

令和4年度数值予報解説資料集

(数值予報課)

令和5年1月
January 2023

気象庁情報基盤部

はじめに

数値予報解説資料集（以下、資料集という）は、それまでに数値予報課にて刊行していた数値予報研修テキストを改めて令和2年度より刊行を開始した。構成を「基礎編」「応用編」「事例解析編」「資料編」とし、数値予報に関する基礎知識から応用知識までを体系的に理解する助けとなることを目指すとともに、最新の数値予報システムの改良の概要及びその予測特性などを実事例によって理解する助けとなることを目指している。

令和2年10月には気象庁の組織改編が行われ、予測対象等によって部署ごとに分かれていた数値予報技術開発部門が、茨城県つくば市に設置された数値予報開発センターに集約された。資料集が扱う数値予報システムについても、組織改編に合わせて順次拡充することとした。この度、令和4年度の刊行にて、数値予報開発センターで開発されるモデル、プロダクトを系統的に解説できるものとなった。

令和4年度の資料集では、「基礎編」として数値予報の流れに沿って観測データと品質管理、データ同化、数値予報モデル（大気、海洋、大気海洋結合、物質循環）、ガイダンス、アンサンブル予報の概要を解説し、気象庁の現業数値予報システムとして運用する、解析、モデル及びアンサンブル予報システムに関する解説を行う。また、プロダクト利用上の留意点も解説する。「応用編」では令和3年度後半から令和4年度前半までに実施した数値予報システムの改良として、全球アンサンブル予報システムの改良（令和4年3月）、メソ数値予報システムの改良（令和4年3月及び6月）、局地数値予報システムの改良（令和4年3月）、観測データ利用法の改良（令和3年10月から令和4年9月）、季節アンサンブル予報システムの改良（令和4年2月）、長期再解析 JRA-3Q、日本域台風時高潮確率予報システムの運用開始（令和4年9月）、ガイダンスの改良（大雨発生確率ガイダンス（令和4年6月））を取り上げた。なお、線状降水帯の予測精度向上のため、水蒸気観測データの利用に向けた開発を現在進めており、現時点の開発状況についても解説する。「事例解析編」では、令和3年後半から令和4年の顕著事例として、令和4年1月の大雪、令和4年7月、8月、9月の豪雨及び令和4年の台風（台風第11号）を取り上げ解説した。数値予報システムやガイダンスの概要一覧、プロダクトの送信時刻等の詳細は「資料編」にまとめている。

数値予報システムは長年の開発により着実な精度向上を果たしてきた。一方、防災及び社会経済活動に資する観点ではさらなる精度向上が求められており、今後も着実に開発を進めて一步一步数値予報の改善を行っていく必要がある。その結果として新たな手法が取り入れるなどにより、数値予報プロダクトの特性も変わることとなる。本資料集がプロダクトの利用者にとって、最新の数値予報技術や数値予報プロダクトの特性について理解を深める助けとなり、適切な利用のために有効に活用されることを期待している。

数値予報開発センターにおいては、研究者との開発連携の一助となるよう、数値予報開発センター年報を作成し、開発計画や開発の進捗を報告している。研究者向けでやや難解ではあるが、数値予報システムのより詳細を知りたい方は本資料集と合わせてご覧いただければ幸いである。

* 気象庁 情報基盤部 数値予報課長 石田 純一

数値予報解説資料集

目次

はじめに

第1章 基礎編	1
1.1 概要	1
1.2 観測データと品質管理	13
1.3 データ同化	29
1.4 数値予報モデル	39
1.4.1 大気モデル	40
1.4.2 海洋モデル	56
1.4.3 大気海洋結合モデル	67
1.4.4 物質輸送モデル	73
1.5 アンサンブル予報	78
1.6 ガイダンス	90
1.7 気象庁の現業数値予報システム	98
1.7.1 全球解析	105
1.7.2 全球モデル	113
1.7.3 全球アンサンブル予報システム	119
1.7.4 メソ解析	123
1.7.5 メソモデル	129
1.7.6 メソアンサンブル予報システム	137
1.7.7 局地解析	143
1.7.8 局地モデル	149
1.7.9 毎時大気解析	154
1.7.10 季節アンサンブル予報システム	159
1.7.11 長期再解析	169
1.7.12 波浪モデル（全球・沿岸）	174
1.7.13 波浪アンサンブル予報システム	186
1.7.14 日本域高潮モデル	189
1.7.15 日本沿岸海況監視予測システム	198
1.7.16 エーロゾルモデル	210
1.7.17 化学輸送モデル（全球・領域）	215
1.7.18 二酸化炭素輸送モデル	222
1.8 プロダクト利用上の留意点	228
1.8.1 数値予報の留意点	229
1.8.2 ガイダンスの留意点	251
第2章 応用編	267
2.1 全球アンサンブル予報システムの改良	267
2.2 メソ数値予報システムの改良	277
2.3 局地数値予報システムの改良	289
2.4 観測データ利用法の改良	299
2.5 季節アンサンブル予報システムの改良	333
2.6 長期再解析 JRA-3Q	347
2.7 日本域台風時高潮確率予報システムの運用開始	353

2.8	ガイダンスの改良	357
第3章	事例解析編	362
3.1	令和4年1月の大雪事例の数値予報の結果	362
3.2	令和4年7月の豪雨事例の数値予報の結果	390
3.3	令和4年8月の豪雨事例の数値予報の結果	426
3.4	令和4年9月の豪雨事例の数値予報の結果	446
3.5	令和4年の台風の数値予報の結果	468
第4章	資料編	485
4.1	数値予報システムの概要一覧表	485
4.2	ガイダンスの概要一覧表	503
4.3	プロダクトの送信時刻	516
4.4	最近の改善のまとめ	518
4.5	プロダクトの物理量の算出手法	520
4.6	プロダクトに関する参考情報	522
4.7	表記と統計的検証に用いる代表的な指標	523

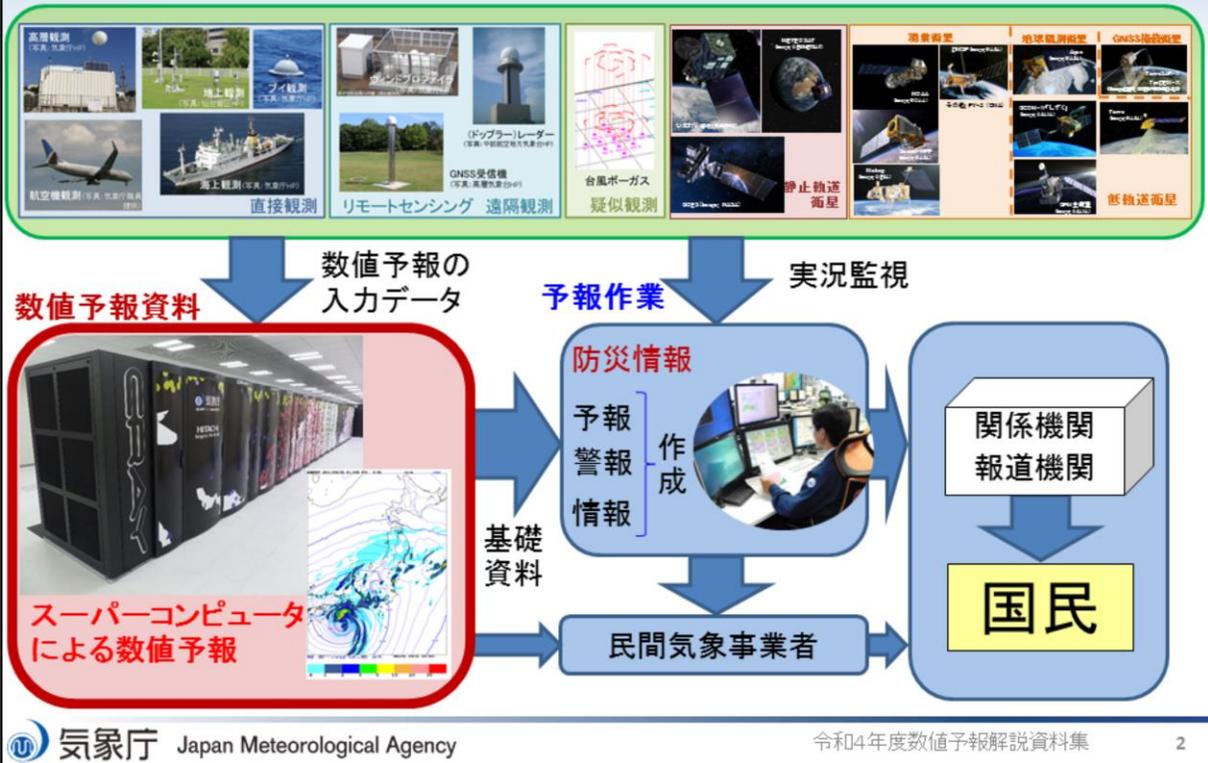


第1章 基礎編

1.1 概要

気象予報業務における数値予報の役割

観測資料



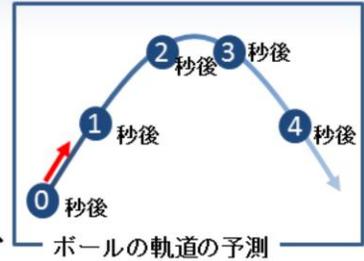
本節では、今日の天気予報の基盤技術となっている数値予報の基礎知識について、本田・室井(2018)を基に最近の更新を反映して、その概要を解説する。

風や気温などの大気状態や降水などの現象を把握するために、スライドにあるように直接観測や衛星観測などの様々な手段を用いて気象観測が行われている。観測・通報されたデータはリアルタイムの実況監視に利用されるほか、数値予報の入力データとして利用されている。数値予報では、現在の大気状態から未来の大気状態を予測し、気温や風、降水などについての各種数値予報資料を作成する。数値予報の一連の処理はスーパーコンピュータにより高速かつ確実に実行される。

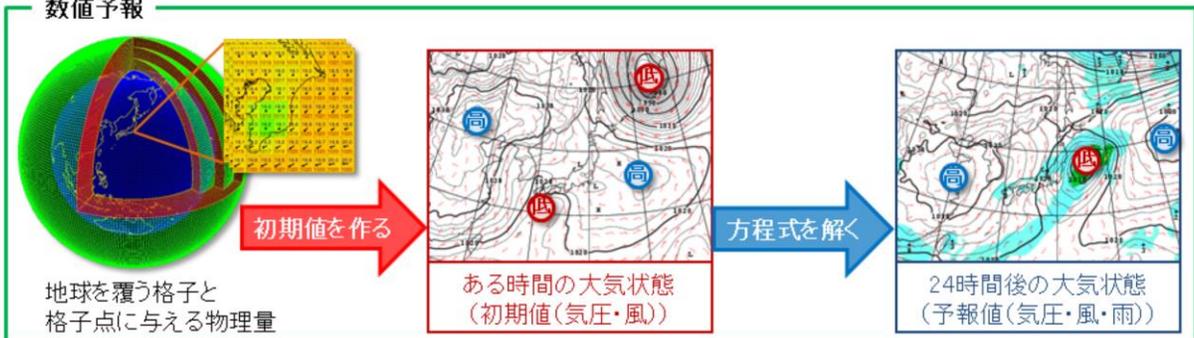
数値予報資料は天気予報、注意報・警報や気象情報などの防災情報を作成する際の基礎資料として利用され、防災情報は関係機関や報道機関を通じて国民に提供される。現代の天気予報や防災情報の作成作業に数値予報資料は必要不可欠であり、数値予報は予報業務における重要な基盤技術となっている。また数値予報資料は民間気象事業者にも提供されていて、様々な形で利活用されている。

数値予報とは

- 大気現象を支配する方程式をコンピュータ(計算機)で解くことで、未来の大気状態を予測すること。
- 数値予報の基本的な考え方
 - ボールの軌道の予測と原理は同じ。
(最初のボールの位置や速度、ボールに加わる力が分かればボールの軌道が予測できる)
 - 数値予報では、現在の大気状態を計算機上に作り、方程式を解いて未来の大気状態を予測する。



数値予報



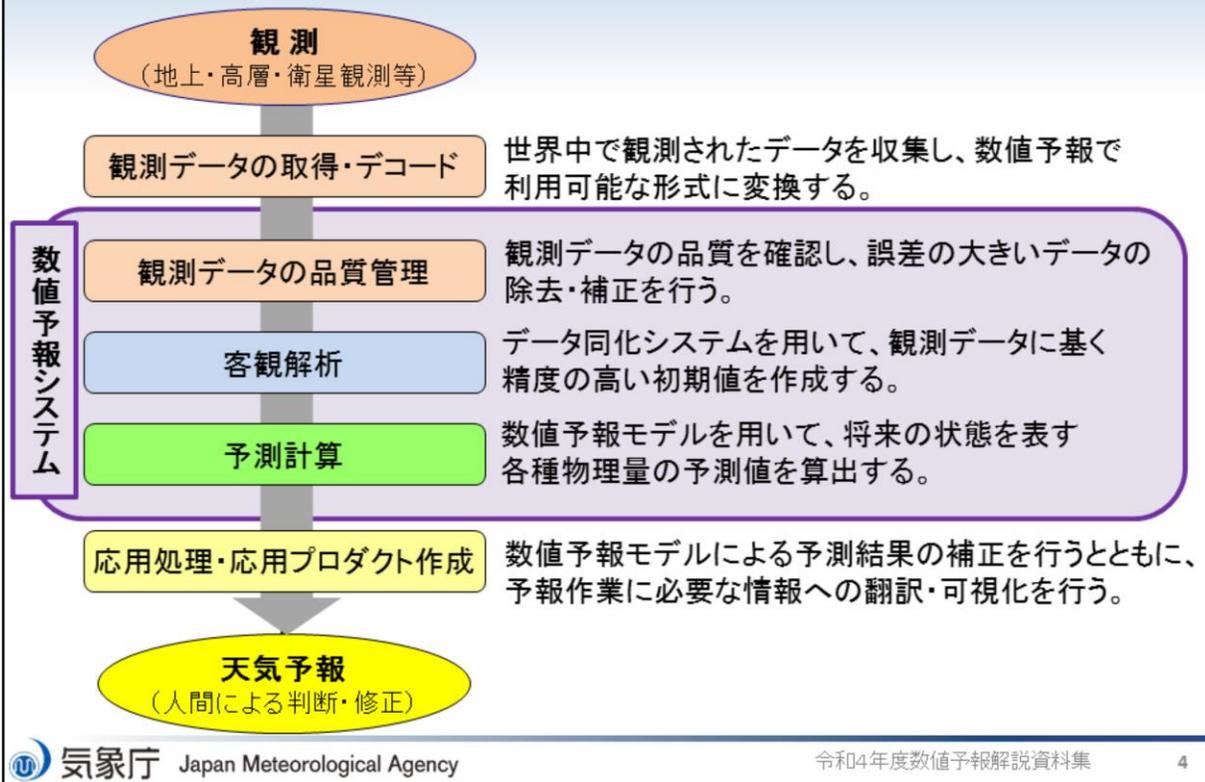
数値予報とは計算機を用いて地球大気の数値シミュレーションを行い、ある時点の大気状態から未来の大気状態を予測することを指す。

空中に投げたボールの軌道の予測を例にとると、最初の状態(位置と速度)とボールに加わる力(重力や空気抵抗)が分かれば、支配方程式(ニュートンの運動方程式)を計算機で解いて1秒後のボールの状態が予測できる。1秒後のボールの状態が分かれば2秒後のボールの状態が予測でき、これを繰り返すことで地面に落ちるまでのボールの位置や速度を予測し続けることができる。ボールの軌道の予測と比べて大気現象を支配する方程式や実際のシミュレーションは複雑だが、数値予報でも基本的な考え方は同じである。

計算機では離散的な値しか取り扱うことができないため、数値予報を実行するには現実の連続した地球大気を細かい格子で分割して、空間を離散化する必要がある。時間についても同様に有限の時間間隔で離散化して取り扱う。格子上の各点には、ある時刻における気象要素(気圧、気温、湿度、風などの物理量)を与えて、計算機上で仮想的に地球大気を再現する。数値予報を開始する時刻における計算機上で再現された地球大気は初期値と呼ばれる。ボールの軌道の予測と同様に方程式を解いて少し先の予測を繰り返すことで、未来の地球大気の状態が予測できる。

スライドには数値予報の初期値と予報値の例を示している。初期値では低気圧が九州南方海上にあって、北日本は三陸沖に中心を持つ高気圧に覆われている。この状態から支配方程式を解いて得られた24時間後の大気状態の予測が右図の予報値である。予報値では九州南方海上にあった低気圧は24時間後には三陸沖に、三陸沖に中心を持つ高気圧は日本のはるか東へと移動し、北日本から東日本の広い範囲で雨が降る予測となっている。

数値予報の流れ



スライドには数値予報のおおまかな流れを示している。

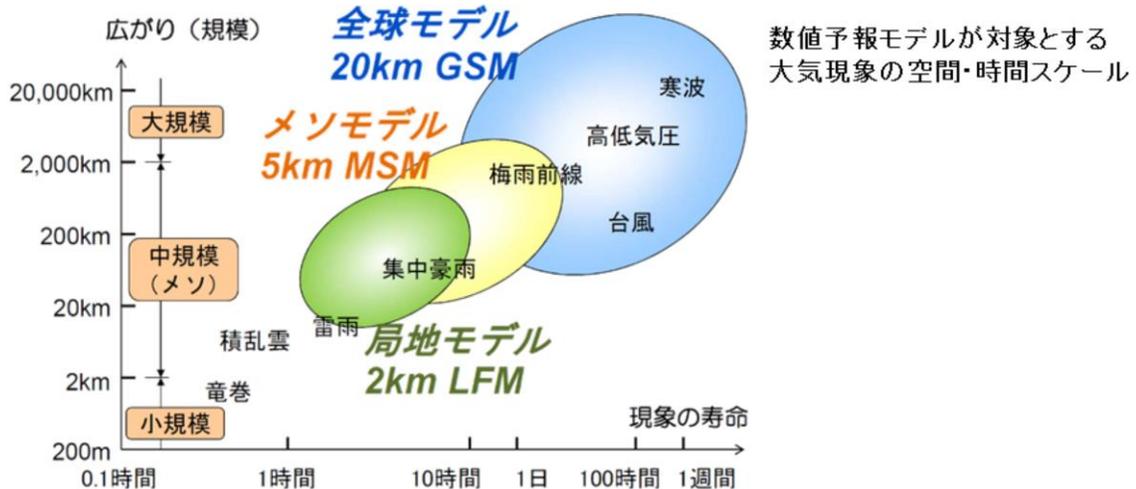
まず、現在の大気の状態を知るために、世界中の観測データを収集し、数値予報で利用可能な形式に変換(デコード)する。観測データには様々な理由で誤差が含まれていて、中には精度が悪く数値予報への利用に適さない観測データも存在するため、収集した観測データの品質を確認し、誤差の大きいデータについてはデータの除去、補正(品質管理)を行う必要がある。次に、品質管理により選別された観測データを利用して数値予報の初期値を作成する。数値予報の初期値を作成する過程を客観解析(データ同化)と呼ぶ。数値予報では初期値の精度が予測精度に及ぼす影響が大きいいため、精度の高い初期値を作成することは非常に重要である。

データ同化により得られた初期値から、数値予報モデルを用いた予測計算を実行することで、未来の大気の状態を表す各種物理量の予測値を算出する。数値予報モデルの実行により得られた予測値は数値の羅列であり、ユーザーが利用しやすい形式に加工する必要がある。この過程を数値予報の応用処理、応用処理で得られる結果を応用プロダクトと呼ぶ。応用プロダクトには、可視化した図形式の資料や、利用しやすい要素への変換、統計的な修正を行った「ガイダンス」と呼ばれる資料があり、これらは天気予報や防災情報作成の際の基礎資料として用いられる。

以上の数値予報の流れのうち、観測データの品質管理から予測計算までを含めた処理を実行するプログラム群を数値予報システムという。

気象に関する数値予報モデル

- 解像度や予報領域、予報時間が異なる複数の気象に関する数値予報モデルを運用。
 - 全球モデル: 地球全体が対象。予報時間は長いが低解像度。
 - 領域モデル: 特定の地域が対象。予報時間は短いが高解像度。
- 予測対象とする現象によって適切に使い分けることが重要。



気象現象には、高気圧や低気圧、台風、梅雨前線などの大規模な現象から、積乱雲や集中豪雨、竜巻などの小規模な現象まで、様々な空間的広がりを持った現象が存在する。この気象現象の空間的な規模(広がり)を空間スケール、寿命(持続時間)を時間スケールと呼ぶ。現象の空間スケールと時間スケールには相関があり、例えば、大規模な現象である台風の寿命は数日から十日程度だが、台風の周辺で発生する個々の積乱雲は小規模な現象でその寿命は30分から1時間程度である。

数値予報モデルが予測対象とする現象の空間・時間スケールは数値予報モデルの解像度に依存し、解像度が高いほど小さい空間・時間スケール(小規模・短寿命)の現象が予測可能となる。図に示すように、高解像度な領域モデルでは全球モデルよりも細かいスケールの現象を予測対象とすることができる。モデルによって予測対象とする現象の時間・空間スケールが異なることやモデルの予測可能限界を理解した上で、現象や用途に合わせてそれぞれの数値予報モデルを適切に利用することが望ましい。

・全球モデル(GSM、全球アンサンブル予報システム)

地球全体を予報領域とした数値予報モデルで、水平格子間隔はGSMが約20km、全球アンサンブル予報システムが約40km。短期予報、週間天気予報、台風予報、防災気象情報、航空気象情報等の作成に利用される。

・メソモデル(MSM、メソアンサンブル予報システム)

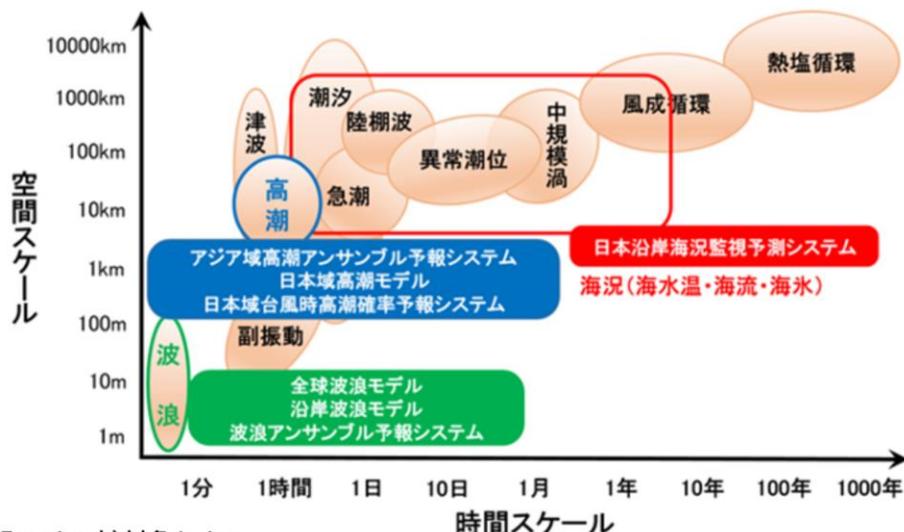
日本周辺を予報領域とした数値予報モデルで、水平格子間隔は5km。短期予報、防災気象情報、航空気象情報、降水短時間予報等の作成に利用される。

・局地モデル(LFM)

日本周辺を予報領域とした数値予報モデルで、水平格子間隔は2km。防災気象情報、航空気象情報、降水短時間予報の作成に利用される。

海洋に関する数値予報モデル

- スケールの異なる海洋現象を予測し災害を軽減するために、予測対象ごとに各種の海洋に関する数値予報モデルを運用。



数値予報モデルが対象とする
海洋現象の空間・時間スケール



気象庁 Japan Meteorological Agency

令和4年度数値予報解説資料集

6

海洋では、図に示されるように、海上の風によって生じる数m～数100mスケールの波浪から、海水温と塩分による密度差で駆動される地球規模の熱塩循環まで、様々なスケールの現象が起きている。気象庁では、予測対象ごとに「波浪モデル」、「高潮モデル」、「海況モデル」といった各種の海洋に関する数値予報モデルを運用している。

- ・波浪モデル(全球波浪モデル、沿岸波浪モデル、波浪アンサンブル予報システム)

海上の風の予測値を用いて、海上における波の発達・減衰やうねりの伝播などを予測する。高波時に発表される波浪警報・注意報や、毎日の波浪予報、船舶向けの波浪図などに利用される。

- ・高潮モデル(アジア域高潮アンサンブル予報システム、日本域高潮モデル、日本域台風時高潮確率予報システム)

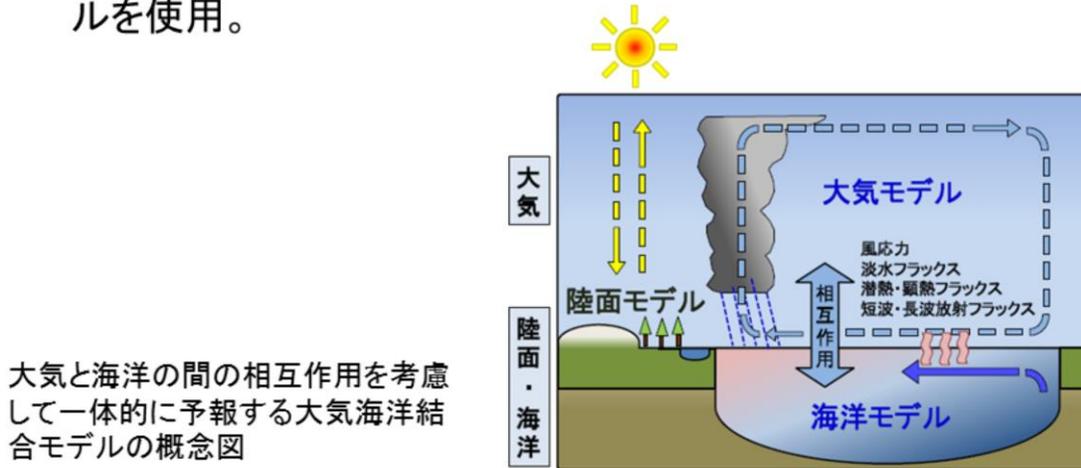
台風の接近時などに海面気圧の変化と海上の風の予測値から潮位の上昇量を予測する。高潮災害が危惧される場合の高潮警報・注意報の発表に利用される。

- ・海況モデル(日本沿岸海況監視予測システム)

黒潮や親潮等の日本周辺の海流や海水温の状態を予測する。海面水温・海流1か月予報の発表、水産業、また他の数値予報モデルとともに船舶の安全運航、海上の警備救難等でも利用される。

大気海洋結合モデル

- 1か月を超える予報では、大気の変動と海洋の変動は互いの影響を強く受ける。
- 季節予報で用いられる季節アンサンブル予報システムには、大気と海洋の変動を一体として予測する大気海洋結合モデルを使用。

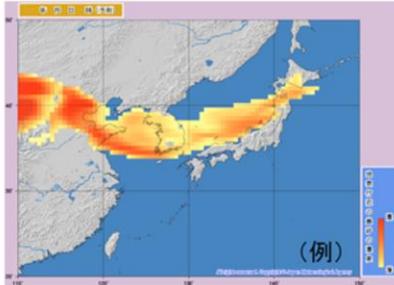


1か月先までの予報では気象に関するモデルが利用されているが、1か月を超える予報では、大気の変動と海洋の変動は互いの影響を強く受けるため、エルニーニョ・ラニーニャ現象等のような海洋の変動も、大気の変動と併せて予報することが必要になる。このため季節予報のためには、大気モデルと海洋モデルを結合し、大気と海洋を一体として予測する大気海洋結合モデルを使用している。

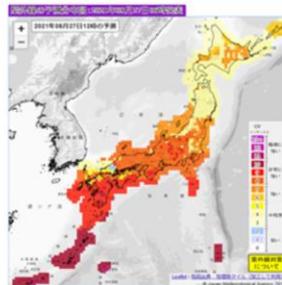
気象庁は、季節アンサンブル予報システムに大気海洋結合モデルを導入し、熱帯海洋変動に関連した大気海洋相互作用の再現性の向上を図っている。

物質輸送に関する数値予報モデル

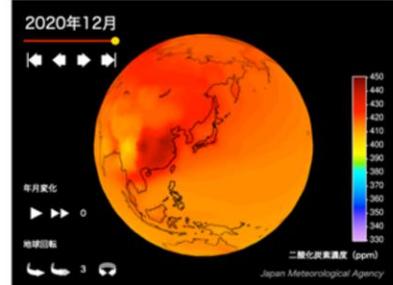
- 地球環境や気候に影響する黄砂、紫外線、二酸化炭素などを、物質輸送モデルを用いて監視・予測。



黄砂解析予測図※



紫外線の予測分布図※



二酸化炭素濃度の球面分布図※

※ 気象庁HPより

物質輸送モデルは大気中のある物質の発生・輸送・消滅過程等をシミュレートして動態を監視・予測する数値予報モデルで、日々の生活に身近な黄砂・紫外線の予測や二酸化炭素濃度の解析に用いられる。

・エアロゾルモデル(全球エアロゾルモデル)

エアロゾルは大気中に漂う数nmから数十 μ mの微粒子で、代表的なエアロゾルとしては黄砂、煙、海塩、PM2.5などがある。大陸などでの黄砂の舞い上がり、風による移動、雨などによる地上への降下を考慮して、大気中の黄砂の量や分布を解析・予測する。黄砂情報の作成に利用される。

・化学輸送モデル(全球化学輸送モデル、領域化学輸送モデル)

オゾンやその変化に関わる物質の風による移動、地上への降下、化学物質や光による反応を通じた変化などを考慮して、上空や地上付近のオゾン濃度を予測する。紫外線情報やスモッグ気象情報の作成に利用される。

・二酸化炭素輸送モデル(二酸化炭素輸送モデル)

二酸化炭素の吸排出量を解析して、それをもとに濃度分布を計算する。世界の大気中の二酸化炭素の分布状況を図示する二酸化炭素分布情報の作成に利用される。

決定論的予報とアンサンブル予報

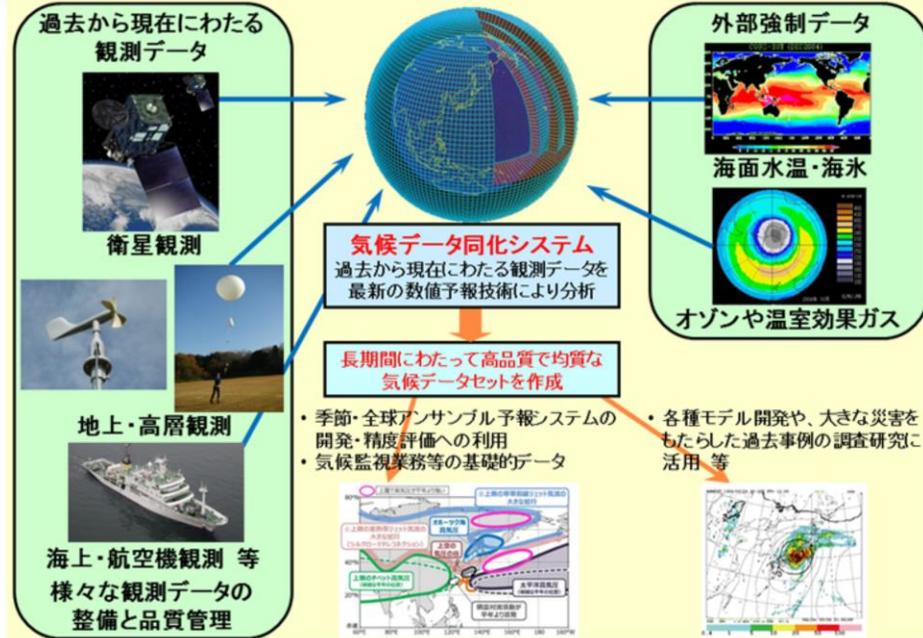
- 数値予報モデルでは、初期値と予報値が一対一対応の関係にある。(初期値が決まれば予報値が決まる)
 - 初期値や境界値、数値予報モデルに含まれる誤差により、予測には必ず誤差が含まれる。
- 決定論的予報
 - データ同化によって得られた解析値を初期値として実行される数値予報。
 - 数値予報の誤差の大きさは、その時々の大気状態で異なるため、一つの決定論的予報の結果で予測の誤差を見積もることはできない。
- アンサンブル予報
 - 予測の誤差を見積もるために、揺らぎを与えた複数の初期値から実行される数値予報。
 - 決定論的予報では知り得ない、予測の誤差や不確実性、信頼性といった情報がアンサンブル予報では得られる。
 - 初期値だけでなく境界値や数値予報モデル自体の不確実性を考慮するアンサンブル予報や、これらを組み合わせたアンサンブル予報もある。

数値予報モデルでは、初期値が与えられれば計算結果である予報値は一意に求まる。このためデータ同化によって得られた解析値を初期値として実行される数値予報を「決定論的予報」と呼ぶ。しかしどれだけ精度良く求めても初期値や境界値には誤差が含まれる。また数値予報モデル自体も、モデル化の際の近似や仮定、あるいは空間・時間の離散化のために予測には必ず誤差が生じる。数値予報では初期値に含まれる僅かな誤差が時間の経過とともに増大するが、この誤差の成長は大気の状態によって大きく左右され、同じ数値予報モデルを用いても、予測に含まれる誤差はその時々の大気の状態によって異なる。そのため、最も尤もらしい解析値のみを初期値として数値予報モデルを実行する決定論的予報では、予測の誤差(不確実性)を事前に知ることはできない。

決定論的予報に対して、予測の誤差を見積もるために、初期値に僅かな揺らぎを与えて行う複数の予測を「アンサンブル予報」と呼ぶ。あるいは境界値や数値予報モデルを置き換え、これらの不確実性を考慮するアンサンブル予報もある。アンサンブル予報では、複数の予報値を利用することで予測の誤差を事前に見積もることができ、予測の信頼性に関する情報を得ることができる。

長期再解析

気象庁長期再解析(JRA)



異常気象の分析を含めた気候の監視や季節予報をよりの確に行うためには、過去の気候もできるだけ正確に把握する必要がある。このため、過去数十年にわたって蓄積した観測データを、最新の数値予報技術により分析する「長期再解析」にて過去の気候データを作成し、気候の監視や季節予報に活用しているほか、国内外の研究活動等で広く利用されている。

長期再解析では、過去から現在にわたって観測データが最新の数値予報技術で解析され、長期間にわたって高品質で均質な気候データセットが準リアルタイムで作成されている。

2006年に約25年間の全球長期再解析を始め、2013年に気象庁は当時の最新技術を用いた約55年間の長期再解析を実施した。2022年現在、最新の技術を用いた新しい長期再解析に移行している。

参考文献

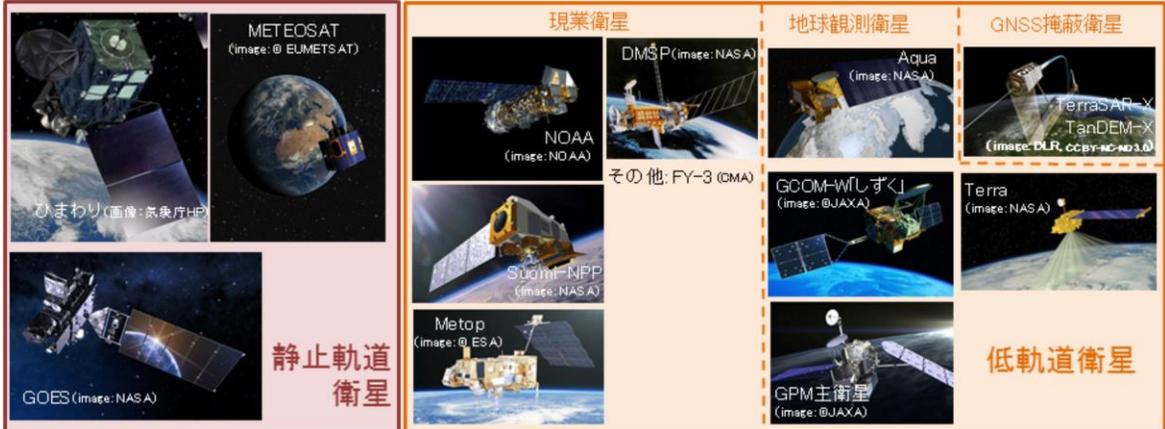
- 本田有機, 室井ちあし, 2018: 概要. 平成30年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 66-71.



第1章 基礎編

1.2 観測データと品質管理

数値予報で利用している観測



数値予報を行うには現実の大気状態を正しく捉えた、各種(気象)観測データが必要である(計盛ほか 2018)。スライドには数値予報で利用している各種観測測器や測器を搭載する衛星などを示している。観測は大きく分けて直接観測、リモートセンシング(遠隔観測)、疑似観測に分類できる。

直接観測では各地の気象台での観測や船舶・漂流ブイ、ラジオゾンデ、商用航空機等が用いられる。

リモートセンシングには地上に設置された測器による地上リモートセンシングと、人工衛星搭載の測器による衛星リモートセンシングがある。地上リモートセンシングではウィンドプロファイラや気象レーダー、GNSS受信機が用いられる。

衛星リモートセンシングに用いられる衛星は静止軌道衛星と低軌道衛星とに大きく分けられ、このうち低軌道衛星には気象機関などが運用する現業衛星のほか、研究機関や宇宙機関が運用する地球観測衛星やGNSS掩蔽衛星がある。

疑似観測は、人間の手による主観解析の結果など、実際の観測で得られたものでない大気に関する情報をデータ同化で利用するために人工的に作成される観測を模したものである。現在、気象庁のデータ同化で疑似観測データとして利用されているのは、台風ポーガスのデータのみである

直接観測

直接観測は、ある場所の大気状態を実際にその場で測る観測。

- 地上観測
 - 官署等、AMeDAS
- 海上観測
 - 船舶、係留ブイ、漂流ブイ
- 航空機観測
 - 民間航空機
- 高層観測
 - ラジオゾンデ
- 高層風観測
 - パイロットバルーン

地表上の観測



上層の観測



直接観測は、ある場所の大気状態を実際にその場で測る観測である。直接観測には各地の気象台などによる地上観測や船舶・漂流ブイによる海上観測、ラジオゾンデによる高層観測、商用航空機などによる航空機観測が含まれる。

地上リモートセンシング

リモートセンシングは離れた場所から電磁波などを用いて間接的に観測を行う手法。

- ウィンドプロファイラ

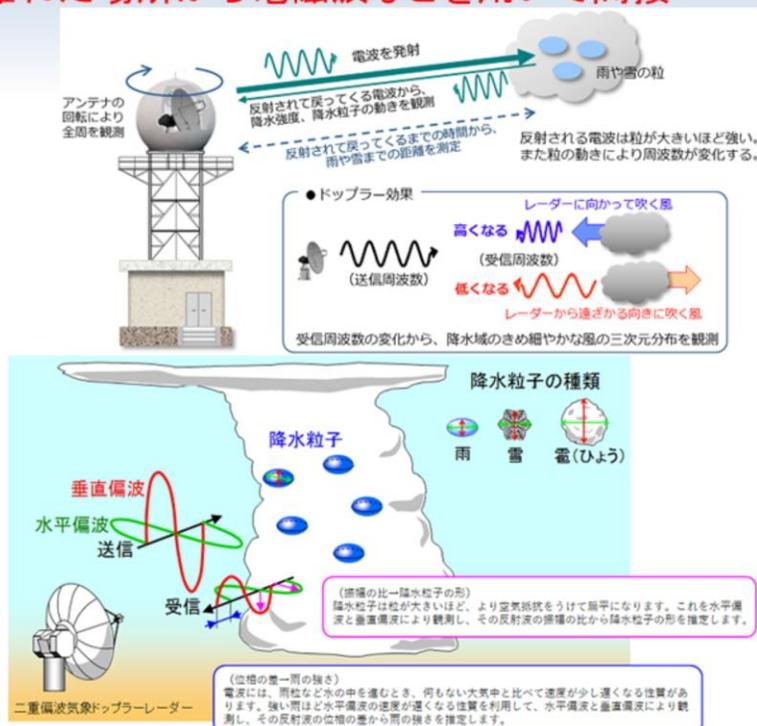
- 気象レーダー

- ドップラー速度
- 反射強度
- 解析雨量

注:解析雨量作成では雨量計等の直接観測データによる補正が行われており、純粋なりモートセンシングではない。

- 地上(船舶)GNSS観測

- 天頂遅延量
- 可降水量



リモートセンシングは離れた場所から電磁波などを用いて、間接的に観測を行う手法である。リモートセンシングには地上に設置された測器による地上リモートセンシングと、人工衛星搭載の測器による衛星リモートセンシングがある。

地上リモートセンシングでは気象レーダーやウィンドプロファイラ、地上GNSSなどを用いて観測を行う。

気象レーダーはアンテナを回転させながら電波(マイクロ波)を放射し、半径数百kmの広範囲内に存在する雨や雪を観測するものである。放射した電波が戻ってくるまでの時間から雨や雪までの距離を測り、戻ってきた電波(レーダーエコー)の強さから雨や雪の強さを観測する。また、戻ってきた電波の周波数の差(ドップラー効果)を利用して、雨や雪の動きすなわち降水域の風を観測することができる。さらに、令和2年3月から二重偏波気象ドップラーレーダーの導入を開始した。二重偏波気象ドップラーレーダーは、水平方向と垂直方向に振動する電波(それぞれ水平偏波、垂直偏波という。)を用いることで、雲の中の降水粒子の種類判別や降水の強さをより正確に推定することが可能となった。この他、レーダーで観測された雨の強さをアメダスや他機関の雨量計による観測で補正したものとして解析雨量がある。ただし、解析雨量はその作成において雨量計等の直接観測データによる補正が行われているため、純粋なりモートセンシングによる観測データではない。

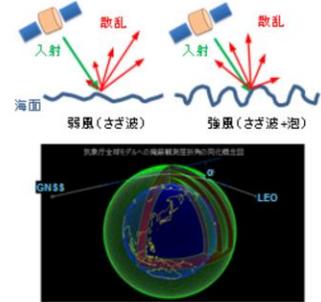
ウィンドプロファイラは地上から上空に電波を放射し、上層大気屈折率の乱れによって生じる送信波と反射波の周波数の差を利用して、上空の風向・風速を観測する。

地上(船舶)GNSSは複数のGNSS衛星から発信された電波を地上または船舶上のGNSS受信機で受信した際の受信時間の遅れ(伝播遅延)を利用する。受信時間の遅れは主に電波が通過した大気中の水蒸気量に起因するため、複数のGNSS衛星を用いて受信機が設置された場所の天頂大気遅延量や鉛直積算水蒸気量(可降水量)を求めることができる。

衛星観測（衛星リモートセンシング）

※赤字は初期値・境界値作成で利用中のもの

- 地球からの電磁波（可視、赤外、マイクロ波）観測
 - イメージャ（輝度温度or反射率）
 - →（雲や大気パターンを追跡して）大気追跡風（AMV）
 - →水蒸気量、降水量、海面水温、土壤水分、積雪域、等
 - サウンダ（複数周波数の輝度温度）
 - →気温・水蒸気鉛直プロファイル
- 複数の角度からマイクロ波を発射、その後方散乱を観測
 - マイクロ波散乱計（散乱断面積）
 - →海上風、土壤水分
- GNSS衛星からの電磁波の大気による遅延
 - GNSS掩蔽観測（遅延量）
 - →屈折角、屈折率、気温・水蒸気プロファイル
- その他
 - 降水レーダー、雲レーダー、雲・エアロゾルライダー、など



衛星リモートセンシングでは地球（地表や雲）から射出され大気の影響を受けた放射を用いて、多種多様な観測が行われている。

イメージャやサウンダは地球からの電磁波を観測する。イメージャは高水平分解能で水平的なデータを得ることができる。輝度温度だけではなく、例えば雲パターンを追跡することで大気中の風も推定できる。サウンダはイメージャと比べて水平分解能は低いですが、複数周波数を利用することで鉛直的な情報を得ることができる。

マイクロ波散乱計は複数の角度からマイクロ波を発射し、その後方散乱を観測することで海上風等を観測する。

GNSS掩蔽観測ではGNSS衛星からの電波を低軌道衛星で受信することによって、気温や水蒸気の鉛直分布に関する情報を全球的に得ることができる。

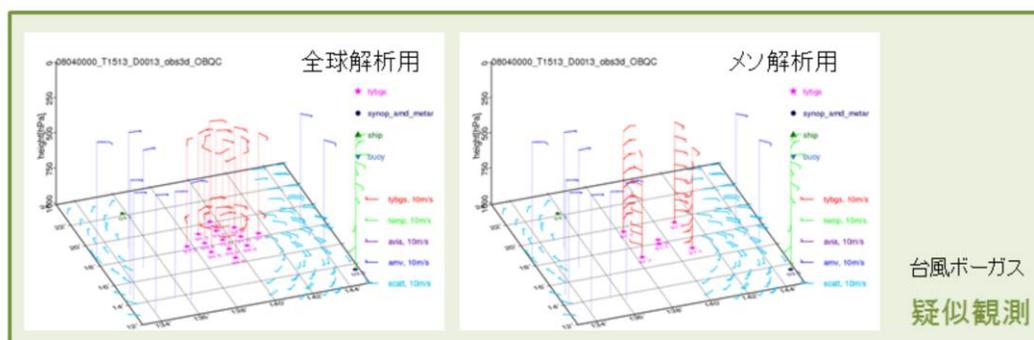
疑似観測

疑似観測は人工的に作成される疑似的な観測データ。

実際に観測で得られたものでない大気に関する情報をデータ同化で利用するために作成される。疑似観測は**ボーガスデータ**と呼ばれる。

bogus・・・偽の

- 台風ボーガス
 - 気象庁の現業作業により解析される台風に関する情報（中心位置(緯度・経度)、中心気圧、15m/s半径など)を基に作成する。
 - 非対象構造は第一推定値(1.3章参照)から抽出する。



疑似観測は人間の手による主観解析の結果など、実際に観測で得られたものでない大気に関する情報をデータ同化で利用するために、人工的に作成される観測を模したものである。現在、気象庁のデータ同化で疑似観測データとして利用されているのは、台風ボーガスのデータのみである。台風ボーガスは気象庁で解析される熱帯低気圧(TC)の情報(中心位置、中心気圧、強風半径)をデータ同化で利用するための手法(もしくはそのデータ)である。台風が多く発生する日本の南の海上では観測データが少ないため、台風ボーガスは利用されている。

ボーガスの作成は理想的な概念モデルに前述のTCに関する情報を適用して軸対称を仮定したTC構造を推定し、これに数値予報で得られる非軸対称構造の情報を加えて、TC周辺の気圧や風の3次元分布を算出する。この中からいくつかの地点のデータを抽出し、抽出データを観測データの形式に変換する。

各種観測データの長所・短所

直接観測

- 高品質のデータが得られる
- × 時間・空間分解能が限定的、分布に限りがある

地上リモートセンシング

- 時間分解能が高い、空間一様性が高い
- × 必要な物理量への変換に工夫が必要

衛星観測(衛星リモートセンシング)

- 広域に均質な観測データが周期的・定常的に得られる
- × 必要な物理量への変換、入電時間、衛星の寿命

疑似観測(台風ポーガス)

- 観測データの乏しい海洋上に存在する台風周辺域で利用可能
- × (典型的な台風構造を仮定しているため) 個々の台風に適していない場合がある

直接観測	地上観測
	地上自動観測
	海上観測
	航空機観測
	高層観測
地上リモートセンシング	ウインドプロファイラ
	ドップラーレーダー
	解析雨量
	地上GNSS
	船舶GNSS
疑似観測	台風ポーガス
静止軌道衛星	大気追跡風
	晴天放射輝度温度
低軌道衛星	極域大気追跡風
	マイクロ波サウンダ
	赤外サウンダ
	マイクロ波イメージャ
	マイクロ波散乱計
	GNSS掩蔽観測
	衛星搭載レーダー
合成衛星画像	LEO GEO大気追跡風

ここでは各種観測データの長所と短所を見ていく。

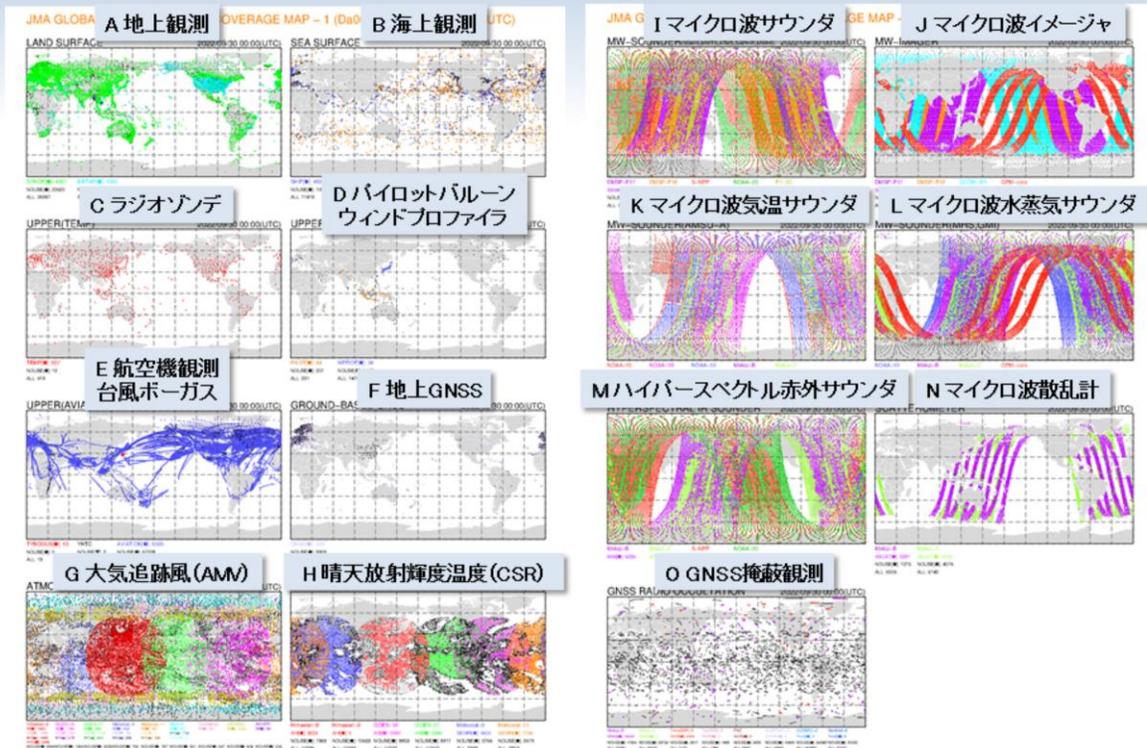
直接観測データは一般に空間分解能に限られ、時間分解能に制約があるものもあるが、高品質でリモートセンシングデータの校正に使われるなど観測データとして貴重である。

地上リモートセンシングは必要な物理量への変換に工夫が必要だが、時間分解能が高く空間一様性が高いという利点がある。

衛星リモートセンシングには地上リモートセンシングの欠点に加え、後述するようにデータの入電に時間がかかるという欠点があるが、時間・空間分解能が高いという利点がある。

疑似観測(台風ポーガス)は典型的な台風構造を仮定しているため個々の台風に適していない場合があるが、観測データの乏しい海洋上に存在する台風周辺域で利用ができるという利点がある。

観測データの水平分布



スライドには2022年9月30日00UTCの前後3時間に観測された観測データの水平分布を示している。それぞれの図でカラーで表示されたデータは実際に全球サイクル解析で利用されたデータを示し、黒は利用されなかったデータを示している。

A)は地上観測で、陸上に密に分布しているが、砂漠や高緯度の雪氷域などでは観測密度が低い。B)は海上観測で、海洋上に広く分布しており、特に北大西洋で観測密度が高い。C)はラジオゾンデによる高層観測で、上空の気温、風、湿度データが得られるが、ほとんどが陸上に分布している。またアフリカでは非常に数が少ない。なお、海洋上では気象観測船や洋上プラットフォームなどによって観測が実施されている。D)はパイロットバルーン(測風気球、橙)やウィンドプロファイラ(青)で得られる上空の風観測である。E)は航空機による観測(青)や台風ポーガス(赤)の分布を示している。航空機観測は全世界から広く得られる。ただし、観測高度は限定的であり、その多くは航空機の巡航高度である10,000 m付近の観測である。F)は地上GNSSデータで、陸上に分布している。

G)～O)は衛星リモートセンシングデータで、色によりその測器を搭載する衛星を区別している。G)～O)の衛星リモートセンシングデータはA)～F)の直接観測や地上リモートセンシングデータと比べて面的にデータが分布しており、さらに水平分解能も高いことが見てとれる。O)はGNSS掩蔽観測で、まばらだが全球に比較的均質にデータが分布している。

G)は大気追跡風(AMV)のデータ分布。H)は静止軌道衛星による晴天放射輝度温度(CSR)のデータ分布で、上空の晴天域のみにデータは限られる。I)はマイクロ波サウンダのデータ分布。J)はマイクロ波イメージャのデータ分布で、海洋上でのみデータを利用している。K)はマイクロ波気温サウンダのデータ分布。L)はマイクロ波水蒸気サウンダのデータ分布。M)はハイパースペクトル赤外サウンダのデータ分布。N)はマイクロ波散乱計による観測のデータ分布で、衛星軌道の左右両側の海上で風向風速のデータが得られる。

観測データの鉛直分布

	種別	地表	全層積算	対流圏下層	対流圏上層	成層圏	中間圏
直接観測	地上・海上	○					
	航空機観測	○		○	○		
	高層観測	○		○	○	○	
地上 リモート センシング	ウインドプロファイラ			○	○		
	気象レーダー			○			
	解析雨量	○					
	地上・船舶GNSS		○				
疑似観測	台風ボーガス	○		○	○		
静止衛星	可視・赤外イメージャ (AMV, CSR)	○		○	○		
低軌道衛星	可視・赤外イメージャ (AMV)	○		○	○		
	マイクロ波サウンダ	○		○	○	○	○
	赤外サウンダ	○		○	○	○	○
	マイクロ波イメージャ	○		○			
	マイクロ波散乱計	○					
	二周波降水レーダー			○	○		
	GNSS掩蔽観測			○	○	○	○

中間圏で観測データが得られるのは衛星搭載サウンダやGNSS掩蔽観測のみ。

衛星データは対流圏下層から対流圏上層(一部中間圏)まで観測データを得られるが、大気下層の観測情報を分離することは難しい。

スライドには各観測の観測対象となる高度を示している。

地上(船舶)GNSSにより鉛直方向に全層積算した水蒸気量が得られるが、水蒸気の分布が対流圏下層が多いため、対流圏下層の影響が大きい。また、晴天放射輝度温度は全層積算量に相当する観測データであるが、ここでは観測波長の特性により感度があるとされる高度を示している。現状、中間圏で観測データが得られるのは衛星搭載サウンダやGNSS掩蔽観測のみである。一方、衛星観測により陸上における大気下層の情報を得るには地表面状態を正確に把握する必要があるため、衛星観測で大気下層の観測情報を分離して得ることは難しい。

数値予報で利用している観測要素

	全球解析	メソ解析	局地解析	毎時大気解析	
直接観測	地上観測	気圧(地上解析のみで利用・気温、風、湿度)		気圧、気温、風、湿度	
	地上自動観測			気温、風	
	海上観測	気圧(地上解析のみで利用・気温、風、湿度)		気圧	
	航空機観測	気温、風			
	高層観測	気圧、気温、風、湿度			
地上リモートセンシング	ウインドプロファイラ	風			
	ドップラーレーダー		ドップラー速度		
			反射強度(※1)		
	解析雨量		降水量		
	地上GNSS(※2)	遅延量	可降水量		
疑似観測	船舶GNSS(※2)		可降水量		
	台風ボーガス	気圧、風			
静止衛星	大気追跡風	風			
	晴天放射輝度温度	放射輝度			
低軌道衛星	極域大気追跡風	風			
	マイクロ波サウンダ	放射輝度			
	赤外サウンダ	放射輝度			
	マイクロ波イメージャ	放射輝度	放射輝度、降水量	放射輝度	
					土壌水分量
	マイクロ波散乱計	風			
					土壌水分量
GNSS掩蔽観測	屈折角	屈折率			
衛星搭載レーダー		反射強度(※1)			
合成衛星画像	LEO GEO(※3)大気追跡風	風			

(※1) 湿度を推定して同化 (※2) GNSSは全球測位システム (※3) LEO GEOは低軌道衛星(LEO)と静止衛星(GEO)の合成プロダクト

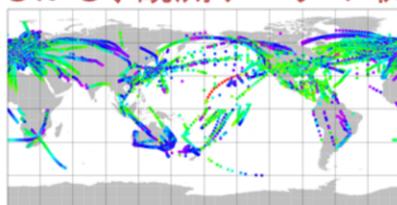
2022年9月現在

スライドでは数値予報で利用している観測要素を示している。

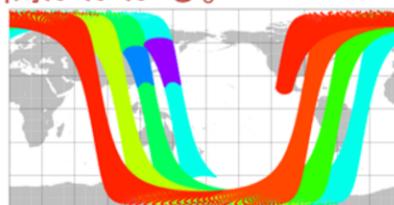
地上観測や海上観測等の直接観測は、気圧、気温、風、湿度など数値予報モデルの予報変数を直接観測するものが多く、地上(船舶)GNSSや衛星観測等のリモートセンシングでは、放射輝度やドップラー速度、反射強度、屈折率など、予報変数ではない物理量を観測するものが多い。

データ打ち切り時間

- 現業数値解析は、リアルタイムシステムである
 - 観測データが増えれば増えるほど、解析精度が向上することが期待できる。
 - **しかし、観測データの取得には時間がかかる。**



-3 -2 -1 0 1 2 3 4 5 6 [h]
同化対象データ(航空機観測)の
解析時刻に対する入電時間分布例



-2 0 2 4 6 [h]
ある衛星の同化対象データの
解析時刻に対する入電時間分布例
(Kasagi/AMSR-E, 2011/03/01 06:00JST)

- **→目的に応じて観測データの待ち受け時間を設定**
 - 速やかな予報のため短い待ち受け時間で解析実行(メソ/局地/全球速報)
 - 精度のよい解析のため待ち受け時間を長く確保して解析実行(気候/全球サイクル)

各種観測データをデータ同化で利用するためには、解析処理開始までにそれらのデータを取得する必要がある。このため、観測データの取得に要する時間は数値予報の運用にとって極めて重要である。スライドには航空機観測と衛星観測の同化対象データの解析時刻に対する入電時間分布を示している。

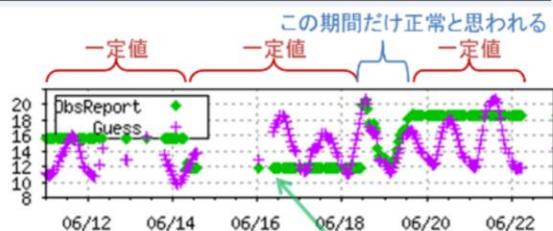
航空機観測は観測時刻が連続的に分布しており、観測後30分以内に多くのデータが入電する。データの入電も連続的にあり、解析時刻の4時間後までには、解析時刻前後3時間のデータのほとんどが入電する。

衛星データについては観測自体は連続的に行われるものの、一定量(例えば地球半周分)のデータを宇宙機関(衛星運用機関)などから一度に取得するため、データ取得分布は連続的にならない。データの取得に要する時間は、一般的には観測後1~3時間程度、遅いものでは5時間程度である。従って、配信の最も遅い解析時刻の3時間後の観測データは解析時刻の8時間後ようやく取得できることになる。このような遅延を補うため、衛星データの中には気象衛星センターに代表される衛星受信局で直接衛星から受信されるデータもある。こうした観測データは、観測後30分以内にはおおむね取得できる。ただし、このようにして衛星から直接得られるのは、受信局周辺の観測データのみに限られる。このため、より迅速に全球的なデータを取得するため、各国の受信局で得られた直接受信データを相互に交換する枠組みがWMOの下で構築されている。

以上の例のように、観測データには取得するのに時間がかかるものがある。観測データが増えれば増えるほど、解析精度が向上することが期待できるが、現業数値予報解析はリアルタイムシステムであるため、迅速性も求められる。そのため、気象庁では速やかな予報のために短いデータ待ち受け時間で行う解析と、精度のよい解析のためデータ待ち受け時間を長く確保して行う解析がある。(詳細は1.3データ同化を参照。)

品質管理(QC)の重要性

誤データの例 船舶からの気温データ



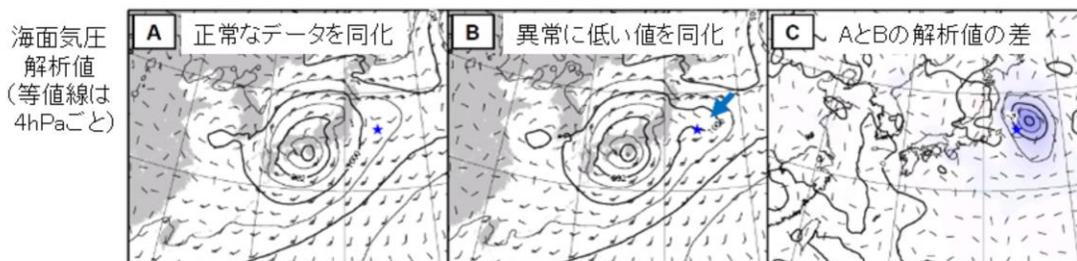
観測データには、誤差が含まれる。測定誤差、代表性誤差、変換誤差など。

誤データの混入は、

- ・予測精度の低下
- ・データ同化処理の異常終了の原因となりうる。

日変化が現れておらず、一定値の通報が続く。

正常な観測データと異常な観測データが同化された時の違いの例



観測データには誤差が含まれる。データ同化で扱う観測誤差として、測定誤差、代表性誤差、変換誤差がある。測定誤差は測器等による誤差で、観測そのものの誤差である(一般に観測誤差と呼ばれるもの)。代表性誤差とは第一推定値の空間的な離散化による誤差である。変換誤差とは格子点値を観測相当量に変換する際に生じる誤差である。これら以外に、人為的なミスや観測測器の故障等、様々な原因により誤データの混入があり得る。そのような異常値データは修正あるいは棄却する必要がある。

スライド左上には船舶からの気温通報値(緑)と、対応する地点における数値予報モデルによる第一推定値(紫)を例として示している。第一推定値が明瞭な日変動を示しているのに対し、通報値はときどき変動がみられるものの一定値が連続しており、明らかに挙動が不自然である。

スライド下部には異常なデータが数値予報のデータ同化に利用された場合の例を示している。(A)は正常な観測データを用いた場合の解析場、(B)は日本の東海上に異常なデータが混入した場合の解析場、(C)は(A)と(B)の差を示している。(B)では日本の東海上に偽の低気圧(矢印)が解析されている様子が見える。この例のように、異常データの混入は予測精度の低下につながる。また、それだけでなく場合によっては、データ同化の処理が異常終了する原因となり得る。このため、異常データはできる限り適切に排除する必要がある。この処理などを実施するのが品質管理(QC: Quality Control)である。

QCにはデータ同化のための前処理として自動的に実施されるリアルタイムQCと、ある一定期間の観測値の振る舞いを監視し、観測データの統計的な問題点などを把握するための非リアルタイムQCの2種類がある。

リアルタイムQC(内的QC)

リアルタイムQCは、データ同化に入力するための観測データの妥当性を判定する前処理で実施される。

リアルタイムQC

内的QC・・・観測データが持つ情報のみを使って行う

外的QC・・・第一推定値や周囲の観測等と比較して行う

チェック種別	チェック内容
ブラックリストチェック	ブラックリストに基づいて、低品質と認識されたデータを棄却
気候学的チェック	気候学的な不自然さについてのチェック
航路チェック	船舶等のデータで不自然な挙動等
要素間整合性チェック	例えば気温と露点温度の関係
鉛直整合性チェック	気温減率の妥当性等

リアルタイムQCはデータ同化に入力するための観測データの妥当性を判定する前処理で実施される。前処理は観測の種類に応じて様々な手法で行われる。このうち直接観測やAMVなどのQCは、以下に述べる内的QCと外的QCの処理が実施される。

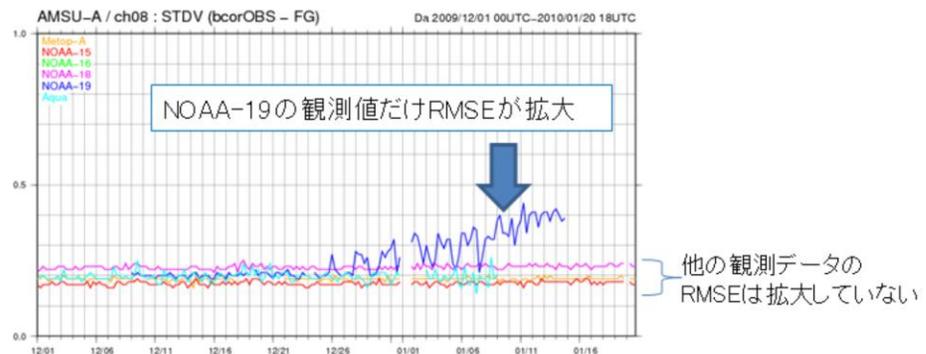
内的QCは観測データが持つ情報のみを使って行うQCであり、以下のような項目がある。

- ・ブラックリストチェック: 後述する非リアルタイムQCの結果に基づいて、品質が悪いと事前に判明しているデータを予め登録したブラックリストに基づいて除去する。
- ・気候学的チェック: 気候学的に妥当な値が報じられているか確認する。値の基準はWMO(1993)に基づいている。
- ・航路チェック: 船舶や航空機などの移動体からの観測通報が適切か確認する。移動速度や角度の確認のほか、船舶では通報位置が海上かどうかも確認する。
- ・要素間整合性チェック: 同時に測定した異なる観測要素間で整合が取れているか確認する。例えば、気温と露点温度が逆転していないか、などである。
- ・鉛直整合性チェック: 高層観測を対象として、鉛直方向にある一連のデータが気象学的に整合しているか確認する。例えば、観測値が一定ではないか(測器が氷結していないか)、気温減率は妥当か、などである。

非リアルタイムQC

- 一定期間の観測値の振る舞いなどを監視
観測データの統計的な問題などを把握
- 必要と判断した場合、リアルタイムQCで用いるブラックリスト上での該当データの登録・解除

例：複数の同種の衛星観測データの
第一推定値に対する二乗平均平方根誤差時系列



➡ 第一推定値ではなく、NOAA-19の観測データの精度が悪化したと判断



非リアルタイムQCは一定期間の観測値の振る舞いなどを監視し、観測データの統計的な問題などを把握するために行われており、この結果に基づきリアルタイムQCで用いるブラックリスト(品質が悪いデータのリスト)の登録・解除などを行っている。アジア地域の地上気象観測データの情報については、モニタリングレポートとしてとりまとめ、観測実施当局である外国気象機関やWMOに周知すると共に、外国数値予報センターとも情報交換し、観測の問題の把握に努めている。なお、このモニタリングレポートは、ウェブ(<http://qc.kishou.go.jp/>)により公開されている。

数値予報課では統計処理や観測値と第一推定値の比較の時系列図などで各種観測データの監視を行っている。また、衛星データに関しては別々の衛星の同様の周波数帯(チャンネル)の輝度温度観測データについて、第一推定値に対する二乗平均平方根誤差(RMSE)やバイアス、入電数の時系列を描画することにより監視を行っている。例として、スライドには複数の同種の衛星観測データの第一推定値に対する二乗平均平方根誤差時系列のグラフを載せている。スライドの図を見ると、NOAA-19以外の衛星のデータは一定の範囲内で変動しているが、NOAA-19だけRMSEが拡大している。これから、第一推定値ではなく、NOAA-19の観測データの精度が悪化したと判断できる。

参考文献

- 計盛正博、本田有機、佐藤芳昭、2018: 観測データと品質管理 平成30年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 72-82.
- WMO, 1993: Guide on the Global Data-Processing System, WMO No.305.

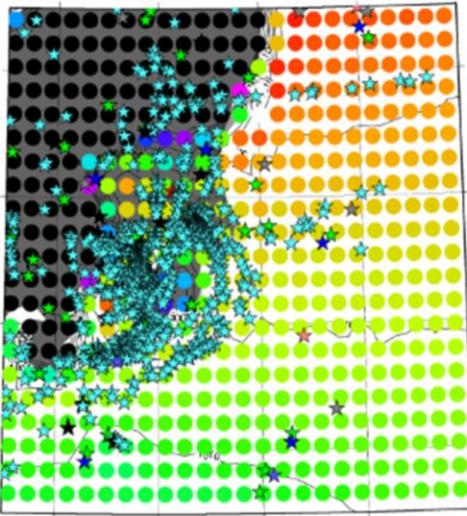


第1章 基礎編

1.3 データ同化

データ同化とは

第一推定値(前回の数値予報の値)と観測値及びそれらの誤差情報をもとに、第一推定値を観測値で修正して解析値(最も確からしい値)を作成する処理



GSMの格子点値(○)と
入電した観測データ(☆)

観測データと第一推定値(数値予報結果)の特徴

	観測値	第一推定値
◎	基本的には現実を反映している	全格子・全要素のデータが利用可能
△	観測誤差を内包	予報誤差を内包
×	全格子・全要素のデータがない	観測値と比べると、現実に沿っているか定かでない

- 第一推定値は全格子点・全要素の情報を持っている。
⇒「たたき台」として利用する。
- 観測値は現実を反映している。
⇒観測値を利用してたたき台を「修正」する。

数値予報モデルを実行するためには、初めに3次元空間の全ての格子点で初期時刻の気温や風、水蒸気量などの大気状態を表す物理量(初期値)を与えなければならない。初期値の精度は数値予報の精度に決定的な意味を持つため、精度の高い初期値を作成することは非常に重要となる(本田ほか 2018)。ここではデータ同化による初期値の作成について簡単に述べる。

表に観測データと第一推定値(前回の数値予報モデルの予報値)の特徴をまとめている。観測データは基本的に現実を反映しているが、利用可能な地点や高度、あるいはデータの種類が限られたものになっている。第一推定値は全ての格子点上で全てのデータを利用できるが、現実に沿ったものとは限らない。このように観測データと第一推定値のメリットとデメリットは互いに相補的になっていて、また観測データと第一推定値はそれぞれ観測誤差、予報誤差を内包している。図はGSMの格子点と実際に入電した観測データの分布を示している。GSMの格子点は3次元空間内に規則正しく並び、これら全ての格子点上で全ての要素のデータが利用できる。一方で観測データの分布はその多くが陸上に集中していて海上では少なく、まばらな分布になっていることが図から読み取れる。

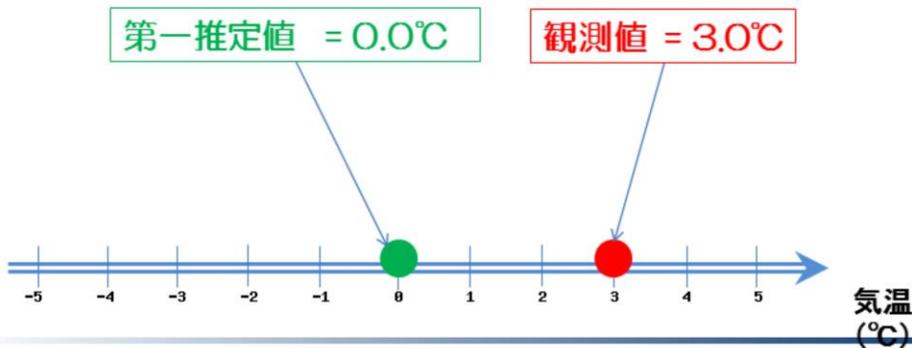
このようにそれぞれメリットとデメリットを持つ観測データと第一推定値をうまく使って、数値予報の初期値を作成する処理をデータ同化、または客観解析と呼ぶ。データ同化では、全格子点上で全要素のデータが利用できる第一推定値を初期値のたたき台として利用し、現実を反映している観測データによってたたき台(第一推定値)を修正することで、精度の良い初期値を作成する。データ同化によって作成された初期値は解析値とも呼ばれ、観測データと第一推定値の双方の利点を活用しつつ、それぞれに内包される観測誤差と予報誤差(背景誤差)も考慮して作成されることから、解析値は最も確からしい値として得られる。

データ同化手法には4次元変分法や3次元変分法、最適内挿法、アンサンブルカルマンフィルタなどがある。

データ同化の例

例) ある場所の気温が 3.0°C と観測された。一方、同じ場所・同じ時刻での第一推定値の気温の予想は、 0.0°C であった。

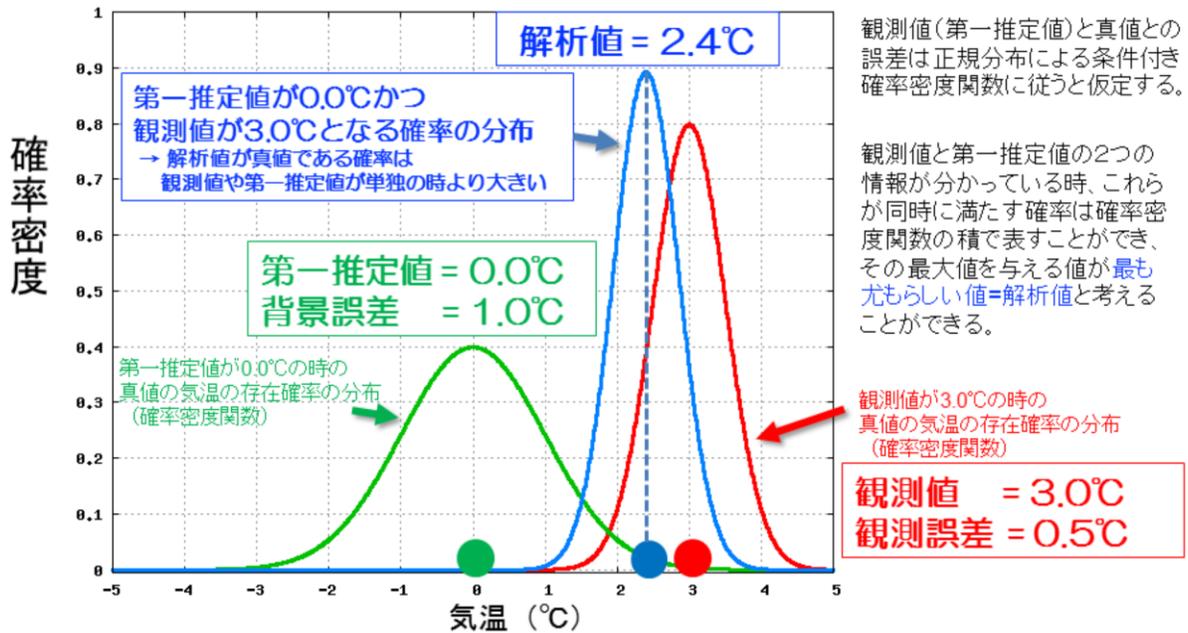
解析値をどのようにして求めるか？



データ同化では、観測値を単純に解析値とするのではなく、観測値と第一推定値の双方に重みをつけて内挿して解析値を求める。解析値が観測値側に寄るかそれとも第一推定値側に寄るかは、データ同化を実行する際にそれぞれの値の持つ誤差の統計的性質として与えられる「観測誤差」と「背景誤差」(第一推定値の誤差)の設定によって決まることになる。

簡単な例として、図のように、ある場所の気温が 3.0°C と観測され、同じ場所・同じ時刻での第一推定値の気温の予想は 0.0°C であった場合、解析値をどのように求めるかについて考える。

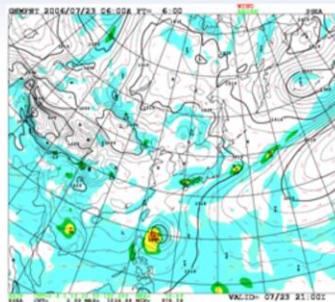
データ同化の例 (最尤推定法)



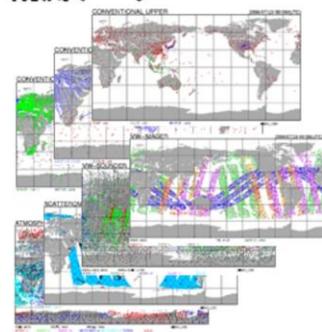
図は、最尤推定法という考え方で解析値を求める場合の例を示す。観測値、第一推定値には、それぞれ統計的な性質として与えられる「観測誤差」、「背景誤差」が存在する。観測値だけが分かっているときには、実際(真値)の気温は、観測値の周りに存在すると考えられ、第一推定値についても同様である。観測値、第一推定値と真値との誤差はそれぞれ正規分布による条件付き確率密度関数に従うと仮定する。確率の分布は観測誤差、背景誤差の大きさに依存し、観測値と第一推定値の2つの情報が分かっている場合、これらが同時に満たす確率は確率密度関数の積で表せる。その最大値を与える値が最も尤もらしい値=解析値と考えることができる。例では、青色の確率密度が最大となる場合の気温は2.4°Cで、この値が解析値となる。このように、観測誤差が背景誤差より小さい場合は解析値は観測データ側に寄り、逆に観測誤差が大きい場合は解析値は第一推定値側に寄ることになる。

データ同化による初期値の作成

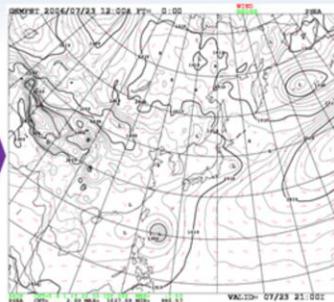
第一推定値



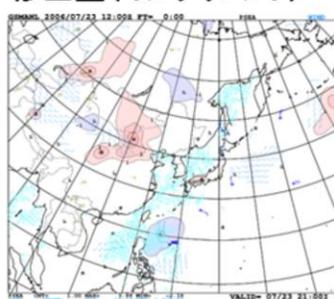
観測データ



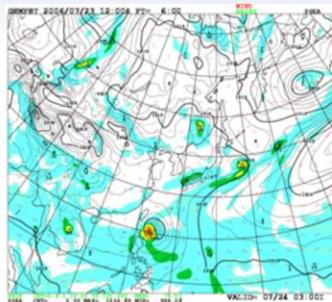
初期値



修正量(インクリメント)



予報値



データ同化(客観解析)

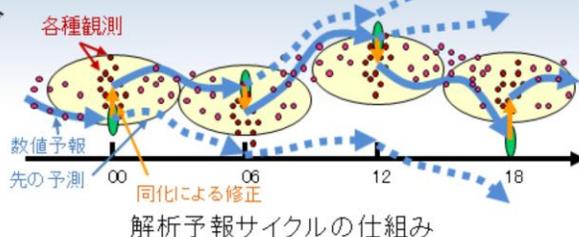
予測計算
(数値予報モデルの実行)

データ同化では、前回の数値予報モデルの予報値である第一推定値を、観測データで修正することによって初期値を作成する。作成された初期値からは数値予報モデルを実行することによって予報値が得られ、次のデータ同化の第一推定値として利用される。データ同化には地上観測や高層観測などによる直接観測のデータや、地上リモートセンシングや衛星観測といった遠隔観測のデータなど、様々な観測データが用いられる。精度の良い初期値を作成するためにはデータ同化に用いる観測データの品質が重要で、異常データが用いられた場合は初期値の精度は著しく悪化する。このためデータ同化には品質管理によって一定の品質を保った観測データのみが利用される。データ同化によって作成された初期値と、たたき台として利用された第一推定値との差は修正量(インクリメント)と呼ばれ、第一推定値が観測データによってどれだけ修正されたかを表している。異常に大きなインクリメントが入っている場合や、逆にインクリメントが全く入っていない場合などは、それぞれ異常データが利用されていることや観測データが利用されていないといったことが考えられ、作成された初期値の精度に注意する必要がある。

解析予報サイクル

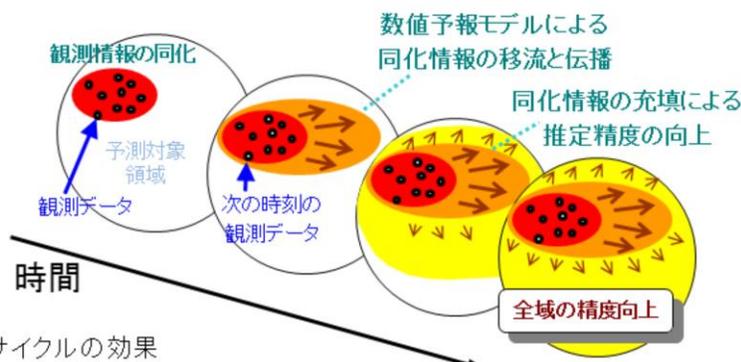
- 数値予報では予測時間が長いほど誤差が増大する。

- 短時間の予測とデータ同化を繰り返して予測精度を保つ。
- 一度で修正できない大きな誤差は次のデータ同化で修正。



- 解析と予測の繰り返しを「解析予報サイクル」と呼ぶ。

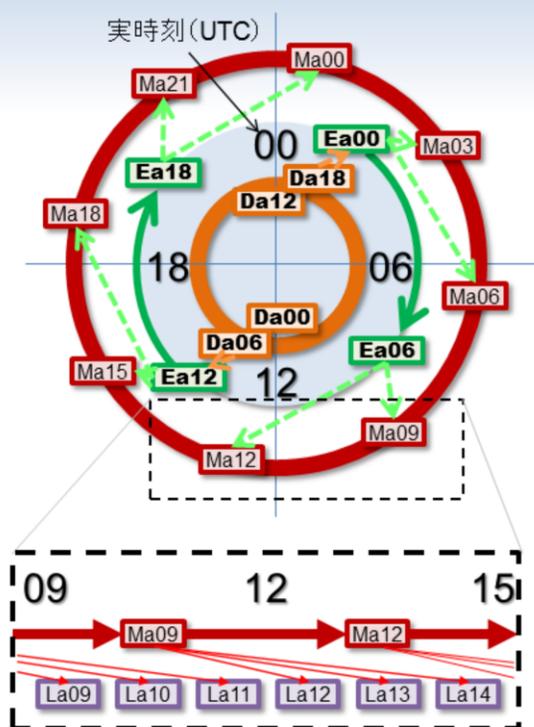
- サイクルを繰り返すことで、海上などの観測が少ない領域でも解析精度の向上が期待できる。



数値予報では、予測時間が長くなるほど誤差が増大するため、予報値は次第に真値（現実の大気状態）から離れていく。そこで短い予測時間の予報値を第一推定値に利用してデータ同化を行うことで真値に近いと期待される初期値を作成し、数値予報モデルを実行して次のデータ同化の第一推定値として利用することを繰り返し、初期値や予報値の精度の保持を図っている。このデータ同化と数値予報の繰り返しを解析予報サイクルと呼ぶ。例えば第一推定値が大きな誤差を持っていて一度のデータ同化で誤差を修正しきれない場合でも、解析予報サイクルでは次のサイクルのデータ同化によって修正され、初期値や予報値の精度が保たれる。特に短期予報や週間予報の範囲では、初期値の精度が数値予報の精度に大きな影響を与えるため、解析予報サイクルによって常に高い精度の初期値を作成することが必要となる。

1つの観測種別のデータは局所的に存在するため、一度のデータ同化では観測が存在する領域の周辺以外では第一推定値が修正されず、データ同化による初期値の改善の影響は限定的である。しかし、データ同化により観測情報が同化された初期値から数値予報モデルを実行し、その予報値を次のデータ同化の第一推定値として利用することで、観測データの影響は数値予報モデルを介して周辺に広がっていく。解析予報サイクルによって予測対象領域全域での精度向上が期待され、このことは初期値や予報値の精度向上において大きな意味を持つ。

解析予報サイクルスケジュール



全球サイクル解析 (Da)

- 一番内側で自己完結したサイクルで精度維持のための解析
- そのため観測データの待ち時間が最も長い

全球速報解析 (Ea)

- 全球予報のための解析
- Ea00,12はDa18,06解析値から第一推定値を作ることで、より高い精度の維持を図っている

メソ解析 (Ma)

- メソ予報のための解析
- 全球解析からはほぼ独立しているものの、側面境界値を全球予報からもらっている

局地解析 (La)

- 局地予報のための解析
- メソ解析・予測値を最初の第一推定値として使っており、サイクルとはなっていない

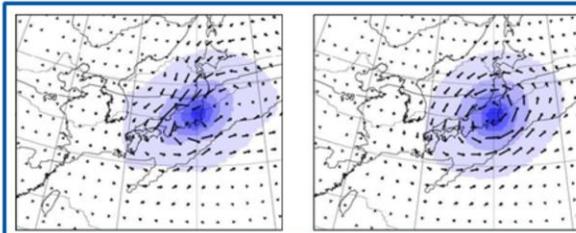
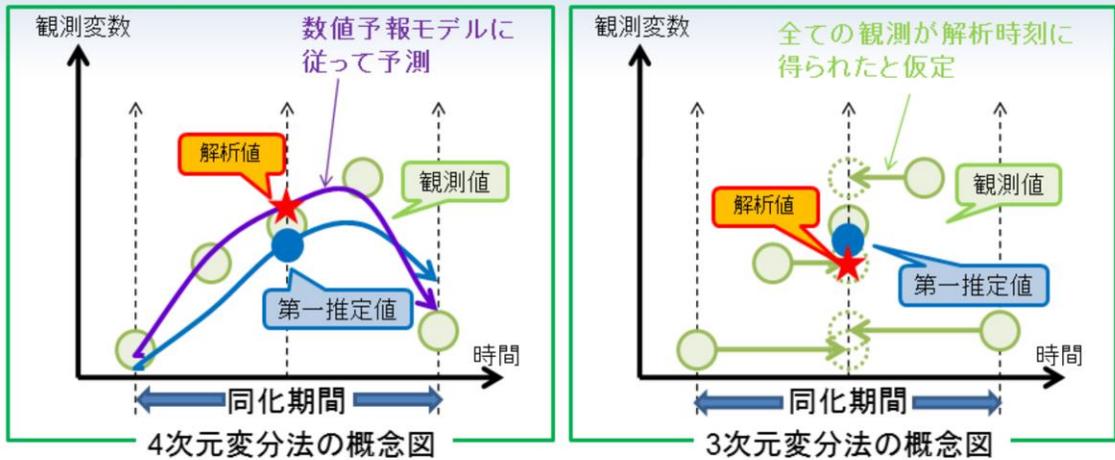
解析予報サイクルと数値予報システムの関係を示す。Daは全球サイクル解析 (Delayed analysis)、Eaは全球速報解析 (Early analysis)、Maはメソ解析 (Meso analysis)、Laは局地解析 (Local analysis) を表し、2桁の数字は解析対象時刻 (UTC) を表す。DaおよびMaの輪は、これらが解析予報サイクルであることを意味し、矢印は第一推定値や側面境界値の提供に関する関係を示している。

DaとEaはともに全球解析であり、それぞれ異なる目的で実行されている。Daは精度を維持するための解析として自己完結したサイクルで、多くの観測データを利用するためにデータ取得打ち切り時間が最も長く、00,12UTCでは11時間50分、06,18UTCでは7時間50分に設定されている。Eaは全球モデル (GSM) を実行するための解析で、数値予報プロダクトを迅速に提供するためにデータ取得打ち切り時間は2時間20分に設定されている。なおEa00,12では、精度を維持するためにそれぞれDa18,06の解析値から第一推定値を作成している。

Maはメソモデル (MSM) を実行するための解析で、データ取得打ち切り時間は50分に設定されている。DaやEaからほぼ独立したサイクルとなっているが、解析を実行するための側面境界値はGSMから提供されている。

Laは局地モデル (LFM) を実行するための解析で、データ取得打ち切り時間は30分に設定されている。解析を実行するための最初の第一推定値はMaやMSMから提供されており、サイクルとはなっていない。

変分法によるデータ同化



4次元変分法(左)と3次元変分法(右)による1点同化の例



ここではデータ同化手法の1つである変分法(4次元変分法と3次元変分法)について簡単に紹介する。4次元変分法は高精度な初期値が必要となる全球解析(門脇 2005; 西嶋・室井 2006)やメソ解析(本田・澤田 2008,2009)で、3次元変分法はより迅速な処理が求められる局地解析(永戸ほか 2012;幾田 2015)で用いられるデータ同化手法である。スライドに4次元変分法と3次元変分法の概念図を示している。変分法では解析時刻の前後に観測されたデータを利用したデータ同化を行う。この同化期間を同化窓(または同化ウィンドウ)と呼ぶ。

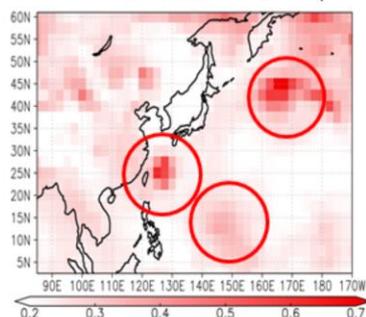
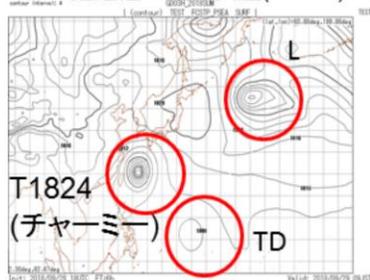
4次元変分法では数値予報モデルを実行することで、同化窓内の各時刻に観測されたデータを大気状態の時間変化を考慮して利用できる(露木 1997,2002)。一方、3次元変分法では数値予報モデルは実行せず、同化窓内の観測データは全て解析時刻に観測されたとして同化を行う。また4次元変分法では数値予報モデルを繰り返し実行して少しずつ第一推定値を修正することで、得られる解析値は力学的にバランスのとれたものになっているが、数値予報モデルを実行しない3次元変分法では必ずしも力学的にバランスのとれた解析値が得られるとは限らない。下の2枚の図は気温の一点観測を4次元変分法と3次元変分法を用いて同化した場合のインクリメント(気温:塗りつぶし、風:矢印)と気温の等値線を示している。4次元変分法では気温の等値線に沿って変形したインクリメントとなっているが、3次元変分法ではインクリメントが等方的になっていることが分かる。

このように4次元変分法は3次元変分法よりも高精度な解析値が得られるデータ同化手法となっている。データ同化手法として変分法以外にも、地上解析や積雪解析、波浪データ同化などに用いられている最適内挿法やアンサンブル予報の初期摂動の作成に利用されるアンサンブルカルマンフィルタなどがある。

ハイブリッド同化

- 基本的な変分法データ同化では、背景誤差として気候学的背景誤差を使用
 - 第一推定値の誤差が流れ(気象場)に依存しない
⇨実際には場に応じて背景誤差(予報の当たり/外れやすさ)は違うはず
- ハイブリッド同化では、気候学的背景誤差に加えてアンサンブル予報から見積もられる予報誤差を利用することで解析精度を向上
 - アンサンブル由来の背景誤差として以下を利用
 - 全球解析: LETKF(局所アンサンブル変換カルマンフィルタ)による予報摂動
 - 局地解析: メソアンサンブル予報システムによる予報摂動

第一推定値の地上気圧(FT=6h) LETKFによる地上気圧のばらつき(FT=6h)



全球解析の例

- 擾乱周辺でばらつき大(流れに依存する誤差)
- この情報を4次元変分法の中で利用

データ同化では、観測値を単純に解析値とするのではなく、観測値と第一推定値の双方に重みをつけて内挿して解析値を求めることになる。解析値が観測値側に寄るかそれとも第一推定値側に寄るかは、データ同化を実行する際にそれぞれの値の持つ誤差の統計的性質として与えられる「観測誤差」と「背景誤差」(第一推定値の誤差)の設定によって決まることになる。観測誤差が背景誤差より小さい場合は解析値は観測データ側に寄り、逆に観測誤差が大きい場合は解析値は第一推定値側に寄ることになる。基本的な変分法データ同化では、背景誤差に過去の一定期間のデータから統計的に計算した予測誤差(「気候学的背景誤差」)を用いているため、日々の気象条件に応じた不確実性の違いを正確に表現することができない。そのため、全球解析や局地解析では、変分法で用いる背景誤差について、気候学的に事前に見積った値に加えて図に示すようにアンサンブル予報から見積もられる予報摂動(ばらつき)を利用することで、実際の大気の状態に応じた誤差情報も考慮する手法(ハイブリッド同化)を用いている(数値予報開発センター 2021; 数値予報開発センター 2022)。これにより、観測データの情報をより適切に初期値に反映させることを可能としている。

参考文献

- 幾田泰醇, 2015: 局地解析の更新と改良. 平成27年度 数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 2-8.
- 永戸久喜, 藤田匡, 原旅人, 2012: 局地モデルの本運用. 平成24年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 72-86.
- 門脇隆志, 2005: 全球4次元変分法. 数値予報課報告・別冊第51号, 気象庁予報部, 100-105.
- 数値予報開発センター, 2021: ハイブリッド同化の全球解析への導入. 令和2年度数値予報開発センター年報, 気象庁数値予報開発センター, 18-22
- 数値予報開発センター, 2022: 局地解析へのハイブリッド同化手法の導入. 令和3年度数値予報開発センター年報, 気象庁数値予報開発センター, 102-105
- 露木義, 1997: 変分法によるデータ同化. 数値予報課報告・別冊第43号, 気象庁予報部, 102-165.
- 露木義, 2002: 変分法によるデータ同化の基礎. 数値予報課報告・別冊第48号, 気象庁予報部, 1-16.
- 西嶋信, 室井ちあし, 2006: データ同化システムの概要. 平成18年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 11-13.
- 本田有機, 澤田謙, 2008: 非静力学メソ4次元変分法. 平成20年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 48-52.
- 本田有機, 澤田謙, 2009: 非静力学メソ4次元変分法の現業化. 平成21年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 65-71.
- 本田有機, 藤田匡, 計盛正博, 室井ちあし, 佐藤芳昭, 2018: データ同化. 平成30年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 84-89.



第1章 基礎編

1.4 数値予報モデル



第1章 基礎編

1.4.1 大気モデル

数値予報モデル

ある時刻の大気状態を、物理法則に従って時間発展させて、未来の大気状態を数値解として計算する。

• 物理法則

- 物理量(気温、風、湿度など)の時間変化を表す式
- 各種物理量の関係を表す方程式(状態方程式)など

物理量の時間変化を記述する方程式

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = F \quad \Rightarrow \quad \phi_{t+\Delta t} = \phi_t + F_t \Delta t$$

時間変化率 未来の値 ある時刻の値

• 時間発展

- 計算機上では、各種物理量を時空間方向に離散化
- 時間微分を含む方程式の時間発展を解く

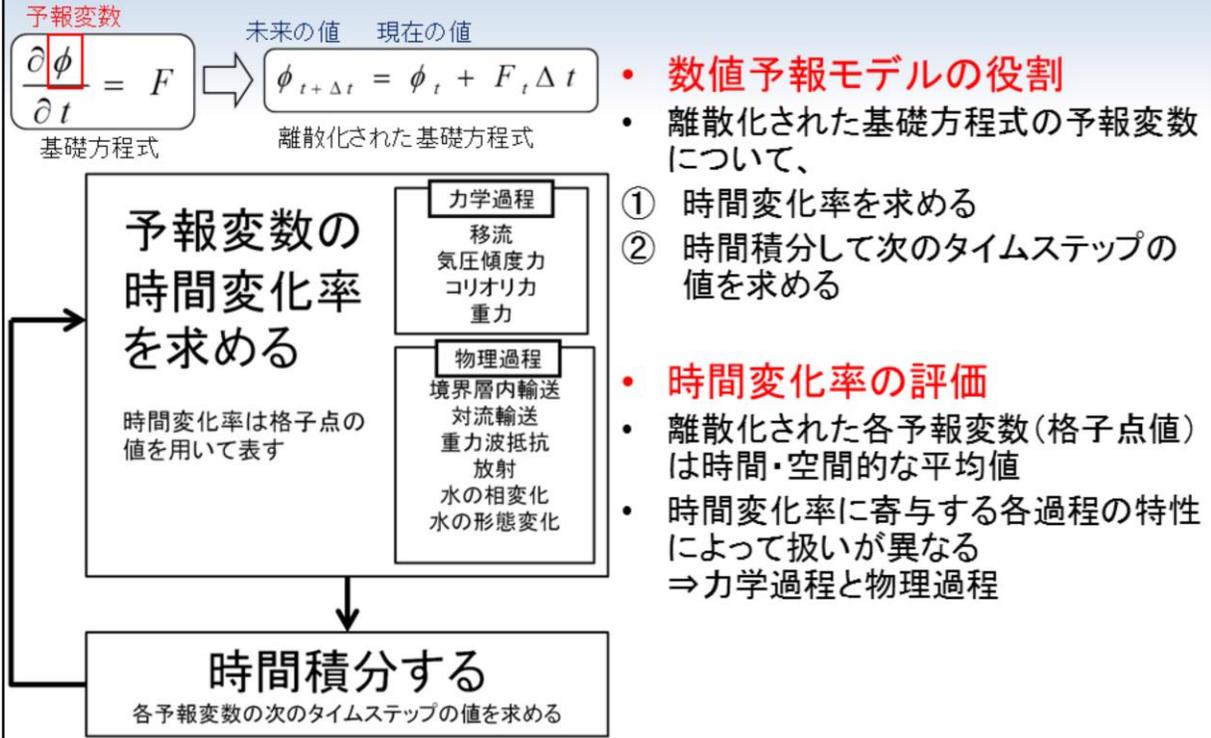


数値予報モデルで扱う主な過程

数値予報モデルは大気現象を支配する物理法則の方程式をコンピュータで解き、未来の値を計算する。この物理法則は複雑な方程式の集まりであり、解析的に答えを求められない。そこで、様々な近似により方程式を簡素化した上で、時間・空間方向においてとびとびの値で表現し、初期状態を与えて、コンピュータで時間積分の計算を行うことで解くことが可能になる。

数値予報モデルにおいて、考慮されている主な過程をスライドの右下に示している。地球大気中には大規模な擾乱からメソスケール擾乱、さらに小さな乱流などのさまざまな時間・空間スケールの現象が存在する。これらを正確に予測するため、数値予報モデルでは、大気の流れを基本として、積乱雲の発生発達、雲と放射の相互作用、境界層の大気の乱れに伴う運動量・熱・水蒸気の輸送など、非常に複雑な過程を取り扱っている。

数値予報モデルによる計算の流れ



基礎方程式は一部を除いて、ある物理量について時間変化率を求めるといった形になっている。したがって、実際の数値予報モデルのプログラムも、物理量毎に時間変化率を求め、それに細かい時間間隔を掛けること(時間積分)によって、未来の物理量を求める、という構造になっている。この物理量を「予報変数」と呼ぶ。なお、予報変数から時間積分を経ずに求められる量を「診断量」と呼ぶことがある。

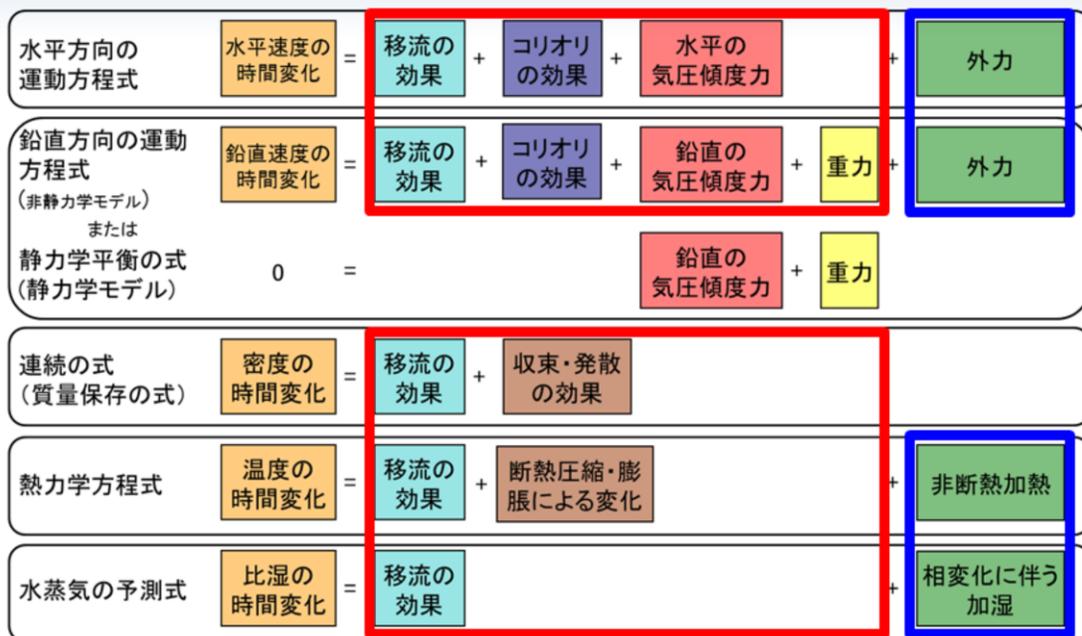
時間変化率を求めるとき、現実の大気のような連続的な分布をコンピュータで取り扱うことが困難なため、「とびとびの値」が連続的な分布を構成していると考えられる(離散化、詳細は後述)。この離散化された値(格子点値)は時間・空間的な平均値を表し、この格子点値を用いて時間変化率を求めるとする。また、時間変化率に寄与する各過程の特性によって扱いが異なるため、時間変化率を求めるときは力学過程と物理過程に分けられる。

「力学過程」(または「力学フレーム」)は数値予報モデルの基礎方程式に含まれる移流や気圧傾度力の時間変化率を求めるとする部分と、実際に時間積分を行うところをあわせた部分を指す。一方、物理過程はそれ以外の外力、非断熱加熱、相変化に伴う加湿の効果などを計算する部分と、それらの計算に必要な大気以外とのやりとりや内部的な変化を考慮する部分などをあわせた部分を指す。

基礎方程式

力学過程

物理過程



その他に状態方程式等

数値予報モデルで用いられる物理法則の基礎方程式を紹介する。

運動方程式は大気の流れ(風)を支配する方程式である。鉛直方向の運動方程式は「静力学平衡」(もしくは「静水圧近似」)を仮定する場合(発達した積乱雲等でなければ、かなりよい精度で成り立つ)、3つ目の式の静力学平衡の式が用いられる。この式は大規模な運動で卓越するふたつの力が釣り合っている状態を示し、鉛直速度の時間変化率を予報する必要がないため、計算量が少なくなるというメリットがある。静力学平衡の仮定をする方程式系を採用した数値予報モデルを「静力学モデル」と呼び、静力学平衡の仮定をしない非静力学方程式系を採用したモデルを「非静力学モデル」と呼ぶ。

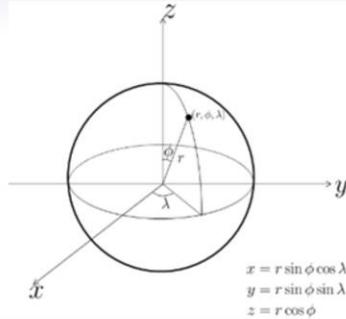
連続の式は水の相転移を除いて、空気の質量が保存されていることを表す方程式である。静力学モデルでは、鉛直方向の運動方程式の代わりに連続の式と水平方向の運動方程式による水平方向の風の計算結果を用いて、鉛直流が求められる。

熱力学方程式は大気温度変化に関する方程式である。温度の代わりに温位で表される場合もある。水蒸気の予測式は大気の水蒸気の変化に関する方程式である。このほかにも大気の状態に関する関係式である状態方程式や大気乱流エネルギー、地中温度などの物理量の方程式を考える場合がある。

座標系

球座標

重力は常に鉛直方向下向きに働き、水平方向2成分は緯度経度によらず直交する。
→全球モデル

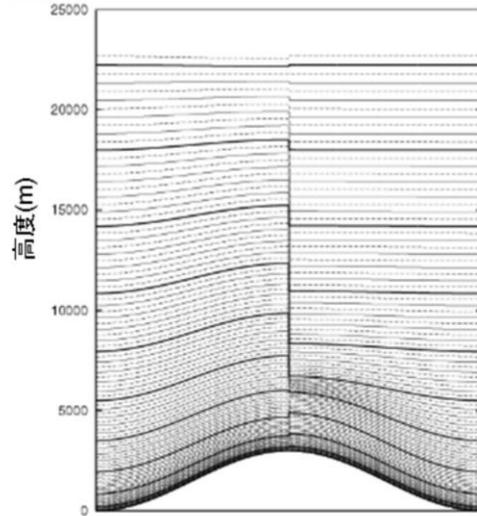


鉛直座標

- ・気圧座標
- ・高度座標

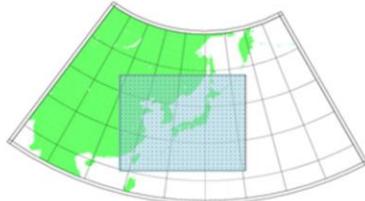
ハイブリッド座標

一番上まで地形の影響が残る鉛直座標系(左)と高度1万mを超えた辺りで地形の影響がなくなるハイブリッド座標(右)。



投影法によって平面に投影した座標系

地球が球体である効果を考慮し、さらに座標の直交性を確保しながら水平2方向の距離の歪みを調整する。
→領域モデル



気象庁 Japan Meteorological Agency

令和4年度数値予報解説資料集

44

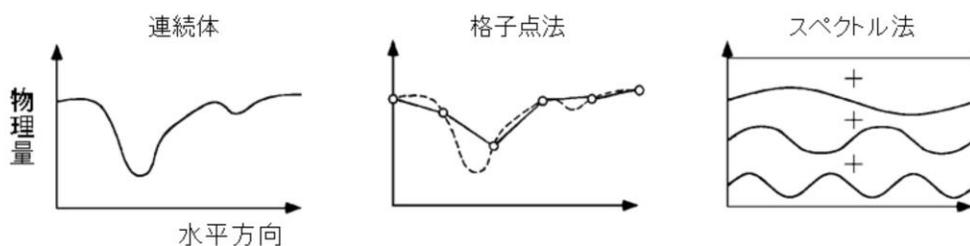
力学過程は基礎方程式をどのような座標系を用いて、どのように離散化を行い、どのように時間積分をするかという、数値予報モデルの基本構造をなす部分である。同じ基礎方程式を用いた数値予報モデルであっても、その基本構造の中身は同じとは限らず、それぞれの数値予報モデルによって特徴がある。ここでは、数値予報モデルで用いられる座標系について説明する。

大気の運動を表す方程式系は3次元空間での直交直線座標系で記述することができる。直交直線座標系のまま解くことも可能だが、地球はほぼ球体であることを利用して方程式を解きやすい形式に書き換えることがよく行われる。全球モデルでは球座標系に変換することにより、重力は常に鉛直方向下向きに働き、水平方向2成分は緯度経度によらず直交することから、解きやすくなる。領域モデルでは投影法によって平面に投影した座標系に変換される。これに基づき方程式を変換することにより、地球が球体である効果を考慮し、さらに座標の直交性を確保しながら水平2方向の距離の歪みを調整する。

鉛直方向の座標系については、気圧座標系と高度座標系に大きく分かれる。気圧座標・高度座標のいずれを採用するとしても、大気の流れに沿うように、大気最下層付近では地形や海面に沿った層配置となるが、一方上層では地形の影響を受けない層配置が都合がよいため、両者を組み合わせた「ハイブリッド座標」もよく採用される。

空間離散化

- 計算機上では連続したものを扱えない
現実の大気状態は連続して変化するが、計算機上では連続したものを扱えないために離散化する必要がある。
- 水平方向の離散化
格子点法 : 連続体の状態を有限個の格子点値で代表させる
スペクトル法: 様々な波長を持つ波の重ね合わせで表現
- 鉛直方向の離散化
格子点法で離散化(地形を考慮するなどして幾つかの層に区切る)



次に、離散化について説明する。一般に大気中のさまざまな物理量は連続的な分布をしている。しかし、このままではコンピュータで取り扱うことが困難なため、連続的な分布を「とびとびの値」で近似的に表現することを考える。このとびとびの値への置き換えを「離散化」と言う。離散化により、基礎方程式にある微分項などを近似的に求めることが可能になる。空間的にとびとびの位置に分布する値から微分計算を扱う方法として、大きく分けて格子点法とスペクトル法の2種類がある。ここでは格子点法を使用するモデルを総称して「格子モデル」と呼び、スペクトル法を採用したモデルは「スペクトルモデル」と呼ぶ。

スライドに格子点法とスペクトル法の模式図を示している。格子点法は近隣の格子との差分等の演算で予報変数の空間分布やその傾きを考える方法であり、スペクトル法では物理量の空間分布をさまざまな波数の波の重ね合わせで表現して、その波数の振幅を時間発展させることで物理量の将来予測を計算する。スペクトル法よりも格子点法の方が直感的に理解しやすいが、スペクトル法では微分項を解析的に計算できるなど、一般的に格子点法よりも精度良く計算できる。離散化の基本的な考え方から言えば、格子点法の場合は格子間隔を細かく、スペクトル法では考える波の数(単位長に含まれる波の数を「波数」、波長が最短の波の数を「切断波数」という)を多く計算したほうが精度は高い。

鉛直方向についても、水平方向と同様の原理だが、スペクトルモデルの場合でもスペクトル法が用いられるのは水平方向のみで、鉛直方向には通常は格子点法が用いられる。一般に大気の流れは上層へ向かうほど水平方向の流れが卓越し、下層ほど鉛直方向の流れの変化が大きくなるので、鉛直層の配置については、地形の影響や境界層の表現等も考慮して、下層ほど細かく設定されることが多い。

スペクトルモデルの解像度

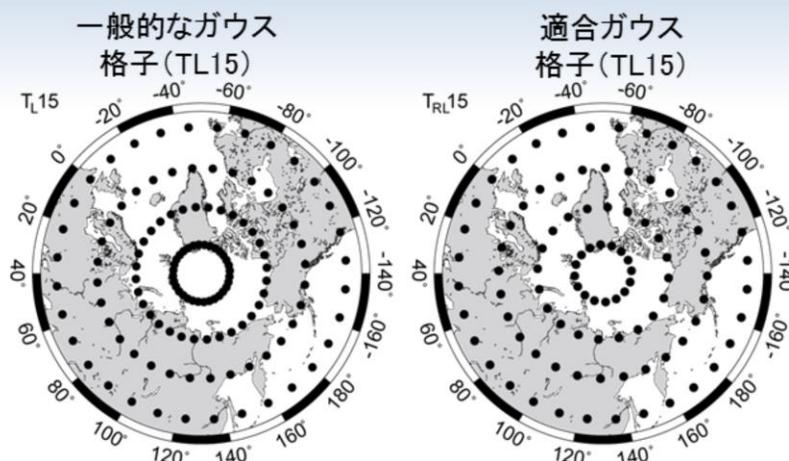
T L 959 T Q 479
三角切断 線形格子 波数 三角切断 2次格子 波数

切断波数	本資料での表記	格子間隔(北緯30度)	格子間隔(赤道)
TL959	20 km	18 km	21 km
TQ479	27km	24km	28km
TL479, TQ319	40 km	36 km	42 km
TL319	55 km	54 km	63 km
TL159	110 km	108 km	125 km

離散化の基本的な考え方から言えば、格子点法の場合は格子間隔を細かく、スペクトル法では考える波の数を多く計算したほうが精度は高い。全球スペクトルモデルの場合は球座標を採用しており、球面調和関数で表される波の重ね合わせで表現されるが、東西波数と全波数の空間で三角切断(triangular truncation)を行う場合には、先頭に“T”を付けて表記する。波と格子の対応はいくつかの方法があり、先頭に“TL”が付く場合には線形格子(linear grid)を、先頭に“TQ”が付く場合には2次格子(quadratic grid)を採用した場合の解像度の表記である。

スペクトルモデルの場合の「解像度」については切断波数を使用する場合と、格子間隔を使用する場合がある。厳密には前者で表記することが正しいが、本資料や様々な資料ではプロダクト利用者へのわかりやすさを重視して、なるべく後者を用いている。例えばTL959の全球モデルの場合、赤道上には1920個の格子点がある。赤道上では地球一周が約40000 kmであるため、東西方向の格子間隔は約21 km、北緯30度ではやや狭まって約18 kmとなる。また南北方向は赤道上的東西方向と同じである。そこで解像度として一般的に格子間隔20 kmと表記している。

適合ガウス格子



- 一般的なガウス格子

高緯度域で格子点の東西方向の空間密度が高い

- 適合ガウス格子

中高緯度の東西格子点数を最適化

格子間隔の非一様性の緩和

物理過程の計算量も減少



全球モデルでは格子点法で等緯度経度格子を用いた場合、両極付近で格子点が集中して微分計算の取り扱いなどが困難になる。従って、格子点法を用いる場合はその他の格子配置を用いるなどの工夫が必要になる。スペクトル法を用いる場合は極での格子点の集中の問題は緩和されるが、面積の大きく異なる格子が共存することは物理過程なども含めて考えると好ましいことではない。

気象庁全球モデルには「適合ガウス格子」(宮本2005;岩村2008)を使用している。ガウス格子は地球の球体表面の緯度方向の積分をガウスの求積法によって精度よく求めるために使用している。適合ガウス格子では中高緯度の格子が標準のガウス格子よりも、精度に影響がない範囲で少なくなっているため、格子間隔の非一様性が緩和される。また、物理過程などは局所的な効果や変化として取り扱う方が都合がよいために、格子点の値を直接用いた計算が併用されており、適合ガウス格子の利用によって、標準的なガウス格子より格子点数が少なくなり、物理過程の計算量も減少する。

格子点における予報変数の配置

Arakawa and Lamb (1977)

→格子点において、予報変数をどのように格子点に配置するかでいくつかのタイプに分類

非静力学モデルasuca

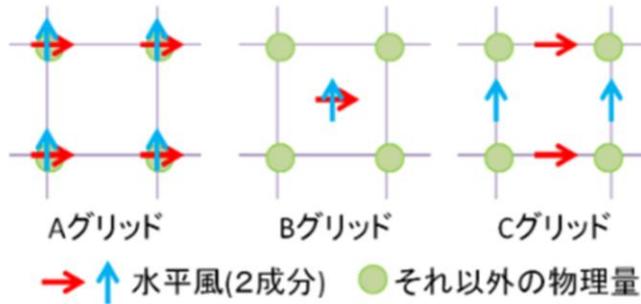


荒川Cグリッド

数値予報GPV



荒川Aグリッド



格子点法において、Arakawa and Lamb (1977)は予報変数をどのように格子点に配置するかでいくつかのタイプに分類した(スライド)。わかりやすく言えば、囲碁のように格子の交点に置くか、将棋のように格子の中央に置くかということである。横方向は中央で縦方向は交点、という配置もある。詳細は省略するが、この配置により計算のしやすさや計算結果の精度が異なるという事情があり、実際には予報変数に応じてこれらを組み合わせて用いることが多い。

気象庁メソモデル・局地モデルで使われている非静力学モデルasucaでは、荒川Cグリッドの配置が用いられている。これは数値予報モデルが各時刻の予報変数を計算する格子点の配置であって、利用者に提供される数値予報GPVでは全ての予報変数が同じ点にある格子(荒川Aグリッド)に内挿して作成されている。

時間積分と計算安定性

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = F \quad \xrightarrow{\text{離散化}} \quad \phi_{t+\Delta t} = \phi_t + F_t \Delta t$$

【時間積分法の安定条件】

情報が伝播する速度 ($\Delta x / \Delta t$) が実際の現象が進む速さ (C) より大きくなければならない。

Courant-Friedrichs-Lewy (CFL) 条件

$$\frac{\Delta x}{\Delta t} > C$$

Δt : 計算時間ステップ(オイラー法の場合)
 Δx : 水平格子間隔
 C : 風速や重力波の位相速度

数値予報モデルでは予報変数の時間変化率を求め、時間積分を行うという手順になる。以上の空間離散化により各方程式の時間変化率を求めることができるので、次のステップは時間積分である。空間離散化と同様、時間積分もなんらかの形に変換・離散化する必要がある。この時間方向の離散化を「時間積分法」といい、空間の格子間隔と同様、時間積分の刻み幅を「積分時間間隔」と呼ぶ。

空間離散化同様、一般的に積分時間間隔が短いほど精度が良い。しかしそれでは計算時間が膨大になるため、現業数値予報モデルでは、設定した格子間隔での予測精度を著しく損なわない範囲で可能な限り積分時間間隔を伸ばして計算時間を短縮する、という方針が基本になる。一方で、安定な計算のため、取りうる積分時間間隔には上限がある。その一つに、「CFL条件」というものがある。

「CFL条件」は情報が伝播する速度が実際の現象が進む速さ以上でなければいけないという条件で、これを満たさなければ、計算により流れに沿って情報を伝えることができなくなり、計算が破綻してしまう(精度が悪いという状態よりさらに悪化して、無意味な計算をして物理的にありえない値を出力してしまう)。

積分時間間隔を長く取るための工夫

セミ・インプリシット法

速度の大きい重力波の効果を計算する際に「陰解法(インプリシット法)」と呼ばれる手法を用いて解く。

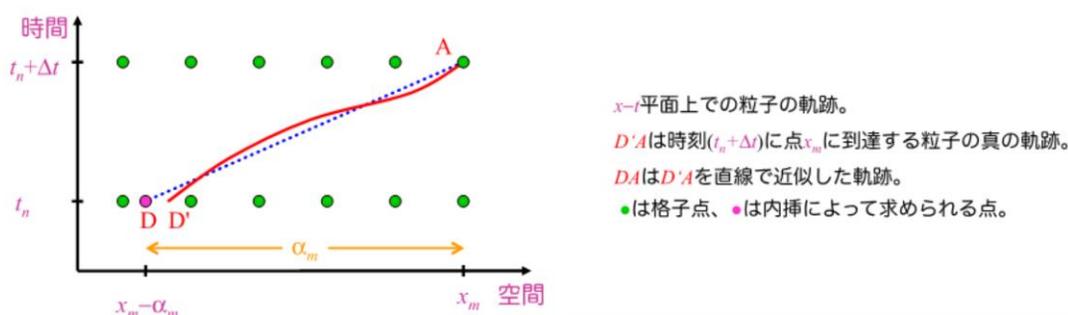
➡ CFL条件を考慮しても積分時間間隔を大きめに取ることができる。

セミラグランジュ法

移流項を計算する時にだけ、ラグランジュ法(流体のある部分(流体塊)に着目し、それが時間とともにどのように移動し変化するかを追跡する方法)を用いる。

➡ 移流による時間変化を考慮する必要がなく、CFL条件の制約がなくなる。

セミラグランジュ法の図

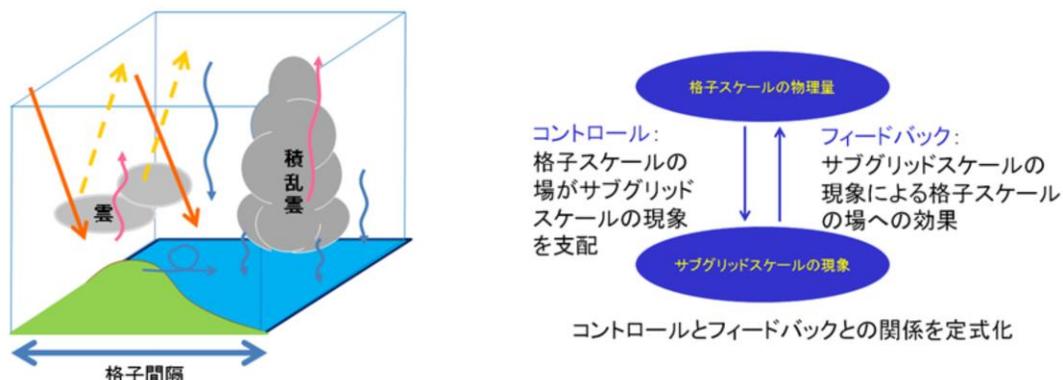


次に、CFL条件を一部回避して積分時間間隔を長く取るための工夫について紹介する。速度の大きい波の効果を計算する際に「陰解法(インプリシット法)」と呼ばれる手法を用いて解くことで、積分時間間隔をCFL条件に依らず決めることができる。それ以外の波の効果を計算する際には従来の「陽解法(イクスプリシット法)」で解くが、相対的に速度が小さいため、CFL条件を考慮しても積分時間間隔を大きめに取ることができる。これら2つの手法を併用する時間積分法を、半分は陰解法を用いることから「セミ・インプリシット法」と呼ぶ。

更に移流におけるCFL条件による積分時間間隔の上限を回避するために開発された手法が、セミラグランジュ法である。ラグランジュ法では流体のある部分(流体塊)に着目し、それが時間とともにどのように移動し変化するかを追跡する方法である。外力や加熱などの強制がなければ流体塊の運動や状態は変化しないことから、移流による時間変化を考慮する必要がなく、CFL条件の制約がなくなる。移流項を計算する時にだけこの手法を用いる計算方法を、セミラグランジュ法と呼ぶ。積分時間間隔の上限がないといっても、流体塊の移動を追跡する必要があるため、あまり長くすると精度が低下することから、実際には予報精度に大きな影響が出ない範囲で決められている。水平格子間隔20 kmの大気モデルで与えられる積分時間間隔はCFL条件では100秒程度だが、セミラグランジュ法を採用した全球モデルの積分時間間隔は400秒としている。

物理過程のパラメタリゼーション

- 予報変数(格子点値)はモデルの格子点における**時間・空間平均値**
- 格子平均からのずれの効果の扱い
 - 格子間隔より小さな現象(サブグリッドスケールの現象)は**格子点値で表現することができない**(基礎方程式で扱えない、モデルで陽に表現できない)
 - サブグリッドスケールの現象が予報変数(格子点値)に及ぼす効果を、格子点の物理量で評価 → **パラメタリゼーション**
 - **パラメタリゼーションは予測精度を高めるには極めて重要**



物理過程は大気の流れに関するもの以外の効果や、離散化により取り扱われなくなった、物理量の格子平均からのズレにより生じる効果を考慮する部分である。例えば、数個の格子に渡る広がりを持つほどに発達した積乱雲や水平方向に広がった層雲が発生することもあり得るが、現在の数値予報モデルで設定される格子間隔よりも小さい雲の方が多い。したがって、格子平均の物理量により直接雲の存在をすべて表すことはできない。しかし、雲は大気において放射量に影響を及ぼす重要な要素であり、また雲は其中で降水粒子が生成、落下することにより地上に降水をもたらすものであるため、天気予報の精度にとっては非常に重要である。そのため、格子平均の物理量により直接表現することができない効果を何らかの形で表現する必要がある。

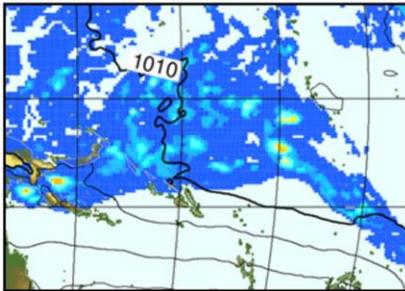
ひとつの格子の中の一部で生じている現象を取り扱うことから、こうした現象のスケールを「サブグリッドスケール」と言い、サブグリッドスケールの現象の効果を近似的に評価することを「パラメタリゼーション」と言う。このとき、サブグリッドスケールの現象を、格子スケールの物理量から計算する必要がある。この計算では、サブグリッドスケールの現象は格子スケールの現象によりコントロールされており、そのフィードバックが計算できることを前提としている。

物理過程が予報精度に与える影響は非常に大きく、物理過程の高度化や精緻化が数値予報モデルの重要課題である。格子平均で現象を表すことができない物理過程は観測から得られる現実の大気の特徴を模した計算を行う。しかし、各物理過程で用いる大気の特徴には未解明の部分が依然多く、数値予報実験や過去の運用時の経験則のみから決められたパラメータや仮定が入っている場合もあり、科学的な知見に照らした改良が必要である。こうした改良に向けて、観測とモデルの予測との比較に関する国際プロジェクトなどによる調査研究も盛んに行われている。

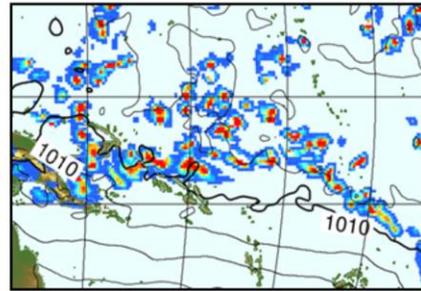
積雲対流パラメタリゼーション

- 積雲対流は数値予報モデルにおいて重要な過程
 - 浮力を起源とする運動量・熱・水蒸気の鉛直輸送
 - 積雲は特に熱帯で顕著に発生・発達し、熱帯における対流活動は大気大循環に大きな影響を与えている。
 - 防災を目的とするメソ・局地モデルでは、対流によって引き起こされる集中豪雨などが予測対象。

積雲対流パラメタリゼーションあり



積雲対流パラメタリゼーションなし

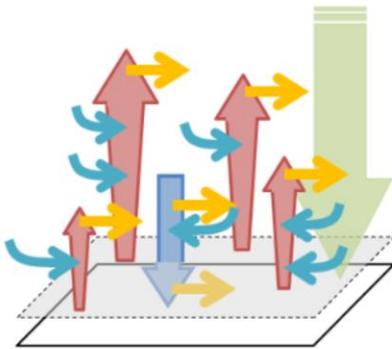


代表的な物理過程として積雲対流パラメタリゼーションについて述べる。

積雲は、特に熱帯で顕著に発生・発達し、熱や水蒸気の鉛直輸送に大きな役割を果たし、ひいては大気大循環に大きな影響を与えている。また熱や水蒸気を鉛直方向に分配した結果として、水蒸気が凝結する。凝結した水蒸気は降水として落下するか、雲水・雲氷として放出される。現在の現業数値予報モデルは、積雲を直接表現するだけの十分な分解能を持たない。直接表現できないからといって積雲を何らかの形で表現しなければ、積雲対流に伴う熱・水・運動量の輸送やそれに伴う雲や雨の多様性が十分に表現できなくなる。その結果、数値予報モデルの予測は雲ひとつない晴れか、もしくは非現実的な降水か、のどちらかの極端な予測になってしまう。したがって、積雲対流パラメタリゼーションにより、熱、水蒸気、運動量の鉛直方向の再分配を行う仕組みを導入している(小森2012)。

Arakawa-Schubert スキーム

- GSMで採用されているArakawa-Schubertスキーム(Arakawa and Schubert 1974)はマスフラックススキームの1つ。
積雲対流に伴う鉛直方向の大気と水物質の質量輸送(マスフラックス)を計算する。
- 境界層に雲底があり、モデル各層を雲頂とする積雲の集合を考える、スペクトル型のスキーム。(現GSMでは最大61種類)



Arakawa-Schubertスキームの模式図。

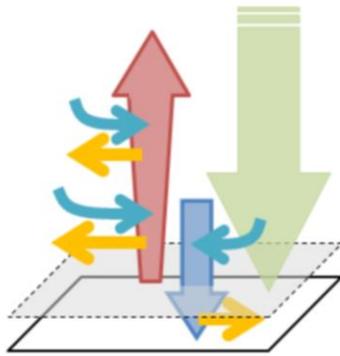
赤、青の鉛直方向の矢印はそれぞれ上昇流、下降流に伴うマスフラックス、水色、黄色の水平の矢印はそれぞれエントレインメント、デトレインメント、緑の下方向の矢印は補償下降流を示す。

GSMで採用されている積雲対流スキームは、スペクトル型のマスフラックススキームの一種であるArakawa-Schubertスキームを基にしている。マスフラックススキームでは積雲のふるまいやそれによる大気への影響を表現するために、積雲対流に伴う鉛直方向の大気と水物質の質量輸送(マスフラックス)を計算することによって、その質量とともに鉛直方向で輸送される運動量、熱、水蒸気の輸送量を見積もる。

積雲の中の大気は、積雲周辺の乾いた冷たい空気を取り込み(これを「エントレインメント」と呼ぶ)、積雲内部の湿った暖かい空気の一部を放出しながら(これを「デトレインメント」と呼ぶ)上昇していく。Arakawa-Schubertスキームではモデル各格子あたりにいろいろな高さの積雲(複数の上昇流、代表的なひとつの下降流、さらに補償下降流)があると考え、積雲の高さの違いはエントレインメントの起き方の違いに対応している。また、ある高さの積雲が発生するかどうかやその活動の強さは、雲底と雲頂の間の大気の安定度に関連する量である「雲仕事関数」など様々な条件によって決まる。GSMで採用されているArakawa-Schubertスキームでは、エントレインメントは中間の高度でも起きる一方、デトレインメントは雲頂と雲底でのみで起きるとしている。

Kain-Fritsch スキーム

- MSMとLFMで採用されているKain-Fritschスキーム(Kain and Fritsch 1990, Kain 2004)はマスマックススキームの1つ。
 - LFMでは対流の立ち上がりでのみ用いられている。
- モデルの各格子に1つの積雲を考える、バルク型のスキーム。



Kain-Fritschスキームの模式図。

赤、青の鉛直方向の矢印はそれぞれ上昇流、下降流に伴うマスマックス、水色、黄色の水平の矢印はそれぞれエントレインメント、デトレインメント、緑の下方向の矢印は補償下降流を示す。

Kain-Fritschスキームでは、モデルの各格子あたり、ひとつの積雲(一組の上昇流と下降流、そして補償下降流)を考える。持ち上げ凝結高度まで断熱的に持ち上げた気塊の仮温度が、格子スケールの大気の仮温度よりも高ければ、その気塊は浮力を持つと考えて積雲を発生させる。メソモデルでは混合層の高さや地表面の熱フラックスに基づいた摂動が考慮されて、地形や風の収束による大気の上昇が弱い場合に積雲対流スキームを発動させる工夫を行っている(原2017)。発生した積雲では、雲底や雲頂だけではなく中間の高度でも、周囲の大気とエントレインメントやデトレインメントにより熱や水蒸気が混合される。

参考文献

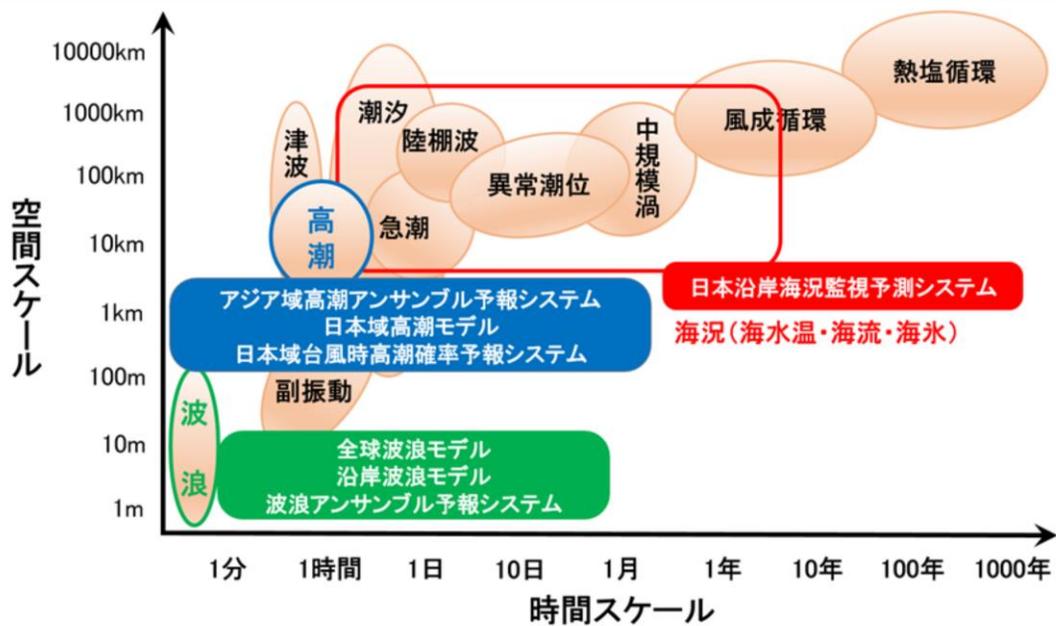
- 岩村公太, 2008: 高解像度全球モデルの改良. 平成20年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 1-6.
- 小森拓也, 2012: 積雲対流. 数値予報課報告・別冊第58号, 気象庁予報部, 42-69.
- 原旅人, 2017: メソ数値予報システムの改良の概要. 平成29年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 42-47.
- 本田有機, 坂本雅己, 藤田匡, 室井ちあし, 2018: 数値予報モデル. 平成30年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 90-105.
- 宮本健吾, 2005: 適合ガウス格子. 数値予報課報告・別冊51号, 気象庁予報部, 39-42.
- Arakawa, A., and Schubert, W. H., 1974: Interaction of a Cumulus Cloud Ensemble with the Large-Scale Environment, Part I. *Journal of Atmospheric Sciences*, 31(3), 674-701.
- Arakawa, A. and V. R. Lamb, 1977: computational design of the basic dynamical processes of the UCLA general circulation model. *Methods in Computational Physics*, Academic Press, 17, 173-265.
- Kain, J. S., 2004: The Kain-Fritsch convective parameterization: An update. *J. Appl. Meteor.*, 43, 170-181.
- Kain, J. S. and J. M. Fritsch, 1990: A one-dimensional entraining/detraining plume model and its application in convective parameterization. *J. Atmos. Sci.*, 47, 2784-2802.



第1章 基礎編

1.4.2 海洋モデル

海洋現象の時空間スケールと 海洋モデルの予測対象



海洋では、図に示されるように、海上の風によって生じる数m～数100mスケールの波浪から、海水温と塩分による密度差で駆動される地球規模の熱塩循環まで、様々なスケールの現象が起きている。

気象庁では、これらの様々な海洋現象を予測し海洋起源の災害を軽減するために、予測対象ごとに「波浪モデル」、「高潮モデル」、「海況モデル」といった各種の海洋に関する数値予報モデルを運用している。

海洋モデルの種類(波浪、海況)

数値予報システム (略称)	モデルを用いて 発表する予報	予報領域と 格子間隔	予報期間 (メンバー数)	実行回数 (初期値の時刻)
全球波浪モデル	外洋波浪予想 (波浪図)	極域を除く地球全体 約55km	5.5日間	1日3回 (00,06,18UTC)
			11日間	1日1回 (12UTC)
沿岸波浪モデル	波浪予報	日本周辺 約5km	5.5日間	1日4回 (00,06,12,18UTC)
波浪アンサンブル予 報システム	週間天気予報 (波浪)	極域を除く地球全体 約55km	11日間 (51メンバー)	1日2回 (00,12UTC)

数値予報システム (略称)	モデルを用いて 発表する予報	予報領域と 格子間隔	予報期間	実行回数 (初期値の時刻)
日本沿岸海況監視予 測システム (JPNEシステム)	海面水温・海流1か月予 報 海氷情報	北太平洋 約10km	31日間	1日1回 (00UTC)
		日本近海 約2km	11日間	1日1回 (00UTC)

表に記載してあるのは、気象庁が運用する海洋に関するモデルのうち、波浪モデルと海況モデルの概要である。

「波浪モデル」は、海上の風の予測値を用いて、海上における波の発達・減衰やうねりの伝播などを予測し、高波時に発表される波浪警報・注意報や、毎日の波浪予報、船舶向けの波浪図などに利用されている。

「海況モデル」は、黒潮や親潮等の日本周辺の海流や海水温、海氷の状態を予測し、海面水温・海流1か月予報・海氷情報や船舶向けの海氷予想図の発表、水産業、また他の数値予報モデルとともに船舶の安全運航、海上の警備救難等でも利用される。令和2年10月28日からは、新しい「海況モデル」として格子間隔約2kmの日本沿岸海況監視予測システムが運用されている。これにより、日本沿岸域の海流や海水温の変動を詳細に予測できるようになり、異常潮位等の沿岸の潮位変動の予測も可能となっている。また、オホーツク海沿岸地域への海氷の接近、接岸や根室海峡、国後水道からの海氷の太平洋への流出をより詳細に表現できるようになった。

海洋モデルの種類(高潮)

数値予報システム (略称)	モデルを用いて 発表する予報	予報領域と 格子間隔	予報期間 (メンバー数)	実行回数 (初期値の時刻)
アジア域高潮アンサンブル予報システム	高潮情報 (アジアの気象局で利用)	北西太平洋 約1.5~50km	132時間 (台風時52メンバー、 非台風時1メンバー)	1日4回 (00,06,12,18UTC)
日本域高潮モデル	高潮情報 (警報・注意報)	日本周辺沿岸部 約1~16km	78時間※1 (台風時6メンバー、 非台風時1メンバー)	1日2回 (00,12UTC)
			39時間 (台風時6メンバー、 非台風時1メンバー)	1日6回 (03,06,09,15,18,21UTC)
日本域台風時高潮確率予報システム	早期注意情報 (警報級の可能性)	日本周辺沿岸部 約1~16km	132時間 (21メンバー)	1日4回※2 (00,06,12,18UTC)
			39時間 (21メンバー)	1日4回※2 (03,09,15,21UTC)

※1 39時間より先の予測結果は一部試験運用中で、今後正式運用となる見込みである。
 ※2 非台風時には動作しない。



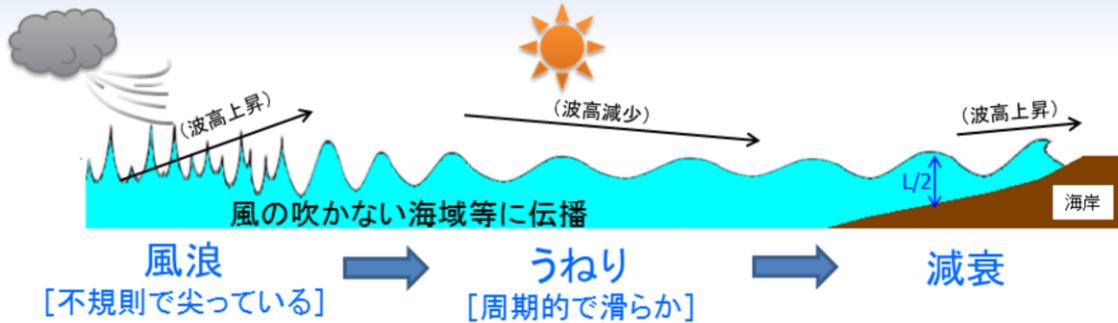
表に記載してあるのは、気象庁が運用する海洋に関するモデルのうち、高潮モデルの概要である。

「高潮モデル」は、台風の接近時などに海面気圧と海上の風の予測値から潮位の上昇量を予測し、高潮災害が危惧される場合の高潮警報・注意報の発表や、警報級の現象が発生する可能性を示す高潮早期注意情報(警報級の可能性)の発表に利用されている。

令和4年9月8日からは「日本域台風時高潮確率予報システム」の運用が開始された。これにより、台風の進路横方向の不確実性や進行速度の不確実性を考慮できるようになり、確率的に高潮予報ができるようになったことで、高潮早期注意情報(警報級の可能性)を発表することが可能となった。

波浪モデル

波浪の一生



①風による風浪の発生

- 風速
 - 吹送距離
 - 吹続時間
- で波高・周期が決まる。

②風浪からうねりへの変化

- 波高は減少
- 周期は長くなる

③海岸近くで砕波

- 水深が浅くなると海底地形による屈折、波高の変形(浅水変形)
↓さらに海岸に近づくと…
- 波形勾配が大きくなり、やがて砕波

波の一生の模式図

波浪モデルの概要について解説を行う前段として、波浪の基礎について簡単に述べる。波浪は、一般に風浪とうねりに大別される。風浪とは海上を吹く風からエネルギーを与えられて発達しつつある波であり、風速が強いほど、また吹く距離(吹送距離)及び吹く時間(吹続時間)が長いほど発達する。個々の波の形状は不規則で尖(とが)っており、強風下ではしばしば白波が立つ。一方、風浪が風の吹かない領域まで進んだり、海上の風が弱まったり風向きが急に変化するなどして、風による発達がなくなった後に残される波をうねりと呼ぶ。うねりは周期的で丸みを帯び、正弦波に近い形状をしている。また、波が海岸に近づき、水深が波長 L の $1/2$ より浅くなると海底地形による屈折や波高の変形が起こる(浅水変形)。さらに水深が浅くなると、波高が急激に上昇、波形勾配が大きくなり、やがて砕波する。波浪モデルでは、波浪が風浪として発生してからうねりに変化し消滅するまでの一連の現象を数式で表し、日々の波浪を計算している。

波浪モデル

波浪の表現

一般に海面は非常に複雑な形状：
様々な波の重ね合わせ

不均一の波を表現することに工夫が必要

二つの表現方法

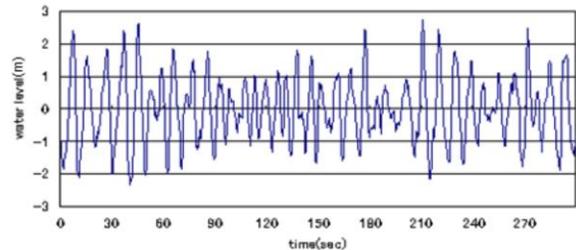
- ① 有義波(波高・周期・波向)
- ② 波浪スペクトル

これらを用いるメリット

- どれくらいの大きさ(波高)の波が
 - どの方角から
 - どれくらいの周期でやってくるか
- 定量的に把握できる。



波の様子(気象庁観測船から撮影)



松前沿岸波浪計における波浪観測記録の例

海面は写真のように複雑な形状をしている。また、グラフは、観測点(松前)における波浪観測の記録の例であるが、正弦波のような単一の振幅、周期ではなく様々な周期及び振幅の波が混在している。このように海面の波は様々な波の重ね合わせとなっていることがわかる。こういった特徴を踏まえ、波浪の状態を表現する方法として、①有義波、②波浪スペクトルという2つの表現方法が一般に用いられている。これらの方法により、どれくらいの大きさの波が、どの方角から、どれくらいの周期でやってくるかといったことについて定量的に把握することが可能となる。

高潮モデル

日本域高潮モデル: 台風時は6通りの高潮計算を実施



気象庁 Japan Meteorological Agency

- 非台風時はMSMIによる1通りの計算を行う。
- 台風時(日本付近に台風が存在する場合)は、MSMIによる1通りに加え、進路予報の誤差を考慮し、5通りの風・気圧場(ポーガス)による計算を行う。
- ポーガス計算では、予報円中心上を通るコース(ポーガス中央コース)と、予報円周辺上を通る4コース(ポーガス周辺コース)の計算を実施。
 1. 予報円中央を通過
 2. 最も速く通過
 3. 予報円右側を通過
 4. 最も遅く通過
 5. 予報円左側を通過
- ポーガス中央コースはMSMIにポーガスを埋め込む。ポーガス周辺コースは台風周辺のみポーガスによる気象場を与える。

令和4年度数値予報解説資料集

62

日本域高潮モデルでは、非台風時には、MSMの風・気圧場を使用した1通りの予測計算を行う。一方、台風による高潮の場合、台風の進路によって高潮の規模や発生のタイミングが大きく異なることから、台風進路予報の誤差などを考慮して高潮の予測をする必要がある。このため、台風が日本に接近する(台風が予測期間内に日本の沿岸300km以内を通過する)と予想される場合(以下、台風時)には、高潮モデルでは6つの異なる風・気圧場を用いた6メンバーの予測計算を行う。6メンバーの予測のうち、1つは非台風時と同様MSMの風・気圧場を使用し、その他5メンバーについては台風情報に基づき作成した仮想的な台風周辺の風・気圧場(以下、台風ポーガス)を用いる。MSMと台風ポーガスの2種類の外力を利用する理由は、MSM予測値を用いた場合に地形による変形や、中緯度に北上してきたことによる台風の構造の変化が高潮予測に反映されるメリットがある一方で、MSM予測が気象庁発表の台風予報と異なる進路・強度を示す可能性を考慮するためである。

台風ポーガスを使用する5メンバーの予測では、図に示したように台風が

1. 予報円中心
2. 予報円上の最も速いコース
3. 予報円上で進行方向右
4. 予報円上の最も遅いコース
5. 予報円上で進行方向左

を通過する場合の高潮を予測する。1を「ポーガス中央コース」、2～5を「ポーガス周辺コース」と呼ぶ。

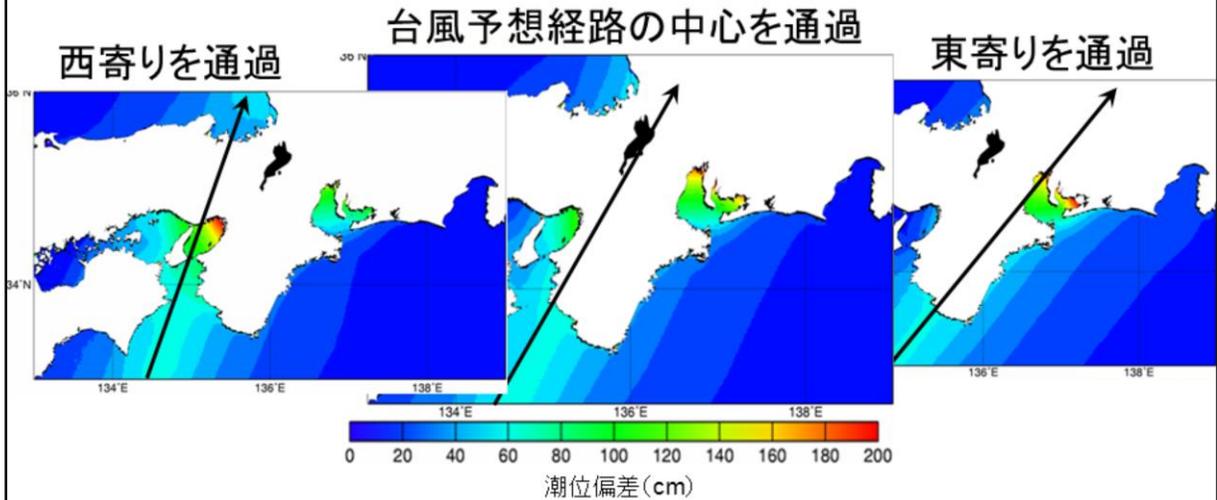
複数の台風が日本に接近した場合、高潮の予測に使用する台風ポーガスは、複数の台風それぞれについて同じコース同士で台風ポーガスの重ね合わせを行い計算する(例えば、重ね合わせに使用する台風ポーガスは、一方の台風を予報円上の最も速いコースで計算する場合、もう一方の台風も同様に予報円上の最も速いコースで計算する)。台風ポーガスを埋め込むときは、弱い台風・優先度の低い台風から埋め込み、優先度の高い台風で上書きを行う、という手続きがとられる。いずれの台風も中心付近(強風半径程度)ではそれぞれの台風ポーガスを使用し、その外側では両者を合成する。ポーガス中央コースはMSMIにポーガスを埋め込むが、ポーガス周辺コースは台風周辺のみポーガスによる気象場を与える(ポーガス周辺コースはポーガスとMSMIによる台風位置が大きくずれる場合が多いため、ポーガスをMSMIに埋め込むと、MSMIによる台風が残ってしまう)。

また、24時間以内に台風ではなくなり、外力として用いる予測期間内までの台風予報値が台風情報に記述されない場合、台風の強度・移動速度を一定と仮定して必要な値を外挿することにより予想を行う。

高潮モデル

日本域高潮モデル:なぜ5コースの計算が必要か

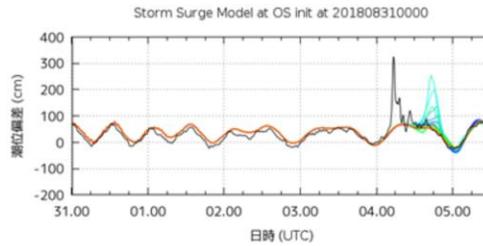
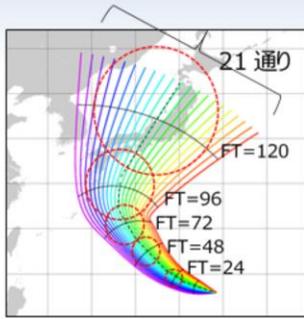
- 高潮が発生する場所・規模は台風コースに強く依存。
- 台風進路の予報誤差がある場合、大きな誤差が発生しうる。
 - 複数のシナリオを用意し、最悪パターンを考慮して使い分ける。



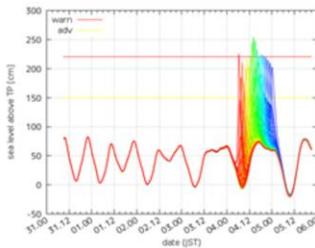
図は、台風進路が少しずつ変わった場合に、顕著な高潮の発生する場所がどう変化するかを示している。この例では、台風が予報円西寄りを通過した場合は大阪湾、予報円中心を通過した場合は伊勢湾、予報円東寄りを通過した場合は三河湾で顕著な高潮が発生することが分かる。このように、高潮が発生する場所や規模は台風進路に大きく影響を受け、進路予報の誤差は高潮予測にも大きな誤差をもたらす。そのため気象庁の高潮予測においては、台風時は複数のシナリオを用意し、状況に応じて使い分けているほか、不確実性や潜在的なリスク評価にも用いている。

高潮モデル

日本域台風時高潮確率予報システム: 確率的な予報



① 台風進路予報に合わせた21通りの5日先までの高潮予測を計算。



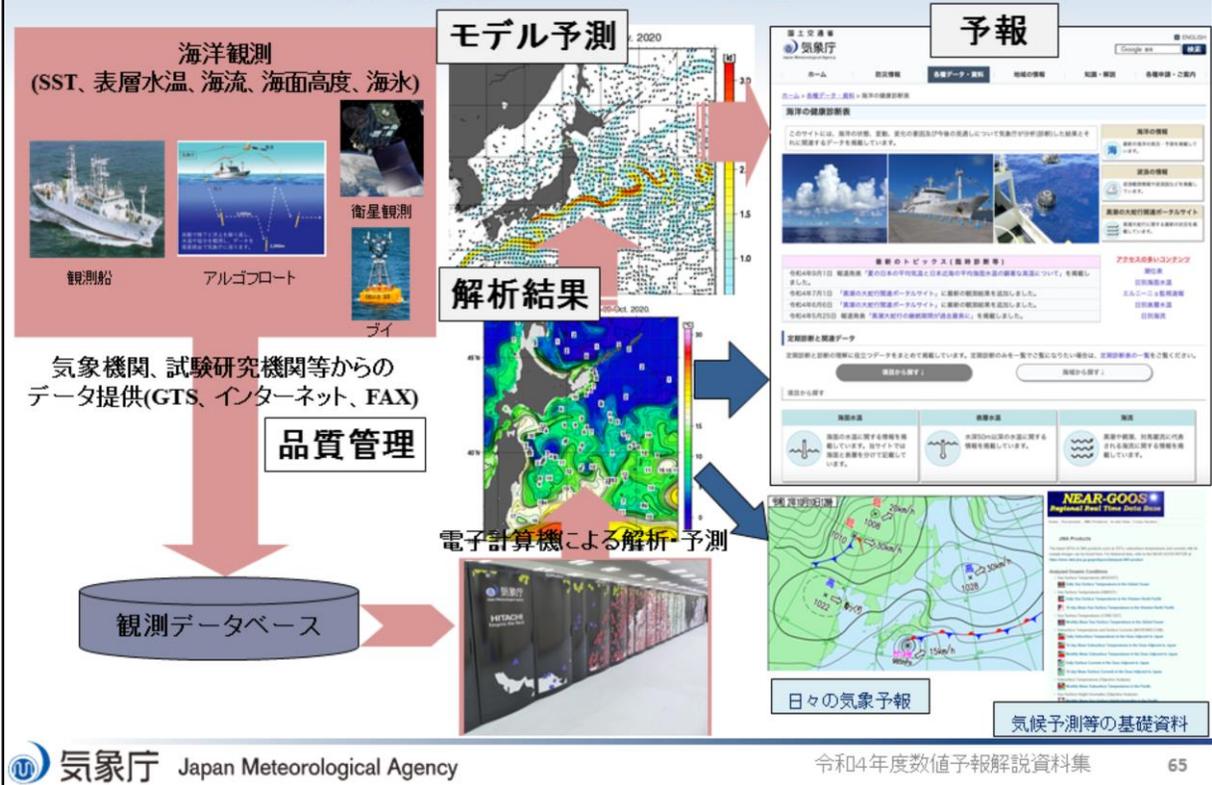
2000000000UTC 初期時刻		選択コース: MSM準拠 パーセンタイル値: 100				○ 通関予報細分区分 ○ 市町村等をまとめた地域 ● 二次細分区分				
府県予報区	通関予報細分区分	市町村等をまとめた地域	二次細分区分	データ	2日目	3日目	4日目	5日目	注	警報基準
宗谷地方	宗谷地方	宗谷北部	稚内市(オホツク海側)	自動判定値	中	中			130	
				高潮アンソンプル	6	31	-13	-34	90	130
宗谷地方	宗谷地方	宗谷北部	標津村(オホツク海側)	自動判定値	低	中	低	低	90	130
				高潮アンソンプル	-3	45	-12	-15	90	130

② 台風進行速度を調整する処理を加え、21×21=441通りの高潮予測に拡張。高潮早期注意情報(警報級の可能性)として発表する。

気象庁では、確率的な高潮予報を可能とするため、令和4年9月8日から「日本域台風時高潮確率予報システム」の運用を開始した。このシステムでは、台風予報円の情報を元に、①日本域高潮モデルを用いて、台風進行の横方向に進路を等間隔にずらした計21通りの台風進路を作成し、21通りの5日先までの高潮予報計算を実行する。その後、②台風進行速度の不確実性について、高潮予報結果の時間をずらす処理を実施することにより、21×21=441通りの高潮予報に拡張して、更に潮汐効果も加算することで、高潮確率予報を作成する。この高潮確率予報を元に、警報級の可能性を判定し、高潮早期注意情報を発表している。

海況モデル

海況情報の収集から提供まで



海洋観測船や海洋ブイ、衛星観測、海洋フロートなどの観測結果は、品質管理を経て海洋観測データベースに蓄積される。この蓄積されたデータを海洋モデルに同化し、解析値や予報値を作成する。解析値や予報値は、日々の天気予報や気象予報の基礎資料として活用されている。

海況モデル

海況情報の利用

- 安全で経済的な船舶の運航
 - 搜索
- 水産業
- 沿岸防災
- レジャー・スポーツ
- 流出油・津波デブリの漂流予測
- 汚染物質の移流・拡散予測

海況情報は、安全で経済的な船舶の運航や搜索、水産業、沿岸防災、レジャー・スポーツ、流出油・津波デブリの漂流予測、汚染物質の移流・拡散予測などに利用されている。漂流予測は、海面に浮いたものが対象で、風の応力を直接受け一方、移流・拡散予測は海水に溶けたものが対象で、海水とともに鉛直方向にも移動する。



第1章 基礎編

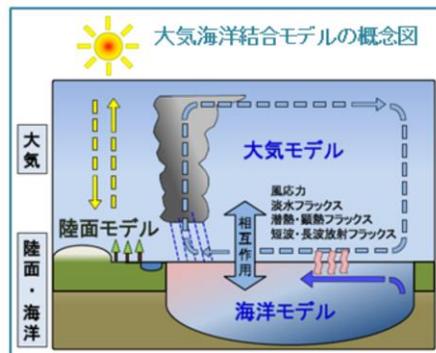
1.4.3 大気海洋結合モデル

大気海洋結合モデルの歴史

眞鍋淑郎博士

☆2021年ノーベル物理学賞受賞☆

- 2021年のノーベル物理学賞は、複雑系の理解に画期的な貢献をした3人の研究者が受賞した。そのうち眞鍋先生と独マックスプランク研究所のクラウス・ハッセルマン教授は、地球の気候と、それに対する人間の影響に関する研究が評価されての受賞（授賞理由：地球気候の物理モデル化、変動性の定量化、及び地球が温暖化することを高い信頼度で予測）。
- 眞鍋博士は、1960年代から地球の気候の物理モデルの開発を先導。放射収支と大気の鉛直輸送の相互作用を研究し、大気中の二酸化炭素の増加が地表の温度上昇につながることを実証した。
- 眞鍋博士の開発した大気海洋結合モデルは、世界各国の気象局や研究機関で開発・使用されている気候モデルの原型となった。



眞鍋淑郎博士が原型を開発した「大気海洋結合モデル」は、その後多くの専門家によって改良が続けられ、近年の計算機技術の目覚ましい進展もあって、人為的な温室効果ガスの増加に伴う数十年から百年規模の気候変動ばかりでなく、わが国の気候に大きな影響を与えるエルニーニョ・ラニーニャ現象などの数か月から数年規模の自然現象の予測にも利用可能なものとなったため、気象庁でも1998年7月より「大気海洋結合モデル」によるエルニーニョ・ラニーニャ現象の予測を開始した。

その後、2010年2月には、1か月から数か月規模の自然現象の予測にも利用可能となったことから、季節アンサンブル予報システムに「大気海洋結合モデル」を導入した。2015年6月には、「大気海洋結合モデル」の解像度を向上させるとともに、海洋モデルに加えて海氷モデルも結合した季節アンサンブル予報システムに用いるものとしては第2世代となる「大気海洋結合モデル」に更新し、2022年2月には「大気海洋結合モデル」の解像度を更に向上させた第3世代の「大気海洋結合モデル」に更新し、今後より短い予報にも「大気海洋結合モデル」を利用していくことが出来るように、初期値作成手法や運用方式にも改良を加えた。

気象・気候現象の予測可能性

■ 予測可能性の概念図

予測可能性は大きく2種類に分類される。

■ 第1種の予測可能性

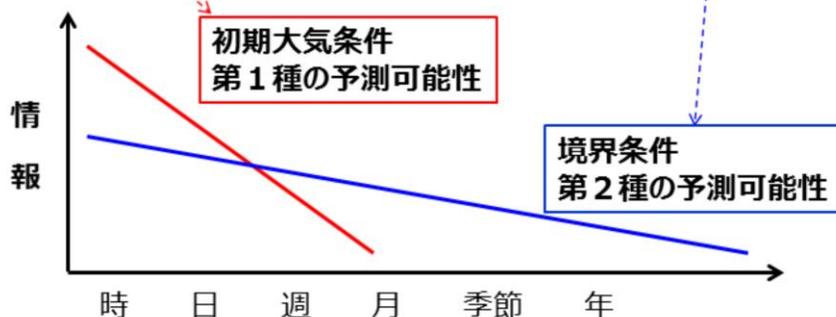
初期大気条件に依存する。

大気の変動は速く、初期の大気を持つ情報は急速に失われる。

■ 第2種の予測可能性

海面水温や海氷、積雪など境界条件に依存する。

境界条件の変動は大気の変動に比べて遅いため、長期予報が可能。



初期値のわずかな誤差が時間とともに急激に増大し、ついには予測不可能な混沌とした状態になる性質をカオスと言う。大気にはカオス的の性質があり、海洋や海氷、積雪等に比べて変動が速く、初期の大気を持つ情報は急速に失われる。一方、海洋や海氷、積雪等は変動が遅いため、大気よりも長期間の予報が可能である。このため、大気が海洋や海氷、積雪等の大気の境界条件から受ける影響については、長期間の予報が可能である。初期の大気条件に依存する予測可能性を第1種の予測可能性、境界条件に依存する予測可能性を第2種の予測可能性と言う。

気象・気候現象の予測可能性

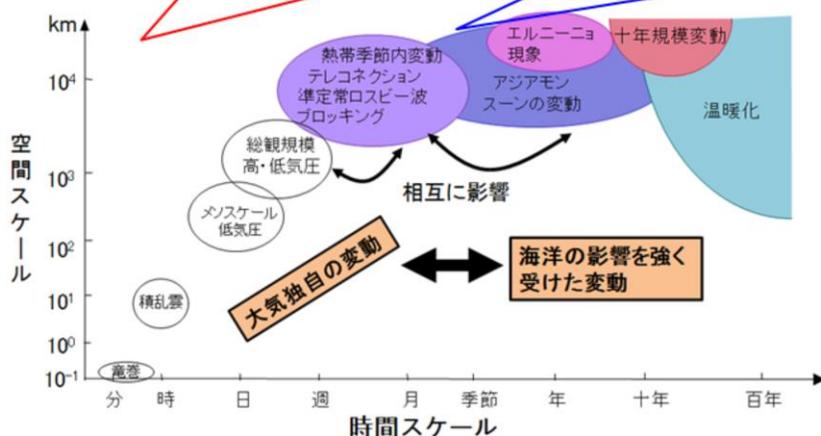
■ 大気現象の時空間スケール

■ 時空間スケールが小さい大気現象

例：竜巻、温帯低気圧など
大気初期条件に敏感なため、長期予報は不可能。

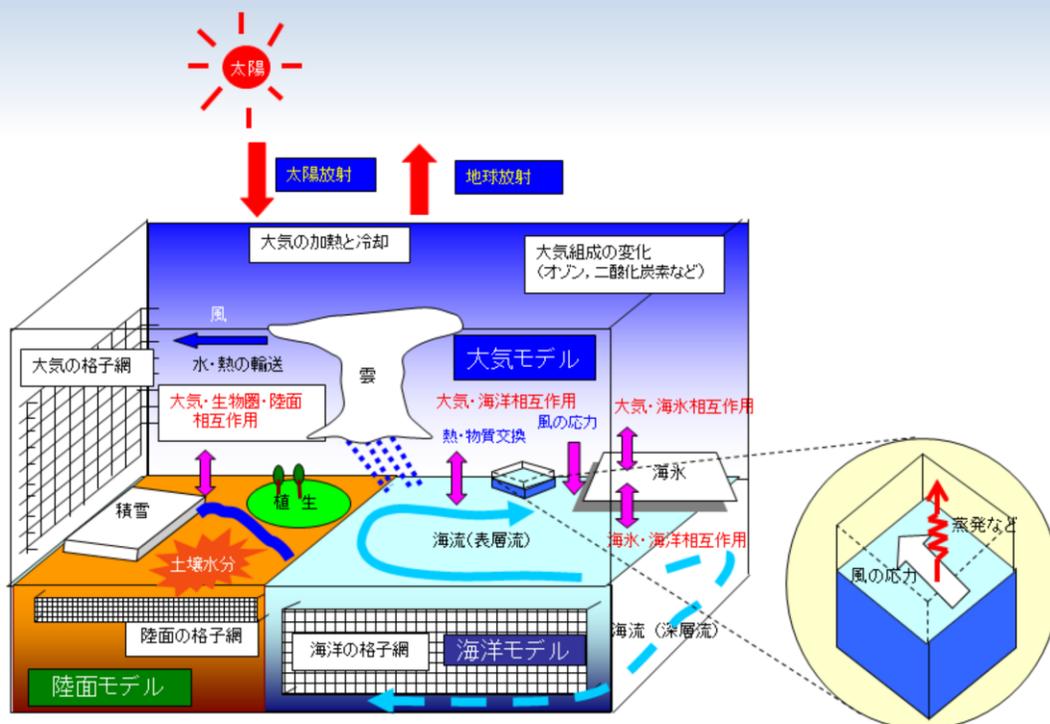
■ 時空間スケールが大きい大気現象

例：赤道季節内振動(MJO)、モンスーン、エルニーニョ現象等
大気初期条件よりも、海洋・海水・陸面等の境界条件に敏感なため、長期予報が可能。



大気現象には竜巻や温帯低気圧など時空間スケールの小さい現象から、赤道季節内振動(MJO)やモンスーン、エルニーニョ現象といった時空間スケールの大きい現象まで様々なものがある。時空間スケールの小さい大気現象は大気初期条件(第1種の予測可能性)に敏感であるため、長期間の予報は不可能である。一方、赤道季節内振動やモンスーン、エルニーニョ現象等は大気初期条件(第1種の予測可能性)よりも、海洋や海水、積雪等の境界条件(第2種の予測可能性)に敏感であるため、長期予報が可能である。

大気海洋結合モデル



長期間の予報では、海水温や海氷、積雪等の大気への影響が大きく、これらを適切に予報する必要があるため、海洋モデルや海氷モデル、陸面モデルを大気モデルに結合し、熱や水蒸気といった物理量の相互交換(相互作用)を計算する大気海洋結合モデルが利用される。このため、大気海洋結合モデルは長期間の予報から導入され、比較的海水温や海氷、積雪等の大気への影響が小さい、より短期間の予報にも導入していくといった方向で開発が進められており、データ同化システムといった大気の初期条件の精度を高める開発とは逆向きの開発となっている。今後、短期予報から長期予報まで予測可能なシームレスな数値予報モデルを開発していくためには、第1種の予測可能性である大気初期条件の開発と、第2種予測可能性である境界条件の開発といった双方向の開発が不可欠である。

季節アンサンブル予報システム

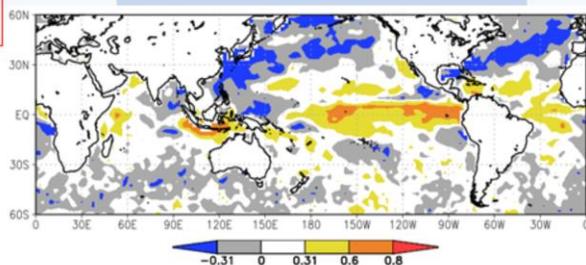
図は旧モデルで過去30年間 (1981-2010)の再予報結果を比較した例

気象庁では2010年2月に大気海洋結合モデルを季節アンサンブル予報システムに導入。

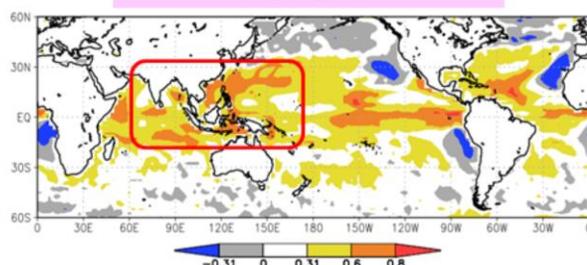
■大気海洋結合効果

大気海洋結合モデルは、海面水温と降水量の過剰な相関(応答)を抑制し、熱帯海洋変動に関連した現象の予報精度を向上する。

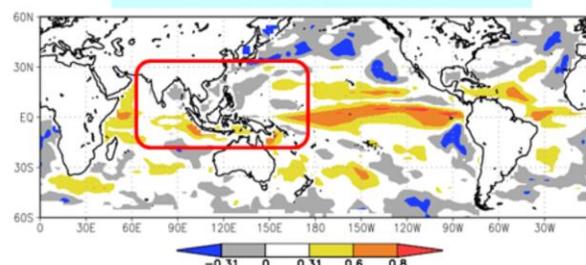
解析



大気モデル



大気海洋結合モデル



7月の海面水温と降水量の相関係数の比較

気象庁では、2010年2月に大気海洋結合モデルを季節アンサンブル予報システムに導入した。海面水温偏差を境界値とする大気モデルでは、海面水温が高い領域で対流が立ち続けてしまうため、海面水温と降水量が過剰な正相関となる。しかし、現実の大気(解析値)では、海面水温の高い領域で対流が立つと、日射の遮断や降水等によって海面水温が低下するため、弱い負相関となっている。大気海洋結合モデルは、図に示すように海面水温と降水量の過剰な正相関を抑制して解析に近づけ、熱帯海洋変動に関連した大気海洋相互作用の再現性を向上する。

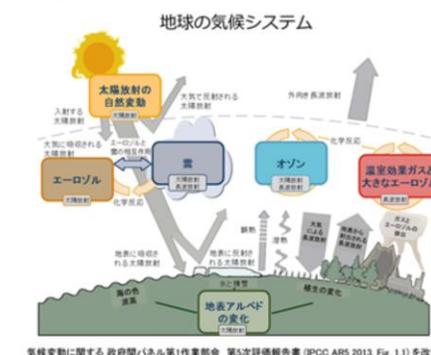
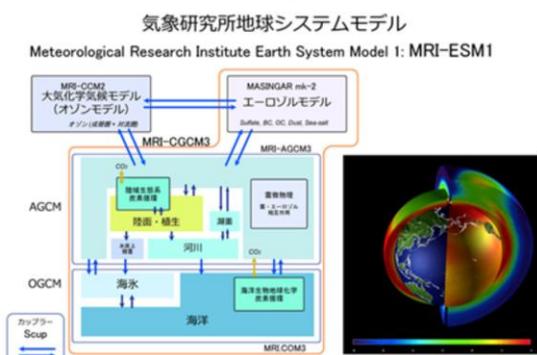


第1章 基礎編

1.4.4 物質輸送モデル

物質輸送モデルとは

- 大気中のある物質の動態を監視・予測するために、当該物質の発生・輸送・消滅過程等をシミュレートする数値モデル
- 大気化学過程から気候/気象場へのフィードバックを考慮する数値モデル（オンラインモデル）も存在
 - ・ 化学気候/気象モデル (Chemistry Climate/Meteorology Model)
 - ・ 地球システムモデル (Earth System Model)

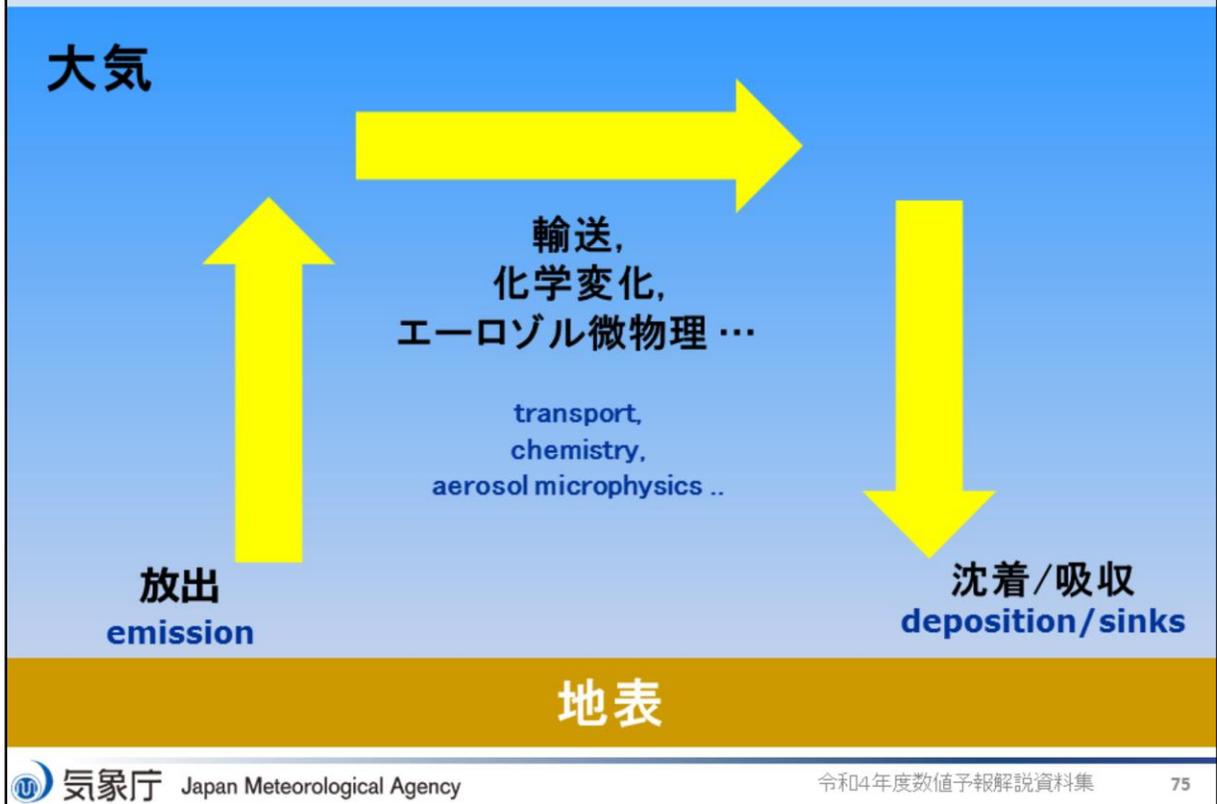


物質輸送モデルとは、大気中のある物質の動態を監視・予測するために、当該物質の発生・輸送・消滅過程等をシミュレートする数値モデルである。着目する物質の中には、大気中で化学反応を起こして変化するもの（化学物質、エアロゾルやオゾン等）もあり、これら化学過程を組み込んだ物質輸送モデルを、化学輸送モデル、大気化学モデルなどと呼ぶ。これら物質は地球の気候システムを通して数カ月先の季節予報や、より長期の気候変動に影響を及ぼす。この大気化学過程が気候・気象場に及ぼす影響を考慮する数値予報モデルが化学気候/気象モデル、地球システムモデルなどである。

化学輸送モデルは、大気質モデル air quality model とも呼ばれ、大気汚染予測などにも用いられる。オフラインモデルでは、あらかじめ気象モデルで解かれた気象場データを、大気質モデルにインプットして予測する。オンライン(2-way)モデルでは、気象モデルと大気質モデルは一体となっており、大気微量成分の変動の影響を気象モデルは考慮することができる。

化学気候モデルとは、従来の気候モデルに化学過程を追加した大気(+陸面、海洋)モデルである。地球システムモデルとは、化学気候モデルに加えて、陸圏から生物圏までを計算対象としたモデルである。

大気中の物質輸送過程

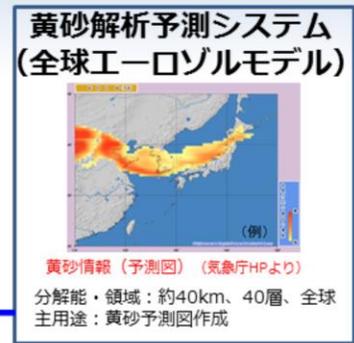
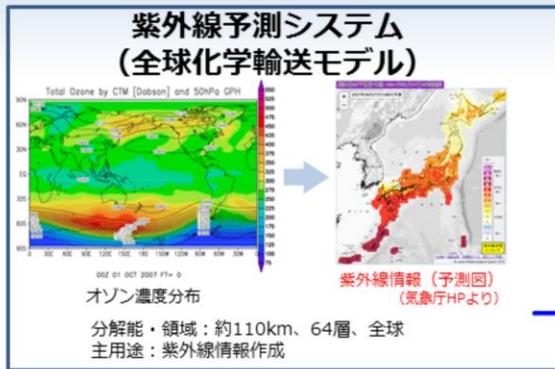


大気中の物質輸送過程は主に放出、輸送、化学変化、エーロゾル微物理等、沈着/吸収で構成される。以下に各項目について例を示す。

- ・放出(排出)の例: 砂漠からの黄砂の舞い上がり、海面付近の波しぶきに含まれる海塩粒子、人間活動による大気汚染物質(炭素性や硫黄性の化合物、NO_xなどのオキシダント誘発物質)排出
- ・輸送過程: 風による移流、大気中での拡散、重力沈降
- ・化学変化: 各種物質ごとに異なる、他の物質との化学的相互作用: 変質、消失、発生を伴う
- ・エーロゾル微物理: エーロゾル粒子の核形成(nucleation)、成長(growth)、凝集(coagulation)、除去・洗浄(deposition & scavenging)
- ・乾性沈着: 大気中粒子の地上到達、気体状物質の地表面での吸収
- ・湿性沈着: 大気中粒子・気体状物質が降水に捕捉・吸収され、地表面に到達

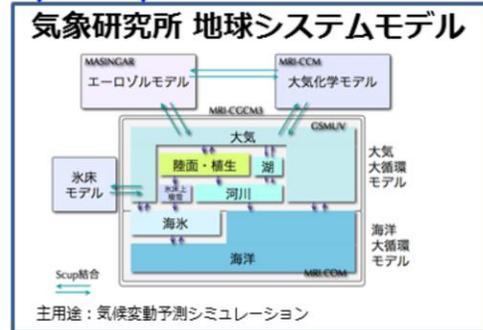
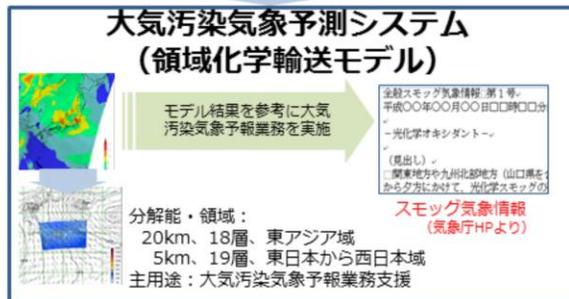
輸送過程の基本法則は「連続の式(質量保存の法則)」(大気の数値予報では、運動方程式・連続の式・熱力学方程式・状態方程式が基本法則)。

当庁の主要な物質輸送モデル①



コンポーネント
モデル

ネスティング



気象庁 Japan Meteorological Agency

令和4年度数値予報解説資料集

76

気象庁では、物質輸送モデルを用いて地球環境や気候に影響する黄砂、紫外線、二酸化炭素などの監視と予測を行っている。

「全球エアロゾルモデル」は、大陸などでの黄砂の舞い上がり、風による移動、雨などによる地上への降下を考慮して、大気中の黄砂の量や分布を解析・予測し、黄砂情報の作成に利用される。

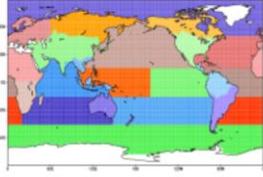
「全球化学輸送モデル」は、オゾンやその変化に関わる物質の風による移動、地上への降下、化学物質や光による反応を通じた変化などを考慮して、上空や地上付近のオゾン濃度を予測し、紫外線情報やスモッグ気象情報作成の支援に用いる「領域大気汚染気象予測モデル」の境界値に利用される。

また、全球化学輸送モデルと、全球エアロゾルモデルは、気象研究所の地球システムモデルのコンポーネントモデルとして組み込まれているものである。

当庁の主要な物質輸送モデル②

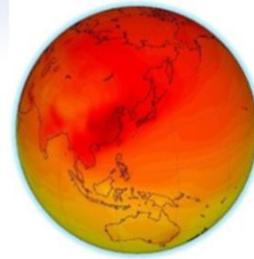
二酸化炭素輸送モデル・逆解析

分解能・領域：約110km、60層、全球
主用途：二酸化炭素分布情報作成



二酸化炭素の吸排出量を分割領域毎に解析し、それをもとに温度分布を計算

逆解析



330 340 350 360 370 380 390 400 410 420 430 440 (ppm)
二酸化炭素分布情報 (気象庁HPより)

移流拡散モデル (ラグランジュモデル)

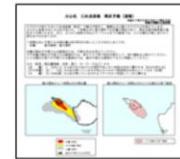
全球版移流拡散モデル

主用途：
航空路火山灰情報 (VAA)
放射性物質拡散シミュレーション*

環境緊急対応 (EER) WMO地区特別気象センター (RSMC) として、原子力発電所の事故等発生時に、国際原子力機関 (IAEA) の要請に応じて、大気中に放出された有害物質の拡散予測情報を提供

メソ版移流拡散モデル

主用途：
降灰予報
航空路火山灰情報 (一部)
大気汚染気象予報業務支援



降灰予報(速報) (気象庁HPより)

「二酸化炭素輸送モデル」は、世界の大気中の二酸化炭素の分布状況を図示する二酸化炭素分布情報の作成に利用される。

「移流拡散モデル」は、航空路火山灰情報 (VAA: Volcanic Ash Advisory) や放射性物質拡散シミュレーション、降灰予報、大気汚染気象予報業務支援に利用される。



第1章 基礎編

1.5 アンサンブル予報

数値予報の誤差(不確実性)

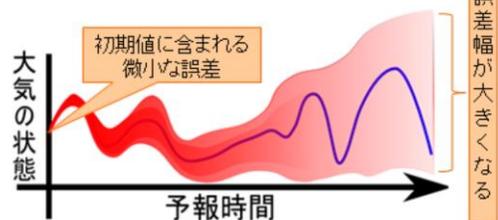
- 大気の振る舞いは**時間方向**、**空間方向**の**偏微分方程式**で記述される。
- **方程式とその数値解法(モデル)**、**初期条件**、**境界条件**が分かれば未来の大気状態を予測できるが、次の問題がある。

初期条件・境界条件: 真の初期値・境界値を知ることはできない。
(観測値の誤差、時間・空間的な制約、親モデルの誤差など)

モデル: 完全な方程式を知ることはできない。
仮に知り得たとしても数値的に解くことで誤差が生じる。
(物理過程のモデル化の不完全性、離散化による誤差など)

大気のカオス的性質: 初期値の微小な誤差が時間とともに増大する。

- 数値予報の結果にどの程度の誤差が含まれるか、一つの決定論的予報では判断できない。



大気の振る舞いは時間・空間に関する非線形偏微分方程式で記述されるため、未来の大気状態を予測するには解くべき方程式とその数値解法、そして初期条件および境界条件が必要となる。これらが正確に与えられるほど、精度の良い予測が可能になると期待されるが、現実には次に挙げるような問題がある(河野 2019; 本田・室井 2018)。

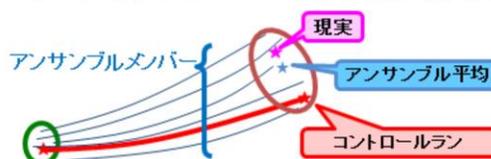
初期条件は、理想的には観測によって得られると期待される。しかし観測されたデータそのものが誤差を含むことや時間・空間的に連続な観測ができないことなどから、真の値を知ることはできない。また、領域モデルでは境界条件として、より広い予報領域を持つ数値予報モデルの予報値を用いるが、そのモデルの予報値にも誤差が含まれる。したがって数値予報に用いる初期値や境界値には必ず誤差が含まれる。

大気の振る舞いは様々な過程が影響を及ぼしあっているために、それを記述する方程式は非常に複雑なものであり、自然を完璧に記述する方程式は知られていない。仮に完全な方程式を知ることができたとしても、方程式を解析的に解くことができないため数値的に解くほかなく、その際には離散化などに起因する誤差が必ず生じる。また大気を持つカオス的性質(初期値鋭敏性)により、初期値に含まれる誤差が微小であったとしても、図のように予報時間が長くなるにしたがって予報誤差が急速に増大し、数値予報の精度を左右するまでに発達することが知られている。

これらの様々な要因によって、数値予報の結果には必ず誤差が含まれ、数値予報を利用する際には予測に不確実性があることを考慮しなければならない。しかし予報誤差の成長速度は大気の状態に大きく依存するため、一つの数値予報の結果(決定論的予報)から予報誤差の大きさを事前に知ることはできない。

アンサンブル予報

- アンサンブル予報とは
 - 複数の数値予報の集合(アンサンブル)によって予測とその不確実性を事前に推定する手法
 - 初期値などに小さな摂動(揺らぎ)を与えて複数の数値予報の集合(アンサンブル)を作成する。
 - それぞれの予測をアンサンブルメンバー(または単にメンバー)、摂動を与えていないメンバーをコントロールランと呼ぶ。
 - 解析誤差、数値予報モデル、境界値の不確実性を考慮する必要がある。
- アンサンブル予報の利点
 - アンサンブルメンバーのばらつきによって予測の不確実性(信頼度)が推定できる。
(ばらつきが小さいと予測の信頼度が高いと期待される、など)
 - 可能性のある複数のシナリオが考慮できる。
(コントロールランは大雨を予測していないが他のメンバーでは予測がある、など)



数値予報の結果に含まれる予報誤差(予測の不確実性)を事前に推定するための手法にアンサンブル予報がある。アンサンブル予報では、予報の初期値などに意図的に小さな摂動(揺らぎ)を与えることで初期値などの不確実性を表現し、摂動を加えた複数の数値予報の集団(アンサンブル)を得る。それぞれの数値予報モデルの予測をアンサンブルメンバー(または単にメンバー)、摂動を加えていないアンサンブルメンバーをコントロールランと呼ぶ。アンサンブル全体は摂動で考慮する不確実性の範囲内で実現しうる大気状態の集団であり、未来の大気状態を確率的に把握することができる。

それぞれのメンバーは解析誤差等を考慮した数値予報モデルの予測であり、メンバーのばらつき具合によって予測の不確実性(信頼度)を見積もることができる。例えば、ある予報時間でメンバーのばらつきが大きい場合、解析値や物理過程に含まれる微小な誤差が時間発展とともに増大しやすい大気状態であることを意味し、予測の不確実性が大きいことが示唆される。

アンサンブル予報では、解析誤差として初期値に与えた摂動が予報誤差として成長しうる範囲で複数の予測が得られる。単一の決定論的予報(コントロールラン)では予測が外れてしまう場合でも、アンサンブル予報では現実をメンバーの集団の中に確率的に捕捉することができることも利点の一つである。

気象庁のアンサンブル予報システム における代表的な摂動作成手法

- 初期摂動作成手法
 - 初期値に含まれる不確実性を表現する手法。
 - データ同化で得られた解析値に摂動(揺らぎ)を与えて複数の初期値を用意し、数値予報モデルを実行することにより複数の予報値を得る。
 - 摂動は解析誤差(初期値に含まれる不確実性)を表現している。
- 確率的物理過程強制法 (Stochastically Perturbed Physical Tendencies; SPPT法)
 - 数値予報モデルの不確実性のうち、物理過程の不確実性を表現する手法。
 - パラメタリゼーションで表現できない不確実性を確率的な摂動項で表現。物理過程の時間変化項にランダムな摂動を加える。
 - 時間積分の各ステップで、物理過程の時間変化項に応じてランダムな摂動を足しこむ。
- 海面水温摂動
 - 下部境界値のうち、海面水温の不確実性を表現する手法。

気象庁で運用しているアンサンブル予報システムで用いられている摂動作成手法をいくつか紹介する。

初期値の誤差(解析値の誤差)については、微小な摂動を初期値に意図的に加えることにより表現できる。初期値の誤差は場所によって大きく異なり、観測のみから特定することはできない。また摂動が時間とともに成長する誤差を表現していることが望ましいが、ランダムに摂動を加えただけでは、予測の不確実性を正しく考慮することは難しい。そこで、成長する誤差を合理的に取り出す必要がある。そのための手法として、全球アンサンブル予報システム(GEPS)で用いられている「特異ベクトル法(Singular Vector: SV法)」がある。

数値予報モデルの不完全性については、その精度やインパクトから考えて、数値予報モデルの物理過程に着目した考慮が行われることが多い。確率的物理過程強制法(Stochastically Perturbed Physical Tendencies; SPPT法)(Buizza et al. 1999; 米原 2010)は、数値予報モデルの物理過程のもつ不確実性を扱う手法の一つであり、全球アンサンブル予報システムで導入されている(山口 2017)。これは予報の時間ステップ毎において、物理過程で計算される気温、比湿、風の時間変化量に対して、時間・空間相関が考慮された乱数をかけたものを摂動として足しこむ手法である。

境界条件の不確実性を考慮するために、下部境界条件の1つである海面水温に摂動を与える手法(太田・堀田 2016)がある。

気象庁のアンサンブル予報システム

- 大気モデルのアンサンブル予報システムとして、全球アンサンブル予報システム(GEPS)、メソアンサンブル予報システム(MEPS)を運用。
- 波浪モデルのアンサンブル予報システムとして、波浪アンサンブル予報システムを運用。
- 大気海洋結合モデルのアンサンブル予報システムとして、季節アンサンブル予報システム(季節EPS)を運用。

	全球アンサンブル予報システム	メソアンサンブル予報システム	波浪アンサンブル予報システム	季節アンサンブル予報システム
水平解像度	約27km(18日先まで) 約40km(18日以降)	5km	約55km	大気: 約55km 海洋: 約25km
予報領域	地球全体	日本付近	極域を除く地球全体 ※2	地球全体
初期時刻	00,06,12,18UTC※1	00, 06, 12,18UTC	00,12UTC	00UTC
予報時間	132時間(06,18UTC)※1 264時間(00UTC) 18日間(12UTC) 34日間(12UTC火・水)	39時間	264時間	240日間(7カ月間)
メンバー数	51メンバー	21メンバー	51メンバー	5メンバー

※1 06,18UTCの気象業務支援センター経由でのデータ提供は台風の条件を満たす場合のみ。

※2 南緯75度～北緯75度、西経180度～東経180度。



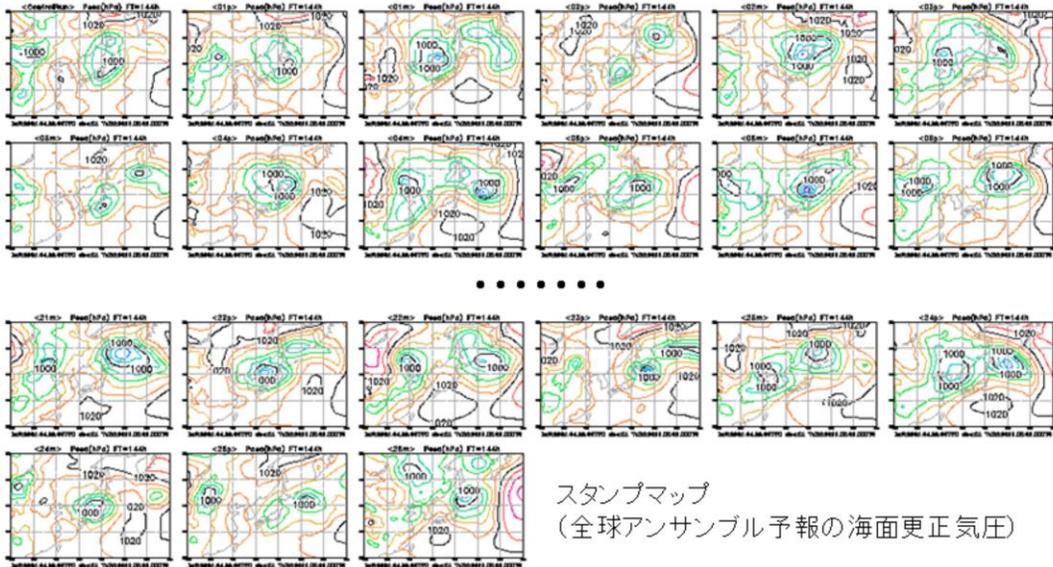
気象庁では、全球アンサンブル予報システム、メソアンサンブル予報システム、波浪アンサンブル予報システム、季節アンサンブル予報システムを運用している。これらのアンサンブル予報システムを用いて、決定論予報だけでは得られない予測の(不)確実性に関する情報を提供している。表にはアンサンブル予報システムの主な仕様を示している(主に外国支援目的に使用しているものを除く)。

※1 全般海上予報区(赤道-60° N、100° -180° E)内に台風が存在する、または同区内で24時間以内に台風になると予想される熱帯低気圧が存在する場合、または、全般海上予報区外に最大風速34ノット以上の熱帯低気圧が存在し、24時間以内に予報円または暴風警戒域が同区内に入ると予想された場合。

アンサンブル予報の代表的なプロダクト スタンプマップ

- 各メンバーの予測を表示した図。

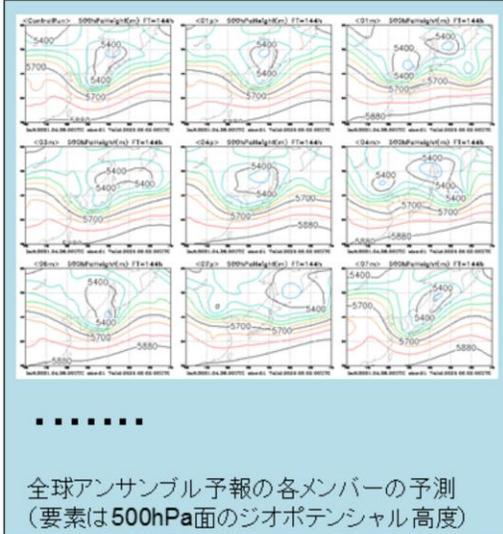
- 詳細な予測結果の確認や分析には便利だが、各メンバーの予測結果を一つ一つ確認して判断するのは容易ではない。何らかの加工を行ったプロダクトの利用が重要。



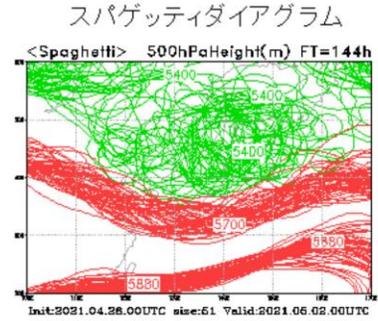
図は全球アンサンブル予報の各メンバーの海面更正気圧を表示したスタンプマップを示している。アンサンブル予報では複数の予報結果が得られるが、それぞれのメンバーの予報値は数値予報モデルを実行した結果であり、予報値は物理量の間で整合したものになっている。スタンプマップを活用すると、メンバー間での予測結果の違いを詳細に確認してその要因の分析なども行うことができる。しかしアンサンブル予報ではメンバー数に応じて予測結果が増えるため、限られた時間内に行わなければならない予報業務などにおいて一つ一つを隈なく見て判断するのは容易ではない。統計的な処理などアンサンブル予報の結果を加工したプロダクトを利用し、効率的に予測結果を把握することも重要となる。

アンサンブル予報の代表的なプロダクト スパゲッティダイアグラム

- 特定の等値線を全メンバーについて重ね描きした図。
 - メンバー間における予測の違いやばらつきが大きい場所を、一枚の図で比較的容易に確認できる。



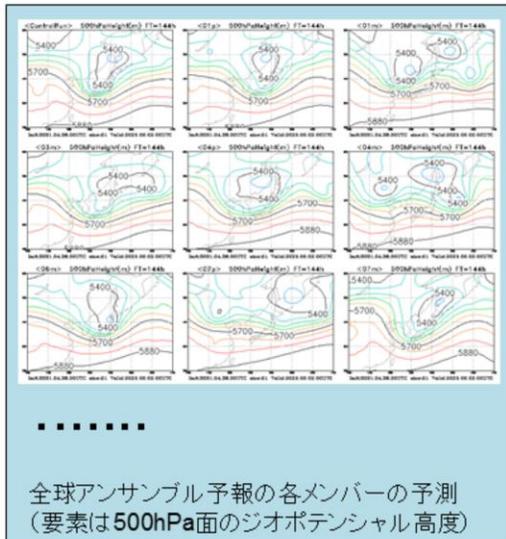
重ね描き



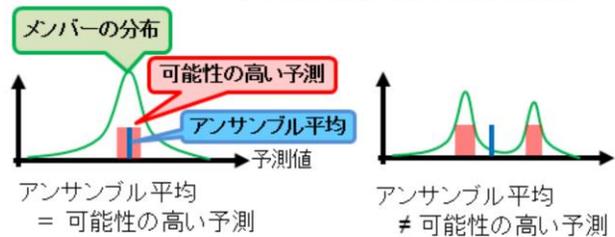
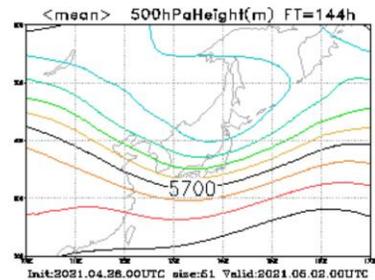
左図は全球アンサンブル予報の予測値(500hPa面ジオポテンシャル高度)を示している。各メンバーの予測値を、右図のように特定の等値線について一枚の図に重ね描きしたものをスパゲッティダイアグラムと呼ぶ。スパゲッティダイアグラムでは、メンバー間における予測の違いや、メンバーのばらつき具合を一枚の図で確認できる。例えばこの図からは、日本付近に深いトラフを表現しているメンバーが多いが、その深さについてばらつきが大きいことが読み取れる。

アンサンブル予報の代表的なプロダクト アンサンブル平均

- 全メンバーの予測を平均したもの。
 - 決定論的予報よりも確からしい予測となっていることが期待される。



アンサンブル平均



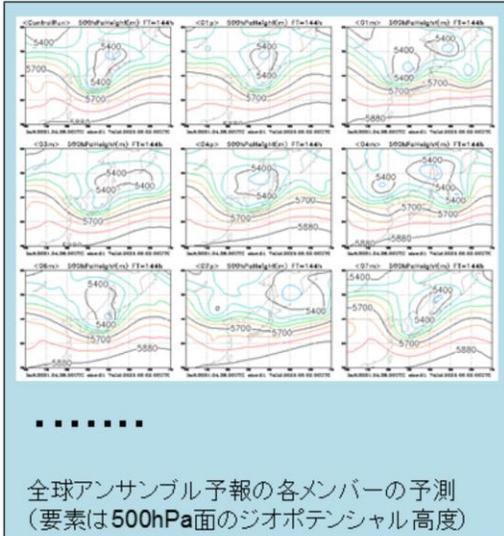
全メンバーの予測を平均したものをアンサンブル平均と呼ぶ。一般にはアンサンブル平均の二乗平均平方根誤差 (Root Mean Square Error, RMSE) はコントロールランと比較して小さいことが期待される (高野 2002)。

アンサンブル予報ではメンバーの分布は確率分布を表していて、分布がピークとなる予測値が出現する可能性の高い予測となっている。メンバーが正規分布する場合にはアンサンブル平均が最も可能性の高い予測となるが、メンバーが正規分布しない、例えば複数のピークを持つ分布の場合はアンサンブル平均と最も可能性の高い予測は一致しない。このためアンサンブル平均だけで判断するのではなく、メンバーの分布も合わせて確認する必要がある。

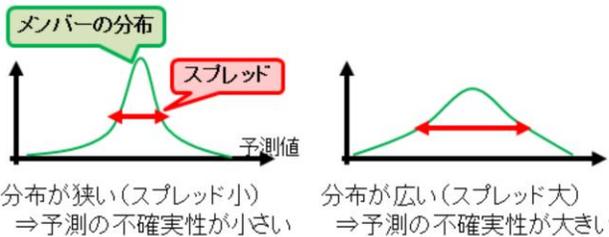
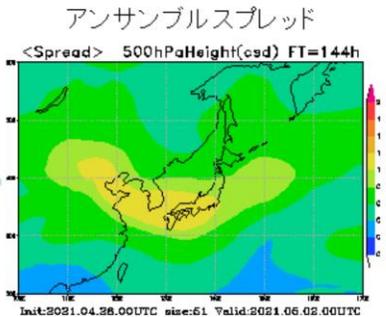
またアンサンブル平均は統計量であるため、数値予報モデルの予報値のように物理量の間で整合した値にはなっていないことにも注意が必要となる。

アンサンブル予報の代表的なプロダクト アンサンブルスプレッド

- 統計学の標準偏差に対応する量。
 - 予測の不確実性の大きさ(信頼度)を表している。



統計処理
(標準偏差)

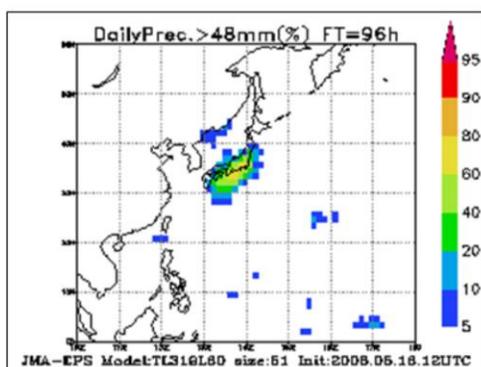


全メンバーの予測について標準偏差を求めたものをアンサンブルスプレッド(または単にスプレッド)と呼ぶ。スプレッドはメンバーのばらつき具合を表す量で、スプレッドの大きさから予測の不確実性の大きさを判断できる。一般にスプレッドの大きさはアンサンブル平均のRMSEと同程度になることが期待される(高野 2002)ことから、スプレッドが大きいほど予測の不確実性が大きい(信頼度が低い)と考えられる。なお、スライドに示したアンサンブルスプレッドの図は気候学的変動量により規格化されている。

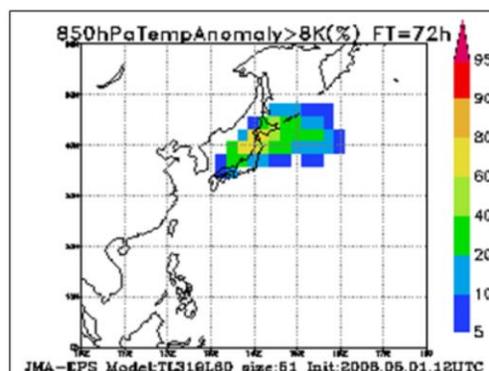
メンバーが狭い範囲に分布している場合はアンサンブル予報のスプレッドが小さく、アンサンブル平均と近い値が出現すると期待されるが、メンバーの分布が広がっている場合はスプレッドが大きく、アンサンブル平均から離れた値が出現する確率が高くなる。

アンサンブル予報の代表的なプロダクト 確率分布図

- 全メンバーに対して特定の現象が予測されるメンバーの割合。
 - 注目している現象について予測の確からしさを把握するために用いられる。



24時間降水量が48mm以上となる確率



850hPa面気温の偏差が8°C以上となる確率

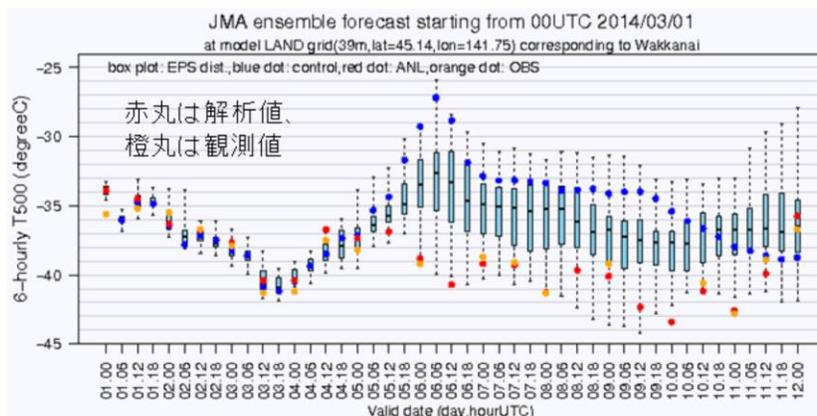
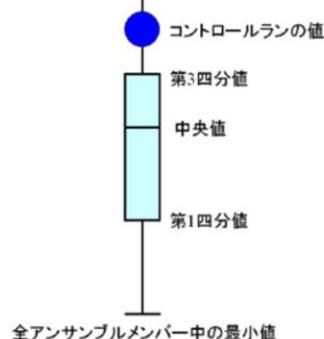
全メンバーに対して、特定の現象が予測されるメンバーの割合を表した図を確率分布図と呼ぶ。特に、ある閾値以上の現象が発生する確率(超過確率)を表す図を超過確率分布図と呼び、注目している現象について予測の確からしさを把握するためによく用いられる。

2枚の図はそれぞれ24時間降水量が48mm以上となる確率、850hPa面での気温の気候値からの偏差が8°C以上となる確率を表した確率分布図であり、超過確率が高いほど予測が確からしいことを表している。

アンサンブル予報の代表的なプロダクト 箱ひげ図 (EPSgram)

- アンサンブル予報の特定の地点での時系列図。
 - メンバーの中央値、最大値、最小値、第1四分位点、第3四分位点の時系列図。
 - 第1四分位点と第3四分位点の間を箱と呼ぶ。

全アンサンブルメンバー中の最大値



ある地点での500hPa面の気温についての箱ひげ図

特定の地点についての、メンバーの中央値、最大値、最小値、第1四分位点、第3四分位点の時系列図を箱ひげ図 (EPSgram) と呼ぶ。各予報時間でのアンサンブルプレッドの情報やその変化傾向が確かめられる。また、コントロールランの値も合わせて描画することで決定論的予報の信頼度の情報も合わせて得られる。

図は箱ひげ図の例を示している。この図からは予報期間のはじめはメンバー間のばらつきが小さく、中盤で急速に大きくなっていることが読み取れる。またこの図では解析値と観測値を合わせて描画していて、実況の観測値がメンバーの予測の範囲内に概ね捕捉できていることが分かる。

参考文献

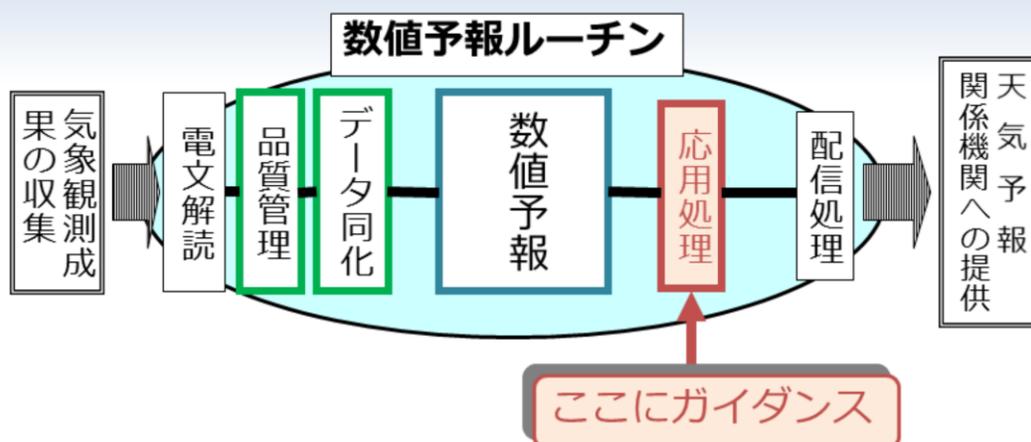
- 太田洋一郎, 堀田大介, 2016: 海面水温摂動の開発. 数値予報課報告・別冊第62号, 気象庁予報部, 77-84.
- 河野耕平, 氏家将志, 國井勝, 西本秀祐, 2019: メソアンサンブル予報システム. 令和元年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 1-15.
- 高野清治, 2002: アンサンブル予報の利用技術. 気象研究ノート, **201**, 73-103.
- 本田有機, 坂本雅巳, 藤田匡, 室井ちあし, 2018: 数値予報モデル. 平成30年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 84-89.
- 本田有機, 室井ちあし, 2018: 概要. 平成30年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 66-71.
- 山口春季, 2017: 全球アンサンブル予報システムの導入. 平成29年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 35-41.
- 米原仁, 2010: 週間アンサンブル予報へのモデルアンサンブル手法の導入. 平成22年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 62-65.
- Buizza, R., M. Miller, and T. N. Palmer, 1999: Stochastic representation of model uncertainties in the ECMWF ensemble prediction system. *Quart.J. Roy. Meteor. Soc.*, **125**, 2887-2908.



第1章 基礎編

1.6 ガイダンス

数値予報の応用処理



応用処理の例

- 可視化 (Web、FAX図作成)
- データ切り出し (ユーザー向けファイル (GPV) 作成)
- 予報要素への翻訳、統計的な補正 → **ガイダンス**

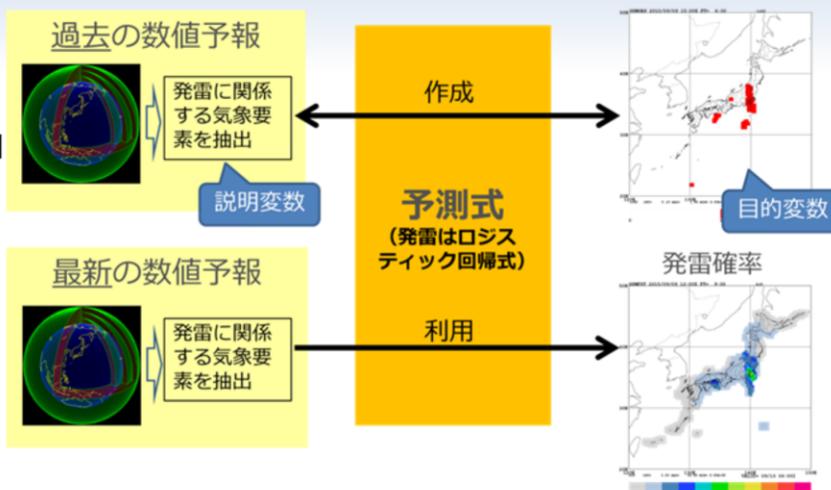
数値予報の後続に位置し、数値予報の結果を利用した各種プロダクトの作成を行う処理を応用処理という。数値予報の結果は膨大な数値データの集まりであり、そのままの状態では利用することは難しい。そこでユーザーの利便性向上のための様々な処理、例えば、数値予報モデルの結果を図に描画する可視化、必要な領域や要素などを抽出するデータ切り出し、予報要素への翻訳や統計的な補正などが応用処理として行われる。これらのうち、最後に挙げた「予報要素への翻訳や統計的な補正」を行う処理およびその結果作成される予測資料をガイダンスと呼ぶ。

天気予報や注意報・警報・情報を作成するためには、予報に影響のある要素を可視化した図を閲覧し、今後の気象状況の推移を検討する必要がある。限られた時間の中で気温や降水量などの多くの要素を迅速に発表するためには、図だけでなく精度よく量的な予測値を直接示す客観的な予測資料が必要であることから、ガイダンスが作成され、配信されている。

ガイダンス

ガイダンスとは

- 「数値予報を用いた客観的・統計的翻訳」
- 過去の数値予報と実況から統計手法等を用いて予測式を作成し、それを最新の数値予報の結果に適用して予測する。



ガイダンスの役割

- 数値予報が予測していない要素を作成する
- 数値予報の系統誤差を補正する

ガイダンスは、防災情報や天気予報等の作成を行う上で重要な基本資料

ガイダンスは「数値予報を用いた客観的・統計的翻訳」(気象庁予報部 1986)とも記述されるように、過去の数値予報と実況から統計手法等を用いて予測式を作成し、それを最新の数値予報の結果に適用することで、客観的・定量的な予測を行うプロダクトである。

ガイダンスには2つの役割がある。一つは、発雷確率や乱気流、視程など、数値予報では直接予測しないが、天気予報、警報・注意報、飛行場予報などの発表に必要な気象要素を作成することである。もう一つは、気温や降水量など、数値予報でも予測するが、その予測値を補正し、より精度を向上させることである。

ガイダンスは防災情報や天気予報等の作成を行う上で重要な基礎資料となっている。

。

現在のガイダンスで用いられている手法

逐次学習

- 入出力関係の変化（モデル変更、季節変化等）に対応可能
- ✗ 予測特性に不適切な変化が起きる可能性、開発・運用のコストが大きい

一括学習

- 予測特性が安定、予測根拠がわかりやすい、開発・運用コストが小さい
- ✗ モデル変更時に係数再作成が必要になることがある

ニューラルネットワーク

- 1, 3時間最大降水量、最小湿度など

説明変数と目的変数の複雑な関係にも対応できるが、ブラックボックス

カルマンフィルタ

- 気温、風、降水量など

入出力関係が変わるものに対し学習が速い（学習速度はパラメタの設定や現象の頻度に依存）

ロジスティック回帰

- 発雷確率など

確率に利用、開発が容易

線形重回帰

- 24時間最大降水量など

開発が容易

診断手法

- 視程（格子形式）など

過去の研究や目的変数の定義に基き予測式を作成

※ ロジスティック回帰と線形重回帰は逐次学習型としても利用可能、ニューラルネットワークは係数固定型としても利用可能。



現在の気象庁のガイダンスの作成には、ニューラルネットワーク、カルマンフィルタ、ロジスティック回帰、線形重回帰、および診断法が用いられている。ニューラルネットワークは、神経細胞（ニューロン）の機能の一部をモデル化した機械学習アルゴリズムである。入力値（説明変数）と出力値（目的変数）の関係が非線形である場合にも適用できるという特徴がある。現在のAIに利用されているディープニューラルネットワークは、中間層を多層化したニューラルネットワークである。ニューラルネットワークは説明変数と目的変数の複雑な関係を表現することができるが、その反面、なぜそのような予測になったのか解釈が困難（ブラックボックス）であるという問題がある。ニューラルネットワークは1, 3時間最大降水量、最小湿度などに利用されている。カルマンフィルタは時系列解析の手法の一つであり、ガイダンスにおいては説明変数と目的変数を結びつける係数を逐次学習する手法として利用されている。カルマンフィルタの予測式は線形形式であり、目的変数と説明変数が線形関係の場合に利用できる。カルマンフィルタは気温、風、降水量などに利用されている。ロジスティック回帰は、雷の有無などのように、現象を2つのクラスに分類する問題に用いられる統計手法の一つである。ロジスティック回帰により得られる予測値は現象の発生確率として考えることができるため、ロジスティック回帰は確率型のガイダンスである発雷確率などに用いられている。線形重回帰は、説明変数と目的変数の間に線形関係がある場合に用いられる手法で、予測結果の解釈や開発が容易であるという特徴をもつ。線形重回帰は24時間最大降水量などに利用されている。診断手法は、過去の研究や目的変数の定義に基づいて予測式を決定し、ガイダンスの予測値を算出する手法である。ほかの手法と比べて、開発において観測や数値予報モデルの長期間のデータが不要で、観測密度に起因する予測精度の不均一性がなく、メリハリの利いた予測が可能、という特徴がある。診断手法は視程ガイダンス（格子形式）などに用いられている。

過去のデータを用いて係数を一括で学習し、運用においては係数を固定して利用する手法を一括学習と呼び、新しく観測データを入力することに係数を更新する学習方法を逐次学習と呼ぶ。逐次学習型のガイダンスと一括学習型のガイダンスを利用面・運用面から優劣をつけると以下の通りになる（優劣を不等号で表す）。

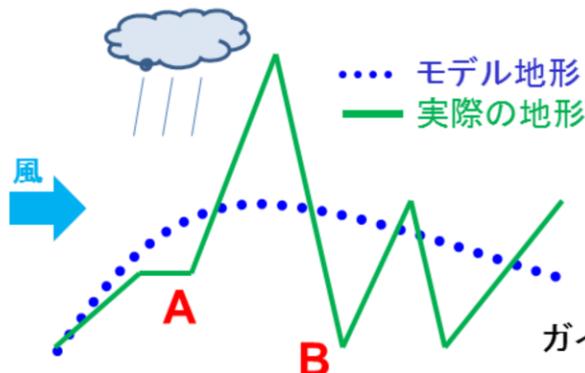
- モデル更新への対応： 逐次 > 一括
- 季節変化への対応： 逐次 > 一括
- 観測所の移設・新設への対応： 逐次 > 一括
- 予測特性の把握： 逐次 < 一括
- 予測の安定性： 逐次 < 一括
- 開発・運用コスト： 逐次 < 一括

カルマンフィルタは基本的には逐次学習のみで利用され、診断手法は一括学習のみで利用されるが、ニューラルネットワーク、ロジスティック回帰、線形重回帰は、逐次学習、一括学習のいずれも利用可能である。気象庁のガイダンスでは、ニューラルネットワークには主に逐次学習が、ロジスティック回帰と線形重回帰には一括学習が用いられている。各手法について詳しくは、工藤ほか（2018）を参照。

ガイダンスができること、できないこと

できること: 系統誤差の補正

例: モデル地形と実際の地形の違いによる誤差の補正



実際の地形では

A: 急斜面で地形性の降水が多い

B: 標高が低く、気温が高い

モデルの地形では

A: 地形がなだらかで降水が少ない

B: 標高が高く、気温が低い

ガイダンスではこれらの誤差を補正できる

できないこと: (系統誤差ではない)ランダム誤差の補正

例えばモデルが前線の予測位置を外している場合、前線の位置をガイダンスで修正して気温や風を求めることはできない

ガイダンスは数値予報を統計的に補正するが、補正可能な誤差は系統誤差(場所ごとや対象時刻ごとに統計検証した際の平均的な誤差)のみである。数値予報の系統誤差としては、

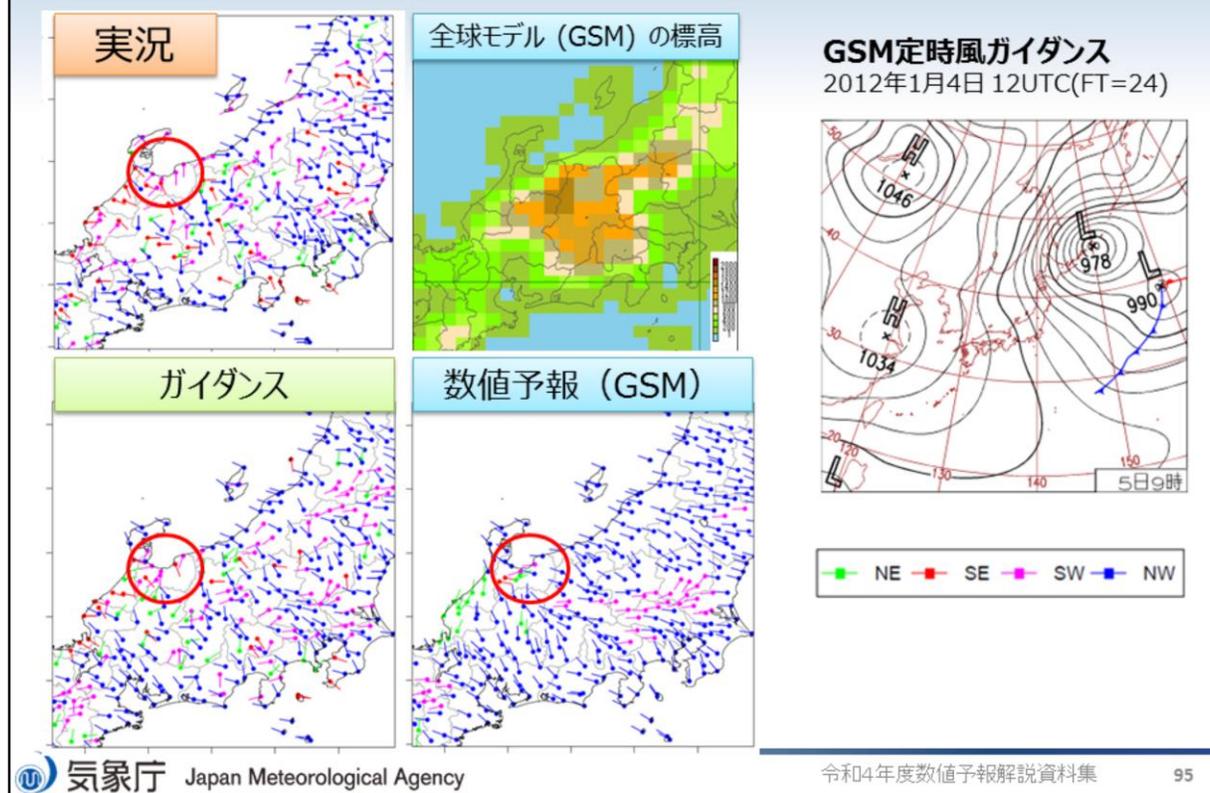
1. 数値予報モデルの地形と実際の地形の違いに起因する誤差
2. 数値予報モデルの海陸分布と実際の海陸分布の違いに起因する誤差
3. 数値予報モデルの不完全性や空間代表性に起因する誤差

などがある。ここでは1の「モデルの地形と実際の地形の違いに起因する誤差」の補正例を図に示す。

実際の地形とモデルの地形を比較すると、モデルの地形は青点線のようになだらかになっている。このため、図で左から風が吹いているとすると、A地点では、数値予報の降水は実際の降水よりも弱く予測される傾向がある。またB地点では実際の地形では谷となっているが、数値予報モデルでは谷が表現されていないため、逆転層がない限り、数値予報の地上気温は実況よりも低くなる。

系統誤差ではない誤差(ここではランダム誤差と呼ぶ)はガイダンスで補正することはできない。ランダム誤差の要因は様々であるが、例えば数値予報の前線や低気圧等の擾乱の位置ずれ、擾乱の発生・発達の外れによる誤差がある。モデルが前線の予測位置を外している場合、ガイダンスは前線の位置を修正して気温や風を求めることはできない。

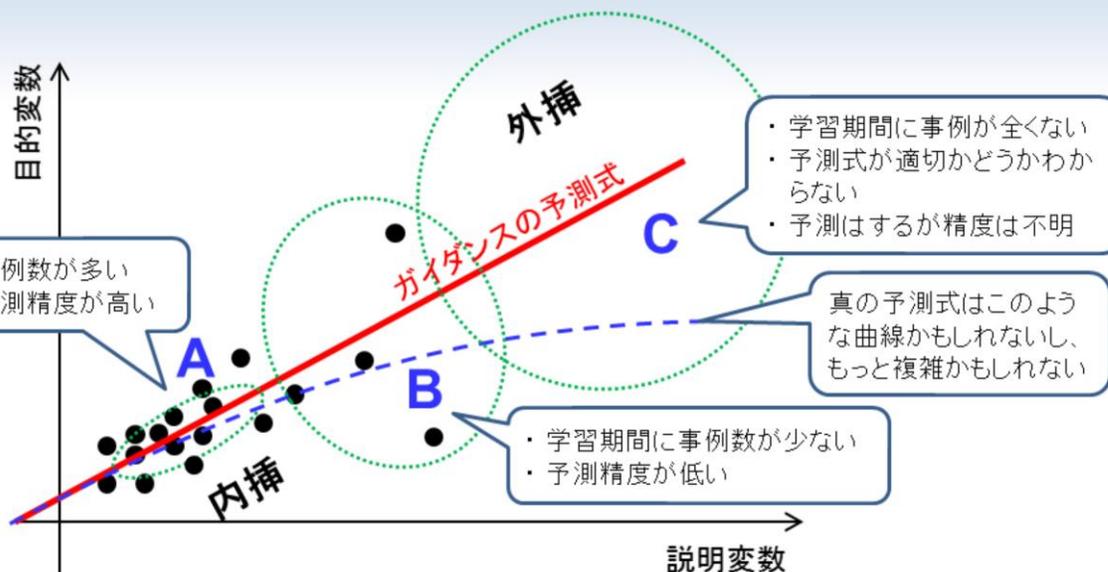
粗いモデル地形に伴う系統誤差の補正例



ここでは地形による系統誤差をガイダンスが適切に補正した例としてGSM定時風ガイダンスの予測事例(2012年1月5日の事例)を示す。

GSMの地形は右上図に示したように粗いため、GSMの風は一様に近い滑らかな風を予測している(右下図)。しかし実況では実際の地形を反映した複雑な風となっている(左上図)。ガイダンス(左下図)では数値予報を適切に補正し、実況の風に近づけていることが分かる。例えば富山県(図中の赤丸)では、冬型の気圧配置の際に地形の影響で南風になることが多いが、GSMでは滑らかな地形のために西から北西風を予測する系統誤差がある。ガイダンスはこれを補正して南風を予測していることがわかる。

統計手法でできるのは過去事例の内挿



- ・主にAで学習した予測式をBやCにも適用している
- ・学習期間中にほとんど起きたことがない現象(大雨、強風など)は予測精度が低い
- ・学習期間中に一度も起きたことがない現象に対しては適切な予測はできない

統計手法を用いたガイダンスでは、過去の予測(説明変数)と実況(目的変数)から作成した関係式を用いて未来の予測を行うが、実況は偏った頻度分布をしている場合が多い。例えば降水量や風速では、降水量が少ない(または無い)事例や弱風の事例が非常に多く、大雨や強風の事例は少ない。このように実況の頻度分布に偏りがある場合、ガイダンスは頻度が多い事例で学習した予測式を頻度が少ない(または全くない)領域まで適用することで予測値を求めていることに注意が必要である。

図の例では、Aの領域では事例数が多いが、Bの領域では事例数が少なく、Cの領域では事例が全くない状況になっている。Aの領域に対する予測は過去事例の内挿であり、統計手法による予測精度は一般的に高い。これに対してBの領域では学習期間に事例数が少ないため予測精度は低くなる。またCの領域では学習期間中に事例が一つも存在せず、ガイダンスの予測(赤実線)はAやBのデータからの外挿になっており、過去データから予測精度を検証することもできない。真の予測式は図の青点線で示したような曲線かもしれないし、もっと複雑な曲線かもしれないが、過去データからはそれを判別することはできない。

この例のように、学習期間中にほとんど起きたことがない現象に対しては、統計手法を用いたガイダンスは一般に予測精度が低く、また、一度も起きたことがない現象に対しては適切な予測を行うことはできない。

参考文献

- 気象庁予報部, 1986: 短期間予報用ガイダンスの解説, 予報技術資料第35号.
- 工藤淳, 後藤尚親, 高田伸一, 2018: ガイダンスの作成技術. 数値予報課報告・別冊第64号, 気象庁予報部, 19-85.

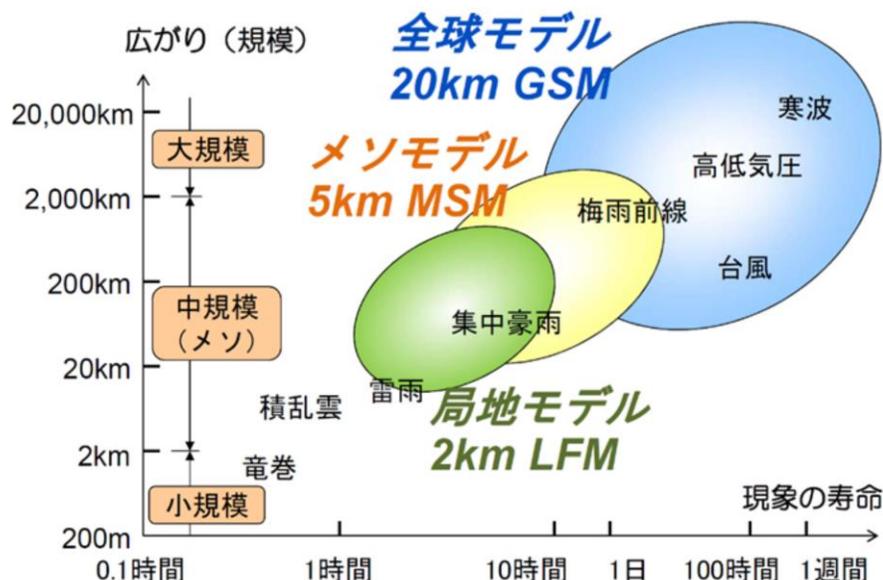


第1章 基礎編

1.7 気象庁の現業数値予報システム

主要な数値予報モデルとその適用範囲

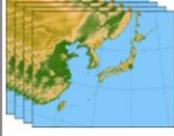
現象の広がり(規模)が大きければ(小さければ)、現象の寿命は長い(短い)ため、現象の空間スケールに応じて、予測可能な時間スケールもおおよそ決まる。予測対象の現象に合わせて数値モデルの時空間分解能を変えて運用する。



スライドには気象庁の主要な数値予報モデルが対象とする現象の空間・時間スケールと、様々な気象現象の空間・時間スケールを示している。気象現象は煙草の煙のゆらぎに見られるようなマイクロな乱流から、ブロッキング高気圧と言われるマクロな現象まで非常に広範な空間スケールにわたる。天気予報に関する気象擾乱は水平規模数10kmで2~3時間持続する雷雨、中規模(メソ)現象といわれる積乱雲の集団による集中豪雨、台風、中緯度の高・低気圧、ブロッキング高気圧などである。

数値予報モデルで予測できる現象の空間スケールは、モデルの格子間隔の大きさに依存しており、現象の空間スケールに応じて、予測可能な時間スケールもおおよそ決まる。そのため、気象庁では計算機資源を有効に活用するために、予報したい現象の時空間スケールに応じて複数の数値予報モデルを運用している。

気象に関する数値予報モデル

	局地モデル (LFM)	メソモデル (MSM)	メソEPS (MEPS)	全球モデル (GSM)	全球EPS (GEPs)	季節EPS (JMA/MRI-CP53)
モデル 領域*						
水平 格子間隔	2 km	5 km	5 km	約 20 km	約27 km(18日まで) 約40 km(それ以降)	大気約 55 km 海洋約 25km
予報期間 (初期時刻)	108時間 (毎時)	78時間(00,12UTC) 39時間(03,06,09, 15,18,21UTC)	39時間 (00,06,12,18UTC)	264時間(00,12UTC) 132時間(06,18UTC)	5.5日(06,18UTC)*4 11日(00UTC) 18日(12UTC) 34日(週2回)	7か月 (00UTC)
メンバー 数	1	1	21	1	51(18日まで) 25(それ以降)	5
モデルを 用いて 発表する 予報	航空気象情報 防災気象情報 降水短時間予報	防災気象情報 降水短時間予報 航空気象情報 分布予報 時系列予報 府県天気予報	防災気象情報 航空気象情報 分布予報 時系列予報 府県天気予報	台風予報 分布予報 時系列予報 府県天気予報 週間天気予報 航空気象情報	台風予報 週間天気予報 早期天候情報 2週間気温予報 1か月予報	3か月予報 暖候期予報 寒候期予報 エルニーニョ監視速報
初期値 解析手法	ハイブリッド 3次元変分法	4次元変分法	メソモデル初期値 + SV*1の摂動 (初期値+側面)	ハイブリッド 4次元変分法	全球モデル初期値+ SV*1の摂動 + LETKF*2の摂動	大気:全球モデル初期値 +BGM法*3の摂動 海洋:4次元変分法 +海洋解析誤差摂動
海面水温	固定値 (HIMSST)	固定値(HIMSST) +1次元海洋混合層 モデルによる変動	固定値(HIMSST) +1次元海洋混合層 モデルによる変動	偏差固定 (MGDSST)	6日以降に季節EPSの 予測SSTを利用 (2段階SST法)	3次元海洋モデルとの 大気海洋結合で変動を予測

*1 SV :特異ベクトル / *2 LETKF :局所アンサンブル変換カルマンフィルタ / *3 BGM 法成長モード育成法
*4 06,18UTCの気象業務支援センター経由でのデータ提供は、台風の条件を満たす場合のみ。

※図の地形データにはNational Centers for Environmental Information作成のETOPO1を使用



気象庁 Japan Meteorological Agency

令和4年度数値予報解説資料集

100

気象庁が現在運用している主要な数値予報モデルの大まかな仕様を示す。

全球モデルは地球全体を予報領域とした、水平格子間隔約20km、鉛直層数128層の数値予報モデルである。台風予報、短期予報、週間天気予報を支援している。全球モデルの予測値はメソモデルの側面境界値にも利用される。

メソモデルは防災気象情報、航空気象情報の作成支援を主な目的とする、水平格子間隔5 km、鉛直層数96層の数値予報モデルである。

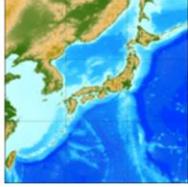
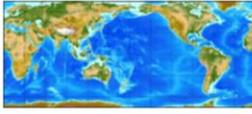
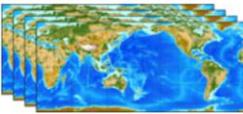
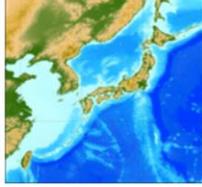
局地モデルは航空気象情報、防災気象情報の作成支援を目的とする、水平格子間隔2km、鉛直層数76層の数値予報モデルである。メソモデルや局地モデルは、水平分解能が細かいことにより、集中豪雨や突風など局地的な激しい現象を主な予測対象としている。

また、全球モデル・メソモデルの予測不確実性に関する資料を提供し、確率情報・信頼度情報の作成作業を支援するために、全球アンサンブル予報システム・メソアンサンブル予報システムを運用している。

季節アンサンブル予報システムは、3か月予報やエルニーニョ現象、暖・寒候期予報など、長期予報を支援するための大気海洋結合モデルである。

各モデルの技術開発は共通するところが多く、協力しながら精度向上を目指す取り組みを行なっている。

海洋に関する数値予報モデル-1

	沿岸波浪モデル	全球波浪モデル	波浪アンサンブル予報システム	日本域高潮モデル
モデル領域*				
水平格子間隔	約 5 km	約 55 km	約 55 km	約 1~16 km
予報期間 (初期時刻)	5.5日 (00,06,12,18UTC)	5.5日 (00,06,18UTC) 11日 (12UTC)	11日 (00,12UTC)	78時間 (00,12UTC) * 398時間 (03,06,09,15,18,21UTC)
メンバー数	1	1	51	台風時: 6 非台風時: 1
モデルを用いて発表する予報	波浪予報	外洋波浪予想 (波浪図)	週間天気予報 (波浪)	高潮情報 (警報・注意報)

* 398時間より先の予測は一部試験運用中で、今後正式運用となる見込み

※図の地形データにはNational Centers for Environmental Information作成のETOPO1を使用



気象庁 Japan Meteorological Agency

令和4年度数値予報解説資料集

101

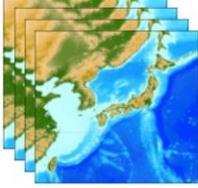
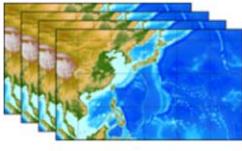
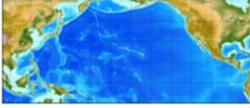
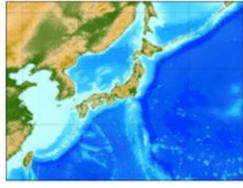
気象庁が現在運用している主要な海洋に関する数値予報モデルの大まかな仕様を示す。

「波浪モデル」は、全球モデルの海上の風の予測値を用いて、海上における波の発達・減衰やうねりの伝播などを予測する。全球波浪モデルは外洋波浪図や外洋域を航行する船舶向けの波浪情報に利用される。沿岸波浪モデルは波浪警報・注意報や日本周辺の波浪予報に利用されている。

波浪アンサンブル予報システムは、全球波浪モデルを使用して、2日先から5日先までの早期注意情報(警報級の可能性)を提供するために利用されている。波浪アンサンブルの予測結果は、WMOの荒天予測計画 (Severe Weather Forecasting Programme, SWFP) を支援するための気象庁 SWFP ウェブサイト上の波浪予測図 <<https://www.data.jma.go.jp/waveinf/wens/wave.html>> を提供する用途にも活用されている。

「高潮モデル」は、台風や発達した温帯低気圧の接近時などに、海面気圧の変化と海上の風の予測値から潮位の上昇量を予測する。日本域高潮モデルは、国内の高潮警報・注意報の発表に利用される。

海洋に関する数値予報モデル-2

	日本域台風時高潮確率予報システム*	アジア域高潮アンサンブル予報システム	日本沿岸海況監視予測システム (JPNシステム)	
モデル領域*				
水平格子間隔	約1~16km	約1.5~50 km	約10 km	約2 km
予報期間 (初期時刻)	132時間 (00,06,12,18UTC) 39時間 (03,09,15,21UTC)	132時間 (00,06,12,18UTC)	31日 (00UTC)	11日 (00UTC)
メンバー数	21メンバー	台風時: 52 非台風時: 1	1	1
モデルを用いて発表する予報	早期注意情報 (警報級の可能性)	高潮情報 (アジアの気象局で利用)	海面水温・海流1か月予報・海氷情報	

*実行は台風時のみ

※図の地形データにはNational Centers for Environmental Information作成のETOPO1を使用



気象庁 Japan Meteorological Agency

令和4年度数値予報解説資料集

102

日本域台風時高潮確率予報システムは、台風進路に摂動を与えた日本域高潮モデルのアンサンブル予報であり、2日先から5日先までの早期注意情報(警報級の可能性)を提供するために利用されている。

アジア域高潮アンサンブル予報システムは、WMO高潮監視スキーム(Storm Surge Watch Scheme,SSWS)に基づき、台風委員会メンバー(国および地域)に高潮予測情報を提供するために利用される。

「日本沿岸海況監視予測システム(JPNシステム)」は、黒潮や親潮等の日本周辺の海流や海水温、海氷の状態を予測する。主に、海面水温・海流1か月予報の発表、海氷情報や船舶向けの海氷予想図、水産業に利用され、他の数値予報モデルとともに、船舶の安全運航、海上の警備救難等でも利用される。水平格子間隔約2kmの予測システムにより、日本沿岸域の海流や海水温の変動を詳細に予測し、異常潮位等の沿岸の潮位変動の予測も可能となっている。

物質輸送モデル

	全球エーロゾルモデル	全球化学輸送モデル	領域化学輸送モデル		二酸化炭素輸送モデル
モデル領域※					
水平格子間隔	約 40 km	約 110 km	20 km	5 km	約 110 km
予報期間 (初期時刻)	4日 (12UTC)	5日 (12UTC)	72時間 (12UTC)	51時間 (12UTC)	解析のみ(年1回)
モデルを用いて発表する予報	黄砂情報	紫外線情報	スモッグ気象情報 全般スモッグ気象情報		二酸化炭素分布情報

※図の地形データにはNational Centers for Environmental Information作成のETOPO1を使用



気象庁 Japan Meteorological Agency

令和4年度数値予報解説資料集

103

気象庁では、大気中の物質の変化や移動などを数式で表した「物質輸送モデル」を用いて、地球環境や気候に影響する黄砂、紫外線、二酸化炭素などの監視と予測を行っている。気象庁が現在運用している物質輸送モデルの大まかな仕様を示す。

「全球エーロゾルモデル」は、大陸などでの黄砂の舞い上がり、風による移動、雨などによる地上への降下を考慮して、大気中の黄砂の量や分布を解析・予測し、黄砂情報の作成に利用される。

「化学輸送モデル」は、オゾンやその変化に関わる物質の風による移動、地上への降下、化学物質や光による反応を通じた変化などを考慮して、上空や地上付近のオゾン濃度を予測し、紫外線情報やスモッグ気象情報の作成に利用される。

「二酸化炭素輸送モデル」は、世界の大気中の二酸化炭素の分布状況を図示する二酸化炭素分布情報の作成に利用される。

参考文献

- 気象庁「海洋に関する数値予報モデルの種類」
<https://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/whitep/1-3-4-2.html>
- 気象庁「気象に関する数値予報モデルの種類」
<https://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/whitep/1-3-4.html>
- 気象庁「物質輸送モデルの種類」
<https://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/whitep/1-3-4-3.html>
- 気象庁 数値予報開発センター「数値予報開発センター年報」
https://www.jma.go.jp/jma/kishou/books/npdc/npdc_annual_report.html
- 本田有機, 坂本雅己, 藤田匡, 室井ちあし, 2018: 数値予報モデル. 平成30年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 90-105.
- National Centers for Environmental Information, ETOPO1 Global Relief Model
<https://www.ngdc.noaa.gov/mgg/global/global.html>

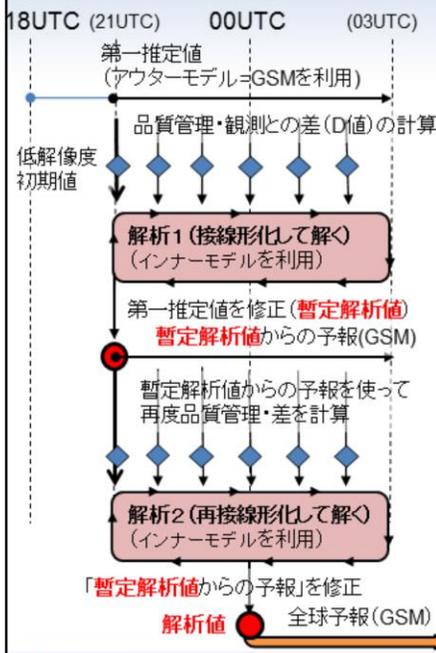


第1章 基礎編

1.7.1 全球解析

全球解析(GA)の仕様

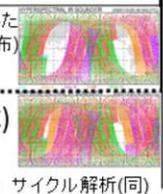
全球解析(00UTC)の流れ



暫定解析値からの予報・再接線形化は、非線形性の強い雲・降水域等にある観測を適切に取り込むのが狙い

全球解析(GA)の仕様

解析手法	4次元変分法(ハイブリッド)
解析変数	水平風、温度、地上気圧、比湿
アウターモデル格子間隔・鉛直層・積分時間間隔	約20km 128層(上端高度:0.01hPa) 400秒
インナーモデル格子間隔・鉛直層・積分時間間隔	約55km 128層(上端高度:0.01hPa) 600秒
データ同化窓	6時間
最小値探索回数	約35回×2回
観測打ち切り時刻	速報解析(入電した観測データの分布)
速報解析	2時間20分
サイクル解析	11時間50分(00,12 UTC) 7時間50分(06,18 UTC)



全球解析では全球モデル、全球アンサンブル予報を実行する上で必要な初期値を作成する。左図は00UTCにおける全球解析の流れを示す。アウターモデルとして全球モデル(GSM)を用い、18UTC初期値の予報値を第一推定値とし、品質管理を行った観測値との差(D値)を計算する。そのD値をもとに、インナーモデルを用いて、第一推定値を修正し、暫定の解析値を作成する。この暫定の解析値からの予報を使用し、再度品質管理を行い、D値を計算する。そのD値をもとに、この暫定の解析値からの予報を修正し、解析値を作成する。この解析値が00UTC初期値としてGSMの予報に用いられている。

右表は全球解析(GA)の仕様である。大気解析手法としては2005年2月から気候学的背景誤差のみを用いる4次元変分法が使用され(門脇 2005; 西嶋・室井 2006)、2019年3月からこれをベースにアンサンブルカルマンフィルタ(EnKF)の利点でもあるアンサンブル予報から見積もられる予報誤差を組み込むハイブリッドデータ同化(横田 2017)が全球解析に導入された(数値予報開発センター 2021)。また、大気解析で解析されない地上の気温や風などの地上解析には最適内挿法を利用している。

国外の観測などのデータの入電にかかる時間がかかる全球解析では、予報支援のために一度速報的なデータ同化を行いプロダクトを提供し、より多くの観測データが利用可能となったタイミングで改めてデータ同化を行なっている。速報的なデータ同化を「速報解析」と呼び、十分な数の観測データを利用して行うデータ同化を「サイクル解析」と呼ぶ。サイクルと呼ぶのは、そこからの第一推定値を用いて次の時刻のデータ同化を実施するため、情報が引き継がれていくからである。そして、定期的にサイクル解析からの第一推定値を速報解析に用いることで、サイクル解析の精度の高さが速報解析に反映される。このように数値予報では、データ同化と数値予報モデルとは互いに影響を及ぼしあう関係にある。

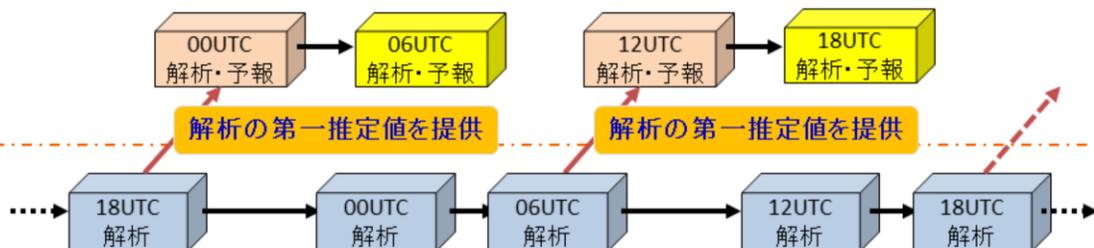
全球速報解析・予報と全球サイクル解析

現業運用：定められた時間内にプロダクトを提供しなければならない

(例) 初期値時刻と庁内外へのプロダクト送信までの所要時間 GSM：4時間以内

全球速報解析・予報

- ✓ プロダクト作成に間に合うよう、短い待ち時間内に入電した観測データを使って実行する解析と予報
 - ・ 観測データの入電待ち時間：2時間20分
- ✓ この解析予報の結果からガイダンスなどの予報資料が作成される



全球サイクル解析

- ✓ 十分な観測データの入電を待ってから実行する解析(より尤もらしい解析値を作成)
 - ・ 観測データの入電待ち時間：
11時間50分(00・12UTC)、7時間50分(06・18UTC)
- ✓ 全球速報解析への第一推定値を提供
 - ・ 18UTC解析値からの予報値が00UTC速報解析での第一推定値に
 - ・ 06UTC解析値からの予報値が12UTC速報解析での第一推定値に

より尤もらしい初期値を作成し、速報解析へ第一推定値を提供する



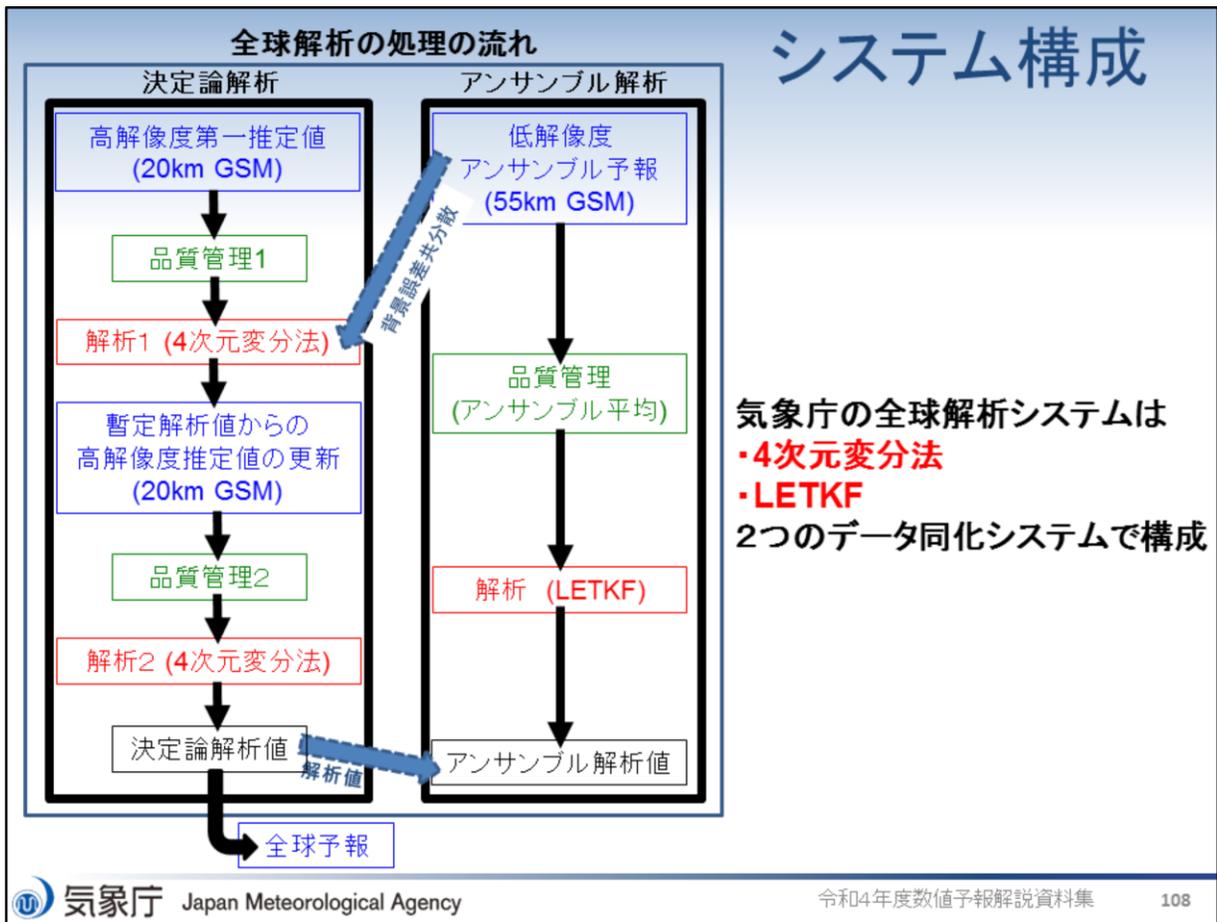
気象庁 Japan Meteorological Agency

令和4年度数値予報解説資料集

107

全球速報解析では定められた時間内にプロダクトを提供するために、短い待ち時間内に入電した観測データを使って解析と予報を実行している。観測データの入電待ち時間は2時間20分である。

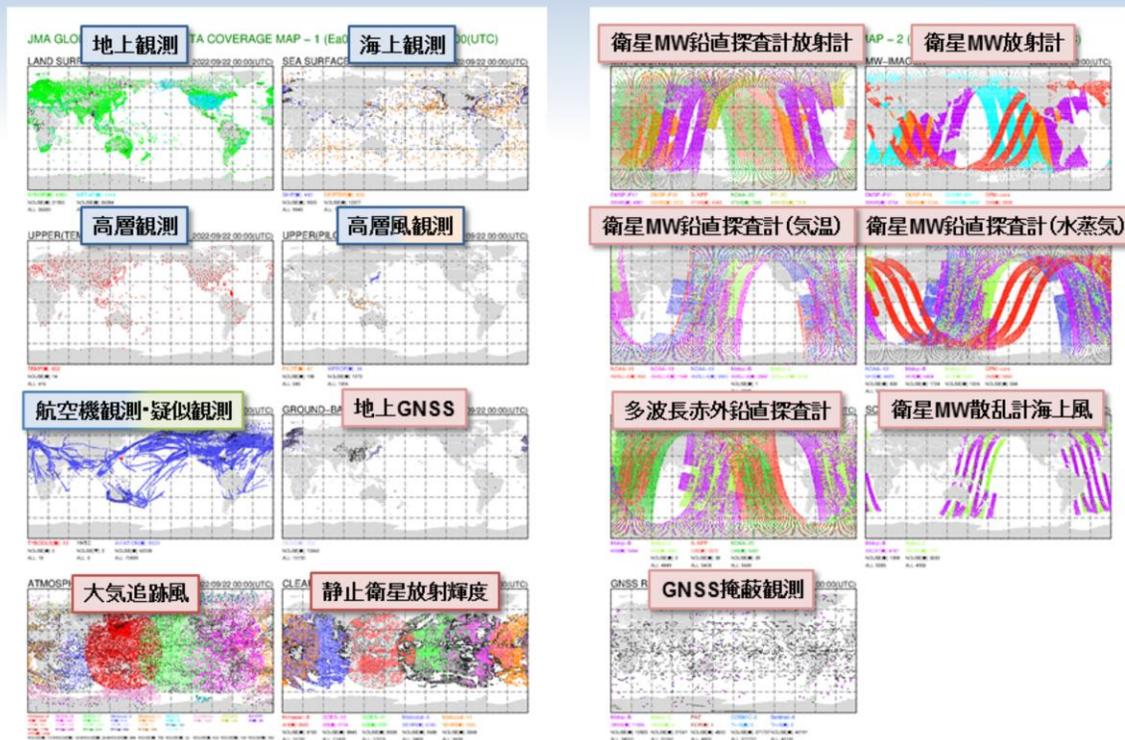
一方、全球サイクル解析では十分な観測データの入電を待ってから解析を実行し、より尤もらしい解析値を作成している。観測データの入電待ち時間は00, 12UTCで11時間50分、06, 18UTCで7時間50分である。また、全球サイクル解析は全球速報解析へ第一推定値を提供している。18UTCサイクル解析値からの予報値が00UTC速報解析での第一推定値になり、06UTCサイクル解析値からの予報値が12UTC速報解析での第一推定値になっている。全球サイクル解析から第一推定値を作ることによって、より尤もらしい初期値を作成し、より高い精度の維持を図っている。



気象庁の全球解析システムは4次元変分法と、アンサンブル・カルマンフィルタ (EnKF) の手法の一種である局所アンサンブル変換カルマンフィルタ (LETKF: Local Ensemble Transform Kalman Filter, Hunt et al. 2007) の2つのデータ同化システムで構成されている。この解析システムは巨大で複雑なシステムとなっており、莫大なジョブ(処理単位)を順序良く効率的に実行する必要がある。

全球速報解析の利用観測データの分布

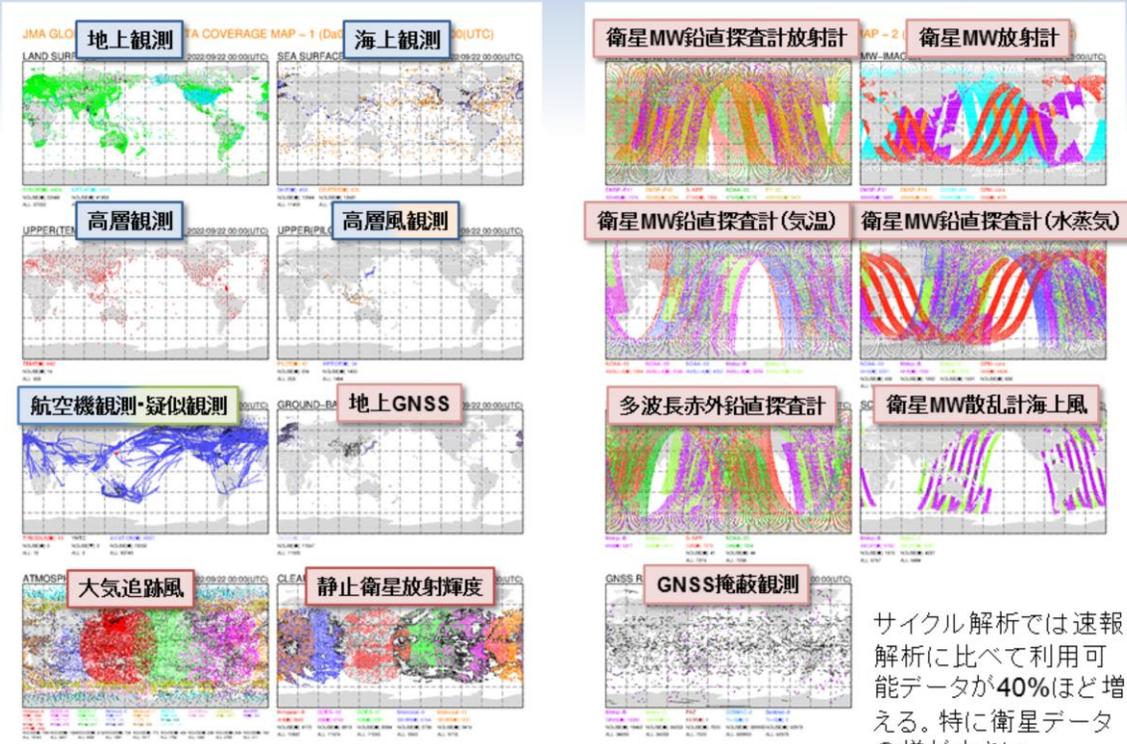
データ待ち時間:
2時間20分



全球速報解析で利用している観測データの分布図をスライドに示す。全球速報解析で利用している観測データは多種多様で、地上観測や高層観測などの直接観測、台風ポーガスといった疑似観測、地上に設置された測器及び人工衛星搭載の測器による遠隔観測が利用されている。

全球サイクル解析の利用観測データの分布

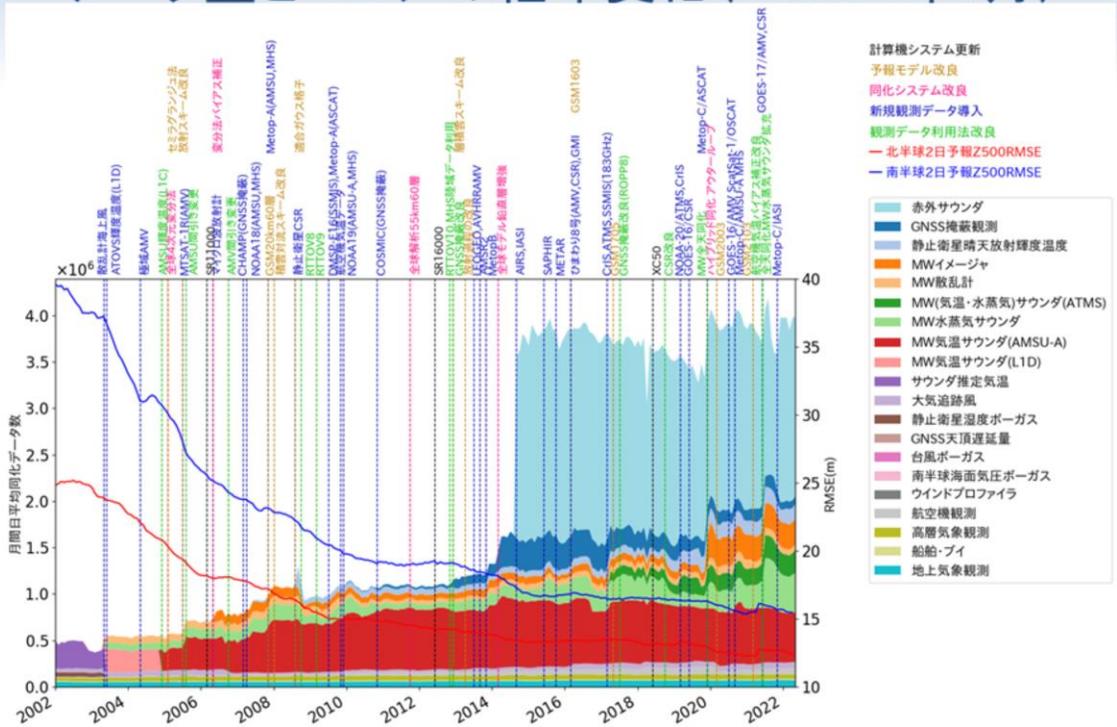
データ待ち時間
00,12UTC:11時間50分
06,18UTC:7時間50分



サイクル解析では速報解析に比べて利用可能データが40%ほど増える。特に衛星データの増が大きい。

全球サイクル解析で利用している観測データの分布図をスライドに示す。利用しているデータの種類の数は全球速報解析と同じであるが、観測データの待ち受け時間が全球速報解析より長く設定されているため、利用可能データが全球速報解析に比べて40%ほど増加する。特に衛星データが大きく増加する。

全球サイクル解析で利用している観測データ量とスコアの経年変化(～2022年4月)



全球サイクル解析で利用している各観測のデータ量を塗り色で示し、全球モデルの北半球と南半球における2日予報について、500hPa高度のRMSEの経年変化をそれぞれ赤線と青線で示す。

全球サイクル解析で利用している観測データの種類の増加傾向にあり、観測データ量は年々増えている。2014年にはハイパースペクトル赤外サウンダ(AIRS, IASI)の利用が開始され、急激にデータ量が増加した。現在、データ利用数の大半を、赤外サウンダを中心とした衛星データが占めている。

また、データ利用数が増えていくにつれ、全球モデルの予測精度が向上している。観測データがモデルの予測精度にとって重要であることが窺える。

参考文献

- 門脇隆志, 2005: 全球4次元変分法. 数値予報課報告・別冊第51号, 気象庁予報部, 100-105.
- 数値予報開発センター, 2021: ハイブリッド同化の全球解析への導入. 令和2年度数値予報開発センター年報, 気象庁数値予報開発センター, 18-22.
- 西嶋信, 室井ちあし, 2006: データ同化システムの概要. 平成18年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 11-13.
- 横田祥, 2017: 4DEnVar(4次元アンサンブル変分法). 天気, **64**, 43-46.
- Hunt, B. R., E. J. Kostelich and I. Szunyogh, 2007: Efficient Data Assimilation for Spatiotemporal Chaos: A Local Ensemble Transform Kalman Filter. *Physica D*, **230**, 112-126.

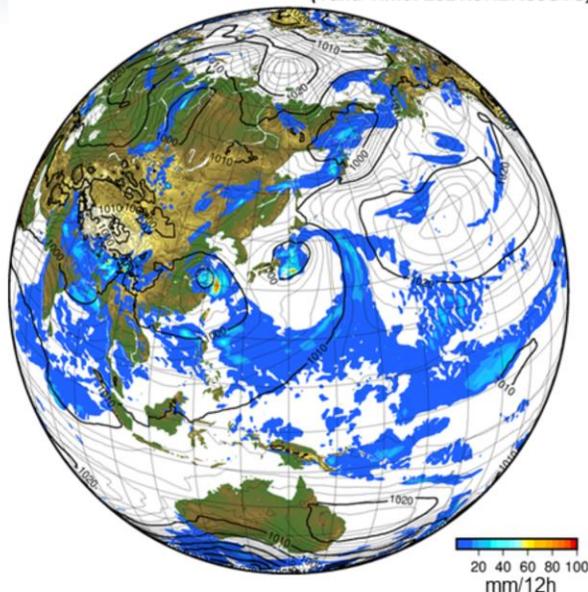


第1章 基礎編

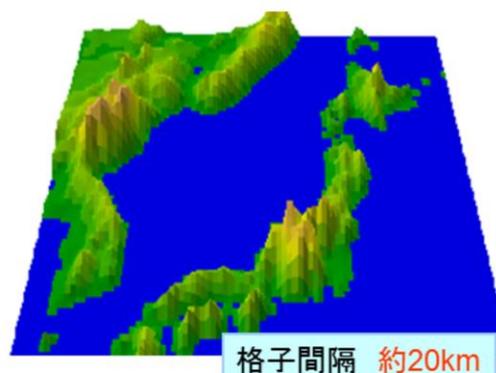
1.7.2 全球モデル

全球モデル

GSM-TL959L128 2021.07.25.00UTC FT=048
(Valid Time: 2021.07.27.00UTC)



- 解像度
 - 水平格子間隔約20km
 - 鉛直128層(最上層0.01hPa)
- 予報時間
 - 132時間(06,18UTC)
 - 264時間(00,12UTC)



全球モデルは、地球全体を予報領域とした数値予報モデルであり、短期予報、週間天気予報、台風予報、航空気象情報の作成作業を支援している。全球モデルの予測値はメソモデルの側面境界値に利用されるほか、波浪モデル、全球エーロゾルモデル、全球化学輸送モデル、領域化学輸送モデルへの入力としても利用される。また、全球アンサンブル予報システムや季節アンサンブル予報システムにも、解像度や一部の仕様は異なるものの、基本的には同じ技術が使われている。

全球モデルは、1988年に静力学平衡の仮定をした静力学方程式系を基礎方程式として、スペクトル法を採用して実用化され、その後高解像度化と力学過程・物理過程の改良を重ねて、2007年11月から水平格子間隔約20km鉛直60層(TL959L60)(北川 2006; 岩村 2008)、2014年3月からは鉛直100層(米原 2014)、2021年3月からは鉛直128層(数値予報開発センター 2021)でモデルの運用を行なっている。台風予報については従来の台風進路予報のほか、2019年3月より運用開始した台風5日先強度予報に利用されている台風強度予報ガイダンスSHIPS(Ono et al., 2019)に、GSMの台風周辺の大気環境の解析値や予報値が入力値として使用されている。

全球モデルの改良と精度向上

北半球5日予報500hPa高度RMSEの経年変化
(1995年1月～2022年5月、前12ヶ月移動平均)

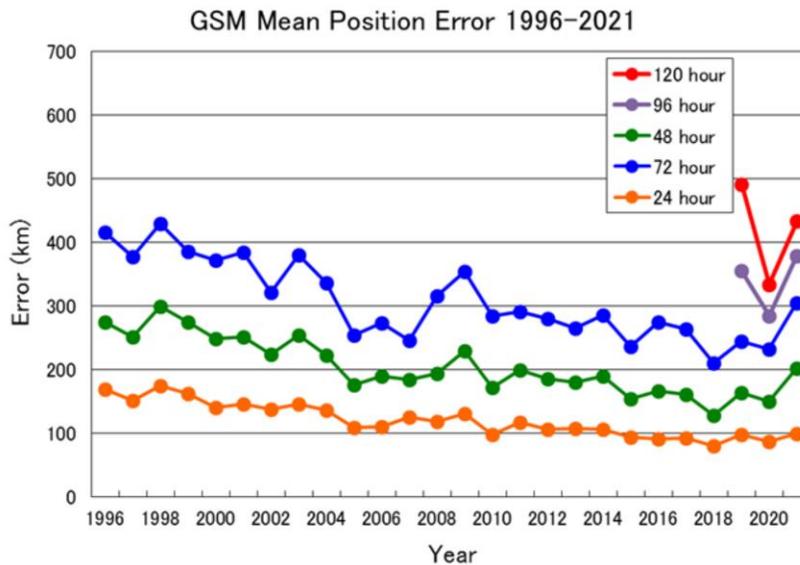


新たな観測データの活用や数値予報モデルの改良等の継続的な技術開発、及びこれらを支えるスーパーコンピュータの性能向上により、予測精度は着実に向上

主な変更点とその時期を矢印で示す
 緑：モデル物理過程、黒：モデル力学過程・解像度、
 紫：データ同化システム、青：新たに同化されたデータ
 ※実線：1.5度格子で検証した新検証(WMOで仕様を統一)
 点線：2.5度格子で検証した旧検証

全球モデルの北半球における5日予報について、500hPa高度のRMSEの経年変化を赤線(WMOにより仕様統一された1.5度格子で検証した新検証)および赤点線(2.5度格子で検証した旧検証)で示す。衛星データの同化など新たな観測データの活用や利用高度化、全球モデルの改良などの継続的な技術開発、及びこれらを支えるスーパーコンピュータの性能向上により予測精度は年々着実に向上している。特に衛星データの高度利用が開始された2000年台は、急速に予測精度が向上している。

GSMの台風進路予測誤差の推移(1996～2021年)



- 年々の変動はあるが、長期的には改善傾向。
- 2021年の台風は北上する台風が多く、また北上する台風の予報誤差自体が大きいことが、2021年の台風予報誤差平均の悪化に寄与していると考えられる。

GSMの台風進路予測誤差の推移を示す。年々の変動はあるが、長期的には改善傾向が見られる。現在の72時間予測、48時間予測の精度は、1990年代後半のそれぞれ48時間予測、24時間予測精度と同等かそれ以上の精度となっている。

世界の数値予報

2022年9月時点

国名または 機関名	全球モデル		全球アンサンブル予報モデル			領域モデルの 格子間隔・ 鉛直層数
	格子間隔 鉛直層数	予報 期間	格子間隔 鉛直層数	メン バ数	予報期間	
日本	20km128層	11日間	27km128層 27km128層 40km128層	51x2 51 25x2/week	11日間 +7日間 +16日間	5km96層 2km76層
欧州中期予報セン ター (ECMWF)	9km137層	10日間	18km137層 36km137層	51x2	15日間 +31日間	なし
イギリス (Met Office)	10km70層	7日間	20km70層	18	7日間	1.5km70層
フランス	5~24km 105層	4日間	10~60km 90層	35x2	4.5日間	1.3km90層
ドイツ	13km90層	7.5日間	40km90層	40	7.5日間	6.5km60層 2.8km50層
米国 (NCEP)	13km127層	16日間	25km64層	31x4	16日間 + 19日間	3km60層 1.5km60層
カナダ	15km84層	10日間	35km80層	21x2	32日間	10km84層 2.5km84層

世界には日本と同様に、全球モデル、全球アンサンブル予報モデル、領域モデルがあり、様々な格子間隔や予報期間のモデルが存在する。表は全球モデルを運用している数値予報センターのうち、主要国または機関のモデルを示す。全球モデルは国際競争が盛んに行われている。特に全球モデルの予測精度が良いと言われている数値予報センターが欧州中期予報センター (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts; ECMWF) や米国 (National Centers for Environmental Prediction; NCEP)、イギリス (United Kingdom Met Office; UKMO)、日本である。

参考文献

- 岩村公太, 2008: 高解像度全球モデルの改良. 平成20年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 1-6.
- 北川裕人, 2006: モデルの概要. 平成18年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 7-10.
- 坂本雅巳, 2018: 全球モデルの予報時間延長. 平成30年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 5-6.
- 数値予報開発センター, 2021: 全球数値予報システムの鉛直層増強、地表面解析高度化, 数値予報開発センター年報(令和2年), 気象庁数値予報開発センター, 77-84.
- 米原仁, 2014: 変更の概要. 平成26年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 1-3.
- Anthes, R.A., 1983: Regional models of the atmosphere in middle latitudes. *Mon.Wea. Rev.*, **111**, 1306-1330.
- Mass, C. F., D. Ovens, K. Westrick and B. A. Colle, 2002: Does increasing horizontal resolution produce more skillful forecast? *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, March 2002, 407-430.
- Ono, M., 2019: Operational Use of the Typhoon Intensity Forecasting Scheme Based on SHIPS (TIFS) and Commencement of Five-day Tropical Cyclone Intensity Forecasts. *RSMC Tokyo-Typhoon Center Technical Review*, **21**, 20-46.



第1章 基礎編

1.7.3 全球アンサンブル予報システム

全球アンサンブル予報システムの仕様

目的	台風進路予報支援・ 週間天気予報支援	2週間気温予報・早 期天候情報支援	1か月予報支援
モデル	GSM2203		
解像度	TQ479L128 (水平: 0.25度・約27km、鉛直: 層数128)		TQ319L128(水平 0.375度・約40km)
予報時間	264時間(11日), 2回/1日(00,12UTC) 132時間(5.5日), 2回/1日(06,18UTC)※	【左記からの延長】 18日,1回/1日 (12UTC)	【左記からの延長】 34日,2回/1週(火・水 曜の12UTC)
初期摂動作成手法	LETKF+特異ベクトル(SV:Singular Vector)法		
モデルアンサンブル手法	確率的物理過程強制法		
境界値摂動	海面水温(SST)摂動		
(海面水温)	初期偏差固定+気候値変化 144時間以降2-tiered SST※	2-tiered SST※ ※ 詳細は高倉・小森(2020)を参照	
メンバー数	51 (1コントロールラン+50摂動ラン)		25 (1コントロールラン+24摂動ラン)
解析値	高解像度全球モデル(TL959L128)用の解析値を TQ479L128へ解像度変換		



気象庁では、全球モデル(GSM)の予測不確実性に関する資料を提供し、確率情報・信頼度情報の作成作業を支援するために、全球アンサンブル予報システム(GEPS)を運用している。GEPSは、週間天気予報のために用いられていた週間アンサンブル予報システム(山口 2011)と、台風進路予報の支援のために運用されていた台風アンサンブル予報システム(太田・佐藤 2010)、1か月予報、異常天候早期警戒情報(現在の早期天候情報)を支援するための1か月アンサンブル予報システム(平井ほか 2015)を統合するシステムとして開発された。2017年1月から台風進路予報と週間天気予報の支援のために、2017年3月から1か月予報などの支援のために、運用を開始した(山口 2017、新保 2017)。

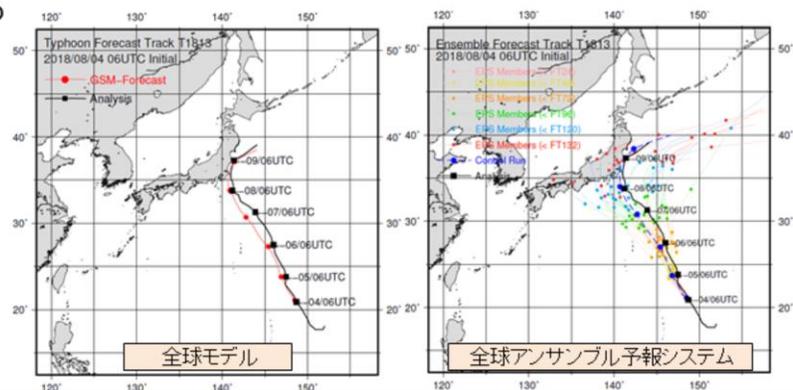
初期時刻00UTC及び12UTCの予測は、予報11日目まで実行され、アンサンブルメンバー数は51である。初期時刻12UTCの予測は、早期天候情報に利用するため、予報18日目まで延長される。そして、毎週火曜日及び水曜日(1週間当たり2回)には、1か月予報に利用するため、25メンバーについては更に予報34日目まで延長される。

予報モデルはGSMの低解像度版の水平格子間隔約27km(TQ479)(ただし、予報19日目から34日目にかけては水平格子間隔約40km(TQ319))鉛直128層のモデルで、物理過程はGSMと同じものを利用している。予報モデルの不確実性を考慮するために、2010年12月に週間アンサンブル予報システムに導入された確率的物理過程強制法(米原 2010)を用いており、下部境界条件の不確実性を考慮するために海面水温摂動(太田・堀田 2016a)を導入した。初期摂動には、LETKF(太田・堀田 2016b)とSV(酒井 2008)を組み合わせる手法を用いている。

※132時間予報の06, 18UTC初期値データは、台風の条件を満たす場合のみ気象業務支援センター経由で提供される。

全球アンサンブル予報システム

- 台風進路予報、週間天気予報などを目的としたシステムでは、全球モデルよりやや粗い水平格子間隔約27kmで地球全体を覆い、1日2回11日先まで、また1日2回5.5日先まで予測計算を実行
- アンサンブルメンバー数は51
- 全球モデルと同様に、数日～1週間程度の範囲で日本付近の気象に影響を与える高低気圧や台風を予測の対象とし、予測の幅や信頼度に関する情報を得ることができる



平成30年台風第13号の予測例
(平成30年8月4日15時から5.5日先までの台風中心位置の予測結果)

台風進路予報や週間天気予報の支援を目的とする全球アンサンブル予報システムでは、全球モデルよりやや粗い水平格子間隔約27kmで地球全体を計算領域とし、1日2回11日先まで、また1日2回5.5日先まで予測計算を実行している。アンサンブルメンバーの数は51個である。全球モデルと同様に数日～1週間程度の範囲で日本付近の気象に影響を与える高低気圧や台風を予測の対象とし、予測の幅や信頼度に関する情報を得ることができる。

図は平成30年台風第13号の進路予測について、全球モデル(左図)と全球アンサンブル予報システム(右図)の予測結果を示す。黒線が実況を、左図の赤線が全球モデル予報を、右図のカラー線が全メンバーの予報を示す。

全球モデルは実況よりやや西の進路を予測しているが、全球アンサンブル予報システムはメンバーによっては実況に近い予測や実況より東の進路を予測していて、予測の幅や信頼度に関する情報を得ることができる。

参考文献

- 太田洋一郎, 佐藤芳昭, 2010: 台風アンサンブル予報システムの改善. 平成22年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 66-70.
- 太田洋一郎, 堀田大介, 2016a: 海面水温摂動の開発. 数値予報課報告・別冊第62号, 気象庁予報部, 77-84.
- 太田洋一郎, 堀田大介, 2016b: 週間アンサンブル予報システムにおけるLETKFの開発. 数値予報課報告・別冊第62号, 気象庁予報部, 66-76.
- 酒井亮太, 2008: 気象庁の新しい週間アンサンブル予報システム. 天気, 55, 515-520.
- 新保明彦, 2017: 全球アンサンブル予報システムの概要. 平成28年度季節予報研修テキスト, 気象庁地球環境・海洋部, 1-8.
- 高倉 寿成, 小森 拓也, 2020: 2段階SST法の詳細と導入事例紹介. 令和2年度季節予報研修テキスト, 気象庁地球環境・海洋部, 2-8.
- 平井雅之, 宮岡健吾, 佐藤均, 杉本裕之, 南敦, 松川知紘, 高谷祐平, 新保明彦, 2015: 1か月アンサンブル予報システムの変更の概要. 平成26年度季節予報研修テキスト, 気象庁地球環境・海洋部, 1-5.
- 山口春季, 2011: 週間アンサンブル予報における初期摂動作成手法の改良. 平成23年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 20-24.
- 山口春季, 2017: 全球アンサンブル予報システムの導入. 平成29年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 35-41.
- 米原仁, 2010: 週間アンサンブル予報へのモデルアンサンブル手法の導入. 平成22年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 62-65.



第1章 基礎編

1.7.4 メソ解析

メソスケール現象と数値予報

メソスケールの現象の特徴

- 降水現象と関係が深い
 - 積乱雲、メソ対流系、梅雨前線上の低気圧など
 - 雲・降水過程に伴う非断熱加熱がその振る舞いに本質的な影響を及ぼす
- 顕著現象との関連が深い
 - 大雨・大雪・強風・突風・雷

メソスケール現象の予測は防災上極めて重要

メソスケール現象を予測するための数値予報システム

- メソスケール現象は、時空間規模が(総観規模に比べて)小さい
 - 高い時間・空間分解能を持つ数値モデルが必要
- メソスケール現象は降水現象と関係が深い
 - 雲・降水を詳細に扱う必要がある
 - 雲・降水に関連する観測データを利用する必要がある

雲物理過程を実装した非静力学モデルと、それを基にしたデータ同化システムが必要



気象現象には大小様々な空間スケールのものが存在する。天気図で卓越する現象は総観規模現象である。総観規模現象は2000km以上の空間スケールの現象を指す。

一方で、2~2000kmの空間スケールの現象をメソスケール現象という。メソスケール現象の特徴として、積乱雲やメソ対流系など降水に関係が深い現象であること、大雨・雷など顕著現象との関連が深いことが挙げられ、これらのことからメソスケール現象の予測は防災上極めて重要となっている。

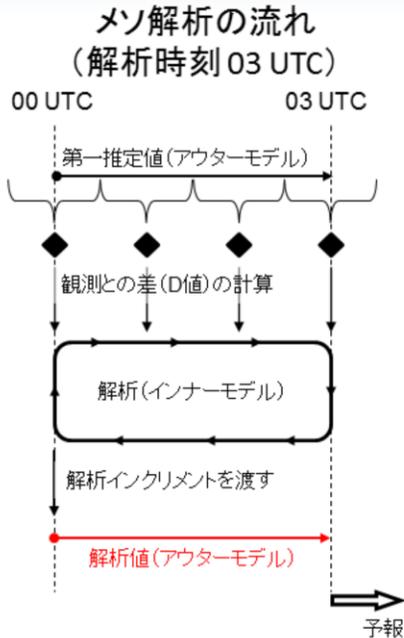
空間スケールが総観規模現象に比べ相対的に小さいメソスケール現象を予測するためには、全球数値予報システムよりも高い時間・空間分解能を持つ数値予報システムが必要となる。また、メソスケール現象は降水現象と関係が深いことから、雲・降水を予報モデルで詳細に扱うとともに、データ同化でも雲・降水に関する観測データを多く利用する必要があり、この要請を満たす予報モデルとデータ同化システムから数値予報システムを構成する必要がある。このような背景があり、メソ数値予報システムが運用されている。

2001年3月にメソ数値予報システムの本運用が開始された。2002年には世界的にも画期的な成果である4次元変分法を用いたメソ解析システムが導入された。2004年には静力学平衡の近似を用いない非静力学モデル JMA-NHM (Non-Hydrostatic Model の略) が導入され、2009年4月には、JMA-NHM を基にした変分法データ同化システム JNoVA が導入された(本田 2010)。その後も継続的な更新・改良がなされており、2017年2月には JMA-NHM を置き換える形で新しい気象庁非静力学モデル asuca (Asuca is a System based on a Unified Concept for Atmosphere の略。再帰的略称を用いている) が導入され(室井 2020)、2020年3月には、asuca を基にした変分法データ同化システム asuca-Var(幾田 2014) が導入されている。そして今日、メソモデルや局地モデルの予測資料は、防災気象情報の基盤のひとつとなっている。

メソ数値予報システムはメソ解析とメソモデルからなっている。まず、メソ解析について述べる。

メソ解析の仕様

- asuca に基づく 4次元変分法(asuca-Var) がベース



メソ解析(MA)の仕様	
解析手法	4次元変分法
アウターモデル水平 格子間隔・鉛直層・ 積分時間間隔	5 km (817×661) 96層 (地上～37.5 km) 100/3 (= 33.3333...)秒
インナーモデル水平 格子間隔・鉛直層・ 積分時間間隔	15km (273×221) 48層 (地上～37.5 km) 100秒
データ同化窓	前3時間
最小値探索回数	最大50回
観測打ち切り時刻	50分

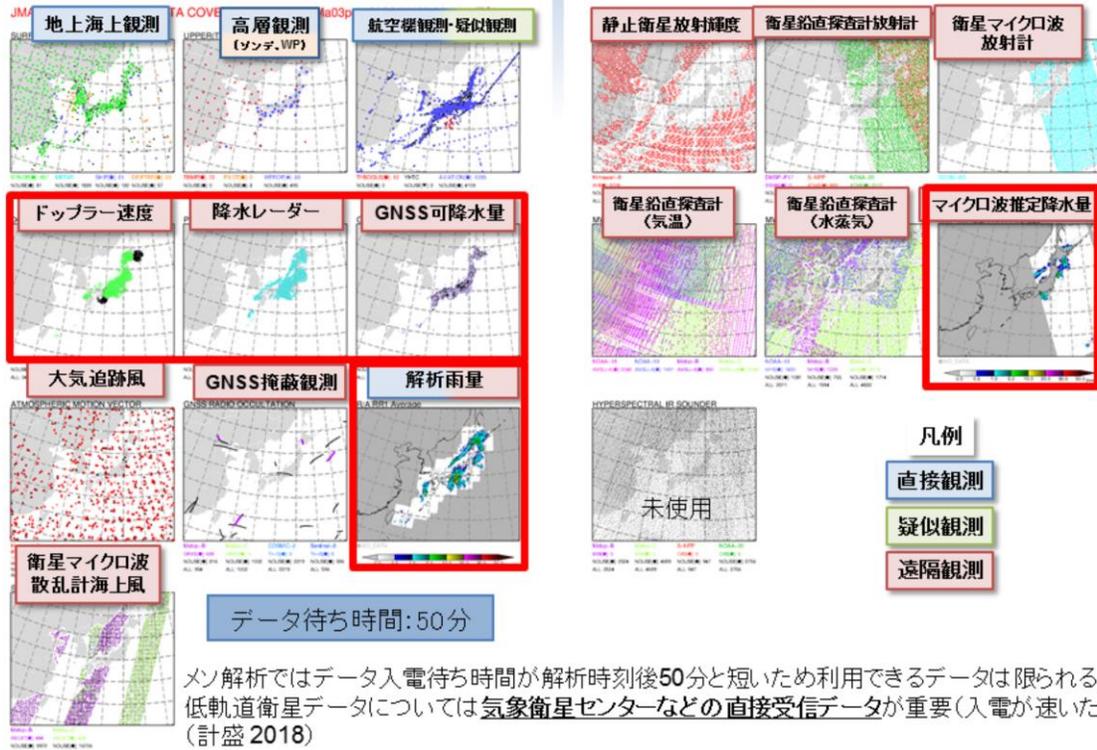
メソ解析は日本を中心とする東アジア領域の大気解析である。大気の解析手法には asuca に基づく4次元変分法を用いているが、大気解析で解析されない地上の解析には最適内挿法を利用している(本田ほか 2018)。

メソ解析の基本的な仕様をスライドの表に纏めておく。なお、アウターモデルは第一推定値の計算に用いるモデル、インナーモデルは解析修正量を求める計算に用いるモデルのことを指す。アウターモデルは水平格子間隔5km鉛直層96層であるのに対し、インナーモデルは水平格子間隔15km鉛直層48層であるのは、後述するようにメソ解析では繰り返し計算が必要であり、この繰り返し計算によって計算量が膨大になってしまうことを防ぐためである。

スライドの図に、解析時刻03UTCにおけるメソ解析の処理の流れを示す。メソ解析のデータ同化窓は前3時間であるため、この例においては00～03UTCの観測データがデータ同化に利用される。まず、アウターモデルを実行して、00UTCの解析値から03UTCまでの予測計算を行うことで第一推定値を得る。この時、00～03UTCにある全ての観測から予報がどの程度離れているかを計算する。次に、インナーモデルを逆方向に実行し、どのような修正を解析値に与えれば良いかを探索する。そして、探索された修正を加えた解析値からインナーモデルを実行して予測計算を行い、観測からどの程度予測が離れているかを計算する。以降、このインナーモデルの計算を繰り返し行っていく。この繰り返し計算は、インナーモデルでの計算が観測データに十分に近付いた時、もしくは、メソ解析での最小値探索の最大回数である50回で打ち切れ、解析インクリメントが算出される。最後に、解析インクリメントを加えた解析値でアウターモデルを実行して予測計算を行い、03UTCにおける解析値を得る。

メソ解析では、このような流れで解析値を計算している。

メソ解析の利用観測データの分布



メソ解析で利用している観測データの分布図をスライドに示す。全球速報解析よりも観測データの待ち受け時間は短く設定されており、利用できる観測データは限られる(計盛ほか 2018)。

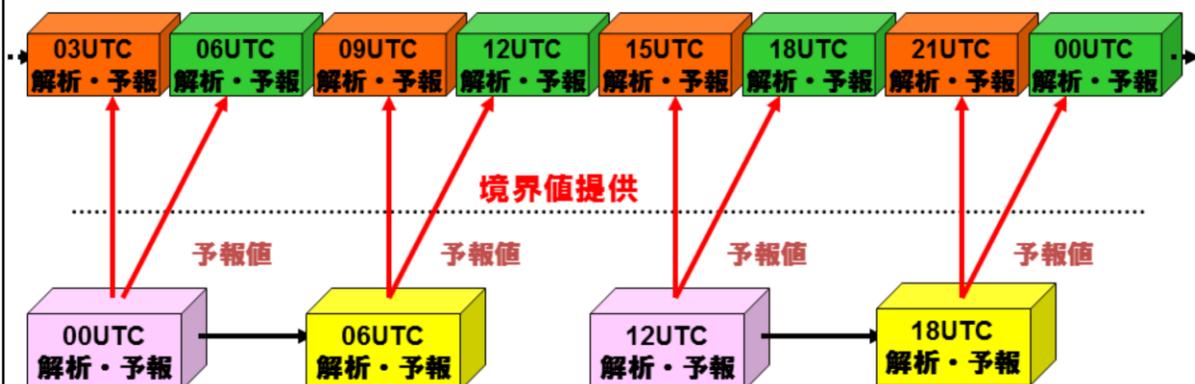
前述した通り、メソスケール現象は降水現象と関係するため、雲・降水に関する観測データを多く利用する必要がある。このことから、メソ解析では解析雨量、レーダー放射強度やマイクロ波推定降水量など、全球解析では利用されていない観測データが同化されている(計盛ほか 2018)。スライドの図で、全球解析では同化されていない観測データを赤枠で囲った。

解析雨量は、地上の雨量計とレーダーから解析された降水量であるから、厳密には観測データではないが、メソ解析では降水に関するデータとして同化を行っている。マイクロ波推定降水量とは、極軌道衛星に搭載されたマイクロ波放射計(イメージャ)の観測データから推定した降水強度である(計盛 2014)。

全球数値予報システムとメソ数値予報システム

- 側面境界値が更新された直後の予報(赤色)とその次の予報(緑色)は同じ側面境界値を使う → 側面境界値の影響を大きく受ける予報後半では、新しい初期時刻の予報の精度が前初期時刻の予報精度に近づく傾向がある

メソ解析・予報



全球速報解析・予報

- 1日4回の予報を側面境界としてMSMへ提供

全球数値予報システムとメソ数値予報システムの関係をスライドの図に示す。

メソ数値予報システムは全球数値予報システムと同様、ひとつ前の初期値から始めた予報値を第一推定値として解析値を作成している。例えば、06UTCの解析値は03UTC解析値からの予測結果を第一推定値としている。また、メソモデルは領域モデルであるため、予報方程式を解くために側面での境界条件が必要になる。メソモデルでは、全球速報解析・予報で作成される予報値を側面境界値として利用している。例えば、06UTC解析値からの予測は、全球数値予報システムにおける00UTC解析値からの予測結果を側面境界値としている。

メソ数値予報システムは1日8回のデータ同化と予報を行うが、全球数値予報システムは1日4回であるため、メソ数値予報システムでは同じ側面境界値を2回ずつ利用することになる。スライドには、側面境界値が更新された直後の予報を赤色で、その次の予報を緑色で示す。一般に数値予報モデルは予報時間が長くなるにつれ側面境界値の影響が大きくなるため、同じ側面境界値を用いる予測では、新しい初期時刻の予測の精度が前初期時刻の予測の精度に近づく傾向がある。

参考文献

- 幾田泰醇, 2014: asuca変分法データ同化システム,平成25年度数値予報課報告・別冊第60号, 気象庁予報部, 91-97.
- 計盛正博, 2014: マイクロ波イメージャ, 平成26年度数値予報課報告・別冊第61号, 気象庁予報部, 50-54.
- 計盛正博, 本田有機, 佐藤芳昭, 2018: 観測データと品質管理. 平成30年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 72-82.
- 本田有機, 2010: 概要,平成21年度数値予報課報告・別冊第56号, 気象庁予報部, 1-6.
- 本田有機, 藤田匡, 計盛正博, 室井ちあし, 佐藤芳昭, 2018: データ同化. 平成30年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 84-89.
- 室井ちあし, 2020: はじめに, 令和元年度数値予報課報告・別冊第66号, 気象庁予報部.

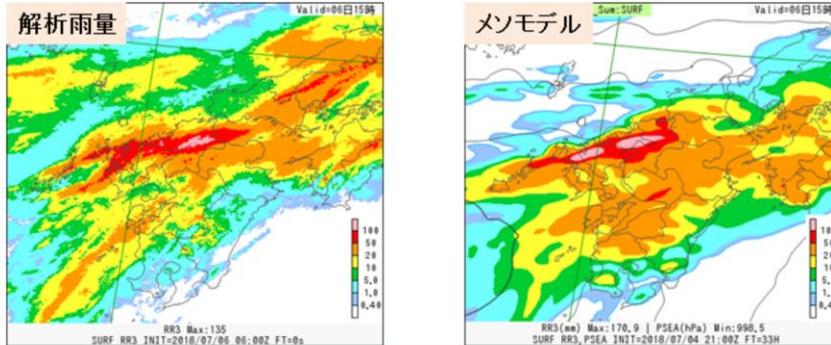


第1章 基礎編

1.7.5 メソモデル

メソモデル

- 利用目的は、防災気象情報、航空気象情報、降水短時間予報、天気予報、局地モデルの側面境界条件
- 水平格子間隔(5 km)で日本付近を対象に1日8回78時間(初期時刻00, 12 UTC)または39時間(初期時刻03, 06, 09, 15, 18, 21 UTC)先まで予測
- 1日~2日先程度までの大雨や暴風等の災害をもたらす現象が主な予測対象



平成30年7月豪雨の線状降水帯の予測例
平成30年7月6日15時までの3時間降水量
平成30年7月5日6時初期値、33時間予報



メソモデルは気象庁非静力学モデル asuca に基づく数値予報モデルである。全球モデルと比較して詳細な雲物理過程が組み込まれ、境界層過程も高度化されているのが大きな特徴である。また、メソスケールモデル向けの積雲対流パラメタリゼーションを用いている。メソスケールの現象を精度よく予測し、水平スケールが20km程度より大きな集中豪雨を表現できるなど、全球モデルにはない特徴を持つ(本田ほか 2018)。

メソスケール現象を予測することによって、防災気象情報や天気予報に役立てられているほか、航空機の安全運航に寄与する航空気象情報、15時間先までの降水予測を行う降水短時間予報にも役立てられ(辻村 2019)、局地数値予報システムへの第一推定値や側面境界値の提供という役割も担っている。

水平格子間隔5km鉛直96層で非静力学方程式系を基礎方程式とし、空間離散化には有限体積法を用いている。メソモデルは領域モデルであり、日本付近の領域のみを予測対象としている。メソ解析で1日8回作成される解析値から予測計算を行っている。予報時間は初期時刻によって異なり、00, 12UTCの解析値からは78時間、それ以外の初期時刻の解析値からは39時間先の予測計算を行う。

主な予測対象は、1~2日先程度までの大雨・暴風といった災害をもたらす顕著現象であり、これらを予測することを目的に運用されている。

スライドの図に平成30年7月豪雨の降水量の予測結果を示す。平成30年7月6日15時までの3時間降水量で、左の図が解析雨量、右の図が平成30年7月5日6時初期値のメソモデルによる33時間先の予測結果となっている。解析雨量において解析されている九州北部の線状降水帯が、メソモデルの予測においても表現されており、メソモデルで実況の強雨を予測できていることが分かる。

メソモデルの主な仕様

- 非静力学モデル asuca がベース
 - 2004年9月に静力学スペクトルモデルから気象庁非静力学モデル (JMA-NHM) に移行
 - 2017年2月に JMA-NHM から非静力学モデル asuca に移行

メソモデル (MSM) の仕様	
水平格子間隔	5 km (817 × 661)
鉛直層	96層 (地上～37.5 km)
積分時間間隔	100/3 (=33.3333...)秒
初期値	メソ解析 (MA)
側面境界値	全球モデル (GSM)
予報時間	78時間予報 (00, 12 UTC) 39時間予報 (03, 06, 09, 15, 18, 21 UTC)

メソモデルの主な仕様をスライドの表に示す。

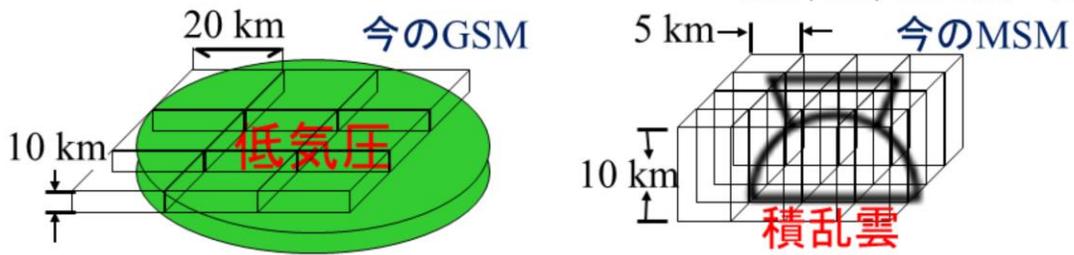
メソモデルは、2001年3月に水平格子間隔10kmのモデルとして本運用を開始した。当時は静力学平衡を仮定し、かつスペクトルモデルであった。その後、2004年には静力学平衡の近似を用いない非静力学モデル JMA-NHM が導入され(石田 2013)、2017年2月には JMA-NHM を置き換える形で新しい気象庁非静力学モデル asuca が導入されている(成田 2020)。なお、1.7.8節で示すように、asuca は局地モデルにも使われている。

物理過程としては、本節で示すバルク法雲物理過程(氏家 2020a)や、Kain-Fritsch 積雲対流パラメタリゼーション(氏家 2020b)などが用いられている。2022年3月には鉛直1次元の海洋混合層モデルが導入されている(数値予報開発センター 2022)。

非静力学の効果について

- 現象の水平スケールが鉛直スケールに比べて大きな場合
 - 鉛直風時間変化の影響(気圧変化など)を無視できる
 - 鉛直スケールが水平スケールに近づくと非静力学モデルが必要
- 断熱過程では水平格子間隔2~3 km以下で非静力学の効果効いてくる
 - 水平スケール10 km程度の現象を解像、鉛直スケール(10 km)と同程度
- 雲・降水過程を取り扱う場合は、10 kmより小さい水平格子間隔で非静力学の効果効いてくる
 - 非断熱過程による潜熱放出が格子単位で起こって水平格子間隔に近い対流が生じやすいため

加藤 (1999)「気象研究ノート」



(雲・降水過程を取り扱うためには) 水平格子間隔
約10 km以下の非静力学モデルが必要

メソモデルは気象庁非静力学モデル asuca に基づく数値予報モデルであり、全球モデルとは異なり静力学平衡の近似を用いていない。

温帯低気圧のような総観規模現象の場合、現象の水平スケールが鉛直スケールと比べてはるかに大きい。この場合、鉛直流の時間変化を無視することが良い近似で成り立つ。一方、集中豪雨などの顕著な降水現象の多くは、積乱雲やメソ対流系擾乱と呼ばれる積乱雲の集合体によって引き起こされる。これらの現象の水平スケールは通常数10km以下で、静力学近似が十分な精度では成り立たない。また、水の相変化に伴う潜熱の解放と雲内水物質の分布が、運動場と降水域の決定に重要な役割を果たしている。従って、顕著降水現象の予報には、雲の微物理過程を含む水平格子間隔5km以下の非静力学モデルを用いることが本質的に望ましい(齊藤 2003)。メソモデルは水平格子間隔5km、局地モデルは水平格子間隔2kmであり、いずれも非静力学モデルが必要とされる。

非静力学モデルの利点と難点

• 利点

- モデルの水平格子間隔に原理的な制限がなくなる
 - 水平スケール数十 km のメソ対流系擾乱による集中豪雨などの顕著現象の予測に威力を発揮する
- 雲や降水の生成と消滅において重要な鉛直流を陽に扱うことができる
- 局地的な地形の影響を受ける風を正確に表現できる

• 難点

- 気圧や密度の計算が静力学モデルより複雑になる
- 音波を解に含むため数値計算に工夫が必要になる

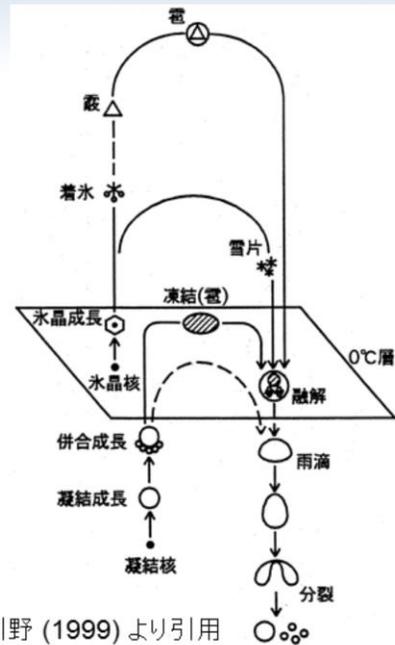
これまで述べてきたように、メソ・局地モデルでは非静力学モデルを用いている。スライドに、非静力学モデルの利点と難点を纏める。

利点としては、まず第一にモデルの水平格子間隔に原理的な制限がなくなることが挙げられる。前述したように、静力学モデルの水平格子間隔は静力学平衡が精度良く成立する水平格子間隔10km程度が限界である。非静力学モデルを用いることによってこのような制限がなくなり、空間スケールが数十 km 程度のメソ対流系擾乱による集中豪雨など、防災上重要な現象の解像ができるようになる。また、静力学モデルだと連続の式から診断していた鉛直流を運動方程式から陽に計算することができるようになるため、雲・降水の生成と消滅といった鉛直流が重要な役割を果たす現象をより高度に扱っていることになる。高解像度化することによって地形の表現性が向上するため、局地的な地形の影響を受ける風をより正確に表現できるようになることも利点の一つである。

難点としては、まず、静力学モデルと比べて気圧や密度の計算が複雑になることが挙げられる。非静力学モデルでは気圧(もしくは密度)が予報変数になるため、静力学モデルに比べ計算が複雑になる。また、気象庁の非静力学モデル asuca は完全圧縮方程式系を採用しており、解には音波が含まれる。音波は非常に高速であるため、音波を安定に解くために積分時間間隔を決めると、積分時間間隔を非常に短くする必要がある。気象学的に重要でない音波に合わせて積分時間間隔を決めると、計算効率が極めて悪い(松林ほか 2013)。このため、数値計算に工夫が必要となる。

雲・降水過程の役割

- 降水形成
 - 雲の微物理構造
 - 降水形成速度・降水効率
 - 降水のタイミング・場所・強度
- 潜熱の解放・吸収・再分配を介して雲のダイナミクスに関与
 - 相変化に伴う潜熱・粒子の荷重
 - 鉛直流の時間変化項
 - 雲の力学構造
 - 発達・維持



メソスケール現象は降水現象に直接関係するため、雲・降水を詳細に扱う必要があることは述べてきた通りである。この為、大気中に雲が形成され、雲の中で水滴が成長し、最終的に降水として地上に降るといふ雲・降水過程を全球モデルよりも詳細に扱うことが求められる。雲内での雨粒の成長を模式的に示した図をスライドに示す。

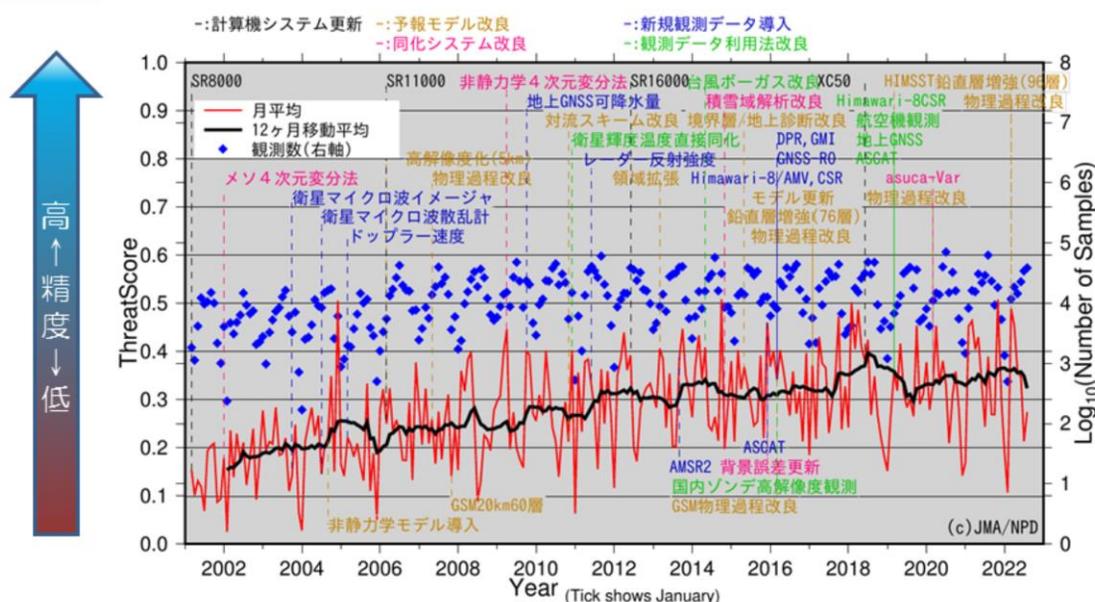
大気中の凝結した水は、様々な形態や大きさで存在し、その形態や大きさによって相変化の特性は細かく変わってくる。粒子ひとつひとつを予報するのは現実的ではないので、形態毎に集団的に状態を記述する簡便な方法(これを「バルク法」と言う)が考えられる。大気中の水は相変化を繰り返しており、雲水、雲氷、雨、雪、あられなど、様々な状態、形で存在している。このように水の状態をいくつかのカテゴリーに分類し、相変化を考慮することによってカテゴリー毎の量を予測し、雲の発達・衰弱の様子をより正確に表現しようというのが雲物理過程である(本田ほか 2018)。非静力学モデルであるメソモデルや局地モデルでは雲物理過程を採用しており、降水形成についての予測を行っている。

このように雲の微物理構造をモデル化した過程を取り入れることによって、降水の形成を予測している。また、相変化に伴う潜熱の解放・吸収・再分配を計算しており、雲物理過程それ自身が鉛直流の時間変化に影響を及ぼす。

一方で、全球モデルにおいては雲水から降水への変換や再蒸発、雪の融解などの単純化した雲微物理を取り扱っている。

メソモデルの精度向上

予報時間03～15時間の3時間毎の降水量予測に対する平均スコア
 (閾値10mm/3h, 検証格子20km, 2001年3月～2022年8月)



メソモデルの降水量予測に対する平均スレットスコアの推移を示す。スレットスコアは高いほど精度が良い(スレットスコアについての説明は、4.7節を参照)。また、メソ数値予報システムの更新を図中に示す。

継続的なメソ数値予報システムの開発・更新によって、年々精度が向上していることが分かる。

参考文献

- 石田純一, 室井ちあし, 2013: はじめに, 平成25年度数値予報課報告・別冊第60号, 気象庁予報部, 1-4.
- 氏家将志, 2020a: 雲過程, 令和元年度数値予報課報告・別冊第66号, 気象庁予報部, 45-55.
- 氏家将志, 2020b: 積雲対流パラメタリゼーション, 令和元年度数値予報課報告・別冊第66号, 気象庁予報部, 33-44.
- 加藤輝之, 1999: 湿潤対流における非静力学効果, 気象研究ノート第196号, 153-168.
- 川野哲也, 1999: Bin法雲物理とモデルへの導入, 気象研究ノート第196号, 85-102.
- 斉藤和雄, 2003: 概論. 数値予報課報告・別冊第49号, 気象庁予報部, 1-15.
- 数値予報開発センター, 2022: メソモデルの改良, 令和3年度数値予報開発センター年報, 気象庁数値予報開発センター, 94-99.
- 辻村豊, 2019: はじめに. 平成30年度予報技術研修テキスト, 気象庁予報部, 142-144.
- 成田正巳, 2020: メソ・局地数値予報システムの改良, 令和元年度数値予報課報告・別冊第66号, 気象庁予報部, 1-7.
- 本田有機, 坂本雅巳, 藤田匡, 計盛正博, 室井ちあし, 2018: 数値予報モデル. 平成30年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 90-105.
- 松林健吾, 河野耕平, 石田純一, 室井ちあし, 2013: 時間離散化, 平成25年度数値予報課報告・別冊第60号, 気象庁予報部, 43-52.



第1章 基礎編

1.7.6 メソアンサンブル予報システム

なぜメソモデルで アンサンブル予報を行なうのか

大気にはカオス的な性質がある

- 初期値等に微小な誤差や不確実性があると、後の予測結果に大きな差を生むことがある
- 特に、(注警報の対象となるような)スケールの小さい現象では1日程度先においても影響が大きくなるほど予測誤差の時間発展が速い



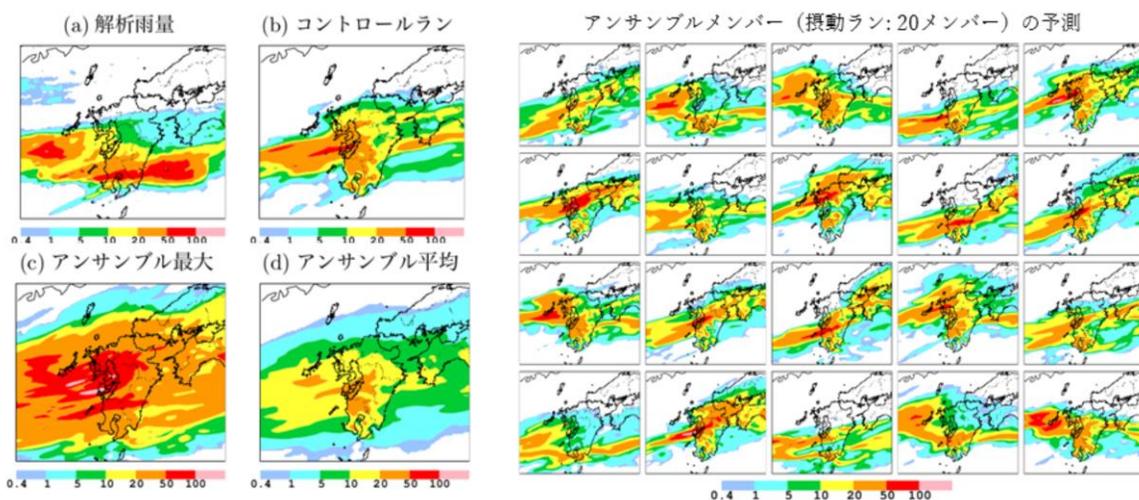
予報がもつ不確実性を反映したばらつき(摂動)を加えた複数の予測を行い、**予報の誤差の広がり**を把握する**メソアンサンブル予報が必要**

数値予報モデル	メソモデル(MSM) (asuca)
予報領域	
水平格子間隔	5 km
鉛直層数 (モデルトップ)	96 (37.5 km)
初期時刻	00, 06, 12, 18 UTC
予報時間	39時間
メンバー数	21
初期摂動	特異ベクトル法
側面境界摂動	全球特異ベクトルの 線形時間発展
モデル摂動	なし

大気にはカオス的な性質があり、予報時間が長くなればなるほど誤差が急激に大きくなることから、予報時間が長いときにメソスケール現象を時間と場所を特定して防災に資する精度で単一の決定論的予報から予測することには限界がある。メソモデル(MSM)が対象とするメソスケール現象の予測は防災上極めて重要であるが、総観スケールの現象に比べて予測可能性が本質的に低いことが指摘されている。これは、ほぼ完全な初期値、数値予報モデルといった理想的な条件下でも、メソスケール現象予測では積雲対流などの時空間スケールの小さい現象の非線形性が卓越し、初期値に含まれる僅かな誤差が急速に時間発展することにより、短時間のうちに決定論的予測限界を迎えることを意味している(國井・小野 2020)。そのため、災害をもたらすような局地的な集中豪雨等のメソスケール現象を時間と場所を特定して予測するには、未だ多くの困難が残されている。一方、現象の予測不確実性を評価するアプローチとしては、数値予報の誤差の要因に対応する僅かなばらつきを加えた複数の予測(アンサンブル予報)が有効である。アンサンブル予報はメソモデルの予測に対する信頼度の把握や複数シナリオの抽出などを可能とするため、顕著現象への効率的なリスクマネジメントという点で非常に有用な手段となる。気象庁では、メソ数値予報システムのアンサンブル予報であるメソアンサンブル予報システムの本運用を2019年6月27日に開始した(河野ほか 2019)。メソアンサンブル予報システムの仕様を表に纏めた。詳細は次頁以降に示す。

メソアンサンブル予報システム

- Meso-scale Ensemble Prediction System: MEPS
- **MSMの予測に対して、コントロールラン(MSM)とは異なる複数の予測を計算し、信頼度・不確実性等の情報を提供することを目的とする数値予報システム**
- MSMと同じ水平格子間隔(5km)で、日本付近を対象に1日4回3時,9時,15時,21時初期値の39時間先までのアンサンブル予測計算(21メンバー)を実行



2019年6月30日9時 初期値 7月1日9時の3時間降水量(24時間予報)



気象庁 Japan Meteorological Agency

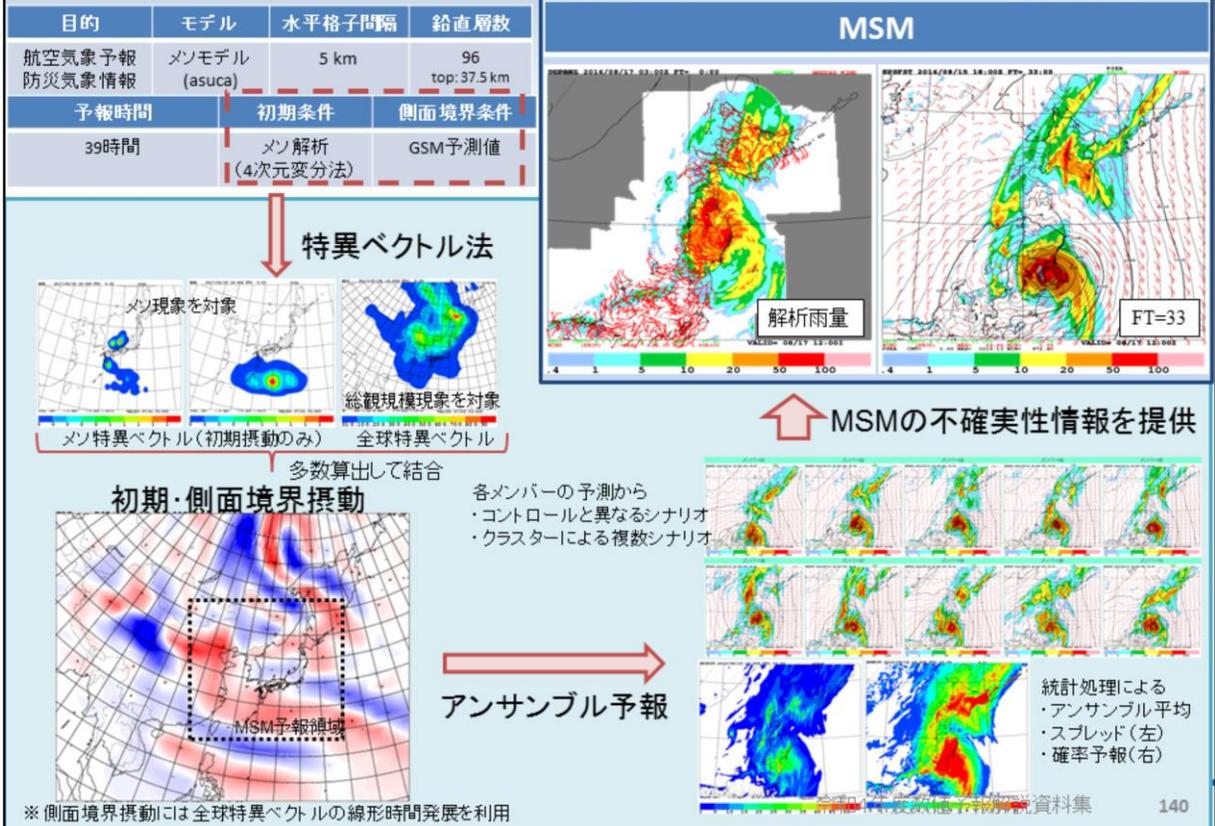
令和4年度数値予報解説資料集

139

メソモデルの予測に対してより適切な信頼度や不確実性等の情報を提供するために、メソアンサンブル予報システムの各メンバーの予測特性がメソモデルと同様であることが望ましい。そこでメソアンサンブル予報システムでは、各メンバーの予測における計算領域や水平格子間隔、鉛直層配置、物理過程を含む各種設定を、全てメソモデルに揃えている。メソアンサンブル予報システムはメソモデルと同じく水平格子間隔5km鉛直96層であり、モデルについてもメソモデルと同じ asuca を使用して、1日4回39時間先までのアンサンブル予測計算を行っている。

図に、メソアンサンブル予報システムの予測結果の一例を示す。メソアンサンブル予報システムは、アンサンブル摂動を加えないメンバー(コントロールラン:メソモデルによる予測結果そのもの。1メンバー)と、コントロールランにアンサンブル摂動を加えたメンバー(摂動ラン:20メンバー)の計21メンバーの予測結果を出力する。メソアンサンブル予報システムにおいて、アンサンブル摂動は初期値と側面境界値のみに与えられ、下部境界摂動や数値予報モデル自体の不確実性は考慮していないため、各アンサンブルメンバーは初期値と側面境界値を除きメソモデルと全く同じ仕様となる。アンサンブル最大とアンサンブル平均は、アンサンブルメンバー間の統計量である。格子ごとのメンバー間の最大値をアンサンブル最大、平均値をアンサンブル平均という。これらは統計量であり、モデルの予測結果そのものではないため、利用にあたっては物理量間で整合が取れたものになっていないことに注意が必要である。

メソアンサンブル予報システムの概要



スライドに、メソアンサンブル予報システムの具体的な処理の流れを示す。

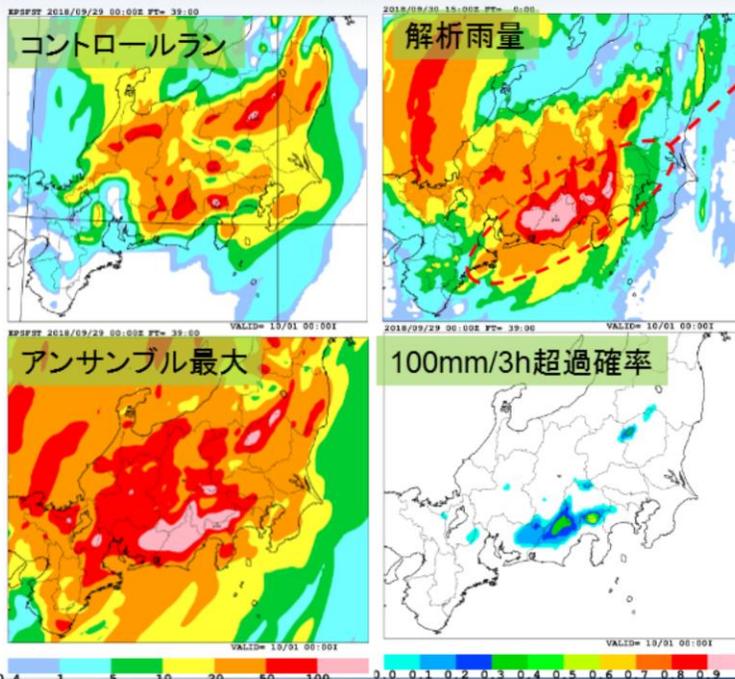
メソアンサンブル予報システムにおいてはコントロールランであるメソモデルの初期値・側面境界値に摂動を加えることで摂動ランを計算している。この摂動作成の手法として、少ないメンバー数でメソモデルの不確実性を効率的に表現するため、特異ベクトル法という手法を用いている。特異ベクトル法は指定した評価時間・領域において線形成長率の大きい摂動を算出する手法で、アンサンブル予報における有効な初期摂動作成手法のひとつである。特異ベクトルには、気象庁全球モデルに基づく全球特異ベクトル、気象庁非静力学モデル JMA-NHM に基づく水平格子間隔の異なる2種類のメソ特異ベクトルがあり、これら特異ベクトルを多数算出して結合することで初期値摂動を作成する。側面境界値摂動については、全球特異ベクトルを時間発展させたものを利用して作成する。これら初期値・境界値摂動によって20メンバーの摂動ランを構成している。この点で、メソアンサンブル予報システムは初期値と側面境界値に起因する不確実性を定量化するシステムといえる。

このように構成した20メンバーの摂動ランについてメソモデルと同じ asuca を用いて予測計算を行い、各摂動ランの予測結果とする。この時、統計処理によってアンサンブル平均やアンサンブルスプレッド、確率予報などを算出している。また、メソアンサンブル予報システムによる予報摂動により、局地解析のハイブリッド同化に必要なモデル誤差を与えている。

メソアンサンブル予報システムによる予測例 平成30年台風第24号

2018年10月1日0時を対象とした前3時間降水量

9月29日
00UTC
初期値
FT=39



東海地方の南斜面
での100mm/3h以上
の強雨に注目

- コントロールラン：
強雨を見逃し
- アンサンブル最大：
強雨を捕捉
- 超過確率：
30～40%の確率



気象庁 Japan Meteorological Agency

令和4年度数値予報解説資料集

141

平成30年台風第24号による大雨の事例について、メソアンサンブル予報システムによる予測例をスライドに示す。2018年10月1日0時を対象とした前3時間降水量で、コントロールラン、解析雨量、アンサンブル最大、100mm/3h超過確率を示している。ここで、100mm/3h超過確率は、100mm/3h以上の降水量となったメンバーの割合を格子ごとに計算した統計量である。

解析雨量で解析されている東海地方の南斜面での100mm/3h以上の強雨に着目する。予報時間FT=39のコントロールランでは降水が過小になっており、メソモデルでは東海地方の強雨を見逃している。一方でアンサンブル予報では、アンサンブル最大で強雨が捕捉されていることに加え、その超過確率が30～40%であることが示されている。このように、決定論的予測で表現できなかった現象をアンサンブル予報によって確率的に捕捉できることがある。

なお、この事例については、メソモデルも初期値が新しくなるにしたがってコントロールランで100mm/3h以上の強雨を表現するようになり、100mm/3h超過確率も高まっていった。このような初期値による変化から、強雨の発生可能性の高まりを捉えることができる。

参考文献

- 河野耕平, 氏家将志, 國井勝, 西本秀祐, 2019: モノアンサンプル予報システム. 令和元年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 1-15.
- 國井勝, 小野耕介, 2020: モノアンサンプル予報システム, 令和元年度数値予報課報告・別冊第66号, 気象庁予報部, 85-115.



第1章 基礎編

1.7.7 局地解析

局地解析の主な仕様

	局地解析	メソ解析
同化システム	asuca-Var	asuca-Var
水平格子間隔(東西格子数×南北格子数)	5 km (633×521)	アウター: 5 km (817×661) インナー: 15 km (273×221)
鉛直層	48層 (地上～約21.8 km)	アウター: 96層 (地上～37.5 km) インナー: 48層 (地上～37.5 km)
観測打ち切り時刻	30分 <small>アメダス地上観測</small>	50分 <small>利用する観測データも異なる</small>
解析値推定法	ハイブリッド3次元変分法	4次元変分法 <small>解析雨量</small>

局地解析実行の流れ
(03 UTC 初期時刻の例)

予測精度向上の工夫として、
「解析と1時間予報の繰り返し」を導入している



- ・高頻度の実行と速報性を重視して、計算負荷が小さい3次元変分法を採用
- ・観測データ情報の十分な利用の面では、4次元変分法を用いるMSMに及ばない



近年、時間・空間規模の小さい積乱雲等に伴う局地的な豪雨による災害が目立ち、防災上の観点から、その予測精度向上への要請が強まっている。また、航空機の安全な運航のため、天候の急変を捉えるなど、飛行場近辺における時間・空間分解能の細やかな気象情報の需要が高まっている。

これらの要請に応えるため、より小さいスケールの現象を表現でき、最新の観測データを反映した初期値による予測結果を迅速に提供できる局地数値予報システムが開発された。局地数値予報システムは2012年8月30日に本運用が開始され、2015年1月には、asucaを基にした変分法データ同化システム asuca-Var が導入されている(原 2015)。

局地数値予報システムは局地解析と局地モデルからなり、本節では局地解析について示す。

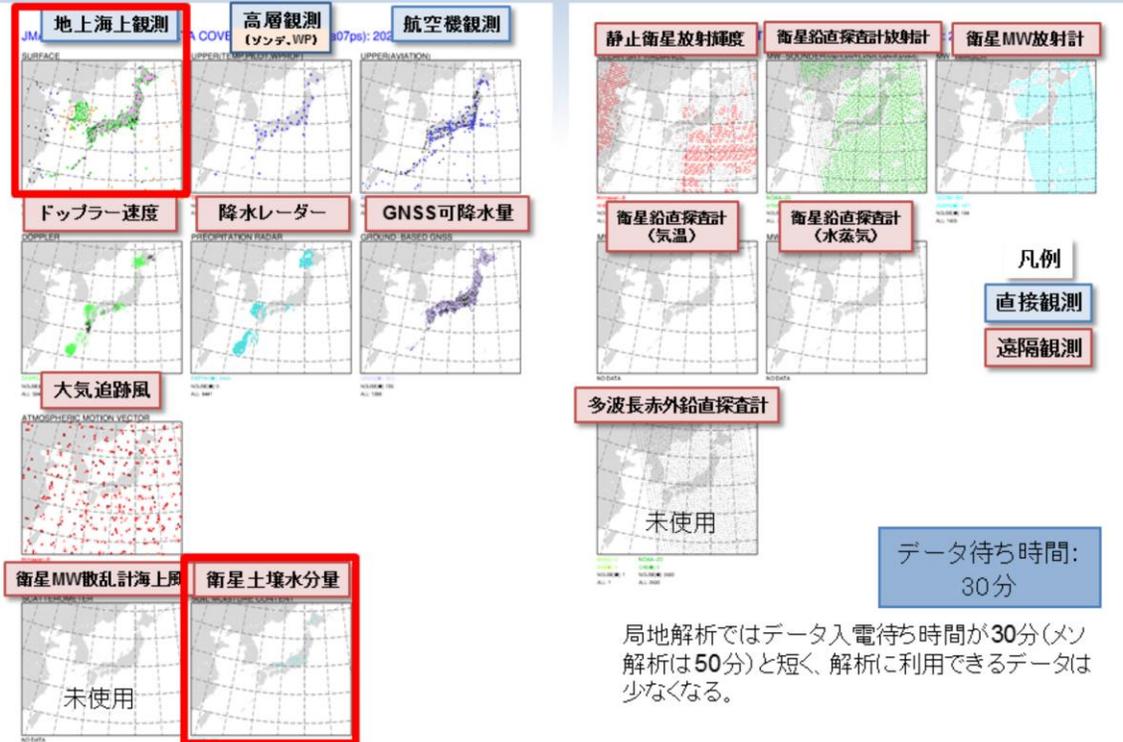
局地解析は1日24回、毎正時に実行され、局地モデルの初期値を作成する。局地解析の主な仕様のメソ解析との対比をスライドの図に示す。

局地解析もメソ解析(1.7.4節を参照)と同様に asucaに基づくデータ同化システムではあるが、メソ解析とは異なり、解析手法に3次元変分法を用いている(2022年3月からは、メソアンサンブル予報から見積もられる予報誤差を組み込むハイブリッド同化を導入(数値開発予報センター2022))。4次元変分法は高精度な解析値を得られる反面、インナーモデルの繰り返し計算が必要であることから計算負荷が非常に大きい。局地解析は高頻度で速報性が求められるデータ同化システムであることから、計算負荷が小さい3次元変分法を採用している。したがって、4次元変分法を用いるメソ解析と比べると、観測データが十分に利用されているとは言えない。

3次元変分法の場合は、原理的に解析対象時刻の観測データしか利用できないという制約がある。そのため、局地解析では、初期値作成時刻の3時間前から、3次元変分法による解析と1時間予報の繰り返しによる解析・予報サイクルを実行し、初期値作成対象時刻の前3時間分の観測データの情報を解析値に取り込むようにしている。例として、図に12時初期時刻における局地解析実行の流れを示す。

また、局地解析で利用する観測データはメソ解析と異なる。局地解析の特徴として、全球解析やメソ解析では利用されていないアメダスデータを利用していることが挙げられ(本田ほか2018)、局地解析が高解像度であることによる特色の一つとなっている。

局地解析の利用観測データの分布



局地解析で利用している観測データの分布図を示す。観測の打ち切り時間が30分と、メソ解析の50分と比べても更に短く、利用される観測データはメソ解析に比べても少なくなっている。

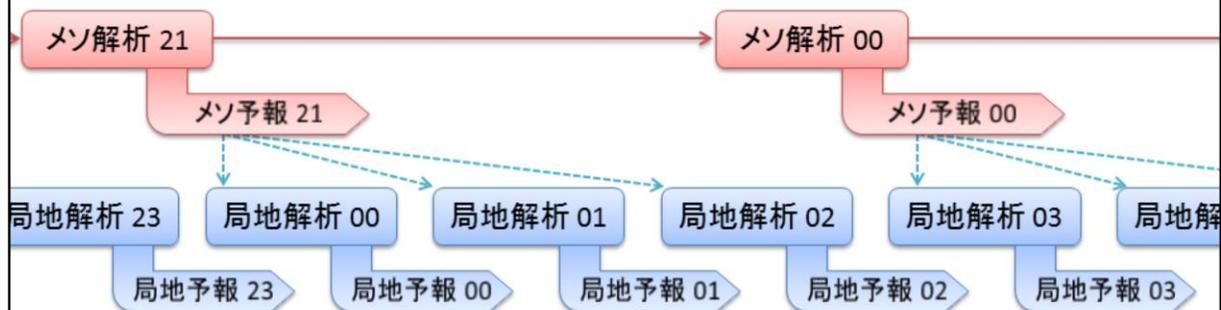
全球・メソ解析では用いられず、局地解析でのみ利用されている観測データを含む分布図を赤枠で囲った。

局地解析の特徴として、アメダスデータを同化していることが挙げられる。アメダスデータでは、気温・風を同化している。また、地上観測についても全球・メソ解析においては気圧のみしか同化されていない一方、局地解析では気圧に加え気温・風・湿度を同化している(計盛ほか 2018)。このように、全球・メソ解析で利用されていない地上の観測データを同化することにより、少ないデータ待ち時間の中で大気下層の解析精度向上を図っている。

衛星土壌水分量を同化に利用していることも、局地解析の特徴のひとつである。様々な衛星には土壌水分に関するプロダクト(土壌水分量プロダクト)があり、定常的且つ広範に同化利用できる。土壌体積含水率が修正されることで地表面フラックスを介して地上気温予測が修正されるため、土壌水分量の初期値の修正が地上気温予測に効果をもたらす(幾田 2017)。

局地数値予報システムの特徴：高頻度

- 最新の観測をいち早く取り入れた初期値からの予報を、高頻度で更新していく



- ある程度精度の保証されたメソ予報 (MSM) が常に利用できる
- そのメソ予報の予報値を基 (第一推定値) に最新の観測を同化した初期値を作成
- 高頻度に解析 + 予報を実行

最新の情報 (第一推定値・観測) を反映させ、
目先 (短時間) の予報資料を充実

局地数値予報システムの特徴のひとつとして、高頻度であることが挙げられる。1日24回、毎正時に実行されており、1日8回のメソ数値予報システムよりも高頻度に行われている。

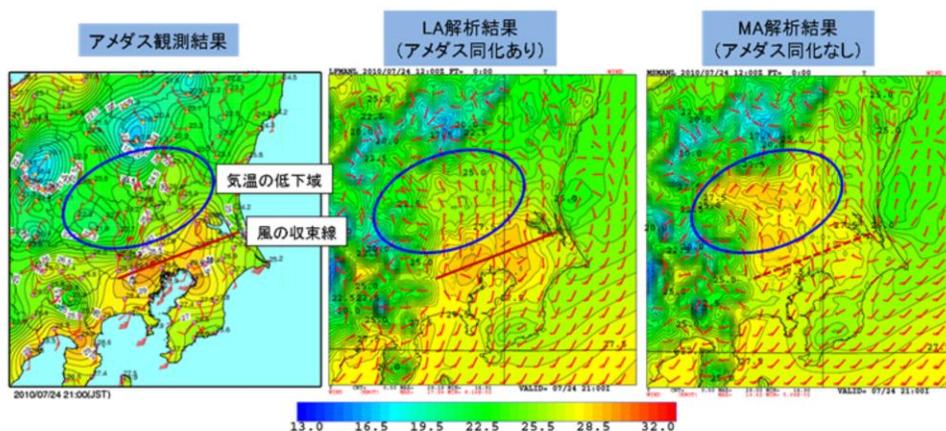
高頻度に数値予報システムを実行する利点として、最新の観測をいち早く取り入れた初期値からの予測を高頻度に提供できる点がある。この利点により、きめ細やかに予測結果を提供している。

図にメソ解析と局地解析の関係を示す。局地数値予報システムは、メソ数値予報システムのようにサイクルが閉じておらず、第一推定値としては局地モデルの予測ではなくメソモデルの予測を用いている。これは、計算時間の制約上、局地数値予報システムだけでサイクルを回すことが難しいためである。また、局地モデルはメソモデルと同様に領域モデルであり、メソモデルの予測から側面境界値も取得している。側面境界値は総観規模スケールの気圧配置をほぼ決めてしまうことから、顕著な対流現象がない場合には、メソモデルと局地モデルで同じような予報になることがある。このため、局地数値予報システムはメソ数値予報システムの影響を大きく受ける。

局地数値予報システムの特徴：高解像度 解析の水平格子間隔は5 km

- モデル地形の表現性向上→局地的な地形の影響を強く受けている観測データも同化可能に
 - AMeDASの気温・風

地上収束線が関東地方を南下した事例(2010年7月24日21時)の地上気温・風



局地数値予報システムの特徴のひとつとして、高解像度であることが挙げられる。局地解析自体の水平格子間隔は5kmであり、メソ解析の OUTER モデルの水平格子間隔と同等である。一方で1.7.8節で示されるように局地モデルの水平格子間隔は2kmであり、メソモデルの水平格子間隔5kmより更に高解像度な数値予報モデルとなっている。水平格子間隔が小さい分、モデルの地形はメソモデルと比べても現実の地形に近くなっており、地形の表現性が向上している。

この恩恵として、局地的な地形の影響を強く受けるアメダスの気温・風データが同化に利用できる、ということが挙げられる。図に、2010年7月24日21時のアメダス観測、局地解析、メソ解析を示す。塗りつぶしは地上気温を、矢羽根は地上の風向・風速を示している。アメダス観測では、青丸で囲った領域の気温が低くなっており、局地解析ではアメダスデータの同化によって観測に準じたものとなっているが、メソ解析では観測が反映されておらず観測に比べ高温になっている。また、赤線で示される風の収束線についても、メソ解析では不明瞭であるのに対し、局地解析ではアメダスを同化することによって明瞭に示されている。このように、局地解析ではアメダスデータを同化することによって、大気下層の解析精度が向上している。

参考文献

- 幾田泰醇, 2017: 局地数値予報システムにおける新規観測データの利用開始及び同化手法の高度化, 平成29年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 82-85.
- 計盛正博, 本田有機, 佐藤芳昭, 2018: 観測データと品質管理. 平成30年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 72-82.
- 数値予報開発センター, 2022: 局地解析へのハイブリッド同化手法の導入. 令和3年度数値予報開発センター年報, 気象庁数値予報開発センター, 102-105.
- 原旅人, 2015: はじめに. 平成27年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 1.
- 本田有機, 藤田匡, 計盛正博, 室井ちあし, 佐藤芳昭, 2018: データ同化. 平成30年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 84-89.

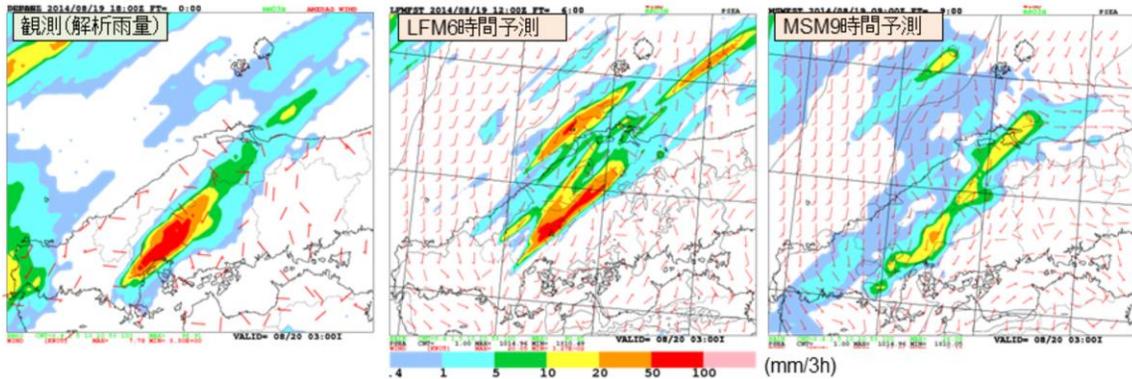


第1章 基礎編

1.7.8 局地モデル

局地モデル

- 利用目的：防災気象情報、航空気象情報、降水短時間予報
- メソモデルより細かい水平格子間隔(2 km)と高い頻度(1日24回(毎時))で、日本付近を対象に10時間先までの予測計算を実行
- 局地的な大雨や飛行場における風の急変等、目先数時間程度の局地的な現象が予測対象



平成26年8月豪雨の予測例
(平成26年8月20日3時までの前3時間積算降水量)



局地モデルは、航空気象情報、防災気象情報の作成支援に用いられている。

メソモデルは水平格子間隔が5kmであるのに対して局地モデルは水平格子間隔が2kmであり、メソモデルと比較して高解像度で予測計算を行っている。数値予報モデルを高解像度化することによって、現象の表現性が向上し、より細やかなスケールの空間的・時間的变化を表現できるようになる。また、メソモデルと比較して高頻度に行われており、1日24回(メソモデルは1日8回)、毎正時の解析値を初期値として、10時間先までの予測計算を行っている。これらを活かし、局地的な大雨や飛行場における風の急変など、目先数時間程度の局地的な現象を主な予測対象としている。

図は、平成26年8月豪雨の予測の結果を示す。左から、解析雨量、局地モデル、メソモデルの予測結果であり、平成26年8月20日3時までの前3時間降水量を示す。解析雨量では線状の強雨域が解析されており、局地モデルでは解析雨量に近い強雨域が表現されている。メソモデルでも降水強化は表現されているものの、解析雨量と比べると降水量が不十分である。このように、局地モデルではメソモデルでも捉えられないような局所的な現象を捉えられることがある。

局地モデルとメソモデルの主な仕様

	局地モデル (LFM)	メソモデル (MSM)
予報モデル	asuca	
水平格子間隔	2 km (1581 × 1301)	5 km (817 × 661)
鉛直層	76層 (地上～約21.8 km)	96層 (地上～37.5 km)
積分時間間隔	12秒	100/3 (= 33.333...)秒
初期値	局地解析 (LA)	メソ解析 (MA)
側面境界値	メソモデル (MSM)	全球モデル (GSM)
予報頻度・時間	1日24回、10時間	1日8回 78時間 (00, 12 UTC) 39時間 (03, 06, 09, 15, 18, 21 UTC)
積雲対流パラメタリ ゼーション	対流のイニシエーション	Kain-Fritsch スキーム



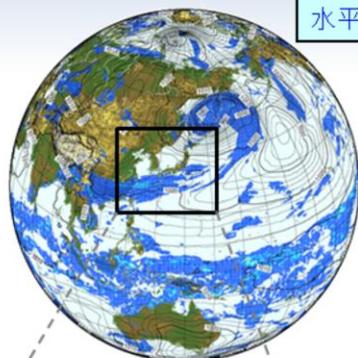
局地モデルの主な仕様を、メソモデルと対比して表に示す。

予報モデルはメソモデルと同じ非静力学モデル asuca を用いており、水平格子間隔 2km 鉛直 76 層での予測計算を行っている。

局地モデルとメソモデルの主要な差異として、積雲対流パラメタリゼーションの違いがある。メソモデルでは Kain-Fritsch スキームを用いて予測しているが、局地モデルでは主に対流のイニシエーション(立ち上がり)を適切に扱うためにパラメタリゼーションが用いられている。局地モデルの運用開始当初、水平格子間隔が 2km である局地モデルでは積雲対流パラメタリゼーションが用いられていなかった。しかし、積雲対流の発生が遅れること、そのために過剰に蓄積されたエネルギーが短時間で上昇流に転換されて過大な降水量を予測したり、実況よりも遅い時間まで積雲対流による降水を予測することが多いことが明らかとなったため、積雲対流発生と終息の表現向上を目的に、局地モデルでは対流の立ち上がりを表現するパラメタリゼーションが用いられるようになった(河野・原 2014)。

計算領域とモデルで表現される地形

全球モデル



全世界の気象予測を1日4回実行
水平格子間隔 約20km

GSMの地形



日本及びその近海の気象の
詳細な予測を1日8回実行
水平格子間隔 5km

日本周辺の気象の
さらに詳細な予測を1日24回実行
水平格子間隔 2km

メソモデル



局地モデル



メソモデル地形図



局地モデル地形図

図に、全球・メソ・局地モデルの予測計算領域と、各モデルにおける地形を示す。メソモデルと局地モデルは共に領域モデルであるが計算領域が異なっており、局地モデルはより日本付近へと領域を絞っている。領域を絞ることで計算量を抑え、水平格子間隔2kmという分解能を実現している。また、全球モデルとメソ・局地モデルは、それぞれの水平格子間隔に応じてモデルで表現される地形が異なる。局地モデルのモデル地形は、メソモデルと比べても精緻である。

参考文献

- 河野耕平, 原旅人, 2014: LFMとしてのasuca の特性, 平成26年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 108-117.



第1章 基礎編

1.7.9 毎時大気解析

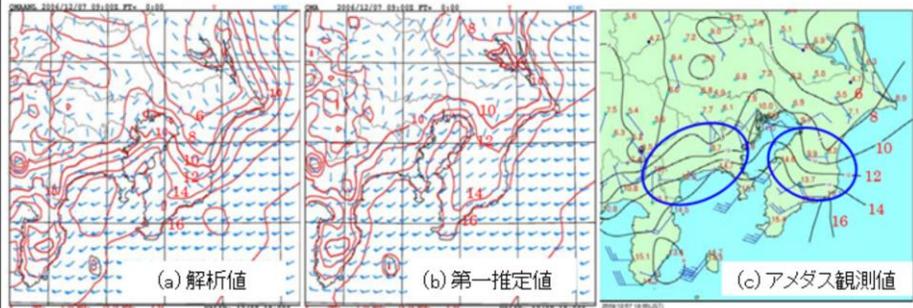
毎時大気解析の概要

- asuca に基づく 3次元変分法(asuca-Var) がベース

毎時大気解析(QA)の仕様	
解析手法	3次元変分法
格子間隔(東西格子数×南北格子数)	5 km (721×577)
第一推定値の鉛直層	96層(地上～37.5 km)
解析値の鉛直層	48層(地上～約21.8 km)
観測打ち切り時刻	18分

2006年12月7日
09UTCの
地上風・地上気温

(藤田(2007)の図を加筆。
矢羽は風。(a)・(b)長い
(短い)羽は10(5) kt ≈
5.1(2.6) m/s。(c)長い
(短い)羽は2(1) m/s。
等値線は気温[°C]。)



気象庁 Japan Meteorological Agency

令和4年度数値予報解説資料集

155

毎時大気解析は、客観解析による風・気温の3次元的な分布を示した実況監視のための資料であり(酒井 2001; 西嶋 2004, 2005; 藤田 2007, 2008)、一般予報だけでなく、航空予報などの現場における実況監視のための資料としても活用されている(原 2017; 工藤 2017)。2001年4月からしばらくは風のみを解析していたが、2006年3月に気温も解析するようになると同時に「毎時大気解析」という名称に変更されて現在に至る(詳細は 工藤 2004; 西嶋 2004; 室井ほか 2008)。

実況把握において観測データを考慮することは重要であるが、観測データは空間的に不均一に分布しているため、そのデータのみから大気の詳細な把握するのは難しい。一方、モデルの初期値作成を行う全球解析・メソ解析・局地解析は、時空間的に統一性のある形式で利用できるが、観測データ収集にかかる時間(カットオフ時間)を十分確保した上で計算や配信を行わなければならない、実況監視という意味では速報性を欠いている。そこで、毎時大気解析では、様々な観測データを利用した客観解析を毎時速報的に行うことで、統一性のある形式でかつ速報的な資料提供を実現している(室井ほか 2008)。

仕様はスライドの表の通りである。第一推定値にはメソモデル(MSM)の予測値を用いており、システムにはasucaをベースにした変分法データ同化システムasuca-Var(幾田 2014)を用いている(2017年7月以前のシステムJNoVAについては Honda et al. (2005)、気象庁予報部(2010)を参照)。また、毎時大気解析ではアメダス観測点付近の地上解析値がアメダス観測値に非常に近くなるように設定しているが、これに対応して海岸線付近の観測値による解析インクリメントが海上にまで不自然に広がるのを防ぐため、地上フィルター(藤田 2008; 原 2017)を実装している。

利用上の注意としては、主に次の点が挙げられる(気象庁予報部 2020)。

(1) 風解析は全体的な風の空間分布や時間変化を把握するための資料である。雷雨等に伴う地上収束域や、メソスケール前線、上中層トラフの構造や動向などを理解する上で有用。

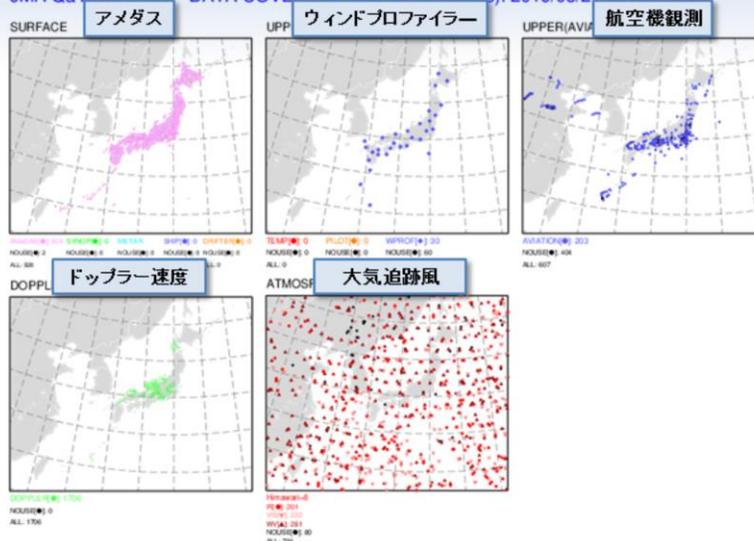
(2) 地上風では、地形の影響による局所的な風の強弱が平滑化され、解析値は数十kmスケールでの代表的な風の場となる。このため、特定の地点における風向・風速値としての利用には適さない。

(3) また、ダウンバーストや竜巻など、時間・空間スケールが小さい現象は表現できない。

(4) 観測点から離れた領域では修正量が小さく、解析値は第一推定値とほぼ同じ。これは観測データがほとんどない海上や100hPa面などで顕著。また、高層の気温解析では観測値が少ないため、第一推定値が修正されない領域が広がる。

毎時大気解析の利用観測データの分布

JMA Qa ANALYSIS - DATA COVERAGE MAP - 1 (Qa06qs): 2019/08/21 06:00(LTC)



データ待ち時間: 18分

観測データ(要素):

- ・アメダス(地上風・地上気温)
- ・ウィンドプロファイラー(風)
- ・航空機観測(風・気温)
- ・ドップラー速度(風)
- ・大気追跡風(風)

毎時大気解析で利用している観測データの分布図をスライドに示す。いずれも日本付近の風・気温の観測データであり、対応する要素は下記の括弧内の通りである。

- ・アメダス(地上風・地上気温)
- ・ウィンドプロファイラー(風)
- ・航空機観測(風・気温)
- ・ドップラー速度(風)
- ・大気追跡風(風)

ここで、ドップラー速度とは、ドップラーレーダーによって測定された降水粒子の移動速度のことであり、これは大気中の風の情報を得るのに利用されている。

参考文献

- 幾田泰醇, 2014: asuca変分法データ同化システム, 平成25年度数値予報課報告・別冊第60号, 気象庁予報部, 91-97.
- 気象庁予報部, 2020: 配信資料に関する仕様 No.12401(令和2年3月31日付), ~毎時大気解析 GPV~, 気象庁予報部, 14pp.
- 気象庁予報部, 2010: 非静力学モノ4次元変分法. 数値予報課報告・別冊第56号, 気象庁予報部, 106pp.
- 工藤淳, 2004: 毎時風解析について. 航空気象ノート第63号, 気象庁航空気象管理官, 33-36.
- 工藤淳, 2017: 毎時大気解析の変更. 平成29年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 64-65.
- 酒井喜敏, 2001: 毎時下層風解析. 平成13年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 59-63.
- 西嶋信, 2004: 毎時風解析. 平成16年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 63-65.
- 西嶋信, 2005: 毎時大気解析. 平成17年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 63-65.
- 原旅人, 2017: 毎時大気解析の変更. 平成29年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 61-63.
- 藤田匡, 2007: 毎時大気解析の高度化. 平成19年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 98-101.
- 藤田匡, 2008: 毎時大気解析の改良. 平成20年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 58-61.

参考文献

- 室井ちあし, 藤田匡, 石川宜広, 2008: 気象庁毎時大気解析, 天気, 55(5), 日本気象学会, 401-408.
- Honda, Y., M.Nishijima, K.Koizumi, Y.Ohta, K. Tamiya, T.Kawabata and T.Tsuyuki, 2005: A preoperational variational data assimilation system for a non-hydrostatic model at the Japan Meteorological Agency: Formulation and preliminary results. Quart. J.Roy. Meteor. Soc., 131, 3465-3475.



第1章 基礎編

1.7.10 季節アンサンブル予報システム

季節アンサンブル予報システム

季節アンサンブル予報システム (JMA/MRI-CPS3)	
運用	2022年2月～
数値モデル	大気海洋結合モデル(第3世代)
水平分解能	大気: 約55km 海洋: 経度方向0.25度×緯度方向0.25度
鉛直層数	大気: 100層(上端0.01hPa) 海洋: 60層
初期値	大気: 全球速報解析 陸面: オフライン地表面解析(*) 海洋: 4次元変分法(*) 海氷: 3次元変分法(*) * 大気強制力は、速報解析部分が全球速報解析で、 遅延解析部分がJRA-3Q
予報時間	240日
メンバー数	初期値あたり5メンバー
実行頻度	1日1回
再予報	24初期値×5メンバー×30年(1991～2020年)
再予報初期値	大気: 気象庁第3次長期再解析(JRA-3Q) 海洋: 4次元変分法(大気強制力: JRA-3Q)
モデル出力解像度	全球域1.25度、日本域0.5625度

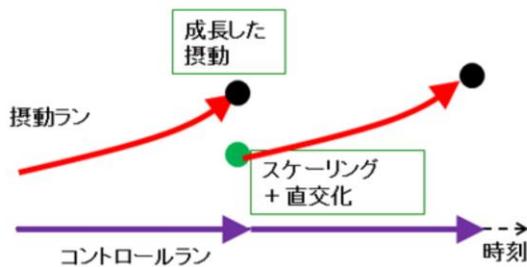
季節アンサンブル予報システムには、大気海洋結合モデルが用いられている。大気海洋結合モデルは海洋・海氷モデルの計算が加わり、大気モデルに比べて多くの計算機資源を必要とするため、大気部分の解像度は全球アンサンブル予報システム(GEPS)より粗くなっている。現業予報における大気・陸面初期値は、全球アンサンブル予報システム(GEPS)と同じであるが、海洋部分の初期値を4次元変分法、海氷の初期値を3次元変分法にて作成している点が異なる。1日1回5メンバーの計算を実施しており、予報時間は、時間ずらし平均法(LAF法)とリードタイムを考慮しても6か月予報に十分な期間として240日間となっている。

季節アンサンブル予報システム

アンサンブル摂動

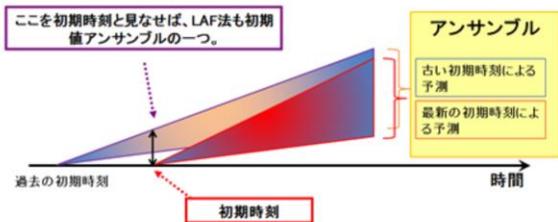
▶ 成長モード育成法(BGM法)

BGM(Breeding of Growing Mode)法は、前初期時刻の解析値に摂動を足し込んだ予測と足し込まない予測をそれぞれ計算することで、初期時刻までに成長した摂動を抽出する。



▶ 時間ずらし平均法(LAF法)

LAF(Lagged Average Forecasting)法はアンサンブル予報技術の一つで、最新の初期値だけでなく、古い初期値からも予報を行い、その結果を組み合わせるアンサンブル予報を構成する手法である。



季節アンサンブル予報システムの初期値あたりの摂動は、成長モード育成(BGM: Breeding of Growing Mode)法(Toth and Kalnay, 1993)で作成される。BGM法とは前初期時刻の解析値に摂動を足し込んだ予測と足し込まない予測をそれぞれ計算することで、初期時刻までに成長した摂動を抽出する手法である。予報の初期時刻以外の期間もBGMサイクルを維持する必要があるが、全球アンサンブル予報システム(GEPS)で用いている特異ベクトル(SV: Singular Vector)法に比べると計算コストが小さい。初期値直後から成長する摂動を作成する方法としてはSV法の方が優れているが、季節予報では週間から2週間の予報より初期値の重要性が比較的小さいため、計算コストの小さいBGM法を用いている。なお、季節アンサンブル予報システムの初期値あたりのコントロールメンバーとBGM法による摂動メンバーは合わせて5メンバーしかなく、季節予報における不確実性を表現するには不十分である。このため、季節予報では古い初期値からの予報も摂動として組み合わせることで、不確実性を評価するために十分な摂動数を確保する。この様に、最新の初期値だけでなく、古い初期値からも予報を行い、その結果を組み合わせるアンサンブル予報を構成する手法は、時間ずらし平均(LAF: Lagged Average Forecasting)法(Hoffman and Kalnay, 1983)と呼ばれる。LAF法は単純である上に、計算機資源を複数の日に分散することが出来るが、古い初期時刻からの予報精度は一般的に最新の初期時刻より低いため、予報精度が低下する。しかし、初期値の重要性が比較的小さい季節予報では、古い初期値を利用するによる予報精度の低下は僅かである。

季節アンサンブル予報システム 再予報

◆ 再予報(過去予報)

英語では、**Re-forecast (Hindcast)** と言うため、
日本語でも、**ハインドキャスト** と呼ばれることもある。
Hindcast は、**Behind + Forecast** の造語である。
運用するモデルを用いて行う過去事例の予報実験

➤ 再予報の目的

- 予測精度の評価
- モデル統計値(気候値・平年値)や系統誤差の計算

➤ 再予報の期間

- エルニーニョ・ラニーニャ現象等による変動の影響を除去するため、最低20年間以上は必要。平年値と同じ30年間が望ましい。

➤ 問題点

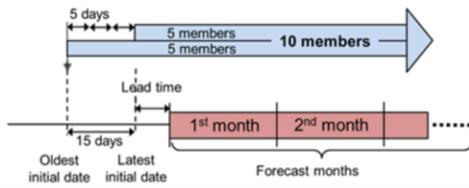
- 多くの過去事例について計算するため、大量の計算機資源を必要とする。
(気象庁では計算機資源の制約のため、運用モデルに比べて計算頻度を減らしている。)

季節予報を目的とした数値予報システムでは、予測精度の評価やモデル統計値(気候値・平年値)や系統誤差の計算のために再予報(Re-forecast, Hindcast)を行うことが一般的で、日本の気象庁だけでなく季節予報を実施している世界各国の数値予報センターでも実施されている。再予報はエルニーニョ・ラニーニャ現象等の数年周期の変動の影響を除去するために、最低20年以上の期間が必要で、平年値と同じ30年間が望ましい。しかしながら、多くの過去事例について計算するため、大量の計算機資源を必要とするため、気象庁では計算機資源の制約のため、運用モデルに比べて計算頻度を減らしている。

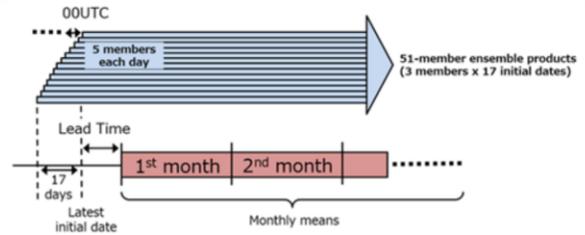
季節アンサンブル予報システム

再予報と現業予報の比較

■ 再予報



■ 現業予報



初期月 LAF初期日構成

1月	12/27, 12/12
2月	1/31, 1/16
3月	2/25, 2/10
4月	3/27, 3/12
5月	4/26, 4/11
6月	5/31, 5/16
7月	6/30, 6/15
8月	7/30, 7/15
9月	8/29, 8/14
10月	9/28, 9/13
11月	10/28, 10/13
12月	11/27, 11/12

- 再予報は現業予報と完全に同一のモデルを用いて行う必要がある。
- 計算機資源制約のため、再予報を実施する初期値は、月2日と少ない。
- 再予報の計算期間は、平年値と同じ1991～2020年の30年間である。

図は再予報と現業予報の仕様を比較したものである。系統誤差補正に利用するため、再予報は現業予報と完全に同一のモデルを用いて行う必要がある。現業予報では、毎日5メンバーの予報を行い、うち3メンバーを利用して17初期日のLAF法で51メンバーのアンサンブル予報を構成して予報を行っている。一方、再予報では15日間隔の月2日の初期値でそれぞれ5メンバーの予報を行い、LAF法で10メンバーのアンサンブル予報を構成している。再予報の計算期間は、平年値と同じ1991～2020年の30年間である。

季節アンサンブル予報システム 再予報の利用

■ 系統誤差(バイアス)

- モデル気候値(モデル平年値)と解析気候値(解析平年値)の差

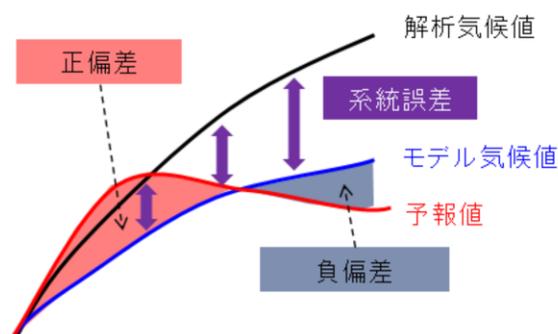
■ 偏差(平年差)

- モデル気候値(モデル平年値)と予報値の差

モデル気候値と予報値は同程度の系統誤差を持つため、
系統誤差の影響を最小限にすることが出来る。

■ 問題点

- ジェット気流の位置など、系統誤差補正が出来ない要素もある。
このため、より系統誤差の小さい
数値予報モデル開発が不可欠である。



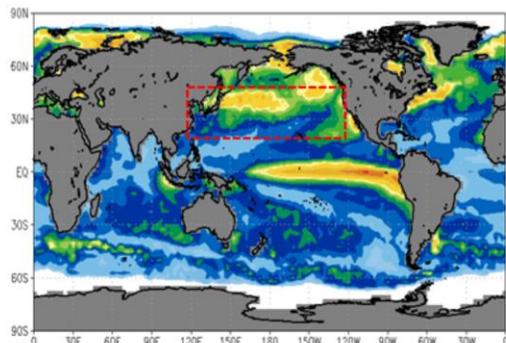
再予報は、系統誤差補正や偏差(平年差)の算出に利用されている。系統誤差とは、再予報の計算結果を平均して求めたモデル気候値(モデル平年値)と解析気候値(解析平年値)の差である。偏差(平年差)は、解析気候値(解析平年値)との差でも算出できるが、その場合は系統誤差の影響を受ける。モデル気候値(モデル平年値)と予報値の差を取ることで、系統誤差の影響を最小限にすることが出来る。しかし、モデル気候値(モデル平年値)を用いて、系統誤差の影響を最小限に補正することが出来るのは、気温やジオポテンシャル高度などの一部要素に限られ、ジェット気流の位置の系統誤差などは補正が不可能であるため、より系統誤差の小さい数値予報モデルを開発していくことが不可欠である。

季節アンサンブル予報システム

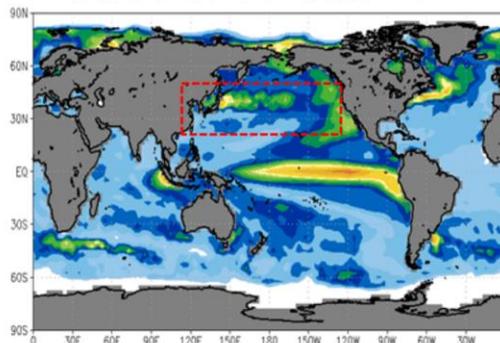
予測精度(海洋変動)

海面水温標準偏差

解析値(MGDSST)



季節アンサンブル予報システム

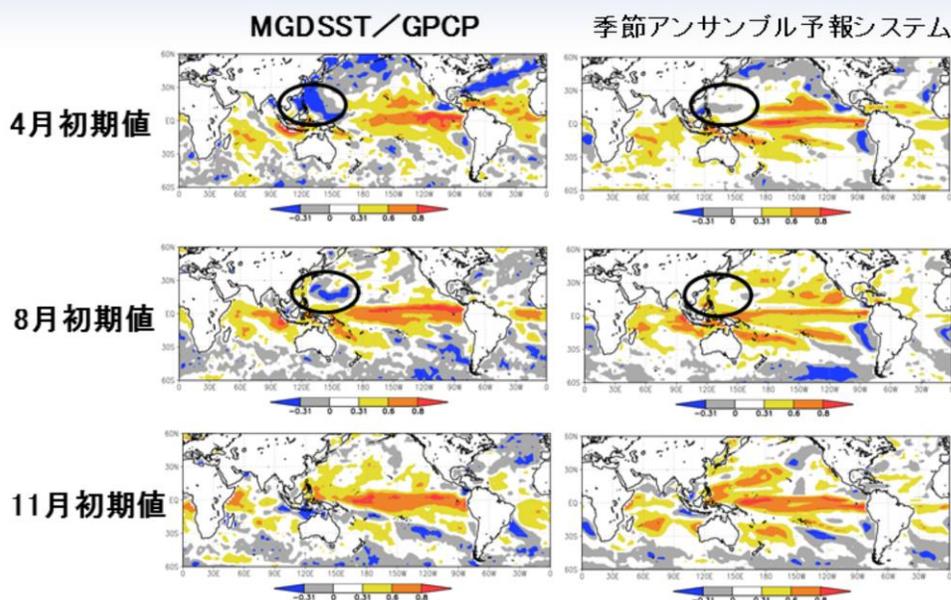


[K]

図は海面水温の標準偏差について、解析値(MGDSST)と季節アンサンブル予報システムを比較したものである。熱帯付近の海洋の渦を解像できる0.25度の渦許容海洋モデルを結合しているため、熱帯における海洋の変動は良く再現されていることが分かる。一方、より海洋の渦のスケールが小さい中緯度の黒潮続流域などでは海洋変動量が過小であるため、利用の際には注意が必要である。中緯度における海洋変動の再現性を改善するには、中緯度の海洋の渦を解像出来る0.1度の渦解像モデルの結合が必要である。

季節アンサンブル予報システム

予測精度(海面水温と降水量の相関)



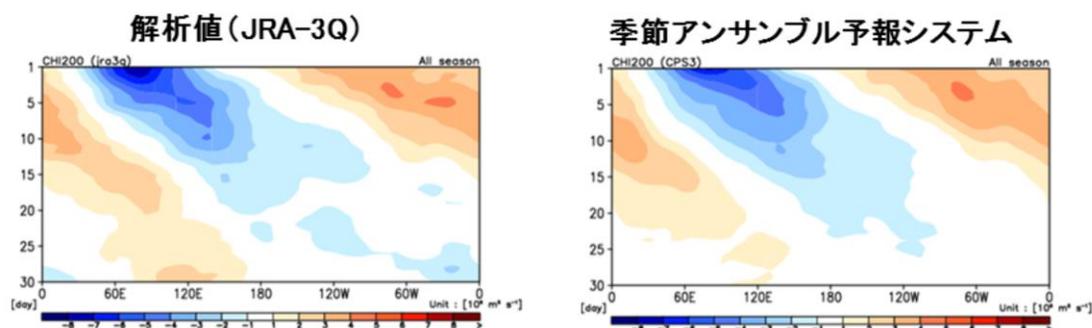
各初期月からの3か月予報における海面水温と降水量の相関

季節アンサンブル予報システムで用いている大気海洋結合モデルは、海面水温と降水量の過剰な正相関を抑制して、熱帯海洋変動に関連した大気海洋相互作用の再現性を向上する。しかしながら、4～8月の暖候期において、解析値では日本の南の海上では海面水温と降水量が負相関であるが、季節アンサンブル予報システムでは負相関となっていない。大気の解像度が粗く、熱帯低気圧による海面水温の急激な変化を十分に再現出来ていないこと等が考えられる。

季節アンサンブル予報システム

予測精度(赤道季節内振動(MJO))

200hPa速度ポテンシャルのホフメラー図



図は、インド洋域にMJOの対流活発位相がある時(Phase3)のCHI200合成図(全季節)

季節アンサンブル予報システムは、大気海洋結合モデルを用いているため、大気モデルに比べて大気と海洋の相互作用の再現性が高い。図は、赤道季節内振動(MJO)について、熱帯域の200hPa速度ポテンシャルの解析値と季節アンサンブル予報システムによる予測を比較したものであるが、MJOに伴う対流活発位相や対流不活発位相の東進が良く再現されていることが分かる。

参考文献

- 気象庁, 2022: 季節アンサンブル予報システムの改良. 数値予報開発センター年報(令和3年), 気象庁数値予報開発センター, 122-132.
- Toth, Z., and E. Kalnay, 1993: Ensemble Forecasting at NMC: The Generation of Perturbations. Bull. Amer. Met. Soc., 74, 12, 2317-2330.
- Hoffman, R. N. and E. Kalnay, 1983: Lagged average forecasting, an alternative to Monte Carlo forecasting. Tellus A, 35A, 100-118.
- 高谷祐平, 2012: 再予報・ハインドキャスト. 天気, 59, 493-495.



第1章 基礎編

1.7.11 長期再解析(JRA-3Q)

気象庁で実施している再解析

	第3次長期再解析 (JRA-3Q)	第2次長期再解析 (JRA-55)
解析期間	1947年9月～現在	1958年～2023年(予定)
データ同化システム	2018年12月版	2009年12月版
水平分解能	約40km	約55km
鉛直層数	100層	60層
海面水温境界値	1985年5月まで1.0° 1985年6月以降0.25°	1.0°
オゾン	オゾン解析値(全期間)	1978年まで気候値 1979年以降オゾン解析値



ClimCORE 領域再解析 (RRJ-ClimCORE)	JRA-55 領域ダウンスケーリング (DSJRA-55)
東京大学のスパコンにメソ解析システムを移植して高解像度化する共同研究を推進中(2021年9月～)	JRA-55を非静力学メソ数値予報モデル(NHM)による力学的ダウンスケーリングで、5kmに高解像度化
	1959年9月26日(伊勢湾台風)の日降水量

長期再解析では、長期間にわたって高品質かつ均質なデータセットを作成するため、最新かつ解析期間中一貫した解析システムを用いる。利用する観測データは、過去の現業数値予報で使用された観測データのほか、遅延入手したものや過去の紙で記録されたデータをデジタル化したものなどを可能な限り収集し、また衛星観測データ等については再処理されたより高品質なデータを可能な限り利用する。このような作業により、過去数十年間にわたる均質・高品質な各種物理量を含むデータセットを提供することが可能となる。

全球長期再解析は、欧州や米国などの世界の主要な国々で実施され、気候変動や異常気象の監視及び研究、季節予報、防災対策、再生可能エネルギーの用地選定や見積りといった経済活動等、幅広く活用されている。日本における全球長期再解析は、2006年に気象庁と電力中央研究所が共同で、約25年間の全球長期再解析(JRA-25)を最初に実施したのが始まりである。その後、2013年には気象庁がJRA-25の後継として約55年間の気象庁第2次長期再解析(JRA-55)を実施した。そして、2022年に最新のデータ同化システムを用いて解析精度を向上し、期間も約75年間に拡張した新たな気象庁第3次長期再解析(JRA-3Q:Japan Re-Analysis 3 quarters of the century)の計算を完了し、現在JRA-55からJRA-3Qに移行を進めている。

全球長期再解析を防災対策や経済活動で活用するためには、水平分解能が粗いことが問題である。このため、JRA-55では非静力学メソ数値予報モデルを用いて日本周辺の解像度を5kmに高める力学的領域ダウンスケーリングを実施した。しかし、力学的領域ダウンスケーリングでは、観測データを同化しないため、実際の現象と時間的・空間的なずれが生じる。このため、JRA-3Qでは精度を高めるべく、2021年9月に東京大学と共同で、メソ同化システムを用いて日本周辺の解像度を5kmに高める研究が推進されている。

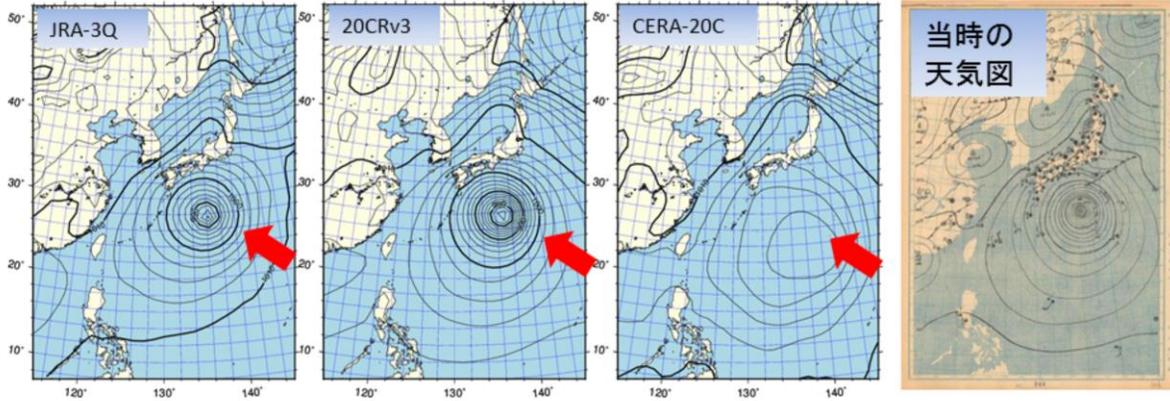
気象庁第3次長期再解析(JRA-3Q)

カスリーン台風の再現

国土防災(堤防設計等)
の基準

- 日本付近を中心とした観測データの拡充(デジタル化)や背景誤差分散調整の効果により、カスリーン台風の再現に成功!

JRA-3Q
水平 40kmr 鉛直 100層
20CRv3
NOAA/CIRES 20世紀再解析
水平 75kmr 鉛直 64層
CERA-20C
ECMWF 20世紀結合再解析
水平 125kmr 鉛直 91層(大気)
水平 110kmr 鉛直 42層(海洋)

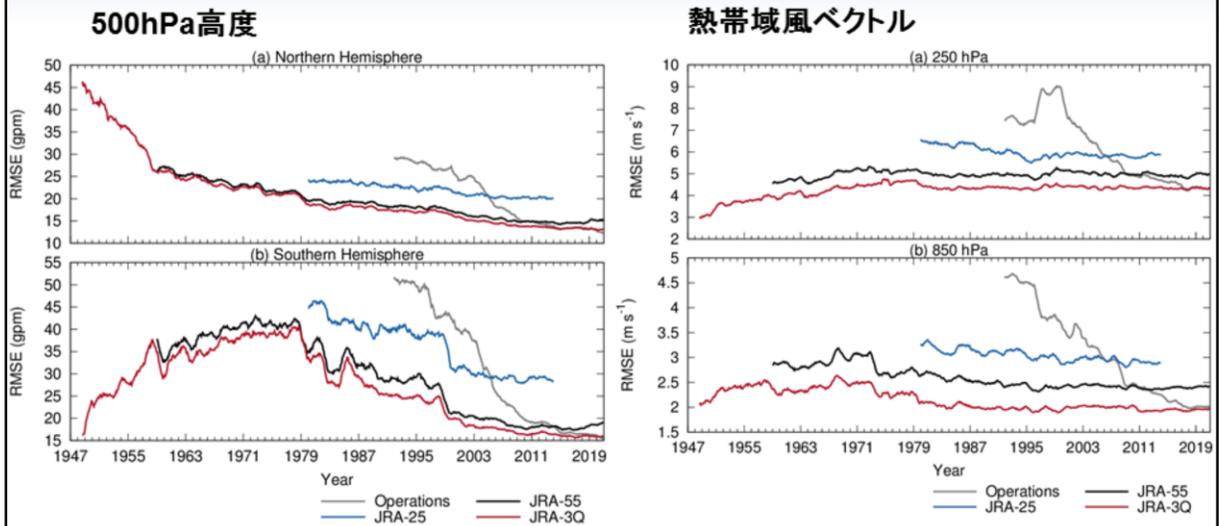


1947年9月13日18UTCにおける海面更正気圧の解析値[hPa]。それぞれの図で、黒線が解析値、矢印がT4709。

カスリーン台風(カスリン台風やキャサリン台風とも呼ばれる)は、第二次世界大戦後間もない1947年(昭和22年)9月に日本に接近し、関東地方や東北地方に甚大な被害をもたらした台風で、同地方における国土防災(堤防の設計等)の基準として重視されているものである。再解析では、時代を遡るほど利用可能な観測データ(特にデジタル化されたデータ)が少なくなるため、解析の精度が低下し、実際の現象を精度良く再現することは困難になる。このため、1948年頃が再解析の限界とされていたが、気象庁第3次長期再解析(JRA-3Q)では、紙で記録された観測データのデジタル化による拡充や背景誤差分散などの調整を行い、1947年9月のカスリーン台風まで精度良く再現することに成功した。JRA-3Qでは、この様に第二次世界大戦後の顕著な災害が数多く再現されたことにより、国土防災にも活用可能なデータセットとなっている。

長期再解析の精度評価

2日予報RMSEによる解析精度の比較



全球再解析の精度評価は、全球数値予報モデルによる2日予報を行い、その平方根平均二乗誤差(RMSE)を比較することで実施している。JRA-25、JRA-55、JRA-3Qの精度を比較すると、再解析の精度が向上していることが分かる。南半球では1960年代以前のRMSEが小さくなるが、これは観測データが極めて少なくデータ同化による変化が小さいなることで、予報値と解析値の差が小さくなるためである。Operationsは、その時代の現業数値予報システムによる精度を示しているが、再解析では最新のデータ同化システムを用いて過去に遡った解析を行うことで、大幅に精度を向上していることが分かる。つまり、過去の精度良い解析値を得るためには、最新のデータ同化システムを用いて再解析を実施することが必要であることが分かる。

参考文献

- Kobayashi, S., Y. Kosaka, J. Chiba, T. Tokuhiro, Y. Harada, C. Kobayashi, and H. Naoe, 2021: JRA-3Q: Japanese Reanalysis for Three Quarters of a Century. Joint WCRP-WWRP Symposium on Data Assimilation and Reanalysis/ECMWF Annual Seminar 2021, online, 13-17 September 2021, 04-2.
- Harada, Y., S. Kobayashi, Y. Kosaka, J. Chiba, and T. Tokuhiro, 2021: Early results of the evaluation of the JRA-3Q reanalysis. EGU General Assembly 2021, online, 19-30 April 2021, EGU21-3762, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-3762>.
- Naoe, H., S. Kobayashi, Y. Kosaka, J. Chiba, T. Tokuhiro, and Y. Harada, 2021: Evaluation of a new Japanese reanalysis (JRA-3Q) in a pre-satellite era, EGU General Assembly 2021, online, 19-30 April 2021, EGU21-6881, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-6881>.
- 気象庁, 2021: 気象庁第3次長期再解析(JRA-3Q)の本計算進捗. 数値予報開発センター年報(令和2年), 気象庁数値予報開発センター, 115-124.
- 気象庁, 2022: 気象庁第3次長期再解析(JRA-3Q)の本計算進捗. 数値予報開発センター年報(令和3年), 気象庁数値予報開発センター, 133-138.



第1章 基礎編

1.7.12 波浪モデル(全球・沿岸)

波浪モデル

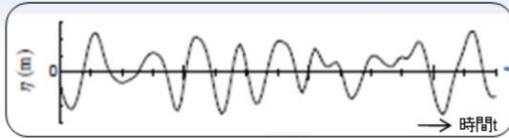
運用中の波浪モデルの概要

	全球波浪モデル	沿岸波浪モデル
タイプ	MRI-III (第3世代波浪モデル)	
計算領域	極域を除く全球 75° S - 75° N 0° E - 180° - 0° W (全周)	日本近海・沿岸 20° N - 50° N 120° E - 150° E
格子間隔	緯経度0.5度	緯経度0.05度
タイム ステップ	移流項 10分 外力項 30分	移流項 1分 外力項 3分
スペクトル 成分	900成分 (25周波数×36方位) 周波数成分：0.0375～0.3Hz；対数分割 方位成分：10度間隔	
外力	全球モデルGSM (20km格子) 台風域内は仮想的な傾度風で補正* (*72時間先まで)	
予測時間	00/06/18UTC: 132時間 12UTC: 264時間	00/06/12/18UTC: 132時間

現在、気象庁では全球波浪モデルと沿岸波浪モデル及び全球波浪アンサンブルという3種類の波浪モデルを運用している。全球波浪モデルは、極付近を除く地球上の海のほぼ全ての海域を対象としアリューシャン近海から日本に達するうねりや、南半球から北半球に伝わるうねりの伝播も計算できる。沿岸波浪モデルは日本近海の領域のみを対象とし、細かい解像度(0.05度格子)でより詳細な計算ができる。全球波浪モデル・沿岸波浪モデルは1日4回(00,06,12,18UTC)実行しており、外力として利用する海上風は、全球モデル(GSM)の予測値を使用するが、台風近傍については、GSMの風を気象庁発表の台風予報と同じ内容の予報課が作成する熱帯低気圧情報(実況解析値、予報値)を利用して作成される台風ポーガスと呼ばれる仮想的な風に置き換えて使用している。

波浪モデル

波浪の表現・・・有義波



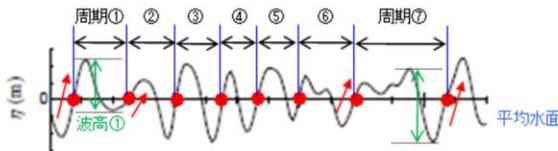
有義波の波高・周期の求め方

波浪計観測値の海面変動を表したもの

- 点: ゼロアップクロス点
- 点から次の●点までが1つの波

ゼロアップクロス法

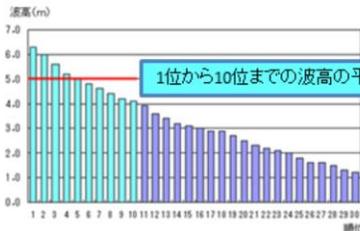
(波浪計データ処理の一般的な方法)



- 波高の高い順に並びかえ、**上位1/3の平均値**を「有義波高」
- 対応する周期を「有義波周期」

熟練した観測者が目視で観測する波高や周期に近い

天気予報や波浪図等で用いている波高や周期も有義波の値



有義波高

(一定時間内の波数がちょうど30の場合)
有義波の求め方

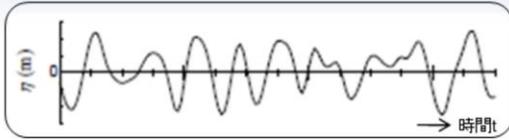
観測された波高の分布はレイリー分布で近似可能。統計的には、100波に1波は有義波高の約1.5倍、1000波(おおよそ2~3時間)に1波は約2倍の波高の波が起こるといわれている。

波浪の表現方法の一つ目は、「有義波」で表す方法である。時系列図は波浪計による観測データの変動を表す。一定時間内に観測された波から平均の水位を求め、平均水位を下から上に超える点(ゼロアップクロス点)を探し、ゼロアップクロス点から次のゼロアップクロス点までを1つの波とする。個々の波の波高と周期を読み取り、これを波高の高い順に並び替えて上位1/3の波高を平均したものを「有義波高」といい、有義波高に対応する周期を「有義波周期」という。このようにして求められた有義波高は船舶等による目視観測の波高とよく合うといわれている。各種波浪計により観測される波高、および天気予報や警報・注意報で用いられている波高は有義波高を指す。

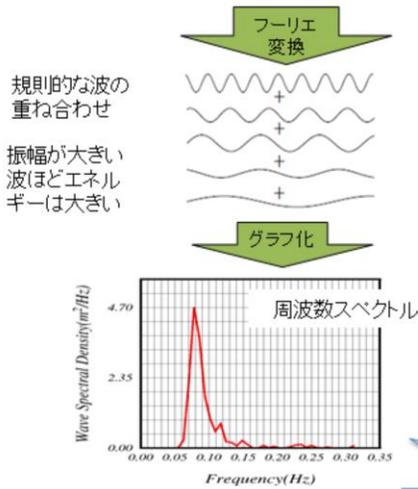
観測された波高の分布はレイリー分布で近似でき、統計的には、100波に1波は有義波高の約1.5倍、1000波に1波は約2倍の波高の波が起こるといわれている(合田・永井, 1974)。

波浪モデル

波浪の表現・・・スペクトル



通常、海面は風浪・うねりが重なり合い不規則な変動をしている。



- ▶ 不規則に変動する海面の波は、規則的な波(正弦波)の重ね合わせであるという考えに基づく。
- ▶ 各規則的な波の高低は、波がもつエネルギーの大小で表現。波のエネルギー E は波高 H の2乗に比例する ($E = \frac{1}{8} \rho g H^2$) (1)
- ▶ 各規則的な波の周波数(周期の逆数)と波のエネルギー(密度)をグラフ化したものを周波数スペクトル($E(f)$)という

スペクトルの求め方

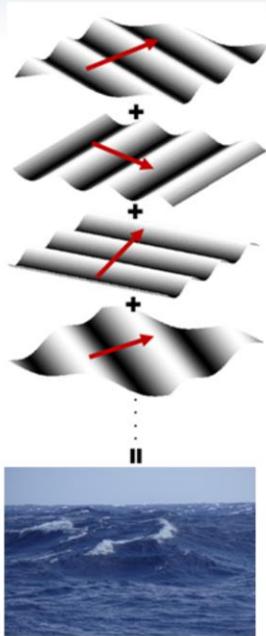
この例では、周波数0.08Hz = 周期12秒の波が卓越

波浪の表現方法の2つ目は、波浪スペクトルで表現する方法である。通常、海面は風浪とうねりが重なり合い不規則な変動をしているが、不規則に変動する海面の波は、規則的な波(正弦波)の重ね合わせであるという考えに基づき、波浪をスペクトルで表現することができる。図の通り、規則的な波の高低は波がもつエネルギーの大小で表現している。なお、波のエネルギー E は波高 H の2乗に比例し、(1)式で表される。規則的な波の周波数(周期の逆数)と波のエネルギー(密度)の関係をグラフ化したものを周波数スペクトルという。

波浪モデル

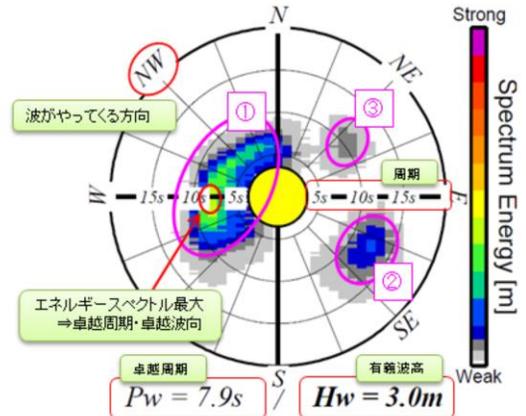
波浪の表現・・・二次元スペクトル

実際の海面では
複数方向から波
が進行・伝播



二次元スペクトルの概念図

➤ 波浪の二次元スペクトル($E(f, \theta)$)
: 周波数スペクトルに、
波がやってくる方向を考慮したもの



波浪の二次元スペクトル(気象庁仕様)

左図は現実の波を二次元のスペクトルで表現した概念図である。実際の海面は単一方向からだけではなく複数方向からの波の重ね合わせとなっている。周波数スペクトルに波がやってくる方向を考慮したものを、波浪の二次元エネルギースペクトル(以下、二次元スペクトル)と呼ぶ。気象庁では、右図に示すようにある地点での波のエネルギーの、周波数および波向に対する分布で二次元スペクトルを表す。暖色系が濃いほどエネルギーが大きいことを表し、円周方向の角度が波の来る向き、中心からの距離が波の周波数(周期)を表す。この例では、二次元スペクトルが集中しているところが3箇所みられる。それぞれ、①周期8秒前後の西からの波、②周期12~13秒の東南東からの波、③周期10秒前後の北東からの波が伝播していることを表しており、二次元スペクトルの最も大きい①が卓越している。この事例では、有義波高(Hw)は3.0m、卓越周期(Pw)は、エネルギースペクトルが最大となる①の周期7.9秒である。

波浪モデル

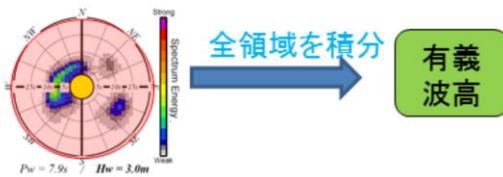
波浪の表現・・・スペクトルと有義波高の関係

▶ 波浪スペクトルから有義波高・卓越周期を以下の手順で算出

有義波高

$$H_w = 4.0 \sqrt{\iint E(f, \theta) df d\theta} \quad (2)$$

全方位、全周波数の波のエネルギーを積分し、その平方根に4.0をかけたもの



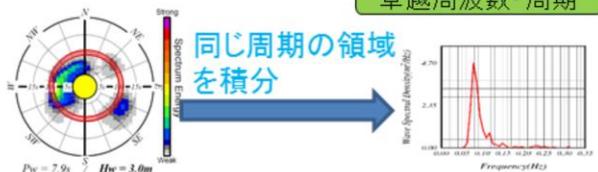
二次元スペクトルから有義波高を算出する方法

卓越周波数・周期

$$\bar{E}(f) = \int_0^{2\pi} E(f, \theta) d\theta \quad (3)$$

周波数 f ごとに、全方位の波エネルギーを積分

その値が最大となる(スペクトルピーク)周波数(周期はその逆数)



二次元スペクトルから卓越周期を算出する方法

二次元スペクトルと有義波高は(2)式によって関係づけられる。左図に二次元スペクトルから有義波高を求める方法の概念図を示す。有義波高は、二次元スペクトルの全方位、全周波数の波のエネルギーを積分し、その平方根に4.0をかけたものである。

また、右図に卓越周期を求める方法の概念図を示す。周波数ごとに、全方位の波エネルギーを積分し、その値が最大となる周波数が卓越周期である。

波浪モデル

波浪モデルの基礎方程式

波浪モデルでは、**波エネルギーの分布が時間・空間的にどのように変化するか**、下記の、エネルギー平衡方程式を基礎方程式として求める。

$$\frac{\partial E}{\partial t} + \underbrace{\nabla \cdot (C_g E)}_{\text{移流項}} + \underbrace{\frac{\partial}{\partial \theta} (\Omega E)}_{\text{屈折}} = \underbrace{S_{net}}_{\text{エネルギー外力関数}} (\equiv S_{in} + S_{nl} + S_{ds} + S_{btm}) \quad (4)$$

$E(f, \theta, \mathbf{x}, t)$: 波浪二次元スペクトル

$C_g(f, \theta, \mathbf{x})$: 群速度 (波エネルギーの進む速さ)

Ω : 浅海域での屈折

S_{net} : 波浪スペクトルに対するエネルギーの入出力を表現する外力関数。

- ① S_{in} : エネルギー入力 (風による風浪の発生・発達)
- ② S_{nl} : 非線形エネルギー輸送 (風浪からうねりへの変換)
- ③ S_{ds} : エネルギー散逸 (逆風や砕波による波浪の減衰)
- ④ S_{btm} : 海底摩擦

全球大気モデル (GSM) の風 + 台風時は台風ボーガスを利用

波浪モデルの予測精度は大気モデルの風の予測精度にも大きく依存する。

波浪モデルでは波浪の二次元スペクトルを予報変数とし、各格子点で定義されたエネルギーの時間変化を計算する。基礎方程式(4)式はエネルギーの収支を表しており、エネルギー平衡方程式と呼ばれる。ここで $E(f, \theta)$ は二次元スペクトル、 f は周波数、 θ は波向、 C_g は波の群速度を表す。右辺はソース項と呼ばれ、波浪スペクトルに対するエネルギーの入出力を表現する外力関数である。ソース項は、風からのエネルギー入力を表す S_{in} 、スペクトル間の非線形エネルギーの伝達を表す S_{nl} 、エネルギー散逸を表す S_{ds} 、海底摩擦を表す S_{btm} からなる(JMA 2022, 杉本 2007)。 S_{btm} と左辺の屈折項については、2017年に波浪モデルに浅海効果を導入した際に追加されたものである(配信資料に関する技術情報第455号:

<https://www.data.jma.go.jp/add/suishin/jyouhou/pdf/455.pdf>)。なお、波が水深の浅い海域(浅海域)に進入すると、海底地形の影響を受けて波高、波速、波長が変化し、副次的に屈折や砕波などの現象が発生するほか、回折や反射など波の変形を伴う現象が起こる。これらを総称して「浅海効果」と呼ぶ。

気象庁の波浪モデルでは、エネルギー入力を表す S_{in} については、全球大気モデル(GSM)の境界層過程で計算された風応力を利用する。ただし、台風付近については、台風位置と強度に応じた風場(台風ボーガス)を作成し利用している。波浪モデルの予測精度は大気モデルの風の予測精度に大きく依存する。

なお、波浪モデルによる波の予測で、地点毎の海面の高さを予報変数とするのではなく、エネルギーである二次元スペクトルを予報変数としているのは、波浪の水平スケールがたかだか数100mと小さいためである。個々の波を表現するためには数m~数10m程度の細かい水平格子間隔が必要となるため、実用的な広い領域の計算を行うには膨大な計算機資源が必要となり現実的ではない。これに対して二次元スペクトルは、統計量としての性質を持つために、数km~数100kmという比較的粗い水平解像度でも扱うことが出来る。最終的に提供される波高や周期、波向は、前述の通り、二次元スペクトルから有義波に換算される。

波浪モデル 台風ポーガスの作成

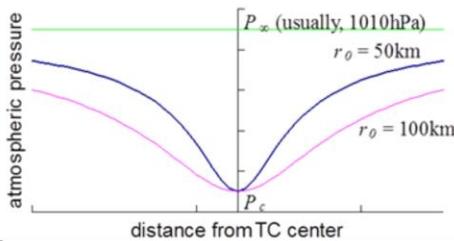
大気モデルの風を、発表される台風解析・予想情報(熱帯低気圧情報)をもとに計算した台風周辺の風(台風ポーガス: 傾度風+台風の移動速度)で置き換えて、台風周辺の波を計算

● 気圧分布

➤ 藤田の式

$$P(r) = P_{\infty} - \frac{P_{\infty} - P_c}{\sqrt{1 + (r / r_0)^2}}$$

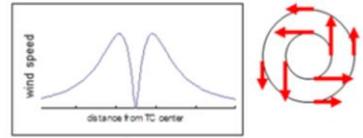
r_0 によって台風の鋭さを設定。
中心気圧と1000hPa半径から算出。



● 風速分布

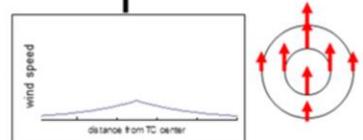
傾度風

$$-\frac{v^2}{r} - fv = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial r}$$

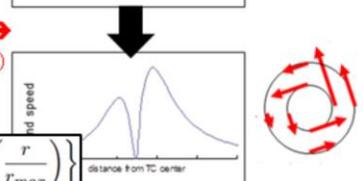


台風移動速度

(中心からの距離で重み付け)



20度内側へ向ける➔
(地上での摩擦効果)



$$W = C_1 \left\{ V_g + C \cdot \exp\left(\frac{r}{r_{max}}\right) \right\}$$

V_g : 傾度風(20度内側へ向いた)、 C : 台風進行速度、 C_1 : パラメータ、 r_{max} : ポーガス領域の大きさ(台風中心からの距離)

波浪モデルにおける台風ポーガスの作成方法

大気モデル内での台風は、発表される台風解析・予想情報(熱帯低気圧情報)と位置や強度が違う場合があるため、波浪モデルでは、熱帯低気圧情報をもとに計算した台風周辺の風(台風ポーガス: 傾度風+台風の移動速度)で置き換えて、台風周辺の波を計算している。

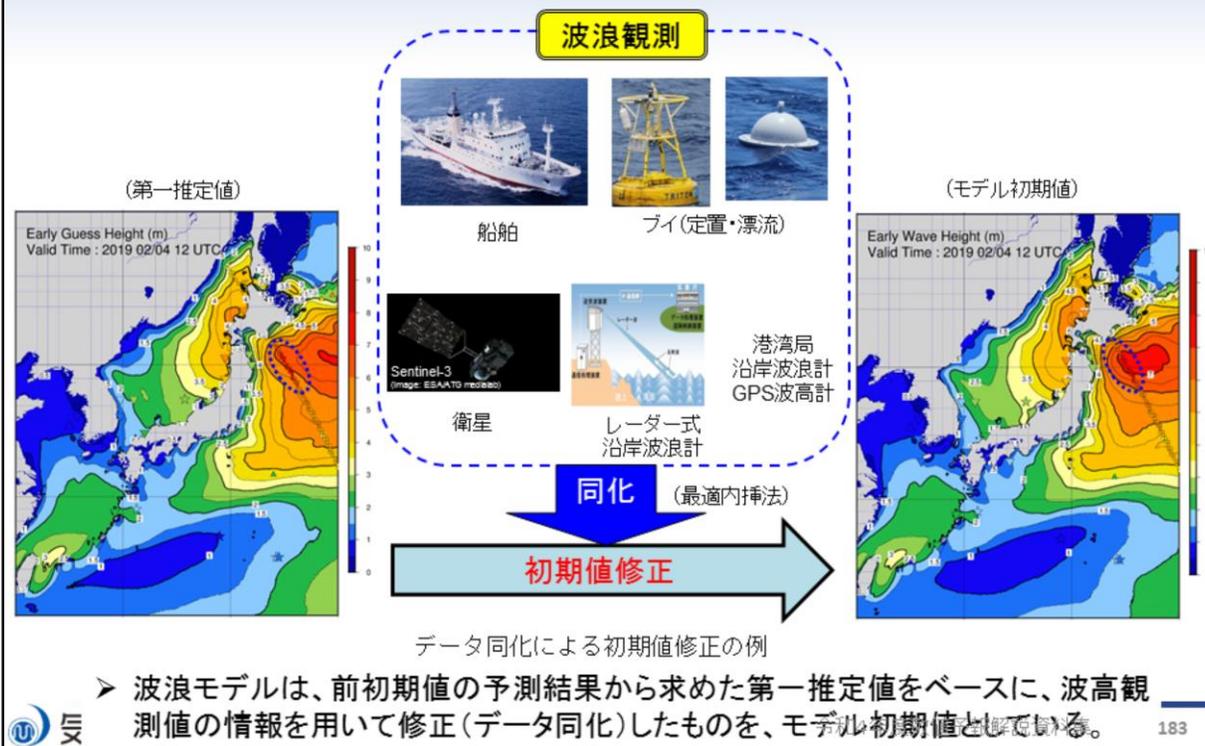
気圧分布の作成には藤田の式(Fujita 1952)を用いている(左図)。ここで P は任意地点の海面気圧、 r は台風中心からの距離、 r_0 は気圧分布の鋭さを表すパラメータ、 P_c は中心気圧、 P_{∞} は無限遠に仮定される海面気圧である。左図は台風周辺の海面気圧分布の断面を表したものだが、同じ中心気圧でも、 r_0 が大きいと広い範囲で気圧が低くなり、 r_0 が小さいと中心付近で急激に気圧が下がるような分布となる。台風周辺の風については、傾度風の関係から風向・風速分布を作成し、更に台風移動速度を考慮することで台風分布の非対称性を表現している(右図)。ここで、 f はコリオリパラメータ、 ρ は空気の密度、 C_1 と r_{max} は定数、 v と V_g は傾度風、 C は台風の移動速度、 W は台風移動速度を加えた風速である。更に、台風中心へ吹き込む風を考慮し、 20° の吹き込み角を一律に設定している。これらは熱帯低気圧情報による情報を元に計算することができる。

波浪モデル 台風ポーガスの埋め込み方法



台風ポーガスの作成方法については前述の通りだが、ポーガスを適用するかどうかは次の条件による。適用条件の一つ目は、熱帯低気圧情報の中心気圧が1000hPa未満かどうかで、1000hPa以上であれば適用されない。適用条件の2つ目は適用範囲の各格子点においてポーガス風速が20m/s未満の場合は台風ポーガスとGSMを比較して台風ポーガスが強い場合に、20m/s以上の場合は無条件に台風ポーガスが採用される。該当格子点においてはGSMの海上風が台風ポーガスに置き換わる。なお、台風ポーガスの適用範囲は、(1000hPa半径+2度) × 2 を1辺とする正方形の領域である。図はモデルの海上風(左)とポーガス領域(右)である。台風中心付近の20m/s以上の海域はポーガスが適用されている。また20m/s未満の海域のうち台風北側の領域はGSMの方が風が強いため適用されていない。台風南側では台風ポーガスの風がGSMより強くポーガスが適用されている。

波浪モデル 波浪モデルにおけるデータ同化



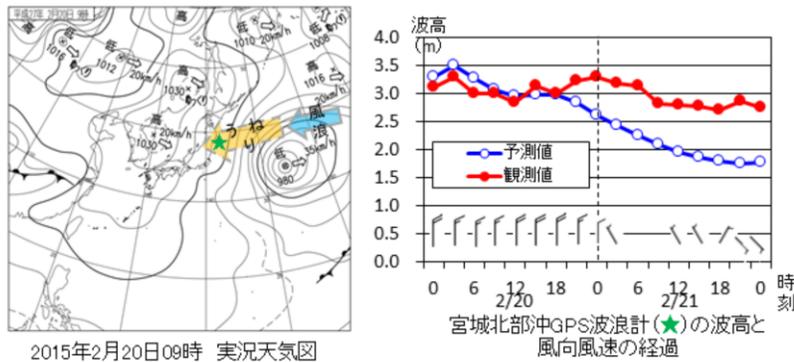
波浪モデルは、前初期値の予測結果から求めた第一推定値をベースに、波高観測値の情報を用いて修正(データ同化)したものを、モデル初期値としている。データ同化には、船舶、ブイ、衛星、GPS波高計、レーダー式沿岸波浪計などの観測データを利用している。具体的には、気象庁のブイは解析時刻の前後3時間平均値、沿岸波浪計・GPS波高計は解析時刻データ又は解析時刻データのない場合は±1時間(GPS波高計は±20分)の値の平均値、船舶は解析時刻に通報された値、衛星は解析時刻±3時間以内のデータを解析時刻の値として利用している。波浪モデルにおけるデータ同化は波高について最適内挿法を利用しているため、時間方向のずれを考慮できない。解析時刻から時間差のある衛星データを利用する際には、風浪が急発達又は減衰する局面などで適切に同化されない場合があるため、注意が必要である。

なお、図は2019年2月4日12UTCの波浪モデルにおける波高の修正例である。三陸沖に第一推定値より高めの衛星観測があり、適切に同化されている。

波浪モデル

波浪モデルの予測について

- 波浪モデルによる波浪現象の再現性は概して高い。
- 一方、適中しない事例もあり。その要因として、
 - 風の予測に大きく依存
- また、波浪モデルの特性による場合もある。(↓例)



東北地方では弱風場となっているが、2月21日の実況では3m近いうねりが継続(赤線)。一方、モデルの予想は2m程度と1m過小。波浪モデルではうねりを過小に予想する場合あり。



波浪モデルの予測について、峯松(2009)、吉田ほか(2012)等で検証が行われているが、全体的な傾向として波浪モデルは観測値をよく再現しており、波高の急激な変化も概ね表現できる。なお、波浪モデルはその後データ同化の導入や浅海効果の導入等改良がおこなわれてきており、それらの精度検証については技術情報(<https://www.data.jma.go.jp/add/suishin/jyouhou/pdf/455.pdf>)等で別途公表されている。

一方、適中しない事例もあるが、その要因として一番に挙げられるのは大気モデルでの風の予測のずれによるものである。また、波浪モデルの特性による場合もある。左図は2015年2月20日から21日に東北地方にうねりが到達した際の天気図、右図は宮城北部沖GPS波高計の波高と風向風速の経過を示したものである。東北地方では弱風場となっているが、2月21日の実況では3m近いうねりが継続(赤線)している一方、波浪モデルの予測(青線)は2m程度と1m過小である。波浪モデルではうねりを過小に予測する場合がある。一般に、波浪モデルにとってうねりの波高表現は非常に難しい。エネルギー散逸の機構が未解明である上、うねりの観測が不十分なためその伝播状況がよくわかっておらず、これらが波浪モデルに組み込まれていないためである。なお、波浪モデルはうねりの波高の予測が不十分な場合でも、周期や波向の予測精度は概して高い。

参考文献

- 峯松宏明, 2009: 気象庁で現業運用している波浪モデル. 天気, 56, 669-674.
- 合田良実, 永井康平, 1974: 波浪の統計的性質に関する調査・解析, 港湾空港技術研究所報告, 13, 3-37.
- 杉本悟史, 2007: 新波浪モデルの概略と特性. 平成19年度量的予報研修テキスト, 気象庁予報部, 28-40.
- 吉田久美・三浦大輔・高野洋雄, 2012: 沿岸波浪モデルの統計的検証と改善について. 測候時報, 79, 特別号, S73-S82.
- 高野洋雄, 2011: 有義波法による波浪推算 – 現業での利用を目的として –. 測候時報, 78, 185-201
- Bretschneider, C. L., 1970: Forecasting relations for wave generation. Look Lab. Hawaii, 1(3), 31-41
- Fujita, T., 1952: Pressure Distribution within Typhoon. Geophys. Mag., 23, 437-451.
- JMA, 2022: OUTLINE OF THE OPERATIONAL NUMERICAL WEATHER PREDICTION AT THE JAPAN METEOROLOGICAL AGENCY
- Pierson, W. J., Jr., G. Neumann, and R. W. James, 1955: Practical Methods for Observing and Forecasting Ocean Waves by Means of Wave Spectra and Statistics, H. O. Publication No. 603, U. S. Navy Department, 284pp.
- Sverdrup, H. and Munk, W. H., 1947: Wind, Sea, and Swell: Theory of relations for forecasting. U.S. Navy Hydrographic Office, Washington, No.601



第1章 基礎編

1.7.13 波浪アンサンブル予報システム

波浪アンサンブル予報システム

運用中の波浪アンサンブル予報システムの概要

	波浪アンサンブル予報システム
タイプ	MRI-III (第3世代波浪モデル)
計算領域	極域を除く全球 75° S - 75° N 0° E - 180° - 0° W (全周)
格子間隔	緯経度0.5度
タイム ステップ	移流項 10分 外力項 30分
スペクトル 成分	900成分 (25周波数×36方位) 周波数成分：0.0375~0.3Hz；対数分割 方位成分：10度間隔
外力	全球EPS (51メンバー) 3時間毎
予測時間	00/12UTC: 264時間

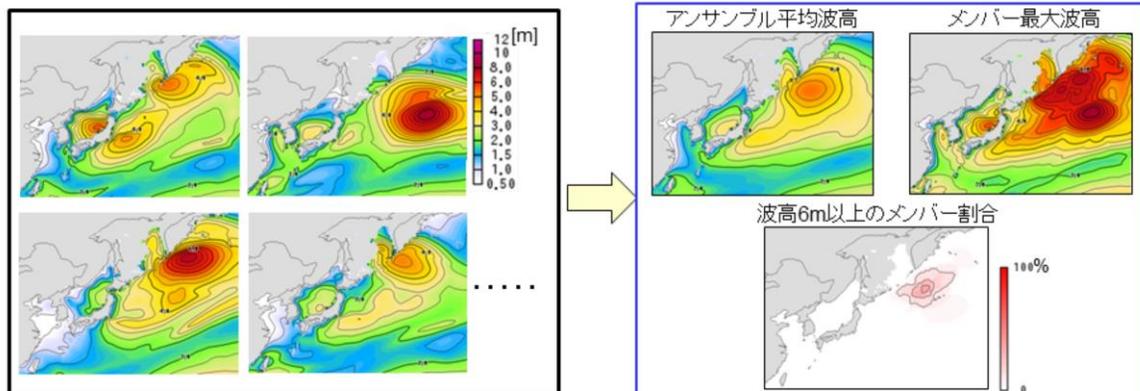
波浪アンサンブル予報システムは、モデル及び初期値は全球波浪モデルと同じで、初期摂動は加えていない。大気外力として全球アンサンブル予報システムで予測されたの51メンバーの風を用いて、各メンバーに対応する予測計算を1日2回(00, 12UTC)行っている。

波浪アンサンブル予報とは

- 複数の予測結果の統計処理により、予測の信頼度や不確実性を
知ることができるほか、顕著な高波が発生する可能性を把握する
ことができる。

波浪アンサンブルモデルによる予測例(現在:51メンバー)

予測結果から得られる情報の例



多数の予測結果を平均することで(アンサンブル平均)、予測時間が長いところでは1つの予測結果よりも平均的な予測精度がよくなるだけでなく、予測の信頼度や不確実性、顕著な高波が発生する可能性などを把握することも可能になる。



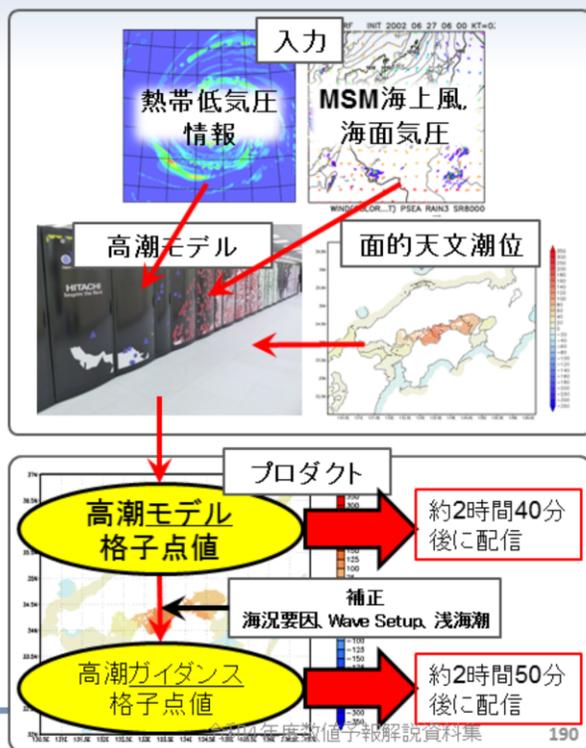
第1章 基礎編

1.7.14 日本域高潮モデル

日本域高潮モデル

高潮モデルの概要

離散化手法	有限差分, 陽解法
座標系	緯度・経度座標
格子系	スタガード格子(Arakawa C), アダプティブメッシュ(AMR)
空間解像度	沿岸から離れるにつれ 5段階に変化(約1,2,4,8,16km)
計算領域	20N~50N, 117.4E~150E
時間差分間隔	4秒
予測時間	78時間(00,12UTC初期値) 39時間(03,06,09,15,18,21UTC 初期値)
メンバー数	台風時6(MSM+ボース×5) 非台風時1(MSM)
実行頻度	1日8回 (00,03,06,09,12,15,18,21UTC)
計算時間	NAPS10で最大約150秒 (1ノード/1メンバー)



表は高潮モデルの仕様を示す。モデル領域は日本の国土ほぼ全てをカバーしている。予報時間は00,12UTC初期値が78時間先まで、03,06,09,15,18,21初期値が39時間先までで、1日8回実行する。高潮モデル計算の際には入力データとして、気象庁発表の台風予報と同じ内容の、予報課が作成する熱帯低気圧情報(実況解析値、予報値)と、気象庁のメソモデル(MSM)の海上風、海面気圧を必要とする。計算された潮位偏差に面的天文潮位(一般に、天文潮位は観測値の存在する地点において調和解析することで算出できるが、データ同化などの技術を用いて、任意の地点で天文潮位を算出することができる。)を加算している。

日本域高潮モデル 初期値作成手法

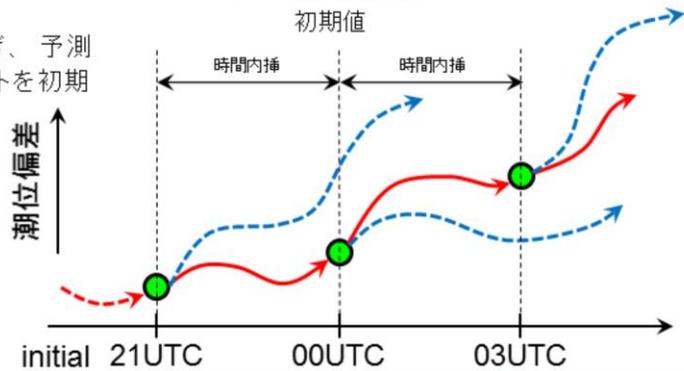
- 計算には潮位偏差の初期値が必要だが、データ同化の効果が薄いため、代わりに気象場の解析値を使って初期値を作成する(ハインドキャスト)。
 - 気象場の解析値を時間内挿して大気外力とし、過去の状態を再計算する。



ハインドキャストは過去から未来へ繋ぎ、予測計算はその都度最新のハインドキャストを初期値として計算する。

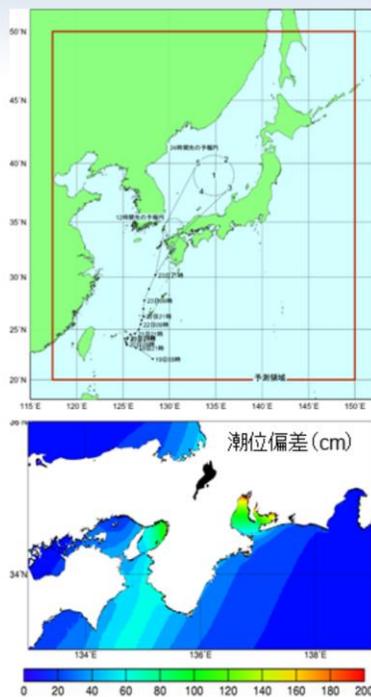
ハインドキャストと予測計算の概念図

→ ハインドキャスト
 ----> 予測計算



高潮モデルの計算には潮位偏差の初期値が必要だが、大気モデルと比較してデータ同化の効果が薄いため、気象場の解析値を使った計算により初期値を作成している。これをハインドキャストと呼んでいる。上図は00UTC初期値の例である。ハインドキャストでは、前初期値21UTCのMSMによるFT=2までの予測値と対象初期値00UTCのMSMによるFT=0の予測値を使用して、過去の状態を再計算することで00UTCにおける潮位偏差の初期値を作成する。高潮モデルは、大気からの外力(大気モデルや台風ポーガス)に依存する部分が大きく、高潮モデル自身の初期値にはあまり敏感ではない。加えて、同化に利用できるデータが限られていることや、日本沿岸域の地形特性(浅い海域が比較的少ない)のため同化の効果が小さい、といった理由から、高潮モデルにおけるデータ同化は行っていない。

日本域高潮モデル 台風ボーガス



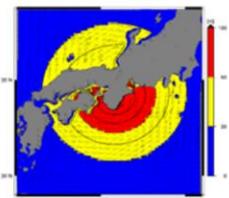
<日本域高潮モデル>

- 非台風時
MSMによる1通りの計算を行う。
- 台風時(日本付近に台風が存在する場合)
MSMによる1通りに加え、進路予報の誤差を考慮し、5通りの風・気圧場(ボーガス)による計算を行う。

<ボーガス計算>

予報円中心上を通るコース(ボーガス中央コース)と、予報円周辺上を通る4コース(ボーガス周辺コース)の計算を実施。

1. 予報円中央を通過
2. 最も速く通過
3. 予報円右側を通過
4. 最も遅く通過
5. 予報円左側を通過

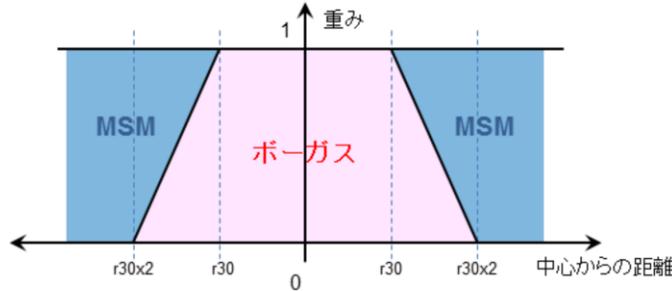


ボーガス中央コースはMSMにボーガスを埋め込む。ボーガス周辺コースは台風周辺のみボーガスによる気象場を与える。

日本域高潮モデルは、非台風時はMSMによる1通りの計算を行う。台風時(日本付近に台風が存在する場合)は、MSMによる1通りの計算に加えて、台風進路予報(予報円)の誤差を考慮し、5通りの台風ボーガスによる計算を行う。

日本域高潮モデル 台風ボーガス(埋め込み)

- 埋め込む範囲は、中心から同心円状の範囲
 - ボーガス中央コース: 中心からの距離により、強風半径(以下、 r_{30})の2倍の範囲内で、ボーガスとMSMの重み付き平均をとる。
 - r_{30} の範囲内ではボーガスを完全に採用。



台風ボーガスの埋め込み

埋め込む範囲は台風中心から同心円状の範囲。ボーガス中央コースの場合、中心からの距離により、強風半径(以下、 r_{30})の2倍の範囲内で、ボーガスとMSMの重み付き平均をとる。 r_{30} の範囲内ではボーガスを完全に採用。

図はボーガス中央コースについて、台風ボーガスをMSMの風・気圧場に埋め込む時の模式図である。強風半径、つまり風速30kt以上の範囲では、ボーガスによる風・気圧場をそのまま使う。一方その外側では、強風半径の2倍の範囲までボーガスとMSMの加重平均を使い、台風中心から離れるにしたがってMSMの割合を大きくしていく。ボーガス周辺コースでは、図のMSMのところが無風・平年値(海面気圧)になる。

日本域高潮モデル

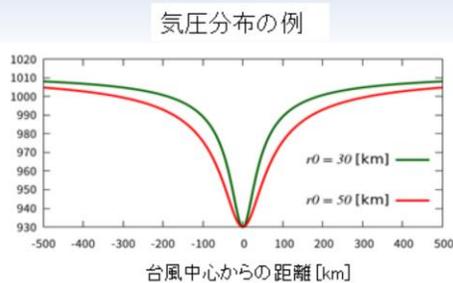
台風ボーガス(パラメータ r_0 決定法)

藤田の式
$$P(r) = P_{\infty} - \frac{P_{\infty} - P_c}{\sqrt{1 + r^2/r_0^2}}$$

P_c : 中心気圧 P_{∞} : 無限遠での気圧

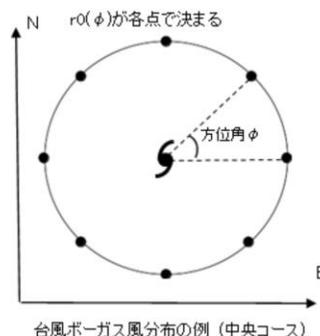
r_0 : 気圧降下の鋭さを決めるパラメータ

- r_0 が小さいなら中心付近の気圧勾配は大
→ 強風域の範囲を左右



改良版での計算手順

1. $r = r_0$ の円上に任意個の分点を取る (右図は8個)
2. 各分点ごとにボーガスの風速を計算
3. 条件“ $r=r_0$ で風速50kt”を満たすように各分点で r_0 を決定 ($r_0=30$ を使用するときも同じ操作)
4. 平均した r_0 の値を計算に使用 (方位角ごとに r_0 を変えることはしない)



台風ボーガスの風分布は藤田の式(Fujita, 1952)で決定している。この式では、 r_0 のパラメータによって強風域の範囲が左右される。これまでの台風ボーガスには強風域の狭い系統誤差があるため、強風域が適切な範囲となるように、この r_0 の計算手順を見直した。

日本域高潮モデル 台風ボーガス(方向別粗度長法)

- 各格子ごとに、風上領域の粗度長を考慮することで
離岸風を減衰させる手法

- 減衰係数の計算手順

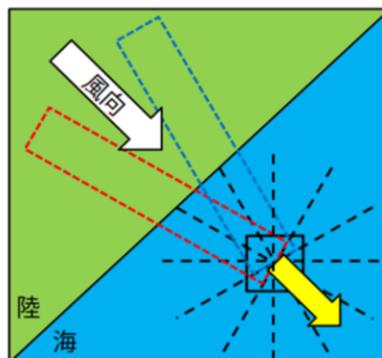
- 12方向に対し、風上側30km分の粗度長を
格子からの距離で重み付け平均

重みは
Gaussian : $w(i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{[-d(i)^2/2\sigma^2]}$

2. 格子での実際の風向に応じて
方向別粗度長を内挿

3. 海上の粗度長との比から減衰係数を算出

$$f_{r-directional-k} = \left(\frac{z_{0marine}}{z'_{0land-directional-k}} \right)^{0.0706}$$

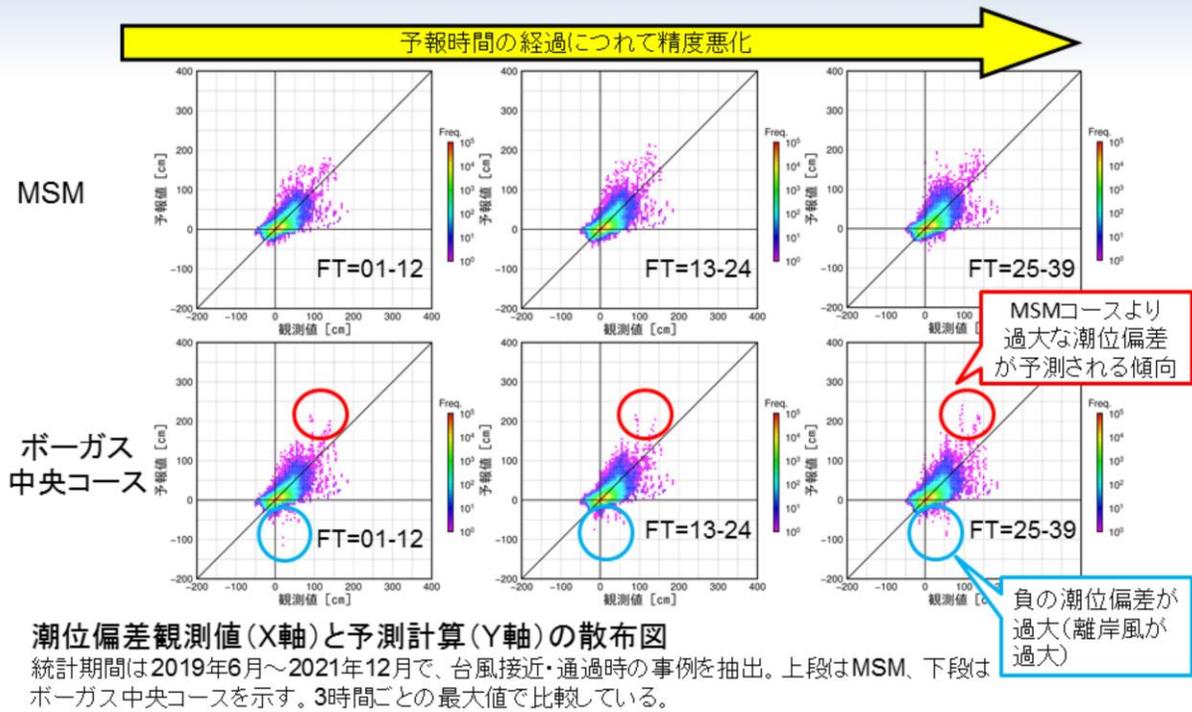


分子: 海上の粗度長
分母: 方向別粗度長

方向別粗度長法 (Westerink *et al.*, 2008) とは、各格子ごとに風上領域の粗度長を考慮することで、離岸風を減衰させる手法である。この手法を新たに導入することで、地形の影響を考慮して内湾域の過大な風速を適切な風速に弱める効果がある。

日本域高潮モデルの精度と特性

MSMと台風ポーガスを利用した場合の相違



図は、2019年6月～2021年12月に台風が接近・通過したときに(全922初期値)、高潮モデルにより予測された潮位偏差(MSM、ポーガス中央コース)と、日本国内207地点の潮位観測点の観測値による潮位偏差の散布図を示す。ポーガス中央コースの散布図には、実測値100cm前後に対し200cmを超える過大予測があったことが示されている。MSMコースの散布図においても過大となる箇所は見られるものの、全体的には台風ポーガスの方が過大評価傾向であり、MSMコースの方が実況からの誤差が小さいと言える。このように台風ポーガスによる高潮の予測誤差が大きいのは、台風ポーガスで仮定している風の場の推定法では方向別粗度長法の導入以後も地形の摩擦の影響が十分には取り込まれていないこと、台風が中緯度まで北上したことにより、典型的な台風の構造から変化することを考慮していないことが主な原因と考えられる。MSM、ポーガスともに予測時間後半に精度が悪化するのには、潮位偏差のピーク出現時刻の予測誤差の影響もあると考えられる。

参考文献

- 林原 寛典, 2011: 気象庁の高潮数値予測モデルについて, *天気*, 58, 235–240.
- Japan Meteorological Agency, 2022: Outline of the operational numerical weather prediction at the Japan Meteorological Agency.
- 石崎 士郎, 曾我 太三, 碓氷 典久, 藤井 陽介, 辻野 博之, 石川 一郎, 吉岡 典哉, 倉賀野 連, 蒲地 政文, 2009: MOVE/MRI.COMの概要と現業システムの構築, *測候時報*, 76, 特別号, S1–S14
- 高佐 重夫, 近澤 昌寿, 森 裕之, 2011: 面的天文潮位の予測手法とその精度, *測候時報*, 78, 特別号, S33–S42.
- 森 裕之, 小林 健作, 2012: wave setupの発生地点及び予測-潮位・波高観測値及び高潮ガイダンスによる調査-, 平成23年度海洋気象技術検討会要旨.
- 小西 達男, 1997: 外洋に面した港湾で発生する高潮の成因について, *海と空*, 73, 3–12.
- Fujita, T., 1952: Pressure Distribution within Typhoon. *Geophys. Mag.*, 23, 437–451.
- Westerink, J. J. et al., 2008: A Basin- to Channel-Scale Unstructured Grid Hurricane Storm Surge Model Applied to Southern Louisiana. *Mon. Wea. Rev.*, 136, 833.



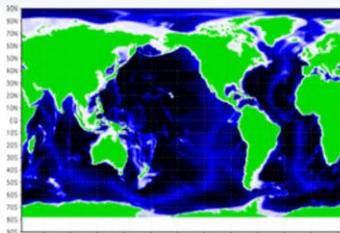
第1章 基礎編

1.7.15 日本沿岸海況監視予測システム

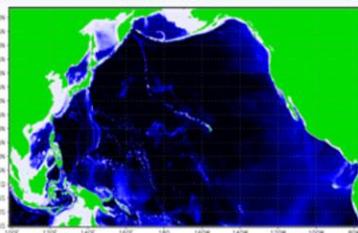
日本沿岸海況監視予測システムの特徴

解析システム(潮汐・気圧応答なし) Hirose et al.(2019)に詳しく

全球3D-Var解析(約100km)(GLB) 北太平洋4D-Var解析(約10km~可変)(NPR)



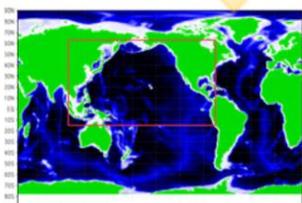
単方向
ネスティング
(オフライン)



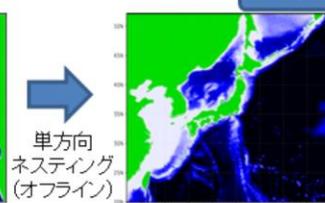
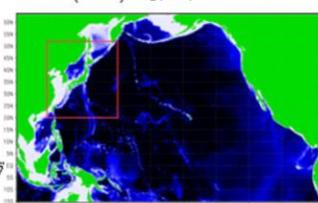
メノスケール

予測システム(潮汐・気圧応答あり)

Sakamoto et al.(2019)に詳しく



双方向
ネスティング



単方向
ネスティング
(オフライン)

IAU法による
初期化

サブメノスケール

全球モデル(約100km)
(GLB)

北太平洋モデル(約10km)
(NP)

日本近海モデル(約2km)
(JPN)

海水と海氷の総和の体積が保存

水位の信頼性が向上

気象庁では沿岸域におけるより詳細な海流・海水温が把握可能な日本沿岸海況監視予測システム(JPNシステム)を開発し、令和2年10月28日(10月27日00UTC初期値)から運用を開始した。

日本沿岸海況監視予測システムの構成図を示す。解析システムである海洋データ同化システム MOVE/MRI.COM (Usui et al. 2015; Hirose et al. 2019) と、予測システムである気象研究所共用海洋モデル MRI.COM (Tsuji no et al. 2017; Sakamoto et al. 2019) から構成される。予測システムの一部では、双方向オンラインネスティングが採用されている。これにより、親モデルと子モデルの場が滑らかに繋がり、側面境界の不連続性が解消、ノイズの発生も抑制される。

日本沿岸海況監視予測システム

解析システム概要

モデル	全球モデル GLB	北太平洋モデル NPR
水平解像度	東西1度×南北0.5度 (北極域:一般座標) (赤道域:南北0.3度)	日本近海: 東西1/11×南北1/10度 その他: 1/7度~0.3度
対象海域	全球	北太平洋
遅延解析	1週間かけて実行(大気外力: JRA-3Q)	
速報解析	10~1日前(大気外力: GSM)	
同化手法	3D-Var (3次元変分法)	4D-Var (4次元変分法)
同化ウィンドウ	5日×2	10日
潮汐過程	なし	
対象とする現象	黒潮、親潮、中規模渦 (数日スケールの変動を同化)	

解析システムは、全球モデル(GLB)と北太平洋モデル(NPR)から構成される。GLBを用いて3次元変分法による解析を行った後、子モデルのNPRを用いた4次元変分法による解析を行う。

日本沿岸海況監視予測システム

解析(NPR) : 4次元変分法による同化

- 同化ウィンドウは実行日(◎)の前10日間(□■)
- 7日前～1日前(■)の観測データと前方積分結果を比較
- 後方積分: 評価関数を最小化するような初期修正量を求める
- 前方積分(2回目): 最初の3日間(□)をIAUにより修正
- 後方積分(2回目): 初期修正量を求める
- ⋮
- 所定の条件をみたすまで、前方・後方積分を繰り返す



◎: 実行日

■: 観測データと前方積分結果を比較する、実行日◎の7日前～1日前

□: IAUにより修正される、最初の3日間



気象庁 Japan Meteorological Agency

令和4年度数値予報解説資料集

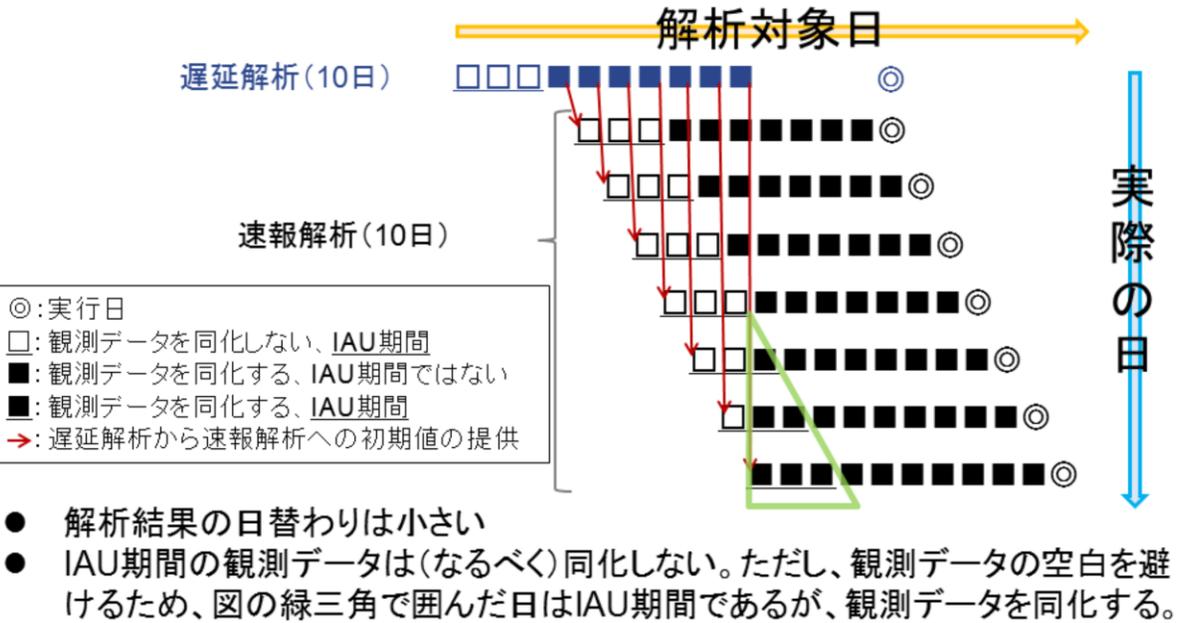
201

日本沿岸海況監視予測システムの北太平洋モデル(NPR)では、4次元変分法によるデータ同化を行う。前方積分と後方積分を行って、評価関数を最小化するような初期修正量を求めるが、求まった修正量の構造は、4次元変分法といえどもモデルの力学を満たしているわけではなく、このような修正量を1ステップで前方計算用のモデルに与えると、重力波などの高周波ノイズを生じさせる原因となる。そのため、Bloom et al.(1996)の Incremental Analysis Update (IAU) の手法を用いて、解析対象期間の最初の3日間において、前方計算用のモデルで修正量をタイムステップごとに加えながら積分することにより、高周波ノイズの除去を図っている。評価関数の修正量に関する勾配と初期勾配との比が所定の値以下になるまでこの手続きを繰り返す。

日本沿岸海況監視予測システム

解析:速報解析

初期値は遅延解析の結果から



基本的にIAU期間の観測データは同化しないが、観測データの空白を避けるため例外的に同化する場合もある。(図の緑三角で囲んだ日)

日本沿岸海況監視予測システム 予報システム概要

モデル	全球モデル GLB	北太平洋モデル NP	日本近海モデル JPN
水平解像度	1×0.3-0.5度	1/11×1/10度	1/33×1/50度(約2 km)
対象海域	全球	北太平洋	日本近海
外力	11日まで: GSM 12日以降: GEPS・JRA-55気候値		GSM
初期値(参照)	GLB-3DVAR	NPR-4DVAR	
IAU期間	3日間		
予報期間	11日間		
延長予報	1か月(GEPS)		なし
潮汐過程	あり		
河川水	JRA55気候値		
対象とする現象	黒潮、親潮、中規模渦		小規模渦、ストリーマ、沿岸波、沿岸湧昇 (詳細な海岸・海底地形)



予測システムは、水平解像度2kmの日本近海モデル(JPN)を核として、北太平洋モデル(NP)、全球モデル(GLB)から構成される。予報期間は、JPNについては11日間、NPおよびGLBは1か月である。NPおよびGLBの1か月延長予報は、気象庁が毎旬発表する海面水温・海流1か月予報の基礎資料等の用途で使用するために実行される。

。

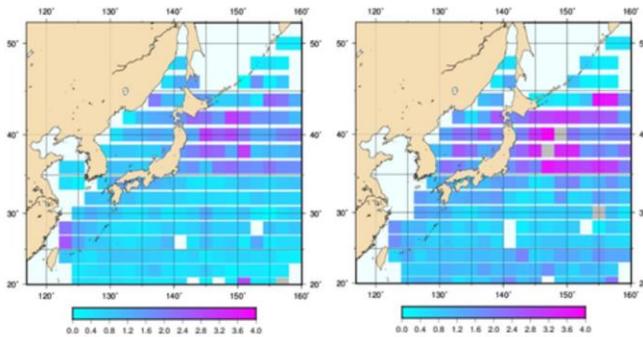
日本沿岸海況監視予測システム

解析・予報精度(水温)

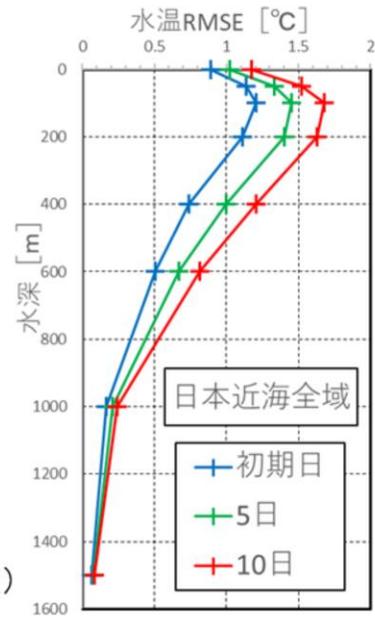
JPN: 水温11日予測値のRMSE

水深1m

水深100m



JPN: 予報日ごとの水深別RMSE



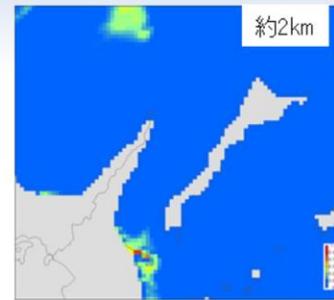
- いずれの水深でも、本州東方でRMSEが大きい(解析と同様)
- RMSEが最大となるのは水深100m付近。
- 水深100m付近では、10日予測値のRMSEは初期日の約1.4倍大きい(他の水深でも同程度)

水温のRMSEは水深100メートル付近で最大となる。水深100メートルでの10日予測値のRMSEは初期日の約1.4倍で、他の水深でも同程度である。

日本沿岸海況監視予測システム

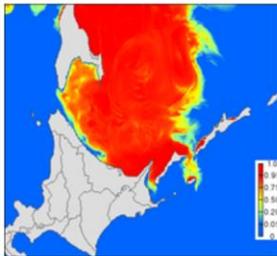
予報: 海氷予測の概要

日本近海モデル(JPN)	
水平格子間隔	約2km
領域	北緯20度～52度 東経117度～160度
予報時間	11日間
予報時間間隔	3時間
予報頻度	毎日、通年

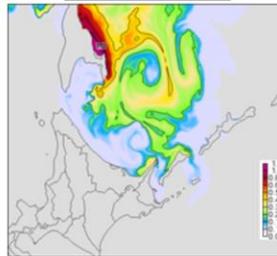


モデル格子

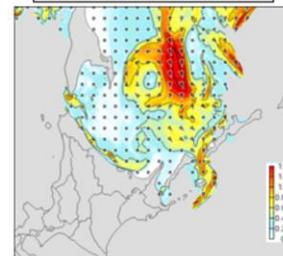
海水密接度



海氷の厚さ



海氷の漂流速度



初期値: 2020年2月27日00UTC、FT=48時間

JPNシステムの日本近海モデル(JPN)には、従来の海氷モデルを高度化した2kmの海氷モデルも組み込まれている。下図にJPNから得られる海氷予測の各要素を示す。海水密接度だけでなく、海氷の厚さや海氷の漂流速度についても、詳細に把握することが出来る。

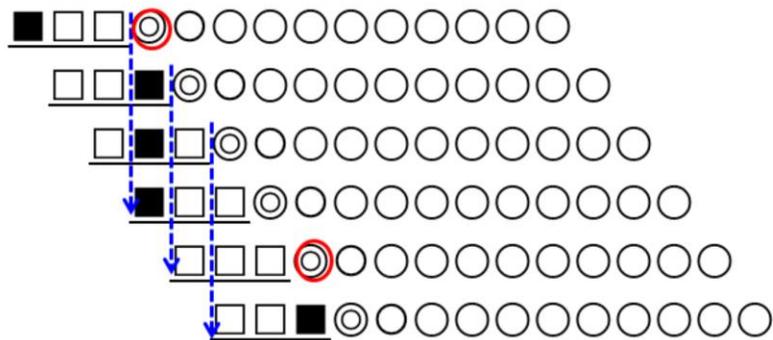
日本沿岸海況監視予測システム

解析: 海水密接度の同化

観測値として火・金の速報解析図を利用する。

自動解析については、ノイズ除去が不完全のため当面利用しない。

火水木金土日火水木……………



□■: JPN水温・塩分IAU期間、◎予報実行日、○予報対象日
火・金曜日に海水密接度をナッジング(■◎)

※ 予報実行日(予報初期日)も速報解析があれば同化する



海水同化は、JPNでは海水速報解析の密接度を、GLBとNPIはCOBE-SST(Ishii et al. 2005)の海水密接度を参照してナッジングすることで、海水の実況を初期値に反映している。

参考文献

- Usui, N., Y. Fujii, K. Sakamoto, M. Kamachi, 2015: Development of a four dimensional variational assimilation system toward coastal data assimilation around Japan. *Mon. Wea. Rev.*, **143** 3874–3892.
- Hirose, N., N. Usui, K. Sakamoto, H. Tsujino, G. Yamanaka, H. Nakano, S. Urakawa, T. Toyoda, Y. Fujii, and N. Kohno, 2019: Development of a new operational system for monitoring and forecasting coastal and open ocean states around Japan. *Ocean Dyn.*, **69**, 1333–1357.
- Tsujino, H., H. Nakano, K. Sakamoto, S. Urakawa, M. Hirabara, H. Ishizaki, and G. Yamanaka, 2017: Reference manual for the Meteorological Research Institute Community Ocean Model version 4 (MRI.COMv4). *Tech. Rep.*, **80**, Meteorological Research Institute, Japan.
- Sakamoto, K., H. Tsujino, H. Nakano, S. Urakawa, T. Toyoda, N. Hirose, N. Usui, and G. Yamanaka, 2019: Development of a 2km-resolution ocean model covering the coastal seas around Japan for operational application. *Ocean Dyn.*, **69**, 1181–1202.
- Bloom, S. C., L. L. Takacs, Silva A. M. D., and Ledvina D., 1996: Data assimilation using incremental analysis updates. *Mon. Wea. Rev.*, **124**, 1256–1271.
- ISHII, M., SHOUJI, A., SUGIMOTO, S., MATSUMOTO, A., 2005: Objective analyses of sea-surface temperature and marine meteorological variables for the 20th century using icoads and the KOBE collection. *Int. J. Climatol.* **25**: 865–879 (2005)



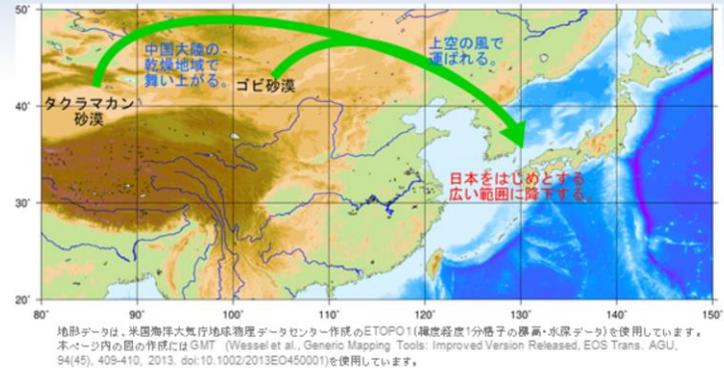
第1章 基礎編

1.7.16 エーロゾルモデル

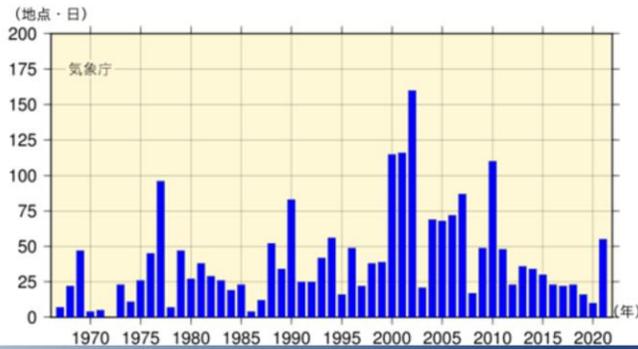
【黄砂】地域～大陸間規模での監視・予測

黄砂現象とは

- ▶ 東アジアの砂漠域や黄土地帯から強風により大気中に舞い上がった黄砂粒子が浮遊しつつ降下する現象を指す
- ▶ 日本では春に観測されることが多く、時には空が黄褐色に煙ることがある



日本における黄砂観測のべ日数の推移



気象庁 Japan Meteorological Agency

令和4年度数値予報解説資料集

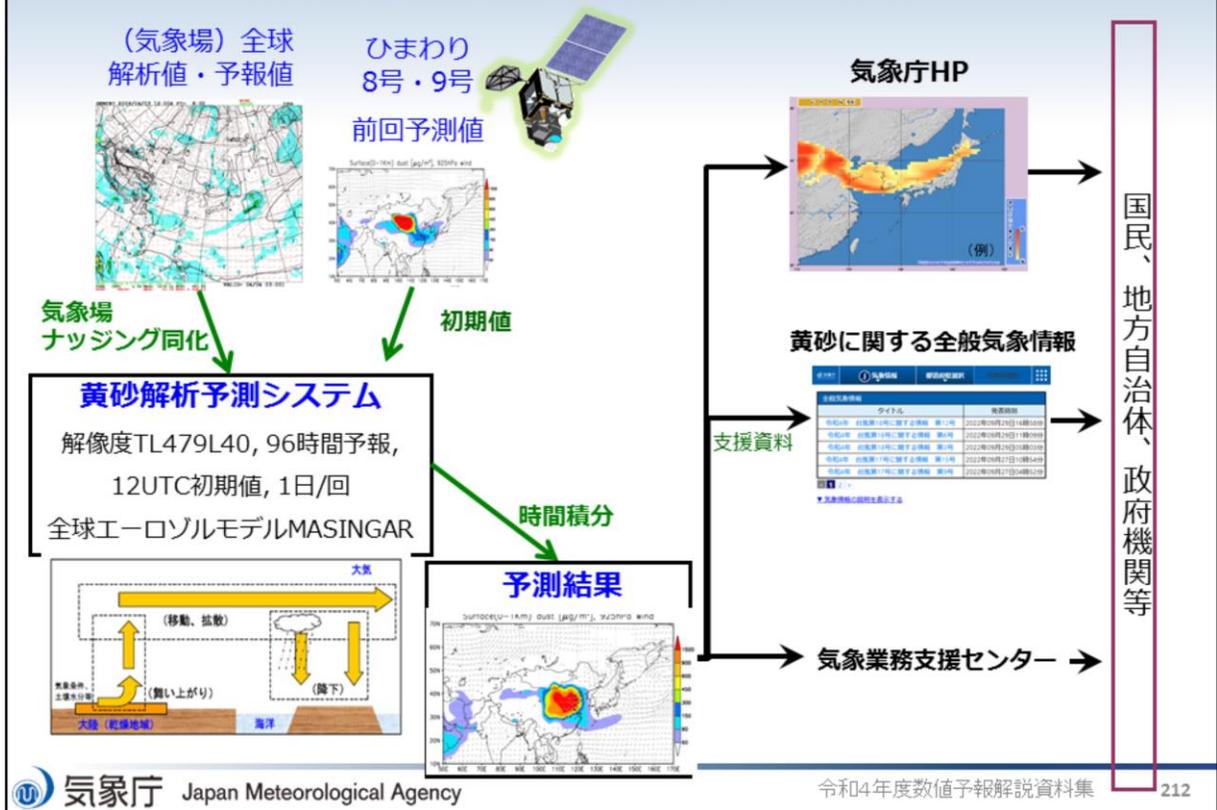
211

黄砂現象とは、東アジアの砂漠域(ゴビ砂漠、タクラマカン砂漠など)や黄土地帯から強風により吹き上げられた多量の砂じん(砂やちり)が、上空の風によって運ばれ、浮遊しつつ降下する現象を指す。日本における黄砂現象は、春に観測されることが多く、時には空が黄褐色に煙ることがある。

黄砂現象発生の有無や黄砂の飛来量は、発生域の強風の程度に加えて、地表面の状態(植生、積雪の有無、土壌水分量、地表面の土壌粒径など)や上空の風の状態によって大きく左右される。黄砂粒子はいったん大気中に舞い上がると、比較的大きな粒子(粒径が10マイクロメートル以上)は重力によって速やかに落下するが、小さな粒子(粒径が数マイクロメートル以下)は上空の風によって遠くまで運ばれる。例えば、東アジアが起源の黄砂粒子が太平洋を横断し、北米やグリーンランドへ輸送されたことも報告されている。

黄砂観測は現在、札幌・仙台・東京・新潟・名古屋・大阪・広島・高松・福岡・鹿児島・那覇の国内11地点で目視観測されている。グラフは、1967年から2021年まで黄砂の観測を続けている上記11地点についての年別黄砂観測のべ日数を示す。のべ日数(地点・日)とは、各日の観測地点数の年間総計である。同統計期間での黄砂観測のべ日数は増加しているとみられる(信頼水準90%で統計的に有意)が、これは2000～2010年に黄砂観測のべ日数が多かった結果を反映しているためである。黄砂観測日数及び黄砂観測のべ日数とも年々の変動が大きく、変化傾向を確実に捉えるためには今後のデータの蓄積が必要である。なお、この11地点の月別黄砂観測日数平年値(1991年から2020年までの平均)は、1.2日(2月)、4.4日(3月)、6.2日(4月)、2.7日(5月)、他は0.5日未満である(気象庁 2022)。

黄砂解析予測システム



黄砂分布の予測には、黄砂発生域での黄砂の舞い上がり、移動や拡散、降下の過程等を組み込んだ数値モデルを用いている。地上風速や土壌水分、積雪被覆、植生等と考慮して黄砂発生域での黄砂の舞い上りを評価している。

気象庁で用いている黄砂解析予測システムは、大気大循環モデルMRI-AGCM3と全球エーロゾルモデルMASINGAR mk-2を結合する構成となっている。水平格子間隔は約40km、鉛直層が40層（地表～約55km）で、粒径（直径）0.2マイクロメートル～20マイクロメートルの黄砂を10段階に分割して、96時間先までの黄砂の濃度などを予測している。さらに、モデルで予測するエーロゾルの3次元分布から計算した光学的厚さ（Aerosol Optical Thickness, AOT）を、静止気象衛星「ひまわり」の観測AOTデータで修正（2次元変分法）することで観測情報を取り込み、前日の黄砂分布状況を解析している。仕様の詳細については田中・小木(2017)などを参照いただきたい。

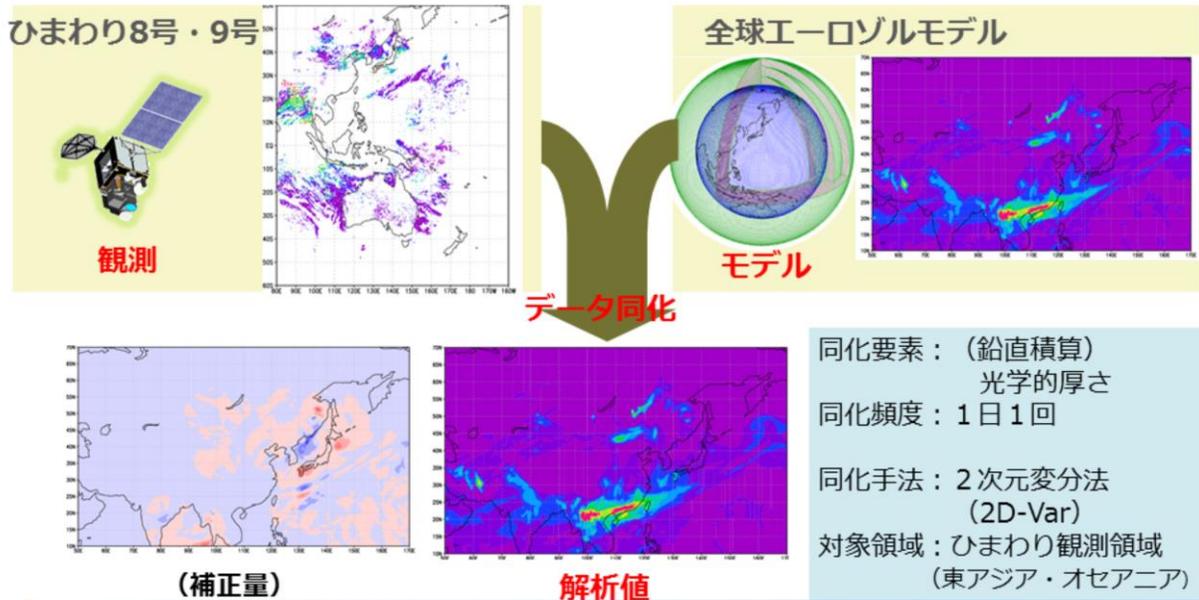
黄砂情報のページの黄砂解析予測図は、この数値モデルの結果をもとに、地表付近（高度1kmまで）の濃い黄砂（黄砂濃度が90マイクログラム/立方メートル以上の領域、視程では10km未満に相当）の予測領域などを表示している。

ナudging (Nudging method): 予測値を、たとえば一定の時定数で、参照値（解析値・観測値）に近づける修正。データ同化の簡便な方法のひとつ。

エアロゾル観測データの同化

2020年1月 ひまわり衛星データを用いた
エアロゾル同化システムの導入

➡ 黄砂解析・予測
の改善



2020年1月29日より、気象衛星ひまわり8号・9号の観測データを黄砂解析予測モデルに同化する手法を導入し、黄砂分布の解析予測を改善した。それまでは、黄砂をはじめとしたエアロゾルに関する観測データの取り込みを行っておらず、モデル内で過剰・過少な黄砂が予測された場合でも補正できていなかった。このため、黄砂の予測精度を向上させるためには、エアロゾルの観測データをモデルの入力値として利用することが課題となっていた。

2015年7月より運用を開始した気象衛星ひまわり8号及び待機運用中のひまわり9号による観測から、広範囲かつ高精度な大気中のエアロゾル観測データが高頻度に得られるようになった。データ同化手法を導入してこれらの観測データをモデルで利用することにより、黄砂予測濃度の再現性向上のための改良を行った。この結果、データ同化手法を導入した黄砂解析予測モデルにおいて、日本付近における黄砂の解析予測精度が向上することを確認できた(気象庁 2019)。

参考文献

- 気象庁, 2019: 配信資料に関する技術情報 第523号. URL: <https://www.data.jma.go.jp/suishin/jyouhou/pdf/523.pdf>
- 気象庁, 2022: 黄砂観測日数の経年変化. URL: https://www.data.jma.go.jp/gmd/env/kosahp/kosa_shindan.html
- 田中泰宙, 小木昭典, 2017: 気象庁全球黄砂予測モデルの更新について. 測候時報, **84**, 66-71.



第1章 基礎編

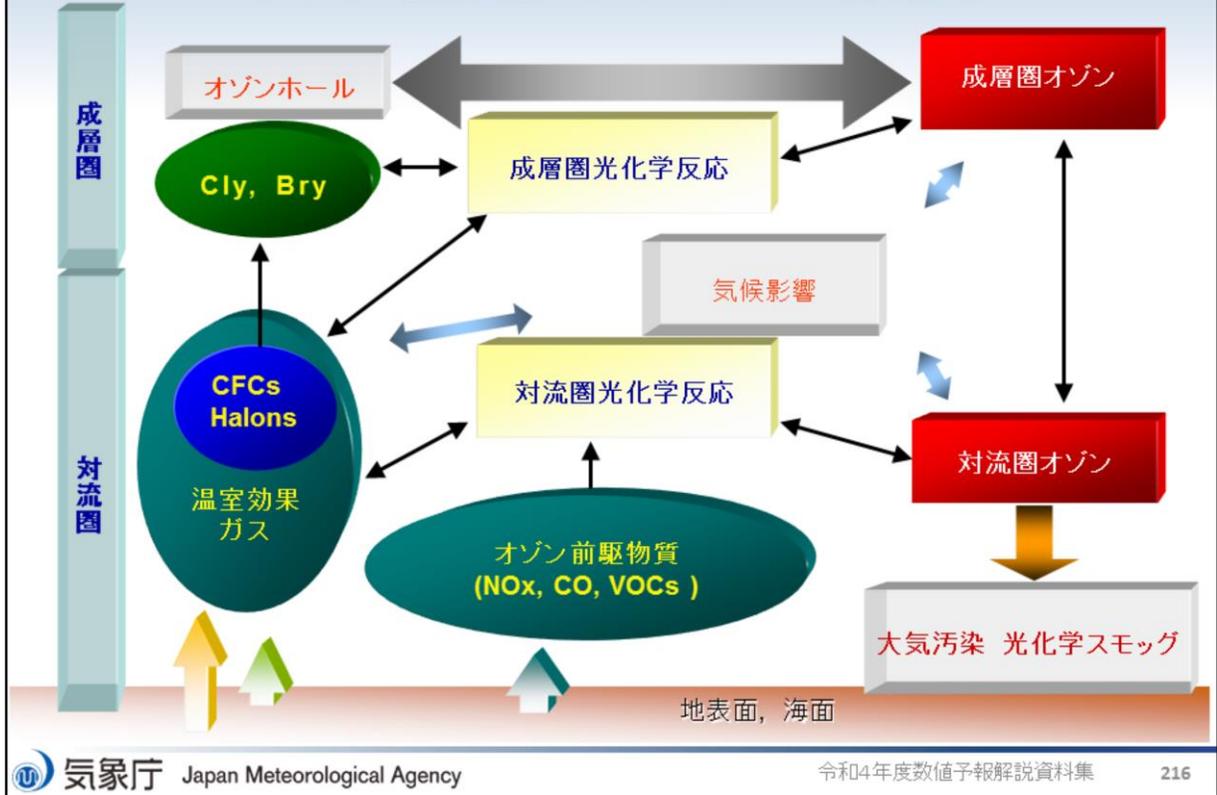
1.7.17 化学輸送モデル(全球・領域)

全球化学輸送モデルで成層圏オゾン(オゾン層)の予測を行い、紫外線情報の基礎データを提供し、大気汚染気象予測システムに側面境界値(オゾン等化学物質)を与える。また、大気汚染気象予測システムで対流圏オゾンの予測を行い、大気汚染気象業務を支援している。

目次

- ・化学輸送モデルの概要
- ・紫外線予測システム
- ・大気汚染気象予測システム
- ・高解像度版領域化学輸送モデル
- ・高解像度版領域化学輸送モデルにおけるデータ同化
- ・参考文献

化学輸送モデルの概要



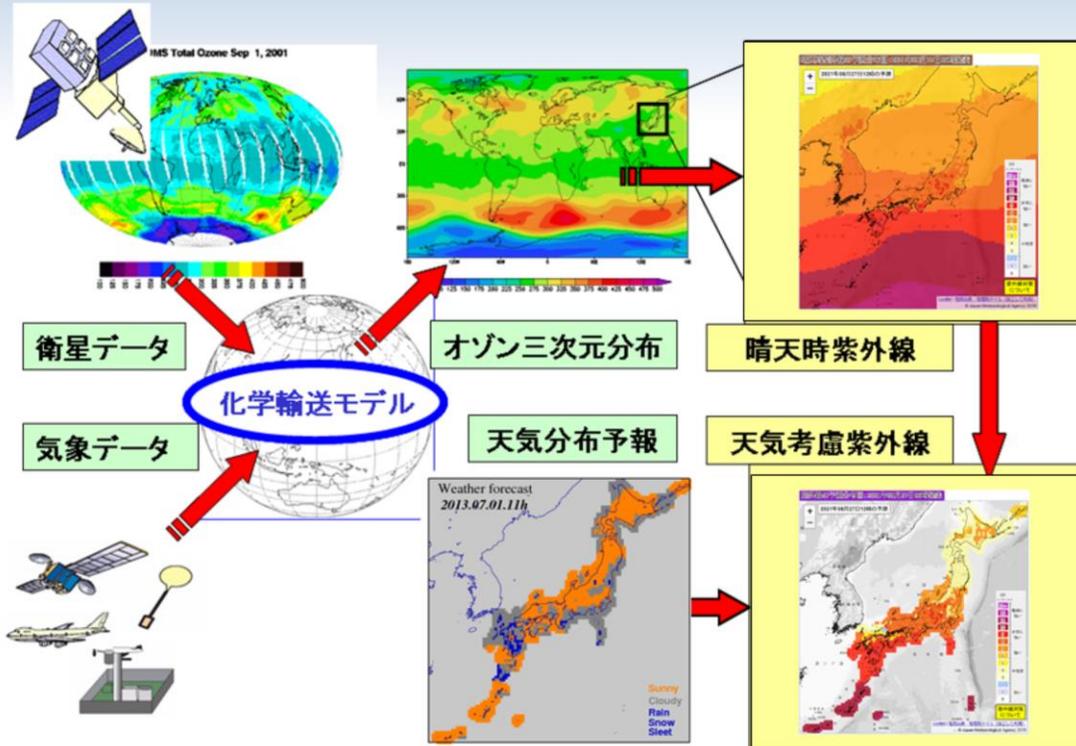
化学輸送モデルは、大気質モデル air quality model とも呼ばれる。気象庁の化学輸送モデルでは成層圏オゾンと対流圏オゾンを取り扱う。オゾンは、化学的な反応により生成・消滅を繰り返すとともに、大気の流れにより輸送される。オゾンの生成源として、成層圏のオゾン層付近の他に、地表付近の(主として人為起源の)前駆物質からの反応によるものがある。

南極上空のオゾン量が極端に少なくなる現象をオゾンホールと呼ぶ。極夜の低温時に発生する極成層圏雲(PSC)の粒子表面の化学反応によって、人為起源の塩素(Cl)化合物からCl分子が生成される。極夜を脱して太陽光が届き始めると、紫外線による光解離によってCl原子が生成され、触媒としてオゾン破壊反応を促進し、オゾンホールができる。

また、オゾンは太陽放射を吸収し、赤外放射を射出することによって、大気的气温場に影響を与えるため、温室効果気体として地球の気候変動に基礎的に関わっている。

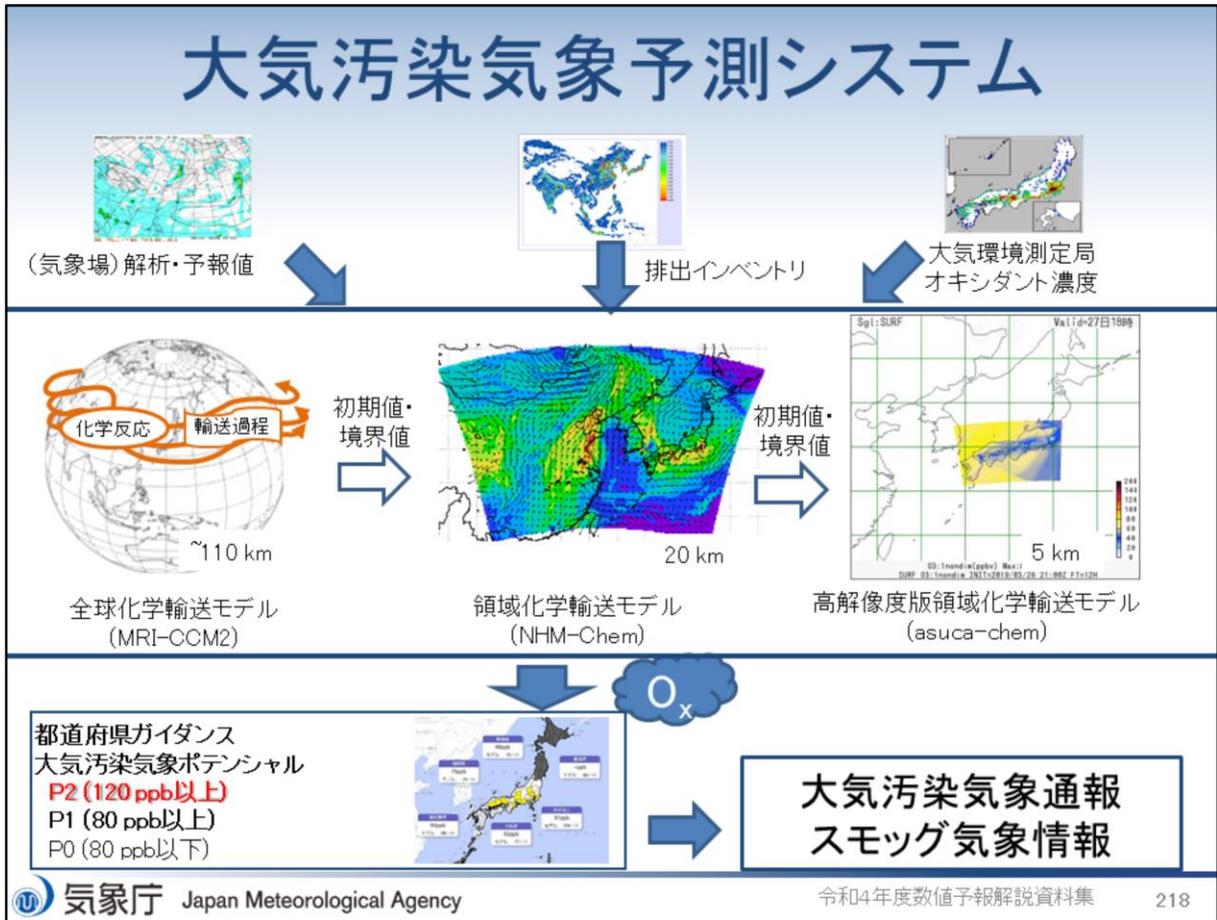
オゾンをはじめ、塩素系、臭素系、フロン類、ハロン類など大気中の微量成分気体は相互に化学反応を起こす場合があるため、これらの過程がモデルに組み込まれている。

紫外線予測システム



紫外線予測システムは紫外線情報に利用されている。本システムでは、大気大循環モデルMRI-AGCM3(Yukimoto et al. 2012)と(全球)化学輸送モデルを結合させたモデルMRI-CCM2(水平格子間隔約110 km鉛直層数64層)を用いており、即時的に利用可能な衛星データ(OMPS/SuomiNPP@NOAA のオゾン全量(鉛直積算量))でナッジングすることで観測情報を取り込んでいる。また、気象場はGSM解析・予測値をナッジングすることで、現実の大気場から離れないようにしている。仕様の詳細はJMA(2019)を参照されたい。

大気汚染気象予測システム



大気汚染気象予測システムは大気汚染気象予報の支援を目的としている。本システムのモデルは、アジア域の領域化学輸送モデル(水平格子間隔20 km 鉛直層数18層)及び、東日本や西日本を対象とする高解像度版領域化学輸送モデル(水平格子間隔5 km 鉛直層数19層)の2種類がある。領域化学輸送モデルは、大気モデルJMA-NHMと組み合わせて使用しており、即時的に利用可能な地上観測データ(オゾン濃度)でナッジングすることで観測情報を取り込んでいる。また、オゾンなどの大気質の初期値境界値を全球化学輸送モデルから与えている。高解像度版領域化学輸送モデルは、大気モデルasucaと組み合わせて使用しており、領域化学輸送モデルと同様に、即時的に利用可能なオゾン濃度の地上観測データでナッジングして観測情報を取り込んでいる。仕様の詳細について、池上ほか(2015)などを参照いただきたい。

「2030年に向けた数値予報技術開発重点計画」では、大気汚染プロダクトの高度化のため、大気汚染物質の予測精度向上が求められている。

領域化学輸送モデル、高解像度版領域化学輸送モデルの結果は、大気汚染気象予報業務に利用される。

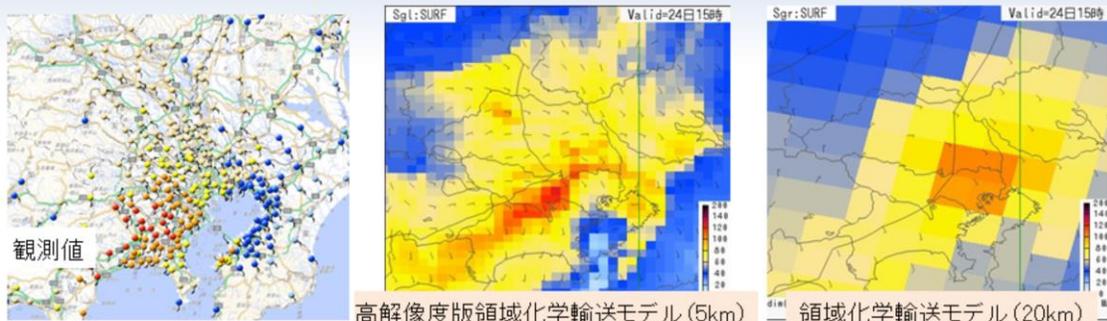
全球化学輸送モデルは、紫外線予測のための全球オゾン分布の予測に用いられるほか、領域化学輸送モデルの外側境界条件としても用いられる。両モデルによる、地表付近の光化学オキシダント(Ox)濃度は、ガイダンスによって大気汚染気象ポテンシャル(P0からP2)に翻訳され、大気汚染気象予報業務のための参照情報として利用されている。例えば、都道府県はP2の状態が継続すると認められる場合には光化学オキシダント注意報を発令している。

排出インベントリ emission inventory : 地表付近からの自然および人間活動起源の各化学物質の排出の量について、地域別(・季節別)に記した目録データ。化学輸送モデルの下部境界条件として用いられる。

全球解析・予報値 : 化学輸送モデル中の気象場の初期条件および予測期間中のナッジングに用いられる。

高解像度版領域化学輸送モデル

2018年7月24日15時(JST)の地上オゾン濃度分布



- 20km版 埼玉県南部が高濃度域の中心で、実況より北にずれている
- 5km版 120ppb以上の領域が東京都、神奈川県に広がっている

5km版の方が実況に近い濃度分布を予測できた

都府県別日最大値ガイダンス(42都府県分)のスレットスコア

	2019年4-5月		2018年7-9月	
	80ppb	120ppb	80ppb	120ppb
5km版	0.77	0.36	0.61	0.39
20km版	0.63	0.39	0.36	0.28

5km版の方が春季120ppb以上を除き成績がよかった



気象庁 Japan Meteorological Agency

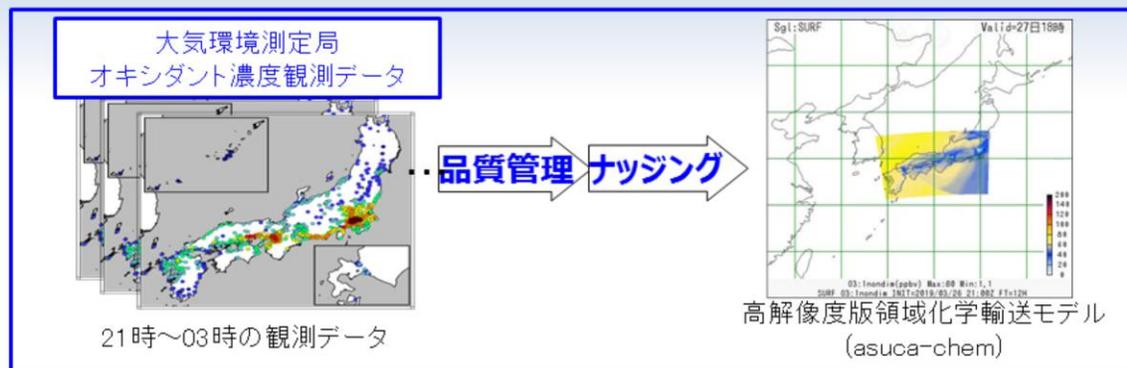
令和4年度数値予報解説資料集

219

大気汚染は基本的には都市部を中心とした局地的な現象であり、海陸風など地形の影響を大きく受けるため、モデルの解像度を上げることで、詳細な汚染の予測が期待できる。当庁の領域化学輸送モデルの水平格子間隔は20kmと粗く、「詳細なスモッグ気象情報」の支援には不十分であった。このため、より水平格子間隔の細かいモデルの開発を進め、令和2年3月に高解像度版領域化学輸送モデルの運用を開始した。

関東地方でスモッグ気象情報が発表された2018年7月24日の事例を示す。関東地方南部を中心に地上オゾン濃度が上昇し、15時には東京都で142ppb(町田市中町)が観測された。領域化学輸送モデルは高濃度域の中心を実況より北(埼玉県南部付近)に予測したが、高解像度版領域化学輸送モデルは正しく東京都・神奈川県付近に予測するとともに、実況のような高い濃度(120ppb以上)を予測するなど、領域化学輸送モデルよりも適切な予測となっている。

高解像度版領域化学輸送モデルにおけるデータ同化



(検証結果)

検証期間: 春) 2019年4月～5月、夏) 2019年6月～9月

予報: 13時～15時

府県予報区別の日最大値ガイダンスのスレットスコア平均値

閾値	季節	同化なし	同化あり
120 ppb	春	0.18 (n=18)	0.20 (n=19)
	夏	0.09 (n=30)	0.08 (n=28)
80 ppb	春	0.60 (n=41)	0.61 (n=41)
	夏	0.47 (n=41)	0.48 (n=41)

オゾン等大気汚染物質を予測する際に、過去の統計上求められた排出インベントリを地表面境界値に用いているため、即時的な現象には十分に対応できない。そこで、高解像度版領域化学輸送モデルのオゾン濃度値を観測値で修正する仕組みを、2022年6月から導入している。一般大気環境測定局で観測されたオキシダント濃度データについて、品質管理をクリアしたデータのみを、領域化学輸送モデルにナッジングで同化している。

ただし、運用の都合上、同化している観測値は夜間のみのため、日中の高濃度の予測の改善には十分ではない。今後、オゾンの前駆物質であるNOx等の汚染物質の同化等の改善が必要である。

一般大気環境測定局: 各都道府県が設置し、オゾンなど大気汚染物質の時間毎データを測定している。「そらまめくん」の愛称で環境省が取りまとめ、HPでほぼリアルタイムに公表している。

参考文献

- 池上雅明, 鎌田茜, 中務信一, 2015: 大気汚染気象予測モデル. 量的予報技術資料(予報技術研修テキスト), 133-140.
- 池上雅明, 鎌田茜, 梶野瑞王, 出牛真, 2017: 気象庁領域大気汚染気象予測モデルへの地上オゾン観測データ同化, 測候時報, 84, 97-107.
- JMA, 2019: Outline of the Operational Numerical Weather Prediction at the Japan Meteorological Agency. Appendix to WMO Technical Progress Report on the Global Data-processing and Forecasting Systems (GDPFS) and Numerical Weather Prediction (NWP) Research. Japan, 229pp pp., (Available online at <https://www.jma.go.jp/jma/jma-eng/jma-center/nwp/outline2019-nwp/index.htm>).
- Yukimoto, Seiji, Yukimasa Adachi, Masahiro Hosaka, Tomonori Sakami, Hiromasa Yoshimura, Mikitoshi Hirabara, Taichu Y Tanaka, Eiki Shindo, Hiroyuki Tsujino, Makoto Deushi, and others, 2012: A new global climate model of the Meteorological Research Institute: MRI-CGCM3—Model description and basic performance—. Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II, 90, 23-64.

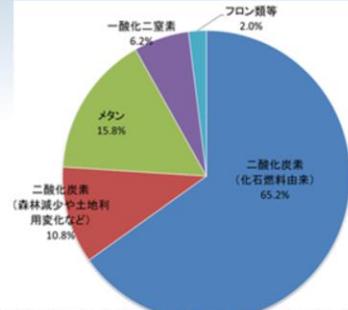


第1章 基礎編

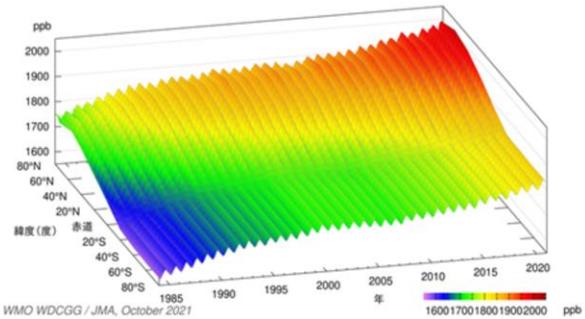
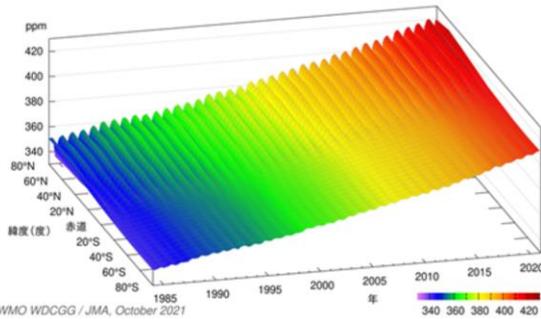
1.7.18 二酸化炭素輸送モデル

温室効果ガスの種類とその観測濃度

- ▶ 人間活動によって増加した主な温室効果ガス: 二酸化炭素、メタン、一酸化二窒素、フロンガス
- ▶ 二酸化炭素は地球温暖化に及ぼす影響がもっとも大きな温室効果ガス



人為起源の温室効果ガスの総排出量に占めるガスの種類別の割合 (2010年の二酸化炭素換算量での数値: IPCC第5次評価報告書より作図)



緯度帯ごとに平均した大気中の二酸化炭素濃度の変動

左図と同様。ただしメタン濃度

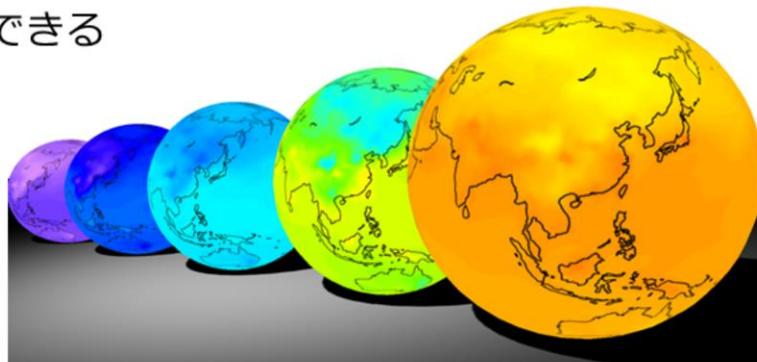
人間活動によって増加した主な温室効果ガスには、二酸化炭素(CO₂)、メタン(CH₄)、一酸化二窒素(N₂O)、フロンガスがある。フロンガスとは、クロロフルオロカーボン(CFC-11, CFC-12など(C, F, Cl から構成))の総称である。また、ハイドロクロロフルオロカーボン(HCFC-22 など(C, F, Cl, Hから構成))なども広義には含まれる。

大気中のCO₂濃度を緯度別にみると、特に北半球で、北ほど濃度が高い傾向にある。近年になるほど、熱帯・南半球との差が大きくなってきている。

メタンもCO₂同様の傾向だが、1985年段階でも北半球熱帯から中高緯度の濃度が相対的に大きく、CO₂ほど一定の増加ではない(2000年代前半に増加が一時鈍化)。メタンの排出原因は、自然起源(熱帯の湿地微生物やシロアリなどの分解作用)が4割、残りは人為起源(稲作、バイオマス燃焼、家畜のゲップなど)である。

二酸化炭素解析システムによる 二酸化炭素分布情報の提供

- 世界各地で観測された二酸化炭素濃度データをもとに、数値シミュレーション（二酸化炭素解析システム）を用いて地球の様々な地域における濃度分布を推定
- 任意の年月や場所の二酸化炭素濃度の分布などを見ることができる



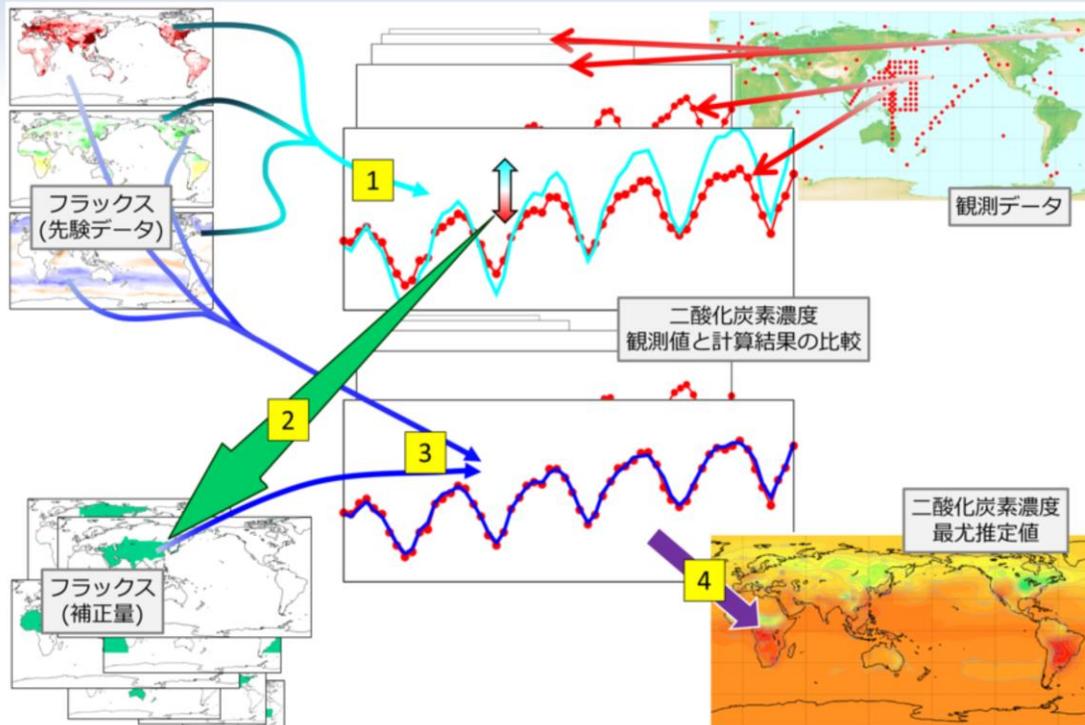
https://www.data.jma.go.jp/ghg/kanshi/info_kanshi.html（気象庁HP二酸化炭素分布情報）

二酸化炭素解析システムを用いて、世界各地で観測された二酸化炭素濃度データをもとに、地球の様々な地域における濃度分布を推定した二酸化炭素分布情報を提供している。任意の年月や場所の二酸化炭素濃度の分布などを見ることができる。

季節変動を繰り返しながら、年々濃度は増加している。北半球は特に季節変動が大きい。これは陸上生物圏のCO₂吸収・排出が反映された結果である。

本システムでは、GSMに二酸化炭素の輸送過程を組み込んだモデルGSAM-TM（水平格子間隔約110 km鉛直層数60層）と逆解析（二酸化炭素の放出・吸収量の補正）を組み合わせた手法を用いている。2015年度に約180 kmの水平分解能で運用を開始し、2020年2月にはより細かい情報を提供するために水平分解能の高解像度化を行った（約180 km⇒約110 km）。

二酸化炭素濃度解析システム



二酸化炭素解析システムについて述べる。二酸化炭素濃度の数値シミュレーションにおいては、フラックス(単位時間あたりに単位面積の地表面または海表面から大気中に入り出す二酸化炭素の量)が基本的な推定量となる。表面のある一地点でのフラックスは風による二酸化炭素の輸送を通じて、上空を含む広い領域の濃度に長期にわたって影響を及ぼす。言い換えると、ひとつの地点・時刻の濃度は、すべてのフラックスからの寄与分の総和として求められる。このような寄与の計算は、大気輸送モデルに基づいて行われる。気象庁では、GSAM-TMを採用している。

計算に先んじて、様々な研究に基づいた先験的なフラックスを用意する。ここでは、人間の活動、陸上生物圏の活動、海洋の働きに相当する3種類の先験的フラックスを用いている。これらのフラックスから、大気輸送モデルに従って各地点・各時刻の濃度が算出される(1)。こうして推定された濃度は、現実に観測された濃度とは一般に異なるため、以下の手法によって補正する。

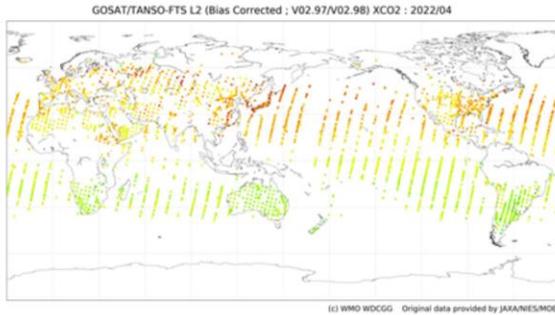
地球全体をいくつかの領域に分け、各々の領域における月あたり単位量のフラックスが各地点・各時刻の濃度へどのように寄与するかを算出する。そして、上述した推定値と観測値との差異が最も良く補われるように各領域に対して係数を割り当てる。係数の決定に際しては、先験的なフラックスと観測値それぞれの誤差を適切に考慮する必要がある。この係数を乗じた各領域のフラックスが先験的なフラックスに対する補正量となる(2、3)。

先験的なフラックスと補正分のフラックスに基づいて算出された濃度は、計算上最も良い推定値(最尤推定値)とみなすことができる(4)。このようにして算出された濃度分布が、気象庁の『二酸化炭素分布情報』に用いられる。

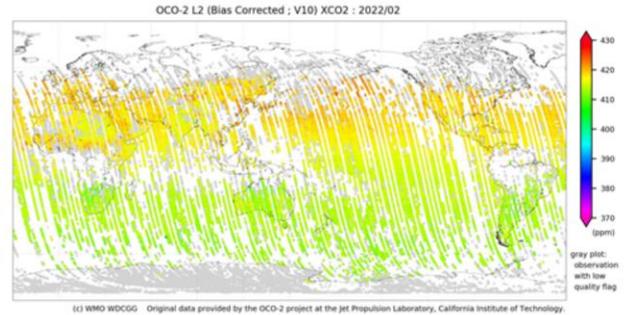
詳しくはNakamura et al. (2015)や、Maki et al.(2010)、地球環境・海洋部 環境気象管理官ほか (2009)を参照されたい。

【今後】衛星観測データの利用

- 環境省のGOSAT衛星、NASAのOCO-2など、衛星によるCO₂観測が発展しつつある。
- 逆解析への利用が今後期待される。



GOSATによる衛星観測
気柱平均CO₂ (XCO₂)



OCO-2による衛星観測
気柱平均CO₂ (XCO₂)

世界温室効果ガスデータセンター(WDCGG)のサイトから引用



二酸化炭素分布情報の大きな課題として、二酸化炭素解析の入力データに用いている観測地点の偏在があり、世界全体の均質的な解析に大きな支障となっている。その対応として、広範囲を一様な品質で観測する衛星観測の利用が考えられることから、気象研究所では衛星観測データの同化利用のための開発が進められている。

GOSAT: (愛称「いぶき」) CO₂やメタンなどの温室効果気体の観測衛星(JAXA、環境省、国立環境研究所、2009年1月～)

OCO-2: 軌道上炭素観測衛星 Orbiting Carbon Observatory (NASA、2014年～)

参考文献

- 地球環境・海洋部 環境気象管理官・気象研究所・神戸海洋気象台(2009): 二酸化炭素分布情報について. 測候時報, 76, 221-229.
- Maki, T., M. Ikegami, T. Fujita, T. Hirahara, K. Yamada, K. Mori, A. Takeuchi, Y. Tsutsumi, K. Suda, and T. J. Conway, 2010: New technique to analyse global distributions of CO2 concentrations and fluxes from non-processed observational data. Tellus, 62B, 797-809.
- Nakamura, T., T. Maki, T. Machida, H. Matsueda, Y. Sawa, and Y. Niwa, 14-18 Dec. 2015: Improvement of Atmospheric CO2 Inversion Analysis at JMA. AGU Fall Meeting, San Francisco, A31B-0033, (<https://agu.confex.com/agu/fm15/meetingapp.cgi/Paper/64173>).



第1章 基礎編

1.8 プロダクト利用上の留意点

数値予報には、数値計算や物理過程等による手法に由来する制約のため、予測精度に限界がある。また、現業予報作業では、全球モデル(GSM)・メソモデル(MSM)・局地モデル(LFM)などの複数の数値予報資料(プロダクト)を作業時間が限られる中で、効率的かつ能率的に利用しなければならない。

本節では、第1.7節までの数値予報の特性としてその限界と予測可能性について述べ、その後、プロダクトの利用上の留意点(第1.8.1項で数値予報の留意点、第1.8.2項でガイダンスの留意点)を述べる。



第1章 基礎編

1.8.1 数値予報の留意点

本項の内容は、藤田(2012)、石田・山田(2018)に基づいて記述しているので、適宜これらの文献を参照願いたい。

数値予報の限界と誤差要因

- 数値予報の限界
 - 大気現象を完全には表現できない(分解能)
 - 誤差の急速な成長(カオスの性質)
- 予報誤差の要因
 - 数値予報モデル(力学過程、物理過程)
 - 初期値
 - 境界値
- 数値予報の限界と誤差特性の把握が重要

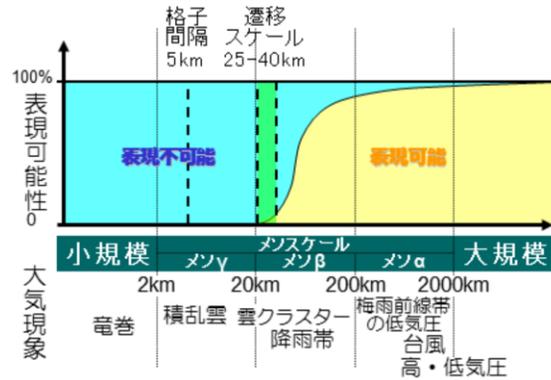
数値予報を行うための必須要素は、数値予報モデルと初期値及び境界値である。数値予報の限界と誤差要因を考える上でも、これらの必須要素は重要である。例えば数値予報の限界について、数値予報モデルの力学過程の面から考えてみる。数値予報モデルの力学過程では、格子点法の場合、空間的に区切りのない連続体(流体)である大気の状態をコンピュータで扱えるように、多数の格子点における値で代表させる必要がある(これを離散化という)。この格子点の間隔で分解能が決まり、どの程度のスケールの現象が格子点における値で直接的に表現可能であるかが決まる。そのため、決まったスケールより小さい大気現象は表現することができないことから、数値予報モデルは大気現象を完全に表現することができない。また、数値予報モデルで用いる大気の支配方程式は非線形であり、そのカオスの性質から予報初期のごくわずかな誤差が急激に拡大して将来の予測に大きく影響する場合があるため、完全な予測は困難である。

表現可能な現象のスケール 実効解像度

- 格子点値はその格子内の平均的な状態を示す
- モデルの実効解像度よりも細かい現象は表現できない
- 実効解像度は格子の 5～8 倍程度

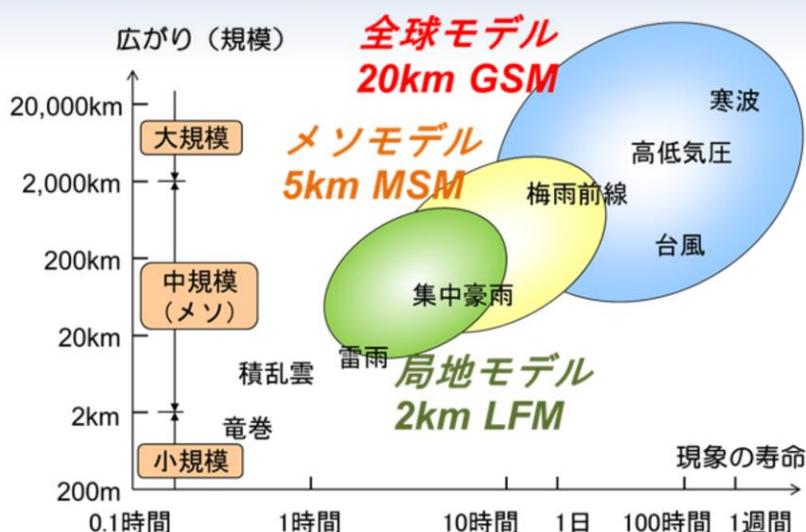
- GSM:100～150km
- MSM:25～40km
- LFM:10～15km

鉛直解像度の制約により境界層の構造や、逆転層などの構造も十分な表現ができないことがある。



一般に、数値予報モデルで表現可能な現象のスケール(実効解像度)は格子間隔の5～8倍程度である。短期・中期予報で用いる気象庁現業数値予報モデルでは、全球モデル(GSM)は水平分解能約20km、メソモデル(MSM)は5km、局地モデル(LFM)は2kmであることから、それぞれ100～150km、25～40km、10～15km程度以上のスケールの現象について表現可能である。また、各モデルの格子点値はその格子内の平均的な状態を示すことにも注意が必要である。さらに、鉛直解像度の制約により、境界層の構造や逆転層などの構造を十分に表現できない場合があることにも注意する必要がある。

気象現象のスケールに応じた 数値予報モデルプロダクトの使い分け



原則としては最新かつ最も分解能の高い数値予報モデルの結果を利用することが推奨される。個々の事例については、観測データと比較、確認し、数値予報プロダクトの使い分けをする必要がある。

気象現象のスケールに応じた数値予報モデルプロダクトの使い分けは、以下のとおりである。

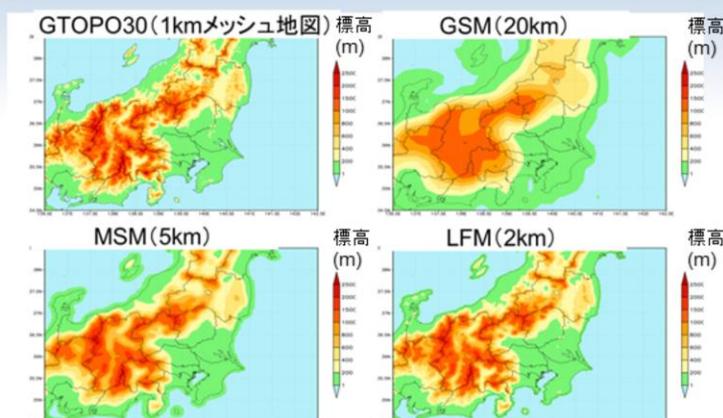
GSMでは、現象の寿命が1日～1週間、広がりが数千km前後の大～中規模の高低気圧や台風等の総観規模の擾乱を表現することができる。

MSMでは、現象の寿命が数時間～1日、広がりが数百km前後の中規模の豪雨をもたらす現象等を表現することができる。

LFMでは、現象の寿命が数時間、広がりが数十km～数百km程度の豪雨をもたらす現象を表現することができる。

このように、現象の寿命や広がりを考慮して、観測データと比較、確認し、数値予報モデルプロダクトの使い分けをする必要がある。また、原則として最新かつ最も分解能の高い数値予報モデルの結果を利用することが推奨される。

モデル地形の不完全さに起因する誤差



- GSM、MSM、LFMの地形は、米国地質調査所が作成した1kmメッシュ（正確には30秒）のGTOPO30データをモデルの水平解像度に合わせて平滑化したもの
- 実際の地形にはLFMより更に小さいスケールの起伏がある
- スケールの小さい地形の影響を受ける風や、小スケールの激しい起伏でモデルと実際の標高の異なる場合の気温は誤差が大きいと考えられる
 - 実際の地形とモデル地形の違いを十分把握する
- このような誤差は系統誤差としてガイダンスで補正される。数値予報の結果とガイダンスの結果を使い分ける必要がある

GSM、MSM、LFMの地形は、米国地質調査所(USGS)が作成した30秒(1秒は1/3600度:約1km)メッシュのGTOPO30データを平滑化して作成している。実際の地形にはLFMより更に小さいスケールの起伏がある。

地形の表現は強制上昇や風系への影響等、数値予報モデルの結果に直接影響を与えるが、実際の地形とは、標高も起伏も異なっているために誤差が生じる。地形の表現による誤差は、決まって生じる誤差の1つで系統誤差と言われる。このような系統誤差は、ガイダンスによって補正することができる。数値予報プロダクトの利用に際しては、実際の地形とモデル地形の違いを十分に把握するとともに、このような系統誤差はガイダンスにより補正されることを念頭において、数値予報結果とガイダンスの結果を使い分ける必要がある。

物理過程の不完全さに起因する誤差

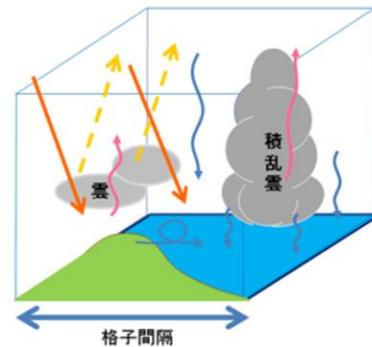
- 物理過程は格子より小さいスケールの効果を格子平均値で計算するためにモデル化を行う
 - モデル化には統計的關係も含まれる
- そのモデル化は不完全で予測誤差の大きな原因
 - 各過程についての知見が不足
 - 解くべき方程式が分かっていない(乱流、対流など)
 - 計算資源が不足
 - 現象の物理過程が複雑なため簡略化が必要(放射過程の波長への依存性など)
 - そもそも導入されていない効果も
 - MSM・LFMでは積雪の変化、LFMでは海面水温の変化
 - パラメタリゼーションの原理的制約

数値予報モデルの物理過程については、今の天気予報で対象となる現象の予測に必要なものは、ほぼ含まれている。その物理過程は格子より小さいスケールの効果を統計的關係を考慮しつつ、格子平均値で計算するためにモデル化を行っているが、それらの過程が不完全なために予測誤差の大きな原因の一つとなっている。例えば、以下のようなものが挙げられる。

1. 乱流や対流など解くべき方程式が分かっていない等、各過程についての知見不足
2. 計算機資源不足。例えば放射過程では、波長への依存性が複雑で計算に時間を要するため、簡略化されている
3. 未導入の効果の影響。例えば、予測期間内において、MSM・LFMでは積雪の変化、LFMでは海面水温の変化が考慮されていない
4. パラメタリゼーションの原理的制約

パラメタリゼーションの原理的制約

- 予報変数(格子点値)は、モデルの格子点における**時間・空間平均値**
- 格子平均からのずれの効果の扱い
 - 格子間隔より小さな現象(サブグリッドスケールの現象)は**格子点値で表現することができない**(支配方程式で扱えない、モデルで陽に表現できない)
 - サブグリッドスケールの現象が予報変数(格子点値)に及ぼす効果を、格子点の物理量で評価 → **パラメタリゼーション**
 - **パラメタリゼーションは、格子平均値と**いった限られた情報のみを用いて格子より小さいスケールの効果を記述する原理的制約がある****



モデルは気温や比湿、風等の、格子平均だけを扱う(知っている)。

前頁にて、物理過程は格子より小さいスケールの効果を統計的関係を考慮しつつ、格子平均値で計算するためにモデル化を行っている述べた。

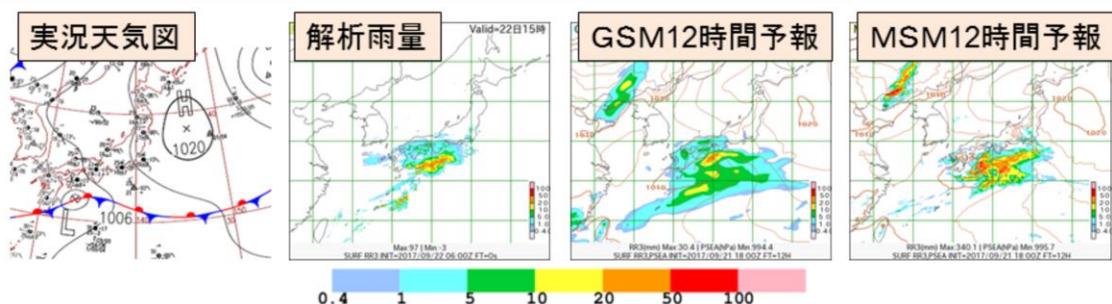
その一つとして、格子間隔より小さな現象(サブグリッドスケールの現象)が予報変数(格子点値)に及ぼす効果を格子点の物理量で評価(パラメタリゼーション)して、格子平均からのずれの効果として、その格子点の値に取り入れている。

これは、予報変数(格子点値)は、モデルの格子点における時間・空間平均値であり、サブグリッドスケールの現象は格子点値で表現することができないことによるものである。

このように、パラメタリゼーションは格子平均値と**いった限られた情報のみを用いて格子より小さいスケールの効果を取り入れなければならない原理的制約があり、誤差を生む一因となっている。**

積雲対流過程の違いによる降水特性の典型例

2017年9月22日15時のアジア太平洋地上天気図、及び同時刻についての前3時間降水量。左から、解析雨量、GSM(9月22日3時初期値)、MSM(9月22日3時初期値)それぞれによる予報。



- [GSM]: 弱い降水域を前線の周囲とその北側に広く予測した。一方で、前線近傍の降水量が少ない
- [MSM]: 強い降水を前線付近に集中させている一方で、前線北側の弱い降水域の広がり狭い。また、低気圧自体もGSMより発達させている

パラメタリゼーションとして、積雲対流過程の違いによる降水特性の典型例を示す。積雲対流過程について、GSMでは主に雲水スキームと荒川シューバート(AS)スキーム、MSMでは雲物理過程とケイン・フリッチ(KF)スキームを用いている。ASスキームとKFスキームは対流パラメタリゼーションの一種であり、数値予報モデルの分解能で表せない積雲の効果を取り入れるために導入されている。この対流パラメタリゼーションの差により、GSMとMSMでは降水表現に差が表れている。図は、左から2017年9月22日15時のアジア太平洋地上天気図、および同時刻の前3時間解析雨量、9月22日3時初期値のGSMおよびMSMの12時間予報の前3時間降水量を示している。

GSMは解析雨量と比較して、弱い降水域を前線の周囲とその北側に広く予測する一方、前線近傍の降水量は少ないという特徴がみられ、ASスキームの典型的な特徴がみられる。

MSMは強い降水を前線付近に集中させる一方で、前線北側の弱い降水域の広がりが狭く、また、低気圧自体もGSMよりも発達させていて、雲物理過程とKFスキームの特徴が表れている。

(パラメタリゼーションの違いに起因する各モデルの予測特性については次頁参照)

各モデルの積雲対流の取り扱い

各モデルでは、水平解像度に応じた対流の取り扱いをしており、降水特性の違いの一因となっている。

- GSM
 - 大気安定度がそれほど低くない段階から積雲対流が発生するものとして成層を安定化するため、弱い降水を広めに予想する傾向
 - 安定化はゆっくり行われ、長時間に渡り広い降水域が予想されることも
- MSM
 - 地形や収束などの強制力が強いときに強い降水を集中させる傾向
 - 格子スケールの積雲対流では降水量が過大になることも。(LFMも同様)
 - 熱雷のような不安定性降水に伴う短時間強雨事例では、降水予測が過小となりやすい
- LFM
 - 格子スケールでの積雲対流発生に必要な強制上昇とその扱いが十分ではないため、発生が遅れる場合あり
 - 積雲対流を弱める現象(エントレインメントなど)を表現できないため、現実よりも強い対流となりやすく、降水量が過大となる傾向

各数値予報モデルの積雲対流は、水平解像度に応じた対流の取り扱いをしていて、降水特性の違いの一因となっている。以下にその特徴を示す。

GSMは、対流パラメタリゼーションとしてASスキームを採用している。そのため、大気安定度がそれほど低くない段階から積雲対流が発生するものとして成層を安定化するため、弱い降水を広めに予想する傾向がある(原 2013)。そして、安定化はゆっくり行われ、長時間に渡り広い降水域が予想されることがある。

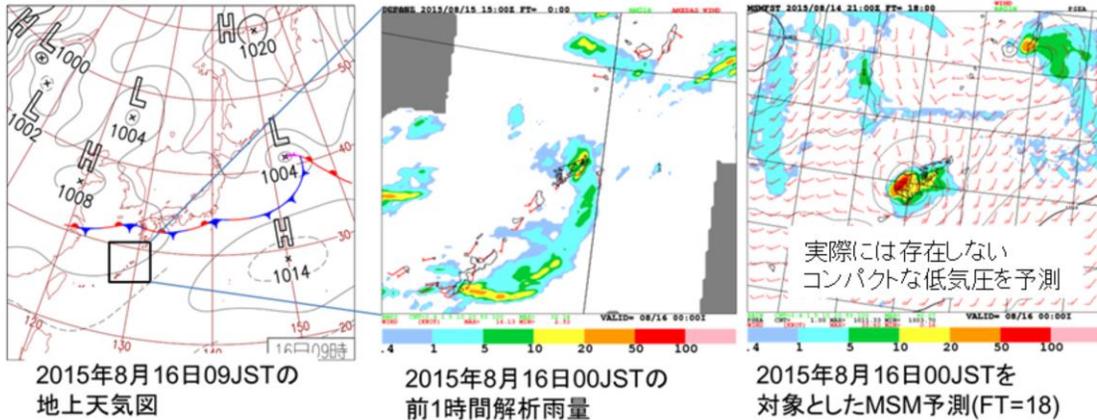
MSMは、雲物理過程に対流パラメタリゼーションとしてKFスキームを採用している。そのため、地形や収束などの強制力が強いときに強い降水を集中させる傾向がみられる(原・倉橋 2017)。また、格子スケールの積雲対流では降水量が過大になることがある。そして、熱雷のような不安定性降水に伴う短時間強雨事例では、降水予測が過小となりやすい。

LFMは雲物理過程を採用しており、対流のイニシエーションにのみ対流パラメタリゼーションを用いている。そのため、格子スケールでの積雲対流発生に必要な強制上昇とその扱いが十分ではなく、発生が遅れる場合がある。そして、積雲対流を弱める現象(エントレインメントなど)を表現できないため、現実よりも強い対流となりやすく、降水量が過大となる傾向がある。

MSMにおける低気圧の過発達

- MSMによる予測では、現在でも低気圧が過発達する可能性がある
- 積雲対流スキームによる不安定の解消が不十分で、格子スケールの上昇流が強く予測されてしまう

(典型例) 2015年8月15～16日を対象とした15日06JST初期値のMSMの予測において、台湾の東から南西諸島へ向けて発達しながら北東進する低気圧を表現していた。

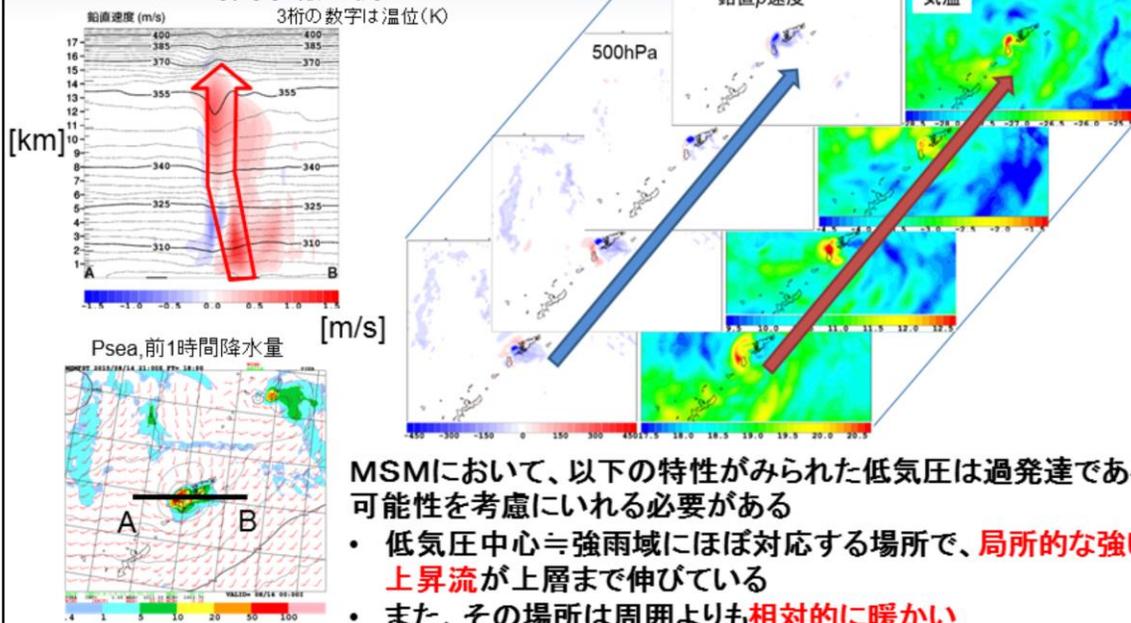


MSMの低気圧の発達の予測については、積雲対流スキームによる不安定の解消が不十分な場合に格子スケールの上昇流が強く予測され、その結果として、低気圧の過発達につながるということが知られている(原 2015)。

典型例として、2015年8月15～16日を対象とした15日6時初期値のMSMの予測を示す。図は、左から2015年8月16日9時の地上天気図、16日0時の前1時間解析雨量、16日0時を対象とした15日6時を初期値とする18時間予報である。奄美大島付近に着目すると、MSMの前1時間予測降水量は解析雨量と比較して過大となっており、また、MSMでは実際には存在しないコンパクトな低気圧が予測されている。

予測された過発達した低気圧の特徴

2015年8月15日6時を初期時刻とする
MSMの18時間予報の例



MSMにおいて、以下の特性がみられた低気圧は過発達である可能性を考慮に入れる必要がある

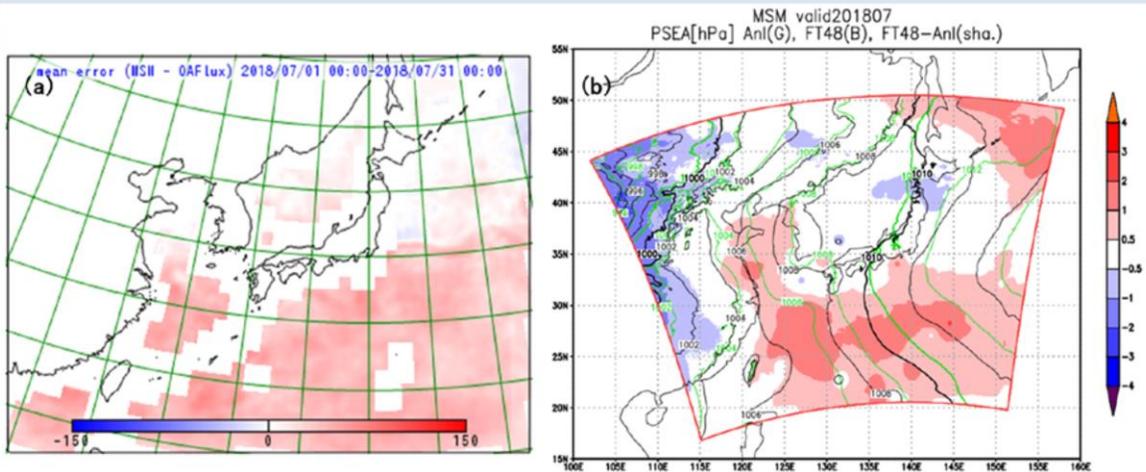
- 低気圧中心≒強雨域にほぼ対応する場所で、**局所的な強い上昇流**が上層まで伸びている
- また、その場所は周囲よりも**相対的に暖かい**

2015年8月15日6時を初期値とするMSMの18時間予報で見られたコンパクトな低気圧について、低気圧中心付近の地上海面気圧および前1時間降水量、鉛直速度、鉛直P速度および気温の鉛直分布を示す。

低気圧中心付近の強雨域に対応する場所で局所的な強い上昇流が上層の成層圏付近まで伸びていることが分かる。また、その場所は周囲よりも相対的に暖かくなっている。

これらの特徴は、予測された過発達した低気圧の特徴であり、天気予報を組み立てる際には注意する必要がある。

MSMが持つ系統誤差について



2018年7月平均における(a) MSMによる潜熱フラックス[W m⁻²]の全予報時間のOAF flux プロダクト (Yu et al. 2008) に対する誤差。(b) 海面更正気圧[hPa] (黒) FT=48のMSM、(緑)メソ解析、(カラー) FT=48のMSMのメソ解析に対する誤差。氏家(2020)から抜粋。

- ・ 潜熱フラックスに基準となる全予報時間のOAF flux プロダクトに対して正バイアス、すなわち下層水蒸気が多いバイアスがある(左図)
- ・ メソ解析に対して、7月の太平洋高気圧の西への張り出しが強いバイアスがある(右図)

MSMの予測には、下層の水蒸気が多いバイアス(左図)や7月の太平洋高気圧の西への張り出しが強い(右図)というバイアスがある。これらの系統誤差は、モデルの諸過程が複雑に絡み合った結果、生じている。これらの点に留意しつつ、MSMのプロダクトを利用していただきたい。図は、氏家(2020)から抜粋したものである。

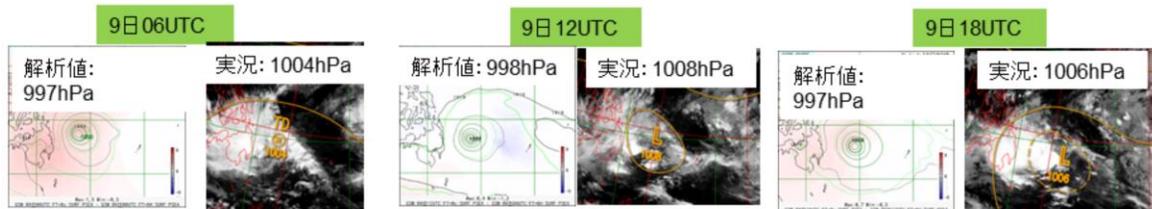
※OAF flux (Objectively Analyzed air-sea Fluxes:客観解析された大気海洋フラックス)

初期値の不完全さに起因する誤差

- 観測値
 - 観測値には様々な誤差が含まれている
 - 入手可能な観測値が時間的・空間的に十分でない
 - ・ 特に、擾乱がある領域に観測値がないと予測の信頼度が低くなる
 - ・ 海上を進む擾乱など、予測に影響を与える観測が少ない場合、新しい時刻の観測により、予報が大きく変化することがある
- 第一推定値
 - 前初期時刻の予報結果が良好でないと、解析における第一推定値の誤差が大きくなる

(例) 2014年4月台風第4号から変わった熱帯低気圧

(コンター: 地上気圧(hPa): 緑は前回のGSM6時間予測)、塗りつぶしは前回予測からの修正量(hPa)と実況(衛星赤外画像および地上天気図)



実況では衰弱しているが、ある程度の示度を保ったまま海上をゆっくり東進した。観測が少ないため、前回予測からの修正量が小さい。なお、この時間帯に台風ポーガスデータは利用されていない。

数値予報モデルの初期値(解析値)は、前の初期値からの予測値をたたき台(第一推定値という)に、観測データを同化することで作成される。

第一推定値は、格子点上に物理要素(気温・気圧・風等)が規則正しく配置されるメリットがある一方で、前初期時刻の予報結果が良好でないと、解析における第一推定値の誤差が大きくなるというデメリットがある。

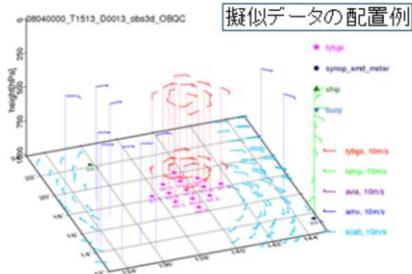
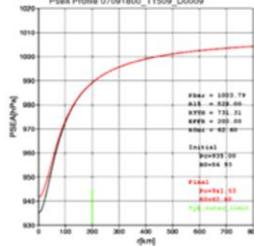
観測値は、現実の大気の状態に近い値が得られるメリットがある一方で、様々な誤差が含まれ、入手可能な観測値が時間的・空間的に十分でないデメリットがある。特に擾乱がある領域に観測値がないと予測の信頼度が低くなる。例として、2014年台風第4号から変わった熱帯低気圧を取り上げる。実況では衰弱しているのにも関わらず、モデルではある程度の示度を保ったまま海上をゆっくり東進し続けることとなった。その間、観測が少ない海上をゆっくり東進し、観測で修正されなかったために前述のような予測となった。

一方で、擾乱が海上を進む際に、予測に影響を与える観測が少ない場合は、新しい時刻の観測により、かえって擾乱の予測が大きく変化する場合があるので、利用の際には慎重に判断する必要がある。

台風ボーガス

- 台風中心付近では、実観測データが十分に得られない場合があり、それを補完するために疑似観測データ(台風ボーガス)を作成・同化利用している
 - 予報官による台風速報解析の中心気圧、強風半径などから単純化されたモデルをあてはめて疑似観測データを作成する
 - 要素は海面気圧、上空の風向風速
 - 台風ボーガスで表現する台風の強度や空間対称性が実際の台風の状態と一致するとは限らない
- 台風ボーガスを同化した初期値での台風構造が、衛星画像などの実況と乖離していないか確認いただきたい
- 特に全球モデルでは、台風構造に歪みを生じるような局所的に大きな修正が解析で入りにくいため、**台風の急発達や位置ずれの修正が一つの初期時刻の解析では十分でない場合がある**

ある台風事例における
ボーガスの海面気圧
プロファイル例



台風ボーガスは、台風予報に適切な初期場を作るために、台風周辺に与えられる疑似観測データである。台風中心付近の実観測データが十分に得られない部分を補完する役割で作成・同化利用し、台風進路および強度予報の精度維持・向上に寄与している。

台風ボーガスは、予報官による台風速報解析の中心気圧、強風半径などから単純化されたモデルをあてはめて疑似観測データを作成する。このことから、台風ボーガスで表現する台風強度や空間対称性が実際の台風の状態と一致するとは限らない。

そのため、台風ボーガスを同化した初期値での台風構造が、衛星画像などの実況と乖離していないか確認する必要がある。特に全球モデルでは台風構造の歪みが生じるような局所的に大きな修正が解析で入りにくいため、台風の急発達や位置ずれの修正が一つの初期時刻の解析では十分でない場合があるので、その点も確認する必要がある。

左図は、ある台風事例におけるボーガスの海面気圧プロファイル例を示している。緑色の線が、台風ボーガスの一番外側の範囲を示し、この例では200kmである。黒線が台風の中心示度を考慮した初期のプロファイル、赤線は黒線に第一推定値や周辺の観測を考慮した後のプロファイルを示している。赤線のプロファイルを元に解析に利用される台風ボーガスデータを作成する。そのデータの例が右図で、疑似データの配置例を示している。桃色が地上の海面気圧、赤色が風向風速(矢羽根)である。

初期時刻による予測の変化について

- 初期時刻によって予測結果が安定しないことがある
 - 初期時刻による予測結果のばらつきが大きいときの状況
 - 最新の解析(データ同化)で、観測情報が反映された
 - 予測の不確実性が高い場であり、初期値の僅かな変化にモデルが反応した
 - 品質に問題のある(またはモデル(第一推定値)と大きく値が異なる)観測データが同化された
 - 逆に初期時刻による予測結果のばらつきが小さいときの状況
 - モデル(第一推定値)の精度がよく、観測との差が小さかった
 - 予測の不確実性が低い場であった
 - 注目する現象の付近で観測データがほとんど同化されなかった(前回の初期値とほとんど同じ予測)

基本的には最新の観測情報を反映した新しい初期値ほど予測精度は高いはず

各数値予報モデルには、初期時刻によって予測結果が安定しないことがある。すなわち、初期時刻による予測結果のばらつきが大きいことに相当する。そのときの状況としては、

1. 最新の解析で観測情報が反映された
 2. 初期値の僅かな変化に対して、モデル予測結果の差が大きい(予測の不確実性が高い)
 3. 品質に問題のある観測またはモデルと大きく値が異なる観測が同化された
- が、考えられる。逆に、予測結果が安定している場合(初期時刻による予測結果のばらつきが小さい)では、
4. モデル(第一推定値)の精度が良く、観測との差が小さかった
 5. 初期値の僅かな変化に対して、モデル予測結果の差が小さい(予測の不確実性が低い)
 6. 注目する現象の観測データがほとんど同化されなかった(前回の初期値とほとんど同じ予測)
- が、考えられる。

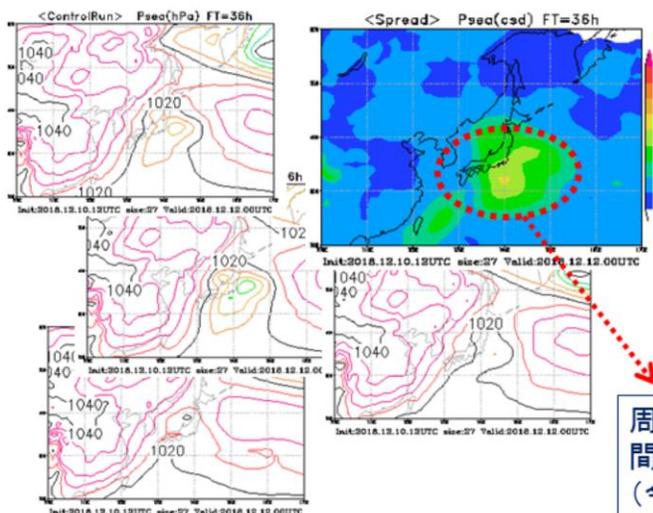
3の品質に問題のある観測が同化された場合については、短期解説資料等を通じて、お知らせすることになるので、留意願いたい。6については、初期値の不完全さに起因する誤差で述べたように実況と異なる場合があるので、十分確認する必要がある。

その他の場合については、基本的には最新の観測情報を反映した新しい初期値ほど予測精度が高いと考えられる。また、2の場合などについて、より確からしい予測を行うには、アンサンブル予報を活用する方法がある。

変化が大きいときの例～アンサンブル予報の視点

予測の不確実性が高い場

⇒ アンサンブル予報のスプレッド(ばらつき程度)も大きくなる



2018年12月12日9時を
対象時刻とする12月10日21時
初期値(FT=36)の
全球アンサンブル予報

海面気圧の

- ・アンサンブルスプレッド(右上)
- ・各メンバーの予測

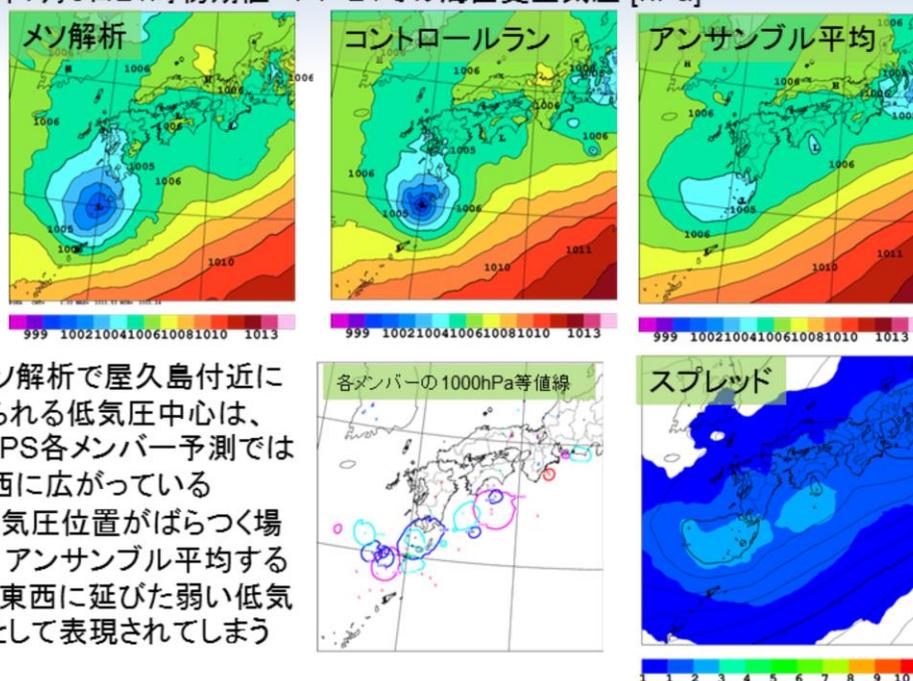
周辺と比べて、アンサンブルメンバー
間の予測のばらつきが大きい
(今後も予測が変わる可能性が高い)

初期値の僅かな変化に対して、モデル予測結果の差が大きい時については、カオスの性質に由来するものであるため、前回・前々回予報との比較、初期値に摂動を与えるなどしたアンサンブル予報の利用が一般的である。

アンサンブル予報の利用により、誤差幅や不確実性を見積もることで予測情報の確からしさを得ることができる。例えば、予測の不確実性が高い場については、アンサンブル予報のスプレッド(ばらつき程度)が大きくなるという特徴がある。

アンサンブル平均で低気圧の中心がぼやけてしまう例

2019年7月3日21時初期値 FT=24での海面更正気圧 [hPa]



- ・メソ解析で屋久島付近に見られる低気圧中心は、MEPS各メンバー予測では東西に広がっている
- ・低気圧位置がばらつく場合、アンサンブル平均すると、東西に延びた弱い低気圧として表現されてしまう

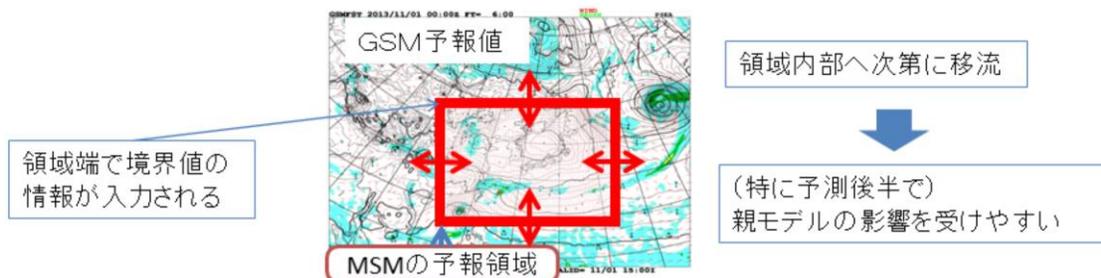
アンサンブル予報を利用する際には、以下の点に注意する必要がある。アンサンブル平均では予測のばらつきが大きい部分は打ち消し合うことにより変動の振幅が小さく、前線の動きや低気圧の示度等がぼけてしまうことがある。

図は、2019年7月3日21時初期値のメソアンサンブル予報システム(MEPS)の24時間予報の西日本の海面更正気圧を上段左からメソ解析、コントロールラン、アンサンブル平均、下段は左から各アンサンブルメンバーの1000hPa等値線、アンサンブルスプレッド(ばらつきの度合い)を示している。メソ解析で屋久島付近に低気圧の中心が見られるが、MEPSの各メンバー予測では1000hPa等値線で見られるように低気圧の中心は東西に広がっている。この状態でアンサンブル平均すると図に示したように東西に延びた弱い低気圧として表現されてしまう。

また、局所的な強雨などの局所的な現象かつ位置ずれの影響が大きい例についても、平滑化の影響を受ける。このような場合、アンサンブル平均を実際に現れる場の予測と考えて利用することは適切でないことに注意する必要がある。

領域モデルへの境界値を通じた親モデルの影響

- MSM、LFMといった領域モデルでは、予報領域の外縁部で、より領域の広いモデル(親モデル)と接続して、領域外の情報を取り入れる必要がある
 - 境界面(側面・上部境界)で運動量、熱・水蒸気の流入を計算するとともに、境界付近で予測値を親モデルに近づける強制力を与えている
- 境界面での流入・流出を通じて領域端で境界値の情報が入力され、その情報は時間の経過とともに領域内部へと移流していく
 - 特にGSMの予測に初期値変わり等の不確実性がある場合、MSMの予報後半の総観場の予測にも不確実性が生じる場合がある
- 親モデルの特性が変われば、その予測値を境界値として用いているモデルの予測特性にも影響を及ぼしうる
 - 2016年の更新によるGSMの乾燥バイアスの軽減にともなって、MSMの解析値・予報値の乾燥バイアスが軽減し、降水頻度が増加した



MSM、LFMといった領域モデルでは、予報領域の外縁部で、より領域の広いモデル(親モデル)と接続して、領域外の情報を取り入れる必要がある。

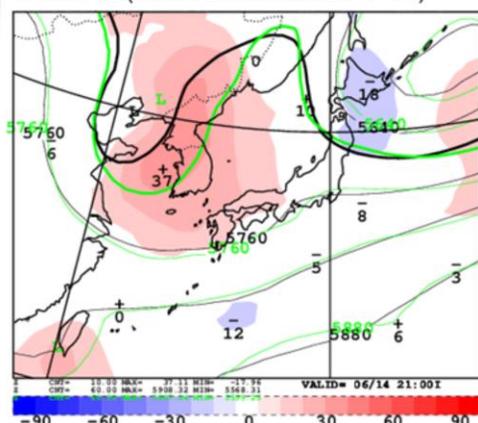
その取り入れ方は、境界面(側面および上部)において、運動量、熱、水蒸気の流入・流出を計算し、親モデルと接続する領域(緩和領域又は側面境界)で親モデルの値に近づける強制力を与える方法をとっている(原 2016)。

そのため、予報時間が長くなるにつれて、側面境界の内部に運動量、熱、水蒸気が移流することによりMSMやLFMの予測値に影響を与えるとともに、解析予報サイクルを通じて解析値にも影響を与える。この効果は、以下のように現われる場合がある。

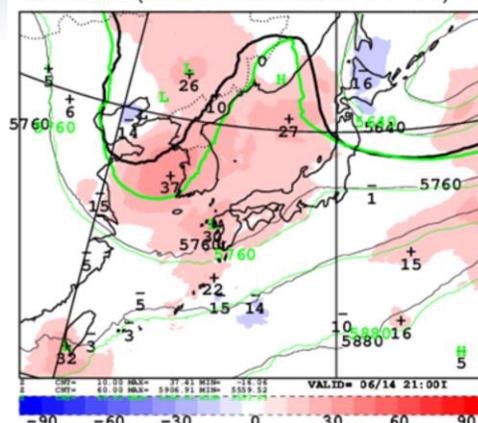
1. GSMの予測に初期値変わり等の不確実性がある場合、MSMの予報後半の総観場の予測にも不確実性が生じる場合がある
2. 親モデルの特性が変われば、その予測値を境界値として用いるモデルの予測特性にも影響を及ぼしうる。2016年のGSM更新による乾燥バイアスの軽減に伴って、MSMの解析値・予報値の乾燥バイアスが軽減し、降水頻度が増加した例があげられる

親モデルとの誤差の類似の例

GSM予想(6月13日9時初期値 FT=36)



MSM予想(6月13日12時初期値 FT=33)



500hPaジオポテンシャル高度 2018年6月14日21時の予想

黒線: 予測値、緑線: 解析値 塗りつぶしは予測値と解析値の差

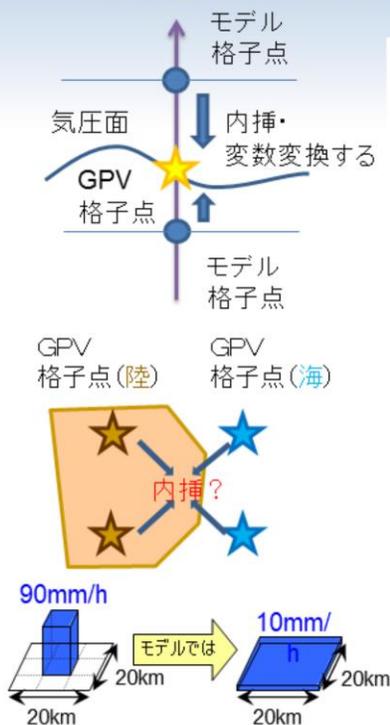
MSMの予報後半の中国東北区の上空のトラフの進行が遅く、浅いなどの総観規模の誤差は、境界値であるGSMの誤差に似ている。

一般に、より先の予測時間ほど、より上層ほどその影響は強くなる傾向。

親モデルとの誤差の類似例として、2018年6月13日9時初期値のGSM36時間予測(左図)と、それを境界条件として用いている13日12時初期値のMSMの33時間予測(右図)のそれぞれ500hPaジオポテンシャル高度の対初期値誤差を示している。誤差の分布がGSMとMSMで類似していることが分かる。また、MSMの予報後半の中国東北区の上空のトラフの進行が遅く、浅いなどの総観規模の誤差は、境界値を与えるGSMの誤差に似ている。

一般に、より先の予測時間ほど、より上層ほど領域モデルは、親モデルの影響を強く受ける傾向がある。

格子点プロダクト(GPV)の利用にあたっての注意点



- 数値予報プロダクトは格子点形式(GPV)でも提供している
- 格子点値(GPV)は、モデルそのものの値ではない
 - 数値予報モデルの格子系から等緯度経度格子に水平内挿されたり、気圧面に鉛直内挿されることにより平滑化される
 - 地表面の風や気温は、モデル大気下層の値から仮定を置いて算出したもの
 - 標高が高く、気圧面が地面より低くなる場合も、便宜上仮定をおいてデータを出力している
- GPVから任意の位置の値を求めたい場合、周囲の海陸分布やその他の性質に注意して、適当な手法を利用する
 - 対象地点に最も近い格子点の値を用いる
 - 対象地点の周囲の格子点の値を内挿する
 - 特性の異なる格子点を除いた周囲の格子点の値を内挿する
- モデルの値自体がその格子のカバーする領域の平均値。実際の場合の値との間には変動幅がある

プロダクトとしての数値予報出力の格子点値(GPV)は、利便性を考えて数値予報モデルの格子から等緯度経度格子に変換した特定の気圧面データが広く提供されている。この格子系の変換は内挿処理によるが、内挿処理は平滑化の効果に伴うために、数値予報モデルと同程度の分解能を有するGPVであっても空間変動の表現が変わりうることに注意する必要がある。また、GPVはその格子をカバーする領域の平均値であるが、格子内のある場所の実際の値には分解能や要素の性質に応じた変動幅があることにも注意する必要がある。

その他、地上における気温や風などの物理量は、数値予報モデルで直接計算された値ではなく、モデル大気下層の値から気温減率を仮定したり、接地境界層における安定度を考慮して、モデル地形の地表に対して算出されている。また、モデル地形の標高が高い場合、その等圧面が地表面よりも低くなることもある。その場合でも物理量の値は算出され、その等圧面での値は大気下層の物理量から便宜上算出したものである。下層データを利用する際は、利用しようとしている気圧面の気圧をモデル地形の地上気圧と比較して、地上気圧以下であれば使わないといった利用方法が考えられる。

GPVの利用の際に格子点と一致しない任意の位置の値を求めたい場合、周囲の海陸分布やその他の性質に注意して、以下のような適当な手法を利用する必要がある。

1. 対象地点に最も近い格子点の値を用いる
2. 対象地点の周囲の格子点の値を内挿する
3. 特性の異なる格子点を除いた周囲の格子点の値を内挿する

参考文献

- 石田純一, 山田和孝, 2018: 数値予報プロダクトの利用. 平成30年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 118-123.
- 氏家将志, 2020: 豪雨防災に貢献するための高解像度領域モデルの課題. 数値予報課報告・別冊第66号, 気象庁予報部, 8-13.
- 原旅人, 2013: MSMとGSMの降水予想の表現の違いとその要因. 平成25年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 102.
- 原旅人, 2015: モデル予測の低気圧の発達をめぐって. 平成27年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 87-98.
- 原旅人, 2016: メソ数値予報システムの特性的変化. 平成28年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 30-35.
- 原旅人, 倉橋永, 2017: 降水予測に着目した新旧MSMの事例比較. 平成29年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 52-55.
- 藤田司, 2012: 数値予報プロダクトの利用. 平成24年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 54-60.

参考文献

- Yu, L., X. Jin, and R. A. Weller, 2008: Multidecade Global Flux Datasets from the Objectively Analyzed Air-sea Fluxes (OAFlux) Project: Latent and Sensible Heat Fluxes, Ocean Evaporation, and Related Surface Meteorological Variables. Technical Report OA-2008-01, Woods Hole Oceanographic Institution, Woods Hole, MA.



第1章 基礎編

1.8.2 ガイダンスの留意点

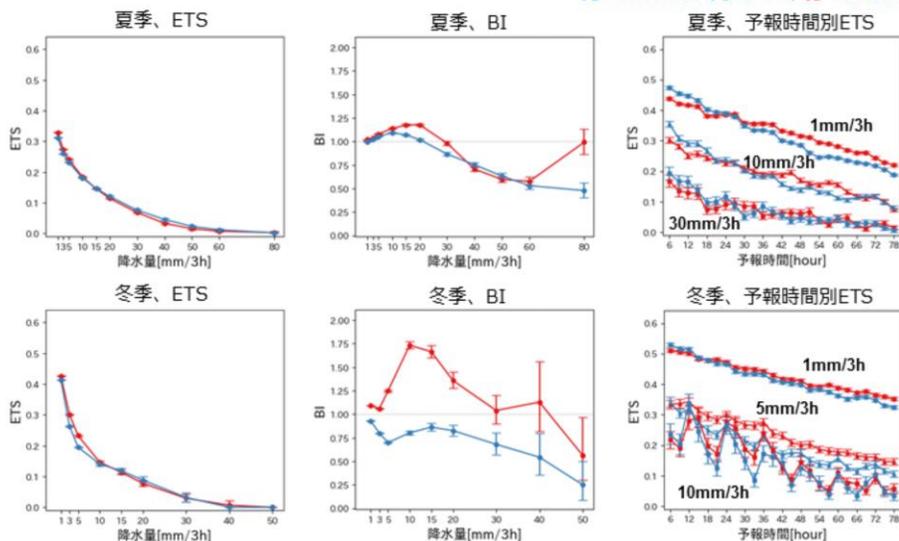
全般的なガイダンスの留意点は、1.6節で述べているので参照願いたい。

本項では、各ガイダンスの留意点を述べるが、詳細は適宜、数値予報課報告・別冊第64号第4章や、石川(2018)、高田(2018)を参照願いたい。

降水ガイダンス利用上の留意点

MRR3は夏について雨量の多いところや、予報時間初めでMSMガイダンスの方がGSMガイダンスよりも精度が良い。ただし、夏の1mm/3h、冬の1, 5mm/3hでは予報時間後半でGSMガイダンスの方が精度が良いことに注意。

青: MSMガイダンス、赤: GSMガイダンス



3時間平均降水量ガイダンス(MRR3)は、統計検証結果から夏季について降水量の多い閾値(大雨)ほど、予報時間初めでMSMガイダンスの方がGSMガイダンスよりも精度が良い。ただし、夏の1mm/3hや、冬の1, 5mm/3hでは予報時間後半でGSMガイダンスの方が精度が良いことに注意が必要である。

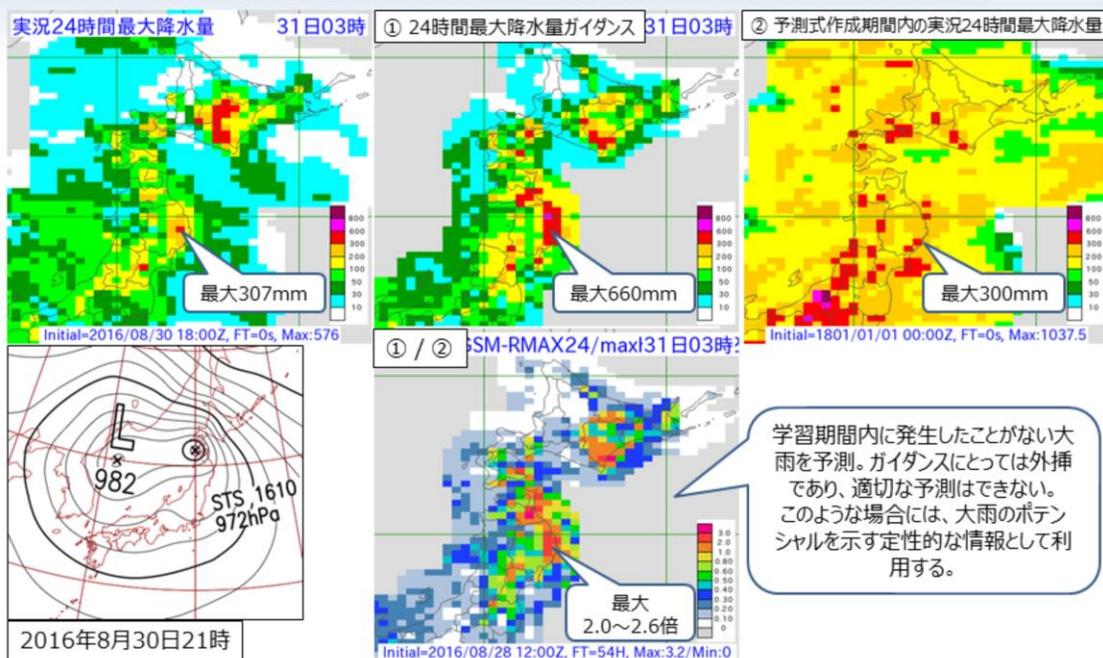
1時間最大降水量ガイダンス(RMAX31)や3時間最大降水量ガイダンス(RMAX33)についても同様に、夏季はGSMガイダンスよりもMSMガイダンスの方が精度が高い。ただし、夏季の短時間強雨で一律にMSMガイダンスの方が良いわけではなく、気象場によってその傾向が異なる点に留意する必要がある。

また、GSMやMSMは不安定性降水の予測が苦手なため、ガイダンスの予測も精度が低くなることに注意する必要がある。

図は、例として、上段は夏季(2021年6月~8月)、下段は冬季(2021年12月~2021年2月)のMRR3のGSMとMSMの比較検証結果を示したものである。左からエクイタブルスコア(ETS)、バイアススコア(BI)、予報時間別ETSである。

降水ガイダンス利用上の留意点

RMAX24は、極値を大幅に超える場合には定性的な利用としていただきたい。



24時間最大降水量ガイダンス(RMAX24)は、台風をはじめとした顕著な大雨が予測される場合に、やや現実離れした降水量を予測することを確認している。このような場合には、ガイダンスの予測をそのまま利用せず、大雨のポテンシャルを示す定性的な情報として取り扱う必要がある。

図は、2016年8月に岩手県に上陸した台風第10号の事例を示す。上図左から2016年8月31日3時を対象とした実況24時間最大降水量、①8月28日21時初期値の8月31日3時を対象としたGSM24時間最大降水量ガイダンス(RMAX24)、②予測式作成期間内の実況24時間最大降水量示している。下図は左から2016年8月30日21時の地上天気図、①/②の比を示している。学習期間内に発生したことの無い大雨を予測(岩手県で①/②の比図で最大2~2.6倍の降水量を予測)したが、実際は半分以下の降水量だった。

2020年9月に九州の西海上を北上した台風第10号の事例でも同様な事象が発生した。そのため、改めて確認した結果、台風に関する利用上の注意点について、以下のとおりまとめる。各モデル、それぞれの降水ガイダンスすべてに共通する。

●GSMガイダンス

常時、モデル予測雨量を上方修正する統計関係になっているため、台風事例で説明変数の値が大きくなれば、上方修正が強まり、MSMガイダンスよりも予測頻度の過大傾向が強まることを認識していただきたい。ただし、モデル(GSM)の降水量予測は、過少傾向であるため、そのままでは利用できない。

●MSMガイダンス

大雨が想定される台風事例では、MSMガイダンスは過大に補正する傾向があるため、MSMやメソアンサンブル予報システムの降水量予測の利用を検討していただきたい。

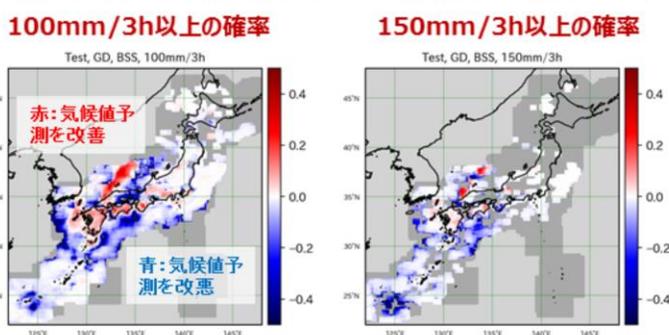
大雨発生確率ガイダンス利用上の留意点

- 100mm/3h以上の確率は東日本、西日本、九州地方を中心に気候値予測を改善しており、これらの地域では予測スキルがあり定量的な利用が想定できる。
- 100mm/3h以上の確率は予測スキルがある一方で、150mm/3h以上の予測は難しいため、定性的な利用を推奨。

MSM大雨発生確率のブライアスキルスコア (BSS)

検証期間: 2019, 2020, 2021年の6~8月、予報時間はFT=3~39

薄灰色: 予測対象領域外、濃灰色: 予測対象領域内だが解析雨量の範囲外または、気候値=0%の格子



大雨発生確率ガイダンスは、100mm/3h以上の確率で東日本、西日本、九州地方を中心に気候値予測を改善しており、これらの地域では予測スキルがあり定量的な利用が想定できる。ただし、予測式は、陸上のデータを中心に作成しているため、海上の予測に関しては気候値予測より改善は難しくなっている。

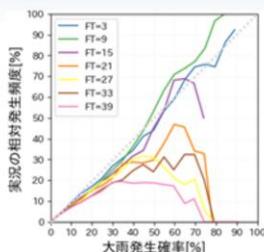
閾値が100mm/3h以上の確率は予測スキルがあるが、150mm/3h以上の大雨は予測が難しくなっているため、150mm/3h以上の確率を利用する際は定性的な利用を推奨する。

図は、例として、MSM大雨発生確率のブライアスキルスコア(BSS)を閾値毎に示したものである。検証期間は、2019年、2020年、2021年の6月から8月までの計9か月で(交差検証)、赤は気候値予測を改善している領域で、青は気候値予測を改悪している領域である。海上では大雨の予測が難しくなっているものの、陸上中心に気候値予測の改善が見られることがわかる。

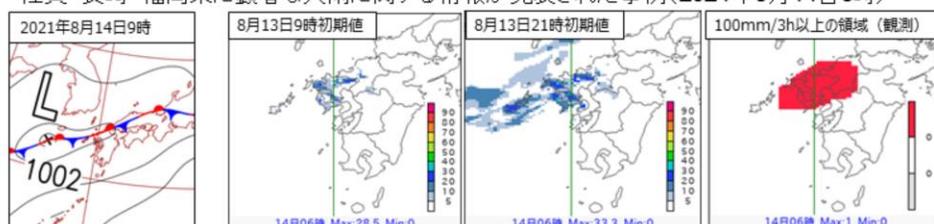
大雨発生確率ガイダンス利用上の留意点

- 予報時間が先になるほど精度が低下する。半日程度先までは予測精度が保てているものの、それ以降では大雨発生確率が高いほど実況と比べて予測頻度が過大である。
- MEPS大雨発生確率ガイダンスは大雨の可能性を捕捉する際や、高確率予測位置のバラつきの変化から大雨の可能性のある地域を絞り込むときに有効である。

閾値は 100 mm/3h



MEPS大雨発生確率ガイダンス(100mm/3h確率50%以上のメンバー割合)の予測例
佐賀・長崎・福岡県に顕著な大雨に関する情報が発表された事例(2021年8月14日6時)



大雨発生確率ガイダンスの精度は予報時間が進むほど精度が低下する。半日程度先までは予測精度が保てているものの、それ以降では大雨発生確率が高いほど実況と比べて予測頻度が過大であることに、利用の際は注意していただきたい。図は、例としてMSM 大雨発生確率ガイダンスと実況の相対発生頻度を比べた信頼度曲線を示したものである。検証期間は、2019年、2020年、2021年の6月から8月までの計9か月で(交差検証)、予報時間は3時間から39時間までである。閾値は100 mm/3hで全国を対象とした検証である。

MEPSガイダンスは大雨の可能性を補足する際や、全メンバーの高確率予測位置のバラつきの変化を参考に大雨の可能性のある地域を絞り込む際に有効である。下の図は、例として、2021年8月に佐賀・長崎・福岡県に顕著な大雨に関する情報が発表されたときの事例についての予測例である。左から2021年8月14日9時の地上天気図、8月14日6時を対象とした8月13日9時初期値のMEPS大雨発生確率ガイダンスで100mm/3h以上の確率が50%以上となっているメンバーの割合、8月14日6時を対象とした8月13日21時初期値のMEPS大雨発生確率ガイダンスで100mm/3h以上の確率が50%以上となっているメンバーの割合、100mm/3h以上の降水量が観測された領域を示している。新しい予測になるにつれて、100mm/3h以上の降水が観測された領域付近で100mm/3h確率50%以上を予測するメンバーが増えてきていることがわかる。

気温ガイダンスの利用上の留意点

- GSMが放射冷却による気温低下を予測した場合、内陸部を中心にガイダンスの予測も低くなる
 - MSM気温ガイダンスでは気温を低下させすぎることには少ないので、MSMガイダンスもあわせて利用する
- モデルで予測が難しい現象はガイダンス予測にも留意
 - 予測が難しい現象:放射冷却や冷気層、海風やフェーン
 - 下層の薄い冷気層の表現はモデルで正確な予測は難しい。
 - 海風が入るタイミング、フェーンなどの希な現象の予測もGSM/MSMとも不十分
 - モデルが外れやすいパターンを判別しワークシート等を利用して対応するなどの検討が必要

気温ガイダンスについては、基本的にMSMガイダンスの利用を推奨するが、モデルの予測する気象場の妥当性を判断して、適切なガイダンスを選択していただきたい。

GSMが放射冷却による気温低下を予測した場合には、内陸部を中心にガイダンスの予測も低くなる。その場合は、放射冷却の予測が妥当かどうか判断して利用していただきたい。なお、MSM気温ガイダンスでは気温を低下させすぎることには少ないので、MSMガイダンスも合わせて利用することが考えられる。

また、GSMやMSMなどのモデルの予測が難しい現象はガイダンスの予測も大きく外すことがあることに留意する必要がある。例えば、放射冷却や冷気層、海風やフェーンなどが上げられる。

このように、モデルやガイダンスでも予測が難しい場合は、そのパターンを判別して、ワークシート等を利用して対応する必要がある。

視程ガイダンス(格子形式)の留意点

- 作成手法
 - 雲水量、相対湿度、降水量などを利用して診断的に視程を予測
- 統計検証
 - 悪視程になるほど予測頻度が過小となり、予測精度が低下する傾向
 - 海上では陸域に比べると悪視程の予測精度の低下は小さい
- 利用上の留意点
 - 数値予報モデルの結果が直接的に予測に反映されるため、シャープな予測が可能だが、モデルの雲水量などの予測が過小な場合は悪視程を全く予測しないこともある
 - 数値予報モデルの変更に伴い予測特性が変化する場合がある。ある程度影響は小さくなるように調整は行うが、それでも精度が低下することも
 - 2019年度末にMSMの改良により、全般にETS改善。無降水時のバイアスコア(BI)がやや過大に変わる点に留意が必要

視程ガイダンス(格子形式)は、悪視程になるほど予測頻度が過小となり、予測精度が低下する傾向がある。また、海上では陸域に比べて悪視程の予測精度の低下は小さい。なお、悪視程になるほど予測頻度が過小な場合、悪視程を全く予測しない場合は、メソアンサンブル視程ガイダンス(格子形式)を参照することで、捕捉できる場合がある。

数値予報モデルの結果が直接的に予測に反映されるため、シャープな予測が可能だが、モデルの雲水量などの予測が過小な場合は悪視程を全く予測しないこともある。数値予報モデルの結果が直接的に効くことから、数値予報モデルの変更に伴い、予測特性が変化する場合があることに注意する必要がある。なお、2019年度末のMSMの改良があり、全般に予測精度が改善した。無降水時のBIがやや過大傾向となった。この点に留意する必要がある。

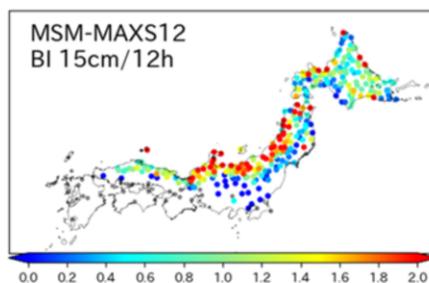
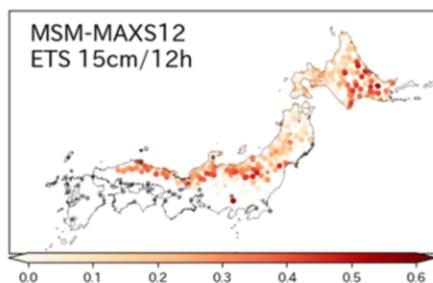
海上予警報に利用する場合は精度が高いMSM視程ガイダンス(格子形式)を主に利用し、MSM視程ガイダンス(格子形式)の予報領域外についてはGSM視程ガイダンス(格子形式)を利用するのが良い。ただし、2021年6月22日のGSM視程ガイダンス(格子形式)の改良により、GSMがMSMより適切な予測頻度となり、GSMとMSMの精度の差は小さくなったので、MSM予報領域内でもGSMの予測を参考にできる。

※平成30年度数値予報研修テキスト以前や数値予報課報告・別冊第64号では、「視程ガイダンス(格子形式)」については、「視程分布予想」と表現していることに留意する必要がある。

降雪ガイダンスの利用上の留意事項

- 統計検証でGSMガイダンスとMSMガイダンスの間で予測精度には大きな差がない。
- 東北地方と北陸地方の日本海側で予測頻度が過大となっている。
- モデルの降水や気温の予測精度が降雪量予測に影響するため、実況を踏まえてより適切な降水・気温の予測を行っているモデルを選択した上で、降雪ガイダンスを利用していただきたい。

MSM12時間降雪量ガイダンス(MAXS12)の予測精度



検証期間：2016[17,18]年12月～翌2月(3か年)
検証地点の予測：周囲4格子の線形内挿により算出

降雪量ガイダンスは、統計検証でGSMガイダンスとMSMガイダンスの間で予測精度には大きな差がない。一方で、東北地方と北陸地方の日本海側で予測頻度が過大である。これは、ガイダンスが新積雪の沈降を考慮していないことが原因である。防災上の観点では降った雪の総量が重要であることから、今後も考慮する予定はない。

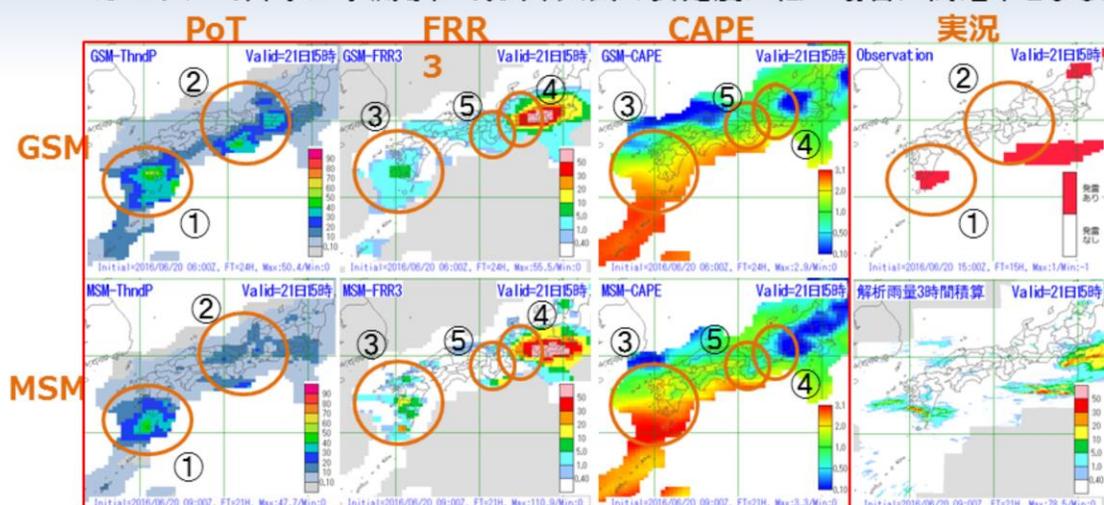
事例検証などの結果からモデルの降水や気温の予測精度が降雪量予測に影響するため、実況を踏まえてより適切な降水・気温の予測を行っているモデルを選択した上で、降雪ガイダンスを利用していただきたい。

図は例として2016年～2018年の12月～翌年2月までを検証期間とするMSMガイダンスの地点別特性(15cm/12時間に対するエクイタブルスレツスコア(ETS)とバイアススコア(BI))を示している。

発雷確率ガイダンス(PoT)の一般的な予測特性と留意事項

～2016年6月21日06UTCを対象とした事例から～

- PoTはモデルで降水が予測されており、大気不安定度が低い場合に高確率となる。



- ①九州南部の発雷は両ガイダンスとも予測できている
- ②東海地方や紀伊半島ではGSM-PoTが高めの予測
- ③九州南部では、両モデルとも降水を予測しており、かつ、大気不安定度も低いため、両ガイダンスとも高めのPoTを予測
- ④東海地方では、両モデルとも降水を予測。大気不安定度はGSMの方が低いため、GSM-PoTが高めの予測
- ⑤紀伊半島では、MSMはGSMに比べて大気不安定度が高く、降水も予測されていないためPoTも低い

発雷確率ガイダンス(PoT)が高確率を予測している場合やGSM-PoTとMSM-PoTの予測値の差が大きい場合など、その予測の妥当性を判断する必要がある場合には、モデルの降水および大気不安定度の妥当性を考慮することが有効である。

また、メソアンサンブル予報システム(MEPS)から作成したガイダンス(MEPSガイダンス)のアンサンブル最大を参考にすることで、より確度の高い判断をすることができるので、こちらも利用いただきたい。

例えば、GSMガイダンスで20%以上、MSMガイダンスで20%未満の予測事例の時にMEPSアンサンブル最大で25%以上が予測されていれば、GSMガイダンスの予測を採用した方が予測精度が高い(アンサンブル最大の閾値を50%以上とするとMSMガイダンスに比べて改善率が最も高い)。

発雷確率ガイダンスの留意点

- 作成手法
 - モデル降水量、CAPEやSSIといった安定度などを説明変数としてロジスティック回帰
- 統計検証
 - 概ね1年を通して、MSM-PoTの方がGSM-PoTに比べて予測精度が良い。ただし高確率の予測頻度が過小であることに留意
- 利用上の留意点
 - PoTは、説明変数のモデル降水量、CAPE、SSIの値に大きく左右される
 - GSMとMSMの予測値が大きく異なり、両ガイダンスの妥当性を判断する必要があるときは、降水予測の有無、大気安定度を確認することが有効
 - 希少な事例や春先の寒気南下時には予測が難しいことに留意
 - 予報時間が先の予測では、高確率を予測しにくくすることで信頼度を維持している
 - モデルの予測傾向が変わらない場合でも、予報時間が短くなるにつれ高確率に変わっていく場合があることに留意が必要

GSM-PoT 及びMSM-PoT の予測精度については、概ね1年を通して、MSM-PoTの方がGSM-PoTに比べて高い。季節別では、春季～秋季はMSMのPoTの方が高く、冬季はGSMのPoTの方が高い。ただし、MSM-PoTは予測頻度が過小の傾向があるため、低めの確率値となることに注意して利用する必要がある。特に、春から秋の北海道～東北北部ではこの傾向が強いことから注意する必要がある。

PoTの予測値が説明変数のFRR3、CAPE、SSIの値に大きく左右される。GSM-PoTとMSM-PoTの予測値が大きく異なり両ガイダンスの妥当性を判断する必要があるようなときには、各モデルの降水予測の有無及び大気安定度の予測を確認することが有効である。

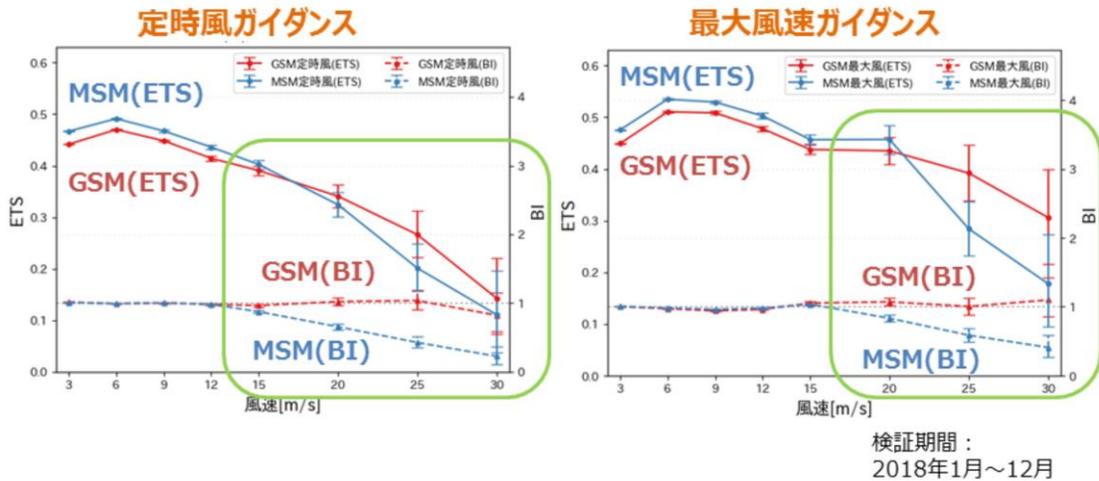
PoTは予測手法に統計手法を用いているため、希少事例、季節外れの事例(春先の寒気南下時)については予測が難しいことに留意願いたい。

PoTは予報時間が先の予測では、高確率を予測しにくくすることで信頼度を維持している。モデルの予測傾向が変わらない場合でも、予報時間が短くなるにつれ高確率に変わっていく場合があるので留意が必要である。

風ガイダンス

頻度バイアス補正の閾値の上限値である13m/s（定時風ガイダンス）、15m/s（最大風速ガイダンス）までは適切な予測頻度を保っているが、上限値を超えると適切に予測できない場合がある(MSMガイダンス)。

上限値を大きくすると、事例が少なくなり学習が不十分となる可能性があるため、調整は難しい。



風ガイダンスは、MSMガイダンスの方がGSMガイダンスに比べて、精度が良い。ただし、頻度バイアス補正の閾値の影響を受けやすいという特徴がある。頻度バイアス補正を用いている定時風ガイダンスは閾値の上限値である13m/s、最大風速ガイダンスは15m/sまでは適切な予測頻度を保っているが、その上限値を超えるような強風は、適切に補正できない場合があり、過大又は過小となる可能性がある。MSMの定時風ガイダンスの場合はこの影響により結果的に過小となっている。そのような場合は、GSMガイダンスも参考にした方が良い。

また、GSMやMSMのモデルの地上風向で層別化しているため、台風や前線の位置ずれなどにより、モデルの一般風の風向が外れた場合や、一般風に対して通常と異なる風が吹く場合には適切な予測にならないことに注意する必要がある。

図は検証期間を2018年1月~12月とする定時風ガイダンス(左図)と最大風速ガイダンス(右図)の風速の閾値別のGSMとMSMのエクイタブルスレットスコア(ETS)とバイアススコア(BI)を示している。

天気ガイダンスの留意点

- 雪の場合は、天気ガイダンスでは天気予報の降水の付加基準（雨は1mm/3時間、雪は0.5mm/3時間）を閾値にしているため、弱い雪を含む雪域を狭く予測する場合がある。弱い雪を予測する際には、3時間降雪量ガイダンスを参考にさせていただきたい。

雪の場合は、天気ガイダンスでは天気予報の降水の付加基準（雨は1mm/3時間、雪は0.5mm/3時間）を閾値にしているため、弱い雪を含む雪域を狭く予測する場合がある。弱い雪を予測する際には、3時間降雪量ガイダンスを参考にさせていただきたい。

最小湿度ガイダンスの留意点

- 最小湿度ガイダンスは、MSMガイダンスの方がGSMガイダンスよりも精度が高いため、MSMガイダンスの利用を推奨する

最小湿度ガイダンスについては、統計的に MSM ガイダンスの方が GSM ガイダンスよりも精度が高いため、MSM ガイダンスの利用を推奨する。

ただし、GSMとMSM 予測の妥当性を判断しながら両者をあわせて利用する必要がある。また、GSM・MSM ガイダンス共に内陸で精度が低い傾向があること、夏の東日本以南と冬の関東で最小湿度を高く予測し、乾燥が弱めとなる傾向があるので留意願いたい。

メソアンサンブル予報システムに基づくガイダンス (MEPSガイダンス)

- 摂動ラン(わずかなばらつきを与えた20メンバー)について
 - すべてのガイダンスに共通で、摂動ランは、摂動を与えない1メンバー(CNTL:MSMと同等)に比べて予測精度が低いので、単独での利用は推奨しない
- アンサンブル平均
 - 気温や風ガイダンスはCNTLに比べて、予測精度が改善するため、利用を推奨する
 - 降水および降雪ガイダンスは平均処理によって摂動ランの表現する降水の分布やピークが平滑化されるため、強雨の分布やピークを捉えるのには適さないため、利用は推奨しない

詳しくは、令和元年度数値予報研修テキスト第2章を参照いただきたい。

メソアンサンブル予報システムに基づくガイダンス (MEPSガイダンス)

- アンサンブル最大
 - 降水や降雪、発雷確率ガイダンスでは、コントロールランと比較して捕捉率が高く、顕著現象のポテンシャルを把握する上で有効な資料の一つとなる
- 超過確率
 - 降水および降雪の超過確率は、摂動ランでの予測で、ばらつきが大きい事例では、対象とする閾値での超過確率はかなり低い値となってしまうため、広がりアンサンブル最大を参考に、超過確率の最大値よりも低い閾値の確率分布を利用することを推奨する

詳しくは、令和元年度数値予報研修テキスト第2章を参照いただきたい。

参考文献

- 石川宜広, 2018: ガイダンス利用上の留意点. 平成30年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 124-125.
- 高田伸一, 2018: ガイダンスの数値予報の誤差の補正. 数値予報課報告・別冊第64号, 気象庁予報部, 4-7.



第2章 応用編

2.1 全球アンサンブル予報 システムの改良

変更の概要

- 全球アンサンブル予報システム(GEPS)の水平解像度を増強
 - 18日予報まで 約40 km→約27 km
 - それ以降、34日予報まで 約55 km→約40 km
- 物理過程を改良
 - 地形性抵抗過程
 - 雲放射過程
 - 湖の扱いの改良
 - オゾン気候値の更新
- 特異ベクトルによる初期摂動の振幅調整
- 海面水温の改良
 - 海面水温解析による偏差固定を11日予報までから6日予報までに短縮
 - それ以降には、熱帯・亜熱帯域に、令和4年2月に運用を開始した新しい季節アンサンブル予報システム(CPS3)による予測結果を利用

本節では、2022年3月の全球アンサンブル予報システム(GEPS: Global Ensemble Prediction System)の改良について述べる。

GEPSの水平解像度を、18日先までの予報については約40kmから約27kmに、それ以降34日先までの予報については約55kmから約40kmにそれぞれ高解像度化するとともに、予測モデルの物理過程を改良した(地形性抵抗過程、雲放射過程、湖の扱い、オゾン気候値の更新)。また、スプレッドとスキルの関係を適切に保つため、特異ベクトル(SV)による初期摂動の振幅調整を行った。さらに、GEPSの下部境界条件としての海面水温(SST)をより高精度のものとするを目的とし、2段階SST法(高倉・小森2020)で外力として使用する季節アンサンブル予報システム(CPS)のSST予報値について、CPS2の予報結果から、令和4年2月から運用開始したCPS3(2.5_季節アンサンブル予報システムの改良 参照)の予報結果に変更した。この変更により予報されたSSTの精度が向上することから、偏差固定SSTからSST予報値への緩和期間を11-18日から6-11日へと変更した。

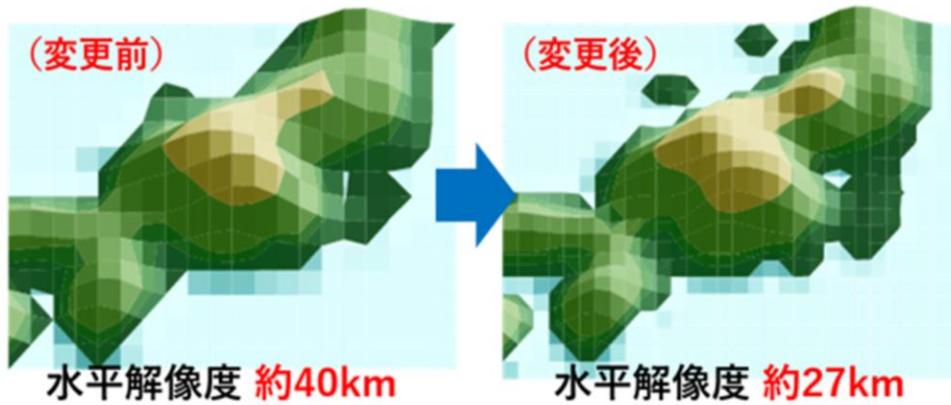
改良のインパクト

- これまでより細かい地形等の地域特性を精緻に表現
- 総観規模の気象場(500hPa高度等)の予測精度向上、確率予測精度向上
- 降水の確率予測精度向上
- アンサンブル平均の台風進路予測については中立、接近確率予測はやや改善
- 台風中心気圧の予測誤差は小さくなる傾向
- 2週目以降において、気温予測や熱帯の循環場等に改善がみられた。

改良のインパクトについて述べる。水平解像度を高解像度化したことにより、これまでより細かい地形等の地域特性を精緻に表現できるようになった。総観規模の予測(500hPa高度等)の予測精度が向上し、アンサンブル予測の確率予測精度も向上した。降水予測の確率予測精度も向上した。アンサンブル平均の台風進路予測については中立、接近確率予測はやや改善であった。水平解像度の高解像度化により、台風中心気圧の予測誤差は小さくなる傾向。また、2週目以降予測での気温予測や熱帯の循環等に改善がみられた。

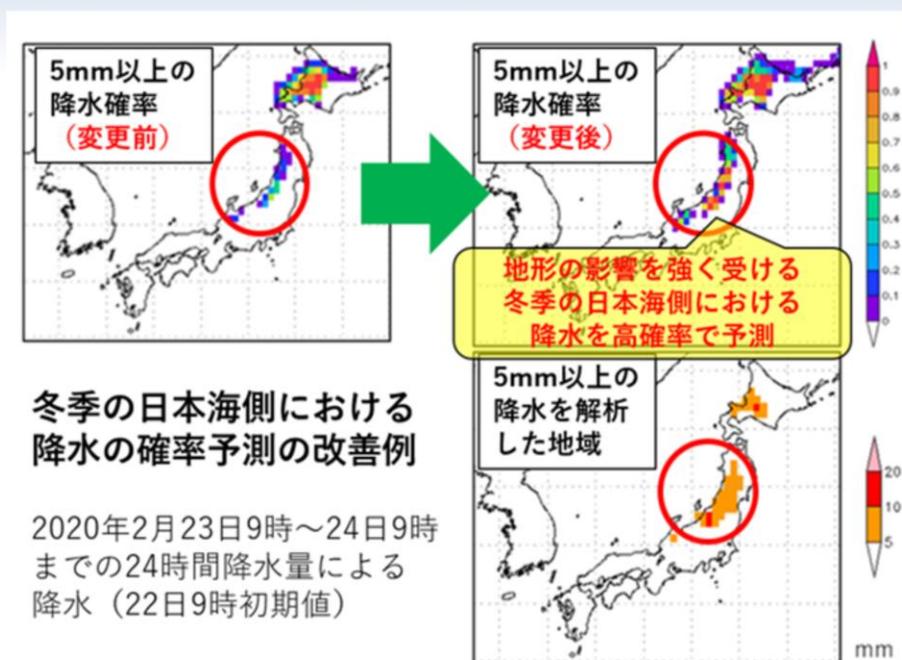
水平解像度の高解像度化

水平解像度の高解像度化により日本海沿岸の地形もより精密に



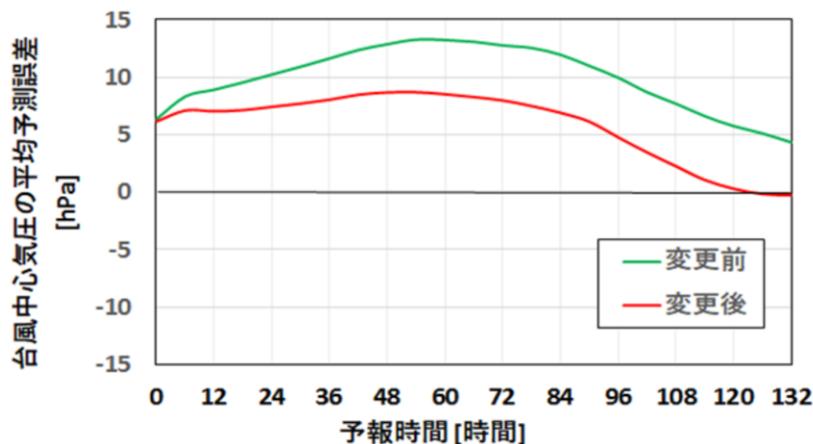
水平解像度の高解像度化により、これまでより細かい地形等の地域特性を精緻に表現できるようになる。図は18日までの予報で用いている地形を示しており、変更前の約40kmから約27kmに更新している。

週間天気予報の改善例



2020年2月22日09時(日本時間)を初期値とする変更前と変更後の24～48時間先の24時間降水量の確率予測と、令和2年2月24日09時(日本時間)の前24時間解析雨量の比較を示す。高解像度化によって地形表現が精緻化され、地形の影響を強く受ける日本海側における冬季の降水の確率予測が改善していることが分かる。

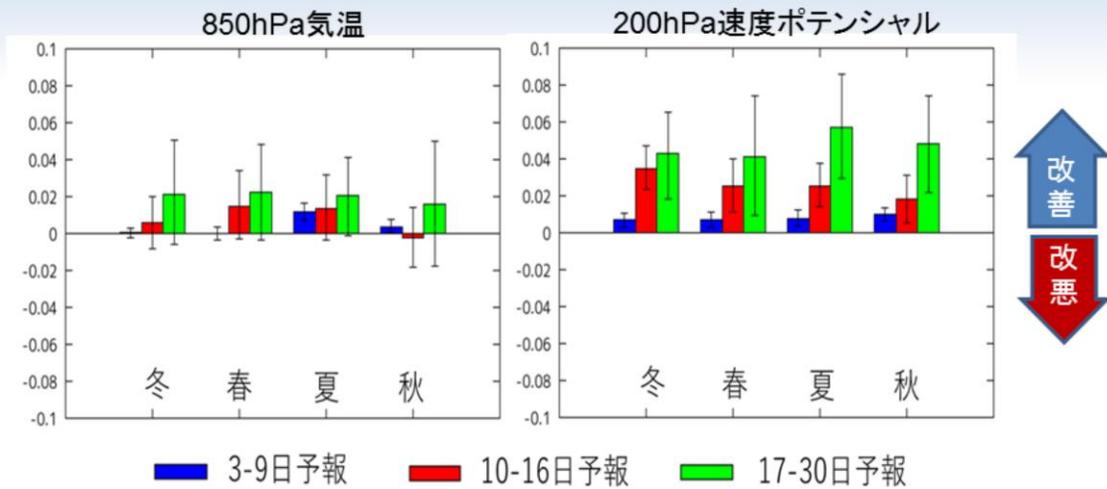
台風中心気圧の平均予測誤差



2019年11月22日～2020年3月11日及び2020年6月22日～10月21日を初期値とする変更前(緑)と変更後(赤)の予報時間ごとの台風中心気圧の平均予測誤差(hPa)

台風進路の予測精度の変化はなかったが(図略)、台風中心気圧の予測については、水平解像度の向上によって深まり、誤差は小さくなる傾向があった。予報時間ごとの台風中心気圧の平均予測誤差を見ると、変更前(緑線)に比べて変更後(赤線)は全ての予報時間で誤差が小さくなっている。

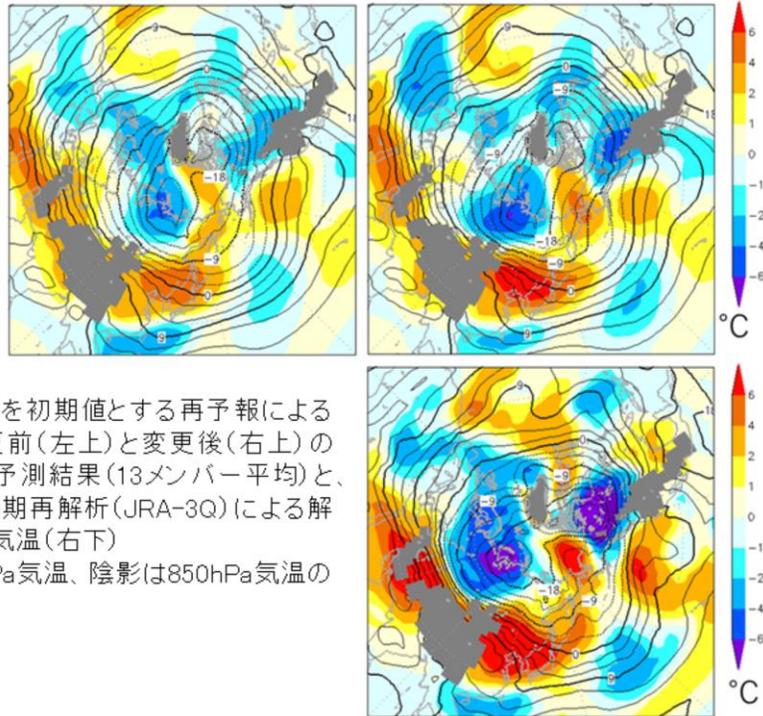
改良のインパクト



再予報(1991年から2020年の30年間の720初期値)による日本周辺域の850hPa気温(左)と熱帯の200hPa速度ポテンシャル(右)の季節別の3~9日予報、10~16日予報、17~30日予報の予測精度指標(アノマリー相関)の改善量。正の値であれば改善、負の値であれば改悪を意味する。誤差幅は95%信頼区間。

再予報(1991~2020年の30年間の720初期値)による日本周辺域の850hPa気温(左)と熱帯の200hPa速度ポテンシャル(右)の季節別の3~9日予報、10~16日予報、17~30日予報の予測精度指標(アノマリー相関)の改善量を示す。3~9日予報、10~16日予報、17~30日予報は、それぞれ概ね週間天気予報、2週間気温予報、1か月予報(3-4週目)の期間に対応している。今回の「全球アンサンブル予報システム」の変更により、年間を通じて熱帯の対流活動の指標である200hPa速度ポテンシャルや、日本周辺域の気温の予測精度が改善されており、改善量は予報時間が長いほど大きくなっていることが分かる。

2週間気温予報の改善例



2018年3月15日を初期値とする再予報による2週間先の変更前(左上)と変更後(右上)の850hPa気温の予測結果(13メンバー平均)と、気象庁第3次長期再解析(JRA-3Q)による解析値の850hPa気温(右下)等値線は850hPa気温、陰影は850hPa気温の平年差を示す。

2018年3月15日を初期値とする再予報による2週間先の変更前と変更後の850hPa気温の予測結果(13メンバー平均)と、気象庁第3次長期再解析(JRA-3Q)による解析値の850hPa気温の比較を示す。変更後は、日本列島が極端な高温となることが明瞭に予測できている。これは、高解像度化によってユーラシア大陸等の地形の影響が精緻化されたことや、海面水温の変更によって赤道季節内変動に伴う熱帯対流活動の予測精度が向上したことによる改善と考えられる。

まとめ

- 2022年3月に、全球アンサンブル予報システム(GEPS)の水平解像度を向上させるとともに、モデルの物理過程の改良および予測計算に利用する海面水温を更新した
 - 降水の確率予測精度が向上
 - 台風中心気圧の予測誤差が小さくなる傾向
 - 2週目以降の予測について気温予測や熱帯の循環場等が改善

参考文献

- 数値予報開発センター, 2022: 開発進捗, 数値予報開発センター年報(令和3年), 気象庁数値予報開発センター, 84-91.
- 高倉寿成, 小森拓也, 2020: 2段階SST法の詳細と導入事例紹介, 令和2年度季節予報研修テキスト, 気象庁地球環境・海洋部, 2-8
- 山口春樹, 2018: 全球アンサンブル予報システムの導入, 平成29年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 35-41



第2章 応用編

2.2 メソ数値予報システムの改良

変更の概要

2022年3月22日実施

- モデル上端高度を21.8kmから37.5kmに引き上げ
 - 鉛直層数: 76から96層(予報)
38から48層(解析のインナーモデル)
- 物理過程の全般的な高度化
 - 1次元海洋混合層モデルの導入
 - 陸面の蒸発散プロセスの精緻化
 - 境界層モデルの精緻化
 - 雲量診断の改良 等

2022年6月15日実施

- 予報時間を51から78時間に延長(00,12UTC初期値のみ)
 - その他(03,06,09,15,18,21)初期値は39時間予報

2022年3月及び6月に実施したメソ数値数値システムの改良の概要を述べる。

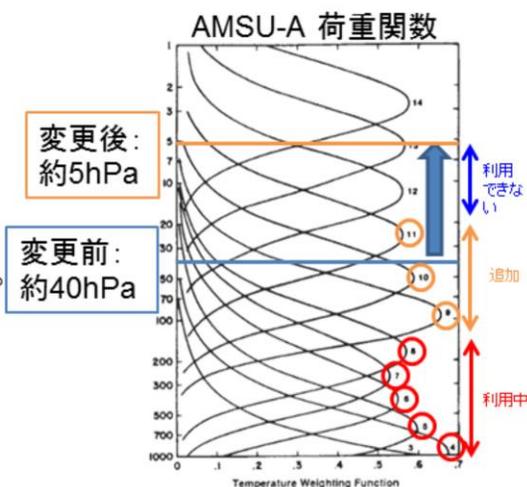
2022年3月には、メソモデルの鉛直層数を76から96層に、メソ解析の鉛直層数を38から48層に増強し、メソモデル・メソ解析ともにモデル上端高度を21.8kmから37.5kmに引き上げた。また、メソモデルにおいて、雲・放射、境界層、陸面及び海面等の物理過程の全般的な高度化を実施した。雲・放射過程では、水蒸気吸収係数を更新するとともに、雲量診断手法を改良した。境界層過程では、境界層モデルにおいて乱流混合をより精緻に扱えるように改良した。海面・海洋過程では、海洋混合層モデルを導入し、海上風が海洋表層をかき混ぜることにより海面温度が変化する効果を考慮するとともに、海塩による海面からの蒸発抑制効果を考慮するよう改良した。陸面過程では、蒸発散プロセスをより精緻に扱えるようにするとともに、土壌水分量の初期値として用いる気候値等を更新した。メソアンサンブル予報システムについてもメソモデルと同じ変更を行った。

2022年6月には、00,12UTC初期値の予報時間を現在の51時間から78時間に延長した。00,12UTC以外の初期値の予報時間は従来通り39時間である。

これらの変更の詳細については、数値予報開発センター(2022a,2022b)を参照のこと。

モデル上端高度の引き上げの効果

- モデル上端を21.8km(約40hPa)から37.5km(約5hPa)に引き上。
 - MSMの鉛直層は76層から96層に。
 - メソ解析のインナーモデルの鉛直層は38層から48層に(上端はMSMと同じ)
 - 高度21.8kmまでの層配置はほぼ従来通り。
 - 対流圏上部～成層圏下部の衛星観測が利用可能に。
- 4DVar背景誤差を更新。
 - メソモデルの予報結果から作成

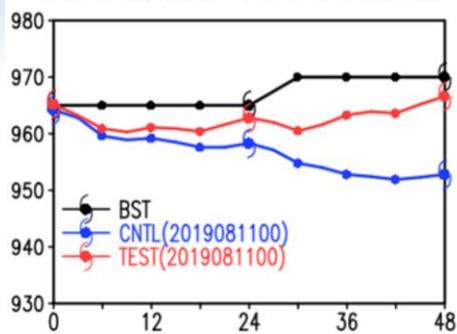


モデル上端高度の引き上げの概要及びその効果について述べる。

モデル上端高度を21.8km(約40hPa)から37.5km(約5hPa)に引き上げるにあたって、メソモデルの鉛直層数を76から96層に、メソ解析の鉛直層数は38から48層に増強している。従来のモデル上端である21.8km(約40hPa)までの層配置は概ね従来通りであり、増強された鉛直層はモデル上端高度の引き上げに用いられている。モデル上端高度を引き上げたことにより、これまでは利用していなかった、対流圏上部～成層圏下部の衛星観測データの利用が可能となった。なお、4次元変分法による観測データの同化に必要となる背景誤差については、モデル上端高度の引き上げに伴い、21.8～37.5kmを含んだものをメソモデルの予報結果の統計値から作成している。

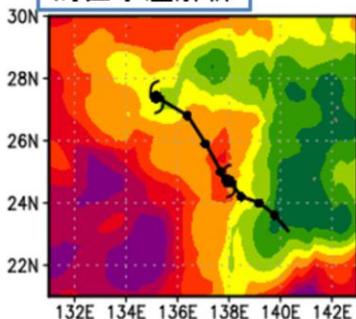
1次元海洋混合層モデル導入の効果

中心示度の対ベストトラック比較

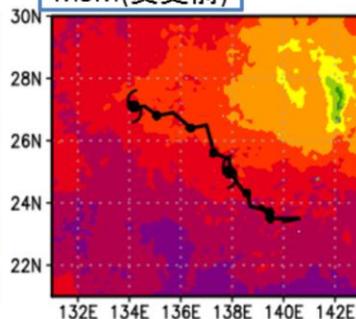


- 2019年8月13日00UTC(FT=48)の海面水温
- 変更前のMSMでは海面水温解析より高い海水上を台風が移動し、中心示度がベストトラックより深い
- 変更後のMSMでは予報後半の中心示度が改善

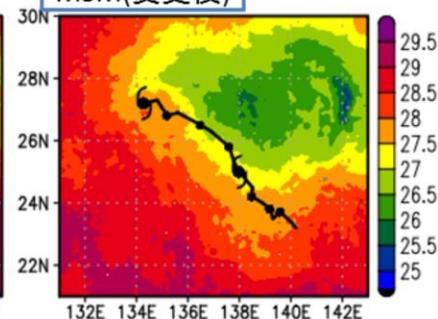
海面水温解析



MSM(変更前)



MSM(変更後)



1次元海洋混合層モデルの効果について述べる。

メソモデルでは予測時間が進むにつれて台風が過発達する傾向があり、この過発達バイアスをもたらす要因の一つとして、海面水温を初期値から固定しているために、海洋が海上風により鉛直混合されて海面水温が低下する効果をモデルが表現できないことが考えられる。今回の改良では、海上風に応じて海面水温が低下する効果を取り入れるために、1次元海洋混合層モデルを導入した。

1次元海洋混合層モデル導入の効果の例として、2019年台風第10号を対象とした比較実験の図を示す。変更前は海面水温解析より高い海水上を台風が移動し、中心示度がベストトラックより深いのが、変更後は台風の経路に沿って海面水温が低下する様子を表現し、予報後半の中心示度が改善していることが分かる。

変更後のメソモデルにおいても、台風や低気圧の過発達傾向は引き続き課題であり、物理過程の改良等を引き続き進めていく。

モデル変更による特性変化の概要

メソモデル

- 大雨予測が改善
 - 降雨頻度の過剰バイアスが軽減される。空振りは減るが見逃しは増える。
- 台風強度予測が改善
 - 予報後半に顕在化する中心気圧の負バイアス(最大風速の正バイアス)が軽減する。
- 地上気象要素の予測が改善
 - 地上乾燥バイアスが大幅に軽減する。地上気温の日中の負バイアス、夜間の正バイアスがそれぞれ軽減する。(日変化表現の改善)

メソアンサンブル

- メソアンサンブル予報において、空振りが減少することで降水量超過確率が実況により対応する事例が確認されている。

2022年3月のメソ数値予報システムの改良による特性変化の概要について述べる。

メソモデルでは降水予測の頻度が過剰傾向にあるが、今回の改良によりこの過剰バイアスが軽減した。降水予測頻度が減少したことにより、空振りは減るが見逃しは増えている。台風の強度及び最大風速については、1次元海洋混合層モデルの導入等により、台風の強度及び最大風速の予測精度が改善した。改良前は、中心気圧の負バイアスとこれに対応する最大風速の正バイアスが予報後半に顕在化していたが、改良後はこれらのバイアスが軽減されている。

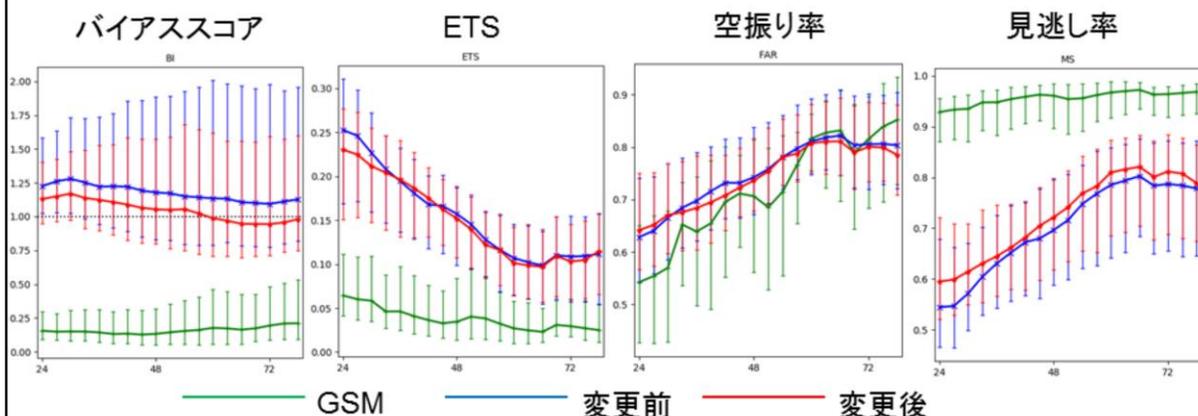
今回の変更では、陸面過程等の改良により、地上気象要素の予測も改善した。改良前のメソモデルでは地上が乾燥する傾向があったが、改良後は乾燥バイアスが大幅に軽減された。また、改良前のメソモデルで見られた日中の低温バイアス及び夜間の高温バイアスが軽減し、改良後は地上気温の日較差がより実況に近い予測となっている。

メソアンサンブル予報システムでは、降水予測の空振りが減少することにより、降水量超過確率が実況により対応する事例が見られるようになっている。

次スライド以降で示す検証結果の統計期間は、2020年7月1日～9月15日(夏期間)、2019年12月23日～2020年2月29日(冬期間)である。

大雨予測(24時間100mm)の改善

- メソモデル(MSM)の**変更後**は、**変更前**と比べ、頻度過剰バイアスが軽減される傾向 注: 変更前は、2022年3月の変更を実施する前のメソモデルを78時間予報まで延長したもの
- GSM**と比較すると、空振りが多いものを見逃しが少ないことで、エクイタブルスレットスコア(ETS)は3日目予測においても有意に上回る

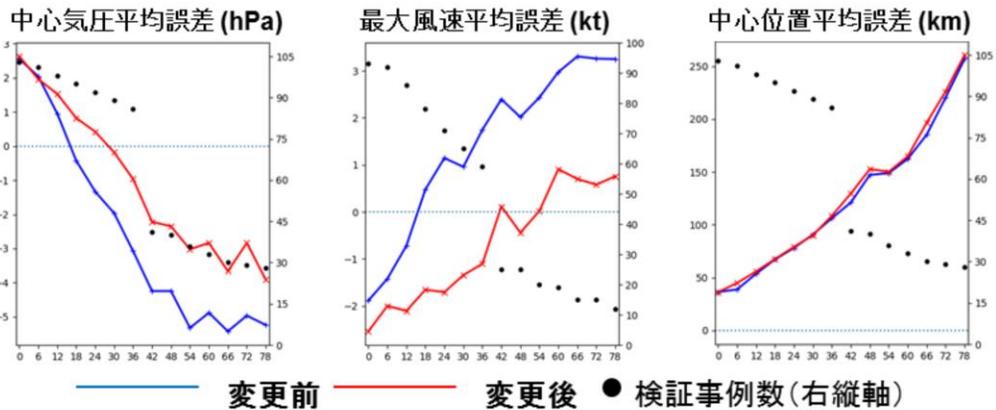


大雨予測(24時間100mm)の予報時間別の検証結果を示す。

メソモデルでは降水予測の頻度が過剰傾向にあるが、2022年3月の改良によりこの過剰バイアスが軽減した。降水予測頻度が減少したことにより、空振りは減るが見逃しは増えている。GSMとの比較では、MSMはその予報時間を通して強い降水の予測頻度がより実況に近くなった。空振りが多いものを見逃しが少ないことで、エクイタブルスレットスコア(ETS)は3日目予測においてもGSMを有意に上回っていることがわかる。2022年6月の予報時間延長により、MSMによる精度の高い降水量予測が3日先まで利用可能となった。

台風強度予測の改善

- 変更前は台風過発達傾向が予報後半に顕在化するが、変更後は軽減される。最大風速の正バイアスが改善する。
- 進路誤差は中立

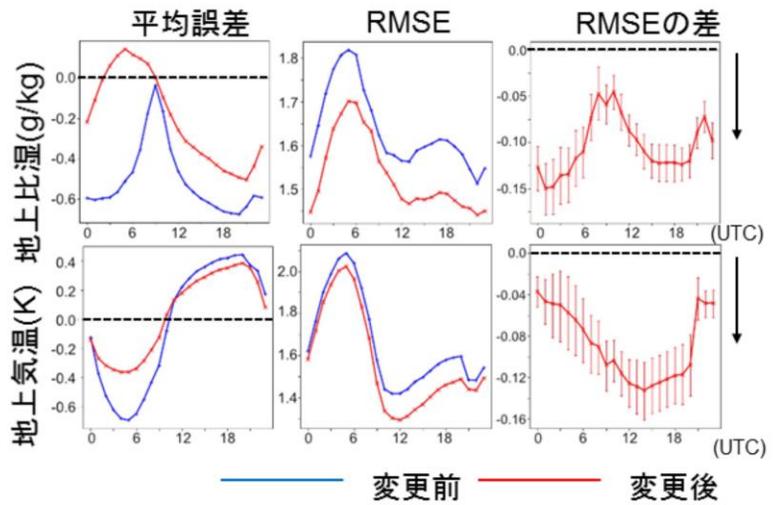


予報時間別の台風の強度、最大風速及び中心位置平均誤差の検証結果を示す。

変更前は、中心気圧の負バイアスとこれに対応する最大風速の正バイアスが予報後半に顕在化していたが、変更後はこれらのバイアスが軽減され、より実況に近い予測になった。台風進路誤差は中立であった。

地上気象要素の予測の改善

- 地上気温・比湿の対象時刻別検証結果 (夏期間)
- 地上乾燥バイアスの軽減
- 日中の低温バイアス、夜間の高温バイアスがそれぞれ軽減
- 全対象時刻でRMSEが有意に改善

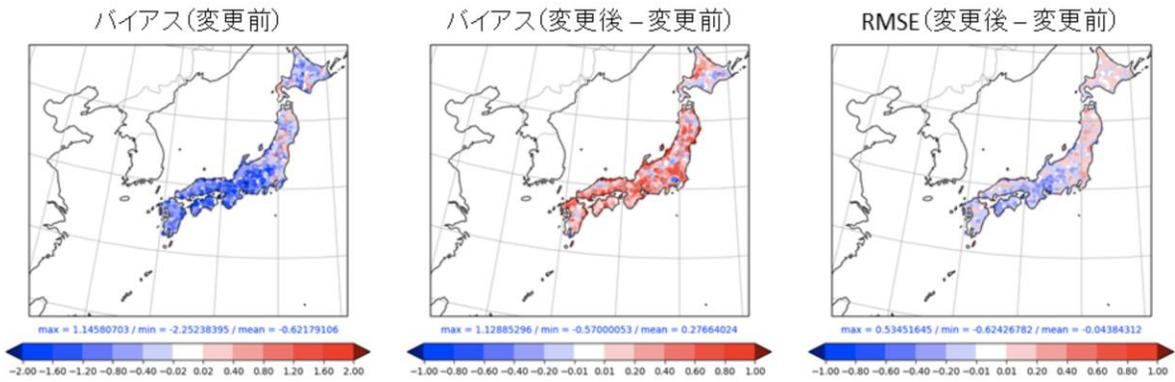


夏季における地上気温・比湿の対象時刻別の検証結果を示す。

変更前のメソモデルでは地上が乾燥する傾向があったが、変更後は乾燥バイアスが軽減し、全対象時刻にて平方根平均二乗誤差 (RMSE) も減少した。また、変更前のメソモデルでは、夏季日中の気温が低く、夏季夜間の気温が高い傾向があったが、これらのバイアスが軽減している。変更後は地上気温の日較差がより実況に近い予測になり、全対象時刻にて平方根平均二乗誤差 (RMSE) が減少している。

対アメダス気温誤差 (夏期間、12時)

日中の気温が上昇し、西日本を中心に誤差縮小。

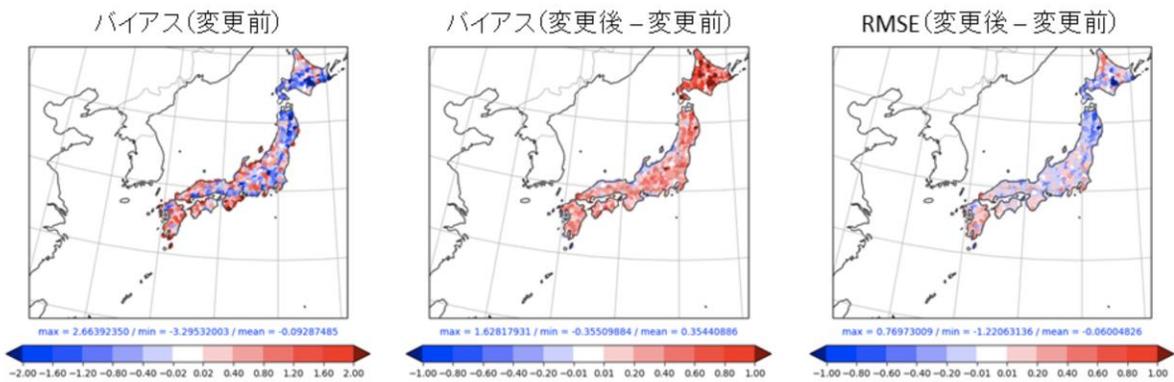


夏期間の正午を対象時刻とした地上気温の対アメダス検証結果を示す。

変更前のメソモデルでは、夏季日中の気温が低く予測される傾向があったが、変更後は西日本を中心に改善している。

対アメダス気温誤差 (冬期間、0時)

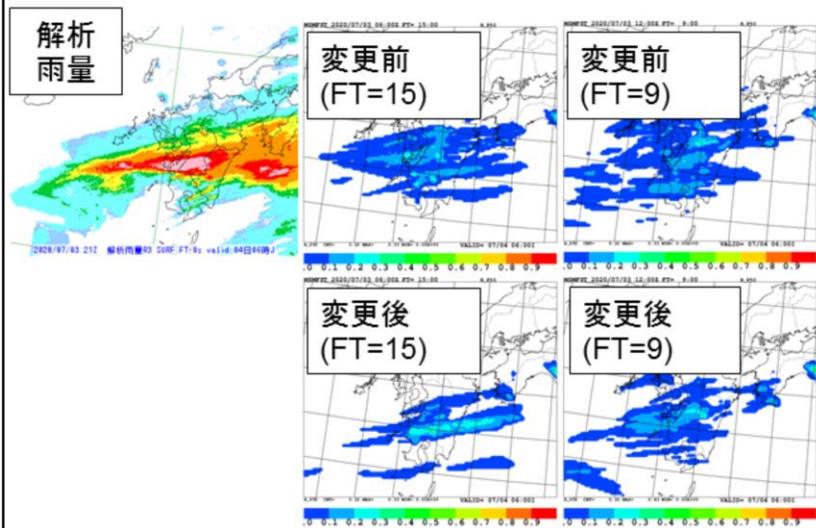
夜間気温が上昇し、北海道や東北地方で誤差縮小。



冬期間の0時を対象時刻とした地上気温の対アメダス検証結果を示す。変更前のメソモデルでは、北海道や東北地方にて冬期夜間の気温が低く予測される傾向があったが、変更後は冬期夜間の気温が全国的に上昇し、北海道や東北地方を中心にて改善している。

(メソアンサンプル)

降水量超過確率予測にて空振りが減少した事例



- メソアンサンプルによる超過確率予測(閾値 50mm/h)
- 対象時刻: 2020年7月4日6時(JST)
- 変更後は変更前に比べ領域が絞れており、空振りが減少。

変更後のメソアンサンプル予報システムでは、変更前と比べて降水予測の空振りが減少する事例が見られる。図は令和2年7月4日の線状降水帯事例における変更前後の降水量超過確率の予測結果を示す。変更後は変更前と比べて強い降水の領域を絞り込んだ予測となり、空振りが減少していることが分かる。

参考文献

- 数値予報開発センター, 2022a: メソ数値予報システムの鉛直層増強、予報時間延長、物理過程の改良, 数値予報開発センター年報(令和3年), 気象庁数値予報開発センター, 92-99.
- 数値予報開発センター, 2022:b メソアンサンブル予報システムの鉛直層増強と物理過程改良, 数値予報開発センター年報(令和3年), 気象庁数値予報開発センター, 100-101.



第2章 応用編

2.3 局地数値予報システムの改良

変更の概要

2022年3月22日実施

- 局地解析にハイブリッド3次元変分法を導入
 - 従来は、気候学的に事前に見積もった背景誤差(モデル予測誤差)を考慮して観測情報を初期値に反映。
 - メソアンサンブルから日々の気象場に応じた背景誤差(モデル予測誤差)を考慮できるようにシステムを高度化。
- 物理過程の高度化
 - 初期値・境界値であるメソモデルの物理過程の高度化にあわせて、局地モデルの蒸発散プロセスを精緻化

2022年3月に実施した局地数値数値システムの改良の概要を述べる。

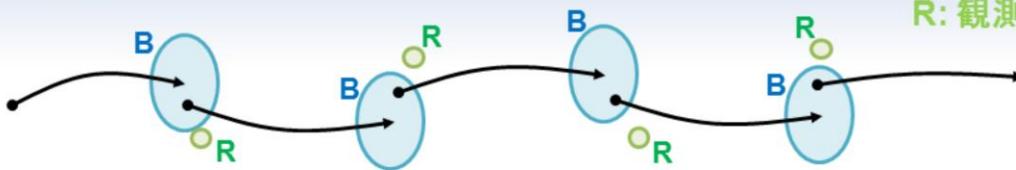
局地解析で用いている3次元変分法(3DVar)では、背景誤差(モデル予測誤差)を考慮して観測情報を初期値に反映させている。変更前は背景誤差(モデル予測誤差)として気候学的に事前に見積もった値のみを用いていたが、変更後はメソアンサンブルから算出した日々の気象場に応じた値を考慮(ハイブリッド同化)し、観測情報をより適切に初期値に反映させることができるようになった。また、局地モデルの陸面過程を改良し、蒸発散プロセスをより精緻に扱えるようにした。陸面過程の変更は、本改良と同時に実施したメソ数値予報システム改良における陸面過程の改良と同等のものである。

これらの変更の詳細については、気象庁数値予報開発センター(2022)を参照のこと。

ハイブリッド同化の概要

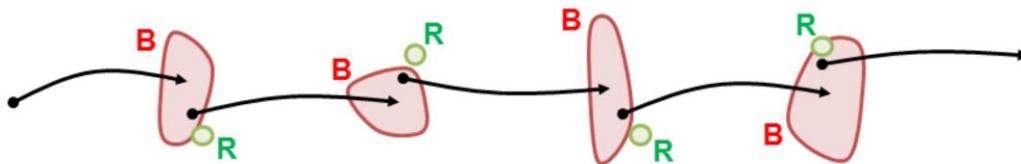
変更前: $B = B_c$

B: 背景誤差
R: 観測誤差



- 気候学的背景誤差 (B_c) は水平方向に一様等方で解析時刻によらず一定
- このため、観測の同化によるインクリメントは日々の気象場に応じたモデル予測誤差によらず決まる。

変更後: $B = 0.5B_c + 0.5B_e$



- メソアンサンブルの予報値から作成した背景誤差 (B_e) を気候学的背景誤差 (B_c) に混ぜることにより、 B は水平方向に非等方、解析時刻毎に異なる。
- アンサンブルスプレッドが大きい位置で背景誤差が大きくなり、予報誤差が大きい点でより観測に近づけることが可能になった。



局地解析に導入されたハイブリッド3次元変分法の概要及びその効果について述べる。

局地解析では3DVarと1時間予報を繰り返すことにより初期値を作成している。3DVarでは背景誤差(モデル予測誤差)を考慮して観測情報を初期値に反映させている。変更前は、気候学的に事前に見積もった値のみを背景誤差として用いてきた。このようにして求められた背景誤差(気候学的背景誤差: B_c)は水平方向に一様等方で解析時刻によらず一定であり、観測の同化によるインクリメント(第一推定値の修正量)は日々の気象場によらず一定であった。変更後は、メソアンサンブルの予報値から作成した日々の気象場に応じた背景誤差(B_e)を気候学的背景誤差(B_c)に混ぜることにより、解析に用いる背景誤差(B)は水平方向に非等方で解析時刻毎に異なるようになった。アンサンブルスプレッドが大きい位置で背景誤差が大きくなり、予報誤差が大きい点でより観測に近づけることが可能になった。

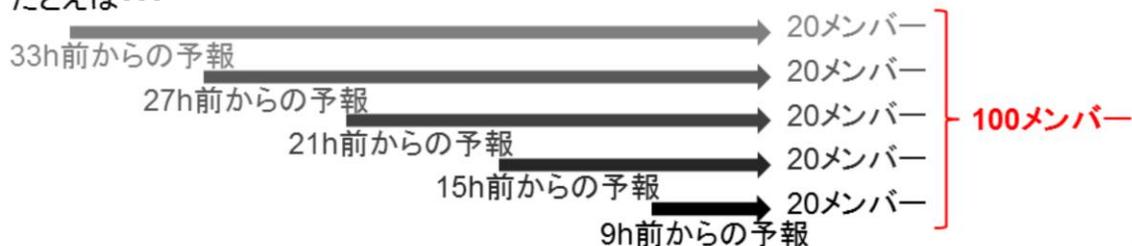
ハイブリッド同化の導入

異なる初期時刻のMEPSを用いたメンバー増

メソアンサンプルのメンバー数が多いほど B_e は精度よく推定されることが期待される。

→ 異なる初期時刻のMEPSを用いて100メンバーに増やす

たとえば…



※MEPSは6時間毎に39時間予報を行っているため、同じ予報対象時刻の予報が6～7初期値あるが、MEPSの実行時間の関係で利用できるのは5初期値分。

※異なる初期時刻のMEPSを用いるにあたっては、予報時間が長くなるほどスプレッドが大きくなることを考慮している。

日々の気象場に応じた背景誤差(B_e)を精度よく推定するための工夫について述べる。

アンサンブルメンバー数が増加するほど、予測の不確実性の推定精度は向上することが期待される。このため、メソアンサンプルの予報値から日々の気象場に応じた背景誤差(B_e)を求めるにあたっては、異なる初期時刻のMEPSを用いて100メンバー(20メンバー/1初期時刻 × 5初期時刻)を利用している。アンサンブル予報では予報時間が長くなるほどスプレッドが大きくなるが、異なる初期時刻のMEPSを用いるにあたっては、予報時間の長さによってスプレッドが異なることを考慮している。

モデル変更による特性変化の概要

- 夏期間の予報前半の強雨を中心に空振りと見逃しが減少し、予測精度が改善する。
- 気象場に応じたモデル予測誤差を考慮して観測情報を初期値に反映させるようになったことにより、強雨の位置や強度が実況に近づく事例が多く見られるようになった。
- 地上気象要素の予測が改善する。地上乾燥バイアスが大幅に軽減するとともに、地上気温の日中の負バイアス、夜間の正バイアスがそれぞれ軽減する（日変化表現の改善）。



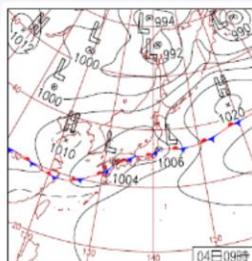
2022年3月の局地数値予報システムの改良による特性変化の概要について述べる。

夏季の予報前半の強雨を中心に、降水の予測精度が向上するとともに、気象場に応じた予測誤差を考慮して観測情報を初期値に反映させるようになったことにより、強雨の位置や強度が実況に近づく事例が多く見られるようになった。

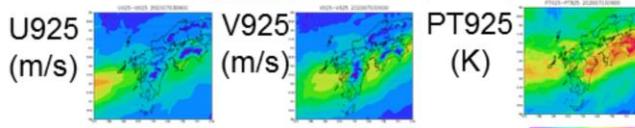
陸面過程等の改良により、地上気象要素の予測も改善した。変更前の局地モデルでは地上が乾燥する傾向があったが、変更後は乾燥バイアスが大幅に軽減された。また、変更前の局地モデルで見られた日中の低温バイアス及び夜間の高温バイアスが軽減し、変更後は地上気温の日較差がより実況に近い予測となっている。

解析インクリメントの変化の例 (次スライドの線状降水帯事例)

天気図(2020/7/4 00UTC)



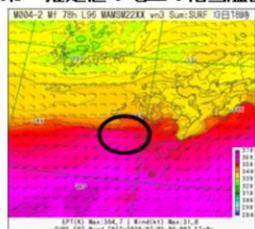
2020/7/3 09UTCのMEPSのアンサンブルスプレッド
(LAF法を用いて100メンバー)



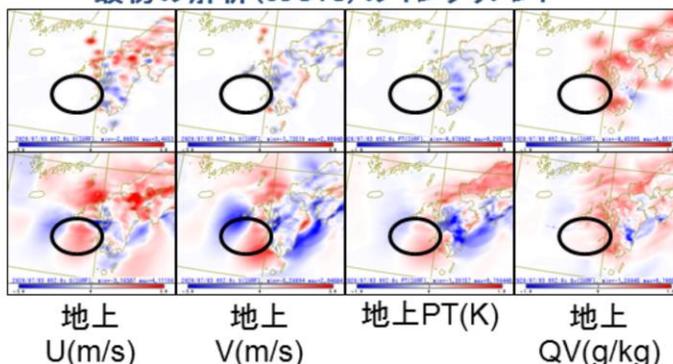
2020/7/3 12UTC初期値作成までの4回のうち
最初の解析(09UTC)のインクリメント

変更前

第一推定値の地上の相当温位と風



変更後

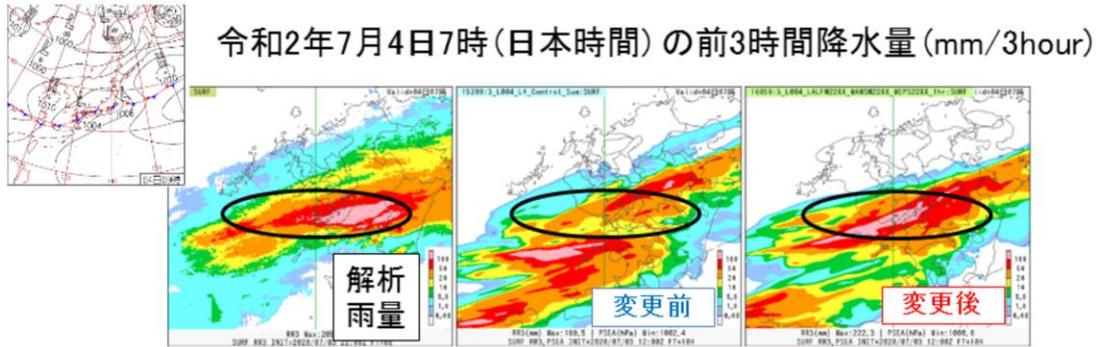


地上 U(m/s) 地上 V(m/s) 地上PT(K) 地上 QV(g/kg)

ハイブリッド3次元変分法の導入による解析インクリメント(観測情報による第一推定値の修正量)の変化の例を示す。右上段がメソアンサンブル予報システム(MEPS)のアンサンブルスプレッド、右中段が改良前の解析インクリメント、右下段が改良後の解析インクリメントである。改良後は、解析インクリメントが気象場の流れに沿った分布になり、地上観測によるインクリメントが海上にも及んでいることがわかる。

強雨予測の改善事例

線状降水帯への暖気流入を強めるような解析インクリメントが入り、線状降水帯をより強めることにより予測が改善する事例

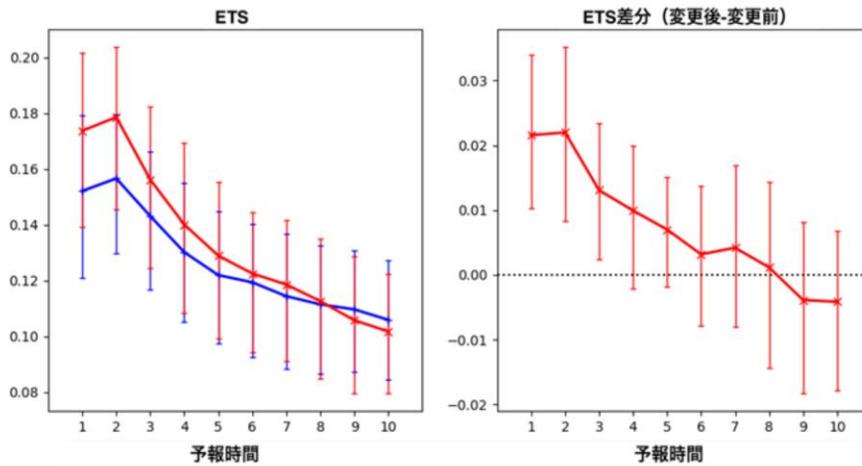


変更後は、線状降水帯に伴う降水の位置・強度を、より現実に近く予測

線状降水帯に伴う降水予測精度が向上した事例として、前スライドで解析インクリメントを示した令和2年7月4日の線状降水帯事例の変更前後の予測結果を示す。変更後は、線状降水帯への暖気流入を強めるような解析インクリメントが入り、降水の位置・強度がより実況に近い予測になっている。

降水予測の改善

夏季の予報前半の強雨を中心に、降水の予測精度が向上する。



1時間積算雨量(閾値: 10mm/h)の検証結果
(検証格子10km)

変更前
変更後

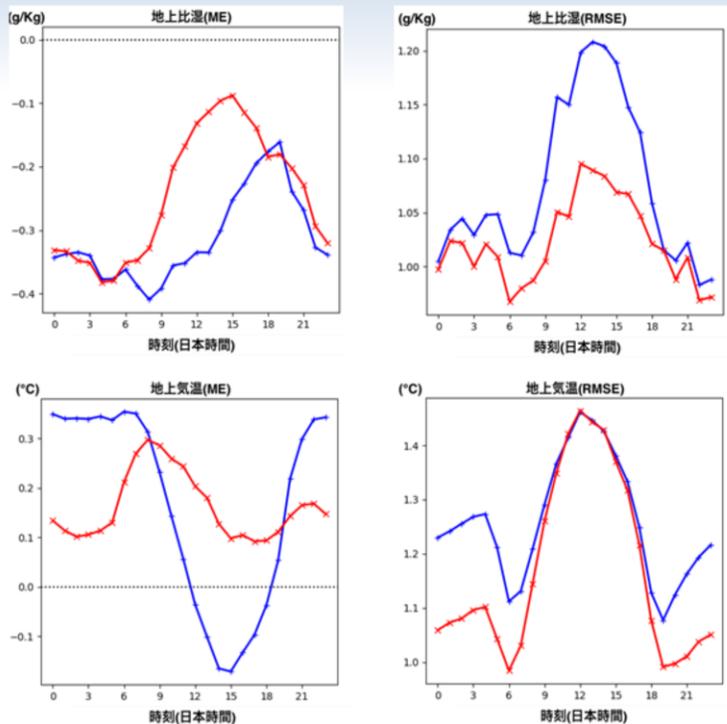
夏季における降水予測(1時間10mm)の予報時間別の検証結果を示す。

夏季の予報前半の強雨を中心に、空振りと見逃しが減少(図省略)し、予測精度が向上する。

地上気象要素の改善

- 地上気温・比湿の対象時刻別検証結果（夏期間）
- 地上乾燥バイアスの軽減
- 日中の低温バイアス、夜間の高温バイアスがそれぞれ軽減
- RMSEが改善

— 変更前
— 変更後



夏季における地上気温・比湿の対象時刻別の検証結果を示す。

変更前の局地モデルでは地上が乾燥する傾向があったが、変更後は乾燥バイアスが軽減し、全対象時刻にて平方根平均二乗誤差 (RMSE) も減少した。また、変更前の局地モデルで見られていた、日中の低温バイアス及び夜間の高温バイアスが軽減した。変更後は地上気温の日較差がより実況に近い予測になり、全対象時刻にて平方根平均二乗誤差 (RMSE) が減少した。

参考文献

- 気象庁数値予報開発センター, 2022: 局地解析へのハイブリッド同化手法の導入, 数値予報開発センター年報(令和3年), 100-101.



第2章 応用編

2.4 観測データ利用法の改良

項目

- 2021年10月から2022年9月までの間に、気象庁の数値予報システムに導入した、観測データの利用に関する主な改良項目について
- 線状降水帯の予測精度向上に向けた水蒸気観測データの利用開発について

本節では、2021年10月から2022年9月までの間に気象庁の全球、メソ、局地数値予報システムに導入した、観測データの利用に関する主な改良項目と、線状降水帯の予測精度向上に向けた水蒸気観測データの利用開発について報告する。

2021年10月から2022年9月までの間に、気象庁の数値予報システムに導入した、観測データの利用に関する主な改良項目について

観測データ利用法の改良

概要

- 2021年10月から2022年9月までの間に、気象庁の数値予報システムに導入した観測データの利用に関する主な改良項目(下記赤字)について

変更日	項目	対象
2021年11月24日	Metop-C/IASI輝度温度データの利用開始(※)	全球解析
2021年11月24日	更新された二重偏波レーダー(福井、大阪、福岡、広島、名古屋、新千歳DRAW、仙台)の反射強度及びドップラー速度データの利用開始(※)	メソ解析、局地解析
2021年11月24日	Metop-C/AMSU-A、MHS輝度温度データの利用開始(※)	局地解析
2021年12月16日	Metop-C/ASCAT海上風データの利用開始(※)	メソ解析
2022年6月30日	Dual-Metop AMV利用開始、RTTOV更新	全球解析
2022年6月30日	ATMS輝度温度データ利用開始、GPM/DPRデータ利用改良、RTTOV更新	メソ解析
2022年8月9日	ATMS輝度温度データ利用開始、RTTOV更新	局地解析

(※)既に同化利用中の機器、センサーによる観測データの利用拡充のため、本項では扱わない

本節前半では、2021年10月から2022年9月までの間に気象庁の全球、メソ、局地数値予報システムに導入した、観測データの利用に関する主な改良項目(新規観測データの利用開始など)について報告する。

概要

- **全球数値予報システム(全球解析、全球モデル)【変更日:2022年6月30日】**
 - 欧州の現業極軌道衛星Metopによる大気追跡風(Dual-Metop AMV)観測データの利用開始
- **メソ数値予報システム(メソ解析、メソモデル)【変更日:2022年6月30日】**
 - 日米の国際協力ミッション全球降水観測計画主衛星(GPM-core)搭載の二周波降水レーダー(DPR)の利用手法改良
 - 米国の現業極軌道衛星Suomi-NPPおよびNOAA-20搭載マイクロ波サウンダ(ATMS)観測データの利用開始(ただし、水蒸気観測チャンネルのみ)
- **局地数値予報システム(局地解析、局地モデル)【変更日:2022年8月9日】**
 - 米国の現業極軌道衛星Suomi-NPPおよびNOAA-20搭載マイクロ波サウンダ(ATMS)観測データの利用開始(ただし、水蒸気観測チャンネルのみ)
- **全球、メソ、局地数値予報システム共通の変更**
 - 衛星輝度温度データの同化のための放射伝達モデルのRTTOV-10からRTTOV-13への更新(地表面射出率データセットの更新等)。今後RTTOV-13の新機能を利用する変更を予定。

主な改良項目の概要について示す。

改良の効果

- 全球数値予報システム(全球解析、全球モデル)
 - 高緯度域の風や下層気温場を中心にした解析場の改善
 - 北半球500hPa高度の予測精度の改善
- メソ数値予報システム(メソ解析、メソモデル)
 - 解析値や第一推定値、予測値における水蒸気場の精度の改善
 - 改良した全球数値予報システムによる外部境界値を利用することによる降水の予測精度の改善
- 局地数値予報システム(局地解析、局地モデル)
 - 解析値や第一推定値における水蒸気場の精度の改善
 - 改良した全球数値予報システムおよびメソ数値予報システムを外部境界値として利用することによる、降水の予測精度の改善

前頁の2022年6月30日、8月9日に実施した観測データ利用に関する改良により、ここに示すような効果が得られた。以下、各項目の詳細について示す。



全球・メソ・局地数値予報システムにおける 放射伝達モデルRTTOV-13の導入

これまで、全球・メソ・局地解析では、衛星輝度温度の同化にEUMETSATのNWP-SAFで開発された放射伝達モデルRTTOV-10.2を利用していた。最新のRTTOV-13を導入することにより、輝度温度の計算精度の向上が期待でき、また新たに打ち上げられた衛星のデータ利用も可能になる。

・今回の改良における変更項目

－ モジュールの更新

－ 地表面射出率データセットの更新

新しいマイクロ波地表面射出率が現在利用中のものと同程度の品質であることを確認済

・今後以下の変更項目を現業化する計画

－ 放射計算用係数の更新

－ 海面射出率モデルの更新(赤外:IREMIS、マイクロ波:FASTEM-6)

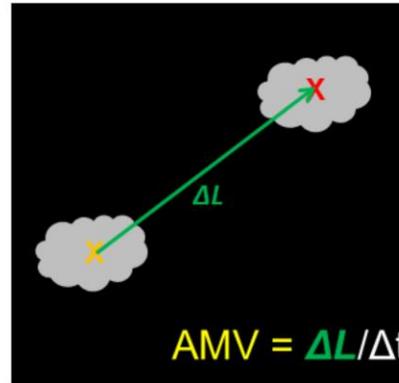
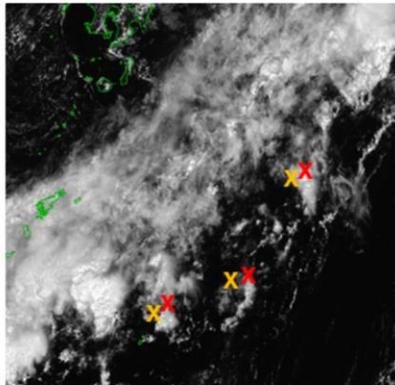
最初に、今回の全球、メソ、局地解析で共通の変更項目である放射伝達モデルRTTOV-13の導入について概要を述べる。これまで、全球・メソ・局地解析では、衛星輝度温度の同化にEUMETSATのNWP-SAFで開発された放射伝達モデルRTTOV-10.2 (Saunders et al. 2012)を利用していたが、RTTOVの最新版はRTTOV-13 (Saunders et al. 2020)となっている。RTTOV-13への更新による主な変更点としては以下の項目がある。

- ・最新の気体吸収データベースに基づく放射伝達計算用の係数(以下「係数」)の更新
- ・複数種類の雲・降水粒子とそれぞれの雲量を考慮した全天候での放射伝達計算
- ・赤外波長帯における雲域の輝度温度計算の精緻化
- ・陸域の射出率・反射率データベースの更新

最新のRTTOV-13を導入することにより、輝度温度の計算精度の向上が期待でき、新たに打ち上げられた衛星のデータ利用も可能になるため、導入に向けた開発を進めている(数値予報開発センター 2022)。今回の変更では、ライブラリのモジュールを差し替え、地表面射出率のデータセットの更新を行った。今後、係数の更新を中心とした、計算結果に大きく影響する変更項目に関する開発を進める予定である。今回の変更単独では、事前に実施した性能評価試験において、全球、メソ、局地数値予報システムそれぞれにおい、解析精度及び予測精度が想定通り中立となることを確認した(図略)。他の観測データ利用拡充と併せた実験結果については後述する。

大気追跡風 (Atmospheric Motion Vector) とは

- 時間的に連続する複数枚の衛星画像から雲や水蒸気パターンを追跡し、その移動量を求め、風ベクトルを算出するプロダクト
- データ同化により対流圏の予測精度(主に風の場合)にインパクトがある



気象庁の全球解析では、2022年6月30日に欧州の極軌道衛星Metop-B、Metop-C衛星2機の観測データから算出される大気追跡風 (AMV: Atmospheric Motion Vector) データの利用を開始した。ここでは、データの概要、利用方法およびデータを利用した実験の結果について示す。

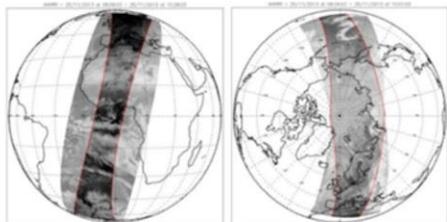
AMVは、時間的に連続する複数枚の衛星画像から雲の動きを捉え、上空の風向風速を算出する衛星プロダクトである(山下・今井 2007)。直接観測データの少ない海上などにおいて、AMVは風に関する貴重な観測データとなっている。

● 全球

全球数値予報システムにおける Dual-Metop AMVの利用開始

開発の動機:

これまで数値予報の初期値作成に利用されてきたMODISやAVHRRなどの極域AMVが近い将来運用終了となる可能性がある。これらの運用終了に備えて、データ同化に利用する極域AMVデータを拡充しておく必要がある。



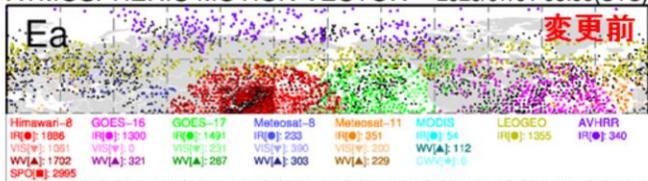
Dual Metop global coverage wind
= “Dual-Metop AMV”

Metop-B,Cの2機の画像から作成。約50分間隔の連続する2枚の画像から作成される。欧州気象衛星開発機構(EUMETSAT)の可視赤外イメージャAVHRRのAMVプロダクトの中の一つ。

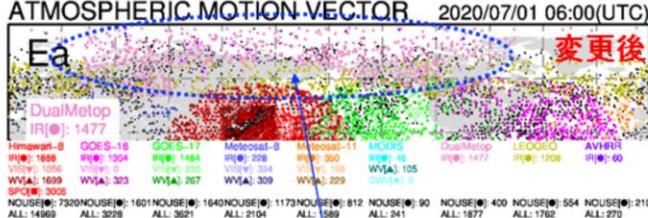
EUMETSAT, AVHRR L2 Wind product ATBD (2016), <https://www.eumetsat.int/media/44490>

大気追跡風のデータ分布例

ATMOSPHERIC MOTION VECTOR 2020/07/01 06:00(UTC)



ATMOSPHERIC MOTION VECTOR 2020/07/01 06:00(UTC)



Dual-Metop大気追跡風の利用により、極域の対流圏中層を中心に、特に速報解析(Ea)で利用データ数が大きく増加

全球解析では、熱帯・中緯度帯で静止気象衛星から算出されたAMV、極域で極軌道衛星から算出されたAMV(極域AMV)および緯度60度帯で極軌道衛星と静止気象衛星の合成画像から算出されたAMV(LEO GEO-AMV)を利用している(山下 2015)。このうち、極域AMVやLEO GEO-AMVにおいては、米国の地球観測衛星TerraおよびAqua搭載のMODIS(Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer: 中解像度画像分光放射計)センサによる観測データも利用している(山下 2011)。ただし、TerraおよびAquaの各衛星は設計寿命を大きく超えて運用されていることから、近い将来にこれらの観測データを利用したAMVが算出されなくなる可能性がある。また、NESDIS(National Environmental Satellite Data and Information Service: 米国環境衛星・資料情報局)による、極軌道衛星NOAA搭載の可視赤外イメージャAVHRR(Advanced Very High Resolution Radiometer: 改良型高分解能放射計)からのAMV算出システムも近い将来に運用を終了する予定である。これらの極域AMVの運用終了に備え、今回の改良では、欧州気象衛星開発機構(EUMETSAT)の極軌道衛星Metop搭載のAVHRRから算出されるAMVプロダクトのうち、Metop-B、Cの2機の画像から作成されるDual Metop global coverage wind(EUMETSAT 2016)(以下Dual-Metop AMV)の利用を開始した。この変更により、極域の対流圏中層を中心に、特に全球速報解析においてAMVの利用データ数が大きく増加する(右図)。

Dual-Metop AMVに対するQC

高緯度域(50° ~88° N/S)のデータのみ利用

- 低緯度では、中層から上層で東風もしくは西風のそれぞれの強風バイアスが大きな地域がみられた。
- 中・低緯度では、観測波長帯の数が多く高頻度観測ができる静止気象衛星のAMVの方が精度がよいと考えられる。
- 極域のAMVの補完が目的。

予報値チェックありQI*の閾値85以上を利用

- 観測値と第一推定値の差分(O-B)の負バイアスが大きな上層や正バイアスの大きな下層の低品質と思われるデータを中心に排除できる

300hPaより下層のデータを利用

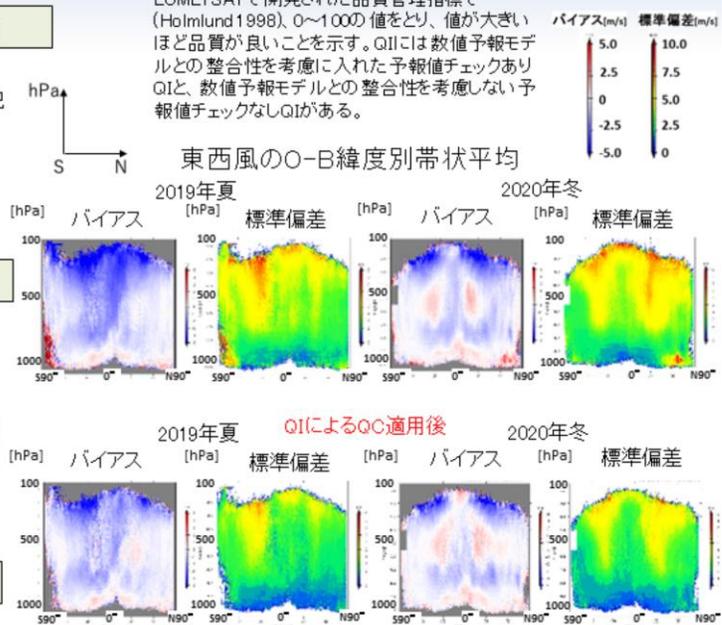
- 中高緯度の上層では、QIのみでは除ききれない第一推定値に対する西風の弱風バイアスがみられたため利用しない。

陸上では700hPaより上の高度を利用

- QIによるQCでかなり軽減できるが、陸下の下層でバイアスや分散が大きな領域がみられ、低品質と考えられるデータが残っていると考えられるため、陸上では700hPa以下の高度では利用しないこととした。

※ QI(Quality Indicator)

EUMETSATで開発された品質管理指標で(Holmlund 1998)、0~100の値をとり、値が大きいほど品質が良いことを示す。QIには数値予報モデルとの整合性を考慮に入れた予報値チェックありQIと、数値予報モデルとの整合性を考慮しない予報値チェックなしQIがある。



Dual-Metop AMVの同化利用にあたっては、全球数値予報システムを用いた予備調査におけるO-B(観測値と第一推定値の差)統計の結果等を踏まえ、以下の品質管理処理(QC)を実施することとした。

- 予報値チェックありQI(Quality Indicator)(Holmlund 1998)を利用することで、O-Bの負バイアスが大きな上層や正バイアスの大きな下層などの低品質と思われるデータを排除することが期待できる結果であったため、QI閾値(85以上)によるQCを使用する。排除しきれない低品質と思われるデータについては、利用しない領域を指定する方法(ブラックリスト)で行う。
- 低緯度では、中層から上層で東風や西風の強風バイアスが大きな地域がみられた。また、中・低緯度では静止気象衛星のAMVの方が精度がよいと考えられるので、高緯度域(50° ~88° N/S)に限定して利用する。
- QIによるQCを行っても中高緯度の上層では第一推定値に対する西風の弱風バイアスがみられるため、300hPaより上層は利用しない。
- 陸下の下層、特に冬季の陸上でバイアスやばらつきが大きいいため、陸上では下層(700hPa以下)は利用しない。

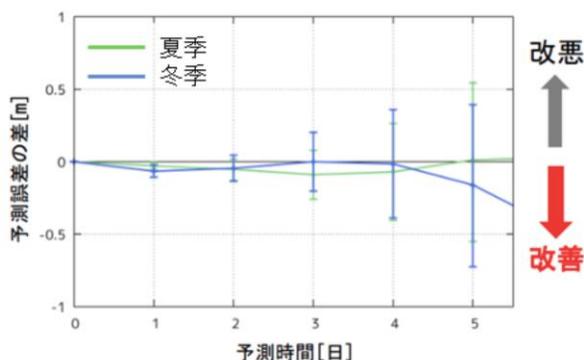
実験設定

CNTL: 2022年4月時点のルーチン相当の設定

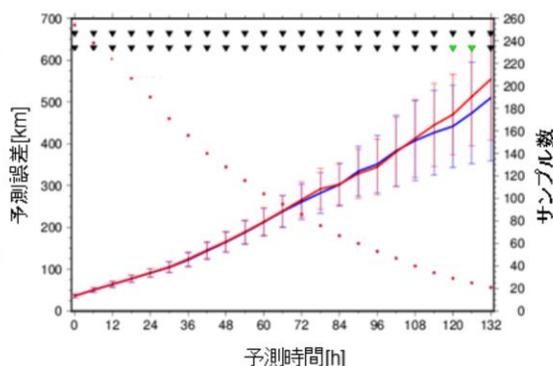
TEST: CNTL + Dual-Metop AMV、RTTOV更新

実験期間: (夏季)2020年6月20日～2020年10月11日、(冬季)2020年11月20日～2021年3月11日

北半球 対解析Z500
RMSEの変更前後の差



台風進路予測精度の変更前後の比較



対解析Z500 RMSEが、予測初期(FT24,48)で改善
(FT48ではRMSEが0.05m程度減少)

気象庁の業績指標のうち、数値予報モデルの精度向上(地球全体の大気を対象とした数値予報モデルの誤差)ではFT48で、12.8m(R2)→11.7m(R7)としている。これは、年間0.2～0.3m程度の誤差減少を想定。

今回の変更では、台風の進路や発達予測について、統計的に有意な差はほぼ見られなかった。

赤: 変更後(TEST)
青: 変更前(CNTL)



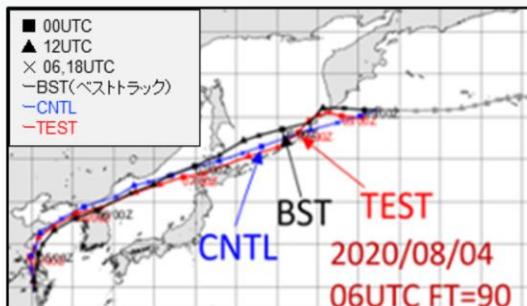
Dual-Metop AMV新規利用およびRTTOV-13への更新の効果を確認するため、2022年4月時点の現業全球数値予報システムと同等の対照実験(CNTL)と、これに変更を加えた実験(TEST)の比較を行った。実験期間は2020年6月20日から10月11日(夏季)、2020年11月30日から2021年3月11日(冬季)で、それぞれ約3ヶ月が検証対象期間である。ここでは、総観規模現象の予測精度の指標となる500hPaのジオポテンシャル高度、及び台風の進路予測の比較を示す。左図に北半球500hPaジオポテンシャル高度の予測誤差(二乗平均平方根誤差)の変更前後の差の平均を示す。夏季、冬季ともにFT=24,48で誤差の減少を示しており、特に観測データ利用のインパクトの影響が大きい予測初期において改善傾向であった。一方、台風の進路予測の検証(右図)では、変更のインパクトはほぼ中立であった。

左図: 2020年7～9月(緑色、夏季)と2020年12月～2021年2月(青色、冬季)の北半球500hPaジオポテンシャル高度予測の初期値に対する予測誤差(二乗平均平方根誤差)の変更前後の差の平均。エラーバーは95%の信頼区間を表す。単位はm。負の値は変更後で予測誤差が改善していることを示す。横軸は予測時間。単位は日。

右図: 台風中心位置予測誤差(単位はkm)の比較。実験期間中(夏季、冬季)に存在した台風に関する平均を示す。検証には気象庁のベストトラックを用いた。青は変更前、赤は変更後。横軸は予測時間(単位は時間)。赤色点はサンプル数(右軸)。エラーバーは95%の信頼区間を示し、改善が有意と確かめられた場合はグラフ上方の三角形が緑色。(上段の三角形はデータ系列の相関を考慮した場合、下段の三角形は相関を考慮しない場合)

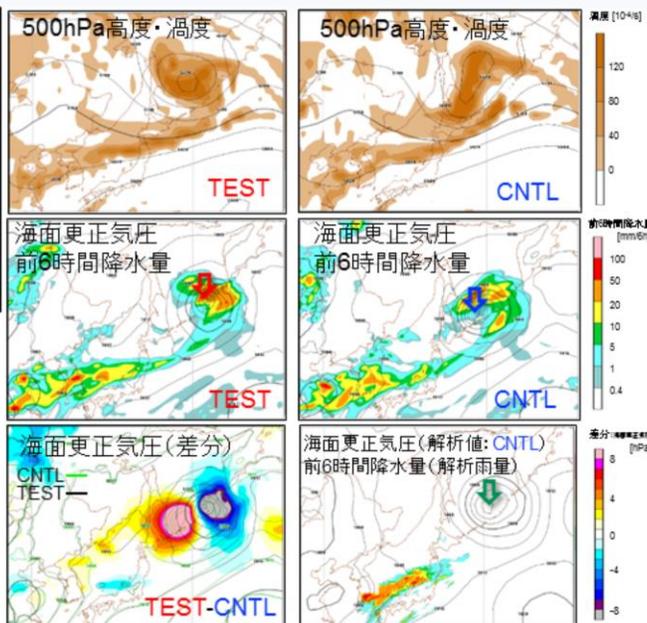
台風進路予測に改善が見られた事例

2020/08/04 06UTC 初期値
FT=90



CNTL、BST、TESTそれぞれ矢印で示した位置はFT=90の擾乱の位置を示す。日本の北のトラフの予測の違いにより、北海道付近から擾乱の進行速度が速くなり現実に近い予測となった。

今回、利用開始したDual Metop AMVが北半球高緯度で利用され、初期値の精度が改善した効果

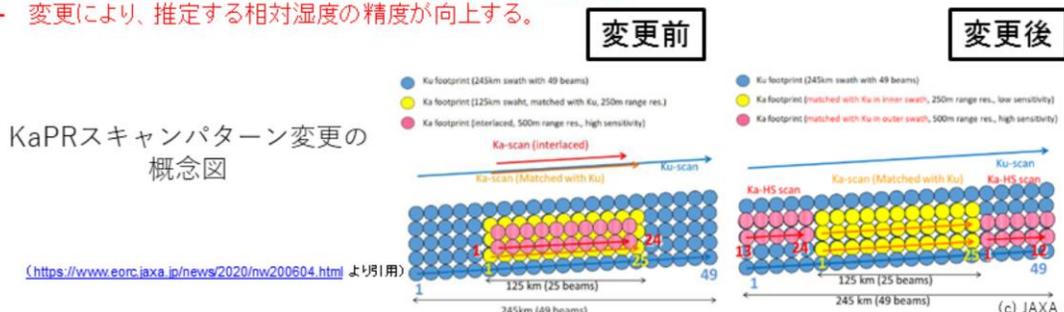


台風の進路予測について、統計的な検証ではほぼ中立であったが、ここでは進路予測に改善がみられた事例について示す。左図は、2020年8月4日06UTC初期値の2020年台風第4号の進路予測結果を示す。青線が変更なし(CNTL)、赤線が変更あり(TEST)、黒線は気象庁ベストトラック(BST)で図中の凡例の印と数字はそれぞれ台風の中心位置と日時(記載時刻はすべて00UTC)を示している。図中の矢印で示した位置はBST、CNTL、TESTそれぞれのFT=90の擾乱の位置を示す。FT=90にかけてCNTLはBSTと比較して擾乱の進行速度が遅かった一方、TESTでは速くなりBSTに近い予測結果となっている。右側の図はFT=90におけるTESTとCNTLの予測の比較結果を示す。CNTLとTESTでは日本の北にある500hPa高度のトラフの深さなどに差異が生じており、その影響で北海道付近を進む擾乱の進行速度がTESTで速くなった結果、図中の矢印で示すように擾乱の位置についてTESTの方が実況に近い予測となっていた。これは、TESTにおいてDual-Metop AMVが北半球高緯度域で同化され、初期値の精度が改善した効果によるものと考えられる。

これらの結果を受け、2022年6月30日より、全球数値予報システムにおいてDual-Metop AMVデータの利用を開始し、RTTOV-13の一部機能を導入した。

メソ数値予報システムにおける GPM/DPR の利用手法改良

- GPM主衛星(GPM-core)は降水の観測を目的に、日米(JAXAおよびNASA)を中心とした国際協力の下で進められている全球降水観測計画(GPM計画)の軸になる人工衛星。GPM-coreに搭載された二周波降水レーダー(DPR)は、降水の鉛直分布が得られるセンサー。
 - Ku帯(13.6GHz、KuPR)とKa帯(35.5GHz、KaPR)の二周波。
 - KaPRには感度の異なるKaMSとKaHS(高感度観測)がある。
- KuPRとKaHSの反射強度をメソ解析で現業利用している。(2016年3月24日から)
 - 反射強度から推定した相対湿度を疑似観測値として同化。
- 今回の改良は、JAXAによる観測方式の変更(2018年5月21日)に伴う、データ利用方法の変更
 - KaHSの観測(図の赤丸)が外側へ →品質確認して利用再開
 - KaMSとKaHSの観測領域が分かれた →KaMSの新規利用
 - 変更により、推定する相対湿度の精度が向上する。



気象庁のメソ解析では、2022年6月30日に国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構(JAXA)が米国航空宇宙局(NASA)と共同で開発した全球降水観測計画(GPM)主衛星に搭載している、二周波降水レーダ(DPR)の利用方法を改良した。ここでは、データの概要、利用方法について説明する。他の改良項目を含めての実験結果については後述する。

GPM主衛星(GPM-core)は降水の観測を目的に、日米(JAXAおよびNASA)を中心とした国際協力の下で進められている全球降水観測計画(GPM計画)の軸になる人工衛星である。GPM-coreに搭載されたDPRは、Ku帯の降水レーダー(KuPR)とKa帯の降水レーダー(KaPR)で構成され、異なる周波数で同じ水物質を観測することにより、水物質の粒径分布や降水種別の高精度な推定が可能となっている。メソ解析では、2016年3月24日からKuPRとKaPRの反射強度因子から相対湿度プロファイルを推定し、その推定された相対湿度プロファイルを4次元変分法で同化している(幾田 2016)。今回の改良は、図に示すJAXAによる観測方式の変更に伴うデータ利用法の変更となる。具合的には、観測方式の変更により利用を中断していたKaHS(KaPRの高感度観測)の利用を再開し、KaMS(二周波観測)を新規に利用する。

KuPR、KaHS反射強度データの同化手法

同化手法は従来通り

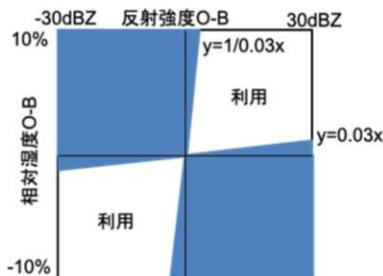
1. レーダーシミュレータで第一推定値の反射強度(Ka帯・Ku帯)を推定。
 - 雨・雪・霰のみ考慮。
 - 降雨減衰なし。 ←減衰補正された観測値を用いるため。
 - ビームパスの傾き、広がり、屈折は無視。 ←水平解像度5kmで粗いため。
2. 観測値をアウトターモデル格子で平均化。
3. バイアス補正
 - 解析ごとに気温別のバイアス(観測値-第一推定値(O-B)の平均値)を求めて引く。
4. 第一推定値の反射強度・相対湿度・気温の関係を用いて、バイアス補正済みの観測値の反射強度から相対湿度を推定。
 - カーネル密度推定を用いた最尤推定。
5. 水平15km(インナーモデルの格子間隔)、鉛直500m間隔で平均化。
6. 推定した相対湿度を品質管理後に疑似観測値として同化。
 - 観測誤差は5%。 ←経験的に設定。

今回のメソ解析におけるDPRの利用手法改良において、同化手法自体は従来通りである。

KuPR、KaHS反射強度データの品質管理

従来処理

- 反射強度は観測値・第一推定値ともに、15dBZ未満または50dBZより大きいものは利用しない。
- 0°C未満で推定された相対湿度は利用しない。
 - 固相(雪、霰)から求めた反射強度はモデルバイアスが大きいため。
- 観測値から第一推定値を引いた値(O-B)の絶対値が閾値より大きいものは利用しない。(グロスエラーチェック)
 - 反射強度: 30dBZ
 - 相対湿度: 10%
- 反射強度O-Bと相対湿度O-Bが逆符号、または差が大きいときは利用しない。(右図)



新規追加処理

- KaMSは、利用下限値を**20dBZ**に設定。(KaMSは、KaHSより観測限界値が大きい)
 - KaHSとKuPRの利用下限値は15dBZ。
- 観測値の下限値チェックを行ったあと、KaHSとKaMSは同じ観測値として一緒にアウターモデル格子の平均化を行う。(前頁の項目2)



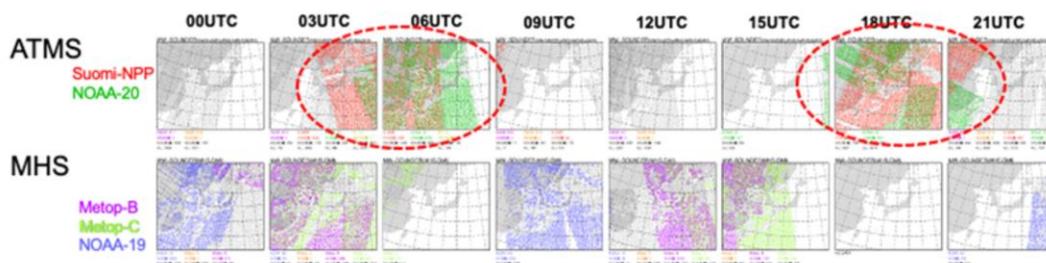
今回のメソ解析におけるDPRの利用手法改良においては、品質管理処理を変更する。まず、KaHSとKuPRの利用下限値は従来通り15dBZに設定する一方、新たに利用を開始するKaMSの下限値を20dBZに設定する。これは、KaMSの観測限界値がKaHSよりも大きいことによる(Masaki et al. 2022)。観測値の下限値チェックを行ったあと、同化処理におけるアウターモデル格子の平均化の際はKaHSとKaMSを区別せずに平均化する。また、今回の改良においては従来のバイアス補正処理における一部不具合の修正も併せて実施した。これらの改良により、GPM/DPR利用手法改良単独の性能評価試験において、データ同化に利用する相対湿度の推定精度が向上し、降水予測スコアが予測前半を中心に改善することを確認した(図略)。他の改良項目を含めての実験結果については後述する。



メソ数値予報システムにおける マイクロ波サウンダATMS観測データの利用開始 (水蒸気観測チャンネル)

• ATMS (Advanced Technology Microwave Sounder)

- マイクロ波サウンダの一種
- 米国の極軌道衛星Suomi-NPP、NOAA-20に搭載
- 酸素や水蒸気の吸収帯付近についての輝度温度を観測し、気温・水蒸気の鉛直プロファイルについての情報を得る
- マイクロ波サウンダAMSU-AとMHSと近い周波数帯で観測を行う後継機器
 - サンプルング間隔や観測幅、チャンネル数増強
- 全球解析では2017年3月29日から気温・水蒸気観測チャンネルデータの利用を開始
- メソ解析では水蒸気観測チャンネルデータの利用から
 - 気温観測チャンネルデータの利用にはバイアス補正手法等に課題(利用に向けた開発を継続)



メソ解析における解析時刻ごとのマイクロ波サウンダ(水蒸気チャンネル)の利用データ分布例(2020年6月26日)
既存利用中のマイクロ波水蒸気サウンダ(MHS)のデータの無いところにデータが入りようになる(赤色破線で示した領域)



気象庁のメソ解析では、2022年6月30日に米国の極軌道気象衛星Suomi-NPP及びNOAA-20搭載のマイクロ波サウンダ(ATMS)の輝度温度データの利用を開始した。ここでは、データの概要、利用方法について説明する。

ATMSは人工衛星搭載のマイクロ波サウンダの一種で、米国の極軌道気象衛星Suomi-NPP及びNOAA-20に搭載されている。同じくマイクロ波サウンダであるAMSU-A(気温サウンダ)及びMHS(水蒸気サウンダ)の後継センサにあたり、一つのセンサにAMSU-A、MHSとほぼ同等のチャンネルが装備されている他、いくつかのチャンネルが追加されている。気温、水蒸気の観測情報が得られるATMSの輝度温度データは、数値予報精度の維持、改善において重要な衛星データであり、全球解析では2017年3月29日から気温、水蒸気観測チャンネルのデータの利用を開始している(平原 2017; 村田 亀川 2020)。

メソ解析、局地解析においてもATMSの輝度温度データの同化利用に向けた開発を進めていたところ、事前の調査において、これらの領域モデルにおけるATMSの気温チャンネルの利用にあたってはバイアス補正手法等に課題があることが判明したため、今回は水蒸気チャンネル(ch18-22)のデータのみ同化利用することとした。また、MHSと同じく、海上・海氷・陸上・雲域で同化する一方、雨域は利用しない。図は、メソ解析におけるATMS及びMHSの輝度温度データ(水蒸気チャンネル)のデータ分布例を示す。ATMSの輝度温度データを利用することで、既に利用中のMHSのデータが無い時間、領域のデータが新たに利用可能となることがわかる。この改良により、ATMS観測データ利用開始単独の性能評価試験において、水蒸気に感度のある衛星観測に対して第一推定値の整合性が改善傾向となるなどのインパクトが見られた(図略)。(局地解析でのATMS利用開始に関しては後述)

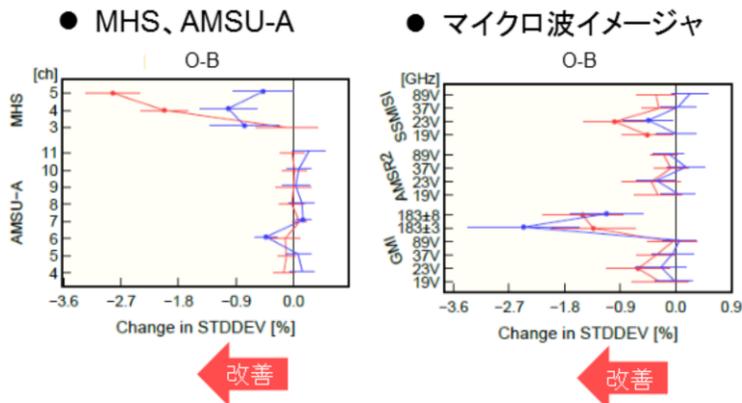
実験設定

CNTL: 2022年4月時点のルーチン相当の設定
 TEST: CNTL + GPM/DPR利用手法改良、ATMS利用開始、RTTOV更新
 (TESTの境界値は前述の全球TEST実験のデータを使用)
 実験期間: (夏季)2020年7月1日~2020年7月31日、(冬季)2021年1月1日~2021年1月31日

観測値と第一推定値の差の標準偏差の変化率[%]

—: 2020年7月
 —: 2021年1月

第一推定値の値が、
他の観測データの値に
近づいているかどうか?



観測値と第一推定値の差 (O-B) の標準偏差の減少は解析場の変化を通じた、観測データ同化の影響が現れやすい予測初期での予測値と観測値の差の標準偏差の減少(改善)を示す。

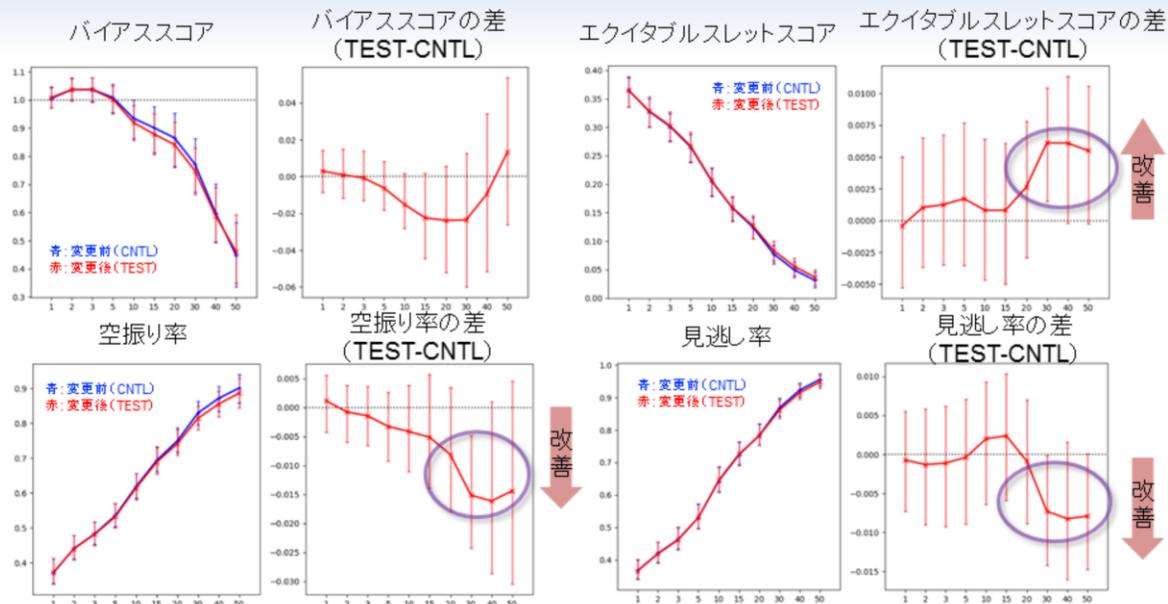
水蒸気に感度のあるチャンネルで改善
 (第一推定値における水蒸気場の表現が改善)

ここでは、前述した全球数値予報システムの改良項目 (Dual-Metop AMV新規利用およびRTTOV-13への更新) およびメソ数値予報システムの改良項目 (GPM/DPRの利用手法改良、マイクロ波サウンダATMS観測データの利用開始およびRTTOV-13への更新) がメソ数値予報システムに与える影響を評価するために実施した試験の結果を示す。2022年4月時点の現業メソ数値予報システムと同等の対照実験 (CNTL) と、これに変更を加えた実験 (TEST) を行い、TESTでは全球数値予報システムの実験 (TEST) による境界値データを使用している。実験期間は2020年7月1日から7月31日 (夏季)、2021年1月1日から2021年1月31日 (冬季) である。

ここでは、今回の改良には直接関係していないマイクロ波サウンダAMSU-A (気温に感度あり)、MHS (水蒸気に感度あり) およびマイクロ波イメージャの観測データを用いて、第一推定値への影響を示す。特に水蒸気に感度のあるチャンネル (MHSおよびGMI183±3、183±7GHz) のデータの観測値と第一推定値の差の統計で標準偏差が減少しており、第一推定値と観測値の整合性が向上していることがわかる (図)。第一推定値の精度向上は、解析予報サイクルを通じて同化される観測値の影響を受けた結果であり、解析値の精度が向上したことを示唆する。

図: TESTのCNTLに対するマイクロ波気温サウンダMHS、AMSU-Aおよびマイクロ波イメージャデータの各チャンネルにおける観測値と第一推定値の差の標準偏差。青線は夏季 (2020年7月)、赤線は冬季 (2021年1月)。標準偏差の図のエラーバーは95%信頼区間、丸い点は変化が統計的に有意であることを示す。

降水予測の精度改善(対解析雨量:夏季:前3時間降水量(20km格子平均)の閾値別検証)



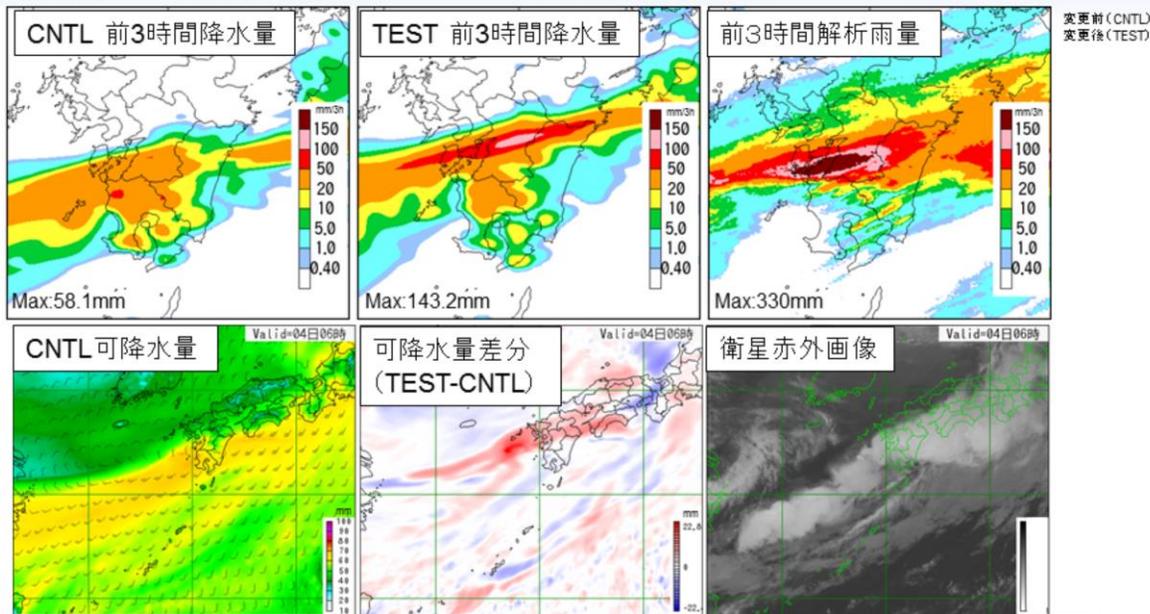
(メソ数値予報システムの改良に加え、全球数値予報システムの改良も外部境界値として取り込んだ結果)
閾値30mm/3h以上で空振り率と見逃し率が減少し、エクイタブルスレットスコアが改善傾向

ここでは、降水予測検証の結果を示す。閾値30mm/3h以上で空振りと見逃しが減少し、エクイタブルスレットスコアが改善傾向であった。

降水予測の精度改善(事例)

初期時刻: 2020年7月3日03UTC FT=18 予想対象時刻: 04日06JST

メソ数値予報システムの改良に加え、全球数値予報システムの改良も外部境界値として取り込んだ結果。



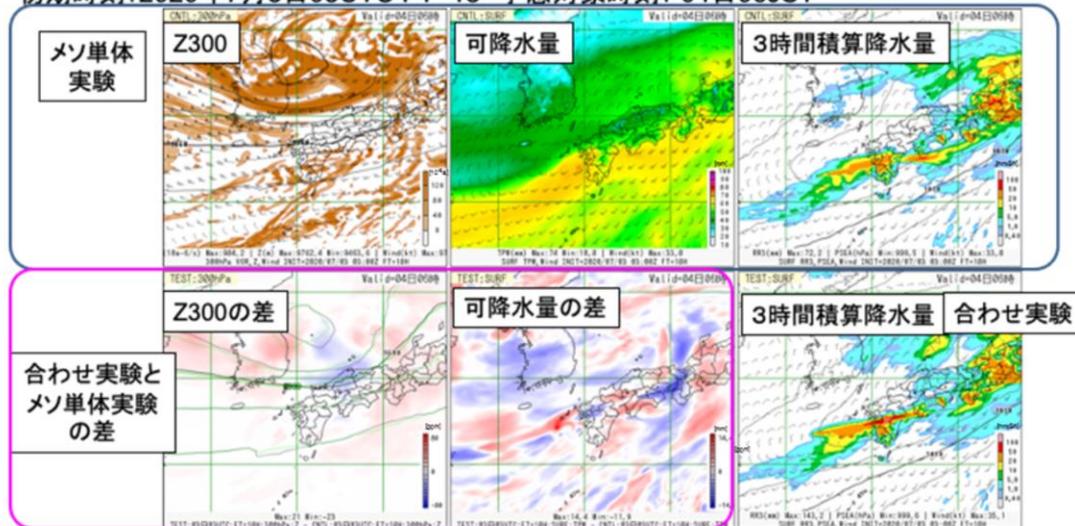
TESTでは九州西海上で可降水量が増加し、3時間で100mm以上の降水量を予測。

ここでは、実験期間中におけるメソ数値予報システムの改善事例を示す。図は、2020年7月3日03UTCを初期値とした18時間予測の事例で、CNTLとTESTの可降水量を比較するとTESTでは九州西海上で可降水量が増加しており、熊本、鹿児島 の県境付近に見られる強雨域についてTESTの降水量予測が解析雨量に近づいている。

降水予測の精度改善(事例)

全球数値予報システムの変更を合わせて評価した場合(前頁)と、メソ数値予報システムの変更単体で評価した場合を比較して、**全球境界値のメソ数値予報システムへの影響を確認**

初期時刻:2020年7月3日03UTC FT=18 予想対象時刻:04日06JST



全球境界値の変更により、上層トラフの予測が深くなり、線状降水帯に伴う降水予測がより現実に近くなった。メソモデルのより長い時間の予測では、境界値の影響が大きい。



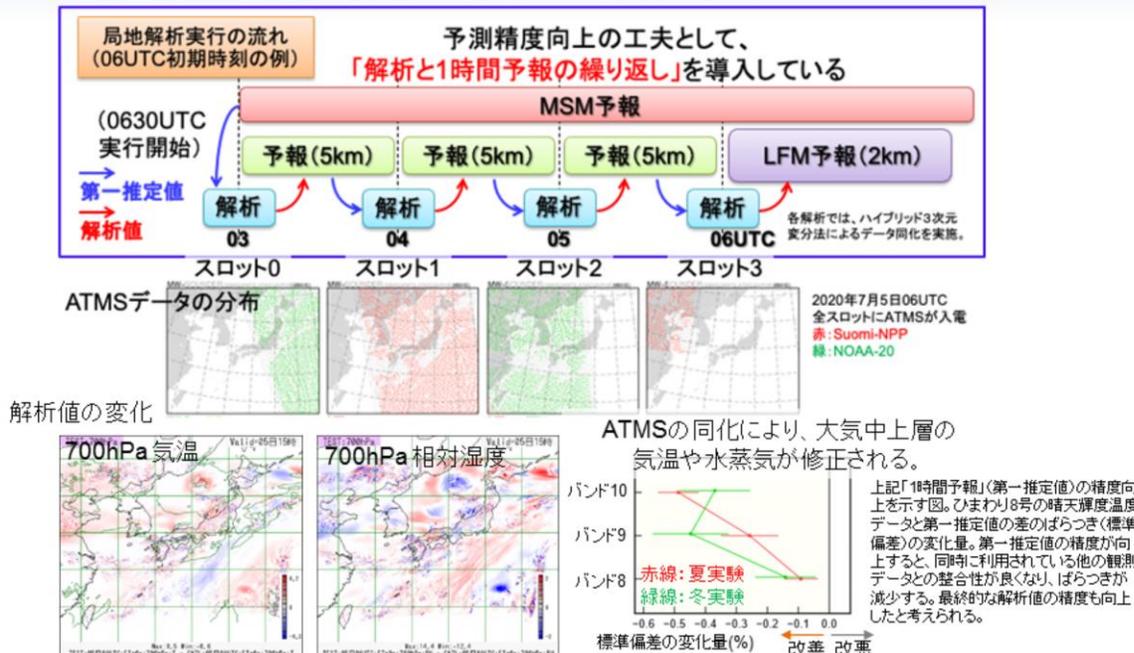
前頁で示した改善事例について、全球数値予報システムの変更を合わせて評価した場合(前頁)と、メソ数値予報システムの変更単体で評価した場合を比較して、全球モデルによる境界値のメソ数値予報システムへの影響を確認する。図は、全頁と同じく2020年7月3日03UTCを初期値とした18時間予測の事例で、上段はメソ数値予報システムの改良項目のみを導入した実験の結果を示す。下段は全球数値予報システムの変更と合わせた実験(合わせ実験)と、メソ数値予報システムの改良項目のみを導入した実験結果の差分(下段左図:300hPaジオポテンシャル高度の差分、下段中図:可降水量の差分)および合わせ実験による降水予測の結果(下段右図)を示す。一般に、メソモデルのより長い時間の予測では全球モデルによる境界値の影響が大きくなるが、合わせ実験では上層トラフの予測が深まって線状降水帯に伴う降水予測がより現実に近くなっており、境界値変更の影響が降水予測の改善に寄与していることが考えられる。

これらの結果を受け、2022年6月30日より、メソ数値予報システムにおいてGPM/DPRの利用手法改良、マイクロ波サウンダATMS観測データ(水蒸気観測チャンネル)の利用開始およびRTTOV-13への更新を導入した。

● 局地 局地数値予報システムにおける マイクロ波サウンダATMS観測データの利用開始 (水蒸気観測チャンネル)

● ATMS (Advanced Technology Microwave Sounder)

－ メソ解析と同等に、水蒸気観測チャンネルデータの利用から



気象庁の局地解析では、2022年8月9日に米国の極軌道気象衛星Suomi-NPP及びNOAA-20搭載のマイクロ波サウンダ(ATMS)の輝度温度データの利用を開始した。前述のメソ解析と同様に、局地解析でのATMSの気温チャンネルの利用にあたってはバイアス補正手法等に課題があるため、水蒸気チャンネル(ch18-22)のデータのみ同化利用することとしている。

局地解析は高頻度で速報性が求められるデータ同化システムであることから、計算負荷が小さい3次元変分法を採用している。3次元変分法の場合は、原理的に解析対象時刻の観測データしか利用できないという制約がある。そのため、局地解析では、初期値作成時刻の3時間前から、3次元変分法による解析と1時間予報の繰り返しによる解析・予報サイクルを実行し、初期値作成対象時刻の前3時間分の観測データの情報を解析値に取り込むようにしている。図に、ATMSのデータ分布例と、ATMSの輝度温度データを同化した場合の700hPaの気温、相対湿度の解析値の変化を示す。ATMSの輝度温度データを同化利用することで、大気中上層の気温や水蒸気量が修正されていることがわかる。右下の図は、局地数値予報システムにおけるATMS利用単独の性能評価試験(実験期間:夏期間(2020年7月2日～15日)、冬期間(2020年1月11日～21日)、3時間間隔実行による試験)において、今回の改良には直接関係していないひまわり8号の晴天放射輝度温度(CSR)の観測データを用いて、第一推定値への影響を示したものである。CSRは対流圏の水蒸気に感度があるデータで、観測値と第一推定値の差の統計で標準偏差が減少しており、第一推定値と観測値の整合性が向上していることがわかる。第一推定値の精度向上は、解析予報サイクルを通じて同化される観測値の影響を受けた結果であり、解析値の精度が向上したことを示唆する。

実験設定

CNTL: 2022年4月時点のルーチン相当の設定

TEST: CNTL + ATMS利用開始、RTTOV更新

(TESTの第一推定値、境界値には前述のメソTEST実験のデータを使用)

実験期間: (夏季)2020年7月2日~2020年7月8日、(冬季)2021年1月4日~2021年1月14日

降水予測の精度改善(対解析雨量:前3時間降水量(10km格子平均)の閾値別検証)

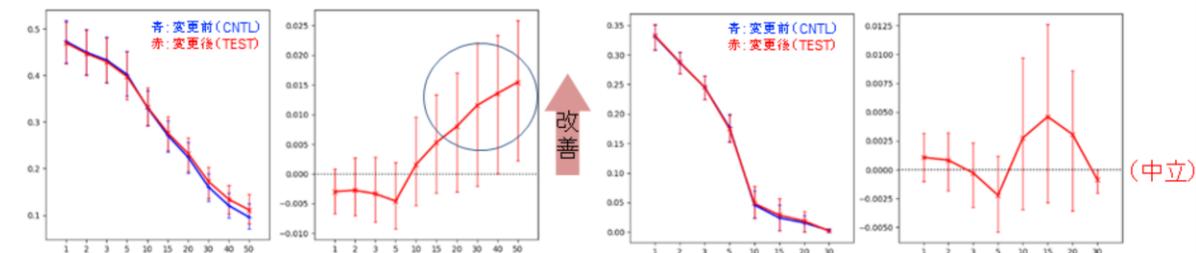
夏季

冬季

エクイタブルスレットスコア

エクイタブルスレットスコアの差
(TEST-CNTL)

エクイタブルスレットスコア

エクイタブルスレットスコアの差
(TEST-CNTL)

(局地数値予報システムの改良に加え、全球・メソ数値予報システムの改良も外部境界値等として取り込んだ結果)
夏季実験で閾値15mm/3h以上でエクイタブルスレットスコアが改善傾向

ここでは、前述した全球数値予報システムの改良項目 (Dual-Metop AMV新規利用およびRTTOV-13への更新) およびメソ数値予報システムの改良項目 (GPM/DPRの利用手法改良、マイクロ波サウンダATMS観測データの利用開始およびRTTOV-13への更新) の影響も含めて局地数値予報システムの改良 (マイクロ波サウンダATMS観測データの利用開始およびRTTOV-13への更新) を評価するために実施した試験の結果を示す。2022年4月時点の現業局地数値予報システムと同等の対照実験 (CNTL) と、これに変更を加えた実験 (TEST) を行い、TESTでは前述のメソ数値予報システムの実験 (TEST) による境界値データを使用している。実験期間は2020年7月1日から7月31日 (夏季)、2021年1月1日から2021年1月31日 (冬季) である。図は降水予測検証の結果を示す。夏季において閾値15mm/3h以上でエクイタブルスレットスコアが改善傾向であった。

● 局地

局地数値予報システムにおける観測データの利用手法改良

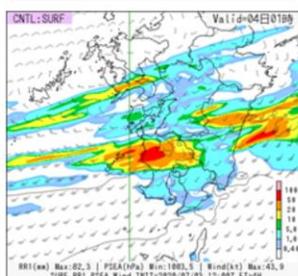
改良の効果

降水予測の精度改善(事例)

初期時刻: 2020年7月3日12UTC FT=4 予想対象時刻: 04日01JST

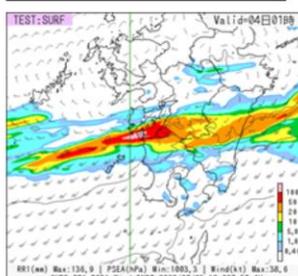
局地数値予報システムの改良に加え、全球・メソ数値予報システムの改良も外部境界値等として取り込んだ結果。

CNTL 前1時間降水量



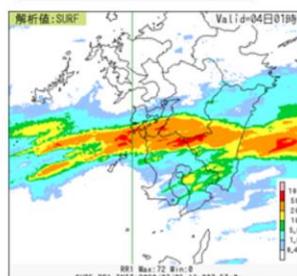
Max: 82.3mm

TEST 前1時間降水量



Max: 136.9mm

前3時間解析雨量



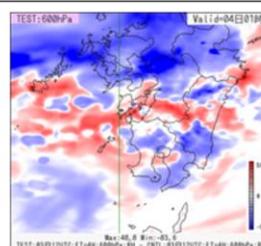
Max: 72mm

変更前 (CNTL)
変更後 (TEST)

TESTでは降水分布が実況(解析雨量)に近づいた。

600hPa相対湿度差分(TEST-CNTL)

600hPa付近の水蒸気場の予測に差異。変更後(TEST)では相対湿度の少ないところをより少なく、相対湿度の多いところをより多くするように変化している。このような変化はメソの予測値の差からもたらされている。



ここでは、実験期間中における局地数値予報システムの改善事例を示す。図は、2020年7月3日12UTCを初期値とした4時間予測の事例で、熊本、鹿児島、宮崎県付近に見られる強雨域についてTESTの降水量予測が解析雨量に近づいている。予測対象時刻の600hPa相対湿度のTEST(変更後)とCNTL(変更前)の差分を確認すると、相対湿度の少ないところをより少なく、相対湿度の多いところをより多くするように変化しており、このような変化は後述するようにメソの予測値の差からもたらされていた。

● 局地

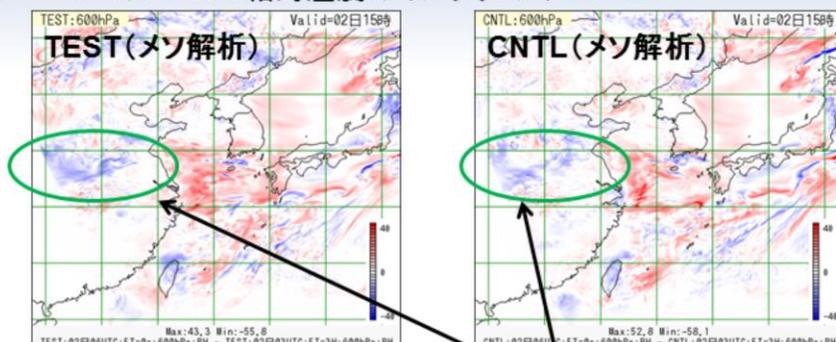
局地数値予報システムにおける観測データの利用手法改良

改良の効果

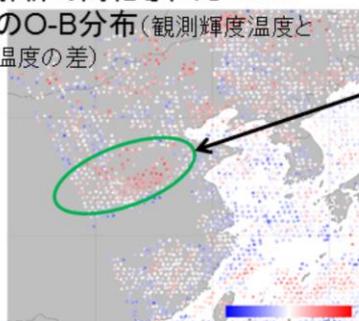
降水予測の精度改善(事例)

7月2日06UTCの600hPa相対湿度のインクリメント

前スライドの相対湿度の差異をもたらしたメソ解析の差異を遡ったもの。



06UTC解析で同化されたATMSのch20のO-B分布(観測輝度温度と計算輝度温度の差)



TESTの方が水蒸気を減らす方向の変化がわずかながら大きい。

モデルの水蒸気が観測に比べて多いという観測シグナル

メソでATMSの水蒸気チャンネルが同化されることで、上流で大気中層付近の水蒸気場が改善され、その効果が局地にも波及してきた結果として、今回の事例で降水予測が改善したと考えられる。

上流の水蒸気の解析精度が降水予測にとって重要

図は、局地数値予報システムの初期値、境界値で参照したメソ数値予報システムにおけるメソ解析でのインクリメントを示しており、前頁で示した600hPa相対湿度の差異の起源を遡ったものである。図中の緑色の丸で示した領域においてはTESTの方が水蒸気を減らす方向の変化がわずかに大きく、この差異が局地数値予報システムで参照するメソモデルの結果に影響していた。メソ解析のTESTでは、当該領域においてATMSの水蒸気チャンネルの輝度温度が同化されることで、第一推定値の水蒸気が観測に比べて多い状況が修正されている。大気中層付近の水蒸気場が改善された効果が局地数値予報システムにも波及し、今回の事例で降水予測が改善したと考えられる。

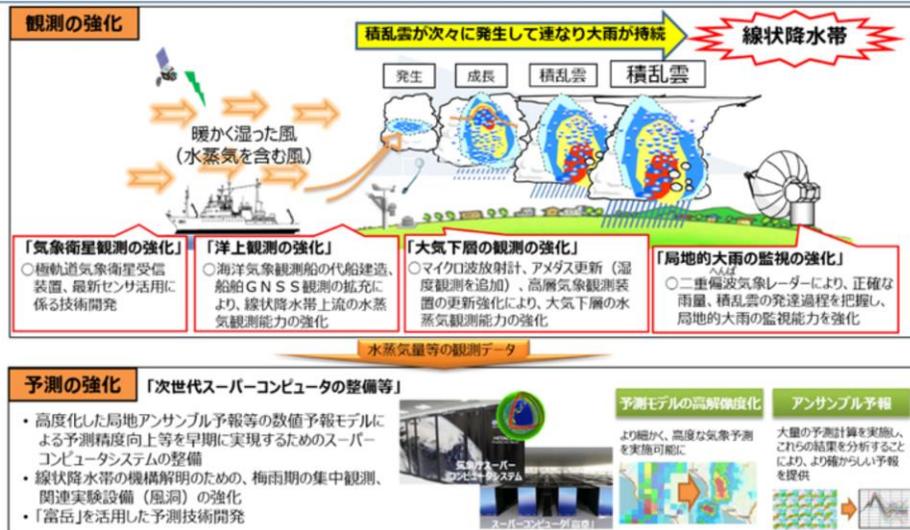
これらの結果を受け、2022年8月9日より、局地数値予報システムにおいてマイクロ波サウンダATMS観測データ(水蒸気観測チャンネル)の利用開始およびRTTOV-13への更新を導入した。

線状降水帯の予測精度向上に向けた水蒸気観測データの利用開発について

観測データ利用法の改良

線状降水帯の予測精度向上に向けた取組 (観測・予測の強化)

線状降水帯は、湿った空気の流入が持続することで次々と積乱雲が発生し、線状の降水域が数時間にわたってほぼ同じ場所に停滞することで大雨をもたらすもの。線状降水帯は、現状の観測・予測技術では、正確な予測が困難なため、水蒸気観測等の強化、気象庁スーパーコンピュータの強化や「富岳」を活用した予測技術の開発等を早急に進め、速やかに防災気象情報の高度化に反映し、住民の早期避難に資する情報を提供する。



(気象庁HPより)

https://www.jma.go.jp/jma/kishou/now/jma_suigai/jma_suigai.html

本節後半では、線状降水帯の予測精度向上に向けた水蒸気観測データの利用開発について報告する。気象庁では、線状降水帯の予測精度向上等に向けた取組の強化・加速化として、「観測の強化」、「予測の強化」、「情報の改善」に関する取り組みを進めている。このうち「観測の強化」としては、「アメダスへの湿度計導入」、「気象レーダーの更新強化」、「洋上の水蒸気等の観測の強化」、「マイクロ波放射計の整備等」、「高層気象観測の強化」、「気象衛星観測の強化」に取り組んでいる。

線状降水帯の予測精度向上の加速化に向けた観測の強化

【観測の強化】線状降水帯の予測精度向上の加速化に向けた観測の強化

本項で扱う項目

「アメダスへの湿度計導入」

- 令和3年度までに157地点に整備
- 令和4年度は西日本及び南西諸島並びに太平洋南側沿岸地域（208箇所分）に整備 機器製作中

「気象レーダーの更新強化」

- 種子島及び室戸岬の二重偏波レーダーについて、それぞれ4月に運用開始及び6月から運用開始予定
- 新潟・沖縄・松江・名瀬を二重偏波レーダーに更新（令和4～5年度） 機器製作中

「洋上の水蒸気等の観測の強化」

- 機動的な気象観測を担う海洋気象観測船「凌風丸」の整備（令和5年度末） 建造中
- 東シナ海～西日本太平洋側を運航する大型の民間船舶10隻にGNSS水蒸気観測装置を5月末から順次設置 設置調整中

「マイクロ波放射計の整備等」

- 西日本及び太平洋南側沿岸域の17箇所から順次設置し、水蒸気観測を実施 設置調整中

「高層気象観測の強化」

- つくば・福岡・鹿児島の高層気象観測を自動化し、適時に高頻度の臨時観測が可能に（令和4年度） 機器製作中

「気象衛星観測の強化」

- 極軌道気象衛星受信装置の更新・最新センサ活用に係る技術開発 実施中
（極軌道気象衛星等を通じて得られる新たなデータを数値予報へ取込むための整備・開発）

気象庁 5

（令和4年5月31日 線状降水帯予測精度向上ワーキンググループ（第4回）資料1より）
https://www.jma.go.jp/jma/kishou/shingikai/kondankai/serjokousuitai_WG/part4/gaiyou.html



気象庁では、これらの線状降水帯の予測精度向上に向けて整備された水蒸気観測データを数値予報で早期に利用するための開発を進めている。ここでは、洋上の水蒸気等の観測（民間船舶GNSSデータ）、アメダス湿度計データおよびマイクロ波放射計データの利用に関する開発の進捗状況について報告する。

民間船舶GNSS可降水量データの利用

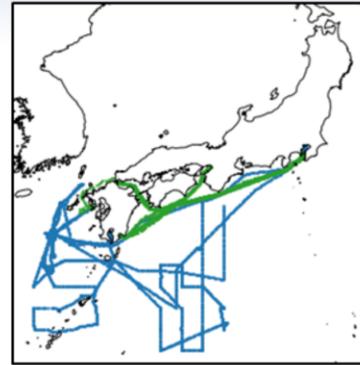
船舶GNSS可降水量

- 船舶に受信機を設置し、上空の水蒸気量(可降水量)を算出
- 2021年8月からメソ解析で利用中
 - 気象庁観測船(凌風丸、啓風丸)
 - 海上保安庁測量船
- 2022年度より、民間船舶(旅客船、貨物船)10隻の協力を得て観測体制を拡充
- 観測データの通報が開始され次第、品質確認後に順次メソ解析で利用開始
 - 2022年9月末時点で、民間船舶については4隻からの観測データの利用を開始
- 民間船舶GNSS可降水量データの品質は地上GNSSや気象庁観測船によるデータの品質と同等
- 2022年度末の局地解析での船舶GNSS可降水量の利用開始に向けて開発中

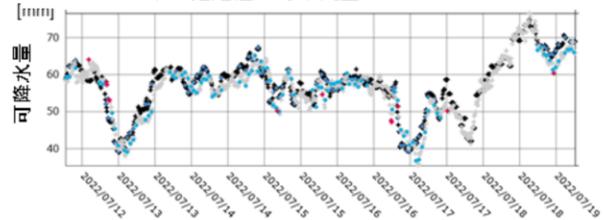
船舶GNSSデータ分布例

(2022/06/01-07/19)

青: 気象庁観測船 緑: 民間船舶



ある民間船舶のGNSS可降水量の観測値と第一推定値の時系列図



気象庁では線状降水帯の予測精度向上のための取り組みの一環として数値予報での船舶GNSS観測データ利用を進めており、2021年8月にメソ解析において気象庁観測船および海上保安庁測量船による船舶GNSS可降水量の利用を開始した(数値予報開発センター 2022)。2022年度からは民間船舶(旅客船、貨物船)10隻の協力を得て観測体制が拡充され、民間船舶からGNSS可降水量データの通報が開始され次第、データの品質確認後に順次メソ解析での利用を開始している。2022年9月末時点で4隻の民間船舶からの観測データについて利用を開始した。上図は2022年6月1日から7月19日の期間を対象とした船舶GNSSのデータ分布を示している(青: 気象庁観測船、緑: 民間船舶)。この期間の民間船舶からのGNSS可降水量データは九州、四国太平洋側海域の定期航路を中心とした領域に分布しており、気象庁観測船による観測とは異なる領域のデータが利用可能となっていることがわかる。下図はある民間船舶によるGNSS可降水量の観測値と第一推定値の時系列図で、両者の値は概ね同様の变化傾向を示している。このほか、民間船舶GNSS可降水量データの品質は地上GNSSや気象庁観測線によるデータの品質と同等であることを確認している(図略)。今後の計画として、2022年度末の局地解析での船舶GNSS可降水量の利用開始を予定しており、引き続き開発を進めている。

アメダス湿度計データの利用開発

追加されたアメダス湿度観測
令和2年度 令和3年度

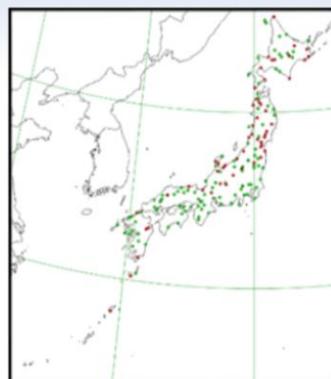
アメダス湿度計データ

- 地上水蒸気量分布の解析精度向上による大雨予測精度向上を目的に、2022年度末のメソ解析、局地解析での利用開始に向けて開発中

●現在同化利用中の要素と利用開発中の要素

		メソ解析	局地解析
気圧	SYNOP	○	○
	アメダス	-	-
気温	SYNOP	X	X
	アメダス	X	○
湿度	SYNOP	X→○	○
	アメダス	--→○	--→○
風	SYNOP	X	X
	アメダス	X	○

○:同化している
X:同化していない
-:観測していない



同化しているのは比湿
観測しているのは相対湿度

アメダスでは気圧を測定していないため、第一推定値を内外挿して推定した地上気圧を使用して比湿を求めている

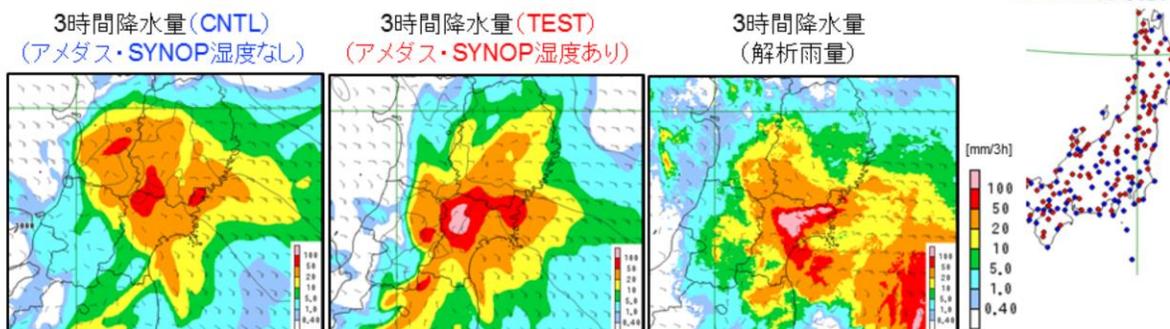
気象庁では線状降水帯の予測精度向上のための取り組みの一環として、地上水蒸気量分布の解析精度向上による大雨の予測精度向上を目的に、メソ解析、局地解析でのアメダス湿度計データの2022年度末の利用開始に向けた開発を進めている。これまで地上気象観測については、SYNOPの気圧データをメソ、局地解析で同化利用しているほか、相対湿度を局地解析で同化利用している。また、局地解析ではアメダスの気温、風データを同化利用している。令和2年度以降、アメダスへの湿度計追加が進められており、メソ、局地解析ではアメダスで観測された相対湿度を新たに同化利用する計画である。併せて、メソ解析ではSYNOPの相対湿度の同化利用も開始する。なお、具体的な同化処理においては相対湿度は比湿に換算して同化するが、アメダスでは換算に必要な気圧を観測していないため、第一推定値の地上気圧から観測地点における地上気圧を内外挿により推定した値を使用して比湿を求め、これを同化利用する。

アメダス湿度計データの利用開発 メソ解析でのアメダス湿度データの利用例

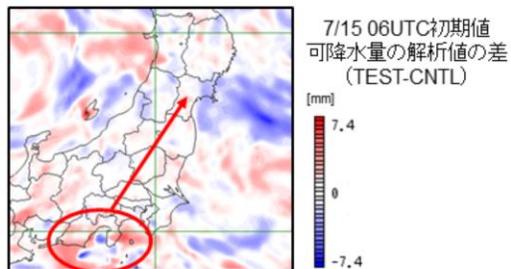
2022年7月16日 宮城県の大雨事例

初期時刻: 2022年7月15日06UTC (FT=12) 予測対象時刻: 7月16日03JST

観測点の分布
アメダス湿度計
SYNOP湿度計



- ・この事例では、「アメダス・SYNOP湿度あり」の方が「アメダス・SYNOP湿度なし」に比べて宮城県付近の降水を強め、3時間積算降水量の予測が実況に近づいた。
- ・アメダス・SYNOP湿度の追加により、初期値において静岡付近の可降水量が増加。このことが予測における宮城県付近での降水量増加につながったと考えられる。
- ・2022年度末のメソ解析、局地解析での利用開始に向けて開発中（整備済みのアメダス湿度データの追加利用、品質管理手法の高度化など）



ここでは、開発中のシステムによるメソ数値予報システムの改善事例を示す。図は、2022年7月15日06UTCを初期値とした12時間予測の事例で、宮城県付近に見られる強雨域についてCNTL(アメダス・SYNOP湿度なし)と比較してTEST(アメダス・SYNOP湿度あり)の降水量予測が解析雨量に近づいている。初期値のTESTとCNTLの可降水量の差分を確認すると、TESTにおいて静岡県付近の可降水量が増加していた。その領域は予測が進むに従って宮城県付近に移動しており、この可降水量の変化が宮城県付近での降水量予測改善につながったと考えられる。

今後の計画として、整備済みのアメダス湿度計データの追加利用に順次対応し、品質管理手法のさらなる高度化を図るなどして、2022年度末にメソ解析、局地解析での利用を開始する予定である。

地上設置型マイクロ波放射計の 可降水量データの利用開発

【観測の強化】マイクロ波放射計の整備、利活用について

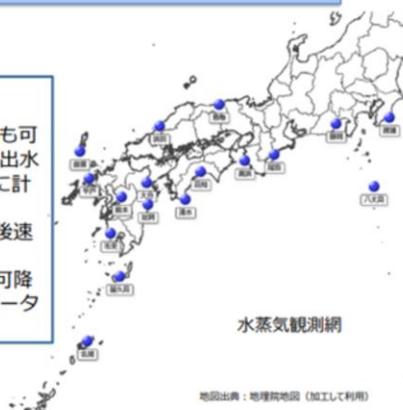
- 線状降水帯を引き起こす幅数百キロメートル規模の水蒸気の流入を捉えるため、水蒸気の高度分布を測定可能なマイクロ波放射計を西日本中心の17箇所に設置。
- 上空の風を測定しているウィンドプロファイラ観測点と併設し、水蒸気の流入を正確に捉える。
- 線状降水帯メカニズム解明に利用するとともに、可能な限り早く実況監視にも最大限活用。



マイクロ波放射計

<運用開始に向けて>

- ・ 6月末～7月初めに名瀬で運用を開始し、その他も可能な限り早めの製作・設置を進めることにより出水中に更に5台の運用開始を目指す。（年度内に計17か所設置）
- ・ 予報現業での実況監視の利用については、設置後速やかに開始する。
- ・ 数値予報での利用については、試験環境の下で可降水量のデータ同化をリアルタイムで実施し、データの品質を確認した後予報現業で参照する。



水蒸気観測網

地図出典：地理院地図（加工して利用）

（令和4年5月31日 線状降水帯予測精度向上ワーキンググループ（第4回）資料1より）
https://www.jma.go.jp/jma/kishou/shingikai/kondankai/serjokousutai_WG/part4/gaiyou.html

気象庁では線状降水帯の予測精度向上のための取り組みの一環として、線状降水帯を引き起こす幅数百キロメートル規模の水蒸気の流入を捉えるため、水蒸気の高度分布を測定可能な地上設置型マイクロ波放射計の整備を進めている。

地上設置型マイクロ波放射計の 可降水量データの利用開発

地上設置型マイクロ波放射計の概要

- 大気からのマイクロ波の輝度温度を測定し、気温や水蒸気の鉛直プロファイルを得るための機器(受動型)。
- 測定要素
 - 輝度温度14ch
 - 水蒸気に感度: 22.24, 23.04, 23.84, 25.44, 26.24, 27.84, 31.40 GHz
 - 気温に感度: 51.26, 52.28, 53.86, 54.94, 56.66, 57.30, 58.00 GHz
 - 輝度温度からのリトリーブ物理量
 - 気温・水蒸気の鉛直プロファイル、可降水量、LWP(鉛直積算液水量)等
 - 地上気象要素(気温、気圧、相対湿度、感雨等)
 - 赤外放射(9.6-11.5 μ m)等々
- 測定間隔: 最短1秒周期
 - 気象技術開発室で10分毎に平均されたものを利用
- 特徴
 - 時間・空間(鉛直方向)的に高分解能。ただし、降水時は品質が悪化する。
- 数値予報での利用方法
 - メソ解析での可降水量データの同化利用に向け開発中
 - 「名瀬」に設置されたマイクロ波放射計のリアルタイムデータ取得を2022年7月2日から開始
 - 2022年7月15日から、マイクロ波放射計可降水量データを試験的にリアルタイムで同化し、モニターを開始



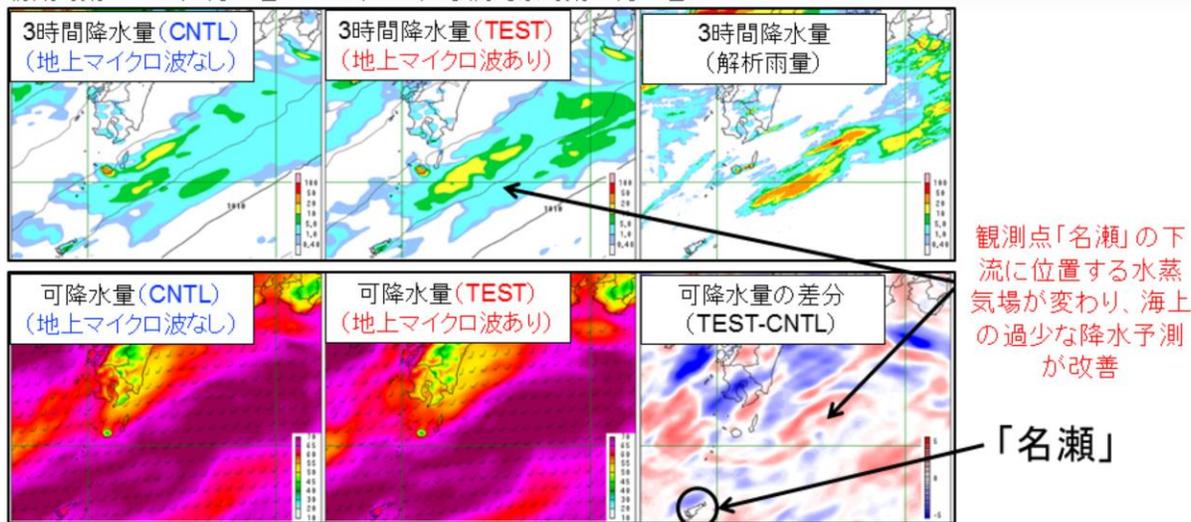
マイクロ波放射計

地上設置型マイクロ波放射計は、大気からのマイクロ波の輝度温度を測定し、気温や水蒸気の鉛直プロファイルを得るための受動型機器である。観測した輝度温度を基に、気温、水蒸気の鉛直プロファイル、可降水量などの物理量を推定値(リトリーブ値)として求めることが可能である。時間、空間的に高分解能であることが特徴であるが、測定原理上、降水時には観測データの品質が悪化することに注意が必要となる。数値予報システムにおいては、なるべく早期のデータ利用を目指し、まずメソ解析において、地上GNSS等での同化利用実績がある可降水量データの利用に向けて開発を進めている。なお、数値予報課で現在利用している地上設置型マイクロ波放射計のデータは、気象庁大気海洋部業務課気象技術開発室で処理されたデータ(10分平均した可降水量、QC情報等)を利用している。2022年7月15日から試験的にリアルタイムで同化し、予測への影響を確認しつつ同化利用に向けた開発を進めている。

地上設置型マイクロ波放射計の 可降水量データの利用開発

メソ解析での地上設置型マイクロ波放射計可降水量データの利用例

初期時刻: 2022年7月18日03UTC(FT=6) 予測対象時刻: 7月18日18JST



- 2022年度中に計17地点に観測機器が設置される予定。その後、観測網としての豪雨予測へのインパクトを評価し、メソ解析、局地解析での可降水量データ同化利用に向けた開発を進める予定。

ここでは、開発中のシステムによるメソ数値予報システムの改善事例を示す。図は、2022年7月18日03UTCを初期値とした6時間予測の事例で、名瀬の風下に位置する降水域についてCNTL(地上マイクロ波なし)と比較してTEST(地上マイクロ波あり)の降水量予測が解析雨量に近づいている。予測対象時刻のTESTとCNTLの可降水量の確認すると、TESTの当該領域において可降水量が増加していた。地上マイクロ波放射計の可降水量データ同化による可降水量の変化が当該領域付近での降水量予測改善につながったと考えられる。

今後の計画として、2022年度中には計17地点に観測機器が設置される予定で、その後、観測網としての豪雨予測へのインパクトを評価し、メソ解析、局地解析での可降水量データ同化利用に向けた開発を進める予定である。

参考文献

- 数値予報開発センター, 2022: 放射伝達モデルRTTOVの更新. 令和3年度数値予報開発センター年報, 気象庁数値予報開発センター, 110.
- 数値予報開発センター, 2022: メソ解析における船舶GNSS可降水量の利用. 令和3年度数値予報開発センター年報, 気象庁数値予報開発センター, 61-65.
- 平原洋一, 2017: 全球解析におけるSuomi-NPP/ATMS輝度温度データの利用開始. 平成29年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 70-72.
- 村田英彦, 亀川訓男, 2020: NOAA-20搭載ATMSおよびCrIS輝度温度データの利用開始. 令和元年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 58-60.
- 山下浩史, 今井崇人, 2007: 大気追跡風(AMV). 数値予報課報告・別冊53号, 気象庁予報部, 36-56.
- 山下浩史, 2011: 全球解析におけるMODIS極域大気追跡風の利用法の改良. 平成23年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 13-19.
- 山下浩史, 2015: 大気追跡風. 数値予報課報告・別冊61号, 気象庁予報部, 70-77.
- EUMETSAT, 2016: AVHRR L2 Wind product ATBD, 1-24.
- Masaki, T., T. Iguchi, K. Kanemaru, K. Furukawa, N. Yoshida, T. Kubota, and R. Oki, 2022: Calibration of the dual-frequency precipitation radar onboard the Global Precipitation Measurement Core Observatory. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 60, 1-16
- Saunders, R., J. Hocking, P. Rayer, M. Matricardi, A. Geer, N. Bormann, P. Brunel, F. Karbou, and F. Aires, 2012: RTTOV-10 science and validation report. Tech. rep., EUMETSAT NWP SAF, 31 pp.
- Saunders, R, J Hocking, E Turner, S Havemann, A Geer, C Lupu, J Vidot, P Chambon, C KöpkenWatts, L Scheck, and others, 2020: RTTOV-13 science and validation report. Tech. rep., EUMETSAT NWP SAF, 106 pp.



第2章 応用編

2.5 季節アンサンブル予報システムの改良

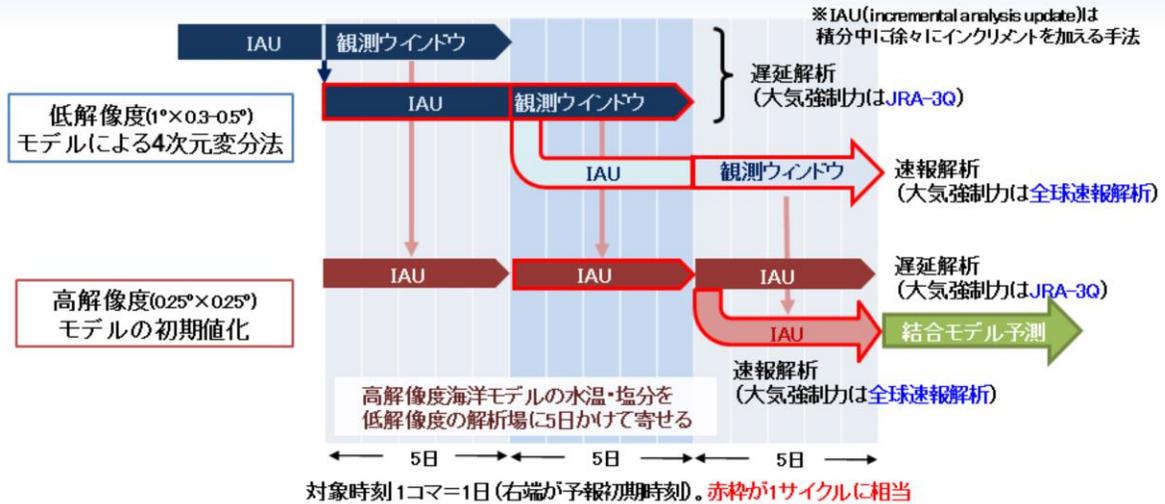
季節アンサンブル予報システムの改良

新旧システムの仕様比較

	大気海洋結合モデル(第3世代)を用いた季節アンサンブル予報システム(JMA/MRI-CPS3)	大気海洋結合モデル(第2世代)を用いた季節アンサンブル予報システム(JMA/MRI-CPS2)
運用	2022年2月～	2015年6月～2022年1月
数値モデル	大気海洋結合モデル(GSM2003C+MRI.COM v4.6)	大気海洋結合モデル(GSM1011C+MRI.COM v3.2)
水平分解能	大気:約55km 海洋:経度方向0.25度×緯度方向0.25度	大気:約110km 海洋:経度方向1.0度×緯度方向0.5-0.3度
鉛直層数	大気:100層(上端0.01hPa) 海洋:60層	大気:60層(上端0.1hPa) 海洋:52層+海底境界層
初期値	大気:全球速報解析 陸面:オフライン地表面解析(*) 海洋:4次元変分法(*) 海氷:3次元変分法(*) *大気強制力は、速報解析部分が全球速報解析で、遅延解析部分がJRA-3Q	大気:気象庁第2次長期再解析(JRA-55) 陸面:JRA-55 海洋:3次元変分法(大気強制力:JRA-55) 海氷:初期値化済み
予報時間	240日	240日
メンバー数	初期値あたり5メンバー	初期値あたり13メンバー
実行頻度	1日1回	5日に1回
再予報	24初期値×5メンバー×30年(1991～2020年)	24初期値×5メンバー×41年(1979～2019年)
再予報初期値	大気:気象庁第3次長期再解析(JRA-3Q) 海洋:4次元変分法(大気強制力:JRA-3Q)	大気:気象庁第2次長期再解析(JRA-55) 海洋:3次元変分法(大気強制力:JRA-55)
モデル出力解像度	全球域1.25度、日本域0.5625度	全球域2.5度

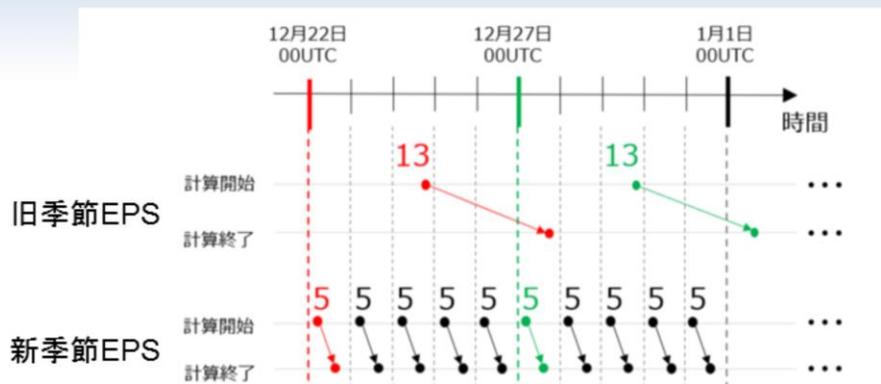
表は新旧の季節アンサンブル予報システム(季節EPS)の仕様比較を示している。新しい季節EPSで使用する数値モデルは、大気と海洋の水平解像度を向上させ、鉛直層数も増強した季節予報に用いるものとしては第3世代となる大気海洋結合モデルに更新した。初期値についても、大気と陸面の初期値を全球モデル(GSM)や全球アンサンブル予報システム(GEPS)と同一の全球速報解析とオフライン地表面解析に変更し、海洋の初期値を作成する手法に4次元変分法を導入、海氷について3次元変分法による初期値作成を開始するといった変更を実施した。また、メンバー数や実行頻度も変更したほか(後述)、モデルの予測結果の出力解像度も2.5度から1.25度に高解像度化し、0.5625度の日本域出力も追加した。

季節アンサンブル予報システムの改良 海洋同化システム(海洋初期値作成手法)の改良



海洋同化は、5日の観測ウィンドウを必要とするため、大気海洋結合モデル(第2世代)までは5日に1回の運用であったが、海洋同化の1ストリーム(上図)を、1日ずつズラして5ストリームを実行することで、海洋初期値を毎日作成できるようになった。低解像度モデルによる4次元変分法は10日の解析ウィンドウをもち、前半5日に与えるインクリメントを最適化することで後半5日の観測にフィットさせる。4次元変分法は10日の解析ウィンドウを使うが、次の解析にはウィンドウ中央の状態量を引き継ぐため(紺色部分からの下向き矢印)、4DVARもIAUも一回の解析で5日進むことになる。これを1日ずつズラして5ストリーム実行することで、海洋同化の毎日実行を実現した。なお、速報解析は即日、遅延解析は4日遅れで動作する。遅延解析はサイクルし、速報解析は毎回、遅延解析サイクルから初期値を引き継ぐ。IAUとは、徐々に(Incremental)解析場(Analysis)を更新(Update)する手法であり、予測計算開始時に発生する不自然な計算(初期ショック)を緩和する効果がある。

季節アンサンブル予報システムの改良 運用方式の変更



旧季節EPS
5日に1回、13メンバーの予測計算を行う



新季節EPS
毎日5メンバーの予測計算を行う

メリット

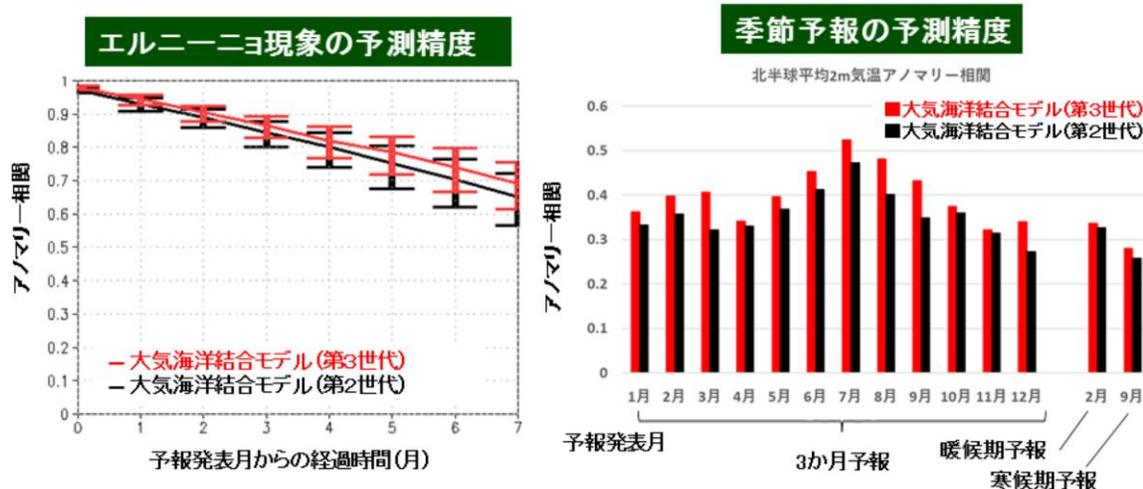
- 5日間隔の制約に縛られずに予報を利用できる
- 1か月予報や2週間予報に使われる全球アンサンブルの下部境界条件として、より新しい予報に基づく海面水温を提供できる

これまで5日に1回の実行であった海洋初期値を作成する海洋同化が毎日運用になったことで、大気海洋結合モデルの毎日実行も可能となった。このため、旧季節EPSでは5日かけて13メンバーの予測計算を実行する運用であったが、新しい季節EPSでは毎日5メンバーの予測計算を実行する運用とした。5日あたりのアンサンブルメンバー数で比較すると、旧季節EPSは13メンバー、新しい季節EPSは5メンバー×5日=25メンバーで、アンサンブルメンバー数も約2倍に増強となっている。この運用方式の変更により、より新しい初期値による計算結果が予報に利用できるようになっただけでなく、大気海洋結合モデルによる予測結果を1か月予報より短い予報に導入していくことも可能となった。2022年3月に更新した全球EPSでは、新しい季節EPSで毎日予測される海面水温を1か月予報や2週間予報の計算に利用するように改良し、予測精度を向上している。

季節アンサンブル予報システムの改良

エルニーニョ現象・季節予報の予測精度

30年間 (1991-2020)の再予報による検証結果



左図は新旧の大気海洋結合モデルによるエルニーニョ現象の予測精度について比較したものである。5～6か月目のエルニーニョ現象の予測精度を見ると、大気海洋結合モデル(第3世代)では、大気海洋結合モデル(第2世代)の5か月予報と同等の精度で6か月予報が可能となっていることが分かる。また、右図は新旧の大気海洋結合モデルによる3か月予報と暖・寒候期予報の予測精度を比較したものである。大気海洋結合モデルでは、年間を通して全ての予測の精度が改善したことが分かる。

季節アンサンブル予報システムの改良 その他の要素の予測精度

アノマリー相関(系統誤差補正無し)による評価結果

1月末初期値

ACOR (CPS3) init:0131 reg:GLB ref:JRA-3Q/GPCPv2.3/MGDSST without bias-cor

	TS	T850	PSEA	Z500	U850	U200	CHI2	PSI2	PSI8	RAIN	SSTMG
0-2month	0.309	0.346	0.294	0.339	0.350	0.480	0.575	0.504	0.352	0.383	0.553
1-3month	0.205	0.233	0.174	0.222	0.229	0.340	0.491	0.432	0.243	0.295	0.415
2-4month	0.164	0.178	0.144	0.176	0.164	0.244	0.362	0.309	0.174	0.214	0.311
3-5month	0.137	0.153	0.156	0.171	0.162	0.218	0.337	0.260	0.163	0.166	0.231
4-6month	0.111	0.133	0.130	0.168	0.137	0.182	0.242	0.244	0.140	0.119	0.175

4月末初期値

ACOR (CPS3) init:0426 reg:GLB ref:JRA-3Q/GPCPv2.3/MGDSST without bias-cor

	TS	T850	PSEA	Z500	U850	U200	CHI2	PSI2	PSI8	RAIN	SSTMG
0-2month	0.205	0.211	0.187	0.256	0.245	0.347	0.535	0.419	0.256	0.287	0.423
1-3month	0.150	0.166	0.160	0.216	0.202	0.260	0.454	0.378	0.233	0.217	0.287
2-4month	0.129	0.165	0.166	0.201	0.200	0.266	0.449	0.354	0.284	0.189	0.234
3-5month	0.141	0.172	0.159	0.194	0.201	0.271	0.375	0.320	0.283	0.167	0.219
4-6month	0.162	0.159	0.133	0.172	0.185	0.237	0.256	0.231	0.233	0.150	0.223

7月末初期値

ACOR (CPS3) init:0730 reg:GLB ref:JRA-3Q/GPCPv2.3/MGDSST without bias-cor

	TS	T850	PSEA	Z500	U850	U200	CHI2	PSI2	PSI8	RAIN	SSTMG
0-2month	0.248	0.263	0.311	0.338	0.326	0.401	0.567	0.431	0.442	0.270	0.459
1-3month	0.215	0.210	0.221	0.259	0.287	0.356	0.581	0.363	0.381	0.244	0.372
2-4month	0.200	0.205	0.207	0.245	0.280	0.316	0.474	0.275	0.275	0.236	0.327
3-5month	0.180	0.185	0.163	0.205	0.224	0.260	0.394	0.216	0.178	0.231	0.296
4-6month	0.175	0.184	0.153	0.186	0.198	0.246	0.346	0.202	0.162	0.219	0.258

10月末初期値

ACOR (CPS3) init:1028 reg:GLB ref:JRA-3Q/GPCPv2.3/MGDSST without bias-cor

	TS	T850	PSEA	Z500	U850	U200	CHI2	PSI2	PSI8	RAIN	SSTMG
0-2month	0.242	0.266	0.270	0.292	0.325	0.375	0.524	0.324	0.252	0.349	0.503
1-3month	0.207	0.229	0.219	0.246	0.268	0.325	0.438	0.296	0.212	0.325	0.375
2-4month	0.182	0.209	0.200	0.242	0.236	0.330	0.410	0.321	0.212	0.295	0.299
3-5month	0.160	0.192	0.177	0.219	0.204	0.302	0.357	0.271	0.202	0.229	0.252
4-6month	0.132	0.166	0.153	0.180	0.156	0.216	0.296	0.241	0.151	0.178	0.224

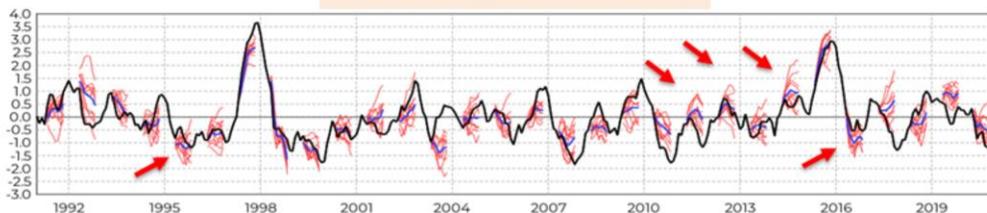
有意に改善
 有意に改悪

表は、地上気温(TS)、850hPa気温(T850)、海面更正気圧(PSEA)、850hPa東西風(U850)、200hPa東西風(U200)、200hPa速度ポテンシャル(CHI2)、200hPa流線関数(PSI2)、850hPa流線関数(PSI8)、降水量(RAIN)、海面水温(SSTMG)について、大気海洋結合モデル(第3世代)のリードタイム別の予測精度(アノマリー相関)を示しており、大気海洋結合モデル(第2世代)から有意に改善したものを黄色、改悪したものを灰色で色付けしたものである。有意に改悪した要素は無く、多くの要素において予測精度が有意に改善したことが確認できる。

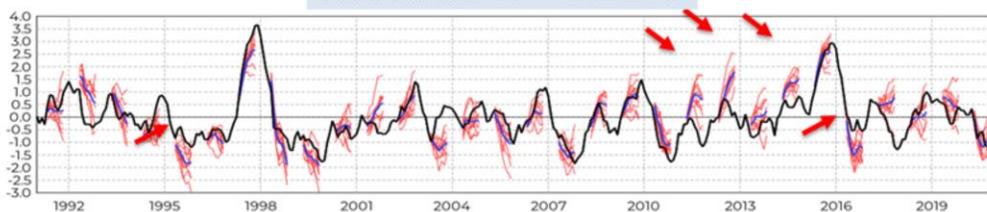
季節アンサンブル予報システムの改良 海洋変動の予測精度

エルニーニョ監視指数(NINO3)の予測精度

大気海洋結合モデル(第3世代)



大気海洋結合モデル(第2世代)



エルニーニョ監視海域の海面水温偏差
各メンバー予測(赤)、アンサンブル平均予測(青)、実況(黒)

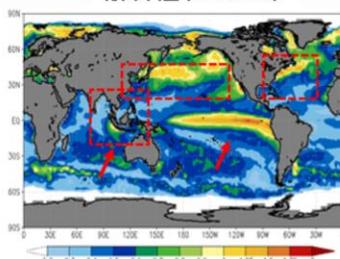
図はエルニーニョ監視指数(NINO3)に関して大気海洋結合モデル(第3世代)と大気海洋結合モデル(第2世代)を比較したものである。大気海洋結合モデル(第2世代)で実況がアンサンブルスプレッドの範囲外(大外し)となっていた幾つかの事例において、アンサンブルスプレッドの範囲内に収まるように改善していることが分かる。

季節アンサンブル予報システムの改良 海洋変動の予測精度

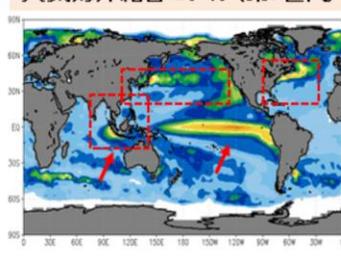
海面水温標準偏差の比較

図は、7月31日初期値の
9~11月予報の標準偏差

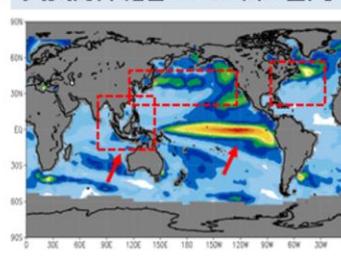
解析値(JRA-3Q)



大気海洋結合モデル(第3世代)



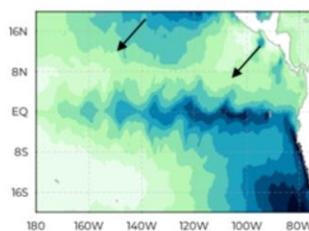
大気海洋結合モデル(第2世代)



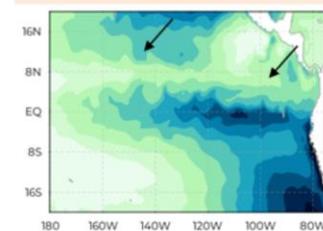
熱帯太平洋域の海面水温分布の比較

図は、1999年12月12日00UTC初期値
から10~14日予報の海面水温予測値

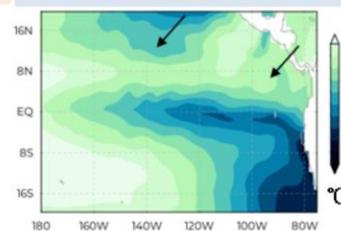
ESA SST CCI* Level4
(0.05度解像度 衛星観測利用解析値)



大気海洋結合モデル(第3世代)
大気T1319-海洋0.25x0.25°



大気海洋結合モデル(第2世代)
大気T1159-海洋1x0.3-0.5°

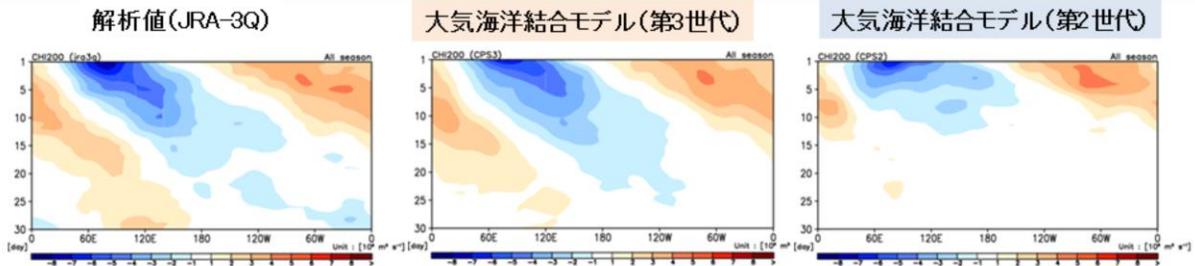


上図は海面水温の標準偏差について、大気海洋結合モデル(第3世代)と大気海洋結合モデル(第2世代)を比較したものである。大気海洋結合モデル(第2世代)の課題であった熱帯太平洋域の変動が過大な傾向は、大気海洋結合モデル(第3世代)では解析値に近づいた。また、インド洋ダイポールモード現象(IOD)において東極となるスマトラ島西岸の海面水温変動量の過少な傾向も同様に、解析値に近づいている。これらは、下図に示すように、海洋モデル部分の解像度を、熱帯における海洋の渦を十分に解像することが可能な渦許容(0.25度)と呼ばれる解像度まで高解像度化したことが主な要因と考えられる。一方、黒潮続流域やメキシコ湾流域等の中緯度では、熱帯よりも海洋の渦が細かいため、変動量が解析値の変動に近づいているものの依然として過少な傾向である。この中緯度の細かい海洋の渦を適切に表現するためには、海洋モデル部分の更なる高解像度化が必要である。

季節アンサンブル予報システムの改良

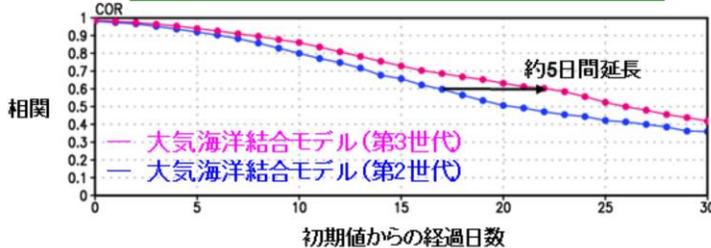
赤道季節内振動(MJO)の予測精度

200hPa速度ポテンシャルのホフメラー図の比較



図は、インド洋域にMJOの対流活発位相がある時(Phase3)のCHI200合成図(全季節)

200hPa速度ポテンシャルの解析値との相関



- 大気海洋結合モデル(第3世代)では、赤道季節内振動(MJO)の強い振幅が維持されつつ東進がより明瞭に見られるようになった。
- 相関0.6以上で予測できる期間が17日から22日まで、約5日間延長



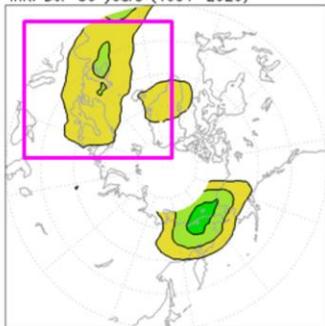
上図は、赤道季節内振動(MJO)の監視に良く利用される200hPa速度ポテンシャルのホフメラー図について、大気海洋結合モデル(第3世代)と大気海洋結合モデル(第2世代)を比較したものである。大気海洋結合モデル(第3世代)では、対流活発位相(寒色系)の東進が明瞭となり、解析値に近づいていることが分かる。下図は、その200hPaについて解析値との相関を示しているが、相関0.6以上の高い精度で予測が可能な期間は大気海洋結合モデル(第2世代)では約17日であったところ、大気海洋結合モデル(第3世代)では約22日となり、約5日間延長している。なお、これは単純に同一条件で比較した結果であるため、旧季節アンサンブル予報システムが5日に1回の運用であったところ、新しい季節アンサンブル予報システムで毎日運用となり、より新しい初期値が利用可能になった点も考慮すると、さらに改善しているものと考えられる。

季節アンサンブル予報システムの改良 ブロッキング現象の予測精度

冬季(12~2月)を対象とした4~27日予報の
ブロッキング高気圧の出現頻度の比較

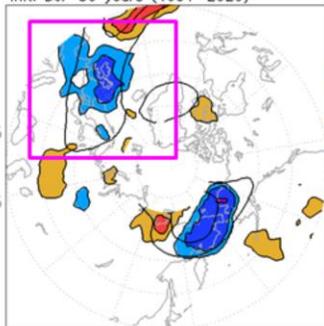
解析値(JRA-3Q)

<analname>
ft=04-27dy mean:07dy
init: DJF 30 years (1991-2020)



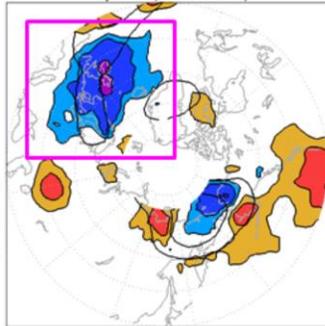
大気海洋結合モデル(第3世代)

<CPS3(5mem)-analname>
ft=04-27dy mean:07dy
init: DJF 30 years (1991-2020)



大気海洋結合モデル(第2世代)

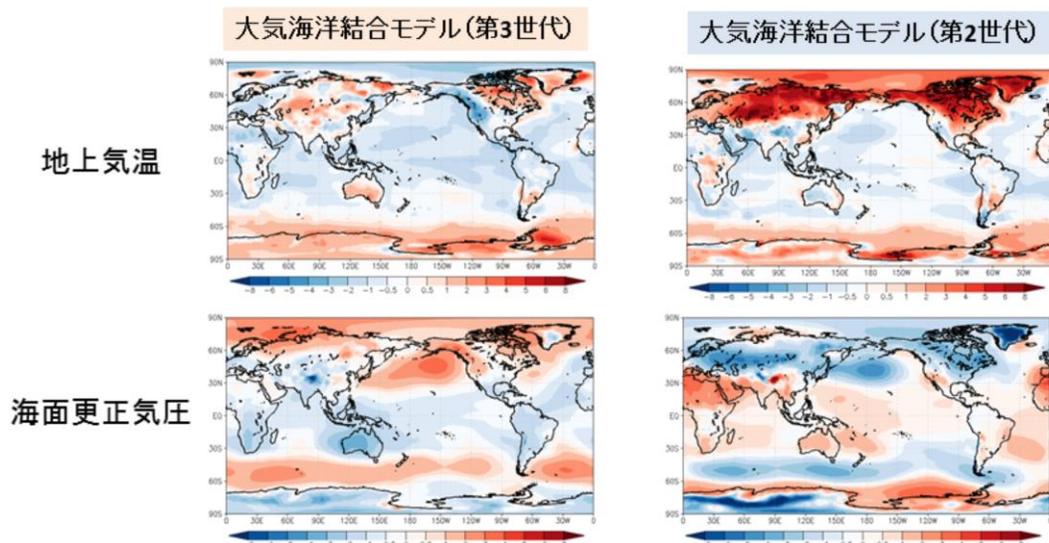
<CPS2(5mem)-analname>
ft=04-27dy mean:07dy
init: DJF 30 years (1991-2020)



左図は解析値におけるブロッキング高気圧の出現頻度、中央図と右図はそれぞれ大気海洋結合モデル(第3世代)と大気海洋結合モデル(第2世代)のブロッキング高気圧出現頻度のバイアスを示している。大気海洋結合モデル(第3世代)では、大西洋におけるブロッキングの過少バイアスが大きく改善した。エルニーニョ現象やラニーニャ現象からのテレコネクションの影響が大きい領域であるため、エルニーニョ現象やラニーニャ現象の予測精度が改善したことと関係している可能性がある。

季節アンサンブル予報システムの改良 系統誤差特性の変化

11月27日を初期値とする冬期間(12~2月)の系統誤差比較

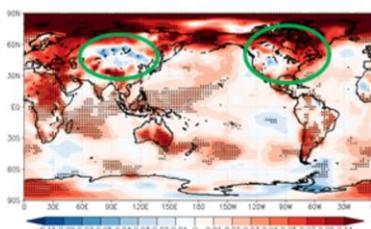


図は大気海洋結合モデル(第2世代)から大気海洋結合モデル(第3世代)への変更において、特に変化の大きかった冬期間(12~2月)の系統誤差の比較を示している。地上気温を見ると、大気海洋結合モデル(第2世代)の課題であった冬季北ユーラシアの大きな高温バイアスは解消している。一方、海面更正気圧を見ると、冬季シベリア高気圧が弱いバイアスは改善し、アリューシャン低気圧の強いバイアスは反転したことが分かる。

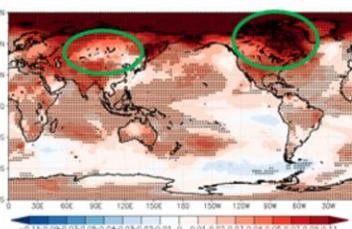
季節アンサンブル予報システムの改良 地球温暖化トレンド再現性の向上

11月27日を初期値とする冬期間(12~2月)の
地上気温の地球温暖化トレンドの比較

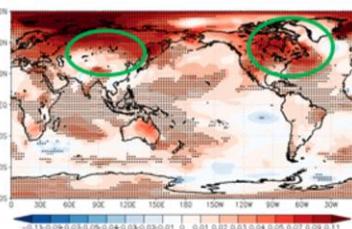
解析値(JRA-3Q)



大気海洋結合モデル(第3世代)



大気海洋結合モデル(第2世代)

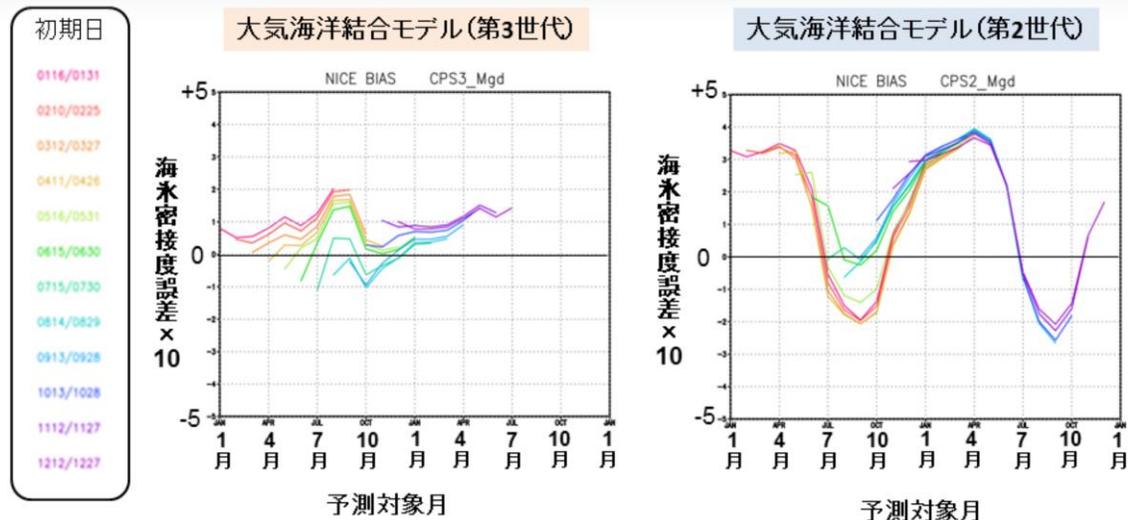


※ハッチをかけた領域は有意な上昇・下降トレンドであることを示している。

冬季のユーラシア大陸の内陸部は、有意ではないものの全球的な地球温暖化傾向に反して寒冷化傾向が観測されている。このメカニズムについては諸説あり、世界の数値予報モデルにおいて再現することが難しい現象の1つとなっている。図は、この冬季ユーラシア大陸内陸部の寒冷化について、大気海洋結合モデル(第3世代)と大気海洋結合モデル(第2世代)の再現性を比較したものである。大気海洋結合モデル(第3世代)では、ユーラシア大陸中部の冬季寒冷化トレンドの位置などが改善傾向であるものの、寒冷化のトレンドは依然として過小な傾向である。なお、カナダ北東部等では地球温暖化トレンド過小傾向の改善が確認できる。

季節アンサンブル予報システムの改良 北極海氷の系統誤差の低減

北極海における海水密度の系統誤差の比較



- 海水密度の初期値化により、初期値での過大バイアスが改善
- 予報の過小バイアスも改善

図は北極海における海水密度の系統誤差について、大気海洋結合モデル(第3世代)と大気海洋結合モデル(第2世代)を比較したものである。大気海洋結合モデル(第3世代)では、海氷の初期値化が導入されたことにより初期値における海氷の過大な傾向が大幅に改善した。加えて、予報期間に過小となる傾向も改善しているが、これは物理過程の改良により、北極海における放射収支等が改善したためと考えられる。

参考文献

Takaya, Y., S. Hirahara, T. Yasuda, S. Matsueda, T. Toyoda, Y. Fujii, H. Sugimoto, C. Matsukawa, I. Ishikawa, H. Mori, R. Nagasawa, Y. Kubo, N. Adachi, G. Yamanaka, T. Kuragano, A. Shimpo, S. Maeda, and T. Ose, 2018: Japan Meteorological Agency/Meteorological Research Institute Coupled Prediction System version 2 (JMA/MRICPS2): atmosphere-land-ocean-sea ice coupled prediction system for operational seasonal forecasting. *Clim. Dyn.*, 50, 751-765.

気象庁, 2022: 季節アンサンブル予報システムの改良. 数値予報開発センター年報(令和3年), 気象庁数値予報開発センター, 122-132.



第2章 応用編

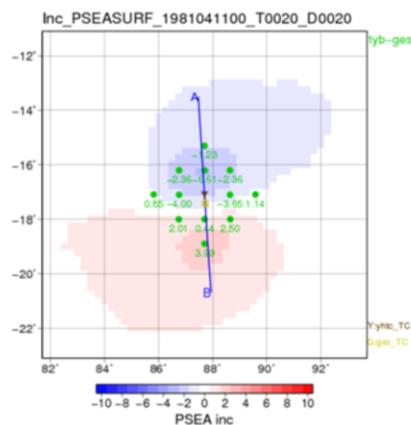
2.6 長期再解析(JRA-3Q)

気象庁第3次長期再解析(JRA-3Q)

JRA-3Qの特徴: 台風ボーガス

アジア太平洋気象防災センターで解析された台風情報(中心位置、中心気圧、強風半径など)から理論的な台風構造を推定し、その台風構造に基づいて作成した擬似観測データ

- 作成位置及び範囲
 - 台風中心を基準とし、100km毎に作成
 - 作成範囲は200km(ただし、台風中心が第一推定値とベストトラックで大きく異なる場合、作成範囲が広がる)
- 作成要素
 - 海面更正気圧と風(850hPa及び300hPa)
- 作成手順
 1. 強風半径(風速30ノット半径)から台風ボーガスの対象領域を決定
 2. この台風領域において、台風中心気圧を基にFujita(1952)の式により海面更正気圧のプロファイルを作成
 3. 海面更正気圧プロファイルを基に上層の高度プロファイル、風のプロファイルを作成

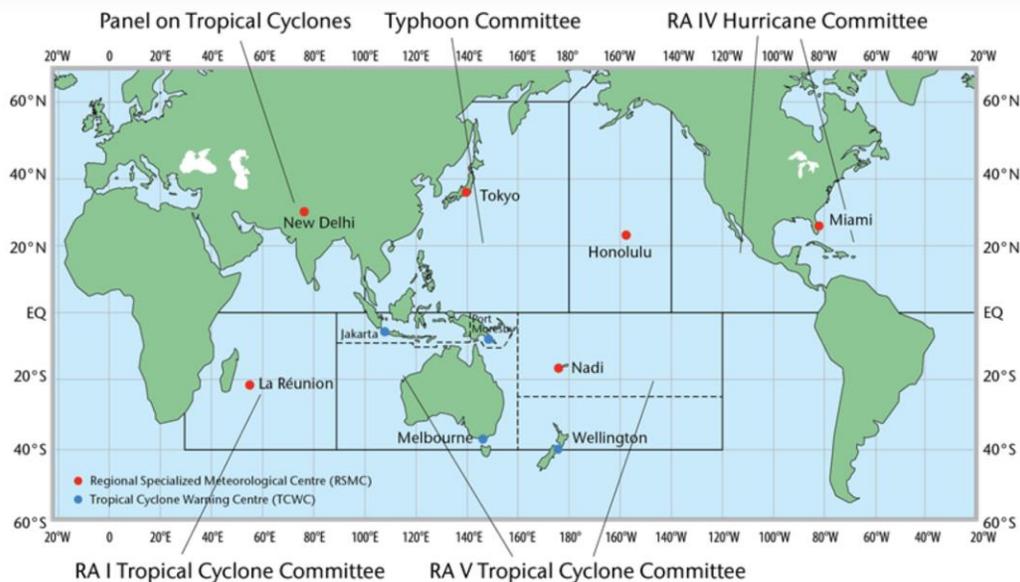


台風ボーガスデータ(緑)と解析インクリメント(陰影)

本節では、JRA-3Qの特徴である台風の高い再現性について述べる。JRA-3Qは台風の中心気圧や構造の再現性を向上させるため、全球モデル(GSM)等の現業数値予報システムでも利用している台風ボーガスを利用している。台風ボーガスとは、アジア太平洋気象防災センターで解析された台風情報(中心位置、中心気圧、強風半径など)から理論的な台風構造を推定し、その台風構造に基づいて作成した擬似観測データである。現業数値予報システムの台風ボーガスは、北西太平洋域(北緯0-60°、東経100-180°)のみで用いられているが、JRA-3Qでは米国大気海洋庁(NOAA)が公開している世界の熱帯低気圧のベストトラックデータ(IBTrACS:International Best Track Archive for Climate Stewardship)を用いて、ハリケーンやサイクロンなどにも台風ボーガスを利用している。

気象庁第3次長期再解析(JRA-3Q) 熱帯低気圧の統計検証(対IBTrACS)

熱帯低気圧の地域特別気象中樞(RSMC)



<https://community.wmo.int/tropical-cyclone-regional-bodies>

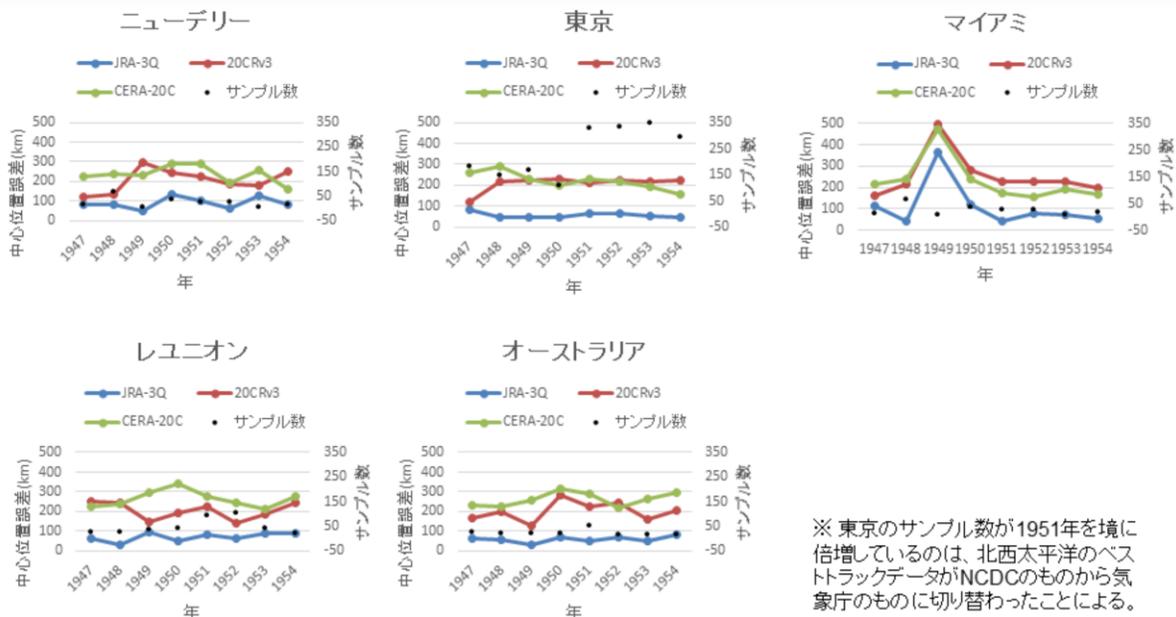
熱帯低気圧の地域特別気象中樞(RSMC)ごとに、統計検証を行った結果を示す。ベストトラックの中心位置から500km以内を探索し、以下の①②の条件を満たす点を熱帯低気圧の中心として検出して比較した。検証期間は1947年～1954年である。

- ①海面気圧が周囲500km以内で最低
- ②環境場の海面気圧よりも2hPa以上低い

気象庁第3次長期再解析 (JRA-3Q)

熱帯低気圧の統計検証(対IBTrACS)

RSMCごとの年平均中心位置誤差

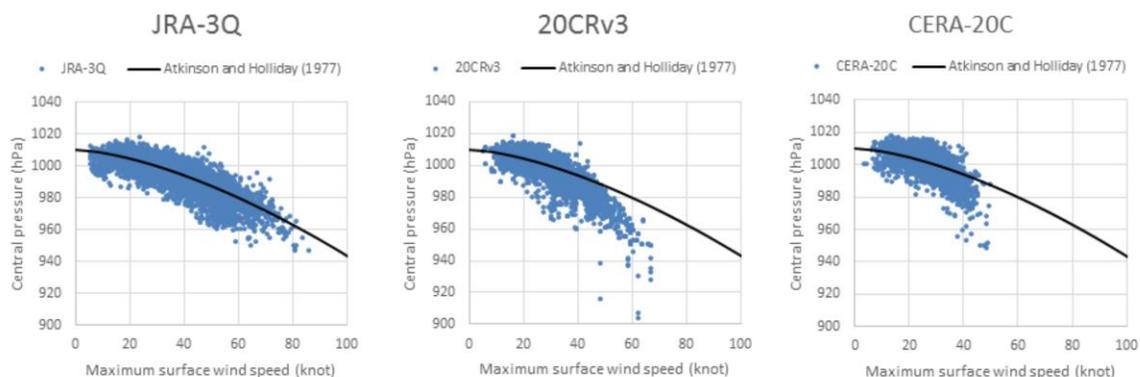


※ 東京のサンプル数が1951年を境に倍増しているのは、北西太平洋のベストトラックデータがNCDCのものから気象庁のものに切り替わったことによる。

JRA-3Qは米国(20CRv3)や欧州(CERA-20C)の再解析と比較して、台風中心の位置誤差が最も小さくなっている。この理由としては、20CRv3, CERA-20Cではベストトラックによる気圧を同化しているのに対し、JRA-3Qでは熱帯低気圧ボーガスとして気圧の他に風も同化利用していることが考えられる。

気象庁第3次長期再解析(JRA-3Q) 熱帯低気圧の統計検証(対IBTrACS)

1947年～1954年を対象とした最大風速と中心気圧の関係図



黒線はAtkinson and Holliday (1977)により中心気圧と最大風速の関係を示す。

図は、1947年～1954年を対象とした最大風速と中心気圧の関係の比較を示している。最大風速と中心気圧の比例関係は、米国(20CRv3)や欧州(CERA-20C)の再解析でも再現されているが、中心気圧が低いほど最大風速が過小となる傾向が見られる。一方、JRA-3Qは最大風速と中心気圧の関係を適切に表現していることが分かる。

参考文献

- Kobayashi, S., Y. Kosaka, J. Chiba, T. Tokuhiro, Y. Harada, C. Kobayashi, and H. Naoe, 2021: JRA-3Q: Japanese Reanalysis for Three Quarters of a Century. Joint WCRP-WWRP Symposium on Data Assimilation and Reanalysis/ECMWF Annual Seminar 2021, online, 13-17 September 2021, O4-2.
- Harada, Y., S. Kobayashi, Y. Kosaka, J. Chiba, and T. Tokuhiro, 2021: Early results of the evaluation of the JRA-3Q reanalysis. EGU General Assembly 2021, online, 19-30 April 2021, EGU21-3762, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-3762>.
- Naoe, H., S. Kobayashi, Y. Kosaka, J. Chiba, T. Tokuhiro, and Y. Harada, 2021: Evaluation of a new Japanese reanalysis (JRA-3Q) in a pre-satellite era, EGU General Assembly 2021, online, 19-30 April 2021, EGU21-6881, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-6881>.
- Gary D. Atkinson and Charles R. Holliday, 1977: Tropical Cyclone Minimum Sea Level Pressure/Maximum Sustained Wind Relationship for the Western North Pacific, Monthly Weather Review, Volume 105: Issue 4, 421-427, [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1977\)105<0421:TCMSLP>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1977)105<0421:TCMSLP>2.0.CO;2)
- 気象庁, 2021: 気象庁第3次長期再解析(JRA-3Q)の本計算進捗. 数値予報開発センター年報(令和2年), 気象庁数値予報開発センター, 115-124.
- 気象庁, 2022: 気象庁第3次長期再解析(JRA-3Q)の本計算進捗. 数値予報開発センター年報(令和3年), 気象庁数値予報開発センター, 133-138.

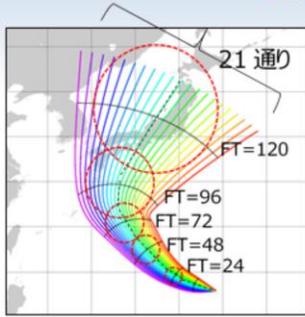


第2章 応用編

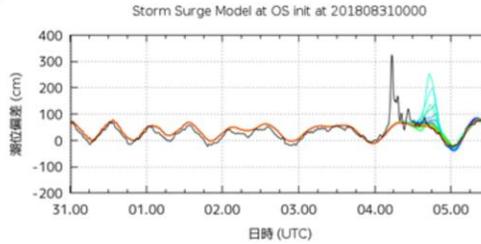
2.7 日本域台風時高潮確率予報システム の運用開始

日本域台風時高潮確率予報システム

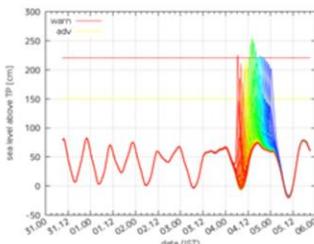
令和4年9月8日に運用開始した新システム



高潮の5日予報が可能に！



① 台風進路予報に合わせた21通りの5日先までの高潮予測を計算。



20xx/xxxxxx/UTC 初期時刻		選択コース: MSM準拠 パーセンタイル値: 100		○遠隔予報細分区 ○市町村等をまとめた地域 ●二次細分区					注	警報基準	
府県予報区	遠隔予報細分区	市町村等をまとめた地域	二次細分区	データ	2日目	3日目	4日目	5日目	注	警報基準	
宗谷地方	宗谷地方	宗谷北部	稚内市(オホーツク海側)	自動判定値	中	中			130		
				高潮アンソングル	6	31	-13	-34	90	130	「中」は黒字+橙色塗りつぶし。
				宗谷村(オホーツク海側)	低	中	低	低	90	130	
				高潮アンソングル	-3	45	-12	-15	80	130	警報基準超過は黒字+橙色塗りつぶし。

② 台風進行速度を調整する処理を加え、21×21=441通りの高潮予測に拡張。高潮早期注意情報(警報級の可能性)として発表する。

気象庁では、警報級の現象が5日先までに予想される場合に、その可能性を「早期注意情報(警報級の可能性)」として発表している。既に提供していた大雨、大雪、暴風、波浪に加え、高潮に関する早期注意情報についても提供可能とするため、新たに「日本域台風時高潮確率予報システム(日本域高潮PFS: Probabilistic Forecast System)」を新たに開発した。

日本域高潮PFSは、台風予報円の情報を元に、①日本域高潮モデルを用いて、台風進行の横方向に進路を等間隔にずらした計21通りの台風進路を作成(Taylor and Glahn, 2008)し、台風ボーガス(Fujita, 1952)を利用した21通りの5日先までの高潮予測計算を実行する。その後、②台風進行速度の不確実性について、高潮予報結果の時間をずらす処理を実施することにより、21×21=441通りの高潮予測に拡張して、更に潮汐効果も加算することで、高潮確率予報を作成する。この高潮確率予報を元に、警報級の可能性を判定し、高潮早期注意情報を発表する。

日本域高潮モデルと日本域高潮PFSの仕様比較

	日本域高潮モデル	日本域高潮PFS
座標系	スタaggerド格子	同左
空間解像度	沿岸から離れるにつれ 5段階に変化(約1,2,4,8,16km)	同左
計算領域	20N~50N, 117.4E~150E	同左
予測時間	39時間(03,06,09,15,18,21UTC) 78時間(00,12UTC)※注	132時間(00,06,12,18UTC) 39時間(03,09,15,21UTC)
メンバー数	台風時6 非台風時1	台風時21 非台風時は動作しない
台風ポーガス	MSM予報値に埋め込み	モデル予報値への埋め込みは行わず 台風ポーガスのみで動作

(注) 39時間より先の予測結果は一部試験運用中で、今後正式運用となる見込みである。

表は日本域高潮モデルと日本域高潮PFSの仕様比較を示している。予報時間とメンバー数、及び台風ポーガスの取り扱いが異なるのみで、座標系や空間解像度、計算領域は同一である。日本域高潮モデルの台風ポーガスはMSM予報値に埋め込む一方、日本域高潮PFSは台風ポーガスのみで動作し、埋め込みは行わない。このため、非台風時は動作しない。

参考文献

- 林原 寛典, 2011: 気象庁の高潮数値予測モデルについて, *天気*, 58, 235–240.
- Japan Meteorological Agency, 2022: Outline of the operational numerical weather prediction at the Japan Meteorological Agency.
- Fujita, T., 1952: Pressure Distribution within Typhoon. *Geophys. Mag.*, 23, 437–451.
- Taylor, A. A., and Glahn, B. 2008: Probabilistic guidance for hurricane storm surge. In 19th Conference on probability and statistics, Vol. 74, No. 8.
- Westerink, J. J. et al., 2008: A Basin- to Channel-Scale Unstructured Grid Hurricane Storm Surge Model Applied to Southern Louisiana. *Mon. Wea. Rev.*, 136, 833.



第2章 応用編

2.8 ガイダンスの改良

大雨発生確率ガイダンス

大雨発生確率ガイダンス

- 「線状降水帯による大雨の半日程度前からの呼びかけ」の判断を支援するための資料
- 目的変数
 - 対象となる 5 km 格子を中心とした 55 km 四方のどこかで 3時間降水量が 150 mm 以上または 100 mm 以上になるか否か
 - 本ガイダンスにおける 3時間降水量は、前 1時間降水量にその前後の前 1時間降水量を加えた値
- メソモデル (MSM) およびメソアンサンブル予報システム (MEPS) からそれぞれ作成



気象庁では、大雨による災害発生の危険度が高まっている中で、線状の降水帯により非常に激しい雨が同じ場所で実際に降り続いている状況を「線状降水帯」というキーワードを使って解説する「顕著な大雨に関する気象情報」を発表している。「顕著な大雨に関する気象情報」の発表基準はつぎのとおり。

1. 解析雨量(5kmメッシュ)において前3時間積算降水量が100mm以上の分布域の面積が500km²以上
2. 1.の形状が線状(長軸・短軸比2.5以上)
3. 1.の領域内の前3時間積算降水量最大値が150mm以上
4. 1.の領域内の土砂キキクル(大雨警報(土砂災害)の危険度分布)において土砂災害警戒情報の基準を実況で超過(かつ大雨特別警報の土壌雨量指数基準値への到達割合8割以上)又は洪水キキクル(洪水警報の危険度分布)において警報基準を大きく超過した基準を実況で超過

この情報の発表基準を満たすような線状降水帯による大雨の可能性が高いことが予想された場合に、地方予報区単位等を対象として半日程度前から気象情報において「線状降水帯」というキーワードを使って呼びかける。大雨発生確率ガイダンスは、「線状降水帯による大雨の半日程度前からの呼びかけ」の判断を支援するための資料である。

(参考)

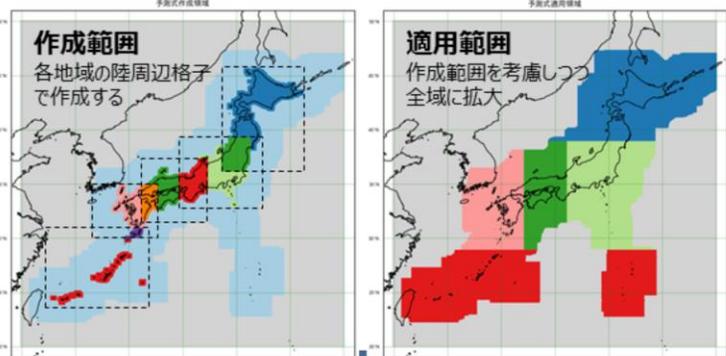
線状降水帯に関する各種情報

https://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/bosai/kishojoho_senjokousuitai.html

目的変数は、対象となる 5 km 格子を中心とした 55 km 四方のどこかで 3時間降水量が 150 mm 以上または 100 mm 以上になるか否かであり、これらの降水量は「顕著な大雨に関する気象情報」の発表基準における閾値である。大雨発生確率ガイダンスにおける 3時間降水量は、前 1時間降水量にその前後の前 1時間降水量を加えた値である。たとえば、9時を対象とする場合は 8時から 9時までの前 1時間降水量に 7時から 8時までと 9時から 10時までの降水量を加えた 7時から 10時までの 3時間降水量である。大雨発生確率ガイダンスは、メソモデル (MSM) およびメソアンサンブル予報システム (MEPS) からそれぞれ作成している。

仕様

- 初期時刻
 - 00, 03, 06, 09, 12, 15, 18, 21 UTC (MSM)
 - 00, 06, 12, 18 UTC (MEPS)
- 予報時間、予報間隔
 - 39時間 (MSM の初期時刻 00, 12 UTC は 51時間) まで 1時間ごと
- 層別化
 - 初期時刻
 - 予報時間
 - 地域



大雨発生確率ガイダンスの初期時刻と予報時間は、MSM および MEPS と同じであり、予報間隔は 1時間である。

予測手法はロジスティック回帰で、係数は固定している。予測式は 2019年、2020年、2021年の 6月から 8月までの計 9か月のデータから作成した。大雨発生確率ガイダンスでは、予測対象となる時刻や数値予報モデルの予報時間、地域による予測特性の違いを軽減するため、初期時刻、予報時間、地域により予測式を層別化している。地域による層別化では、全国を 5つの領域に分割し、それぞれの地域について予測式を作成する(「作成範囲」の図)。この領域をそれぞれの周囲の海上に拡大し、予測の対象とする(「適用範囲」の図)。

仕様は「4.2.1 降水ガイダンス」の「大雨発生確率ガイダンス」にまとめている。

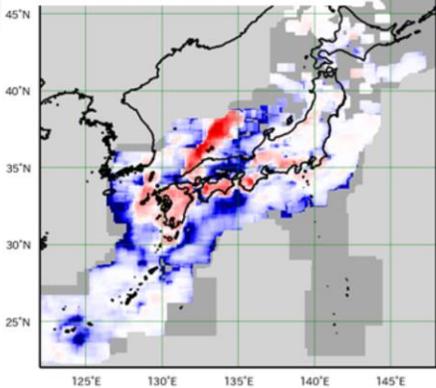
(参考)

配信資料に関する技術情報第584号 ～大雨発生確率ガイダンスの提供について～

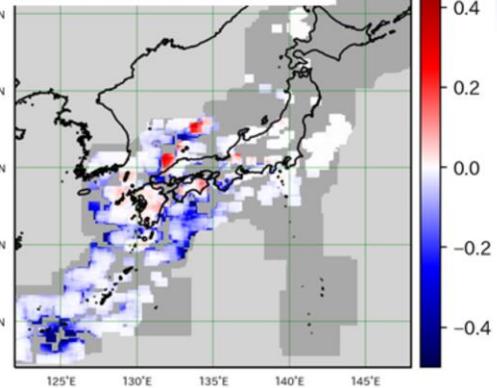
<https://www.data.jma.go.jp/suishin/jyouhou/pdf/584.pdf>

ブライアスキルスコア (気候値予測との比較)

MSM 大雨発生確率ガイダンス
閾値は 100 mm/3h



MSM 大雨発生確率ガイダンス
閾値は 150 mm/3h



- 閾値 100 mm/3h では九州から四国、東海地方の陸上を中心に改善
- 閾値 150 mm/3h では範囲が狭いものの九州や四国の陸上を中心に改善

MSM 大雨発生確率ガイダンスの統計的な予測精度を見るため、気候値予測からの改善の程度を示すブライアスキルスコアを示す。検証に利用できる期間が短いため、検証期間は学習期間と同じ2019年、2020年、2021年の6月から8月までの計9か月とし、3か月抜き交差検証による結果を示す。予報時間は3時間から39時間までである。閾値は100 mm/3h(左)と150 mm/3h(右)である。

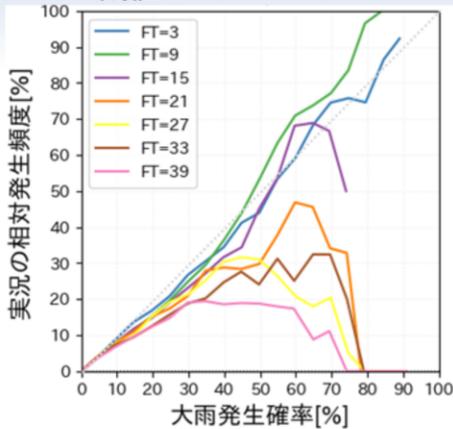
閾値 100 mm/3h では、九州から四国、東海地方の陸上を中心に気候値予測を改善している。

閾値 150 mm/3h では、100 mm/3h の結果ほど明瞭ではないものの、九州や四国の陸上を中心に改善していることがわかる。

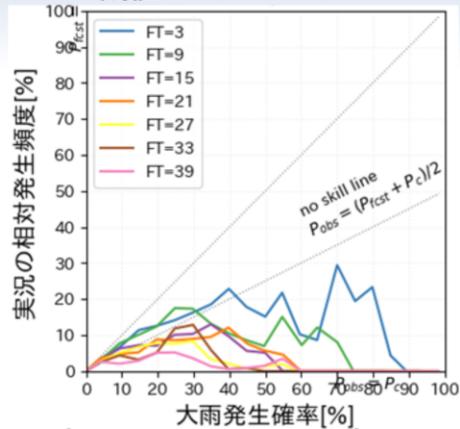
海上で気候値予測を改善できていない理由は、大雨発生確率ガイダンスの予測式を陸上のデータを中心に作成しているためである。

信頼度曲線

閾値は 100 mm/3h



閾値は 150 mm/3h



- 予報時間 (FT) が 9 時間までは信頼度が高いが、それ以降は大雨発生確率が大きいほど実況の頻度と比べて過大
- すべての FT で実況の頻度と比べて大雨発生確率が大きく、精度は不十分
- 今後の改良が必要

MSM 大雨発生確率ガイダンスと実況の相対発生頻度を比べた信頼度曲線を示す。検証に利用できる期間が短いため、検証期間は学習機関と同じ 2019年、2020年、2021年の 6月から 8月までの計 9か月とし、3か月抜き交差検証による検証結果を示す。予報時間は 3時間から 39時間までである。閾値は 100 mm/3h(左)と 150 mm/3h(右)である。また、検証領域はスライド 2 の「適用範囲」の全域である。

閾値 100 mm/3h の場合、FT = 3 では信頼度曲線が対角線の近くにあり、大雨発生確率ガイダンスは実況の頻度を適切に予測できていることがわかる。一方、FT = 9 では 0% から 40% までは信頼度曲線が対角線の近くにあるものの、50% から 90% にかけては対角線よりやや上にあり実況の頻度と比べて大雨発生確率ガイダンスは過小であることがわかる。その後の FT では 0% から 20~30% までは信頼度曲線が対角線に近いものの、大雨発生確率ガイダンスが 30~40% 以上になると実況の頻度と比べて過大である。線状降水帯による大雨の半日程度前からの呼びかけにおいて、FT による信頼度の違いには注意が必要である。

閾値 150 mm/3h の場合、すべての FT で実況の頻度と比べて大雨発生確率ガイダンスは過大であり、予測精度は十分ではない。今後の改良が必要である。



第3章 事例解析編

3.1 令和4年1月の大雪事例の 数値予報の結果

※以下のスライドの説明では、令和4年1月の年月は省略する

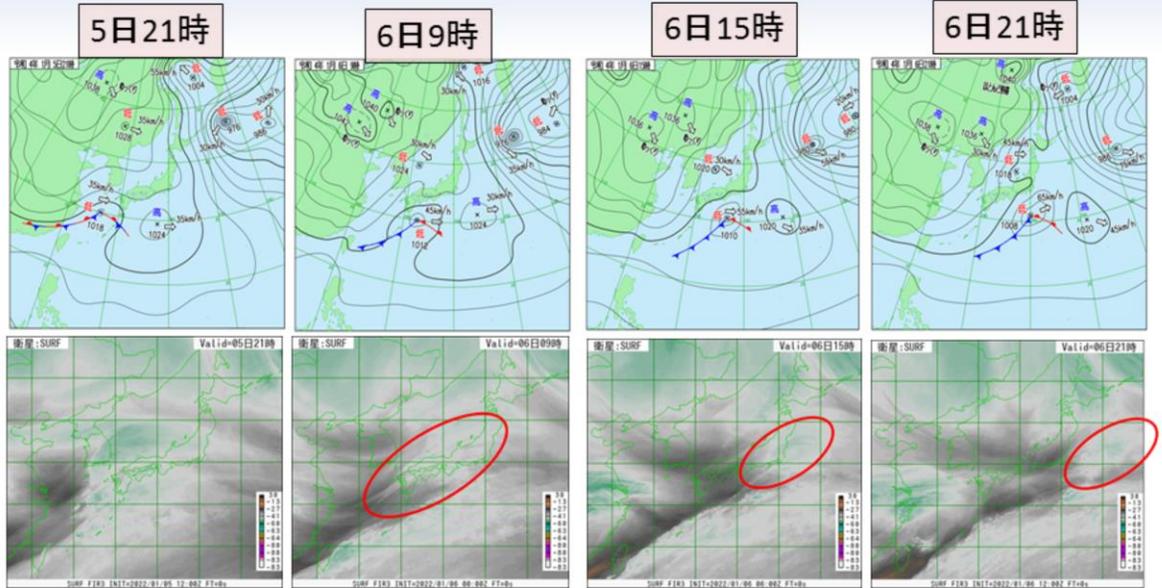
令和4(2022)年1月6日の東京23区を中心とした大雪に関する数値予報結果について取り上げる。本事例では関東南部を中心に6日昼前から雪となり、同日夜まで降り続き、最深積雪は、東京10cm、横浜とつくば8cm、水戸と千葉7cm、さいたまと河口湖2cmとなった。6日夕方に東京23区、千葉県、茨城県に大雪警報が発表された。前日5日夕方の東京都の予報は、くもり 所により 昼前 から 夕方 雪か雨、その他の関東南部の予報も同様であった。前日の予報と当日の大雪警報発表のギャップが大きく、社会的に影響が大きかったことから、この大雪に関して、数値予報結果を以下にまとめた。

概要

- 1月6日、日本の南海上を低気圧が通過した。また、その北東側に当たる関東の南に総観場では表現されない小さな低気圧があり、東進した
- 関東南部を中心に6日昼前から雪となり、同日夜まで降り続いた
- 最深積雪は、東京10cm、横浜とつくば8cm、水戸と千葉7cm、さいたまと河口湖2cmとなった
- 6日夕方に東京23区、千葉県、茨城県に大雪警報が発表された
- 前日5日夕方の東京都の予報は、くもり 所により 昼前 から 夕方 雪か雨、その他の関東南部の予報も同様であった
- この大雪の翌日の路面凍結により転倒する等、1300人以上のけが人が発生したとの報道があった
- 交通では、凍結路面による玉突き事故や首都高速道路でも複数の路線で立ち往生、関東各地のJR線や私鉄各線は一部で運転見合わせ等の影響があった
- 前日の予報と当日の大雪警報発表のギャップが大きく、社会的に影響が大きかったことから、この大雪に関して、数値予報結果をまとめた

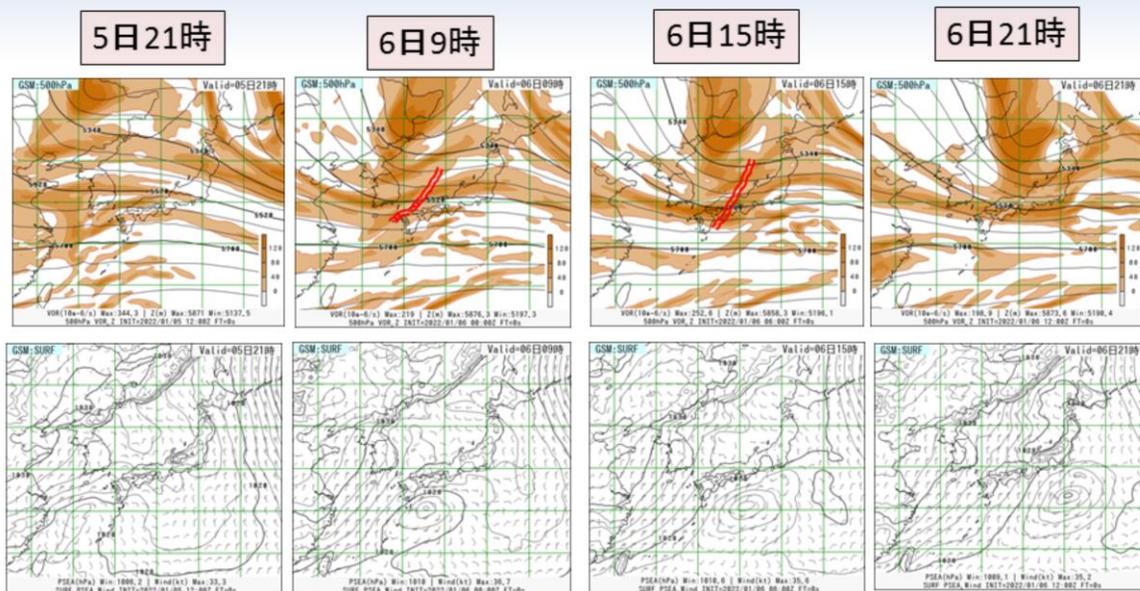
令和4(2022)年1月6日の東京23区を中心とした大雪に関する概要は、スライドに記載したとおりである。

地上天気図・衛星水蒸気画像 (5日21時～6日21時)

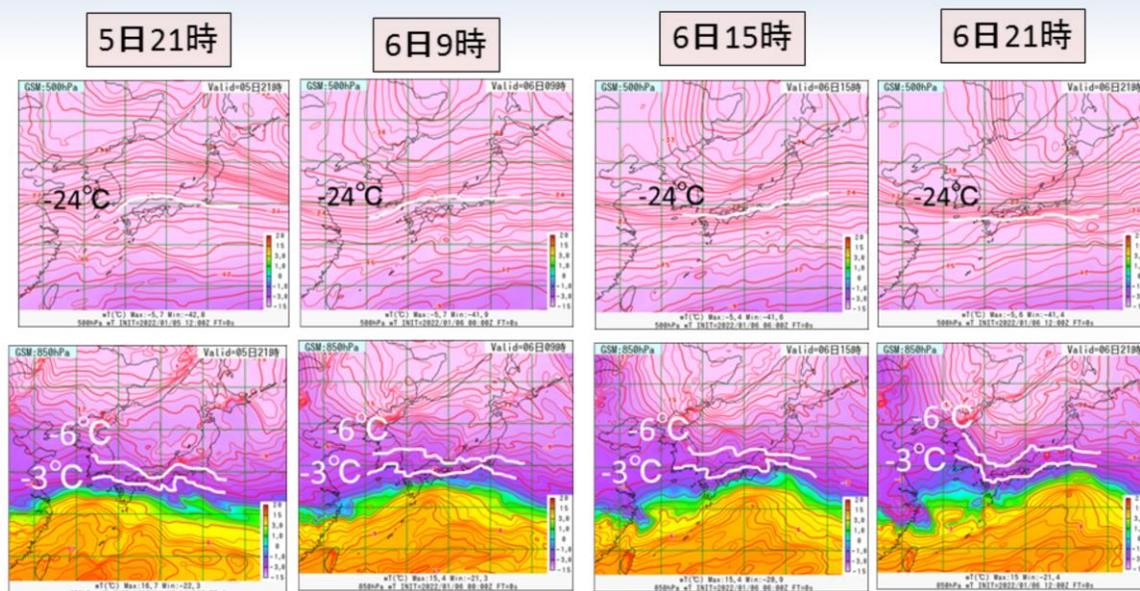


図は令和4(2022)年1月5日21時から6日21時にかけての地上天気図(上段)、気象衛星ひまわりによる水蒸気画像(下段)を示す。説明については次頁に記載した。

解析値の変化(GSM:5日21時~6日21時) (上段:500hPa高度・渦度、下段:海面更正気圧・風)



解析値の変化(GSM:5日21時～6日21時) (上段:500hPa気温、下段:850hPa気温)



500hPaの気温場では-24°C前後、850hPaでは、降雪の目安となる-3～-6°Cの寒気が関東平野にかかる状況であった。

図は令和4(2022)年1月5日21時から6日21時にかけてのGSMの500hPa気温(上段)、850hPa気温(下段)のそれぞれ解析値を示す。

500hPaの気温場では-24°C前後、850hPaでは、降雪の目安となる-3～-6°Cの寒気が関東平野にかかる状況であった。

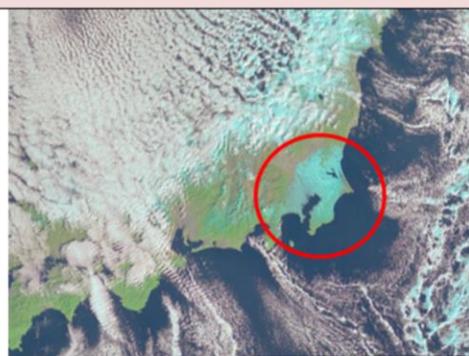
解析降雪量とひまわりのRGB合成画像

6日18時までの12時間解析降雪量



東京で10cmの降雪量を観測。
7cm以上の領域は、横浜から
つくばにかけての領域で見られ
る。

8日9時のひまわりのNatural Color RGB合成画像



水色の領域は雪氷域を示し、関東平野
の積雪に対応。

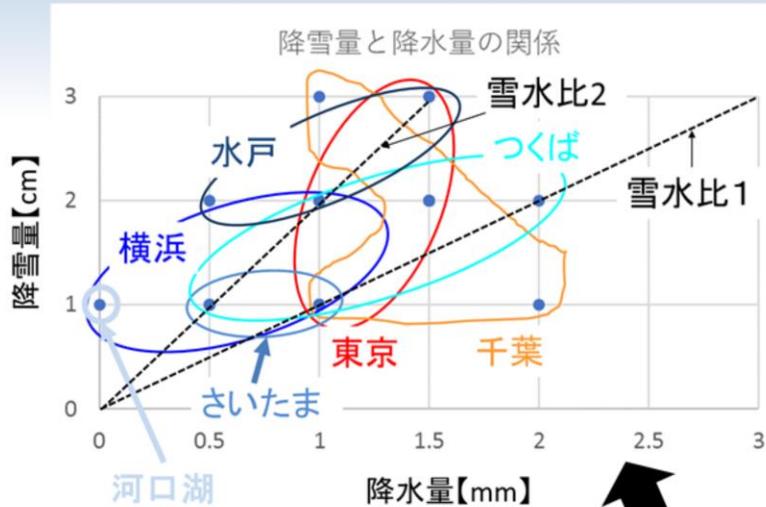
7日7時34分八王子市から
富士山方向の写真。関東
西部山地で白くないことか
ら降雪量が少ないことが
推察される。
(気象庁職員による撮影)



図の上段は、令和4(2022)年1月6日18時までの12時間解析降雪量、8日9時のひまわりのNatural Color RGB合成画像を示す。解析降雪量の図のとおり、東京で10cmの降雪量を観測した。

7cm以上の領域は、横浜からつくばにかけての領域で見られ、ひまわりのRGB合成画像からもその様子が確認できる。また、下段に7日7時34分八王子市から富士山方向の写真を示す。関東西部山地で白くないことから降雪量が少ないことが推察され、解析降雪量の分布に対応したものになっている。

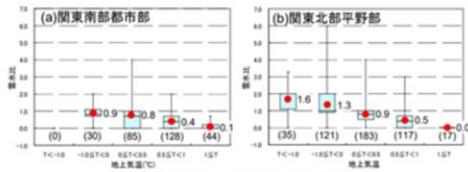
降雪量と降水量の関係(毎時観測データから解析)



降雪のあった地点の平均で雪水比は、約1.7(降水量0mmの部分を除く)とやや大きい特徴がみられた。また、降雪のあった地点では、一時、雪水比が2又はそれを超える時間帯があった。

6日14時~19時
までの降雪のあった
時間を対象

(参考)



第2.2.18 図 気温階別の雪水比の平均値と幅分け図
凡例は第2.2.3図に同じ。()内の数値はデータ数を示す。

牧野(2014)による

図は本事例(令和4(2022)年1月6日)における降雪量と降水量の関係を毎時観測データから解析したものである。降雪のあった地点の平均で雪水比は、約1.7(降水量0mmの部分を除く)とやや大きい特徴がみられた。また、降雪のあった地点では、一時、雪水比が2又はそれを超える時間帯があった。1989~2012年の南岸低気圧の積雪事例についての調査で、関東南部都市部の雪水比の平均値を調査した結果では、雪水比は1を下回っていた(牧野 2014)。このことから、本事例は珍しい事例であったと思われる。

GSM・MSMの予測と解析値の比較

令和4年度数値予報解説資料集

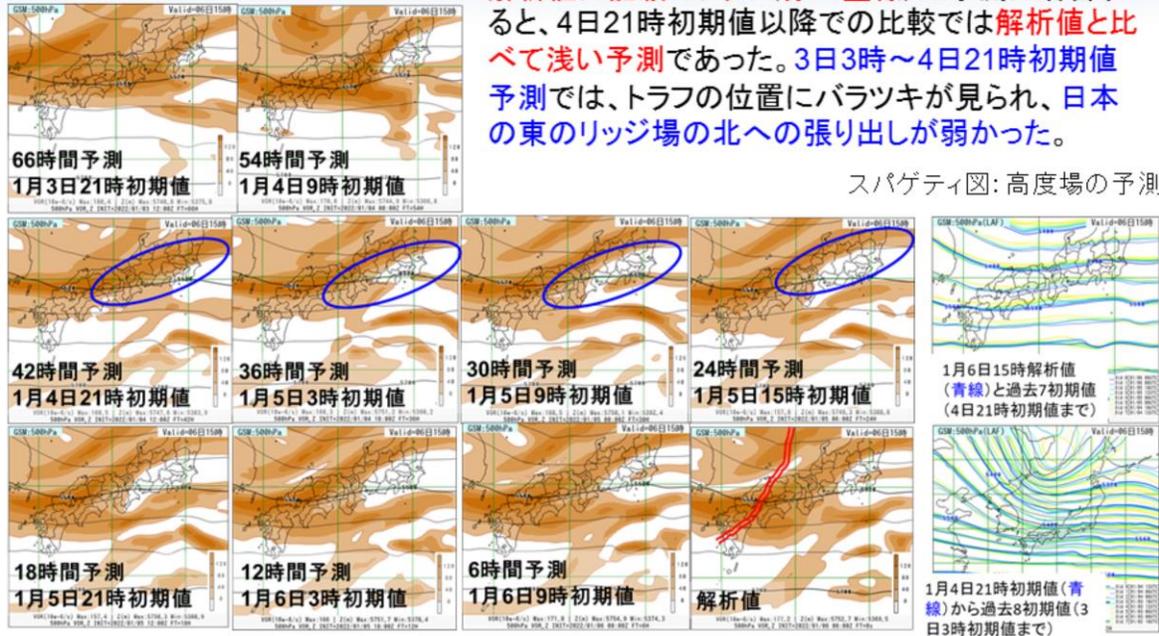
369

本事例(令和4(2022)年1月6日)におけるGSMとメソ数値予報システム(MSM)のそれぞれの予測と解析値の比較結果を示す。

GSM: 500hPaの高度・渦度の予測と解析値の比較 (6日15時対象)

解析値に記載のトラフ(赤二重線)の予測に着目すると、4日21時初期値以降での比較では**解析値と比べて浅い予測**であった。3日3時~4日21時初期値予測では、トラフの位置にバラツキが見られ、日本の東のリッジ場の北への張り出しが弱かった。

スパゲティ図: 高度場の予測

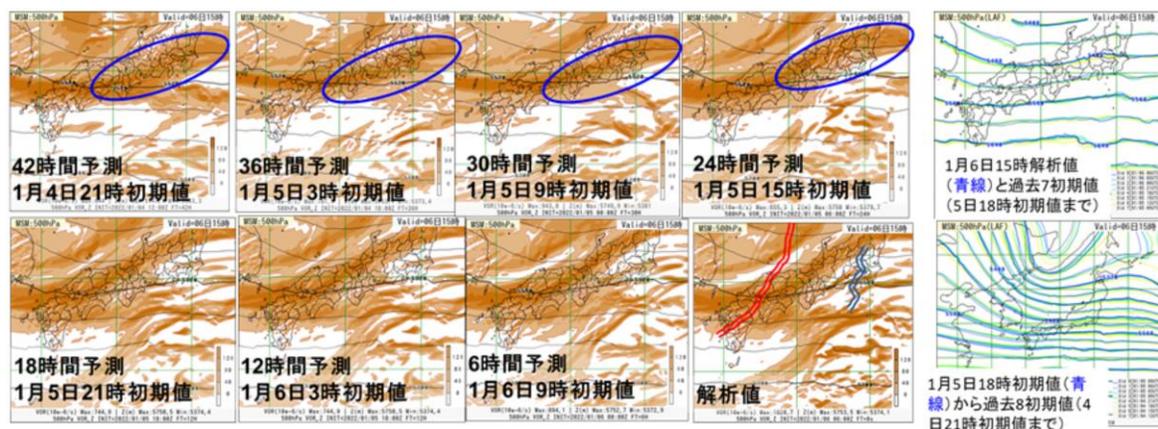


図は、令和4(2022)年1月6日15時を対象としたGSMによる500hPa高度(m)・渦度($10^{-6}/s$)の66時間前~6時間前からの予測結果と対象時刻の解析値および高度場の予測のスパゲティ図を示す。解析値に記載のトラフ(赤二重線)の予測に着目すると、4日21時初期値以降での比較では解析値と比べて浅い予測であった。3日3時(図は21時から)~4日21時初期値予測では、トラフの位置にバラツキが見られ、日本の東のリッジ場の北への張り出しが弱かった(青楕円付近に着目)。

MSM: 500hPaの高度・渦度の予測と解析値の比較 (6日15時対象)

解析値に記載のトラフ(赤二重線)の予測に着目すると、解析値と比べてそれほど大きな差はないが、トラフ前面のリッジ(青二重線)の予測が浅かった。4日21時～5日18時初期値予測では、トラフの浅い傾向、日本の東のリッジ場の北への張り出しが弱い傾向が見られた(5520m付近の渦度0線に着目すると関東の東にかけて蛇行のない状態であった(青楕円))。

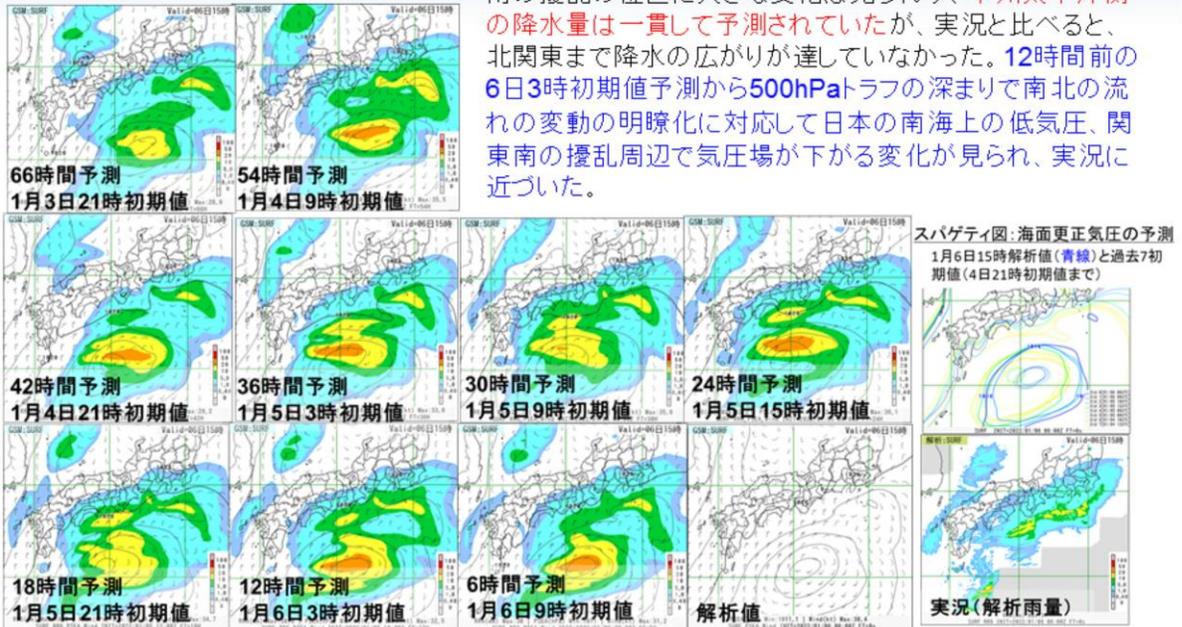
スパゲティ図: 高度場の予測



図は、令和4(2022)年1月6日15時を対象としたMSMによる500hPa高度(m)・渦度($10^{-6}/s$)の42時間前～6時間前からの予測結果と対象時刻の解析値および高度場の予測のスパゲティ図を示す。解析値に記載のトラフ(赤二重線)の予測に着目すると、解析値と比べてそれほど大きな差はないが、トラフ前面のリッジ(青二重線)の予測が浅かった。4日21時～5日18時初期値予測では、トラフの浅い傾向、日本の東のリッジ場の北への張り出しが弱い傾向が見られた(5520m付近の渦度0線に着目すると関東の東にかけて蛇行のない状態であった(青楕円))。

GSM: 6時間降水量 (mm)・風 (kt)・海面更正気圧 (hPa) の 予測と解析値の比較 (6日15時対象)

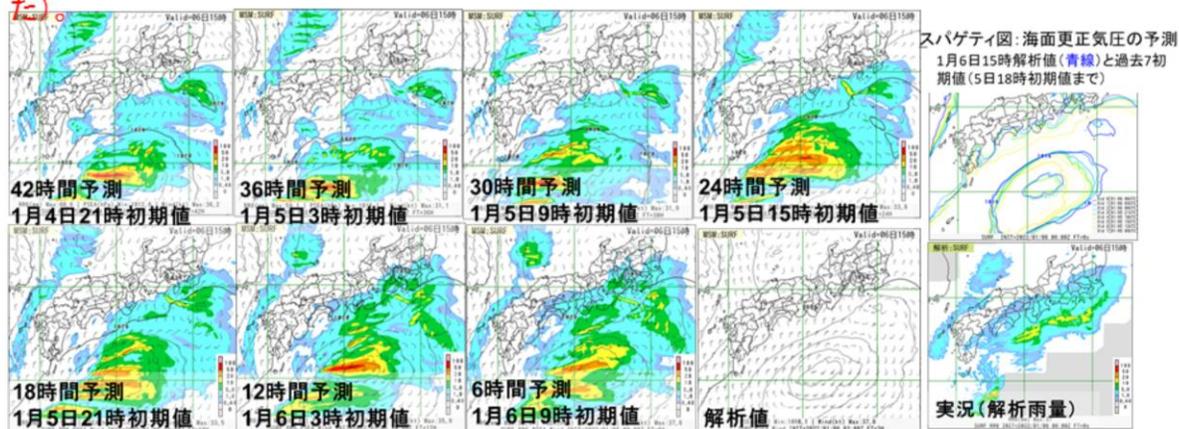
解析値に比べると日本の南海上の低気圧の位置や関東の南の擾乱の位置に大きな変化は見られず、**本州太平洋側の降水量は一貫して予測されていたが、実況と比べると、北関東まで降水の広がりが達していなかった。**12時間前の6日3時初期値予測から500hPaトラフの深まりで南北の流れの変動の明瞭化に対応して日本の南海上の低気圧、関東南の擾乱周辺で気圧場が下がる変化が見られ、実況に近づいた。



図は、令和4(2022)年1月6日15時を対象としたGSMによる6時間降水量 (mm)・風 (kt)・海面更正気圧 (hPa) の66時間前～6時間前からの予測結果と対象時刻の解析値、海面更正気圧の予測のスパゲティ図および6日15時の実況(前6時間解析雨量)を示す。解析値に比べると日本の南海上の低気圧の位置や関東の南の擾乱の位置に大きな変化は見られず、本州太平洋側の降水量は一貫して予測されていたが、実況と比べると、北関東まで降水の広がりが達していなかった。12時間前の6日3時初期値予測から500hPaトラフの深まりで南北の流れの変動の明瞭化に対応して日本の南海上の低気圧、関東南の擾乱周辺で気圧場が下がる変化が見られ、実況に近づいた。

MSM: 6時間降水量 (mm)・風 (kt)・海面更正気圧 (hPa) の 予測と解析値の比較 (6日15時対象)

解析値に比べると日本の南海上の低気圧の位置や関東の南の擾乱は予測されていたが、位置は南ないし南東寄りであった。その影響で24時間前の5日15時初期値予測まで、本州太平洋側の降水量自体が予測できていなかった。12時間前の6日3時初期値予測から500hPaの日本の東のリッジの北への張り出しにより南北の流れの変動の明瞭化に対応して、日本の南海上の低気圧の北上や関東南の擾乱周辺で気圧場が下がる変化が見られた。この初期値を境に降水域の北への拡大が急激にみられ、実況に近づいた(細かく予測結果を確認すると、5日21時初期値予測から6日0時初期値予測の間の変化が大きかった)。



図は、令和4(2022)年1月6日15時を対象としたGSMによる6時間降水量 (mm)・風 (kt)・海面更正気圧 (hPa) の42時間前～6時間前からの予測結果と対象時刻の解析値、海面更正気圧の予測のスパゲティ図および6日15時の実況(前6時間解析雨量)を示す。解析値に比べると日本の南海上の低気圧の位置や関東の南の擾乱は予測されていたが、位置は南ないし南東寄りであった。その影響で24時間前の5日15時初期値予測まで、本州太平洋側の降水量自体が予測できていなかった。12時間前の6日3時初期値予測から500hPaの日本の東のリッジの北への張り出しにより南北の流れの変動の明瞭化に対応して、日本の南海上の低気圧の北上や関東南の擾乱周辺で気圧場が下がる変化が見られた。この初期値を境に降水域の北への拡大が急激にみられ、実況に近づいた(細かく予測結果を確認すると、5日21時初期値予測から6日0時初期値予測の間の変化が大きかった。改善した要因については後述する)。

GSM・MSMの予測と解析値の比較結果のまとめ

- GSM・MSM共通: 500hPa高度の5520m付近のトラフの深さが浅い、日本の東のリッジの北への張り出しが弱い傾向がみられた(トラフ・リッジのめりはり不足)
- GSM
 - 3日21時初期値予測から、本州太平洋側の降水量は一貫して予測されていた。実況と比べると、北端部分の予測は少し不十分だった
 - 12時間前の6日3時初期値予測から500hPaトラフの深まりで南北の流れの変動の明瞭化に対応して日本の南海上の低気圧、関東南の擾乱周辺で気圧場が下がる変化がみられ、この初期値を境に降水域の北への拡大がみられ、実況に近づいた
- MSM
 - 日本の南海上の低気圧の位置や関東の南の擾乱は予測されていたが、位置は南ないし南東寄りで、18時間前の5日21時初期値予測まで、本州太平洋側の降水量自体が予測できていなかった
 - 12時間前の6日3時(細かく見ると6日0時)初期値予測から500hPaの日本の東のリッジの北への張り出しにより南北の流れの変動の明瞭化に対応して、日本の南海上の低気圧の北上や関東南の擾乱周辺で気圧場が下がる変化がみられ、この初期値を境に降水域の北への拡大が急激にみられ、実況に近づいた



本事例(令和4(2022)年1月6日)におけるGSM・MSMの予測と解析値の比較結果について、まとめた。

12時間降雪量ガイダンスと 実況との比較

GSM・MSM
7日0時対象

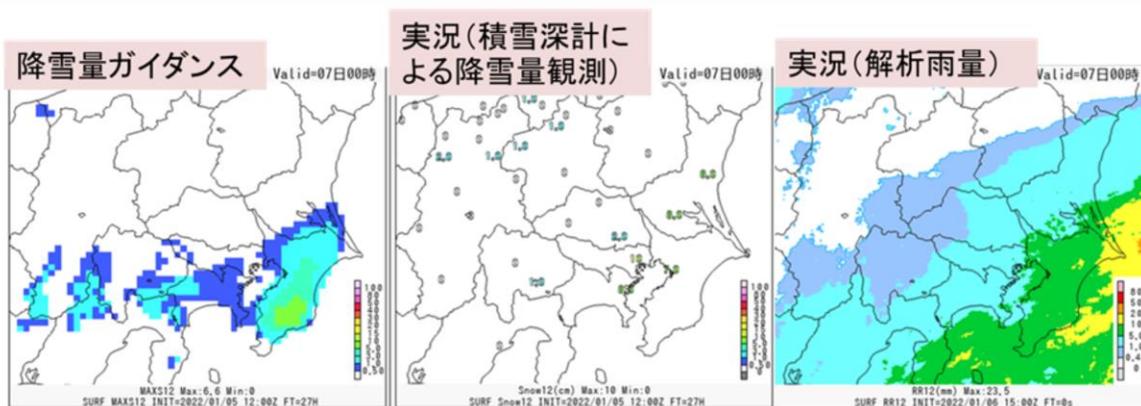
令和4年度数値予報解説資料集

375

本事例(令和4(2022)年1月6日)における7日0時対象のGSMおよびMSMの12時間降雪量ガイダンスと実況との比較結果を示す。

GSM:12時間降雪量ガイダンスの予測(5日21時初期値)と実況の比較(7日0時対象)

27時間前からの予測

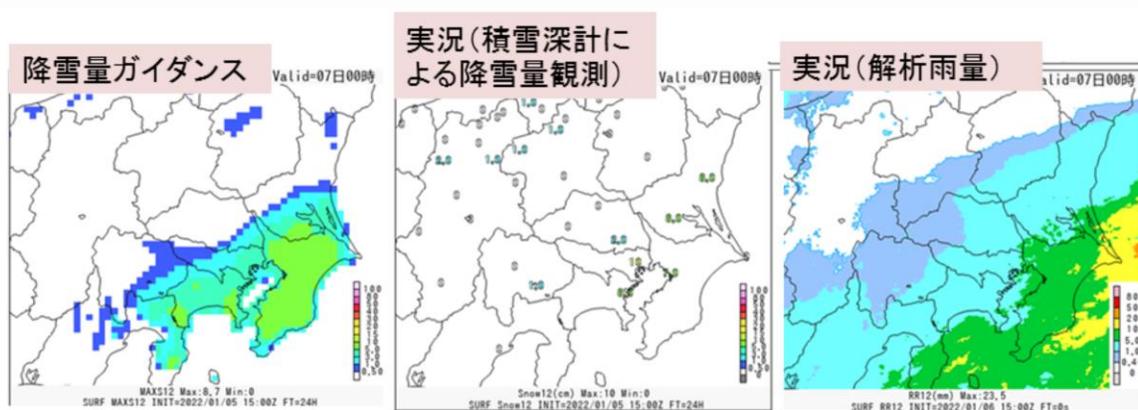


5日21時初期値の予測では、関東南部沿岸部から内陸へ予測降水量が表現され、実況に近づいた(図略)。降雪量については、関東南部や山梨県等の広域に予測。降雪量ガイダンスでは千葉県南部で最大が7cm程度となった。

図は、令和4(2022)年1月7日0時を対象としたGSMの12時間降雪量ガイダンス(cm)、実況(cm:積雪深計による降雪量観測)および実況(mm:前12時間解析雨量)を示している。なお、当該ガイダンスは、27時間前からの予測(5日21時初期値)結果である。5日21時初期値の予測では、関東南部沿岸部から内陸へ予測降水量が表現され、実況に近づいた(図略)。降雪量については、関東南部や山梨県等の広域に予測。降雪量ガイダンスでは千葉県南部で最大が7cm程度となった。

MSM:12時間降雪量ガイダンスの予測(6日0時初期値)と実況の比較 (7日0時対象)

24時間前からの予測

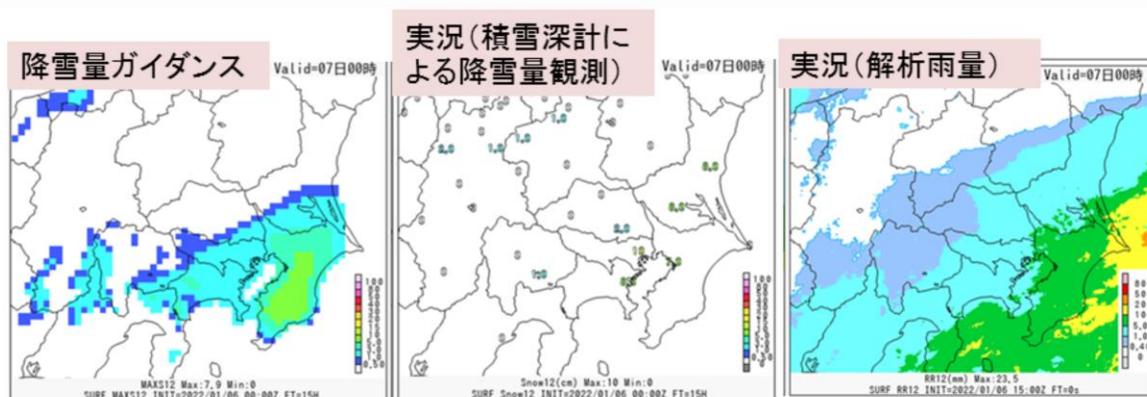


6日0時初期値予測では、3時間前の初期値(5日21時: 図略)の予測に比べて、房総半島の降水域はさらに北へ拡大し、茨城県南部や東京、神奈川県内に広がり、予測降水量が増加(図略)。降雪量ガイダンスによる予測降雪域は、降水域の広がりと同様に広がった。千葉県内で最大が9cm程度となった。

図は、令和4(2022)年1月7日0時を対象としたMSMの12時間降雪量ガイダンス(cm)、実況(cm:積雪深計による降雪量観測)および実況(mm:前12時間解析雨量)を示している。なお、当該ガイダンスは、24時間前からの予測(6日0時初期値)結果である。6日0時初期値予測では、3時間前の初期値(5日21時: 図省略)の予測に比べて、房総半島の降水域はさらに北へ拡大し、茨城県南部や東京、神奈川県内に広がり、予測降水量が増加(図略)。降雪量ガイダンスによる予測降雪域は、降水域の広がりと同様に広がった。千葉県内で最大が9cm程度となった。

GSM: 12時間降雪量ガイダンスの予測(6日9時初期値)と実況の比較 (7日0時対象)

15時間前からの予測

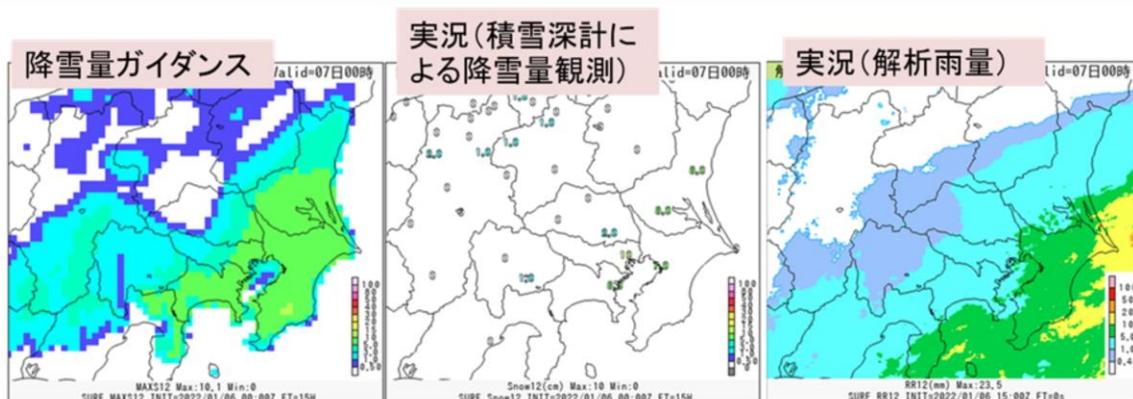


6日9時初期値の予測では、5日21時と比べて降水域・降雪域は北へやや拡大した。降雪量は、当該ガイダンスで関東南部中心に1～3cm、千葉県南部で最大8cm程度に増加した。

図は、令和4(2022)年1月7日0時を対象としたGSMの12時間降雪量ガイダンス(cm)、実況(cm:積雪深計による降雪量観測)および実況(mm:前12時間解析雨量)を示している。なお、当該ガイダンスは、15時間前からの予測(6日9時初期値)結果である。6日9時初期値の予測では、5日21時と比べて降水域・降雪域は北へやや拡大した。降雪量は、当該ガイダンスで関東南部中心に1～3cm、千葉県南部で最大8cm程度に増加した。

MSM:12時間降雪量ガイダンスの予測(6日9時初期値)と実況の比較 (7日0時対象)

15時間前からの予測



6日9時初期値予測では、6日0時と比べて降水域・降雪域はさらに茨城県や栃木県内で予測される等、北へ拡大した。降雪量は、当該ガイダンスで関東南部、茨城県南部中心に5～7cm、千葉県南部で最大10cmが予測されるようになった。

図は、令和4(2022)年1月7日0時を対象としたMSMの12時間降雪量ガイダンス(cm)、実況(cm:積雪深計による降雪量観測)および実況(mm:前12時間解析雨量)を示している。なお、当該ガイダンスは、15時間前からの予測(6日9時初期値)結果である。6日9時初期値予測では、6日0時と比べて降水域・降雪域はさらに茨城県や栃木県内で予測される等、北へ拡大した。降雪量は、当該ガイダンスで関東南部、茨城県南部中心に5～7cm、千葉県南部で最大10cmが予測されるようになった。

12時間降雪量ガイダンスと実況との比較結果 のまとめ

- GSM: 7日0時を対象とした12時間降雪量について
 - 27時間前の予測では、関東南部や山梨県等の広域に予測され、15時間前の予測から関東南部で予測領域が拡大し、関東南部中心に1～3cm、千葉県南部で最大8cm程度予測されるようになった
- MSM: 7日0時を対象とした12時間降雪量について
 - 15時間前の予測(6日9時初期値)では関東南部、茨城県南部中心に5～7cm、千葉県南部で最大10cmが予測されるようになった

本事例(令和4(2022)年1月6日)における12時間降雪量ガイダンスと実況との比較結果について、まとめた。

24・12時間降雪量ガイダンスの5CM・10CM超過確率と実況との比較

MEPS

7日0時対象

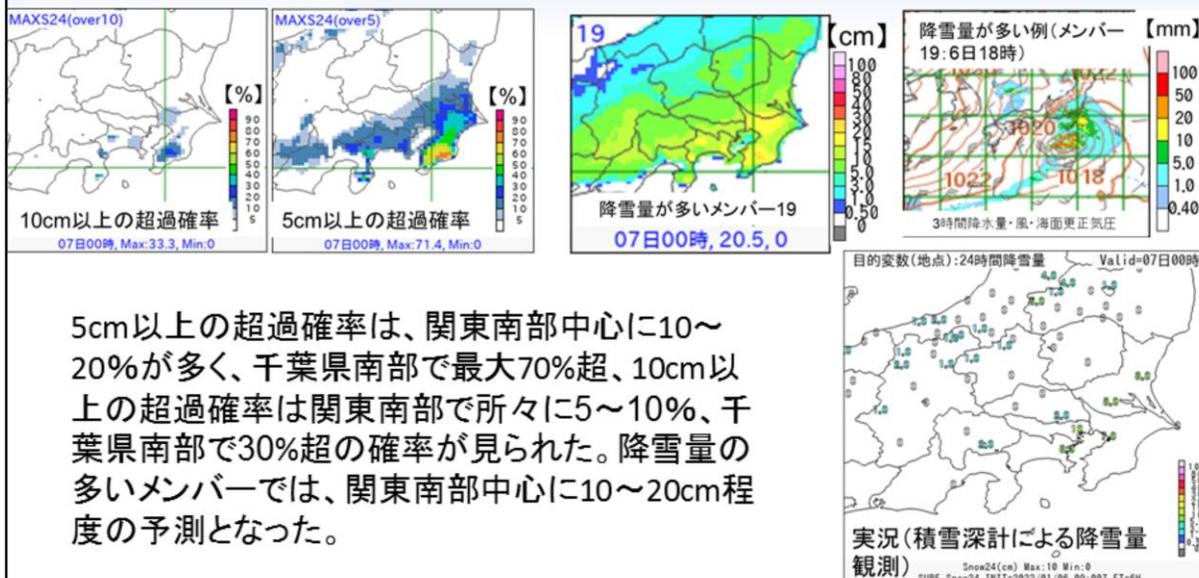
令和4年度数値予報解説資料集

381

本事例(令和4(2022)年1月6日)における7日0時対象のメソアンサンブル予報システム(MEPS)の24・12時間降雪量ガイダンスの5cm・10cm超過確率と実況との比較結果を示す。

MEPS(24時間降雪量ガイダンスの超過確率) 5日21時初期値予測(対象:7日0時)

27時間前からの予測

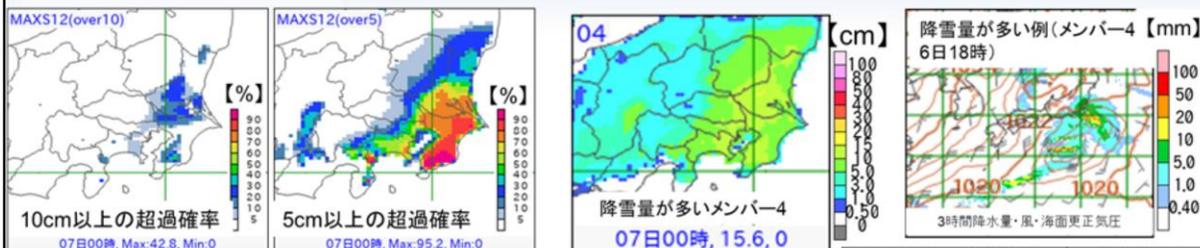


5cm以上の超過確率は、関東南部中心に10～20%が多く、千葉県南部で最大70%超、10cm以上の超過確率は関東南部で所々に5～10%、千葉県南部で30%超の確率が見られた。降雪量の多いメンバーでは、関東南部中心に10～20cm程度の予測となった。

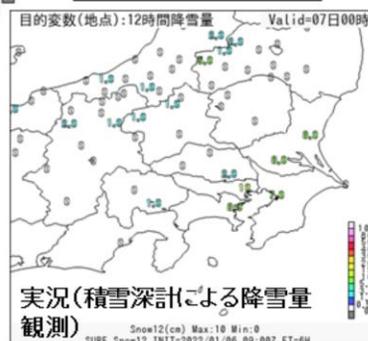
図は、令和4(2022)年1月7日0時を対象としたMEPSの24時間降雪量ガイダンスの5cm・10cm超過確率(%)の結果を左側に示している。右側は、降雪量の多いメンバーの24時間降雪量ガイダンス(cm)と同メンバーの6日18時の3時間降水量(mm)・風(kt)・海面更正気圧(hPa)の予測結果および実況(cm:積雪深計による降雪量観測)を示している。なお、ガイダンスは、27時間前からの予測(5日21時初期値)結果である。5cm以上の超過確率は、関東南部中心に10～20%が多く、千葉県南部で最大70%超、10cm以上の超過確率は関東南部で所々に5～10%、千葉県南部で30%超の確率が見られた。降雪量の多いメンバーでは、関東南部中心に10～20cm程度の予測となった。

MEPS(12時間降雪量ガイダンスの超過確率) 6日9時初期値予測(対象:7日0時)

15時間前からの予測



5cm以上の超過確率は、関東南部中心に50%以上で千葉県南部で最大95%、10cm以上の超過確率は茨城県と千葉県で20~30%で、千葉県南部で最大40%超であった。降雪量の多いメンバーでは、関東南部中心に10cm前後の予測となった。このメンバーでは、本州南海上の低気圧の発達はなくなり、関東の南の擾乱が主体となる事例となった。



図は、令和4(2022)年1月7日0時を対象とした15時間前からの予測(5日21時初期値)結果である。各図の説明は、27時間前からの予測結果と同様である。5cm以上の超過確率は、関東南部中心に50%以上で千葉県南部で最大95%、10cm以上の超過確率は茨城県と千葉県で20~30%で、千葉県南部で最大40%超であった。降雪量の多いメンバーでは、関東南部中心に10cm前後の予測となった。このメンバーでは、本州南海上の低気圧の発達はなくなり、関東の南の擾乱が主体となる事例となった。

MEPSガイダンスの予測と実況との比較結果のまとめ

- 24時間降雪量ガイダンスの超過確率(7日0時対象)
 - 27時間前の予測(5日21時初期値)
 - 5cm以上: 関東南部中心に10~20%が多く、千葉県南部で最大70%超
 - 10cm以上: 関東南部で所々に5~10%、千葉県南部で30%超
- 12時間降雪量ガイダンスの超過確率(7日0時対象)
 - 15時間前の予測(6日9時初期値)
 - 5cm以上: 関東南部中心に50%以上で千葉県南部で最大95%
 - 10cm以上: 茨城・千葉県で20~30%、千葉県南部で最大40%超

本事例(令和4(2022)年1月6日)におけるMEPSガイダンスの予測と実況との比較結果について、まとめた。

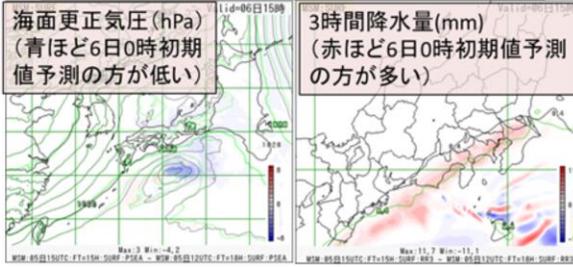
MSMの予測結果が改善した要因

降水域の北への拡大が急激に変化した6日0時と5日21時初期値の予測比較より

本事例(令和4(2022)年1月6日)において、MSMの予測結果が改善した要因について、降水域の北への拡大が急激に変化した6日0時と5日21時初期値の予測比較からまとめた。

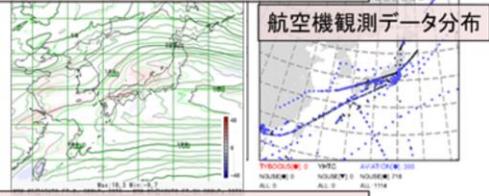
MSMの6日0時と5日21時初期値の予測比較 (対象:6日15時)

6日0時初期値15時間予測—5日21時初期値18時間予測
(対象:6日15時)

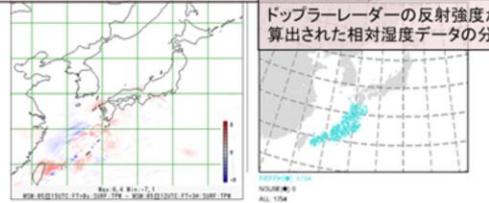


6日0時初期値の5日21時予測からの修正量(左)と6日0時初期値作成時に修正に関係したと思われる観測データの分布(右)

300hPaの等風速線(kt)
(赤ほど6日0時初期値予測の方が強い)



可降水量(mm)
(赤ほど6日0時初期値予測の方が多い)

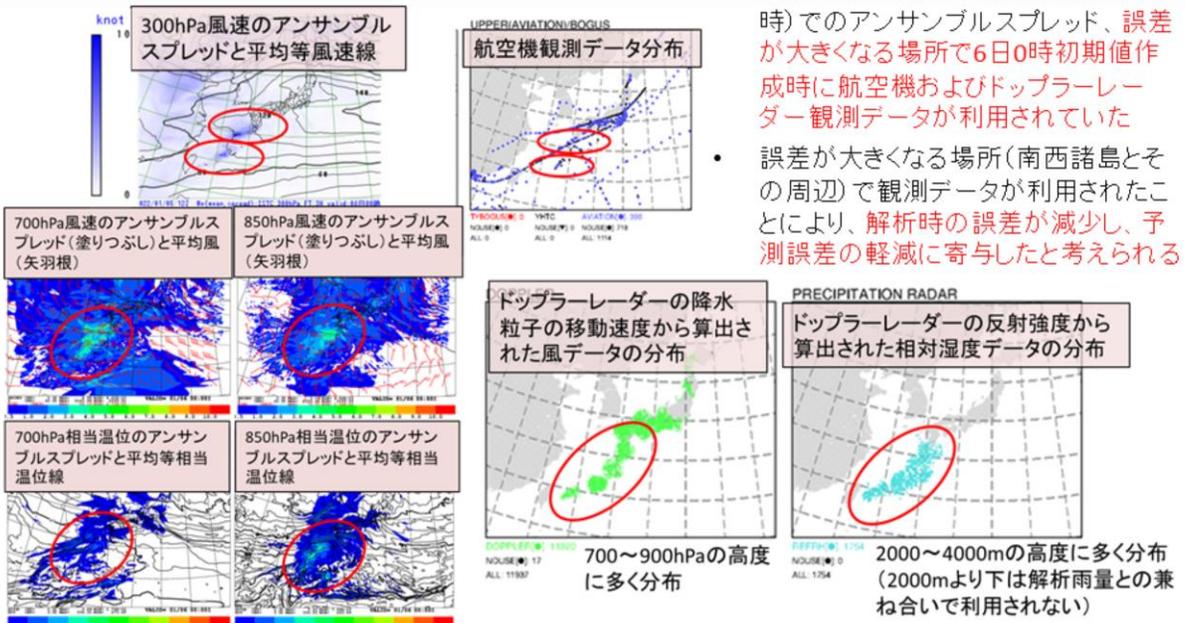


MSMの予測結果を確認すると、5日21時初期値予測から6日0時初期値予測の間の変化が大きかった。変化が大きかった要素の例として、海面更正気圧と3時間降水量予測について、上図に示す。紀伊半島の南の低気圧から北東方向での気圧の低下と予測降水量の北側への広がり(関東南部でも表現)が確認できる。この変化は、初期値に遡ると6日0時初期値での解析値作成時の観測データ(航空機およびドップラーレーダー観測データ等)による修正の効果が大きかったと考えられる(ジェットの流れと水蒸気量の修正の効果)。

MSMの令和4(2022)年1月6日0時と5日21時初期値の予測比較を示す。図は、左側が6日0時初期値の15時間予測の5日21時初期値の18時間予測からの変化の結果(海面更正気圧および3時間降水量)を示し、右側が6日0時初期値の5日21時予測からの修正量と6日0時初期値作成時に修正に関係したと思われる観測データの分布(航空機観測データおよびドップラーレーダーの反射強度から算出された相対湿度データの分布)を示している。MSMの予測結果を確認すると、5日21時初期値予測から6日0時初期値予測の間の変化が大きかった。変化が大きかった要素の例として、海面更正気圧と3時間降水量予測について、上図に示す。紀伊半島の南の低気圧から北東方向での気圧の低下と予測降水量の北側への広がり(関東南部でも表現)が確認できる。この変化は、初期値に遡ると6日0時初期値での解析値作成時の観測データ(航空機およびドップラーレーダー観測データ等)による修正の効果が大きかったと考えられる(ジェットの流れと水蒸気量の修正の効果)。

MEPSのアンサンブルスプレッドの大きい領域と観測データ分布比較

(5日21時初期値3時間予測(左)と6日0時初期値に利用された観測データ分布(右))



- 5日21時初期値の3時間予測(6日0時)でのアンサンブルスプレッド、誤差が大きくなる場所で6日0時初期値作成時に航空機およびドップラーレーダー観測データが利用されていた
- 誤差が大きくなる場所(南西諸島とその周辺)で観測データが利用されたことにより、解析時の誤差が減少し、予測誤差の軽減に寄与したと考えられる

MEPSのアンサンブルスプレッド(ばらつき)の大きい領域(300・700・850hPa風速(kt)、700・850hPa相当温位(K))と観測データ分布(航空機観測データ、ドップラーレーダー観測(風・相対湿度)比較を示す。MEPSは令和4(2022)年1月5日21時初期値3時間予測結果、観測データ分布は6日0時初期値に利用された結果である。5日21時初期値の3時間予測(6日0時)でのアンサンブルスプレッド、誤差が大きくなる場所で6日0時初期値作成時に航空機およびドップラーレーダー観測データが利用されていたことが分かる(赤丸印)。これらのことから、誤差が大きくなる場所(南西諸島とその周辺)で観測データが利用されたことにより、解析時の誤差が減少し、その後の降水域の北への拡大が劇的に変化して実況に近づくなどの予測誤差の軽減に寄与したと考えられる。

全体のまとめ

- GSM・MSM・MEPS共に東京とその周辺の大雪を精度よく予測できなかった
 - 要因
 - 500hPa高度の5520m付近のトラフの深さが浅い、日本の東のリッジの北への張り出しが弱い傾向がみられた(トラフ・リッジのめりはり不足)
 - GSMでは、1月3日21時初期値予測から、本州太平洋側の降水量は一貫して予測されていたが、実況(6日15時対象)と比べると、前項のことがあり、北関東まで降水の広がりが達していなかった
 - MSMでは、18時間前の5日21時初期値予測まで、実況(6日15時対象)と比べて、本州太平洋側の降水量自体が予測できていなかった。6日0時初期値にて、南西諸島とその周辺の誤差が大きくなる場所に航空機およびドップラーレーダー観測データが利用されたことにより、予測が改善された
 - 直近の12時間降雪量ガイダンス予測(15時間前の予測(6日9時初期値))
 - ✓ GSM: 関東南部中心に1~3cm、千葉県南部で最大8cm
 - ✓ MSM: 関東南部、茨城県南部中心に5~7cm、千葉県南部で最大10cm
 - MEPSにおいて、24時間降雪量の5cm以上の超過確率は、関東南部中心に10~20%の確率(ただし、MEPSの1月6日9時初期値の12時間降雪量の5cm以上の超過確率は、50%以上とそれまでの確率に比べて高い)(対象は7日0時)

本事例(令和4(2022)年1月6日)における全体のまとめを示す。

参考文献

- 牧野真一, 2014: 大雪の事例(平成25年1月14日関東地方南部の大雪事例). 平成25年度予報技術研修テキスト, 気象庁予報部, 28-38.



第3章 事例解析編

3.2 令和4年7月の豪雨事例の数値予報の結果

※以下のスライドの説明では、FTは予報時間(例:FT=6は6時間予報)、「～時」は日本時間、図中の「UTC」は協定世界時(例:00UTCは9時)を表す。また、現在、現業利用中の○km解像度の数値予報システム名を○km(数値予報システム名)と示す場合がある(例:5kmMSM、2kmLFM)。特にkmの付いていない(数値予報システム名)だけの場合は、現業利用中のものと同様である。以下のスライドの説明では、令和4年7月の年月は省略する

本節では、令和4(2022)年7月に発生した線状降水帯に関する数値予報システムにおける予測結果の内、第3.2.1項で5日に高知県で発生した線状降水帯事例、第3.2.2項で15日に九州南部における大雨事例、第3.2.3項で19日に九州北部で発生した線状降水帯事例をそれぞれ取り上げる。さらに、環境場(第3.2.4項)、まとめ(第3.2.5項)について示す。

7月に発生した線状降水帯に関する数値予報システムにおける 予測結果について(概要)

対象日時	場所	大雨発生確率ガイダンス(概ね15時間前)	5kmMSM (降水量実況比)	2kmLFM (降水量実況比)	気が付いた点
7月5日0時 (発生)	高知県	最大30%	過小傾向	過小傾向	LFMが実況に近い(風向風速に差、降水の持続性予測に課題)
7月15日6時 (発生せず)	九州南部	10%程度	過小	過小	214mm/3hの事例。(周辺部で風向風速に差、水蒸気の濃淡がはっきりしない)
7月16日0時と3時 (発生せず)	九州	九州南部を中心に25~30%	九州北部:過大傾向、南部:過小傾向	九州北部:過大傾向、南部:過小傾向	上層トラフが深まらず、下層暖湿気の流入が弱い(可降水量は海上で少ない傾向)
7月18日15時と18時 (発生)	壱岐・対馬	最大で10~15%。直近で急激に上昇	過小傾向	実況に近い(位置ずれあり)	実況で急激な変化(対流雲発達)
7月19日0時・3時・6時 (発生)	九州北部	実況で対応する地域では30%以上	過小傾向	実況に近い(位置ずれあり)	MSMは過小傾向だが、大雨発生確率Gでポテンシャルを捉えていることを認識

青: 良い方のコメント / 赤: 悪い方のコメント

令和4(2022)年7月に発生した線状降水帯に関する数値予報システムにおける予測結果について、表にまとめた。本節では、この内、第3.2.1項で5日に高知県で発生した線状降水帯事例、第3.2.2項で15日に九州南部における大雨事例、第3.2.3項で19日に九州北部で発生した線状降水帯事例をそれぞれ取り上げる。



第3章 事例解析編

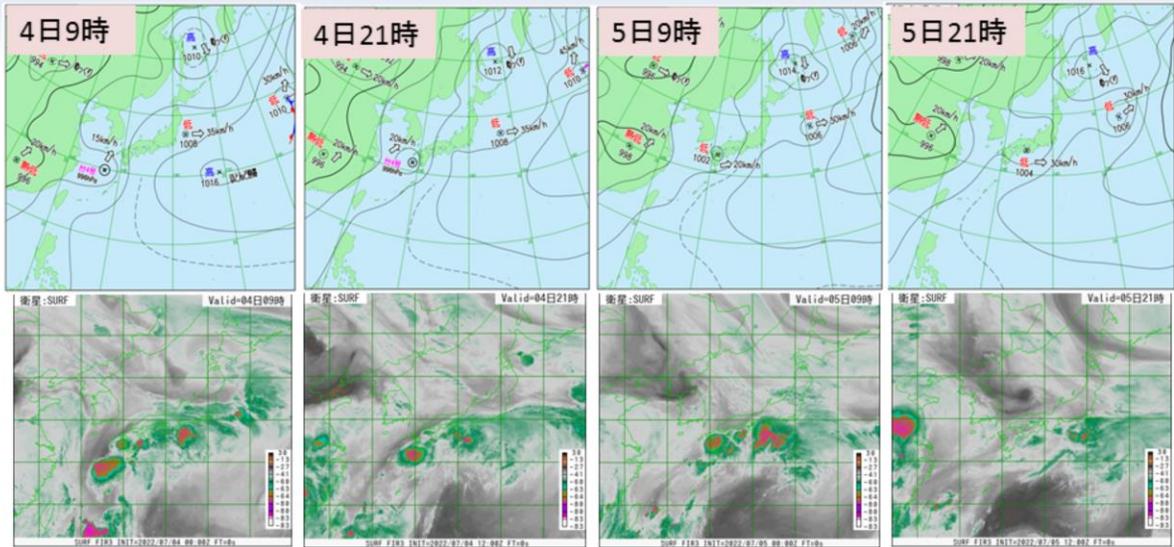
3.2.1 高知県で発生した線状降水帯事例 (7月5日)

概要

- 北上する台風第4号とその東側の太平洋高気圧の縁辺からの下層暖湿気が日本付近に入り続け、5日3時までの24時間降水量が、高知県を中心に200mmを超え、所により500mmを超える大雨となった。
 - 5日0時39分に高知県に顕著な大雨に関する気象情報が発表され、線状降水帯による非常に激しい雨が降り続き、命に危険が及ぶ土砂災害や洪水による災害発生の危険度が急激に高まっていることが呼びかけられた
 - 3時間降水量では、高知県須崎で208.0mm(5日1時10分まで)、高知県窪川で194.5mm(5日0時30分まで)となり、観測史上1位を更新した
 - 24時間降水量では、高知県須崎で409.0mm(5日3時00分まで)となり、7月の1位を更新した
- その他、3日に愛知県、京都府、福井県、5日には長崎県、熊本県、福岡県、北海道、青森県で記録的短時間大雨情報が発表された。また、3日13時30分頃、栃木県宇都宮市下栗町から西刑部町にかけてダウンバーストによる突風が発生した
- **線状降水帯の発生した時間帯を考慮し、5日0時を対象として、3時間100mm以上の大雨発生確率ガイダンスの予測結果、現業数値予報システム(5kmMSM、2kmLFMおよび5kmMEPS)による予測と実況の比較結果を示す。**

令和4(2022)年7月5日に高知県で発生した線状降水帯事例の概要を示す。

地上天気図・衛星水蒸気画像 (4日9時～5日21時)



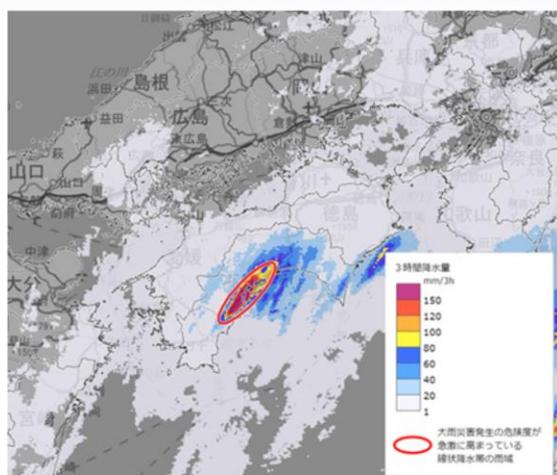
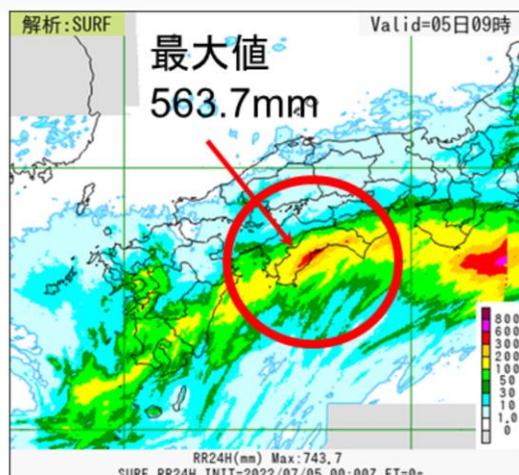
台風と太平洋高気圧の縁辺からの下層暖湿気が日本付近に入り続け、西日本で対流雲が発達した。

図は令和4(2022)年7月4日9時から5日21時にかけての地上天気図(上段)、気象衛星ひまわりによる水蒸気画像(下段)を示す。

台風と太平洋高気圧の縁辺からの下層暖湿気が日本付近に入り続け、西日本で対流雲が発達した。

解析雨量

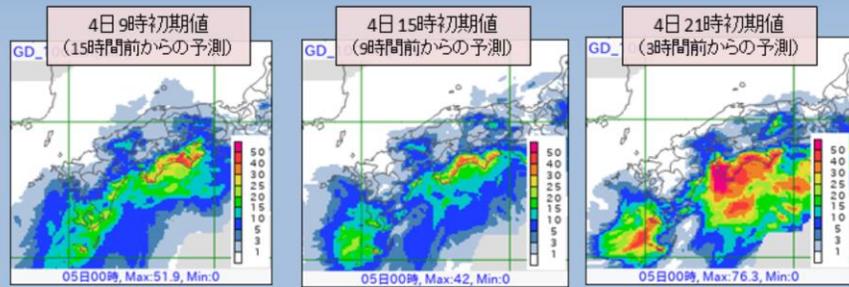
24時間(左図:5日9時対象)と線状降水帯発生時の3時間解析雨量
(右図:5日0時30分対象)



7月5日9時までの24時間解析雨量(左図)と5日0時30分対象の線状降水帯発生時の3時間解析雨量を示す。高知県では、線状降水帯の発生により、大雨となった。

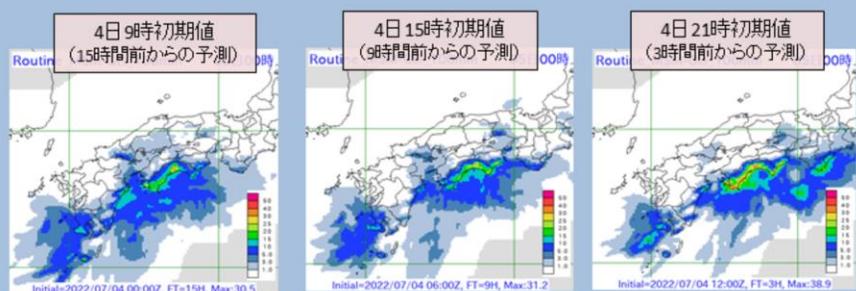
大雨発生確率ガイダンス(3時間100mm以上)の予測結果 (5日0時対象)

メソアンサンブル(5kmMEPS)大雨発生確率ガイダンスの全メンバー最大値(%)



*11×11格子(55km四方)で前1時間降水量にその前後の1時間降水量を加えた3時間降水量が100mm以上を示す。

メソモデル(5kmMSM)大雨発生確率ガイダンス(%)



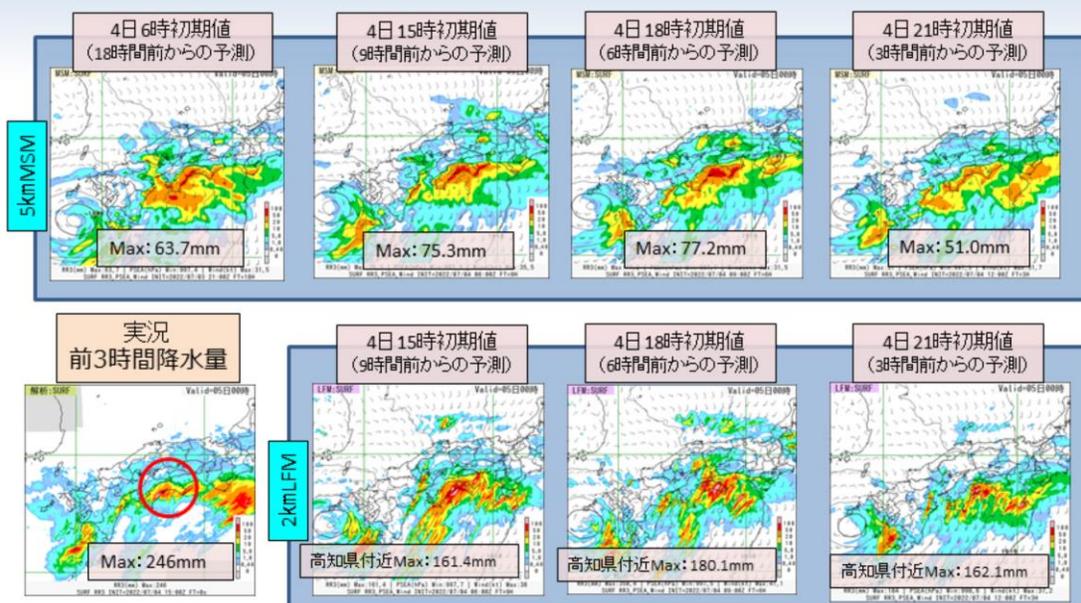
- ▶15時間前から5kmMEPSでは高知県を中心に40%以上、5kmMSMでは最大30%台の確率が予測されていた。
- ▶3時間前から、5kmMEPSでは50%を超える確率が予測されていた。



令和4(2022)年7月5日0時対象の3時間100mm以上の大雨発生確率ガイダンス(2.8節参照)の予測結果を確認する。上段はメソアンサンブル予報システム(5kmMEPS)による全メンバー最大値(単位:%)、下段はメソ数値予報システム(5kmMSM)のものを示し、左から15時間前、9時間前、3時間前からのそれぞれ予測結果を示している。右上は実況の結果を示す。

15時間前から5kmMEPSでは高知県を中心に40%以上、5kmMSMでは最大30%台の確率が予測され、3時間前から、5kmMEPSでは50%を超える確率が予測されていたことを確認した。

現業数値予報システムによる予測と実況の比較結果 (5日0時対象【上段:5kmMSM、下段:2kmLFM】)



掲載の図はすべて、前3時間降水量・地上風・海面更正気圧

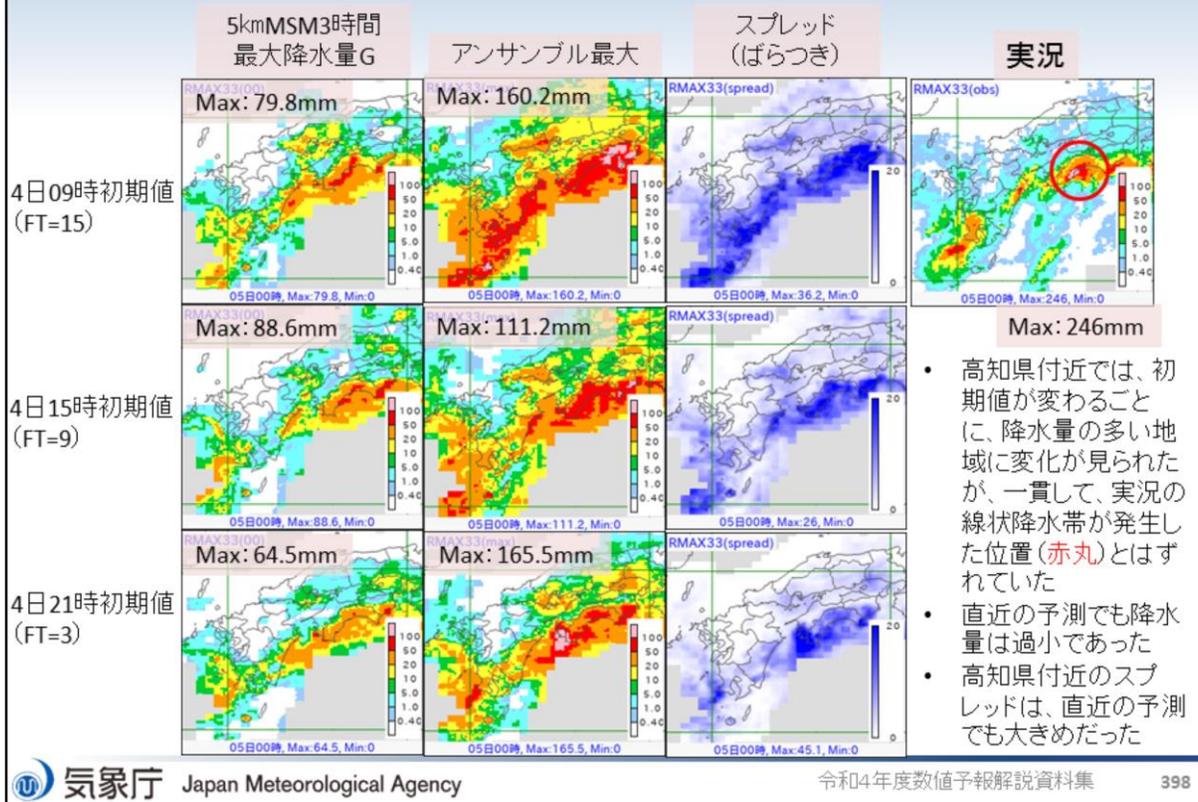
- ▶高知県の線状降水帯(赤丸付近)による降水量予測は、5kmMSMは過小傾向。
- ▶LFMの予測降水量は、実況に近い。ただし、実況と100mm程度の差があり、過小傾向。

5kmMSM(上段)および2kmLFM(下段)の3時間降水量について、令和4(2022)年7月5日0時を対象とした結果を示す。

図は、前3時間降水量(mm)・地上風(kt)・海面更正気圧(hPa)で、7月4日6時初期値の18時間前からの予測(2kmLFMは4日15時初期値の9時間前からの予測)から順番に7月4日21時初期値の3時間前からの予測までの結果を示す。また、下段左に解析雨量(mm)の結果を示す。

高知県の線状降水帯(赤丸付近)による予測降水量に着目すると、5kmMSMは過小傾向、2kmLFMは5kmMSM比で実況に近いが、実況と100mm程度の差があり、過小傾向である。

5kmMEPS3時間最大降水量ガイダンス(5日0時対象)

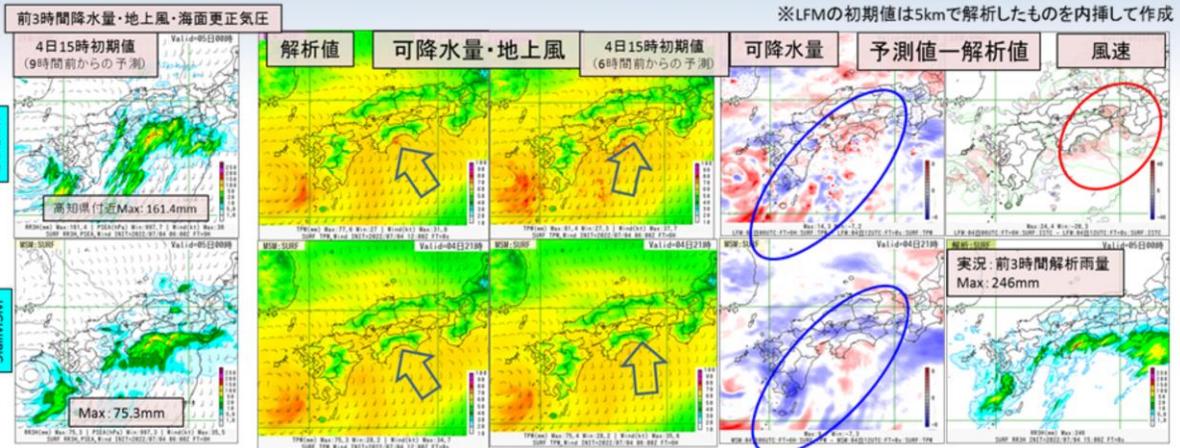


令和4(2022)年7月5日0時を対象とした5kmMEPS3時間最大降水量ガイダンスの結果を示す。右上図が7月5日0時の観測の5km格子3時間最大降水量、左側から5kmMSM3時間最大降水量ガイダンス、5kmMEPS3時間最大降水量ガイダンスメンバー最大値、スプレッド(ばらつき)を示し、上段から下段に向かって、7月4日9時初期値15時間予測、15時初期値9時間予測および21時初期値3時間予測の結果をそれぞれ示す。降水量、スプレッドの単位はいずれもmmである。スプレッドは、青色が濃いほどスプレッドが大きいことを示す。

以下の特徴が見られた。

- ・高知県付近では、初期値が変わるごとに、降水量の多い地域に変化が見られたが、一貫して、実況の線状降水帯が発生した位置(赤丸)とはずれていた
- ・直近の予測でも降水量は過小であった
- ・高知県付近のスプレッドは、直近の予測でも大きめだった

現業数値予報システム(5kmMSMおよび2kmLFM)による6時間前予測と解析値の比較結果【対象時刻:4日21時】



5kmMSMと2kmLFMとも共通で予測値は解析値と比べて、可降水量は九州東岸から四国沿岸部は多い傾向(青い楕円の領域)だが、四国や紀伊半島のはるか沖合では少ない傾向。四国沖の領域(赤い楕円の領域)に着目すると、地上の風向・風速が異なる(解析値の風向が南東～南南東、予測値の風向が南～南南西で、風速の予測値が解析値に比べて強い)。予測降水量と実況との間に差が生じたことに関係した可能性がある。参考として2kmLFMと5kmMSMの5日0時対象の予測降水量の結果(左図)と実況(右下図)を示した。高知県付近で比較すると、実況比で過小であった。



令和4(2022)年7月4日21時を対象とした2kmLFM(上段)と5kmMSM(下段)による6時間前からの予測可降水量と解析値の比較結果を示す。左図の5日0時対象の予測降水量の環境場を確認していることになる。図は、左から順に前3時間降水量(mm)・地上風(kt)・海面更正気圧(hPa)、可降水量の解析値(mm)、4日15時初期値の6時間前からの可降水量の予測値(mm)、その可降水量の解析値からの差分値(赤色ほど予測値の可降水量が多いことを示す)、4日15時初期値の6時間前からの地上風速の解析値からの差分値(kt)(赤色ほど予測値の地上風速が強いことを示す)である。また、右下図は、5日0時対象の前3時間解析雨量(mm)である。特徴は以下のとおりである。

5kmMSMと2kmLFMとも共通で予測値は解析値と比べて、可降水量は九州東岸から四国沿岸部は多い傾向(青い楕円の領域)だが、四国や紀伊半島のはるか沖合では少ない傾向がみられた。四国沖の領域(赤い楕円の領域)に着目すると、地上の風向・風速が異なる(解析値の風向が南東～南南東、予測値の風向が南～南南西で、風速の予測値が解析値に比べて強い)。予測降水量と実況との間に差が生じたことに関係した可能性がある。参考として2kmLFMと5kmMSMの5日0時対象の予測降水量の結果(左図)と実況(右下図)を示した。高知県付近で比較すると、実況比で過小であった。

まとめ

- 7月5日に高知県で発生した線状降水帯事例に関する数値予報システムにおける予測結果について、3時間100mm以上の大雨発生確率ガイダンスの予測結果、現業数値予報システム(5kmMSM、2kmLFMおよび5kmMEPS)による予測と実況の比較結果を示した
- 大雨発生確率ガイダンスによる予測結果
 - 15時間前から高知県を中心に最大30%台の確率が予測されていた。3時間前から、30%を超える確率の領域が拡大した
- 5kmMSMおよび2kmLFMによる予測結果
 - 予測降水量は、5kmMSMは過小傾向、2kmLFMの予測降水量は、100mm以上で実況に近い。ただし、実況と100mm程度の差があり、過小傾向
- 5kmMEPSガイダンスによる予測結果
 - 初期値が変わるごとに、降水量の多い地域に変化が見られたが、一貫して、実況の線状降水帯が発生した位置とはずれ、予測降水量は過小であった
- 5kmMSMおよび2kmLFMによる6時間前からの予測と解析値の比較結果
 - 可降水量は九州東岸から四国沿岸部は多い傾向だが、四国や紀伊半島のはるか沖合では少ない傾向。四国沖では、地上の風向・風速が異なっていた。予測降水量と実況との間に差が生じたことに関係した可能性がある

令和4(2022)年7月5日の高知県で発生した線状降水帯事例に関する数値予報システムにおける予測結果について、このスライドにまとめた。



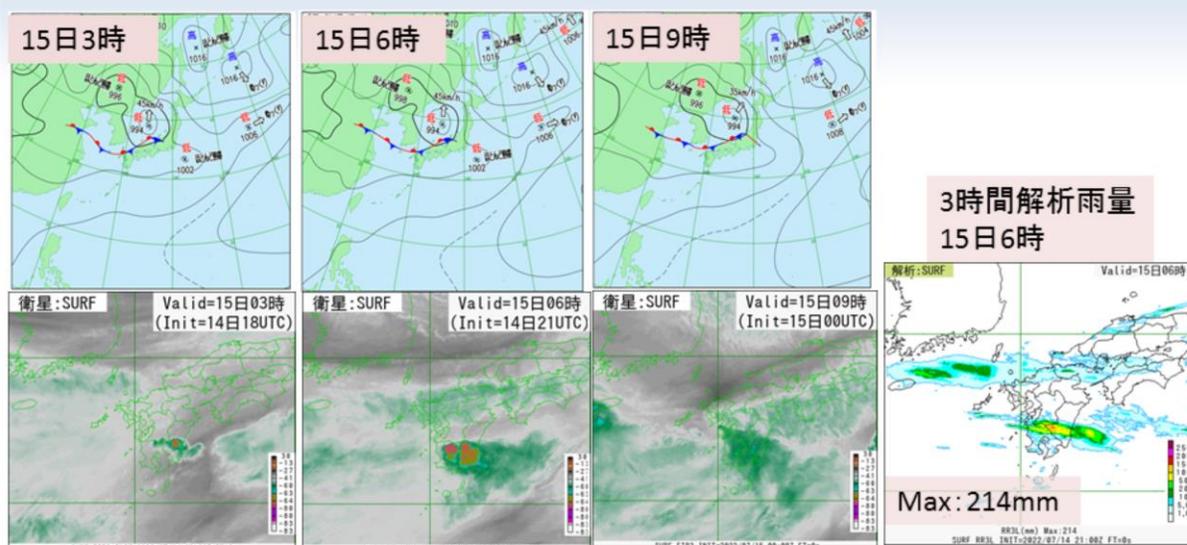
第3章 事例解析編

3.2.2 九州南部における大雨事例 (7月15日)

概要

- 九州北部に停滞している梅雨前線に向かって、暖かく湿った空気が流入し、大気の状態が不安定となった。宮崎県を中心に総雨量が200mmを超える大雨となり、宮崎県加久藤では15日5時までの1時間降水量が93.0mmの猛烈な雨が観測され、15日の日降水量が234.5mmに達した
- また、5日5時30分に宮崎県えびの市付近で120mm以上、同日6時には宮崎県高原町付近で約120mmの記録的短時間大雨情報が発表された
- **記録的短時間大雨情報が発表された時間帯を考慮し、15日6時を対象として、3時間100mm以上の大雨発生確率ガイダンスの予測結果、現業数値予報システム(5kmMSM、2kmLFMおよび5kmMEPS)による予測と実況の比較結果を示す**

地上天気図・衛星水蒸気画像



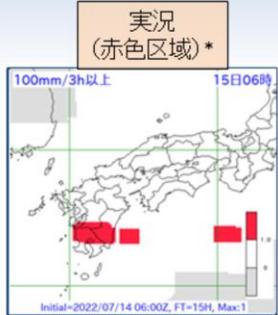
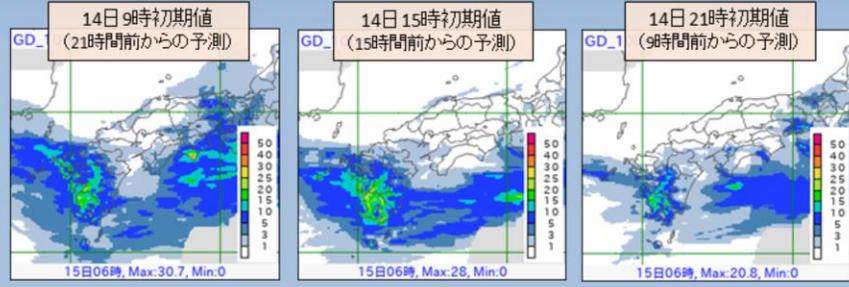
九州北部に停滞している梅雨前線に向かって、暖かく湿った空気が流入し、大気の状態が不安定となり、対流雲が発達した。九州南部では、3時間に200mmを超える大雨となった。

図は令和4(2022)年7月4日9時から5日21時にかけての地上天気図(上段)、気象衛星ひまわりによる水蒸気画像(下段)を示す。また、下段右に3時間解析雨量(mm)の結果を示す。

九州北部に停滞している梅雨前線に向かって、暖かく湿った空気が流入し、大気の状態が不安定となり、対流雲が発達した。九州南部では、3時間に200mmを超える大雨となった。

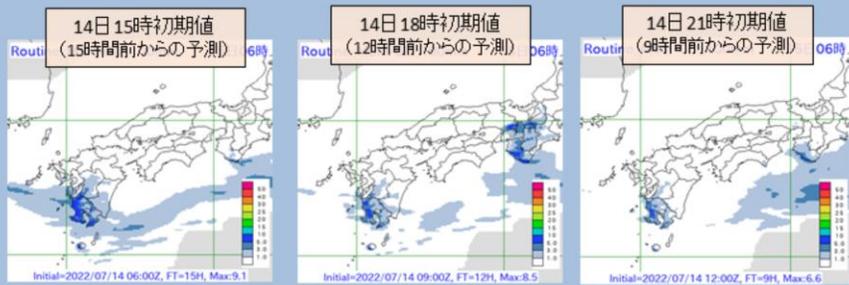
大雨発生確率ガイダンス(3時間100mm以上)の予測結果 (15日6時対象)

メソアンサンブル(5kmMEPS)大雨発生確率ガイダンスの全メンバー最大値(%)



*11×11格子(55km四方)で前1時間降水量にその前後の1時間降水量を加えた3時間降水量が100mm以上を示す。

メソモデル(5kmMSM)大雨発生確率ガイダンス(%)

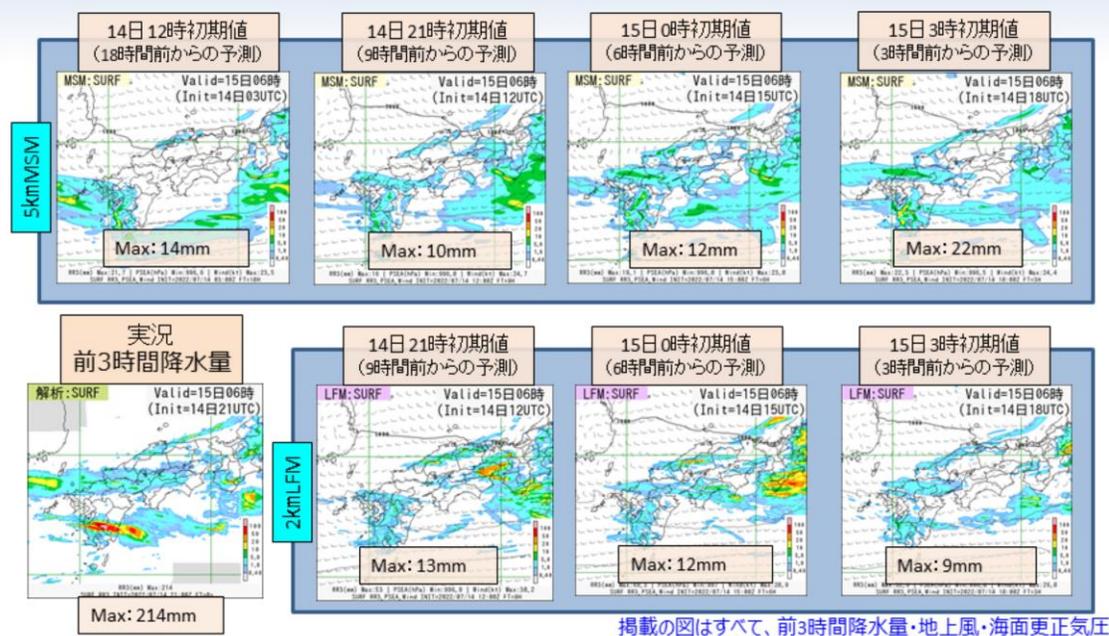


▶21時間前から5kmMEPSでは九州南部を中心に20%以上が予測されていたが、5kmMSMでは10%程度の確率予測だった。

令和4(2022)年7月15日6時対象の3時間100mm以上の大雨発生確率ガイダンスの予測結果を確認する。上段はメソアンサンブル予報システム(5kmMEPS)による全メンバー最大値(単位:%)、下段はメソ数値予報システム(5kmMSM)のものを示し、5kmMEPSは左から21時間前、15時間前、9時間前からのそれぞれ予測結果を、5kmMSMは左から15時間前、12時間前、9時間前からのそれぞれ予測結果を示している。右上は実況の結果を示す。

21時間前から5kmMEPSでは九州南部を中心に20%以上が予測されていたが、5kmMSMでは10%程度の確率予測だった。

現業数値予報システムによる予測と実況の比較結果 (15日6時対象【上段:5kmMSM、下段:2kmLFM】)



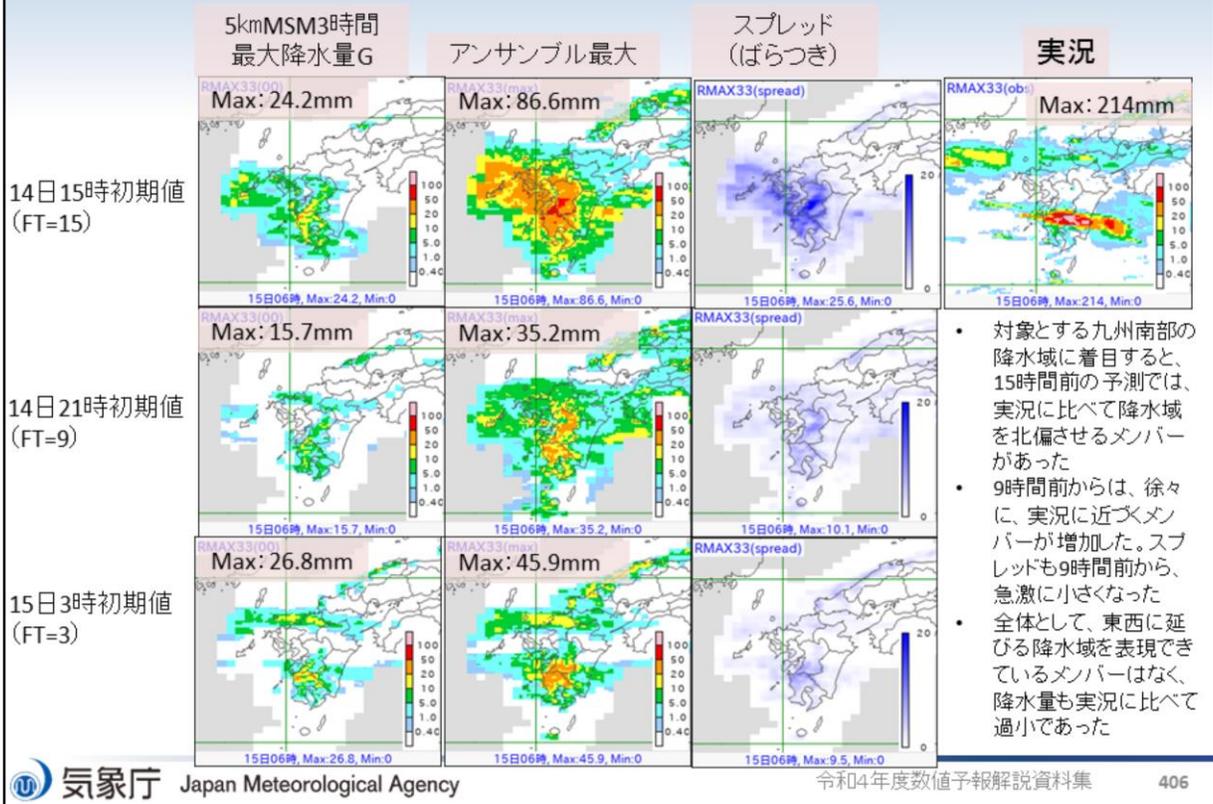
▶5kmMSM・2kmLFMの九州南部の予測降水量は、過小

5kmMSM(上段)および2kmLFM(下段)の3時間降水量について、令和4(2022)年7月15日6時を対象とした結果を示す。

図は、前3時間降水量(mm)・地上風(kt)・海面更正気圧(hPa)で、7月14日12時初期値の18時間前からの予測(2kmLFMは14日21時初期値の9時間前からの予測)から順番に7月15日3時初期値の3時間前から予測までの結果を示す。また、下段左に解析雨量(mm)の結果を示す。

5kmMSM・2kmLFMの九州南部の予測降水量は、過小であった。

5kmMEPS3時間最大降水量ガイダンス(15日6時対象)



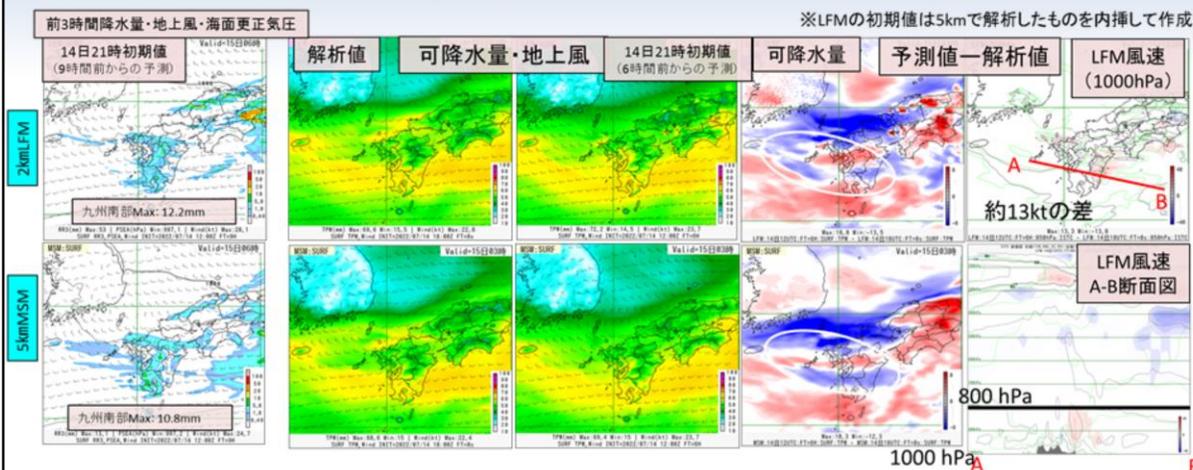
令和4(2022)年7月15日6時を対象とした5kmMEPS3時間最大降水量ガイダンスの結果を示す。右上図が7月15日6時の観測の5km格子3時間最大降水量、左側から5kmMSM3時間最大降水量ガイダンス、5kmMEPS3時間最大降水量ガイダンスメンバー最大値、スプレッド(ばらつき)を示し、上段から下段に向かって、7月14日15時初期値15時間予測、21時初期値9時間予測および15日3時初期値3時間予測の結果をそれぞれ示す。降水量、スプレッドの単位はいずれもmmである。スプレッドは、青色が濃いほどスプレッドが大きいことを示す。

対象とする九州南部の降水域に着目すると、以下の特徴が見られた。

- ・15時間前の予測では、実況に比べて降水域を北偏させるメンバーがあった
- ・9時間前からは、徐々に、実況に近づくメンバーが増加した。スプレッドも9時間前から、急激に小さくなった
- ・全体として、東西に延びる降水域を表現できているメンバーはなく、降水量も実況に比べて過小であった

現業数値予報システム(5kmMSMおよび2kmLFM)による 6時間前予測と解析値の比較結果 【対象時刻:15日3時】

※LFMの初期値は5kmで解析したものを内挿して作成



5kmMSMと2kmLFMとも共通で予測値は解析値と比べて、可降水量は帯状の降水域(白楕円の領域)ではコントラストがはっきりしないこととその領域より北側では少なく、南側では多い傾向。白楕円の領域内の宮崎県沿岸付近に着目すると、下層の風向・風速が異なる(解析値の風向が南成分、予測値の風向が西成分を持つ風で、風速の予測値が九州東海上で解析値に比べて強い)。参考として2kmLFMと5kmMSMの15日6時対象の予測降水量の結果(左図)を示した。実況比で過小であった。

令和4(2022)年7月15日3時を対象とした2kmLFM(上段)と5kmMSM(下段)による6時間前からの予測可降水量と解析値の比較結果を示す。左図の15日6時対象の予測降水量の環境場を確認していることになる。図は、左から順に前3時間降水量(mm)・地上風(kt)・海面更正気圧(hPa)、可降水量の解析値(mm)、14日21時初期値の6時間前からの可降水量の予測値(mm)、その可降水量の解析値からの差分値(赤色ほど予測値の可降水量が多いことを示す)、14日21時初期値の6時間前からの1000hPaの風速の解析値からの差分値(kt)(赤色ほど予測値の地上風速が強いことを示す)と前述の図内のABの風速の解析値からの差分値の断面図である。特徴は以下のとおりである。

5kmMSMと2kmLFMとも共通で予測値は解析値と比べて、可降水量は帯状の降水域(白楕円の領域)ではコントラストがはっきりしないこととその領域より北側では少なく、南側では多い傾向であった。白楕円の領域内の宮崎県沿岸付近に着目すると、下層の風向・風速が異なる(解析値の風向が南成分、予測値の風向が西成分を持つ風で、風速の予測値が九州東海上で解析値に比べて強い)。参考として2kmLFMと5kmMSMの15日6時対象の予測降水量の結果(左図)を示した。実況比で過小であった。

まとめ

- 7月15日の九州南部における大雨事例に関する数値予報システムにおける予測結果について、3時間100mm以上の大雨発生確率ガイダンスの予測結果、現業数値予報システム(5kmMSM、2kmLFMおよび5kmMEPS)による予測と実況の比較結果を示した
- 大雨発生確率ガイダンスによる予測結果
 - 21時間前から5kmMEPSでは九州南部を中心に20%以上が予測されていたが、5kmMSMでは10%程度の確率予測だった
- 5kmMSMおよび2kmLFMによる予測結果
 - 5kmMSM・2kmLFMの九州南部の予測降水量は、過小であった
- 5kmMEPSガイダンスによる予測結果
 - 東西に延びる降水域を表現できているメンバーはなく、降水量も実況に比べて過小であった
- 5kmMSMおよび2kmLFMによる6時間前からの予測と解析値の比較結果
 - 予測値は解析値と比べて、可降水量は帯状の降水域ではコントラストがはっきりしないこととその領域より北側では少なく、南側では多い傾向であった。宮崎県沿岸付近に着目すると、下層の風向・風速が異なっていた(解析値の風向が南成分、予測値の風向が西成分を持つ風で、風速の予測値が九州東海上で解析値に比べて強い)

令和4(2022)年7月15日の九州南部における大雨事例に関する数値予報システムにおける予測結果について、このスライドにまとめた。



第3章 事例解析編

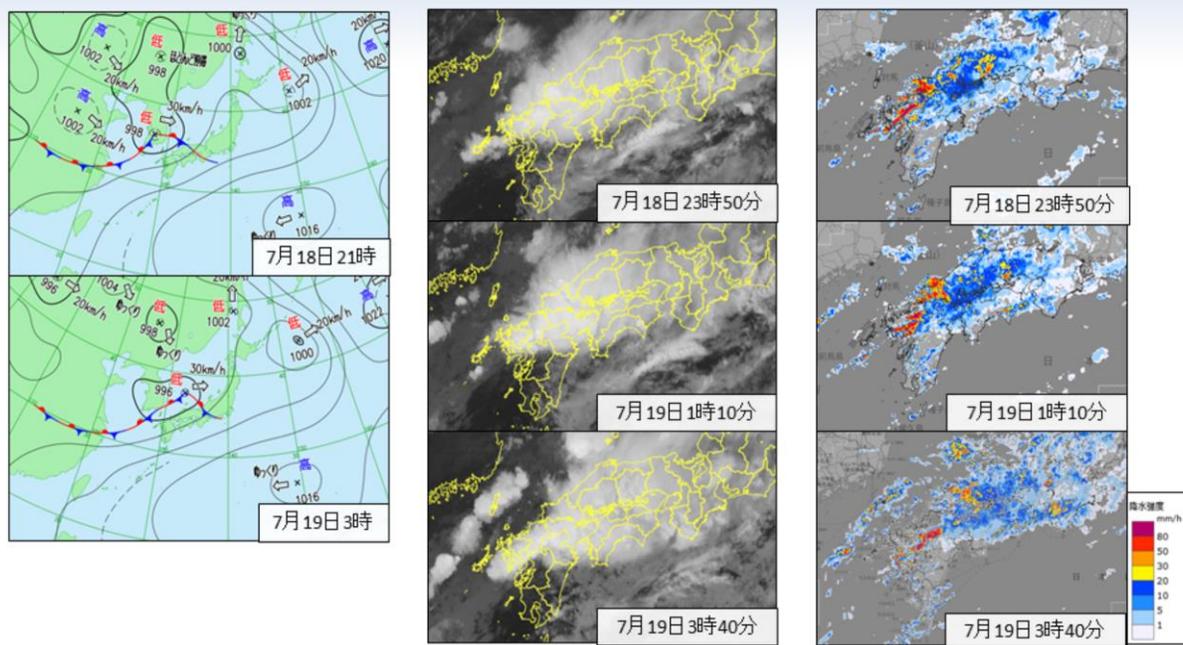
3.2.3 九州北部で発生した線状降水帯事例 (7月19日)

概要

- 黄海から日本海に進む低気圧や前線に向かって暖かく湿った空気が流れ込んだ影響で、西日本では18日から20日にかけて九州を中心に大雨となった
- 18日の夜遅くには山口県、そして19日未明には福岡県及び佐賀県、明け方には福岡県及び大分県で線状降水帯が発生し、猛烈な雨が降った
- 福岡県久留米では、3時までの3時間に116mm、19日の日降水量は、184.5mmに達した
- 19日3時40分には大分県玖珠町付近で約120mm、日田付近で約110mmの記録的短時間大雨情報が発表された
- **予測降水量が多かった19日3時を対象**として、3時間100mm以上の大雨発生確率ガイダンスの予測結果、現業数値予報システム(5kmMSM、2kmLFMおよび5kmMEPS)による予測と実況の比較結果を示す

令和4(2022)年7月19日に九州北部で発生した線状降水帯事例の概要を示す。

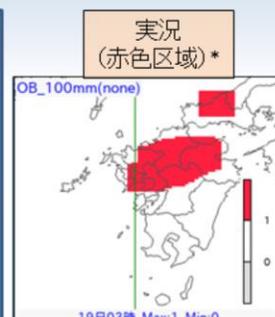
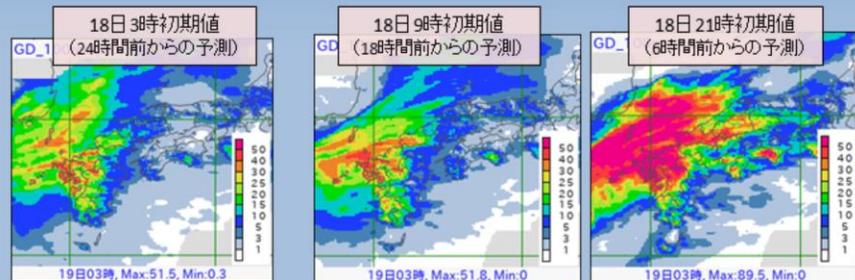
地上天気図(左図)・衛星赤外画像(中図)・気象レーダーによる降水強度(右図)(18日～19日)



図は令和4(2022)年7月18日から19日にかけての地上天気図、気象衛星ひまわりによる赤外画像および気象レーダーによる降水強度を示す。黄海から日本海に進む低気圧や前線に向かって暖かく湿った空気が流れ込み、九州北部を中心に対流雲が発達した。

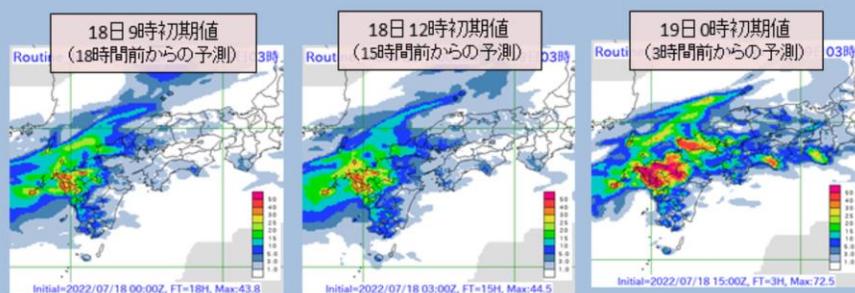
大雨発生確率ガイダンス(3時間100mm以上)の予測結果 (19日3時対象)

メソアンサンブル(5kmMEPS)大雨発生確率ガイダンスの全メンバー最大値(%)



*11×11格子(55km四方)で前1時間降水量にその前後の1時間降水量を加えた3時間降水量が100mm以上を示す。

メソモデル(5kmMSM)大雨発生確率ガイダンス(%)



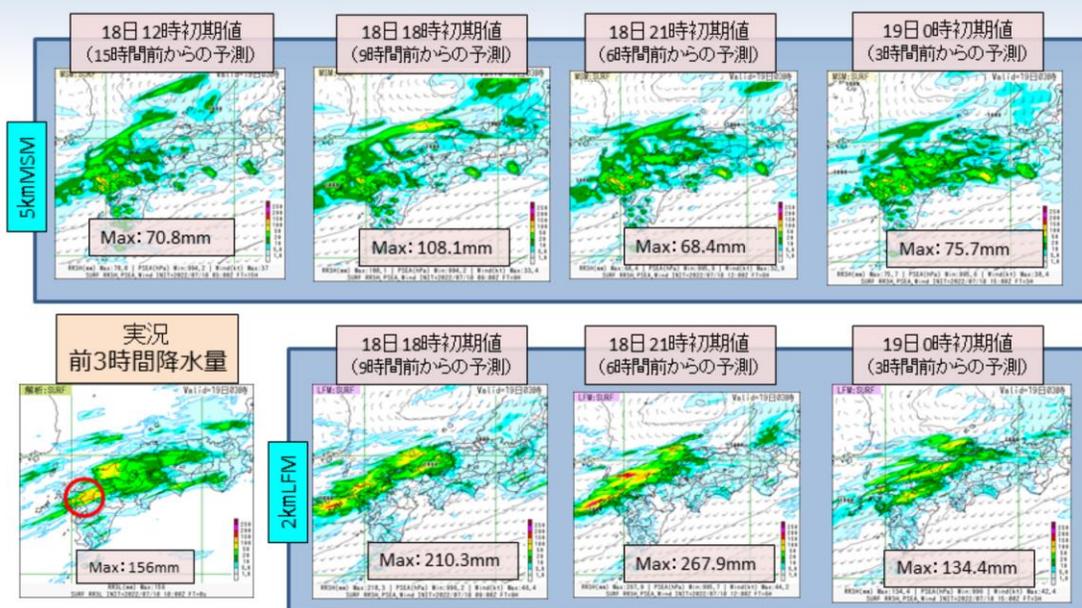
▶5kmMEPSでは、24および18時間前からは、実況で対応する地域では**30%以上の確率で比較的高い値であった**。5kmMSMでも、同様な傾向であった
▶3時間前からは、実況で対応する地域では**50%以上**が予測されていた



令和4(2022)年7月19日3時対象の3時間100mm以上の大雨発生確率ガイダンスの予測結果を確認する。上段はメソアンサンブル予報システム(5kmMEPS)による全メンバー最大値(単位:%)、下段はメソ数値予報システム(5kmMSM)のものを示し、5kmMEPSは左から24時間前、18時間前、6時間前からのそれぞれ予測結果を、5kmMSMは左から18時間前、15時間前、3時間前からのそれぞれ予測結果を示している。右上は実況の結果を示す。

5kmMEPSでは、24および18時間前からは、実況で対応する地域では30%以上の確率で比較的高い値であった。5kmMSMでも、同様な傾向であった。3時間前からは、実況で対応する地域では50%以上が予測されていた。

現業数値予報システムによる予測と実況の比較結果 (19日3時対象【上段:5kmMSM、下段:2kmLFM】)



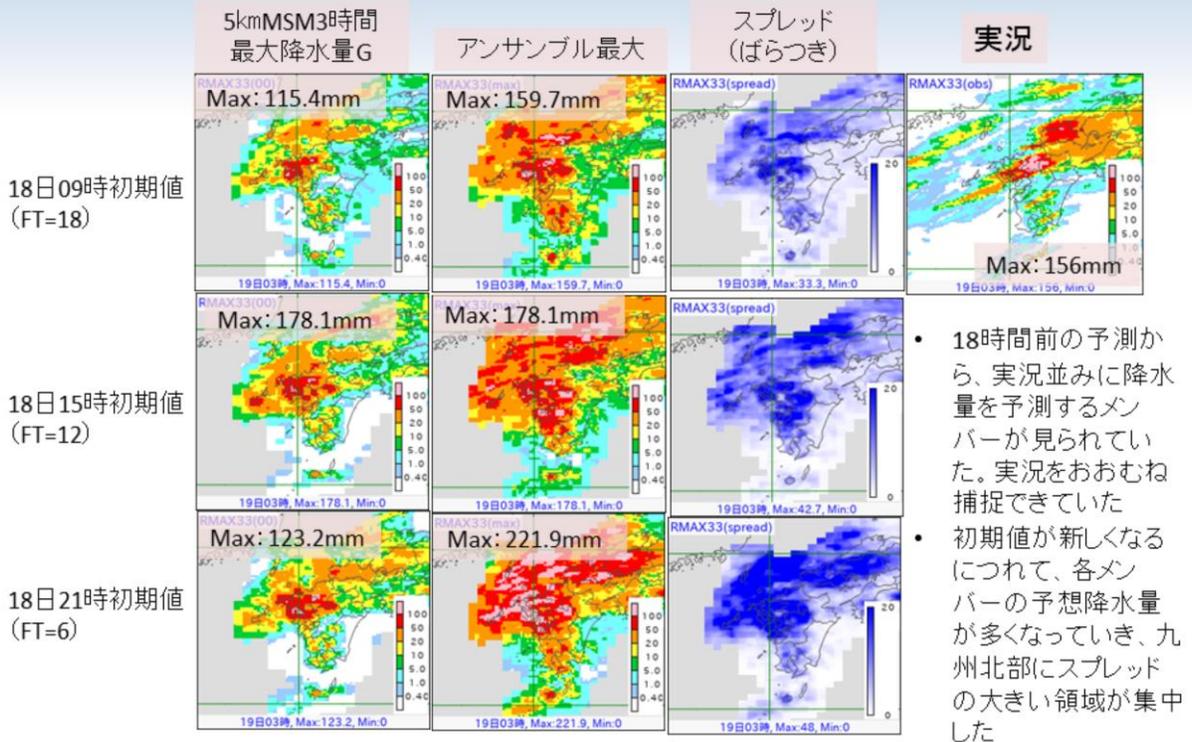
掲載の図はすべて、前3時間降水量・地上風・海面更正気圧
 ▶九州北部の線状降水帯(赤色円)の降水について:5kmMSMの予測降水量は過小傾向であった。2kmLFMでは、実況に近かったが、150mm以上(赤色区域)の予測降水量に着目すると北西方向への位置ずれの傾向が見られた

5kmMSM(上段)および2kmLFM(下段)の3時間降水量について、令和4(2022)年7月19日3時を対象とした結果を示す。

図は、前3時間降水量(mm)・地上風(kt)・海面更正気圧(hPa)で、7月18日12時初期値の15時間前からの予測(2kmLFMは18日18時初期値の9時間前からの予測)から順番に7月19日0時初期値の3時間前から予測までの結果を示す。また、下段左に解析雨量(mm)の結果を示す。

九州北部の線状降水帯(赤色円)の降水について:5kmMSMの予測降水量は過小傾向であった。2kmLFMでは、実況に近かったが、150mm以上(赤色区域)の予測降水量に着目すると北西方向への位置ずれの傾向が見られた。

5kmMEPS3時間最大降水量ガイダンス(19日3時対象)

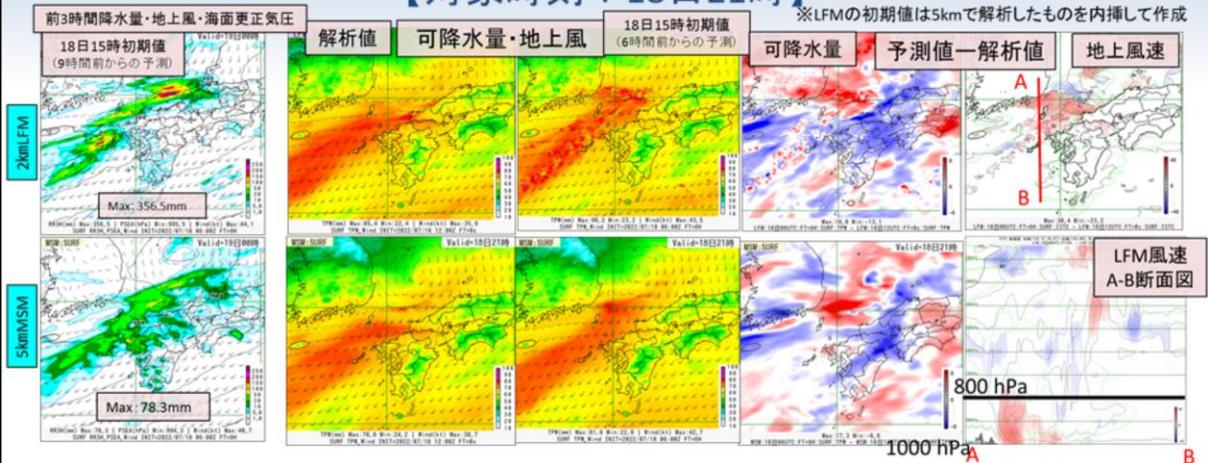


令和4(2022)年7月19日3時を対象とした5kmMEPS3時間最大降水量ガイダンスの結果を示す。右上図が7月19日3時の観測の5km格子3時間最大降水量、左側から5kmMSM3時間最大降水量ガイダンス、5kmMEPS3時間最大降水量ガイダンスメンバー最大値、スプレッド(ばらつき)を示し、上段から下段に向かって、7月18日9時初期値18時間予測、15時初期値12時間予測および18日21時初期値6時間予測の結果をそれぞれ示す。降水量、スプレッドの単位はいずれもmmである。スプレッドは、青色が濃いほどスプレッドが大きいことを示す。

対象とする九州北部の降水域に着目すると、以下の特徴が見られた。

- ・18時間前の予測から、実況並みに降水量を予測するメンバーが見られていた。実況をおおむね捕捉できていた
- ・初期値が新しくなるにつれて、各メンバーの予想降水量が多くなっていき、九州北部にスプレッドの大きい領域が集中した

現業数値予報システム(5kmMSMおよび2kmLFM)による 6時間前予測と解析値の比較結果 【対象時刻：18日21時】



5kmMSMと2kmLFMとも共通で予測値は解析値と比べて、可降水量は降水の予測されている場所が多い傾向、その周辺で少ない傾向が見られた。また、降水の予測されている場所では、予測値で風速が強い傾向が見られた。可降水量の5kmMSMと2kmLFMの解析値に差が見られた(LFM解析値の方が可降水量が多い)。参考として2kmLFMと5kmMSMの19日0時対象の予測降水量の結果(左図)を示した。実況比で2kmLFMでは過大、5kmMSMでは過小であった。

令和4(2022)年7月18日21時を対象とした2kmLFM(上段)と5kmMSM(下段)による6時間前からの予測可降水量と解析値の比較結果を示す。左図の19日0時対象の予測降水量の環境場を確認していることになる。図は、左から順に前3時間降水量(mm)・地上風(kt)・海面更正気圧(hPa)、可降水量の解析値(mm)、18日15時初期値の6時間前からの可降水量の予測値(mm)、その可降水量の解析値からの差分値(赤色ほど予測値の可降水量が多いことを示す)、18日15時初期値の6時間前からの地上風速の解析値からの差分値(kt)(赤色ほど予測値の地上風速が強いことを示す)である。前述の図内のABの風速の解析値からの差分値の断面図である。特徴は以下のとおりである。

5kmMSMと2kmLFMとも共通で予測値は解析値と比べて、可降水量は降水の予測されている場所が多い傾向、その周辺で少ない傾向が見られた。また、降水の予測されている場所では、予測値で風速が強い傾向が見られた。可降水量の5kmMSMと2kmLFMの解析値に差が見られた(LFM解析値の方が可降水量が多い)。参考として2kmLFMと5kmMSMの19日0時対象の予測降水量の結果(左図)を示した。実況比で2kmLFMでは過大、5kmMSMでは過小であった。

まとめ

- 7月19日の九州北部で発生した線状降水帯事例に関する数値予報システムにおける予測結果について、3時間100mm以上の大雨発生確率ガイダンスの予測結果、現業数値予報システム(5kmMSM、2kmLFMおよび5kmMEPS)による予測と実況の比較結果を示した
- 大雨発生確率ガイダンスによる予測結果
 - 5kmMEPSでは、24および18時間前からは、実況で対応する地域では30%以上の確率で比較的高い値であった。5kmMSMでも、同様な傾向であった
- 5kmMSMおよび2kmLFMによる予測結果
 - 5kmMSMの予測降水量は過小傾向であった。2kmLFMでは、実況に近かったが、150mm以上の予測降水量に着目すると北西方向への位置ずれの傾向が見られた
- 5kmMEPS最大降水量ガイダンスによる予測結果
 - 18時間前の予測から、実況並みに降水量を予測するメンバーが見られていた。実況をおおむね捕捉できていた
- 5kmMSMおよび2kmLFMによる6時間前からの予測と解析値の比較結果
 - 5kmMSMと2kmLFMとも共通で予測値は解析値と比べて、可降水量は降水の予測されている場所で多い傾向、その周辺で少ない傾向が見られた。また、降水の予測されている場所では、予測値で風速が強い傾向が見られた

令和4(2022)年7月19日の九州北部で発生した線状降水帯事例に関する数値予報システムにおける予測結果について、このスライドにまとめた。



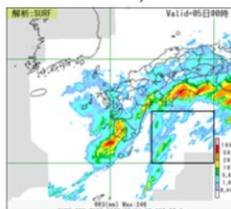
第3章 事例解析編

3.2.4 環境場

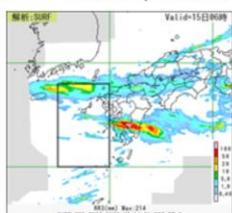
豪雨をもたらした環境場

GSMおよびMSMの気温・水蒸気混合比・水平風速・水蒸気フラックスの検証領域での鉛直プロファイル(期間平均と平均場の差分)を予報時間(FT)ごとに示す。

高知県事例検証領域(矩形領域)
132.0E - 135.0E, 30.0N - 32.5N



九州2事例検証領域(矩形領域)
127.5E - 130.0E, 30.0N - 34N



令和4年7月の豪雨事例 高知県の事例(3.2.1項の事例)

- 平均場: 1991年~2020年の7月上旬
 - ・ 長期再解析(JRA-3Q):7月1日 9時 - 11日 3時
- 期間平均:2022年7月4日~7月5日
 - ・ GSM予報値:7月4日 9時 - 6日 3時
 - ・ MSM予報値:7月4日 9時 - 6日 3時

九州南部の事例(3.2.2項の事例)

- 平均場: 1991年~2020年の7月中旬
 - ・ 長期再解析(JRA-3Q):7月11日 9時 - 21日 3時
- 期間平均:2022年7月14日~7月15日
 - ・ GSM予報値:7月14日 9時 - 16日 3時
 - ・ MSM予報値:7月14日 9時 - 16日 3時

九州北部の事例(3.2.3項の事例)

- 平均場: 1991年~2020年の7月中旬
 - ・ 長期再解析(JRA-3Q):7月11日 9時 - 21日 3時
- 期間平均:2022年7月18日~7月19日
 - ・ GSM予報値:7月18日 9時 - 20日 3時
 - ・ MSM予報値:7月18日 9時 - 20日 3時

令和4(2022)年7月の豪雨事例の環境場について、気温(単位:°C)・水蒸気混合比(単位:g/kg)・水平風速(単位:m/s)・水蒸気フラックス(単位:gm⁻²s⁻¹)がどれくらい予測できていたかを確認するために、期間平均値の平均場からの差分について、GSMおよびMSMの鉛直プロファイルかつ予報時間(FT)別に示し、長期再解析(JRA-3Q)から作成した平均場(1991-2020年)と比較する。検証領域は、大雨となった地域の上流にあたる海上の矩形領域を設定した。平均場の期間と令和4(2022)年7月の豪雨事例の期間は以下に示すとおりである。

以下の予報値の期間はすべて予測対象時刻を示す。

高知県の事例(3.2.1項の事例)

平均場:1991年-2020年の7月上旬
長期再解析(JRA-3Q):7月1日 9時 - 11日 3時
期間平均:2022年7月4日 - 7月5日
GSM予報値:7月4日 9時 - 6日 3時
MSM予報値:7月4日 9時 - 6日 3時

九州南部の事例(3.2.2項の事例)

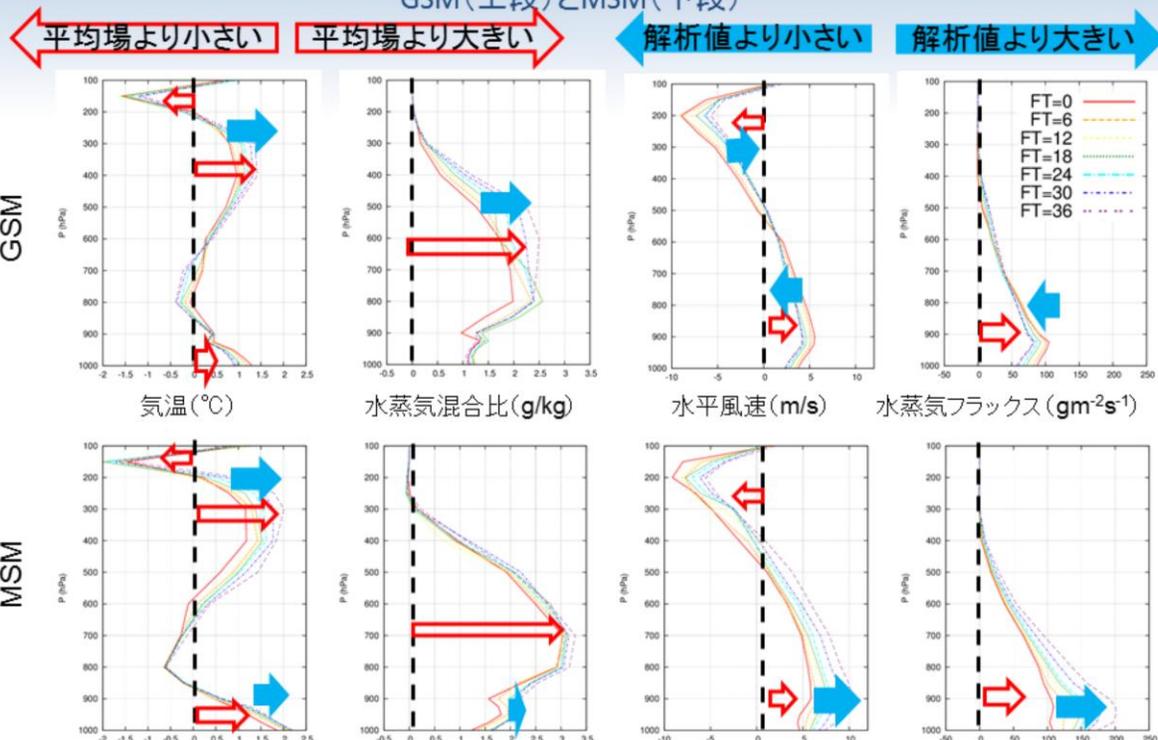
平均場:1991年-2020年の7月中旬
長期再解析(JRA-3Q):7月11日 9時 - 21日 3時
期間平均:2022年7月14日 - 7月15日
GSM予報値:7月14日 9時 - 16日 3時
MSM予報値:7月14日 9時 - 16日 3時

九州北部の事例(3.2.3項の事例)

平均場:1991年-2020年の7月中旬
長期再解析(JRA-3Q):7月11日 9時 - 21日 3時
期間平均:2022年7月18日 - 7月19日
GSM予報値:7月18日 9時 - 20日 3時
MSM予報値:7月18日 9時 - 20日 3時

高知県事例 各要素の鉛直プロファイル(平均場との差分)

GSM(上段)とMSM(下段)



令和4(2022)年7月の高知県の事例の気温(単位:°C)・水蒸気混合比(単位:g/kg)・水平風速(単位:m/s)・水蒸気フラックス(単位:gm²s⁻¹)の平均場からの差分鉛直プロファイルをGSMおよびMSM別に示す。各グラフは高知県の事例期間中の解析値(FT=0)および6時間~36時間予測値(FT=6~FT=36)を示す。以下に特徴を示す。

①気温

- ・GSMおよびMSM共通で解析値および予測値共に100~200hPaで平均場比で低く、200~600hPaと900hPaから下層で平均場比で高い
- ・GSMおよびMSM共通で200~600hPaでは解析値比で予測値は高く、900hPaより下層ではMSMでは予測値が高く、GSMでは低くなる傾向

②水蒸気混合比

- ・GSMおよびMSM共通で解析値および予測値共に300hPaより下層では平均場比で水蒸気量が多い
- ・GSMおよびMSM共通で300hPaより下層では解析値比で予測値は水蒸気量が多い

③水平風速

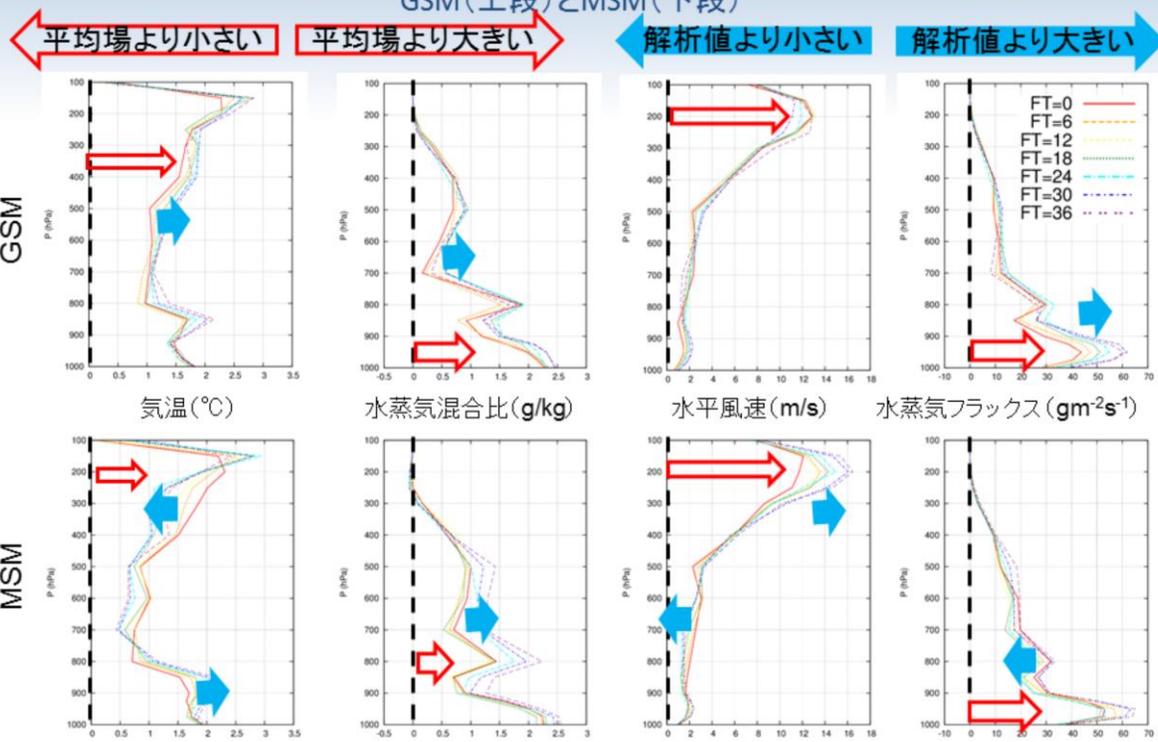
- ・GSMおよびMSM共通で解析値および予測値共に200~400hPaで平均場比で風速が弱く、600hPaより下層で平均場比で風速が強い
- ・GSMでは200~400hPaでは解析値比で風速の予測値が大きく、600hPaより下層では小さい
- ・MSMでは200hPaから下層では解析値比で風速の予測値が大きい

④水蒸気フラックス

- ・GSMおよびMSM共通で解析値および予測値共に500hPaから下層で水蒸気フラックスは平均場比で大きい
- ・GSM予測値では700hPaから下層で解析値比で小さい
- ・MSM予測値では700hPaから下層で解析値比で大きい

九州南部事例 各要素の鉛直プロファイル(平均場との差分)

GSM(上段)とMSM(下段)



令和4(2022)年7月の九州南部の事例の気温(単位:°C)・水蒸気混合比(単位:g/kg)・水平風速(単位:m/s)・水蒸気フラックス(単位:gm⁻²s⁻¹)の平均場からの差分鉛直プロファイルをGSMおよびMSM別に示す。各グラフは九州南部の事例期間中の解析値(FT=0)および6時間~36時間予測値(FT=6~FT=36)を示す。以下に特徴を示す。

①気温

- ・GSMおよびMSM共通で解析値および予測値共に平均場比で高い
- ・GSMでは、300~900hPaでは解析値比で予測値は高く、MSMでは300~700hPaで予測値が低く、800hPaから下層で高い

②水蒸気混合比

- ・GSMおよびMSM共通で解析値および予測値共に300hPaより下層では平均場比で水蒸気量が多い
- ・GSMおよびMSM共通で500hPaより下層では解析値比で予測値は水蒸気量は多い傾向

③水平風速

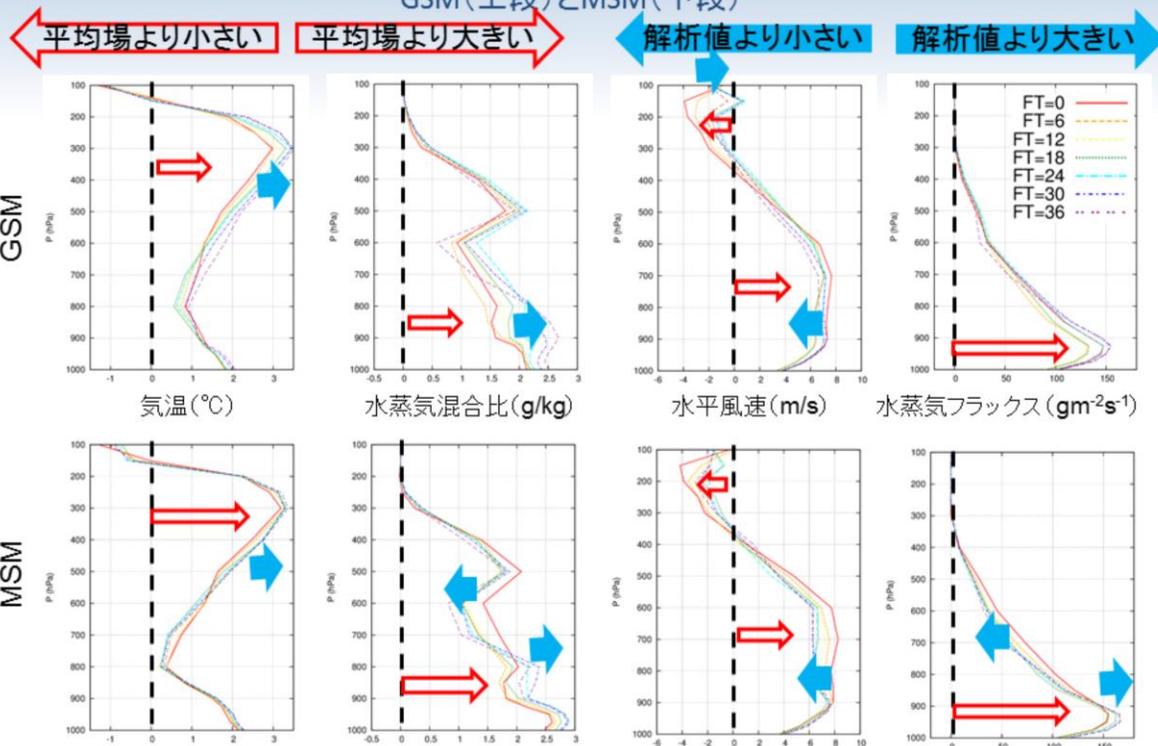
- ・GSMおよびMSM共通で解析値および予測値共に平均場比で風速が強い
- ・GSMでは解析値比で予測値との違いは小さい
- ・MSMでは500hPaから上層で解析値比で風速の予測値が大きく、700~900hPaでは風速の予測値が小さい

④水蒸気フラックス

- ・GSMおよびMSM共通で解析値および予測値共に300hPaから下層で水蒸気フラックスは平均場比で大きい
- ・GSM予測値では800hPaから下層で解析値比で大きい
- ・MSM予測値では700~900hPaで解析値比で小さく、900hPaより下層で解析値比で大きい

九州北部事例 各要素の鉛直プロファイル(平均場との差分)

GSM(上段)とMSM(下段)



令和4(2022)年7月の九州北部の事例の気温(単位:°C)・水蒸気混合比(単位:g/kg)・水平風速(単位:m/s)・水蒸気フラックス(単位:gm⁻²s⁻¹)の平均場からの差分鉛直プロファイルをGSMおよびMSM別に示す。各グラフは九州北部の事例期間中の解析値(FT=0)および6時間~36時間予測値(FT=6~FT=36)を示す。以下に特徴を示す。

①気温

- ・GSMおよびMSM共通で解析値および予測値共に平均場比で高い
- ・GSMでは200~600hPa、MSMでは300~500hPaでは解析値比で予測値は高く、GSMでは800hPa、MSMでは700hPaで予測値が低い

②水蒸気混合比

・GSMおよびMSM共通で解析値および予測値共に300hPaより下層では平均場比で水蒸気量が多い

- ・GSMでは500hPaより下層で解析値比で水蒸気量の予測値は多い傾向、MSMでは400~700hPaでは水蒸気量の予測値は少なく、800hPaから下層では多い傾向

③水平風速

・GSMおよびMSM共通で200~300hPaでは、解析値および予測値共に平均場比で風速が弱く、400hPaから下層で風速が強い

- ・GSMでは200~400hPaで解析値比で風速の予測値が大きく、600hPaより下層では風速の予測値が小さい

・MSMでは200~300hPaで解析値比で風速の予測値が大きく、500~800hPaでは風速の予測値が小さい

④水蒸気フラックス

・GSMおよびMSM共通で解析値および予測値共に400hPaから下層で水蒸気フラックスは平均場比で大きい

- ・MSM予測値では500~800hPaで解析値比で小さく、900hPaより下層で解析値比で大きい

まとめ

	高知	九州南部	九州北部
気温	GSMおよびMSM共通で解析値および予測値共に100～200hPaで平均場比で低く、200～600hPaと900hPaから下層で平均場比で高い	GSMおよびMSM共通で解析値および予測値共に平均場比で高い。予測値は解析値比で800hPaから下層で高い。	GSMおよびMSM共通で解析値および予測値共に平均場比で高い。GSMでは200～600hPa、MSMでは300～500hPaでは解析値比で予測値は高い。
水蒸気混合比	GSMおよびMSM共通で解析値および予測値共に300hPaより下層では平均場比で水蒸気量が多く、解析値比で予測値は水蒸気量は多い	GSMおよびMSM共通で解析値および予測値共に300hPaより下層では平均場比で水蒸気量が多い。500hPaより下層では解析値比で予測値は水蒸気量は多い傾向	GSMおよびMSM共通で解析値および予測値共に300hPaより下層では平均場比で水蒸気量が多い。MSMでは400～700hPaでは水蒸気量の予測値は少なく、800hPaから下層では多い傾向
水平風速	GSMおよびMSM共通で解析値および予測値共に200～400hPaで平均場比で風速が弱く、600hPaより下層で平均場比で風速が強い。MSMでは200hPaから下層では解析値比で風速の予測値が大きい	GSMおよびMSM共通で解析値および予測値共に平均場比で風速が強い。MSMでは500hPaから上層で解析値比で風速の予測値が大きく、700～900hPaでは風速の予測値が小さい	GSMおよびMSM共通で200～300hPaでは、解析値および予測値共に平均場比で風速が弱く、400hPaから下層で風速が強い。MSMでは200～300hPaで解析値比で風速の予測値が大きく、500～800hPaでは風速の予測値が小さい
水蒸気フラックス	GSMおよびMSM共通で解析値および予測値共に500hPaから下層で水蒸気フラックスは平均場比で大きい。MSM予測値では700hPaから下層で解析値比で大きい。	GSMおよびMSM共通で解析値および予測値共に300hPaから下層で水蒸気フラックスは平均場比で大きい。MSM予測値では700～900hPaで解析値比で小さく、900hPaより下層で解析値比で大きい	GSMおよびMSM共通で解析値および予測値共に400hPaから下層で水蒸気フラックスは平均場比で大きい。MSM予測値では500～800hPaで解析値比で小さく、900hPaより下層で解析値比で大きい

水蒸気量を中心とした環境場について、まとめた。令和4(2022)年7月の事例については、概ね水蒸気量の予測は解析値並みかむしろ解析値に比べて多かった。一方で水平風速の予測については、各事例で予測値の大小が目立つ結果となり、水蒸気フラックスの予測値へも影響していることが分かった。高知および九州南部の事例では2km LFMの予測降水量が過小で風向風速に違いがあったことと整合する結果であった。また、九州北部の事例では2km LFMは予測降水量が実況に近いが位置ずれが見られたものであるが、位置ずれの部分で風向風速の予測が関わっている可能性がある。風向風速の予測は、水蒸気量の分布(水蒸気量の収束など)にも影響する可能性がある。

。



第3章 事例解析編

3.2.5 まとめ

第3.2.1項から第3.2.4項にかけて述べた、令和4(2022)年7月の豪雨事例の数値予報結果について、以下のスライドにまとめた。

令和4年7月の豪雨事例の数値予報の結果のまとめ

- 7月5日の高知県で発生した線状降水帯事例、7月15日の九州南部における大雨事例、7月19日の九州北部で発生した線状降水帯事例について紹介した
- 大雨発生確率ガイダンスでは、大雨のポテンシャルを捉えていることが確認できたが、九州南部における大雨事例のように大雨のポテンシャルを捉えることが難しい事例もあった
- 5kmMSMの予測降水量は過小な場合が多かった
- 2kmLFMや5kmMEPSにおいても、九州北部で発生した線状降水帯事例のように、位置ずれはあるが、線状降水帯を捉えている場合があった
- 環境場の確認では、水平風速の予測については、各事例で予測値の大小が目立つ結果となった。水蒸気量の予測は概ね適切か解析値に比べて多かった
- 事例解析においても解析値と予測値において、風向風速の違いや水蒸気量の濃淡の違い、LFMの線状の降水域の位置ずれを確認したことから、風向風速の表現の改善が予測降水量の精度向上の1つの鍵になる可能性がある
- その他の7月に発生した線状降水帯に関する数値予報システムにおける予測結果については、3.2節の冒頭の表を参照願いたい

参考文献

- 気象庁 2022:線状降水帯予測精度向上に向けた技術開発・研究をオールジャパンで実施します, 報道発表資料,
https://www.jma.go.jp/jma/press/2205/31a/SLMCS_AllJapan20220531.html
- 気象庁, 2021:全球モデルの水平解像度向上、物理過程改良に向けた開発: 数値予報開発センター年報(令和3年), 気象庁 数値予報開発センター, 66-75.
- 藤田司, 2012:プロダクト利用上の注意点.平成24年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 54-67.



第3章 事例解析編

3.3 令和4年8月の豪雨事例の数値予報の結果

※以下のスライドの説明では、FTは予報時間(例:FT=6は6時間予報)、「～時」は日本時間、図中の「UTC」は協定世界時(例:00UTCは9時)を表す。また、現在、現業利用中の〇km解像度の数値予報システム名を〇km(数値予報システム名)と示す場合がある(例:5kmMSM、2kmLFM)。特にkmの付いていない(数値予報システム名)だけの場合は、現業利用中のものと同様である。以下のスライドの説明では、令和4年8月の年月は省略する

本節では、令和4(2022)年8月に発生した線状降水帯に関する数値予報システムにおける予測結果の内、第3.3.1項で3日に山形県及び新潟県で発生した線状降水帯事例を取り上げる。さらに、環境場(第3.3.2項)、まとめ(第3.3.3項)について示す。

8月に発生した線状降水帯に関する数値予報システムにおける 予測結果について(概要)

対象日時	場所	大雨発生確率ガイダンス(概ね15時間前)	5kmMSM (降水量実況比)	2kmLFM (降水量実況比)	気が付いた点
8月3日9時 (発生)	青森・秋田 県境	20%以下	過小傾向	過小傾向(線状降水帯の予測は直近で実況に近づく)	青森県内の地上気温が予測より低い
8月3日15時と18時(発生)	山形県と新潟県	20%以下	線状の強雨域を予測できていない	線状の強雨域を予測(15時降水量過剰:18時は位置ずれ)	特別警報に至る。降水系の維持に下層暖湿気と地形(粟島)の影響の可能性
8月4日9時 (発生)	福井県	5%以下	過小	過小傾向(線状降水帯に対応する領域付近において強雨を予測。)	日本海上の可降水量が少ない傾向
8月13日18時 (発生せず)	東海地方	50%以上	過大	(予測時間対象外)	台風第8号の進路が西よりかつ過発達
8月14日0時 (発生)	伊豆諸島北部	5~10% (9時間前で伊豆半島で40%以上)	過小	過小傾向(3時間前の予測で実況に近づく)	台風周辺のアウトバーンの予測相当温位の変動が大きい

青: 良い方のコメント / 赤: 悪い方のコメント

令和4(2022)年8月に発生した線状降水帯に関する数値予報システムにおける予測結果について、表にまとめた。本節では、この内、第3.3.1項で3日に山形県及び新潟県で発生した線状降水帯事例を取り上げる。



第3章 事例解析編

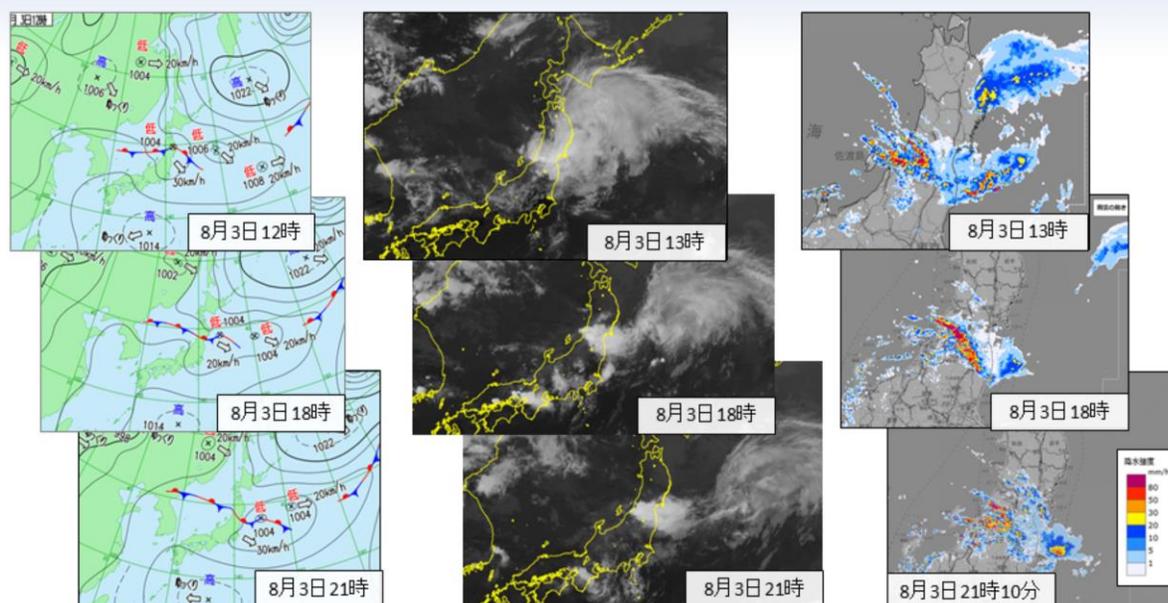
3.3.1 山形県及び新潟県で発生した線状降水帯事例 (8月3日)

概要

- 日本海から東北地方にのびる前線に向かって、台風第6号を起源とする暖かく湿った空気が流入した影響で、8月3日から4日にかけて東北地方・北陸地方で大雨となった
- 8月3日の午後には、山形県及び新潟県で線状降水帯が発生し、大雨が降った。3日昼過ぎから4日明け方にかけて、山形県及び新潟県では22回の記録的短時間大雨情報が発表された。また、3日19時15分に山形県に、4日1時56分に新潟県に、それぞれ大雨特別警報が発表された(気象庁2022)
- 新潟県下関では、4日3時までの3時間に322.5mmの降水量を観測し、4日6時20分までの24時間降水量は560mmの大雨となり観測史上1位を更新した。
- **線状降水帯が発生した時間帯(3日15時と18時)を対象**として、3時間100mm以上の大雨発生確率ガイダンスの予測結果、現業数値予報システム(5kmMSM、2kmLFMおよび5kmMEPS)による予測と実況の比較結果を示す

令和4(2022)年8月3日に山形県及び新潟県で発生した線状降水帯事例の概要を示す。

地上天気図(左図)・衛星赤外面像(中図)・気象レーダーによる降水強度(右図)(3日)

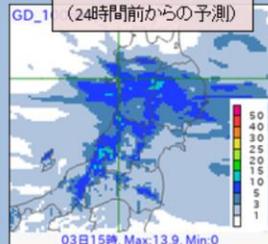


図は令和4(2022)年8月3日の地上天気図、気象衛星ひまわりによる赤外面像および気象レーダーによる降水強度を示す。日本海から東北地方にのびる前線に向かって、台風第6号を起源とする暖かく湿った空気が流入した影響で、新潟県や山形県を中心に対流雲が発達した。

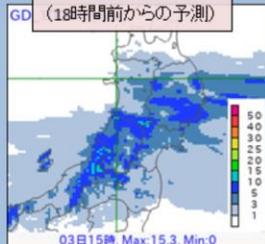
大雨発生確率ガイダンス(3時間100mm以上)の予測結果 (3日15時対象)

メソアンサンブル(5kmMEPS)大雨発生確率ガイダンスの全メンバー最大値(%)

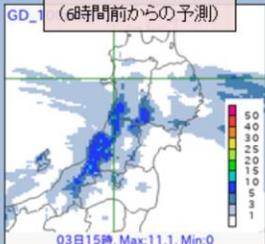
2日 15時初期値
(24時間前からの予測)



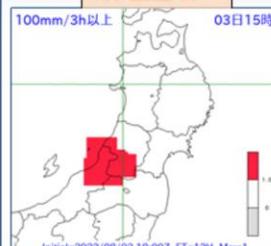
2日 21時初期値
(18時間前からの予測)



3日 9時初期値
(6時間前からの予測)



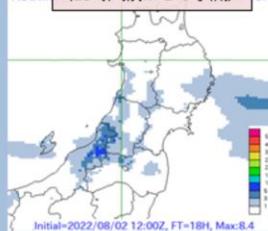
実況
(赤色区域)*



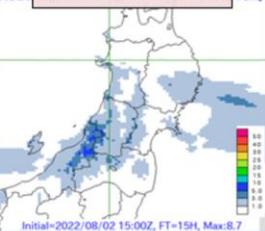
*11×11格子(55km四方)で前1時間降水量にその前後の1時間降水量を加えた3時間降水量が100mm以上を示す。

メソモデル(5kmMSM)大雨発生確率ガイダンス(%)

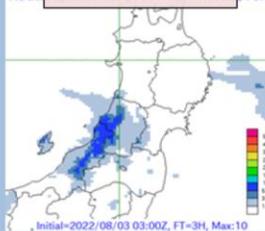
2日 21時初期値
(18時間前からの予測)



3日 00時初期値
(15時間前からの予測)



3日 12時初期値
(3時間前からの予測)



- ▶5kmMEPS、5kmMSMともに20%以下の予測
- ▶直前の予測でも5kmMEPS、5kmMSMともに15%以下と、低い値が予測されていた

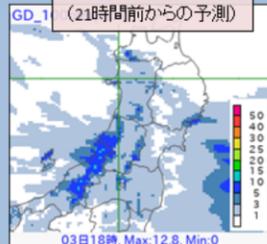
令和4(2022)年8月3日15時対象の3時間100mm以上の大雨発生確率ガイダンスの予測結果を確認する。上段はメソアンサンブル予報システム(5kmMEPS)による全メンバー最大値(単位:%)、下段はメソ数値予報システム(5kmMSM)のものを示し、5kmMEPSは左から24時間前、18時間前、6時間前からのそれぞれ予測結果を、5kmMSMは左から18時間前、15時間前、3時間前からのそれぞれ予測結果を示している。右上は実況の結果を示す。

5kmMEPS、5kmMSMともに20%以下の予測であった。直前の予測でも5kmMEPS、5kmMSMともに15%以下と、低い値が予測されていた。

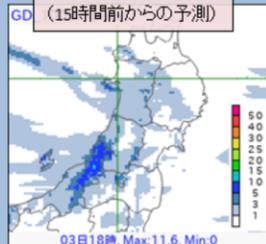
大雨発生確率ガイダンス(3時間100mm以上)の予測結果 (3日18時対象)

メソアンサンブル(5kmMEPS)大雨発生確率ガイダンスの全メンバー最大値(%)

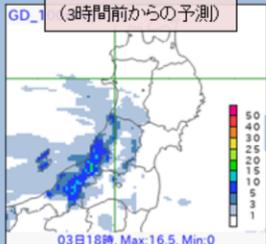
2日 21時初期値
(21時間前からの予測)



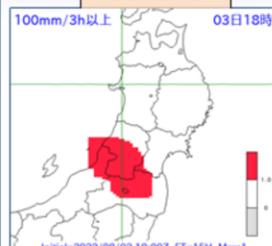
3日 3時初期値
(15時間前からの予測)



3日 15時初期値
(3時間前からの予測)



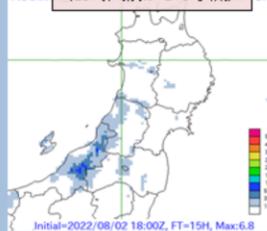
実況
(赤色区域)*



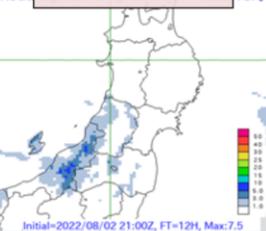
*11×11格子(55km四方)で前1時間降水量にその前後の1時間降水量を加えた3時間降水量が100mm以上を示す。

メソモデル(5kmMSM)大雨発生確率ガイダンス(%)

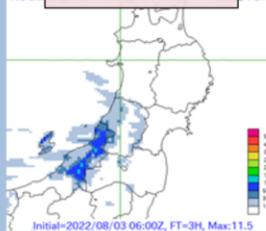
3日 3時初期値
(15時間前からの予測)



3日 6時初期値
(12時間前からの予測)



3日 15時初期値
(3時間前からの予測)



- ▶5kmMEPS、5kmMSMともに20%以下の予測
- ▶直前の予測でも5kmMEPS、5kmMSMともに15%以下と、低い値が予測されていた



気象庁 Japan Meteorological Agency

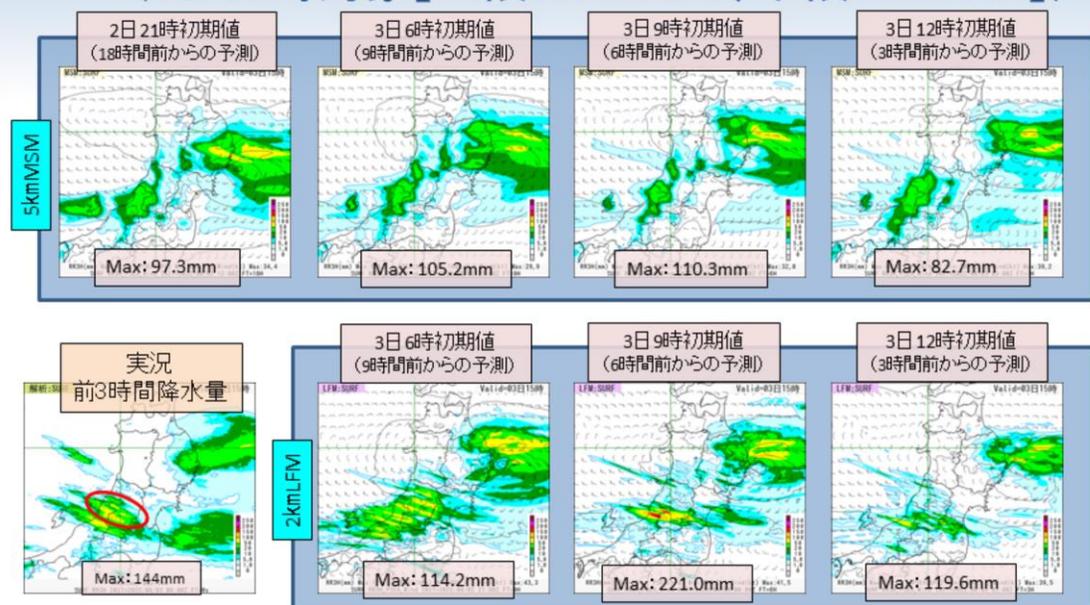
令和4年度数値予報解説資料集

432

前スライドに続き、令和4(2022)年8月3日18時対象の3時間100mm以上の大雨発生確率ガイダンスの予測結果を確認する。図の配置は前スライドと同様である。5kmMEPSは左から21時間前、15時間前、3時間前からのそれぞれ予測結果を、5kmMSMは左から15時間前、12時間前、3時間前からのそれぞれ予測結果を示している。右上は実況の結果を示す。

5kmMEPS、5kmMSMともに20%以下の予測であった。直前の予測でも5kmMEPS、5kmMSMともに15%以下と、低い値が予測されていた。

現業数値予報システムによる予測と実況の比較結果 (3日15時対象【上段:5kmMSM、下段:2kmLFM】)



掲載の予測図はすべて、前3時間降水量・地上風・海面更正気圧

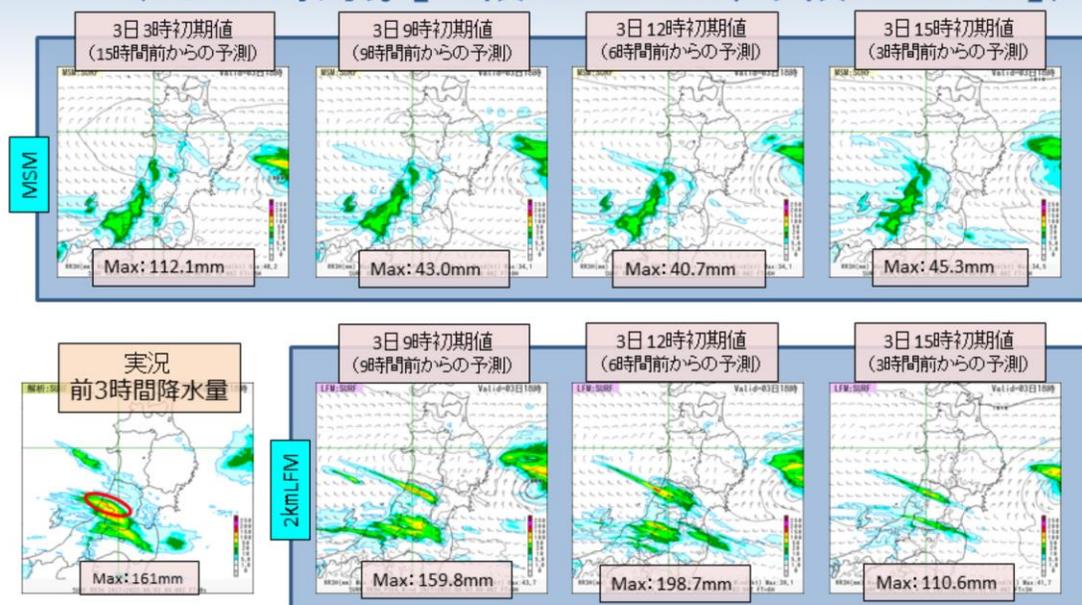
▶山形・新潟県の線状降水帯(赤丸)の降水について:5kmMSMでは線状の強雨域を予測できていない。2kmLFMでは特に6時間前からの予測で線状の強雨域を予測しているが、降水量は実況と比較して過大。

5kmMSM(上段)および2kmLFM(下段)の3時間降水量について、令和4(2022)年8月3日15時を対象とした結果を示す。

図は、前3時間降水量(mm)・地上風(kt)・海面更正気圧(hPa)で、8月2日21時初期値の18時間前からの予測(2kmLFMは3日6時初期値の9時間前からの予測)から順番に8月3日12時初期値の3時間前から予測までの結果を示す。また、下段左に解析雨量(mm)の結果を示す。

山形・新潟県の線状降水帯(赤丸)の降水について、5kmMSMでは線状の強雨域を予測できていない。2kmLFMでは特に6時間前からの予測で線状の強雨域を予測しているが、降水量は実況と比較して過大であった。

現業数値予報システムによる予測と実況の比較結果 (3日18時対象【上段:5kmMSM、下段:2kmLFM】)



掲載の予測図はすべて、前3時間降水量・地上風・海面更正気圧

▶山形・新潟県の線状降水帯(赤丸)の降水について:MSMでは線状の強雨域を予測できていない。2kmLFMでは実況と比較して北にずれているものの、線状の強雨域を予測できている。

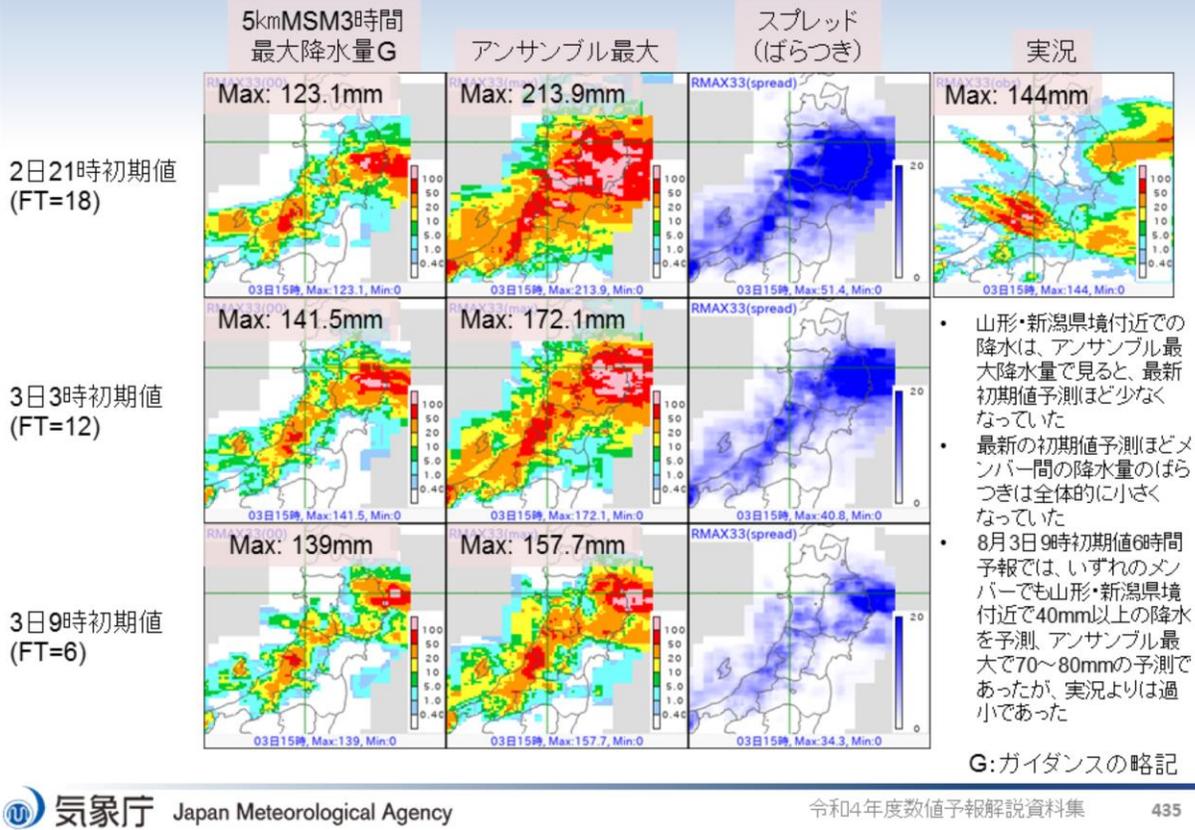


前スライドと同様に5kmMSM(上段)および2kmLFM(下段)の3時間降水量について、令和4(2022)年8月3日18時を対象とした結果を示す。図の内容は前スライドに同じである。

図は、8月3日3時初期値の15時間前からの予測(2kmLFMは3日9時初期値の9時間前からの予測)から順番に8月3日15時初期値の3時間前から予測までの結果を示す。また、下段左に解析雨量(mm)の結果を示す。

山形・新潟県の線状降水帯(赤丸)の降水について、5kmMSMでは線状の強雨域を予測できていない。2kmLFMでは実況と比較して北にずれているものの、線状の強雨域を予測できている。

5kmMEPS3時間最大降水量ガイダンス(3日15時対象)

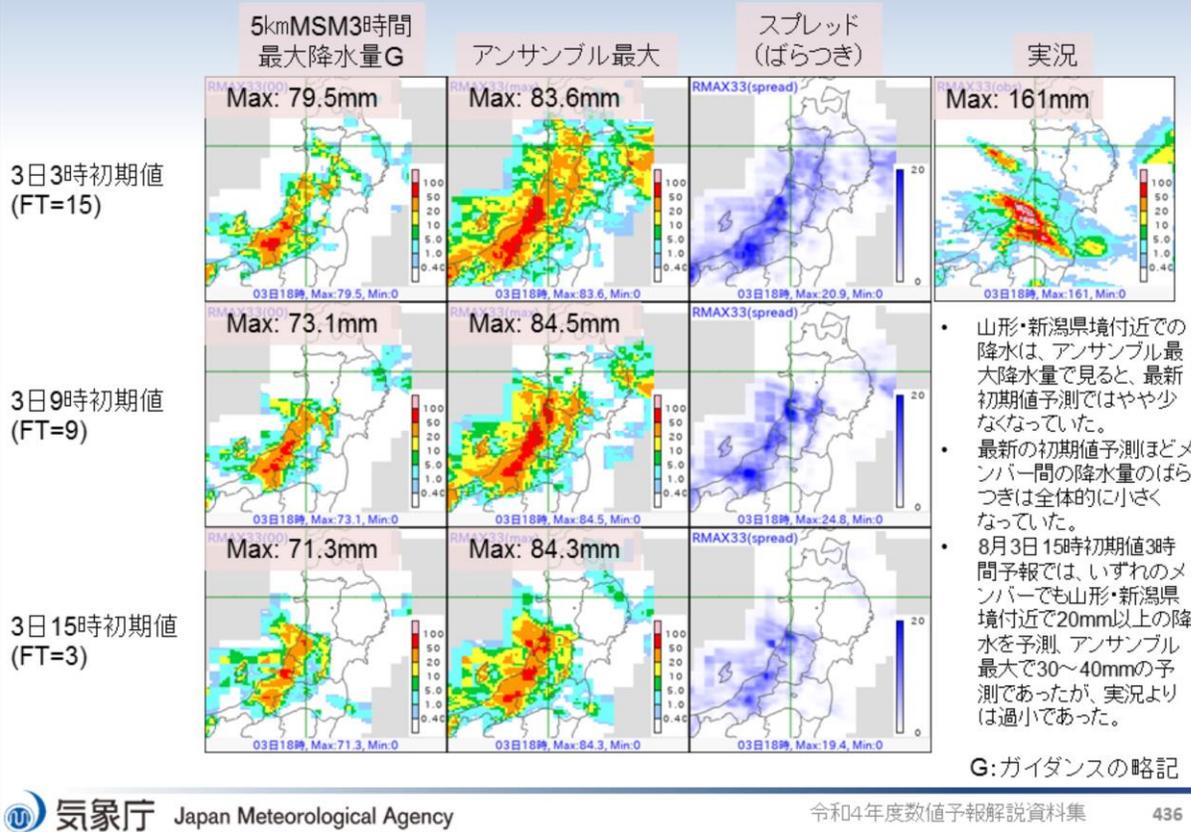


令和4(2022)年8月3日15時を対象としたMEPS3時間最大降水量ガイダンスの結果を示す。右上図が8月3日15時の観測の5km格子3時間最大降水量、左側から5kmMSM3時間最大降水量ガイダンス、5kmMEPS3時間最大降水量ガイダンスメンバー最大値、スプレッド(ばらつき)を示し、上段から下段に向かって、8月2日21時初期値18時間予測、8月3日3時初期値12時間予測および8月3日9時初期値6時間予測の結果をそれぞれ示す。降水量、スプレッドの単位はいずれもmmである。スプレッドは、青色が濃いほどスプレッドが大きいことを示す。

以下の特徴が見られた。

- ・山形・新潟県境付近での降水は、アンサンブル最大降水量で見ると、最新初期値予測ほど少なくなっていた
- ・最新の初期値予測ほどメンバー間の降水量のばらつきは全体的に小さくなっていた
- ・8月3日9時初期値6時間予報では、いずれのメンバーでも山形・新潟県境付近で40mm以上の降水を予測し、アンサンブル最大で70~80mmの予測であったが、実況よりは過小であった

5kmMEPS3時間最大降水量ガイダンス(3日18時対象)



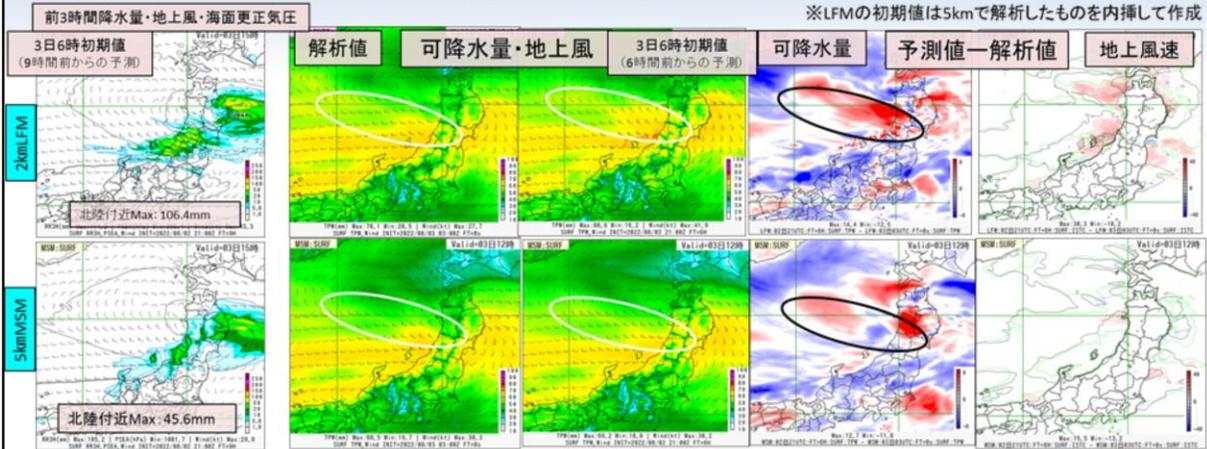
令和4(2022)年8月3日18時を対象とした5kmMEPS3時間最大降水量ガイダンスの結果を示す。右上図が8月3日18時の観測の5km格子3時間最大降水量、左側から5kmMSM3時間最大降水量ガイダンス、5kmMEPS3時間最大降水量ガイダンスメンバー最大値、スプレッド(ばらつき)を示し、上段から下段に向かって、8月3日3時初期値15時間予測、8月3日9時初期値9時間予測および8月3日15時初期値3時間予測の結果をそれぞれ示す。降水量、スプレッドの単位はいずれもmmである。スプレッドは、青色が濃いほどスプレッドが大きいことを示す。

以下の特徴が見られた。

- ・山形・新潟県境付近での降水は、アンサンブル最大降水量で見ると、最新初期値予測ではやや少なくなっていた。
- ・最新の初期値予測ほどメンバー間の降水量のばらつきは全体的に小さくなっていた。
- ・8月3日15時初期値3時間予測では、いずれのメンバーでも山形・新潟県境付近で20mm以上の降水を予測、アンサンブル最大で30~40mmの予測であったが、実況よりは過小であった。

現業数値予報システム(5kmMSMおよび2kmLFM)による 6時間前予測と解析値の比較結果 【対象時刻：3日12時】

※LFMの初期値は5kmで解析したものを内挿して作成



丸印を囲った領域(線状降水帯発生域やその上流)に着目すると、5kmMSMと2kmLFM共に予測値は解析値と比べて、可降水量は多い傾向(2kmLFMの方が多)。2kmLFMでは、地上の風速が東北地方の沿岸部でやや強い特徴が見られた(5kmMSMにはあまり見られない)。参考として2kmLFMと5kmMSMの3日15時対象の予測降水量の結果(左図)を示した。実況比で2kmLFM、5kmMSM共に過小であった。

令和4(2022)年8月3日12時を対象とした2kmLFM(上段)と5kmMSM(下段)による6時間前からの予測可降水量と解析値の比較結果を示す。左図の3日15時対象の予測降水量の環境場を確認していることになる。図は、左から順に前3時間降水量(mm)・地上風(kt)・海面更正気圧(hPa)、可降水量の解析値(mm)、3日6時初期値の6時間前からの可降水量の予測値(mm)、その可降水量の解析値からの差分値(赤色ほど予測値の可降水量が多いことを示す)、3日6時初期値の6時間前からの地上風速の解析値からの差分値(kt)(赤色ほど予測値の地上風速が強いことを示す)である。特徴は以下のとおりである。

丸印を囲った領域(線状降水帯発生域やその上流)に着目すると、5kmMSMと2kmLFM共に予測値は解析値と比べて、可降水量は多い傾向(2kmLFMの方が多)。2kmLFMでは、地上の風速が東北地方の沿岸部でやや強い特徴が見られた(5kmMSMにはあまり見られない)。参考として2kmLFMと5kmMSMの3日15時対象の予測降水量の結果(左図)を示した。実況比で2kmLFM、5kmMSM共に過小であった。

まとめ

- 8月3日の山形県及び新潟県で発生した線状降水帯事例に関する数値予報システムにおける予測結果について、3時間100mm以上の大雨発生確率ガイダンスの予測結果、現業数値予報システム(5kmMSM、2kmLFMおよび5kmMEPS)による予測と実況の比較結果を示した
- 大雨発生確率ガイダンスによる予測結果
 - 5kmMEPS、5kmMSMともに20%以下の予測であった。直前の予測でも5kmMEPS、5kmMSMともに15%以下と、低い値が予測されていた
- 5kmMSMおよび2kmLFMによる予測結果
 - 山形・新潟県の線状降水帯の降水について、5kmMSMでは線状の強雨域を予測できていない。2kmLFMでは、位置ずれはあるものの、6時間前からの予測で線状の強雨域を予測していた。降水量は実況と比較して過大であった
- 5kmMEPS最大降水量ガイダンスによる予測結果
 - 山形・新潟県境付近での降水は、アンサンブル最大値で見ると、最新初期値予測ほど少なく、降水量のばらつきも全体的に小さくなっていた。実況よりは過小であった
- 5kmMSMおよび2kmLFMによる6時間前からの予測と解析値の比較結果
 - 5kmMSMと2kmLFMとも共通で予測値は解析値と比べて、可降水量は多い傾向。2kmLFMでは、地上の風速が東北地方の沿岸部でやや強い特徴が見られた

令和4(2022)年8月3日の山形県及び新潟県で発生した線状降水帯事例に関する数値予報システムにおける予測結果について、このスライドにまとめた。

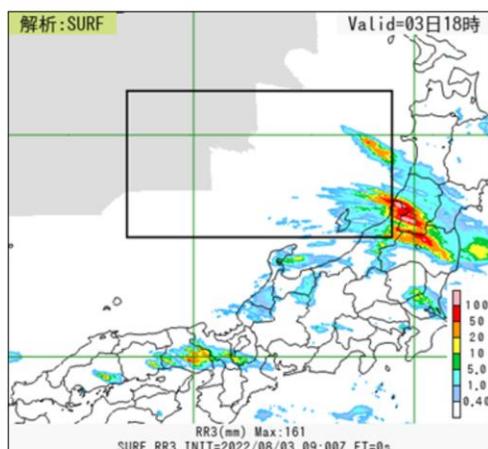


第3章 事例解析編

3.3.2 環境場

豪雨をもたらした環境場

GSMおよびMSMの気温・水蒸気混合比・水平風速・水蒸気フラックスの検証領域での鉛直プロファイル(期間平均と平均場の差分)を予報時間(FT)ごとに示す。



検証領域(矩形領域)
133.5E-139.5E, 37.7N-41.0N

令和4年8月の豪雨事例
(山形県及び新潟県で発生した線状降水帯事例)

- 平均場: 1991年~2020年の8月上旬
 - ・再解析: 8月1日9時-11日3時
- 期間平均: 2022年8月2日~8月3日
 - ・GSM予報値: 8月2日 9時 - 4日 3時
 - ・MSM予報値: 8月2日 9時 - 4日 3時

令和4(2022)年8月の豪雨事例(山形県及び新潟県で発生した線状降水帯事例)の環境場について、気温(単位:°C)・水蒸気混合比(単位:g/kg)・水平風速(単位:m/s)・水蒸気フラックス(単位:gm⁻²s⁻¹)がどれくらい予測できていたかを確認するために、期間平均値の平均場からの差分について、GSMおよびMSMの鉛直プロファイルかつ予報時間(FT)別に示し、長期再解析(JRA-3Q)から作成した平均場(1991-2020年)と比較する。検証領域は、大雨となった地域の上流にあたる海上の矩形領域を設定した。平均場の期間と令和4(2022)年8月の豪雨事例(山形県及び新潟県で発生した線状降水帯事例)の期間は以下に示すとおりである。

以下の予報値の期間はすべて予測対象時刻を示す。

平均場: 1991年-2020年の8月上旬

長期再解析(JRA-3Q): 8月1日 9時 - 11日 3時

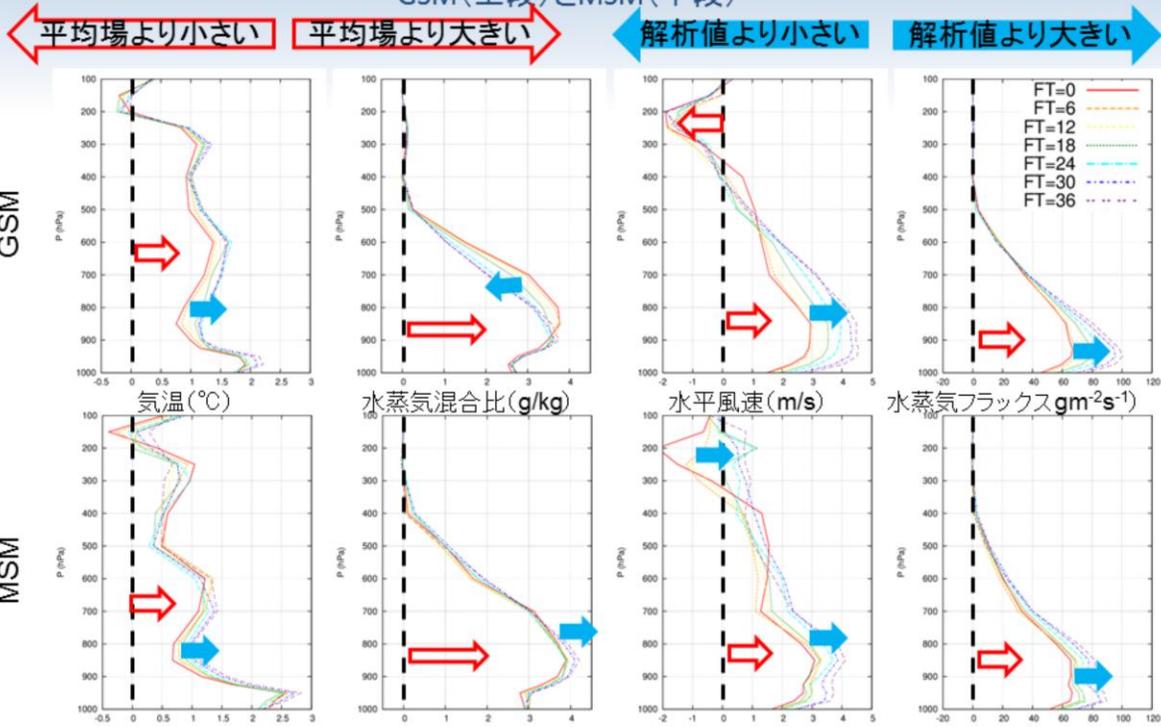
期間平均: 2022年8月2日 - 8月3日

GSM予報値: 8月2日 9時 - 4日 3時

MSM予報値: 8月2日 9時 - 4日 3時

令和4年8月の豪雨事例 各要素の鉛直プロファイル(平均場との差分)

GSM(上段)とMSM(下段)



令和4(2022)年8月の豪雨事例(山形県及び新潟県で発生した線状降水帯事例)の気温(単位:°C)・水蒸気混合比(単位:g/kg)・水平風速(単位:m/s)・水蒸気フラックス(単位:gm⁻²s⁻¹)の平均場からの差分鉛直プロファイルをGSMおよびMSM別に示す。各グラフは豪雨事例期間中の解析値(FT=0)および6時間~36時間予測値(FT=6~FT=36)を示す。以下に特徴を示す。

①気温

- ・GSMおよびMSM共通で解析値および予測値共に概ね平均場比で高い
- ・GSMでは300~900hPa、MSMでは700~900hPaでは解析値比で予測値は高い

②水蒸気混合比

- ・GSMおよびMSM共通で解析値および予測値共に500hPaより下層では平均場比で水蒸気量が多い
- ・GSMでは600~800hPaで解析値比で水蒸気量の予測値は少ない傾向、MSMでは800~900hPaでは水蒸気量の予測値は多い傾向

③水平風速

- ・GSMで200~300hPaでは、解析値および予測値共に平均場比で風速が弱く、600hPaから下層で風速が強い
- ・MSMで200~300hPaでは、解析値で平均場比で風速が弱く、400hPaから下層で強い
- ・GSMでは600hPaから下層で解析値比で風速の予測値が大きい
- ・MSMでは200~300hPaおよび700hPaから下層で解析値比で風速の予測値が大きい傾向

④水蒸気フラックス

- ・GSMおよびMSM共通で解析値および予測値共に500hPaから下層で水蒸気フラックスは平均場比で大きい
- ・GSM予測値では、800hPaから下層、MSM予測値では700hPaから下層で解析値比で大きい

まとめ

令和4年8月の豪雨事例（山形県及び新潟県で発生した線状降水帯事例）	
気温	<ul style="list-style-type: none"> ・GSMおよびMSM共通で解析値および予測値共に概ね平均場比で高い ・MSMでは700～900hPaでは解析値比で予測値は高い
水蒸気混合比	<ul style="list-style-type: none"> ・GSMおよびMSM共通で解析値および予測値共に500hPaより下層では平均場比で水蒸気量が多い ・MSMでは800～900hPaでは水蒸気量の予測値は多い傾向
水平風速	<ul style="list-style-type: none"> ・GSMでは解析値および予測値共に平均場比で600hPaから下層で風速が強い（MSMでは、400hPaから下層で強い） ・MSMでは200～300hPaおよび700hPaから下層で解析値比で風速の予測値が大きい傾向
水蒸気フラックス	<ul style="list-style-type: none"> ・GSMおよびMSM共通で解析値および予測値共に500hPaから下層で水蒸気フラックスは平均場比で大きい ・MSM予測値では700hPaから下層で解析値比で大きい

水蒸気量を中心とした環境場について、まとめた。令和4(2022)年8月の事例(山形県及び新潟県で発生した線状降水帯事例)については、概ね水蒸気量は平均場に比べて多く、その予測は下層を中心に解析値並みかむしろ解析値に比べて多かった。また、水平風速の予測についても下層を中心に予測値の大きい傾向が見られた。下層の風速および水蒸気量の予測値が大きいことを反映して、水蒸気フラックスの予測値も下層中心に解析値より大きくなった。

2kmLFMでは、線状の降水域が実況に近い形で予測されていることもあり、対象事例からは、水蒸気量の予測に関しては懸念事項はなさそうである。7月の事例でも触れているが、線状の降水域の位置ずれについては、水平風速の予測が関係している可能性がある。



第3章 事例解析編

3.3.3 まとめ

第3.3.1項から第3.3.2項にかけて述べた、令和4(2022)年8月の豪雨事例の数値予報結果について、以下のスライドにまとめた。

令和4年8月の豪雨事例の数値予報の結果のまとめ

- 8月3日の山形県及び新潟県で発生した線状降水帯事例について紹介した
- 大雨発生確率ガイダンスでは、大雨のポテンシャルを捉えることが難しい事例であった
- 5kmMSMの予測降水量は過小であった
- 2kmLFMIにおいて、位置ずれはあるが、線状降水帯を捉えていた
- 環境場の確認では、概ね水蒸気量は平均場に比べて多く、その予測値は下層を中心に解析値並みかむしろ解析値に比べて多かった。また、水平風速の予測についても下層を中心に予測値の大きい傾向が見られた
- 3.2節の7月の事例でも触れているが、線状の降水域の位置ずれについては、水平風速の予測が関係している可能性がある
- その他の8月に発生した線状降水帯に関する数値予報システムにおける予測結果については、3.3節の冒頭の表を参照願いたい

参考文献

- 気象庁 2022:令和4年(2022年)8月3日～4日に山形県、新潟県に大雨特別警報を発表した事例, 大雨事例等における防災気象情報の精度検証と発表基準の改善, <https://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/jirei/sokuhou/R040803.pdf>



第3章 事例解析編

3.4 令和4年9月の豪雨事例の数値予報の結果

※以下のスライドの説明では、FTは予報時間(例:FT=6は6時間予報)、「～時」は日本時間、図中の「UTC」は協定世界時(例:00UTCは9時)を表す。また、現在、現業利用中の〇km解像度の数値予報システム名を〇km(数値予報システム名)と示す場合がある(例:5kmMSM、2kmLFM)。特にkmの付いていない(数値予報システム名)だけの場合は、現業利用中のものと同様である。以下のスライドの説明では、令和4年9月の年月は省略する

本節では、令和4(2022)年9月に発生した線状降水帯に関する数値予報システムにおける予測結果の内、第3.4.1項で23～24日に東海地方で発生した線状降水帯事例を取り上げる。さらに、環境場(第3.4.2項)、まとめ(第3.4.3項)について示す。

9月に発生した線状降水帯に関する数値予報システムにおける 予測結果について(概要)

対象日時	場所	大雨発生確率ガイダンス(概ね15時間前)	5kmMSM(降水量実況比)	2kmLFM(降水量実況比)	気が付いた点
9月3～5日(発生せず)	沖縄地方	先島諸島中心に30%以上	過大・過小な場合あり(実況に近い場合もあり)	過大・過小な場合あり	台風第11号通過に伴う(予測中心気圧は実況比で低い)
9月6日(発生せず)	九州北部	長崎県を中心に30%を超える確率	実況に近い	実況に近い	台風第11号通過に伴う(予測中心気圧は実況に近い)
9月18～19日(発生)	熊本県・宮崎県	九州を中心に50%を超える高い確率	実況に近い	実況に近い	台風第14号通過に伴う(予測中心気圧は実況に近い)
9月19～20日(発生せず)	四国・中国・近畿・東海地方	各地域で30%を超える確率	実況に近い(ただし、紀伊半島の予測降水量は過小)	実況に近い(ただし、紀伊半島の予測降水量は過小)	台風第14号通過に伴う
9月23～24日(発生)	愛知県・静岡県	23日18時～24日0時対象:30%を超える確率、24日3時および6時対象では前時間帯より低確率	23日18時対象:実況に近い、23日21時～24日6時対象:過大・過小・位置ずれなどあり	23日18時対象:実況に近い、23日21時～24日6時対象:過大・過小・位置ずれなどあり	台風第15号通過に伴う(中心位置が実況比で異なる)。台風中心の東側の予測水蒸気量が少ないことと濃度がはっきりしない。予測が安定せず、大雨の持続性に課題。

青: 良い方のコメント / 赤: 悪い方のコメント

令和4(2022)年9月に発生した線状降水帯に関する数値予報システムにおける予測結果について、表にまとめた。本節では、この内、第3.4.1項で23～24日に東海地方で発生した線状降水帯事例を取り上げる。



第3章 事例解析編

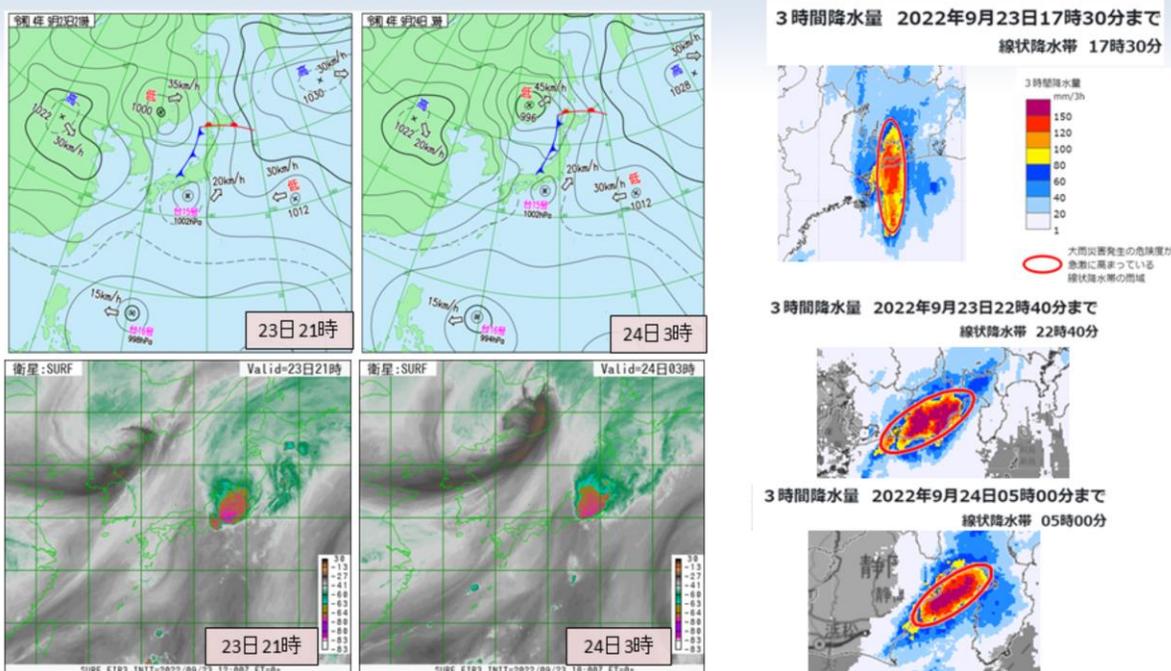
3.4.1 東海地方で発生した線状降水帯事例 (9月23日～24日)

概要

- 台風第15号の東海地方への北上に伴い、台風周辺の暖かく湿った空気が流入した
- 9月23日夕方に愛知県、23日夜と24日明け方に静岡県で線状降水帯が発生した。また、静岡県では23日夜～24日未明にかけて16回の記録的短時間大雨情報が発表された
- 静岡では24日5時50分までの12時間に404.5mm(観測史上1位)となるなど、静岡県を中心に大雨となった
- **線状降水帯が発生した時間帯(23日18時と24日0時および3時)を対象として、3時間100mm以上の大雨発生確率ガイダンスの予測結果、現業数値予報システム(5kmMSM、2kmLFMおよび5kmMEPS)による予測と実況の比較結果を示す**

令和4(2022)年9月23～24日に東海地方で発生した線状降水帯事例の概要を示す。

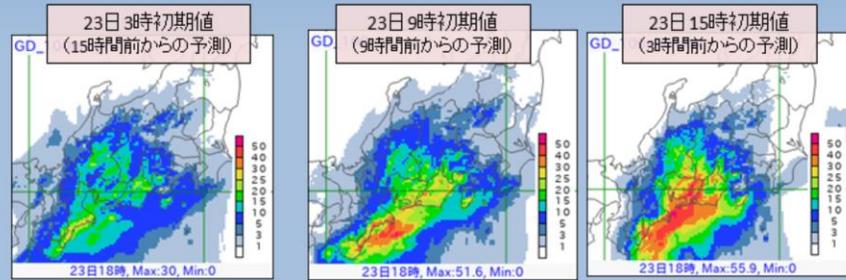
地上天気図(上段)・衛星水蒸気画像(下段)・線状降水帯発生時の 3時間解析雨量(右図)(23日～24日)



図は令和4(2022)年9月23～24日の地上天気図、気象衛星ひまわりによる水蒸気画像および線状降水帯発生時の3時間解析雨量を示す。北海道から日本海に延びる前線や台風第15号に向かって暖かく湿った空気が流入し、東海地方を中心に対流雲が発達し、23日夕方から24日明け方にかけて、線状降水帯が発生した。

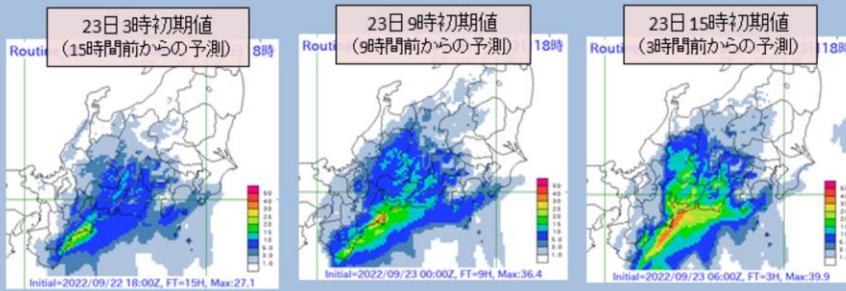
大雨発生確率ガイダンス(3時間100mm以上)の予測結果 (23日18時対象)

メソアンサンブル(5kmMEPS)大雨発生確率ガイダンスの全メンバー最大値(%)



*11×11格子(55km四方)で前1時間降水量にその前後の1時間降水量を加えた3時間降水量が100mm以上を示す。

メソモデル(5kmMSM)大雨発生確率ガイダンス(%)



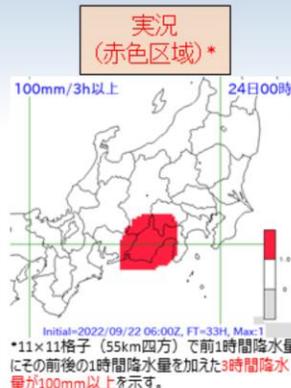
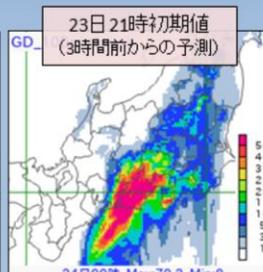
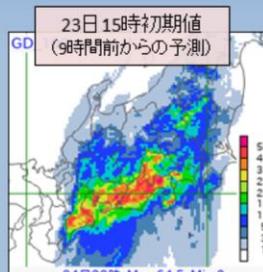
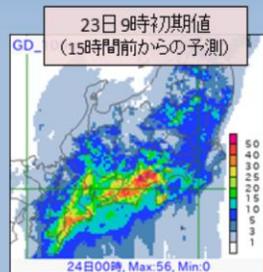
▶15時間前からの5km MEPS、5kmMSMの各大雨発生確率ガイダンスでは、三重県を中心に東海地方では15～30%、9時間前からは、30%以上の確率が予測された

令和4(2022)年9月23日18時対象の3時間100mm以上の大雨発生確率ガイダンスの予測結果を確認する。上段はメソアンサンブル予報システム(5kmMEPS)による全メンバー最大値(単位:%)、下段はメソ数値予報システム(5kmMSM)のものを示し、左から15時間前、9時間前、3時間前からのそれぞれ予測結果を示している。右上は実況の結果を示す。

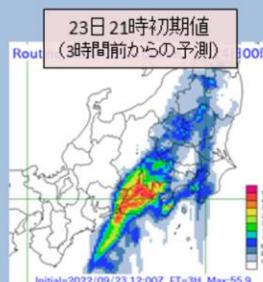
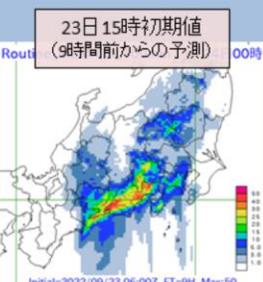
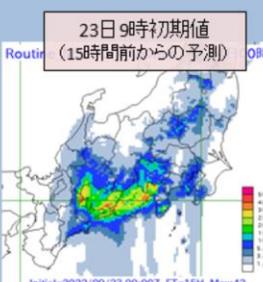
15時間前からのMEPS、5kmMSMの各大雨発生確率ガイダンスでは、三重県を中心に東海地方では15～30%、9時間前からは、30%以上の確率が予測された。

大雨発生確率ガイダンス(3時間100mm以上)の予測結果 (24日0時対象)

メソアンサンブル(5kmMEPS)大雨発生確率ガイダンスの全メンバー最大値(%)



メソモデル(5kmMSM)大雨発生確率ガイダンス(%)



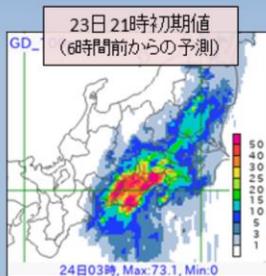
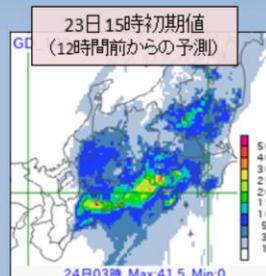
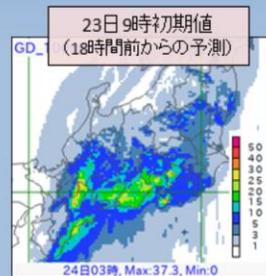
▶15時間前からの5km MEPS、5kmMSMの各大雨発生確率ガイダンスでは、静岡県を中心に40%を超える確率が予測された

令和4(2022)年9月24日0時対象の3時間100mm以上の大雨発生確率ガイダンスの予測結果を確認する。図の仕様は23日18時対象のものと同じである。

15時間前からのMEPS、5kmMSMの各大雨発生確率ガイダンスでは、静岡県を中心に40%を超える確率が予測された。

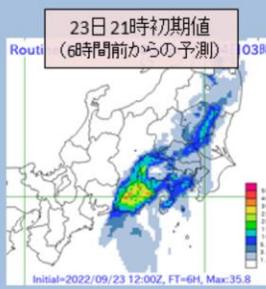
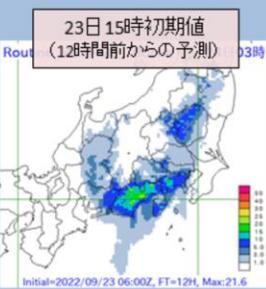
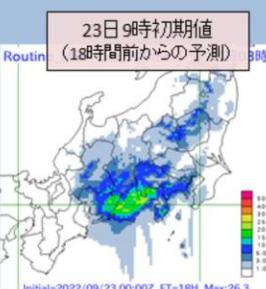
大雨発生確率ガイダンス(3時間100mm以上)の予測結果 (24日3時対象)

メオンサンプル(5kmMEPS)大雨発生確率ガイダンスの全メンバー最大値(%)



*11×11格子(55km四方)で前1時間降水量にその前後の1時間降水量を加えた3時間降水量が100mm以上を示す。

メモデル(5kmMSM)大雨発生確率ガイダンス(%)



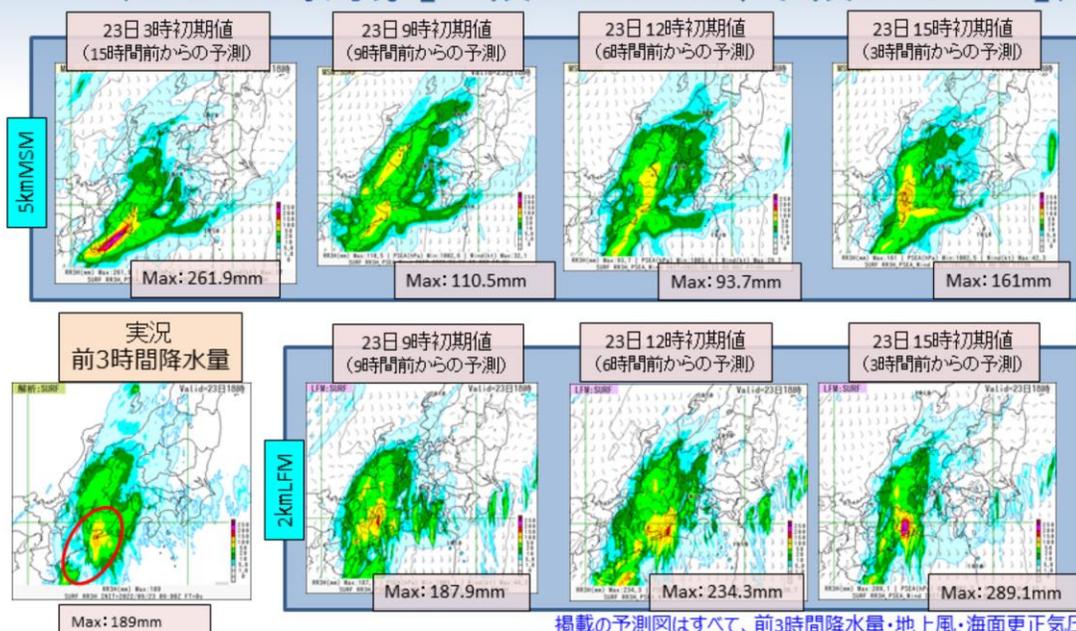
▶18時間前からのMEPS、5kmMSMの各大雨発生確率ガイダンスでは、静岡県を中心に15%を超える確率が予測された(24日0時以前と比べると確率は低かった)。6時間前からは、静岡県を中心に5kmMEPSでは50%以上、5kmMSMでは25%以上の確率が予測された



令和4(2022)年9月24日3時対象の3時間100mm以上の大雨発生確率ガイダンスの予測結果を確認する。図の仕様は23日18時対象のものと同じであるが、図の配置は、左から18時間前、12時間前、6時間前からのそれぞれ予測結果を示している。右上は実況の結果を示す。

18時間前からのMEPS、5kmMSMの各大雨発生確率ガイダンスでは、静岡県を中心に15%を超える確率が予測された(24日0時以前と比べると確率は低かった)。6時間前からは、静岡県を中心に5kmMEPS大雨発生確率ガイダンスでは50%以上、5kmMSM大雨発生確率ガイダンスでは25%以上の確率が予測された。

現業数値予報システムによる予測と実況の比較結果 (23日18時対象【上段:5kmMSM、下段:2kmLFM】)



掲載の予測図はすべて、前3時間降水量・地上風・海面更正気圧

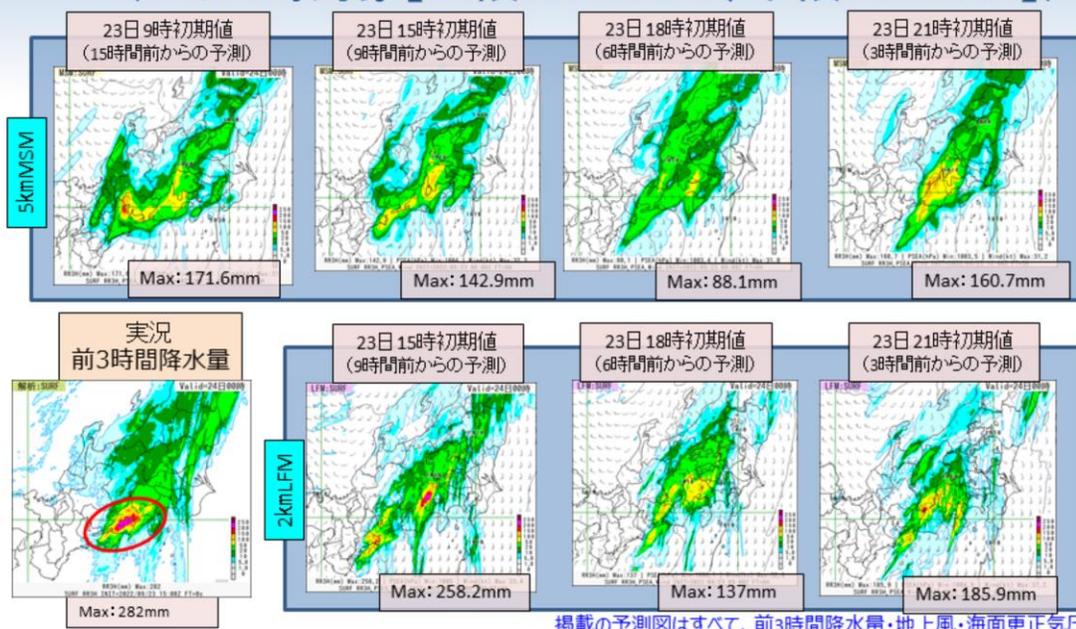
▶線状降水帯の発生した地域(赤丸)に着目すると、2kmLFMの9時間前予測では、降水量の最大値および降水分布ともに実況に近かった。5kmMSMの15時間前予測、2kmLFMの6時間前予測共に降水量の最大値は実況に比べて過大であった。5kmMSMの9および6時間前予測では、実況に比べてやや少ない降水量であった。

5kmMSM(上段)および2kmLFM(下段)の3時間降水量について、令和4(2022)年9月23日18時を対象とした結果を示す。

図は、前3時間降水量(mm)・地上風(kt)・海面更正気圧(hPa)で、9月23日3時初期値の15時間前からの予測(2kmLFMは23日9時初期値の9時間前からの予測)から順番に9月23日15時初期値の3時間前から予測までの結果を示す。また、下段左に解析雨量(mm)の結果を示す。

線状降水帯の発生した地域(赤丸)に着目すると、2kmLFMの9時間前予測では、降水量の最大値および降水分布ともに実況に近かった。5kmMSMの15時間前予測、2kmLFMの6時間前予測共に降水量の最大値は実況に比べて過大であった。5kmMSMの9および6時間前予測では、実況に比べてやや少ない降水量であった。

現業数値予報システムによる予測と実況の比較結果 (24日0時対象【上段:5kmMSM、下段:2kmLFM】)



掲載の予測図はすべて、前3時間降水量・地上風・海面更正気圧

▶線状降水帯の発生した地域(赤丸)に着目すると、MSM、2kmLFM共に予測降水量は過小傾向であった。降水分布では、20mm以上の区域に着目すると、MSMの方が2kmLFMに比べて実況に近く、2kmLFMでは実況に比べて、降水域全体でみると、予測領域の北側への広がり不足の傾向が見られた

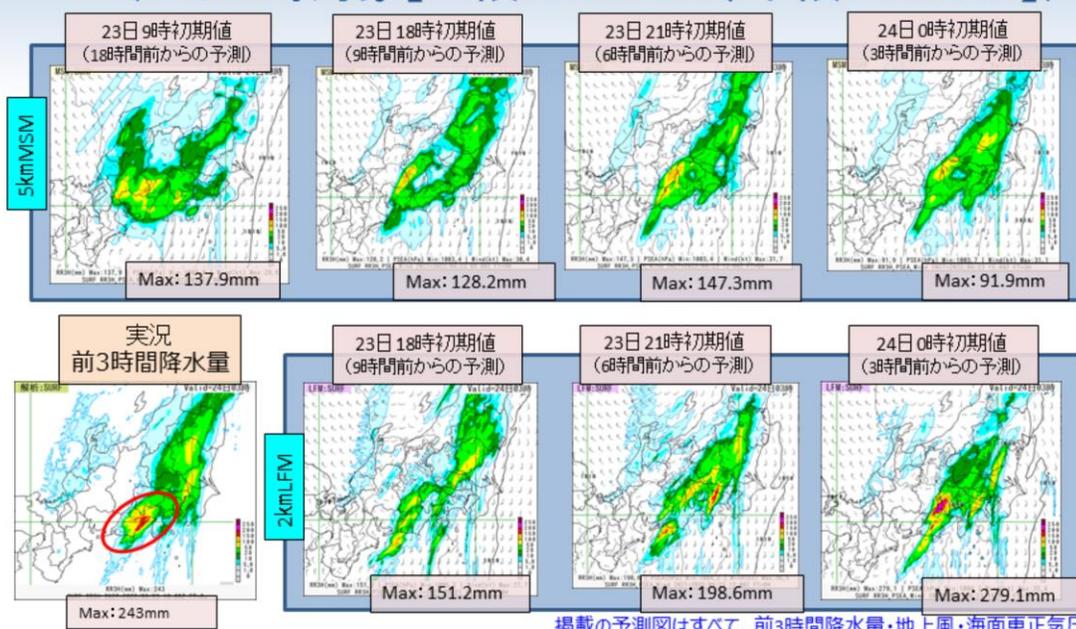


5kmMSM(上段)および2kmLFM(下段)の3時間降水量について、令和4(2022)年9月24日0時を対象とした結果を示す。

図の様子は23日18時対象のものと同じであるが、9月23日9時初期値の15時間前からの予測(2kmLFMは23日15時初期値の9時間前からの予測)から順番に9月23日21時初期値の3時間前から予測までの結果を示す。また、下段左に解析雨量(mm)の結果を示す。

線状降水帯の発生した地域(赤丸)に着目すると、5kmMSM、2kmLFM共に予測降水量は過小傾向であった。降水分布では、20mm以上の区域(黄色)に着目すると、5kmMSMの方が2kmLFMに比べて実況に近かった。降水域全体でみると、2kmLFMでは実況に比べて、予測領域の北側への広がり不足の傾向が見られた。

現業数値予報システムによる予測と実況の比較結果 (24日3時対象【上段:5kmMSM、下段:2kmLFM】)



掲載の予測図はすべて、前3時間降水量・地上風・海面更正気圧

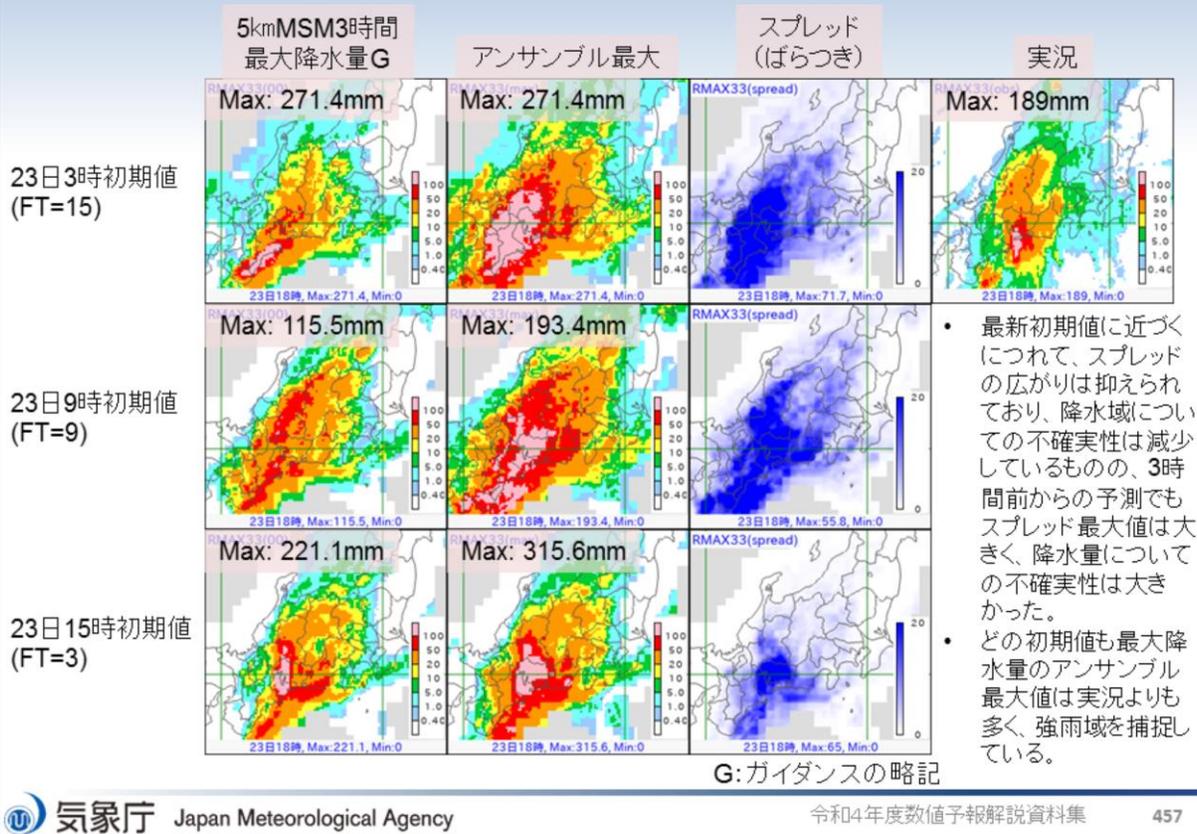
▶赤丸の静岡県内の地域に着目すると、5kmMSMの予測降水量は実況に比べて、過小傾向が見られた。予測降水量の極大値は北西側へずれている傾向が見られた。2kmLFMの予測降水量は実況に比べて、過小傾向が見られた。また、予測降水量の極大値が複数存在したり、北西や南西方向への位置ずれが見られた

5kmMSM(上段)および2kmLFM(下段)の3時間降水量について、令和4(2022)年9月24日3時を対象とした結果を示す。

図の様子は23日18時対象のものと同じであるが、9月23日9時初期値の18時間前からの予測(2kmLFMは23日18時初期値の9時間前からの予測)から順番に9月24日0時初期値の3時間前から予測までの結果を示す。また、下段左に解析雨量(mm)の結果を示す。

赤丸の静岡県内の地域に着目すると、5kmMSMの予測降水量は実況に比べて、過小傾向が見られた。予測降水量の極大値は北西側へずれている傾向が見られた。2kmLFMの予測降水量は実況に比べて、過小傾向が見られた。また、予測降水量の極大値が複数存在したり、北西や南西方向への位置ずれが見られた。

5kmMEPS3時間最大降水量ガイダンス(23日18時対象)

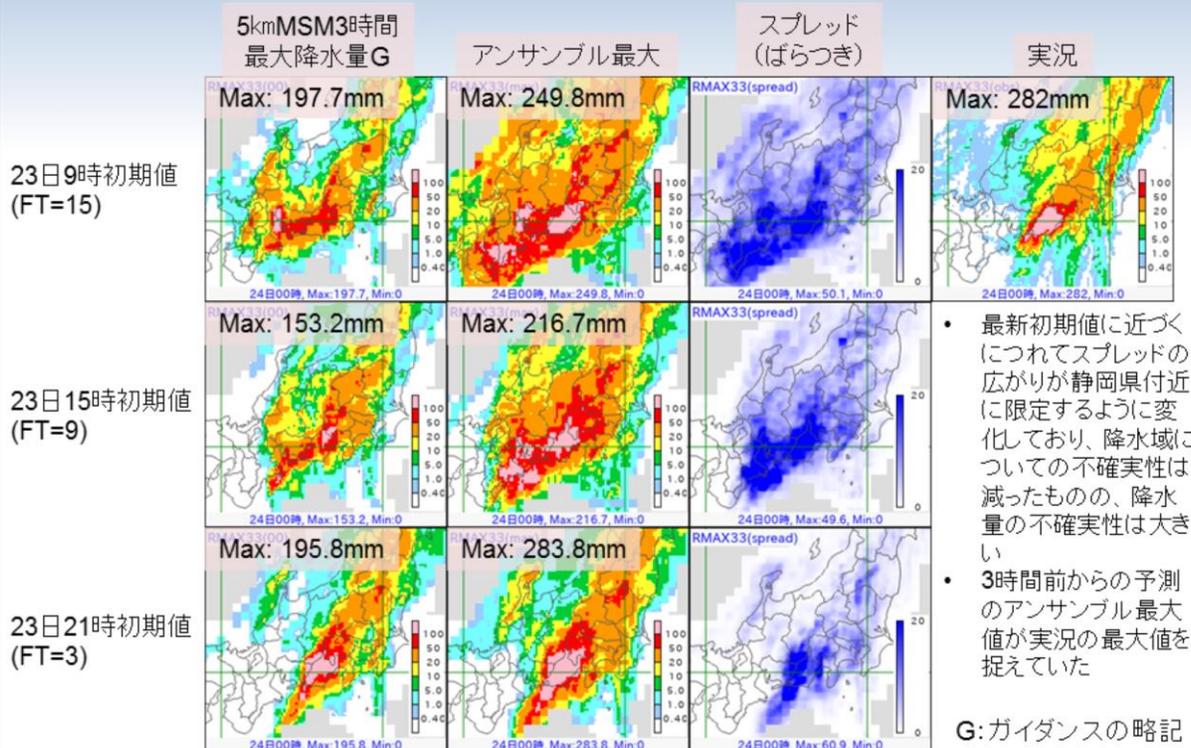


令和4(2022)年9月23日18時を対象としたMEPS3時間最大降水量ガイダンスの結果を示す。右上図が9月23日18時の観測の5km格子3時間最大降水量、左側から5kmMSM3時間最大降水量ガイダンス、5kmMEPS3時間最大降水量ガイダンスメンバー最大値、スプレッド(ばらつき)を示し、上段から下段に向かって、9月23日3時初期値15時間予測、9月23日9時初期値9時間予測および9月23日15時初期値3時間予測の結果をそれぞれ示す。降水量、スプレッドの単位はいずれもmmである。スプレッドは、青色が濃いほどスプレッドが大きいことを示す。

以下の特徴が見られた。

- 最新初期値に近づくにつれて、スプレッドの広がりは抑えられており、降水域についての不確実性は減少しているものの、3時間前からの予測でもスプレッド最大値は大きく、降水量についての不確実性は大きかった
- どの初期値も最大降水量のアンサンブル最大値は実況よりも多く、強雨域を捕捉している

5kmMEPS3時間最大降水量ガイダンス(24日0時対象)

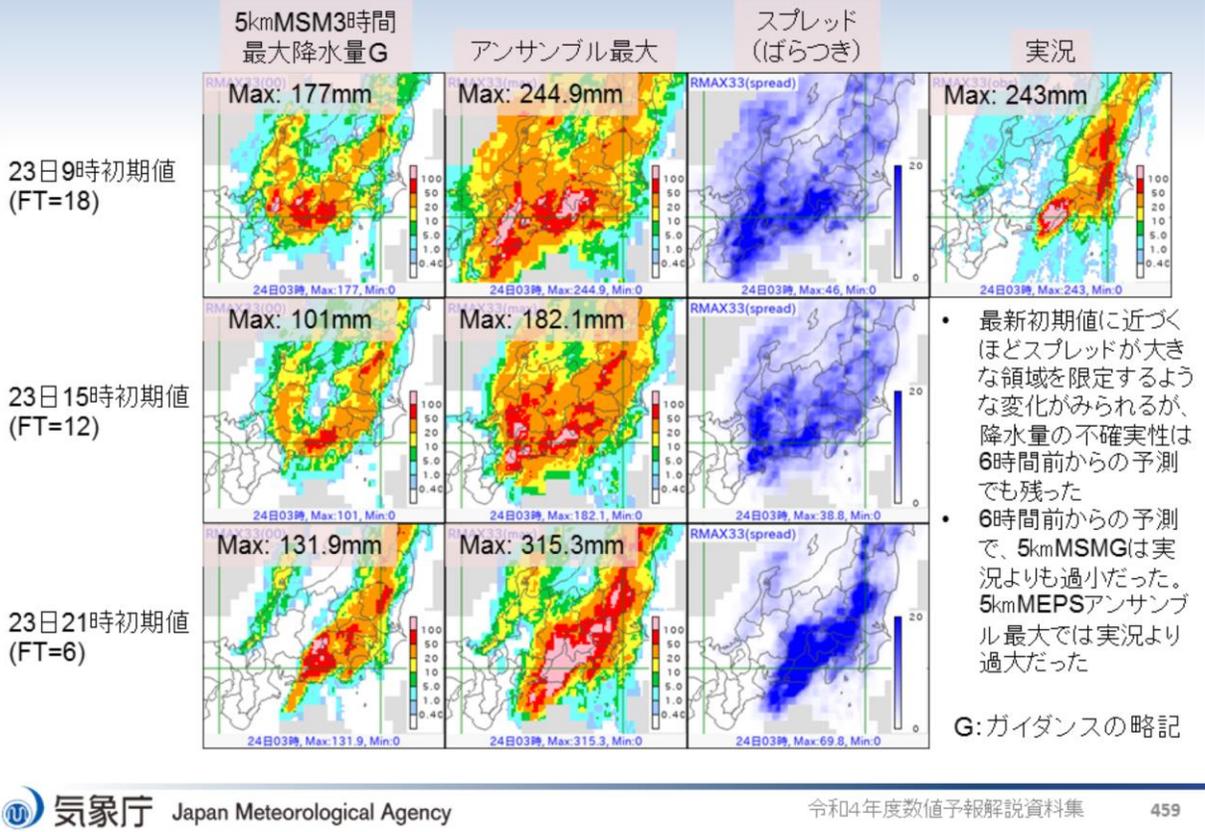


令和4(2022)年9月24日0時を対象としたMEPS3時間最大降水量ガイダンスの結果を示す。右上図が9月24日0時の観測の5km格子3時間最大降水量、その他は23日18時対象の図の仕様と同じである。上段から下段に向かって、9月23日9時初期値15時間予測、9月23日15時初期値9時間予測および9月23日21時初期値3時間予測の結果をそれぞれ示す。降水量、スプレッドの単位はいずれもmmである。スプレッドは、青色が濃いほどスプレッドが大きいことを示す。

以下の特徴が見られた。

- 最新初期値に近づくにつれてスプレッドの広がりが静岡県付近に限定するように変化しており、降水域についての不確実性は減ったものの、降水量の不確実性は大きい
- 3時間前からの予測のアンサンブル最大値が実況の最大値を捉えていた

5kmMEPS3時間最大降水量ガイダンス(24日3時対象)



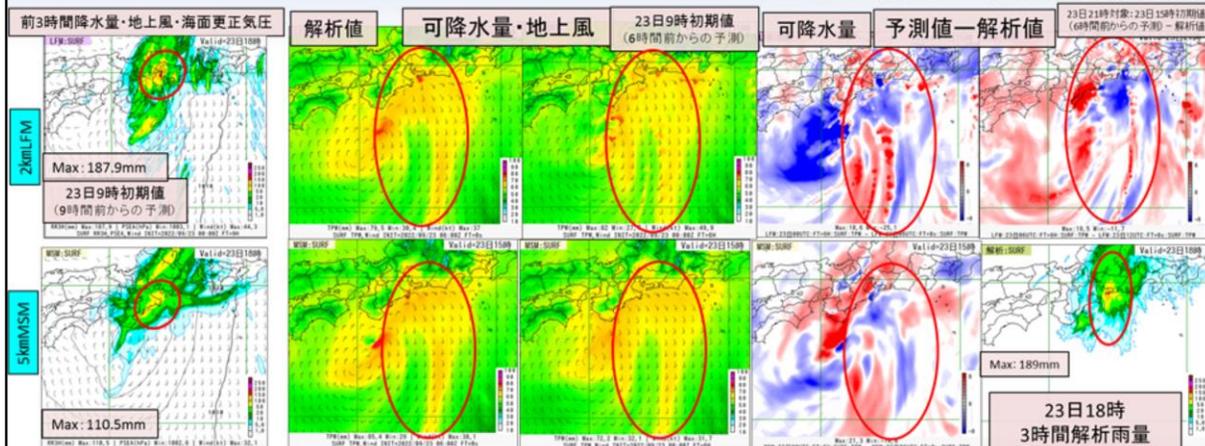
令和4(2022)年9月24日3時を対象としたMEPS3時間最大降水量ガイダンスの結果を示す。右上図が9月24日3時の観測の5km格子3時間最大降水量、その他は23日18時対象の図の仕様と同じである。上段から下段に向かって、9月23日9時初期値18時間予測、9月23日15時初期値12時間予測および9月23日21時初期値6時間予測の結果をそれぞれ示す。降水量、スプレッドの単位はいずれもmmである。スプレッドは、青色が濃いほどスプレッドが大きいことを示す。

以下の特徴が見られた。

- ・最新初期値に近づくほどスプレッドが大きな領域を限定するような変化がみられるが、降水量の不確実性は6時間前からの予測でも残った
- ・6時間前からの予測で、5kmMSMGは実況よりも過小だった。5kmMEPSアンサンブル最大では実況より過大だった

現業数値予報システム(5kmMSMおよび2kmLFM)による 6時間前予測と解析値の比較結果 【対象時刻：23日15時】

※LFMの初期値は5kmで解析したものを内挿して作成



5kmMSMと2kmLFMとも共通で予測値は解析値と比べて、台風中心の東側(赤丸の領域)で可降水量は多い傾向であったが、静岡県沖から南にバンド状の延びる可降水量の多い領域のコントラストがはっきりしない特徴がみられた。また、愛知県から静岡県沖で可降水量が少ない傾向、三重県などでは多い傾向が見られた。23日21時対象で解析値と比較してもこの傾向は変わらなかった。23日18時の線状降水帯が発生した時の予測(小さい赤丸領域)に着目すると、2kmLFM・5kmMSM共に可降水量が多く予測された三重県など実況より西側で降水量が多くなる傾向が見られた。前述の可降水量の特徴は、24日日界過ぎから明け方にかけての大雨の予測に影響を与えた可能性がある。



令和4(2022)年9月23日15時を対象とした2kmLFM(上段)と5kmMSM(下段)による6時間前からの予測可降水量と解析値の比較結果を示す。左図の23日18時対象の予測降水量の環境場を確認していることになる。図は、左から順に23日18時対象の前3時間降水量(mm)・地上風(kt)・海面更正気圧(hPa)、可降水量の解析値(mm)、23日9時初期値の6時間前からの可降水量の予測値(mm)、その可降水量の解析値からの差分値(赤色ほど予測値の可降水量が多いことを示す)、23日21時を対象とした23日15時初期値の可降水量の予測値の解析値からの差分値である。また、右下図は23日18時対象の3時間解析雨量(mm)である。特徴は以下のとおりである。

5kmMSMと2kmLFMとも共通で予測値は解析値と比べて、台風中心の東側(赤丸の領域)で可降水量は多い傾向であったが、静岡県沖から南にバンド状の延びる可降水量の多い領域のコントラストがはっきりしない特徴がみられた。また、愛知県から静岡県沖で可降水量が少ない傾向、三重県などでは多い傾向が見られた。23日21時対象で解析値と比較してもこの傾向は変わらなかった。23日18時の線状降水帯が発生した時の予測(小さい赤丸領域)に着目すると、2kmLFM・5kmMSM共に可降水量が多く予測された三重県など実況より西側で降水量が多くなる傾向が見られた。前述の可降水量の特徴は、24日日界過ぎから明け方にかけての大雨の予測に影響を与えた可能性がある。

まとめ

- 9月23～24日の東海地方で発生した線状降水帯事例に関する数値予報システムにおける予測結果について、3時間100mm以上の大雨発生確率ガイダンスの予測結果、現業数値予報システム(5kmMSM、2kmLFMおよび5kmMEPS)による予測と実況の比較結果を示した
- 大雨発生確率ガイダンスによる予測結果
 - 5kmMEPS、5kmMSMでは共に24日0時対象までの18あるいは15時間前からの予測では40%を超える地域があった。24日3時対象の予測では、15%の低確率であった
- 5kmMSMおよび2kmLFMによる予測結果
 - 23日18時対象の2kmLFMの9時間前予測では、降水量の最大値および降水分布ともに実況に近かった。5kmMSMの15時間前予測、2kmLFMの6時間前予測共に降水量の最大値は実況に比べて過大であった。5kmMSMの9および6時間前予測では、実況に比べてやや少ない降水量であった。24日0時や3時対象では5kmMSMおよび2kmLFM共に過大・過小・位置ずれなどあり、降水量予測が安定しなかった
- 5kmMEPSガイダンスによる予測結果
 - 最新初期値に近づくにつれてスプレッドの広がりが静岡県付近に限定するように変化しており、降水域についての不確実性は減ったものの、降水量の不確実性は大きかった
- 5kmMSMおよび2kmLFMによる6時間前からの予測と解析値の比較結果
 - 5kmMSMと2kmLFMとも共通で予測値は解析値と比べて、可降水量は台風中心の東側で可降水量は多い傾向であったが、静岡県沖から南にバンド状の延びる可降水量の多い領域のコントラストがはっきりしない特徴がみられた。愛知県から静岡県沖で可降水量が少ない傾向が見られた



令和4(2022)年9月23～24日の東海地方で発生した線状降水帯事例に関する数値予報システムにおける予測結果について、このスライドにまとめた。

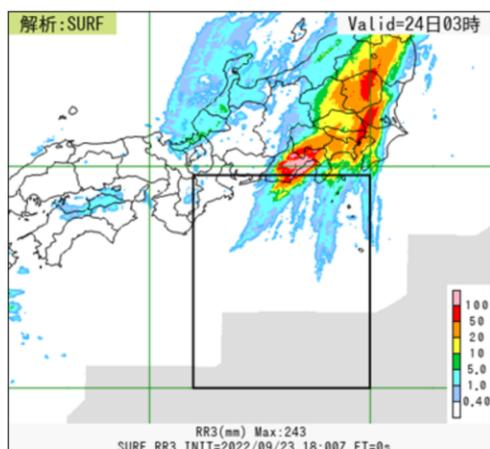


第3章 事例解析編

3.4.2 環境場

豪雨をもたらした環境場

GSMおよびMSMの気温・水蒸気混合比・水平風速・水蒸気フラックスの検証領域での鉛直プロファイル(期間平均と平均場の差分)を予報時間(FT)ごとに示す。



検証領域(矩形領域)
136.0E-140.0E, 30.0N-34.8N

令和4年9月の豪雨事例 (東海地方で発生した線状降水帯事例)

○平均場:1991年~2020年の9月下旬

- ・ 長期再解析:
9月21日9時-10月1日3時

○期間平均:2022年9月22日~9月23日

- ・ GSM予報値:9月22日 9時 - 24日 3時
- ・ MSM予報値:9月22日 9時 - 24日 3時

令和4(2022)年9月の豪雨事例(東海地方で発生した線状降水帯事例)の環境場について、気温(単位:°C)・水蒸気混合比(単位:g/kg)・水平風速(単位:m/s)・水蒸気フラックス(単位:gm⁻²s⁻¹)がどれくらい予測できていたかを確認するために、期間平均値の平均場からの差分について、GSMおよびMSMの鉛直プロファイルかつ予報時間(FT)別に示し、長期再解析(JRA-3Q)から作成した平均場(1991-2020年)と比較する。検証領域は、大雨となった地域の上流にあたる海上の矩形領域を設定した。平均場の期間と令和4(2022)年9月の豪雨事例(東海地方で発生した線状降水帯事例)の期間は以下に示すとおりである。

以下の予報値の期間はすべて予測対象時刻を示す。

平均場:1991年-2020年の9月下旬

長期再解析(JRA-3Q):9月21日 9時 - 10月1日 3時

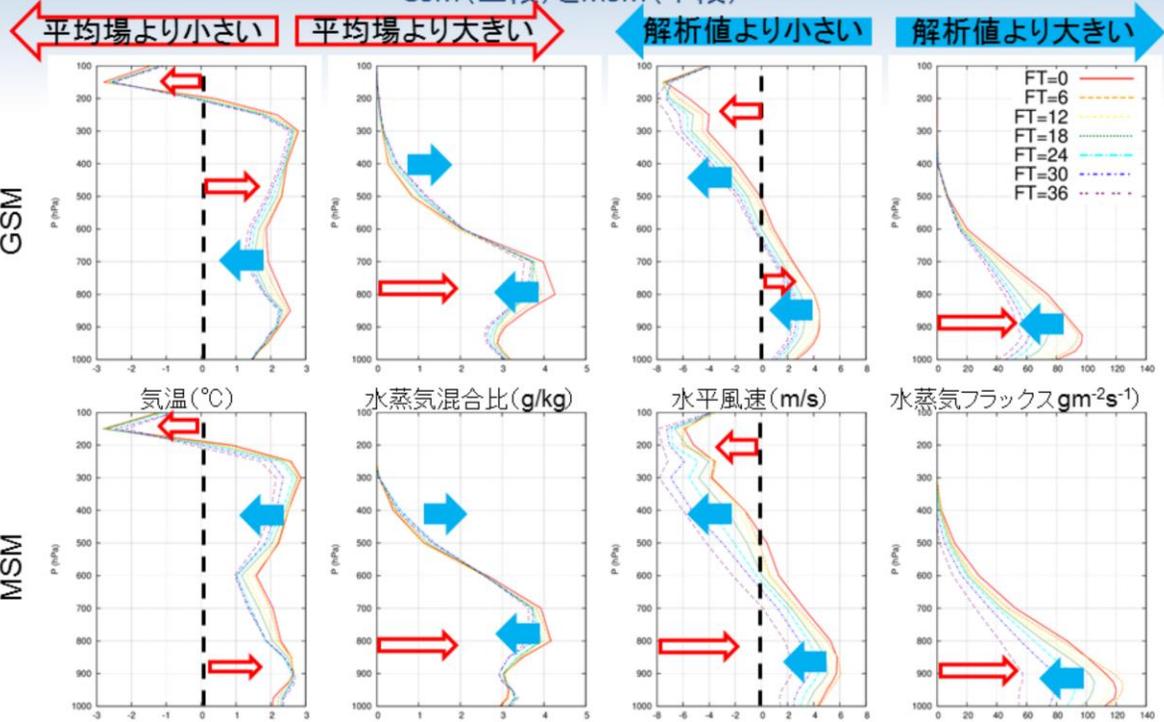
期間平均:2022年9月22日 - 9月23日

GSM予報値:9月22日 9時 - 24日 3時

MSM予報値:9月22日 9時 - 24日 3時

令和4年9月の豪雨事例 各要素の鉛直プロファイル(平均場との差分)

GSM(上段)とMSM(下段)



令和4(2022)年9月の豪雨事例(東海地方で発生した線状降水帯事例)の気温(単位:°C)・水蒸気混合比(単位:g/kg)・水平風速(単位:m/s)・水蒸気フラックス(単位:gm⁻²s⁻¹)の平均場からの差分鉛直プロファイルをGSMおよびMSM別に示す。各グラフは豪雨事例期間中の解析値(FT=0)および6時間~36時間予測値(FT=6~FT=36)を示す。以下に特徴を示す。

①気温

- ・GSMおよびMSM共通で解析値および予測値共に100~200hPaで平均場比で低く、200hPaから下層で平均場比で高い
- ・GSMおよびMSM共通で200~800hPaでは解析値比で予測値は低くなる傾向

②水蒸気混合比

- ・GSMおよびMSM共通で解析値および予測値共に400hPaより下層では平均場比で水蒸気量が多い
- ・GSMおよびMSM共通で400~500hPaで解析値比で予測値は水蒸気量は多く、700~900hPaでは解析値比で予測値は水蒸気量が少ない

③水平風速

- ・GSMおよびMSM共通で解析値および予測値共に400hPaから上層で平均場比で風速が弱く、600hPaより下層で平均場比で風速が強い傾向
- ・GSMおよびMSM共通で200hPaから下層では解析値比で風速の予測値が小さい

④水蒸気フラックス

- ・GSMおよびMSM共通で解析値および予測値共に500hPaから下層で水蒸気フラックスは平均場比で大きい
- ・GSM予測値では600hPaから下層で解析値比で小さい傾向
- ・MSM予測値では500hPaから下層で解析値比で小さい傾向

まとめ

令和4年9月の豪雨事例(東海地方で発生した線状降水帯事例)	
気温	<ul style="list-style-type: none"> ・GSMおよびMSM共通で解析値および予測値共に100～200hPaで平均場比で低く、200hPaから下層で平均場比で高い ・GSMおよびMSM共通で200～800hPaでは解析値比で予測値は低くなる傾向
水蒸気混合比	<ul style="list-style-type: none"> ・GSMおよびMSM共通で解析値および予測値共に400hPaより下層では平均場比で水蒸気量が多い ・GSMおよびMSM共通で400～500hPaで解析値比で予測値は水蒸気量は多く、700～900hPaでは解析値比で予測値は水蒸気量が少ない
水平風速	<ul style="list-style-type: none"> ・GSMおよびMSM共通で解析値および予測値共に400hPaから上層で平均場比で風速が弱く、600hPaより下層で平均場比で風速が強い傾向 ・GSMおよびMSM共通で200hPaから下層では解析値比で風速の予測値が小さい
水蒸気フラックス	<ul style="list-style-type: none"> ・GSMおよびMSM共通で解析値および予測値共に500hPaから下層で水蒸気フラックスは平均場比で大きい ・GSM予測値では600hPaから下層で解析値比で小さい傾向 ・MSM予測値では500hPaから下層で解析値比で小さい傾向

水蒸気量を中心とした環境場について、まとめた。9月の豪雨事例(東海地方で発生した線状降水帯事例)については、概ね水蒸気量は平均場に比べて多かったが、その予測は下層を中心に水蒸気量が少ない傾向が見られた。また、水平風速の予測についても下層を中心に予測値が小さい傾向が見られた。このことを反映して、水蒸気フラックスの予測値は下層中心に解析値より小さくなった。

水蒸気量が少ない傾向については、前述の6時間前からの予測可降水量と解析値の比較結果において、予測値の方が静岡県沖から南にバンド状の延びる可降水量の多い領域のコントラストがはっきりしない特徴がみられたことと、愛知県から静岡県沖で可降水量が少ない傾向が見られたことと関連している可能性がある。



第3章 事例解析編

3.4.3 まとめ

第3.4.1項から第3.4.2項にかけて述べた、令和4(2022)年9月の豪雨事例の数値予報結果について、以下のスライドにまとめた。

令和4年9月の豪雨事例の数値予報の結果のまとめ

- 9月23～24日の東海地方で発生した線状降水帯事例について紹介した
- 大雨発生確率ガイダンスによる予測において、23日18時対象では大雨のポテンシャルを捉えていたが、24日のガイダンスによる確率値は低くなり、大雨のポテンシャルを捉えるには不十分であった
- 5kmMSMの予測降水量は過小であった
- 2kmLFMにおいて、位置ずれはあるが、23日夕方に発生した線状降水帯は捉えることができたが、その後の予測降水量は過大や過小などとなり、安定しなかった
- 環境場の確認では、概ね水蒸気量は平均場に比べて多かったが、その予測値は下層を中心に水蒸気量の少ない傾向が見られた。また、水平風速についても下層を中心に予測値の小さい傾向が見られた
- 前述については、6時間前からの予測可降水量と解析値の比較結果において、予測値の方が静岡県沖から南にバンド状の延びる可降水量の多い領域のコントラストがはっきりしない特徴がみられたことと、愛知県から静岡県沖で可降水量が少ない傾向が見られたことと関連している可能性がある
- その他の9月に発生した線状降水帯に関する数値予報システムにおける予測結果については、3.4節の冒頭の表を参照願いたい



第3章 事例解析編

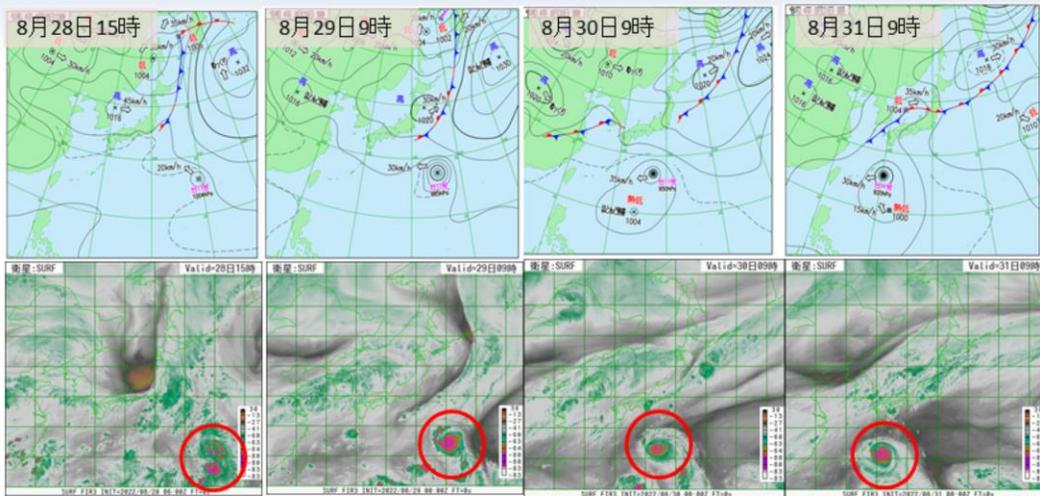
3.5 令和4年の台風の数値予報の結果 (台風第11号)

※以下のスライドの説明では、原則として令和4年の年は省略する。なお、速報としてまとめたものであるため、今後の調査により、考えられる要因等が変わる可能性があることに留意願います。

令和4(2022)年の台風の数値予報の結果として、8月28日15時に南鳥島近海で発生した台風第11号を取り上げる。この台風は、急速に発達しながら西寄りに進み、29日に東京都父島近海を強い勢力で通過した。父島では29日に最大瞬間風速48.4 m/s(南南西)を記録した。その後、31日に南大東島近海を猛烈な勢力で通過した。沖縄県北大東では31日に最大瞬間風速48.4m/s(南西)を記録した。9月2日には沖縄の南海上まで南下し、停滞した後、4日には、先島諸島を大型で強い勢力で北上した。沖縄県鏡原(宮古島市)では4日に最大瞬間風速40.1m/s(南南西)を記録した。5～6日は大型で強い勢力を維持したまま、東シナ海を北上後、対馬海峡を通過し、6日21時に日本海で温帯低気圧となった。

本節では、台風の進路・強度予測に絞って、数値予報結果を確認するとともに、予測誤差の考えられる要因等に関して述べる。なお、速報としてまとめたものであるため、今後の調査により、考えられる要因等が変わる可能性があることに留意願いたい。

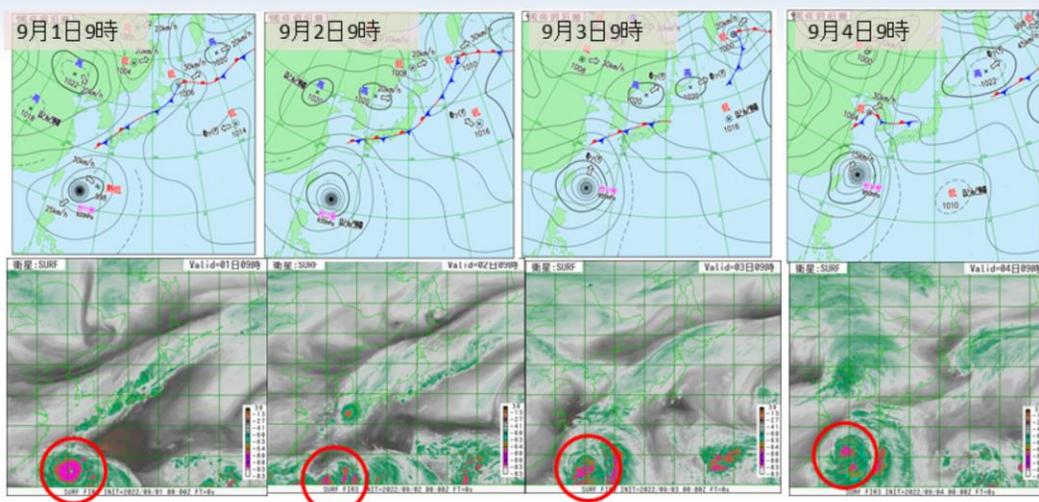
台風第11号に関する地上天気図・衛星水蒸気画像 (8月28日15時～8月31日9時)



8月28日15時に南鳥島近海で台風第11号が発生し、急速に発達しながら西寄りに進み、29日に東京都父島近海を強い勢力で通過した。その後、31日に南大東島近海を猛烈な勢力で通過した。

図は令和4(2022)年8月28日15時から31日9時にかけての地上天気図(上段)、気象衛星ひまわりによる水蒸気画像(下段)を示す。8月28日15時に南鳥島近海で台風第11号が発生し、急速に発達しながら西寄りに進み、29日に東京都父島近海を強い勢力で通過した。その後、31日に南大東島近海を猛烈な勢力で通過した。

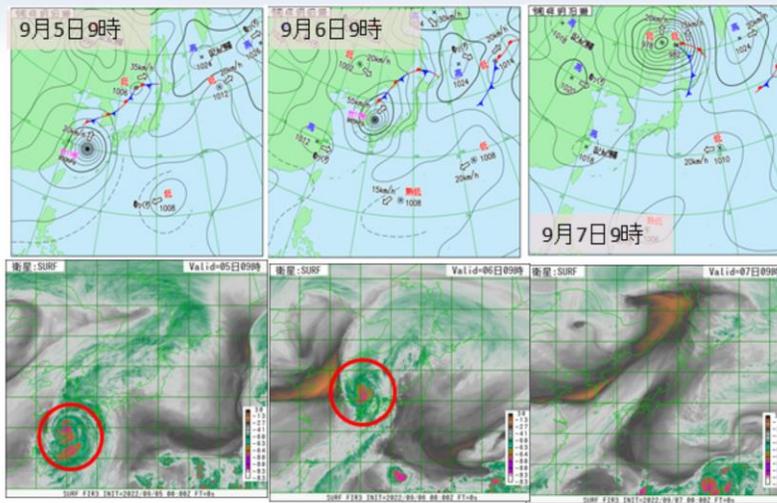
台風第11号に関する地上天気図・衛星水蒸気画像 (9月1日9時～9月4日9時)



台風第11号は2日9時前後の時間帯には、沖縄の南海上で、停滞。4日には、先島諸島を大型で強い勢力で北上した。

図は令和4(2022)年9月1日9時から4日9時にかけての地上天気図(上段)、気象衛星ひまわりによる水蒸気画像(下段)を示す。台風第11号は2日9時前後の時間帯には、沖縄の南海上で、停滞。4日には、先島諸島を大型で強い勢力で北上した。

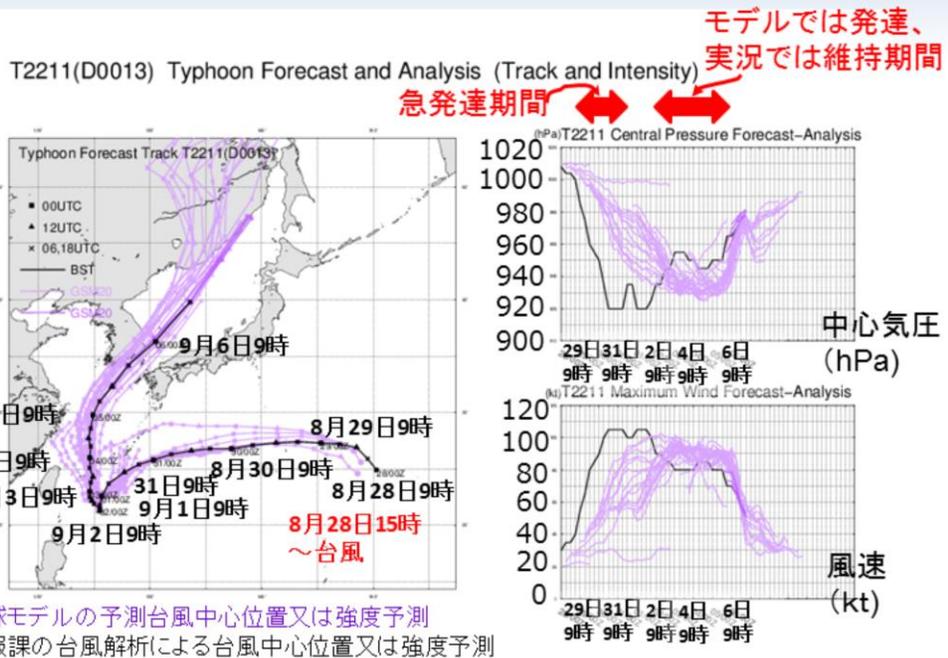
台風第11号に関する地上天気図・衛星水蒸気画像 (9月5日9時～9月7日9時)



台風第11号は5～6日は大型で強い勢力を維持したまま、東シナ海を北上後、対馬海峡を通過し、6日21時に日本海で温帯低気圧となった。

図は令和4(2022)年9月5日9時から7日9時にかけての地上天気図(上段)、気象衛星ひまわりによる水蒸気画像(下段)を示す。台風第11号は5～6日は大型で強い勢力を維持したまま、東シナ海を北上後、対馬海峡を通過し、6日21時に日本海で温帯低気圧となった。

台風第11号のGSMの全進路・強度予測結果の 台風速報解析との比較



台風第11号の全球数値予報システム(GSM)による予測位置(紫線)と台風速報解析位置(黒線)および強度(中心気圧(hPa:右上図)、風速(kt:右下図))を示す。予測位置については、令和4(2022)年8月28日9時初期値から9月6日15時初期値までのそれぞれ5.5日予測が描画されている。濃紫色ほど初期値が新しい。以下のような特徴が見られた。

(発生予測)

発生の直前に少なくとも1日前まで等圧線が閉じた閉曲線での擾乱を表現することができなかった(これを熱帯擾乱の発生予測ができなかったと定義する)

(進路予測)

1. 西進時(8月28日～31日): 台風速報解析に比べて、日本の南を北よりに発達することなく進む予測などが見られた
2. 停滞時(9月1日～2日頃): 台風速報解析に比べて、沖縄の南のやや東寄りの領域で停滞する傾向が見られた
3. 北上時(9月3日以降): 台風速報解析に比べて、東シナ海を西寄りに北上する傾向が見られた

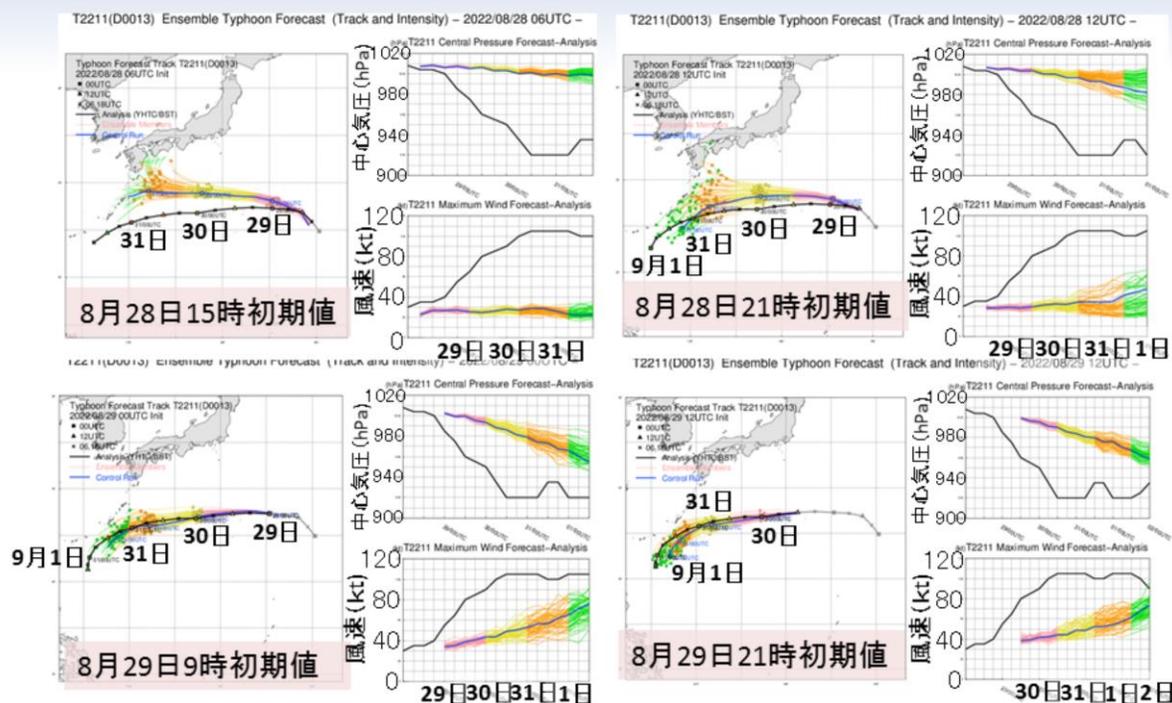
(強度予測)

1. 西進時: 台風速報解析に比べて、急発達が予測できなかった
2. 停滞時: 台風速報解析では衰弱する傾向であったが、発達を予測する傾向が続き、解析に近い予測ができなかった
3. 北上時: 台風速報解析では勢力を維持する傾向であったが、やや発達を予測する傾向が続き、解析に近い予測ができなかった。メソ数値予報システム(MSM)では、リードタイムが長いほど、台風の中心気圧が台風速報解析に比べてかなり低く、9月4日9時を対象とした48時間前以前の予測では900hPaを下回る結果となった。

東シナ海から日本の東海上にかけて海面水温は28℃以上で、台風の沖縄の南での停滞時や東シナ海北上時の再発達に寄与した可能性がある。

また、台風の急発達に関しては、近年多く発現しており、それによる強度予測誤差が拡大していることが指摘されている(Ito 2016; 伊藤 2018; 嶋田 2019)。2021年台風第14号においても台風の急発達が予測できていなかったことを確認している(気象庁情報基盤部 2021)。数値予報システムの観点からは、台風の急発達が予測できない要因として、数値予報モデルの解像度の影響などのほか、数値予報モデルの解像度に適した初期値を作成していることや、数値予報システムの安定運用の観点から中心気圧が不適切に深い構造の台風とならないような仕様として、それが挙げられる。そのため、初期値において実況と比較して中心気圧の浅い構造の台風となっている場合、実況のように中心気圧の深い台風を予測するのは困難な場合がある。

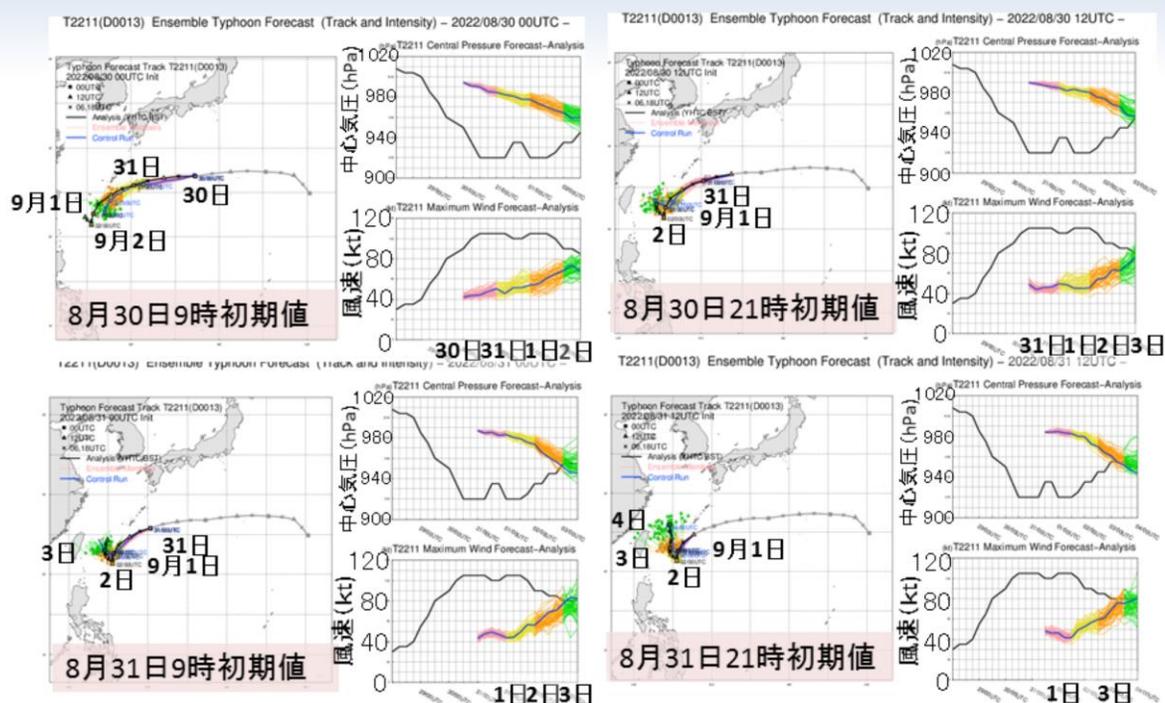
台風第11号の全球アンサンブル進路・強度予測結果 (8月28日～29日)



GEPSによる台風第11号の進路・強度予測(令和4(2022)年8月28日15時～8月29日21時初期値予測)の結果を示す。各初期値予測の左図が台風進路予測、右上図が中心気圧(hPa)の時系列予測、右下図が中心付近の最大風速(kt)を示す。なお、黒線は台風速報解析による追跡結果であり、日付は各9時時点のものを示す。色付の線は、GEPSの各メンバーの追跡結果であり、予測時間毎に色付けを変えている(例えば、8月28日15時初期値の場合は黄色は30日対象の予測結果を示している)。

GSMの予測と同様に8月28日初期値の予測は、台風速報解析に比べて、全体的に日本の南海上を北寄り西進する予測となっていた。その後、29日初期値の予測では、台風速報解析に近い予測結果であった。また、急発達予測はなかった。

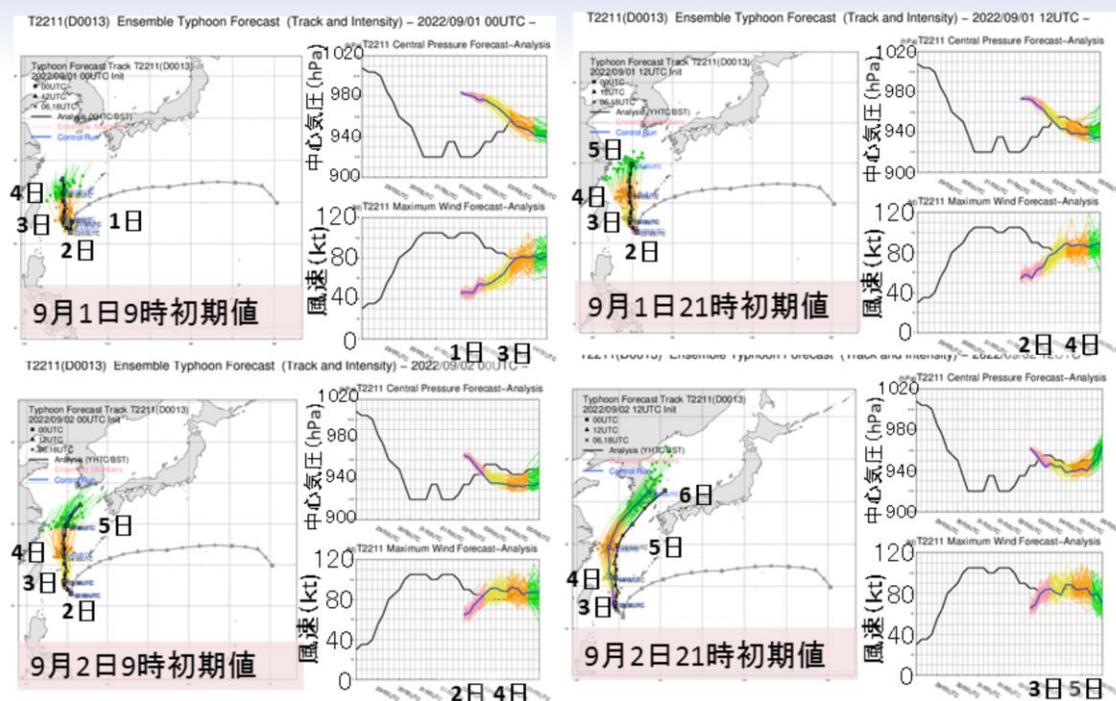
台風第11号の全球アンサンブル進路・強度予測結果 (8月30日～31日)



GEPSによる台風第11号の進路・強度予測(令和4(2022)年8月30日9時～8月31日21時初期値予測)の結果を示す。各初期値予測の左図が台風進路予測、右上図が中心気圧(hPa)の時系列予測、右下図が中心付近の最大風速(kt)を示す。なお、黒線は台風速報解析による追跡結果であり、日付は各9時時点のものを示す。色付の線は、GEPSの各メンバーの追跡結果であり、予測時間毎に色付けを変えている(例えば、8月30日9時初期値の場合は緑色は9月2日対象の予測結果を示している)。

GSMの予測と同様に8月30日初期値の9月2日前後の予測は、台風速報解析に比べて、沖縄の南で停滞する位置が全体的にやや北東側にずれる傾向が見られた。その後、31日初期値の予測では、台風速報解析に近い予測結果であった。強度については、台風速報解析では勢力を維持から衰弱する傾向であったが、それに対して、やや発達を予測する傾向が続いた。

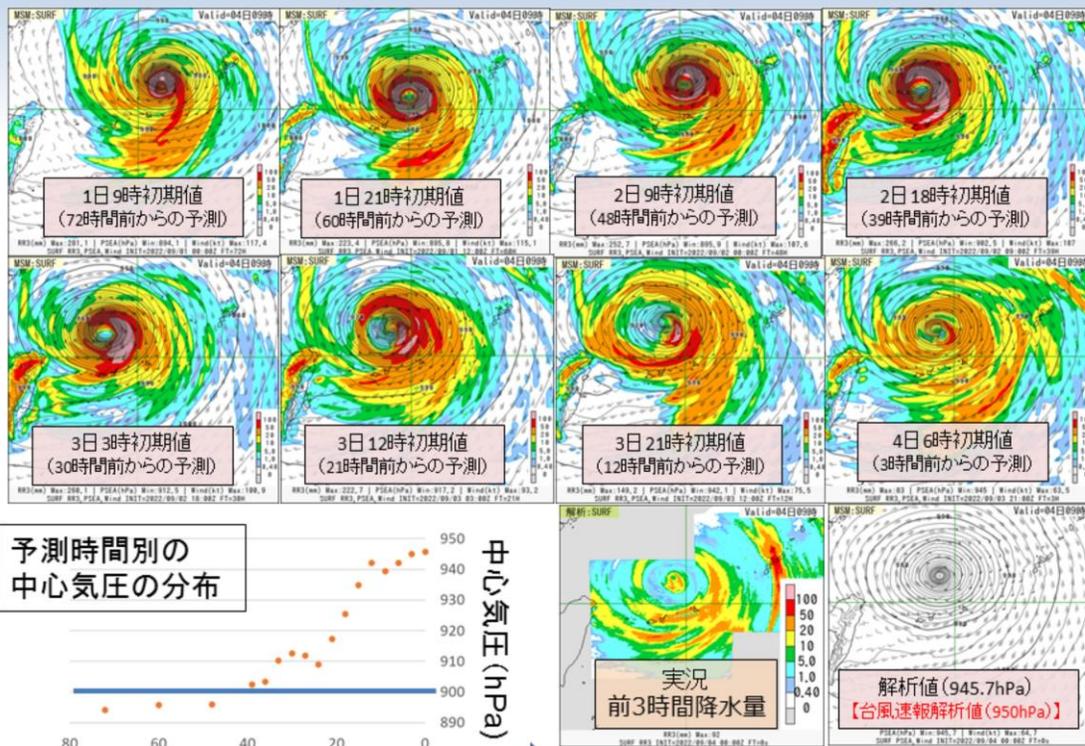
台風第11号の全球アンサンブル進路・強度予測結果 (9月1日～2日)



GEPSによる台風第11号の進路・強度予測(令和4(2022)年9月1日9時～9月2日21時初期値予測)の結果を示す。各初期値予測の左図が台風進路予測、右上図が中心気圧(hPa)の時系列予測、右下図が中心付近の最大風速(kt)を示す。なお、黒線は台風速報解析による追跡結果であり、日付は各9時時点のものを示す。色付の線は、GEPSの各メンバーの追跡結果であり、予測時間毎に色付けを変えている(例えば、9月1日9時初期値の場合は緑色は4日対象の予測結果を示している)。

1日～2日9時初期値の予測では、台風速報解析に近い予測結果であったが、2日21時初期値の予測では、台風速報解析に比べて、全体的に西側を北上する結果であった。強度については、台風速報解析では勢力を維持から衰弱する傾向であったが、それに対して、やや発達を予測する傾向が続いた。

台風第11号のMSMによる予測結果(9月4日9時対象)



(リードタイム長い) 予測時間(FT) (リードタイム短い)



気象庁 Japan Meteorological Agency

令和4年度数値予報解説資料集

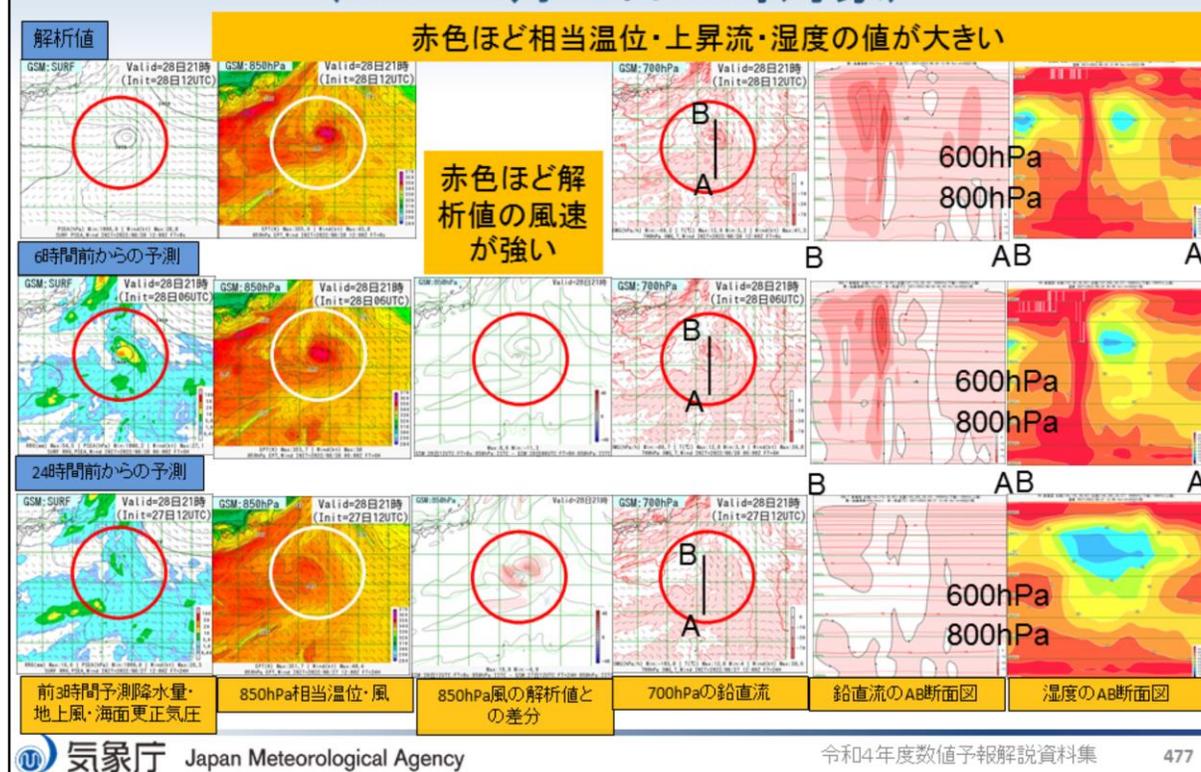
476

MSMによる台風第11号の強度予測結果を令和4(2022)年9月4日9時を対象として予測時間別に示す。掲載の72時間前～3時間前からの予測図はすべて、前3時間降水量(mm)・地上風(kt)・海面更正気圧(hPa)である。下段の図は右から解析値(地上風(kt)・海面更正気圧(hPa)のみ)、実況(前3時間降水量)、予測時間別の中心気圧の分布を示す。

リードタイムが長いほど、台風の中心気圧が、台風速報解析に比べてかなり低く、48時間以前の予測では900hPaを下回る結果となった。12時間前からの予測よりリードタイムが短くなると、実況に近い中心気圧となった。予測中心気圧がかなり低くなった48時間以前の予測では、中心付近で100mm以上の予測降水量が集中する特徴が見られた。その後、予測中心気圧が高くなるほど、中心付近の100mm以上の予測降水量は見られなくなる特徴が見られた。

台風の強度予測に関する取り組みとして、MSMでは初期値固定で海面水温(全球海面水温解析値)の利用から、令和4年3月に1次元海洋混合層モデルを導入して、台風強度の過発達傾向の予測を改善させた(気象庁 2021)が、本事例で見られるように、まだ課題があることを示唆している。

台風第11号の発生直後の環境場の違い (GSM:8月28日21時対象)

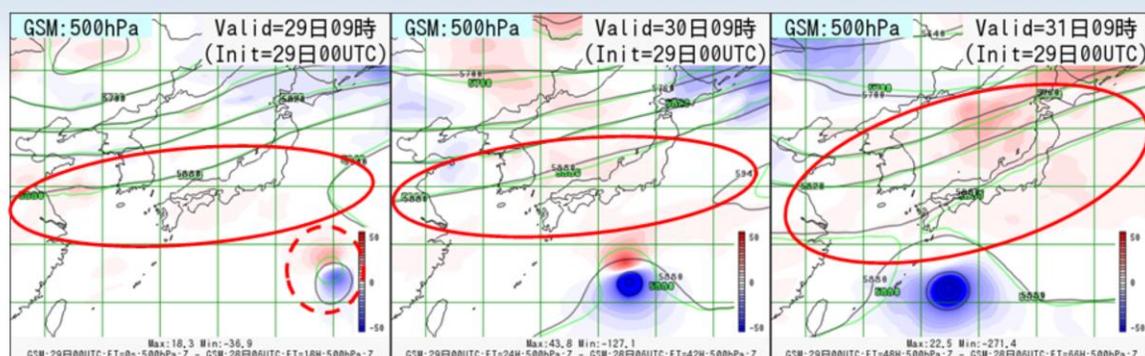


台風第11号の発生直後として令和4(2022)年8月28日21時を対象としたGSMでの環境場を確認する。図は左から順に前3時間降水量(mm)・地上風(kt)・海面更正気圧(hPa)で黄色や橙色ほど予測降水量が多い、850hPaの相当温位(K)・風(kt)で赤色ほど相当温位が高い、850hPa風の解析値との差分(kt)で赤色ほど解析値の方が風速が強い、700hPaの鉛直流(hPa/hour)で赤色が濃いほど鉛直流が強い、鉛直流(hPa/hour)のAB鉛直断面図で凡例は700hPaの鉛直流に同じ、湿度(%)のAB鉛直断面図で赤色ほど湿度が高いことを示す。また、上段から順に解析値、6時間前からの予測、24時間前からの予測を示す。対象としている熱帯擾乱を赤丸ないし白丸で表示している。なお、解析値や6時間前からの予測に利用された解析値には台風ポーガスが入っているが、24時間前からの予測には入っていない。

対象としている熱帯擾乱に着目すると、台風ポーガスが入っている解析値や6時間前からの予測では、等圧線が閉じた閉曲線での擾乱を表現し、中心付近では予測降水量や高相当温位の集中と顕著な上昇流、それに伴う湿潤域(高湿度を目安)の鉛直方向の立ち上がりが見られた。一方で、24時間前からの予測では、それらの特徴ははっきりと見られない。また、850hPa風の解析値との差分を見ると台風中心付近と中心から南西側の領域の風速が弱いことが分かった。この領域では、海面からの潜熱フラックスが解析値や6時間前からの予測のものに比べて値が小さい傾向(図略)が見られた。

これらのことから対象としている熱帯擾乱の中心の南西側の領域での風速が弱いことにより、海面からの潜熱フラックスの供給が弱くなり、熱帯擾乱の発達を抑えられ、GSMのモデル自身での熱帯擾乱の発生予測ができなかった可能性がある。

台風第11号西進時(8月28日～31日)の予測進路の違いについて (8月28日15時初期値と29日9時初期値からの各予測の比較)



【特徴】 赤色の塗りつぶしの色が濃いほど、29日の解析値又は予測値の高度場が高い

- ① 28日15時初期値の29日9時の台風の位置が解析値に比べて北側に位置(赤破線円)
- ② 28日15時初期値では発達する予測はなかったが、29日9時初期値では急発達した
- ③ 29日9時初期値予測は28日15時初期値予測に比べて、太平洋高気圧の西へ張り出しが台風の西進と共に強まった(赤実線円)

28日15時初期値では日本の南を北よりに発達することなく進む予測となった要因は、①で28日15時初期値の台風の中心位置が解析値に比べて北側であったことと③の28日15時初期値予測では29日9時初期値予測に比べて、太平洋高気圧の西へ張り出しが弱かったことから、日本の陸地近くを西進することができ、予測進路に差が生じたと考えられる。また、②の28日15時初期値予測では発達しなかったことも、太平洋高気圧の西へ張り出しをおさえる方に寄与したことが考えられる。

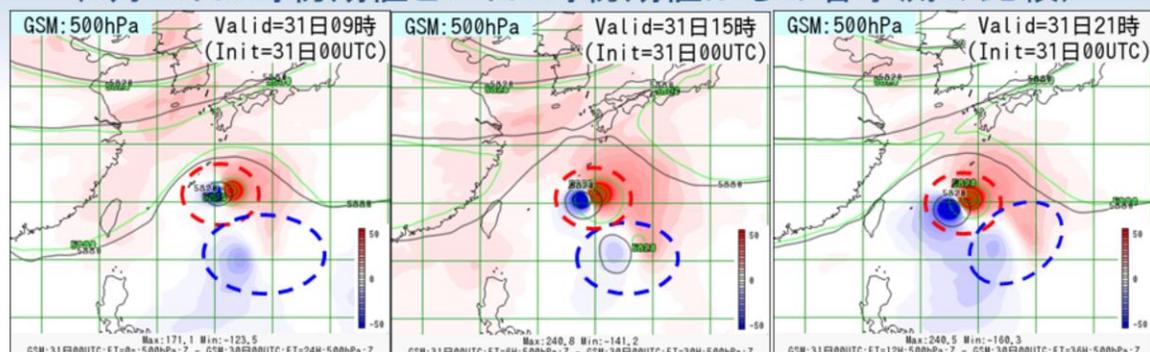
台風の西進時に台風速報解析に比べて、令和4(2022)年8月28日15時初期値では日本の南を北よりに発達することなく進む予測となったことについて、500hPa高度予測差図(左図:8月29日9時を対象とした8月29日9時初期値(黒線:FT=0)—8月28日15時初期値(緑線:FT=18)、中図:8月30日9時を対象とした8月29日9時初期値(黒線:FT=24)—8月28日15時初期値(緑線:FT=42)、右図:8月31日9時を対象とした8月29日9時初期値(黒線:FT=48)—8月28日15時初期値(緑線:FT=66))の図から推測する。赤色の塗りつぶしの色が濃いほど、29日の解析値又は予測値の高度場が高いことを示す。

以下の3つの特徴が見られる。

- ① 28日15時初期値の29日9時の台風の位置が解析値に比べて北側に位置
- ② 28日15時初期値では発達する予測はなかったが、29日9時初期値では急発達した
- ③ 29日9時初期値予測は28日15時初期値予測に比べて、太平洋高気圧の西へ張り出しが台風の西進と共に強まった

これらの特徴から、28日15時初期値では日本の南を北よりに発達することなく進む予測となったと考えられる要因は、①で28日15時初期値の台風の中心位置が解析値に比べて北側であったことと③の28日15時初期値予測では29日9時初期値予測に比べて、太平洋高気圧の西へ張り出しが弱かったことから、日本の陸地近くを西進することができ、予測進路に差が生じたことである。また、②の28日15時初期値予測では発達しなかったことも、太平洋高気圧の西へ張り出しをおさえる方に寄与した可能性がある。

台風第11号停滞時(9月1日～2日頃)の予測進路の違いについて (8月30日9時初期値と31日9時初期値からの各予測の比較)



【特徴】

赤色の塗りつぶしの色が濃いほど、31日の解析値又は予測値の高度場が高い

- ① 30日9時初期値の31日9時の台風の位置が解析値に比べて東側に位置(赤破線円)
- ② 30日9時および31日9時初期値解析・予測では、台風の南東側に熱帯擾乱(30日9時初期値予測では31日初期値予測の東側に位置(青破線円))が存在。台風や熱帯擾乱の周辺では31日9時初期値予測は30日9時初期値予測に比べて、太平洋高気圧が強い
- ③ 30日9時および31日9時初期値解析・予測では、②により、台風と熱帯擾乱との相互作用(台風は南西進、熱帯擾乱は北東進)による動きがそれぞれ見られた

8月30日9時初期値と31日9時初期値の予測では、台風と熱帯擾乱との相互作用は起きていたとみられるが、予測に差が生じた考えられる要因は、それぞれの位置の差の寄与が大きいことである



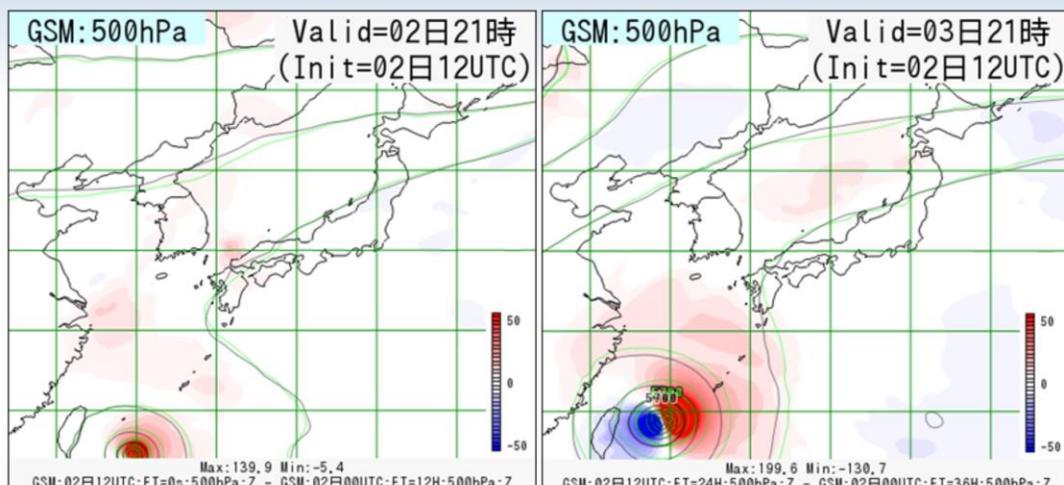
台風の停滞時に台風速報解析に比べて、沖縄の南のやや東寄りの領域で停滞する傾向が見られたことについて、500hPa高度予測差図(左図:令和4(2022)年8月31日9時を対象とした8月31日9時初期値(黒線:FT=0)―8月30日9時初期値(緑線:FT=24)、中図:8月31日15時を対象とした8月31日9時初期値(黒線:FT=6)―8月30日9時初期値(緑線:FT=30)、右図:8月31日21時を対象とした8月31日9時初期値(黒線:FT=12)―8月30日9時初期値(緑線:FT=36))の図から推測する。赤色の塗りつぶしの色が濃いほど、31日の解析値又は予測値の高度場が高いことを示す。

以下の3つの特徴が見られる。

- ① 30日9時初期値の31日9時の台風の位置が解析値に比べて東側に位置
- ② 30日9時および31日9時初期値解析・予測では、台風の南東側に熱帯擾乱(30日9時初期値予測では31日初期値予測の東側に位置)が存在。台風や熱帯擾乱の周辺では31日9時初期値予測は30日9時初期値予測に比べて、太平洋高気圧が強い
- ③ 30日9時および31日9時初期値解析・予測では、②により、台風と熱帯擾乱との相互作用(台風は南西進、熱帯擾乱は北東進)による動きがそれぞれ見られた

これらの特徴から、8月30日9時初期値と31日9時初期値の予測では、台風と熱帯擾乱との相互作用は起きていたとみられるが、予測に差が生じた考えられる要因は、それぞれの位置の差の寄与が大きいことである。

台風第11号北上時(9月3日以降)の予測進路の違いについて (9月2日9時初期値と2日21時初期値からの各予測の比較)



左図において、2日21時対象の2日9時の予測値および21時の解析値との間の台風の中心位置や大きさなどの差は小さかった。右図の3日21時対象の2日9時および21時初期値の予測の比較では、台風の東側や北側で赤色の塗りつぶしの色が濃い領域が広がっていた。2日21時初期値の予測では9時初期値予測に比べて、太平洋高気圧の縁の部分を中心に張り出しが強いことを示している。この傾向は、その他の初期値比較でも確認できた。このことが、台風速報解析に比べて、東シナ海を西寄りに北上した要因の可能性はある。



台風の北上時に台風速報解析に比べて、東シナ海を西寄りに北上する傾向が見られたことについて、500hPa高度予測差図(左図:令和4(2022)年9月2日21時を対象とした9月2日21時初期値(黒線:FT=0)―9月2日9時初期値(緑線:FT=12)、右図:9月3日21時を対象とした9月2日21時初期値(黒線:FT=24)―9月2日9時初期値(緑線:FT=36))の図から推測する。赤色の塗りつぶしの色が濃いほど、2日21時の解析値又は予測値の高度場が高いことを示す。前述の全球アンサンブル予測結果から2日9時初期値予測が2日21時初期値予測に比べて台風進路予測が実況に近いことから、2日21時初期値予測における東シナ海を西寄りに北上する傾向時の誤差の一端を見ることができ

る。左図において、2日21時対象の2日9時の予測値および21時の解析値との間の台風の中心位置や大きさなどの差は小さかった。右図の3日21時対象の2日9時および21時初期値の予測の比較では、台風の東側や北側で赤色の塗りつぶしの色が濃い領域が広がっていた。2日21時初期値の予測では9時初期値予測に比べて、太平洋高気圧の縁の部分を中心に張り出しが強いことを示している。この傾向は、その他の初期値比較でも確認できた。このことが、台風速報解析に比べて、東シナ海を西寄りに北上した要因の可能性はある。

まとめ(その1)

- 台風第11号について、GSMおよびGEPSを中心に台風の予測結果を確認した(台風強度の過発達傾向の予測のみMSM)
 - 発生予測
 - 発生の直前に少なくとも1日前まで等圧線が閉じた閉曲線での擾乱を表現することができなかった
 - 進路予測
 - 西進時(8月28日～31日):台風速報解析に比べて、日本の南を北よりに発達することなく進む予測などが見られた
 - 停滞時(9月1日～2日頃):台風速報解析に比べて、沖縄の南のやや東寄りの領域で停滞する傾向が見られた
 - 北上時(9月3日以降):台風速報解析に比べて、東シナ海を西寄りに北上する傾向が見られた
 - 強度予測
 - 西進時:台風速報解析に比べて、急発達が予測できなかった
 - 停滞時:台風速報解析では衰弱する傾向であったが、発達を予測する傾向が続き、解析に近い予測ができなかった
 - 北上時:台風速報解析では勢力を維持する傾向であったが、やや発達を予測する傾向が続き、解析に近い予測ができなかった

令和4(2022)年台風第11号の数値予報の予測結果について、まとめた。

まとめ(その2)

- 発生予測ができなかったことについて
 - 擾乱中心の南西側の領域での風速が弱いことにより海面からの潜熱フラックスの供給が弱くなり、熱帯擾乱の発達を抑えられ、GSMのモデル自身での熱帯擾乱の発生予測ができなかった可能性がある
- 台風の西進時に台風速報解析に比べて、28日15時初期値では日本の南を北よりに発達することなく進む予測となったことについて
 - 28日15時初期値の台風の中心位置が解析値に比べて北側であったこと
 - 28日15時初期値予測では29日9時初期値予測に比べて、太平洋高気圧の西へ張り出しが弱かったこと
 - 上記2つの理由により、日本の陸地近くを西進することができ、予測進路に差が生じた可能性がある。また、28日15時初期値予測では発達しなかったことも、太平洋高気圧の西へ張り出しをおさえる方に寄与した可能性がある
- 台風の停滞時に台風速報解析に比べて、沖縄の南のやや東寄りの領域で停滞する傾向が見られたことについて
 - 台風の南側に熱帯擾乱があり、台風と熱帯擾乱との相互作用は起きていた可能性がある。予測に差が生じた考えられる要因は、台風と熱帯擾乱の位置の差の寄与が大きいことである

まとめ(その3)

- 台風の北上時に台風速報解析に比べて、東シナ海を西寄りに北上する傾向が見られたことについて
 - 2日21時初期値の予測では9時初期値予測に比べて、太平洋高気圧の縁の部分を中心に張り出しが強い。このことが、台風速報解析に比べて、東シナ海を西寄りに北上した要因の可能性がある
- 西進時に台風速報解析に比べて急発達が予測できなかったことについて
 - 数値予報システムの観点から台風の急発達が予測できない要因の1つとして、数値予報システムの安定運用の観点から初期値の段階で中心気圧の深い構造の台風とならないような仕様となっていることが挙げられる
 - 実況と比較して中心気圧の浅い構造の台風から、実況のように中心気圧の深い台風をリードタイムの短い間に予測することは困難と考えられる
- 台風が停滞時や北上時に再発達する予測が続いたことについて
 - GSMで利用する海面水温が東シナ海から日本の東海上にかけて 28°C 以上で、台風の沖縄の南での停滞時や東シナ海北上時の再発達に寄与した可能性がある。東シナ海で 28°C 以上あり、再発達に寄与した可能性がある
- 台風強度の過発達傾向の予測について(MSM: 2022年9月4日9時対象)
 - リードタイムが長いほど、台風の中心気圧が、台風速報解析に比べてかなり低く、48時間以前の予測では900hPaを下回る結果となった。中心付近で100mm以上の予測降水量が集中する特徴が見られた



参考文献

- Ito, K., 2016: Errors in tropical cyclone intensity forecast by RSMC Tokyo and statistical correction using environmental parameters. SOLA, 12, 247-252
- 伊藤耕介, 2018: 台風の予測精度向上に資する先端的研究の現状. 第11回気象庁数値モデル研究会, http://pfi.kishou.go.jp/Presen2018/2_ito.pdf, (参照2021-11-14)
- 上野充, 2000: 数値モデルによる台風予報. 気象研究ノート, 197, 131-286.
- 嶋田宇大, 2019: 台風強度予報の改善に向けて取り組むべき研究課題. 第51回メソ気象研究会, http://pfi.kishou.go.jp/Presen2019/5_shimada.pdf, (参照2021-11-14)
- 気象庁情報基盤部, 2021: 台風第14号. 令和3年度数値予報解説資料集, 気象庁情報基盤部, 495-513.
- 気象庁, 2021: メソ数値予報システムの鉛直層増強、予報時間延長、物理過程の改良: 数値予報開発センター年報(令和3年), 気象庁 数値予報開発センター, 92-109.

第4章 資料編

数値予報課が所掌する数値予報システムとガイダンスの概要、およびプロダクトの送信時刻に関する情報を以下の表に示す（2022年9月30日現在）。表中の用語については、平成30年度数値予報研修テキスト第II部「数値予報の基礎知識」も参照のこと。

4.1 数値予報システムの概要一覧表

4.1.1 全球数値予報システム（全球モデル（GSM）・全球解析（GA））

数値予報モデル（全球モデル（GSM））	
水平分解能	TL959（格子間隔約20 km：0.1875°） ¹
鉛直層数	128層（最上層0.01 hPa）
初期時刻	00, 06, 12, 18UTC
予報時間	132時間（5.5日）（初期時刻：06, 18UTC） 264時間（11日）（初期時刻：00, 12UTC）
境界値	
地中温度	予測する（初期値は解析値 ² ）
土壌水分	飽和度を予測する（初期値のうち、1～3層は解析値、4～7層は気候値）
積雪被覆	予測した積雪水当量を用いて積雪被覆率を診断する（初期値は全球解析による）
海面水温	全球海面水温解析値（海洋気象情報室作成：0.25°格子）の平年偏差を、予報時間により季節変動する気候値に加えたもの
海氷分布	南北半球ごとの全球海氷密接度解析値（海洋気象情報室作成：0.25°格子）の海氷面積平年偏差を維持するように、海氷密接度の初期偏差固定予測値を気候値で修正したもの

¹ Tは三角形波数切断を、Lは1次格子を、数字は切断波数をそれぞれ表す。

² 観測データは同化されておらず、解析システム内で予測された値が利用されている。

解析（データ同化）システム（全球解析（GA））	
データ同化手法	局所アンサンブル変換カルマンフィルタ（LETKF）を用いたハイブリッド4次元変分法
水平分解能	アウトモデル ³ の水平分解能：TL959（格子間隔約 20 km : 0.1875°） ¹ インナーモデル ³ の水平分解能：TL319（格子間隔約 55 km : 0.5625°） ¹
鉛直層数	128 層（最上層 0.01 hPa）+ 地上 ⁴
アウトループの繰返し回数	2 回
インナーループの繰返し回数	約 35 回
気候学的背景誤差共分散のための制御変数	相対渦度、非バランス発散、非バランス気温、非バランス地表気圧、対数比湿
アンサンブル共分散のための共分散膨張	適合型乗算（adaptive multiplicative）共分散膨張。誤差標準偏差の水平全球平均の鉛直プロファイル、気候学的背景誤差共分散とアンサンブル共分散で整合させるための共分散膨張も追加的に使用。
アンサンブル共分散のための局所化	ガウス関数。局所化スケール（ガウス関数で $\exp(-1/2)$ となる距離）は水平方向は 800km（比湿については 400km）、鉛直方向は 0.8 スケールハイト
ハイブリッド共分散のための重み	50 hPa より下層で気候学的共分散、アンサンブル共分散は共に 0.5 で、それより上層では、それぞれ 1, 0 に近づける。
解析時刻	00, 06, 12, 18UTC
同化ウィンドウ	各解析時刻の 3 時間前から 3 時間後まで
観測の待ち受け時間	速報解析 ⁵ ：2 時間 20 分 サイクル解析 ⁵ ：11 時間 50 分（初期時刻：00, 12UTC） 7 時間 50 分（初期時刻：06, 18UTC）
利用する主な観測（観測データもしくは算出データ）	ラジオゾンデ（気圧、気温、湿度、風）、ウィンドプロファイラ（風）、航空機（気温、風）、地上（気圧 ⁴ ）、船舶・ブイ（気圧 ⁴ ）、地上 GNSS（大気遅延量）、衛星可視赤外イメージャ（大気追跡風）、衛星マイクロ波散乱計（海上風）、衛星マイクロ波サウンダ（輝度温度）、衛星マイクロ波イメージャ（輝度温度）、衛星ハイパースペクトル赤外サウンダ（輝度温度）、静止衛星赤外イメージャ（輝度温度）、衛星 GNSS 掩蔽（屈折角）
台風ポーガス	疑似観測値（海面更正気圧、風）を利用

³ アウトモデルは第一推定値の計算に用いるモデル。インナーモデルは解析修正量を求める計算に用いるモデル。

⁴ 地上観測および船舶・ブイ観測の気温・風・湿度のデータは、2次元最適内挿法による地上解析値作成に利用される。ただし、この地上解析値はモデルの初期値としては使われない。

⁵ 全球解析には予報資料を作成するために行う速報解析と観測データを可能な限り集めて正確な実況把握のために行うサイクル解析の2種類の計算がある。

LETKF 計算の詳細	
水平分解能	TL319 (格子間隔約 55 km : 0.5625°) ¹
鉛直層数	128 層 (最上層 0.01 hPa)
メンバー数	100 メンバー
モデルアンサンブル手法	確率的物理過程強制法
初期値化	地上気圧時間変化率の解析に基づいた水平発散の調節 (Hamrud et al. 2015)
共分散膨張	適合型乗算 (adaptive multiplicative) 共分散膨張
局所化	ガウス関数。局所化スケール (ガウス関数で $\exp(-1/2)$ となる距離) は水平方向は 400km (水蒸気に感度のある観測に対しては 300km)、鉛直方向は 0.6 スケールハイト (地上気圧と GNSS 天頂遅延量観測については、1.2 スケールハイト)、時間方向には 3 時間。衛星輝度温度観測に対しては、規格化 (ピーク値で除算) した荷重関数の平方根と、荷重関数のピーク位置を中心とするガウス関数 (スケールは $0.6\sqrt{2}$ スケールハイト) との最大値を鉛直局所化関数として使用。
リセンタリング	解析アンサンブルは、アンサンブル平均が 4 次元変分法の解析値と整合するようリセンタリングされる。
観測データの利用方法	全球解析に準ずる。但し、衛星ハイパースペクトル赤外サウンダは利用しない。
同化ウィンドウ	4 次元変分法と同じ
積雪深解析の詳細	
データ同化手法	2 次元最適内挿法
水平分解能	TL959 (格子間隔約 20 km : 0.1875°) ¹
第一推定値	モデル予測値を衛星観測から推定した積雪域で補正したもの
利用する観測	SYNOP 積雪深、アメダス積雪深 ⁶ 、衛星マイクロ波イメージャ (輝度温度 ⁷)
解析時刻	18UTC (サイクル解析のみで実施 ⁸)
土壌水分解析の詳細	
データ同化手法 ⁹	2 次元最適内挿法 (地上解析) Simplified Extended Kalman Filter (土壌水分解析本体)
水平分解能	TL959 (格子間隔約 20 km : 0.1875°) ¹
解析対象	土壌第 1-3 層の飽和度
第一推定値	モデル予測値
利用する観測	SYNOP 地上気温、相対湿度
解析時刻	00, 06, 12, 18UTC

⁶ アメダス積雪深のデータは、日本域において積雪深解析の結果を修正する処理でのみ利用される。

⁷ 輝度温度から積雪域を推定し、第一推定値の作成で利用。解析本体では利用しない。

⁸ 速報解析及びサイクル解析の 00、06、12、18UTC において、最新の積雪深解析を最新の日本域の積雪深観測で修正する処理を行い、その結果が全球モデルの初期値となる。

⁹ 土壌水分解析は 2 段階で行われる。まず、地上気温・相対湿度観測を同化した地上解析値を作成する。次に地上解析値を観測値とみなし、地上気温・相対湿度と土壌水分の相関関係を利用して土壌水分を解析する。

4.1.2 全球アンサンブル予報システム (GEPS)

数値予報モデル			
水平分解能	TQ479 (格子間隔約 27 km : 0.25°) ¹⁰ (18 日まで) TQ319 (格子間隔約 40 km : 0.375°) ¹⁰ (18 日以降)		
鉛直層数	128 層 (最上層 0.01 hPa)		
初期時刻	00, 06, 12, 18UTC		
予報時間	132 時間 (5.5 日) (初期時刻 : 06, 18UTC) 264 時間 (11 日) (初期時刻 : 00UTC) 432 時間 (18 日) (初期時刻 : 12UTC) 816 時間 (34 日) (初期時刻 : 12UTC、火曜日・水曜日のみ)		
メンバー数	51 メンバー (50 摂動ラン+コントロールラン) (18 日まで) 25 メンバー (24 摂動ラン+コントロールラン) (18 日以降)		
初期値および摂動作成手法			
初期値	全球解析値を TQ479 へ解像度変換したもの		
初期摂動作成手法	特異ベクトル (SV) 法及び LETKF ¹¹		
モデルアンサンブル手法	確率的物理過程強制法 (摂動ランのみ)		
下部境界摂動作成手法	海面水温摂動 (摂動ランのみ)		
SV 計算の詳細			
SV 計算の対象領域	北半球領域	熱帯領域	南半球領域
	30°N~90°N	30°S~30°N	30°S~90°S
接線形・随伴モデルの分解能	TL63 (格子間隔約 270 km) ¹ 、鉛直層数 40		
接線形・随伴モデルの物理過程	初期値化、水平拡散、境界層過程、地表面フラックス	(左に加えて) 積雲対流過程、重力波抵抗、長波放射、雲水過程、レイリー摩擦、乾燥対流調節	(北半球領域と同じ)
評価時間	48 時間	24 時間	(北半球領域と同じ)
摂動の大きさの評価 (ノルム)	湿潤トータルエネルギー		
初期摂動の振幅	モデル第 15 層 (約 500 hPa) の気温の二乗平均平方根が 0.23 K	モデル第 6 層 (約 850 hPa) の気温の二乗平均平方根が 0.20 K	(北半球領域と同じ)
SV から初期摂動を合成する手法	バリエーションミニマム法		
利用する SV の数	最大 50 個	最大 35 個	(北半球領域と同じ)

¹⁰ T は三角形波数切断を、Q は二次格子を、数字は切断波数をそれぞれ表す。

¹¹ 全球速報解析で LETKF 用に計算された 6 時間予報のアンサンブルを使用している。

4.1.3 メソ数値予報システム（メソモデル (MSM) ・メソ解析 (MA))

数値予報モデル	
水平分解能と計算領域	格子間隔：5 km、計算領域：東西 4,080 km × 南北 3,300 km
鉛直層数	96 層（最上層 37.5 km）
初期時刻	00, 03, 06, 09, 12, 15, 18, 21UTC
予報時間	78 時間（初期時刻：00, 12UTC）, 39 時間（初期時刻：03, 06, 09, 15, 18, 21UTC）
境界値	
地中温度	予測する（初期値の地表面および地中の第 1 層から第 6 層は解析値、第 7, 8 層は気候値）
土壌水分	体積含水率を予測する（初期値は解析値 ² ）
積雪被覆	旧全球積雪深解析 ¹² （日本域以外）及び観測で修正したオフライン陸面モデル（日本域）の被覆分布に固定
海面水温	北西太平洋高解像度海面水温解析値（海洋気象情報室作成：0.1° 格子）を初期値とし、1 次元海洋混合層モデルにて予測
海氷分布	北半球海氷解析値（海洋気象情報室作成：0.1° 格子）に固定
側面境界	全球モデル予報値 ¹³
解析（データ同化）システム	
データ同化手法	4 次元変分法
水平分解能	アウターモデル ³ の水平格子間隔：5 km インナーモデル ³ の水平格子間隔：15 km
鉛直層数	アウターモデル 96 層＋地上 ⁴ インナーモデル 48 層＋地上 ⁴
解析時刻	00, 03, 06, 09, 12, 15, 18, 21UTC
同化ウィンドウ	各解析時刻の 3 時間前から解析時刻まで
観測の待ち受け時間	50 分
利用する主な観測（観測データもしくは算出データ）	ラジオゾンデ（気圧、気温、湿度、風）、ウィンドプロファイラ（風）、航空機（気温、風）、地上（気圧 ⁴ 、積雪深）、船舶・ブイ（気圧 ⁴ ）、アメダス（積雪深）、地上 GNSS・船舶 GNSS（可降水量）、空港気象レーダー（ドップラー速度）、気象レーダー（解析雨量、ドップラー速度、反射強度 ¹⁴ ）、衛星可視赤外イメージャ（大気追跡風）、衛星マイクロ波散乱計（海上風）、衛星マイクロ波サウンダ（輝度温度）、衛星マイクロ波イメージャ（降水強度、輝度温度）、静止衛星赤外イメージャ（輝度温度）、衛星二周波降水レーダー（反射強度 ¹⁴ ）、衛星 GNSS 掩蔽（屈折率）
台風ボーガス	疑似観測値（海面更正気圧、風）を利用

¹² 令和 2 年度数値予報解説資料集「4.1.1 全球数値予報システム（全球モデル (GSM) ・全球解析 (GA) ・全球積雪解析)」、及び中村 (2009) を参照。

¹³ 例えば、初期時刻 00UTC の全球モデル予報値を初期時刻 03, 06UTC のメソモデルの側面境界値として利用する。

¹⁴ 反射強度から相対湿度プロファイルを推定して、相対湿度として同化している。

4.1.4 メソアンサンブル予報システム (MEPS)

数値予報モデル	
水平分解能と計算領域	格子間隔：5 km、計算領域：東西 4,080 km × 南北 3,300 km
鉛直層数	96 層（最上層 37.5 km）
初期時刻	00, 06, 12, 18 UTC
予報時間	39 時間
メンバー数	21 メンバー（20 摂動ラン + コントロールラン）
初期値および摂動作成手法	
初期値	メソ解析値
初期摂動作成手法	特異ベクトル (SV) 法：水平格子間隔 40 km のメソ SV (MSV40) + 水平格子間隔 80 km のメソ SV (MSV80) + 全球モデルに基づく全球 SV (GSV)
モデルアンサンブル手法	なし
側面境界摂動作成手法	SV 法 (GSV)
下部境界摂動作成手法	なし
SV 計算の詳細	
SV 計算の対象領域	MSV: 125° E-145° E, 25° N-45° N において 925 hPa の渦度によりターゲット域を動的に変更 (35° N 以南、130° E 以東の格子点において、MSV40 では 925 hPa の渦度が $10 [10^{-6} s^{-1}]$ 以下、MSV80 では渦度が $0 [10^{-6} s^{-1}]$ 以下の領域を対象領域から除外)、GSV: 120° E-170° E, 25° N-45° N
接線形・随伴モデルの分解能	MSV40: 水平格子間隔 40 km, 鉛直層数 38, MSV80: 水平格子間隔 80 km, 鉛直層数 38, GSV: 全球アンサンブル予報システム (GEPS) と同じ
評価時間	MSV40: 6 時間、MSV80: 15 時間、GSV: 45 時間
摂動の大きさの評価 (ノルム)	MSV: 湿潤トータルエネルギー, GSV: 乾燥トータルエネルギー
初期摂動の振幅	SV の絶対値の領域平均が基準値 (南北風・東西風 1.8 m/s, 温位 0.7 K, 水蒸気 0.001 kg/kg となるように倍率を定めた後、上限値 (南北風・東西風 5.4 m/s, 温位 3.6 K, 水蒸気 0.0054 kg/kg) により倍率を修正
SV から初期摂動を合成する手法	バリエアンスミニマム法
利用する SV の数	MSV40: 10, MSV80: 10, GSV: 20

4.1.5 局地数値予報システム（局地モデル (LFM) ・ 局地解析 (LA)）

数値予報モデル	
水平分解能と計算領域	格子間隔：2 km、計算領域：東西 3,160 km × 南北 2,600 km
鉛直層数	76 層（最上層 21.8 km）
初期時刻	毎正時
予報時間	10 時間
境界値	
地中温度	予測する（初期値は解析値 ² ）
土壌水分	体積含水率を予測する（初期値は解析値）
積雪被覆	メソモデルで利用している積雪被覆の内挿値に固定
海面水温	北西太平洋高解像度海面水温解析値（海洋気象情報室作成：0.1° 格子）に固定
海氷分布	北半球海氷解析値（海洋気象情報室作成：0.1° 格子）に固定
側面境界	メソモデル予報値 ¹⁵
解析（データ同化）システム	
データ同化手法	ハイブリッド 3 次元変分法 ¹⁶
水平分解能	格子間隔：5 km
鉛直層数	48 層（最上層 21.8 km）＋地上
解析時刻	毎正時
同化ウィンドウ	各解析時刻の 3 時間前から解析時刻まで
観測の待ち受け時間	30 分
利用する主な観測（観測データもしくは算出データ）	ラジオゾンデ（気圧、気温、湿度、風）、wind profiler（風）、航空機（気温、風）、地上（気圧、湿度）、船舶・ブイ（気圧）、アメダス（気温、風）、地上 GNSS（可降水量）、空港気象レーダー（ドップラー速度）、気象レーダー（ドップラー速度、反射強度 ¹⁴ ）、衛星可視赤外イメージャ（大気追跡風）、衛星マイクロ波散乱計（土壌水分）、衛星マイクロ波サウンダ（輝度温度）、衛星マイクロ波イメージャ（輝度温度、土壌水分）、静止衛星赤外イメージャ（輝度温度）
台風ボーガス	利用しない

¹⁵ 局地モデル実行開始時の最新のメソモデル予報値を側面境界値として利用する。初期時刻、日々の計算時間によって変動するものの、通常、局地モデル初期時刻の 1～4 時間前を初期時刻とするメソモデル予報値を利用する。

¹⁶ 解析時刻の 3 時間前を、メソモデル予報値を第一推定値として 3 次元変分法により解析する。その後、その解析値からの 1 時間予報値を推定値として 3 次元変分法により解析する。これを 3 回繰り返す。3 次元変分法の背景誤差には、メソモデルから作成された気候学的な値とメソアンサンブル予報システムの予報値から求めた気象場に応じた値を混ぜて用いる。なお、第一推定値として用いるメソモデル予報値は、通常 FT=0, 1, 2 を利用する。例えば、初期時刻 00UTC のメソモデル予報値を、FT=0 は 03UTC の、FT=1 は 04UTC の、FT=2 は 05UTC の局地解析の第一推定値にそれぞれ利用する。

¹⁷ メソモデル予報値を第一推定値として、3 次元変分法により解析する。なお、第一推定値として用いるメソモデル予報値は、通常 FT=2, 3, 4 を利用する。例えば、初期時刻 00UTC のメソモデル予報値を FT=2 は 02UTC の、FT=3 は 03UTC の、FT=4 は 04UTC の毎時大気解析の第一推定値としてそれぞれ利用する。

¹⁸ 地上と上空を独立に解析した後、境界層内については地上と上空の修正量の線形結合をとり、これを修正量とする。

¹⁹ 特にアメダス観測については、解析値を観測値に強く寄せる設定を用いている。また、海岸付近のアメダス観測の強い影響が海上に及ばないよう、解析を実行した後にフィルタを適用している。

4.1.6 毎時大気解析

解析（データ同化）システム	
データ同化手法	3次元変分法 ¹⁷
水平分解能と計算領域	格子間隔：5 km、計算領域：東西 3,600 km × 南北 2,880 km
鉛直層数	48層（最上層 21.8 km）+地上 ¹⁸
解析時刻	毎正時
観測の待ち受け時間	18分
利用する主な観測（観測データもしくは算出データ）	ウィンドプロファイラ（風）、航空機（気温、風）、アメダス ¹⁹ （気温、風）、空港気象レーダー（ドップラー速度）、気象レーダー（ドップラー速度）、衛星可視赤外イメージャ（大気追跡風）
台風ボース	利用しない
備考	出力要素：風、気温

4.1.7 季節アンサンブル予報システム（季節 EPS）

数値予報モデル	
水平分解能	大気: TL319 ¹ （格子間隔約 55 km : 0.5625°） 海洋: 格子間隔約 25 km : 0.25° × 0.25°
鉛直層数	大気: 100層（最上層 0.01 hPa） 海洋: 60層
初期時刻	00UTC
予報時間	240日間
モデル領域	全球
メンバー数	5メンバー（4摂動ラン+コントロールラン）
初期値および摂動作成手法	
初期値	大気: JRA-3Q（遅延解析）、全球速報解析（速報解析） 陸面: オフライン地表面解析値 海洋: MOVE/MRI.COM-G3 (Global version 3) 4D-Var 海氷: MOVE/MRI.COM-G3 (Global version 3) 3D-Var
初期摂動作成手法	大気: 熱帯・北半球・南半球 成長モード育成 (BGM) 法 海洋: 海洋解析誤差摂動
モデルアンサンブル手法	確率的物理過程強制法

4.1.8 波浪モデル（全球・沿岸）

モデル名称	全球波浪モデル (GWM)	沿岸波浪モデル (CWM)
モデル種類	第三代波浪モデル MRI-III	
モデル領域	極域を除く全球 75°N - 75°S 0°E - 180° - 0°W	日本近海 50°N - 20°N 120°E - 150°E
水平分解能（格子点数）	0.5° × 0.5° (720 × 301)	0.05° × 0.05° (601 × 601)
タイムステップ (移流項) (ソース項)	10 分 30 分	1 分 3 分
初期時刻	00,06,12,18UTC	
予測期間 (00UTC, 06UTC, 18UTC) (12UTC)	132 時間 264 時間	132 時間 132 時間
周波数成分	900 成分 25 周波数 (0.0375 ~ 0.3 Hz、対数分割) 36 方位	
初期値	最適内挿法による解析	
側面境界値	-	全球波浪モデル
大気外力	GSM 台風周辺では藤田の式に基づく台風ボーガスを使用	
浅海効果	屈折、海底摩擦を考慮	

4.1.9 波浪アンサンブル予報システム

モデル名称	波浪アンサンブル予報システム
モデル種類	第三代波浪モデル MRI-III
モデル領域	極域を除く全球 75°N - 75°S 0°E - 180° - 0°W
水平分解能（格子点数）	0.5° × 0.5° (720 × 301)
タイムステップ (移流項) (ソース項)	10 分 30 分
初期時刻	00,12UTC
予測期間	264 時間
周波数成分	900 成分 25 周波数 (0.0375 ~ 0.3 Hz、対数分割) 36 方位
アンサンブルメンバー数	51 メンバー
初期値	最適内挿法による解析
大気外力	GEPS
浅海効果	屈折、海底摩擦を考慮

4.1.10 高潮モデル（日本域高潮モデル・日本域台風時高潮確率予報システム・アジア域高潮アンサンブル予報システム）

モデル名称	日本域高潮モデル	日本域台風時高潮確率予報システム ²⁰
支配方程式	二次元浅水長波方程式	
離散化手法	有限差分法	
格子	スタaggerド格子 (Arakawa-C)	
モデル領域	20°N - 50°N, 117.4°E - 150°E	
水平分解能	約 1, 2, 4, 8, 16 km (アダプティブメッシュにつき可変)	
タイムステップ	4 秒	
初期時刻	00, 03, 06, 09, 12, 15, 18, 21UTC	
予報時間	78 時間 (00, 12UTC) ²¹ 39 時間 (03, 06, 09, 15, 18, 21UTC)	132 時間 (00, 06, 12, 18UTC) 39 時間 (03, 09, 15, 21UTC)
メンバー数	台風時: 6 通り (MSM + 台風ボーガス 5) 非台風時: 1 通り (MSM のみ)	21 通り (気象庁の台風発表予報の進路 + この進路を中心として進行方向に直交する方向に左右にそれぞれ 10 メンバー)

モデル名称	アジア域高潮アンサンブル予報システム	
支配方程式	二次元浅水長波方程式	
離散化手法	有限体積法	
格子	スタaggerド格子 (Arakawa-B)	
モデル領域	0° - 50°N, 95°E - 180°E	
水平分解能	約 1.5 km～約 50 km	
タイムステップ	4 秒	
初期時刻	00, 06, 12, 18UTC	
予報時間	132 時間	
メンバー数	台風時: 52 通り (GSM + GEPS51 メンバー) 非台風時: 1 通り (GSM のみ)	
大気外力	GSM, GEPS 台風周辺では藤田の式に基づく台風ボーガスを使用	

²⁰ 非台風時には動作しない

²¹ 一部試験運用中で、今後正式運用となる見込み

4.1.11 日本沿岸海況監視予測システム

モデル名称	日本沿岸海況監視予測システム（解析）
支配方程式	プリミティブ方程式（自由表面あり）
離散化手法	有限差分法（水平方向、鉛直方向）
モデル領域	GLB ²² ：全球 NPR ²² ：15°S - 63°N, 99°E - 75°W
ネスティング	GLB：なし NPR：GLBからの単方向オフラインネスティング
水平分解能	GLB: 東西 1° × 南北 0.3 - 0.5° NPR: 東西 1/11° × 南北 1/10°（日本周辺。他領域では粗い格子を使用）
鉛直層	60 (GLB は海底境界層 1 層を追加)
格子点数	GLB: 364 × 366 × 61 = 8, 126, 664 NPR: 1334 × 578 × 60 = 46, 263, 120
移流スキーム	QUICK
鉛直混合スキーム	GLS
海氷モデル	5 カテゴリ海氷モデル 熱力学過程 力学過程
大気外力	熱フラックス、降水量、海上風、海面気圧、気温、湿度 遅延解析: JRA-3Q 速報解析: GSM
河川水流入	JRA55-do (Tsujino et al. 2018) 気候値
データ同化手法	GLB: 3D-Var（データ同化ウィンドウ 5 日） NPR: 4D-Var（データ同化ウィンドウ 10 日）
解析変数	水温、塩分（2000 m 以浅）
海氷同化手法	ナッジング
同化に使用する観測データ	現場観測水温・塩分 衛星海面高度計観測 (Jason-3, Cryosat-2, Saral) 海面水温 (MGDSST)、海氷密接度 (マイクロ波放射計)

²² GLB: 全球モデル、NPR: 北太平洋モデル

モデル名称	日本沿岸海況監視予測システム（予報）
支配方程式	プリミティブ方程式（自由表面あり）
離散化手法	有限差分法（水平方向、鉛直方向）
Model domain	GLB: 全球 NP ²³ : 15°S – 63°N, 99°E – 75°W JPN ²³ : 20° – 52°N, 117° – 160°E
ネスティング	GLB-NP 双方向オンラインネスティング JPN: NP からの単方向オフラインネスティング
水平分解能	GLB: 東西 1° × 南北 0.3 - 0.5° NP: 東西 1/11° × 南北 1/10° JPN: 東西 1/33° × 南北 1/50°
鉛直層	60 (GLB は海底境界層 1 層を追加)
格子点数	GLB: 364 × 366 × 61 = 8, 126, 664 NP: 2049 × 784 × 60 = 96, 384, 960 JPN: 1423 × 1604 × 60 = 136, 949, 520
移流スキーム	Second-Order Moment
鉛直混合スキーム	GLS
海氷モデル	5 カテゴリ海氷モデル 熱力学過程 力学過程
潮汐力	主要 8 分潮
大気外力	熱フラックス、降水量、海上風、海面気圧、気温、湿度 11 日予報: GSM 12-31 日予報: GEPS・JRA-55 気候値
河川水流入	JRA55-do 気候値
初期値化	GLB-3DVAR、NPR-4DVAR 解析結果を IAU にて同化 (IAU 期間: 3 日)
海氷初期化	GLB, NP: マイクロ波放射計に基づく海氷解析にナッジング JPN: 気象庁海氷速報解析にナッジング
予測期間	GLB, NP: 31 日 JPN: 11 日

²³ NP: 北太平洋モデル、JPN: 日本近海モデル

4.1.12 黄砂解析予測システム（全球エーロゾルモデル）

モデル名称	全球エーロゾルモデル
力学フレーム	全球スペクトルモデル
気象モデル	MRI-AGCM3(GSMUV)
水平分解能	TL479（格子間隔約 40km : 0.375°）
鉛直総数	40 層（最上層 0.4hPa）
予報時間	96 時間（初期時刻：12UTC）
気象場のナッジング	全球解析値及び全球予報値（u, v, T）
エーロゾルモデル	MASINGAR mk-2 rev.3
予測エーロゾル変数	10 種類の粒径の球状石英（0.2~20 μ m）、10 種類の粒径の海塩（0.2~20 μ m）、硫酸塩、黒色炭素、有機炭素
黄砂発生過程	粒径、植生、地表面状態（土壌水分、積雪）、地上風速に依存する
沈着過程	重力落下（乾性沈着）、雲粒に吸収・降水による除去（湿性沈着）
黄砂解析システム	
エーロゾル同化手法	2DVAR
利用する観測（観測データ）	ひまわり 8 号・9 号（光学的厚さ）

4.1.13 紫外線予測システム（全球化学輸送モデル）

モデル名称	全球化学輸送モデル
力学フレーム	全球スペクトルモデル
気象モデル	MRI-AGCM3(GSMUV)
水平分解能	TL159（格子間隔約 110km : 1.1°）
鉛直総数	64 層（最上層 0.01hPa）
予報時間	120 時間（初期時刻：12UTC）
気象場のナッジング	全球解析値及び全球予報値（u, v）
化学モデル	MRI-CCM2
取り扱う大気微量成分	オゾン及び関連化学種
化学過程	光解離反応、気相反応、不均一反応
オゾン解析システム	
オゾン同化手法	ナッジング
利用する観測（観測データ）	衛星観測（オゾン全量）

4.1.14 大気汚染気象予測システム（領域化学輸送モデル）

モデル名称	領域化学輸送モデル	高解像度版領域化学輸送モデル
力学フレーム	非静力学モデル	
気象モデル	JMA-NHM	asuca
モデル領域	東アジア域	日本域
水平分解能	20km	5km
鉛直層数	18 層（最上層 約 10km）	19 層（最上層 約 10km）
予報時間（初期時刻）	72 時間（12UTC）	51 時間（12UTC）
オゾン解析システム		
オゾン同化手法	ナッジング	
利用する観測（観測データ）	地上観測（オゾン濃度）	

4.1.15 二酸化炭素解析システム（二酸化炭素輸送モデル）

モデル名称	二酸化炭素輸送モデル（GSAM-TM）
力学フレーム	全球スペクトルモデル
水平分解能	TL159（格子間隔約 110km : 1.1°） ¹
鉛直層数	60 層（最上層 0.1hPa）
気象場のナッジング	JRA-55 (u, v)
二酸化炭素同化手法	ベイズ統合逆解析
利用する観測（観測データ）	地上観測、船舶観測、航空機観測（二酸化炭素濃度）

4.1.16 数値予報モデル（全球モデル、メソモデル、局地モデル）の鉛直層と対応する気圧

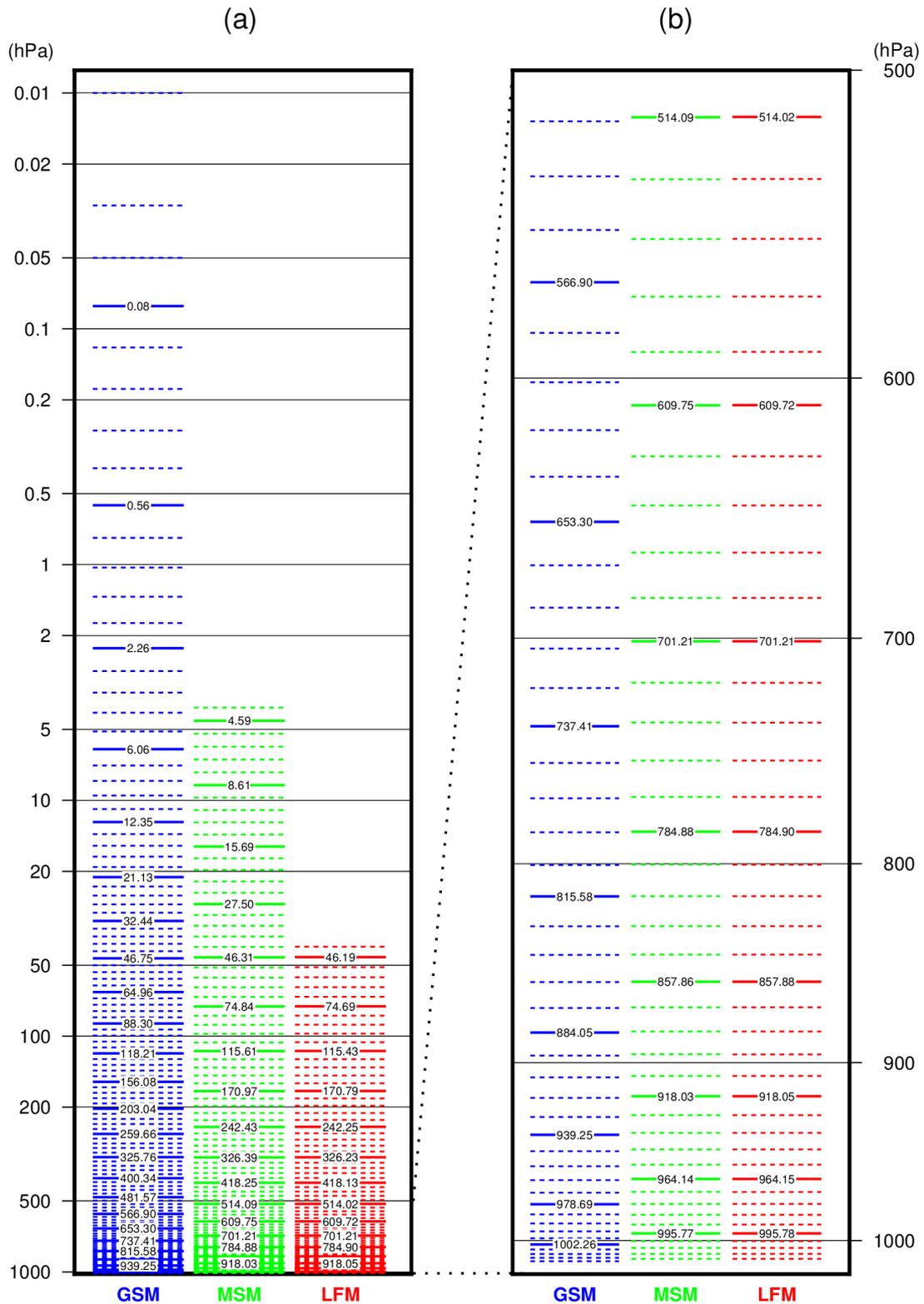


図 4.1.1 数値予報モデルの鉛直層（全球モデル GSM 128 層、メソモデル MSM 96 層、局地モデル LFM 76 層）と対応する気圧。縦軸は気圧 (hPa)。図中の値は、標準大気を仮定した場合の数値予報モデルの鉛直層と気圧であり、気圧の値は 5 層刻みで表示。(a) GSM, MSM, LFM について最下層気圧から 0.01 hPa までを示した図、(b) 最下層気圧から 500 hPa までを拡大した図。GSM は下部境界の気圧を参照する σ - p ハイブリッド座標での気圧の値を示しており、MSM, LFM は幾何高度を参照するハイブリッド座標で下部境界が 0 m (平均海面) の場合の幾何高度を気圧に変換した値を示している。全球アンサンブル予報システムと GSM、メソアンサンブル予報システムと MSM は、それぞれ同じ鉛直層を使用している。

表 4.1.1 全球モデル GSM の鉛直 128 層と対応する気圧と高度。標準大気を仮定した場合の鉛直層と気圧、高度を表示。

層番号	気圧 (hPa)	高度 (m)	層番号	気圧	高度	層番号	気圧	高度	層番号	気圧	高度
128	0.01	79302.24	96	29.96	23857.17	64	213.58	11367.28	32	704.27	2964.22
127	0.03	73368.19	95	32.44	23344.16	63	224.52	11050.66	31	720.94	2779.67
126	0.05	70062.03	94	35.04	22848.30	62	235.84	10737.16	30	737.41	2600.76
125	0.08	66860.46	93	37.77	22367.82	61	247.56	10425.91	29	753.64	2427.57
124	0.12	63759.47	92	40.62	21901.12	60	259.66	10116.69	28	769.60	2260.14
123	0.18	60764.72	91	43.61	21446.78	59	272.14	9809.69	27	785.26	2098.54
122	0.27	57880.41	90	46.75	21003.52	58	285.00	9505.12	26	800.60	1942.83
121	0.39	55109.34	89	50.05	20570.23	57	298.23	9203.19	25	815.58	1793.08
120	0.56	52453.05	88	53.50	20145.91	56	311.82	8904.09	24	830.17	1649.34
119	0.77	49918.09	87	57.13	19729.08	55	325.76	8608.01	23	844.34	1511.67
118	1.03	47547.84	86	60.95	19319.29	54	340.05	8315.14	22	858.07	1380.13
117	1.37	45354.02	85	64.96	18915.42	53	354.66	8025.64	21	871.31	1254.79
116	1.77	43354.76	84	69.17	18516.92	52	369.59	7739.70	20	884.05	1135.68
115	2.26	41529.77	83	73.60	18123.33	51	384.82	7457.47	19	896.25	1022.86
114	2.83	39860.66	82	78.26	17734.28	50	400.34	7179.10	18	907.90	916.37
113	3.49	38331.13	81	83.15	17349.46	49	416.13	6904.73	17	918.96	816.22
112	4.25	36926.70	80	88.30	16968.60	48	432.16	6634.52	16	929.42	722.44
111	5.10	35634.51	79	93.71	16591.53	47	448.43	6368.60	15	939.25	635.02
110	6.06	34443.08	78	99.39	16218.09	46	464.91	6107.09	14	948.45	553.94
109	7.11	33342.13	77	105.36	15848.18	45	481.57	5850.13	13	956.99	479.16
108	8.27	32322.49	76	111.63	15481.74	44	498.40	5597.83	12	964.88	410.61
107	9.53	31373.82	75	118.21	15118.74	43	515.37	5350.28	11	972.11	348.19
106	10.89	30485.44	74	125.10	14759.18	42	532.46	5107.58	10	978.69	291.76
105	12.35	29650.90	73	132.33	14403.10	41	549.65	4869.82	9	984.61	241.17
104	13.91	28865.16	72	139.90	14050.53	40	566.90	4637.08	8	989.90	196.18
103	15.57	28123.61	71	147.81	13701.55	39	584.20	4409.44	7	994.59	156.53
102	17.32	27422.01	70	156.08	13356.25	38	601.52	4186.97	6	998.69	121.89
101	19.17	26756.51	69	164.72	13014.70	37	618.82	3969.73	5	1002.26	91.89
100	21.13	26123.57	68	173.73	12677.03	36	636.10	3757.79	4	1005.34	66.06
99	23.18	25519.97	67	183.11	12343.33	35	653.30	3551.21	3	1007.99	43.88
98	25.33	24942.77	66	192.88	12013.73	34	670.42	3350.05	2	1010.28	24.74
97	27.59	24389.31	65	203.04	11688.34	33	687.42	3154.37	1	1012.30	7.92

表 4.1.2 メソモデル MSM の鉛直 96 層、局地モデル LFM の鉛直 76 層と対応する気圧と高度。標準大気を仮定した場合の鉛直層と気圧、高度を表示。

層番号	MSM		LFM		層番号	MSM		LFM	
	気圧 (hPa)	高度 (m)	気圧 (hPa)	高度 (m)		気圧 (hPa)	高度 (m)	気圧 (hPa)	高度 (m)
96	4.04	37500.00			48	362.39	7886.52	362.25	7889.19
95	4.59	36584.14			47	380.80	7540.48	380.67	7542.90
94	5.21	35682.59			46	399.43	7203.77	399.30	7205.95
93	5.92	34795.25			45	418.25	6876.28	418.13	6878.24
92	6.71	33922.02			44	437.23	6557.91	437.12	6559.65
91	7.60	33062.79			43	456.34	6248.56	456.24	6250.10
90	8.61	32217.45			42	475.54	5948.11	475.45	5949.47
89	9.74	31385.91			41	494.80	5656.47	494.72	5657.66
88	11.00	30568.05			40	514.09	5373.54	514.02	5374.57
87	12.40	29763.78			39	533.37	5099.20	533.31	5100.08
86	13.96	28973.00			38	552.61	4833.36	552.55	4834.10
85	15.69	28195.59			37	571.77	4575.91	571.73	4576.53
84	17.61	27431.45			36	590.83	4326.75	590.79	4327.25
83	19.73	26680.49			35	609.75	4085.77	609.72	4086.17
82	22.08	25942.59			34	628.50	3852.88	628.48	3853.17
81	24.66	25217.65			33	647.06	3627.95	647.04	3628.16
80	27.50	24505.57			32	665.38	3410.90	665.36	3411.03
79	30.62	23806.24			31	683.44	3201.62	683.43	3201.68
78	34.03	23119.57			30	701.21	3000.00	701.21	3000.00
77	37.77	22445.44			29	718.67	2805.94	718.68	2805.89
76	41.86	21783.75	41.75	21801.00	28	735.80	2619.34	735.81	2619.24
75	46.31	21134.41	46.19	21150.83	27	752.55	2440.09	752.57	2439.95
74	51.15	20497.29	51.03	20512.93	26	768.92	2268.09	768.94	2267.92
73	56.41	19872.31	56.28	19887.18	25	784.88	2103.23	784.90	2103.03
72	62.10	19259.36	61.96	19273.48	24	800.41	1945.42	800.44	1945.20
71	68.23	18658.33	68.09	18671.73	23	815.49	1794.54	815.52	1794.30
70	74.84	18069.12	74.69	18081.83	22	830.11	1650.49	830.13	1650.25
69	81.93	17491.62	81.78	17503.66	21	844.23	1513.18	844.26	1512.93
68	89.53	16925.74	89.37	16937.13	20	857.86	1382.48	857.88	1382.23
67	97.67	16371.36	97.50	16382.12	19	870.97	1258.31	870.99	1258.07
66	106.35	15828.39	106.18	15838.55	18	883.55	1140.56	883.58	1140.32
65	115.61	15296.72	115.43	15306.29	17	895.59	1029.12	895.62	1028.89
64	125.45	14776.24	125.27	14785.26	16	907.09	923.90	907.11	923.67
63	135.89	14266.86	135.71	14275.33	15	918.03	824.77	918.05	824.57
62	146.95	13768.46	146.77	13776.42	14	928.40	731.65	928.42	731.46
61	158.64	13280.95	158.45	13288.41	13	938.20	644.43	938.22	644.25
60	170.97	12804.22	170.79	12811.20	12	947.42	563.00	947.44	562.84
59	183.96	12338.16	183.77	12344.69	11	956.07	487.26	956.09	487.13
58	197.60	11882.68	197.41	11888.77	10	964.14	417.11	964.15	416.99
57	211.91	11437.67	211.72	11443.34	9	971.62	352.44	971.63	352.34
56	226.89	11003.02	226.71	11008.29	8	978.53	293.15	978.54	293.07
55	242.43	10578.64	242.25	10583.52	7	984.85	239.14	984.86	239.07
54	258.42	10164.41	258.24	10168.92	6	990.60	190.29	990.60	190.25
53	274.84	9760.23	274.66	9764.40	5	995.77	146.52	995.78	146.48
52	291.66	9366.00	291.49	9369.84	4	1000.38	107.70	1000.38	107.68
51	308.85	8981.62	308.69	8985.15	3	1004.42	73.75	1004.42	73.74
50	326.39	8606.99	326.23	8610.21	2	1007.91	44.55	1007.91	44.54
49	344.25	8241.98	344.10	8244.92	1	1010.85	20.00	1010.85	20.00

4.1.17 数値予報モデル（全球モデル、メソモデル、局地モデル）の陸面過程における地表面からの土壌の深さ

表 4.1.3 数値予報モデル（全球モデル、メソモデル、局地モデル）の陸面過程における地表面からの土壌の深さ（m）。全球アンサンブル予報システムと全球モデル、メソアンサンブル予報システムとメソモデルは、それぞれ同じ土壌層を使用している。

	GSM	MSM	LFM
地表層	—	0.0025	0.0025
第1層	0.010	0.0085	0.0085
第2層	0.045	0.0173	0.0173
第3層	0.130	0.0309	0.0309
第4層	0.340	0.0536	0.0536
第5層	0.740	0.0936	0.0936
第6層	1.490	0.1681	0.1681
第7層	2.740	0.3146	0.3146
第8層	—	0.6076	0.6076

参考文献

- Hamrud, M., M. Bonavita, and L. Isaksen, 2015: EnKF and hybrid gain ensemble data assimilation. Part I: EnKF implementation. *Mon. Wea. Rev.*, **143**, 4847–4864.
- Tsujino, H., S. Urakawa, H. Nakano, R. J. Small, W. M. Kim, S. G. Yeager, G. Danabasoglu, T. Suzuki, J. L. Bamber, M. Bentsen, C. W. Boning, A. Bozec, E. P. Chassignet, E. Curchitser, F. B. Dias, P. J. Durack, S. M. Griffies, Y. Harada, M. Ilicak, S. A. Josey, C. Kobayashi, S. Kobayashi, Y. Komuro, W. G. Large, J. Le Sommer, S. J. Marsland, S. Masina, M. Scheinert, H. Tomita, M. Valdivieso, and D. Yamazaki, 2018: JRA-55 based surface dataset for driving ocean-sea-ice models (JRA55-do). *Ocean Modelling*, **130**.
- 中村 貴, 2009: 全球積雪解析. 数値予報課報告・別冊第 55 号, 気象庁予報部, 11-14.

4.2 ガイドンスの概要一覧表

4.2.1 降水ガイドンス

平均降水量ガイドンス (MRR) ¹	
作成対象	GSM : 20 km 格子 MSM, MEPS : 5 km 格子
作成方法	カルマンフィルタによる予測降水量を頻度バイアス補正後、降水確率 (PoP) で補正。
作成対象とするモデル	GSM, MSM, MEPS (MEPS は各メンバー)
予報対象時間単位	3 時間
予報期間と間隔	GSM : FT=6 から FT=84 まで 3 時間間隔 MSM : FT=3 から FT=39 (00, 12 UTC 初期値は 78) まで 3 時間間隔 MEPS : FT=3 から FT=39 まで 3 時間間隔
逐次学習の有無	あり
説明変数	モデル予測値 (NW85, NE85, SSI, PCWV, QWX, EHQ, OGES, DXQV, FRR) ²
目的変数	解析雨量 (1 km 格子) とアメダスの降水量から算出した 20 km (MSM, MEPS は 5 km) 格子内の平均降水量
層別化処理の対象	格子毎、初期時刻、予報時間 (6 時間区切り)
備考	頻度バイアス補正の閾値に 0.5, 1, 5, 10, 20, 30, 50, 80, 120 mm/3h を使用する (GSM の 11~4 月は 1, 3, 50, 80 mm/3h を使用する)。

¹ 詳細は数値予報課報告・別冊第 64 号第 4.2 節を参照のこと。

² 降水ガイドンスに使用する説明変数は以下のもの。

NW85 : 850 hPa の北西成分の風速

NE85 : 850 hPa の北東成分の風速

SSI : ショワルターの安定指数 (850~500 hPa)

PCWV : 可降水量 × 850 hPa の風速 × 850 hPa の鉛直速度

QWX : \sum (鉛直速度 × 比湿 × 湿度 × 層の厚さ)、 \sum は各層の和を示す (以下同じ)

EHQ : \sum (基準湿度からの超過分 × 比湿 × 湿潤層の厚さ)、湿潤層は基準湿度 (気温で変化) を超える層 (以下同じ)

OGES : 地形性上昇流 × 比湿 × 湿潤層の厚さ

DXQV : 冬型降水の指数 「風向別降水率 × 850 hPa の風速 × (海面と下層温位の飽和比湿差)」

FRR : モデル降水量予測値

RH85 : 850 hPa の相対湿度

NW50 : 500 hPa の北西成分の風速

NE50 : 500 hPa の北東成分の風速

ESHS : \sum (比湿 × 湿潤層の厚さ) / \sum 飽和比湿

HOCR : 地形性上昇流 × 相対湿度

CFRR : モデル降水量予測値の変換値 「 $FRR^2 / (FRR^2 + 2)$ 」

D850 : 850 hPa の風向

W850 : 850 hPa の風速

OGR : 地形性上昇流 × 比湿

10Q4 : 1000 hPa の比湿と 400 hPa の飽和比湿の差

DWL : 湿潤層の厚さ

降水確率ガイダンス (PoP) ¹	
作成対象	GSM : 20 km 格子 MSM : 5 km 格子
作成方法	カルマンフィルタ
作成対象とするモデル	GSM, MSM
予報対象時間単位	6 時間
予報期間と間隔	GSM : FT=9 から FT=81 まで 6 時間間隔 MSM : 00, 12 UTC 初期値 : FT=9 から FT=75 まで 6 時間間隔 03, 15 UTC 初期値 : FT=6 から FT=36 まで 6 時間間隔 06, 18 UTC 初期値 : FT=9 から FT=39 まで 6 時間間隔 09, 21 UTC 初期値 : FT=6 から FT=36 まで 6 時間間隔
逐次学習の有無	あり
説明変数	モデル予測値 (NW85, NE85, RH85, NW50, NE50, ESHS, HOGGR, DXQV, CFRR) ²
目的変数	解析雨量 (1 km 格子) とアメダスの降水量から算出した 20 km (MSM は 5 km) 格子内の降水の有無の平均 (実況降水面積率に同じ)
層別化処理の対象	格子毎、初期時刻、予報時間 (6 時間区切り)

最大降水量ガイダンス (RMAX) ¹	
作成対象	GSM : 20 km 格子 MSM, MEPS : 5 km 格子
作成方法	1, 3 時間最大降水量 : ニューラルネットワーク (3 層 : 中間層はロジスティック関数 ³ 、出力層は線形関数を使用) 24 時間最大降水量 : 線形重回帰
作成対象とするモデル	GSM, MSM, MEPS (MEPS は各メンバー)
予報対象時間単位	1, 3 時間最大降水量 : 3 時間、24 時間最大降水量 : 24 時間
予報期間と間隔	GSM : 1, 3 時間最大降水量 : FT=6 から FT=84 まで 3 時間間隔 24 時間最大降水量 : FT=27 から FT=84 まで 3 時間間隔 MSM : 1, 3 時間最大降水量 : FT=3 から FT=39 (00, 12 UTC 初期値は 78) まで 3 時間間隔 24 時間最大降水量 : FT=24 から FT=39 (00, 12 UTC 初期値は 78) まで 3 時間間隔 MEPS : 1, 3 時間最大降水量 : FT=3 から FT=39 まで 3 時間間隔 24 時間最大降水量 : FT=24 から FT=39 まで 3 時間間隔
逐次学習の有無	なし
説明変数	1, 3 時間最大降水量 : モデル予測値 (D850, W850, SSI, OGR, 10Q4, DWL) ² と 3 時間平均降水量。 24 時間最大降水量 : モデル予測値 (500 hPa の高度、500 hPa の温位、850 hPa の鉛直 P 速度、850 hPa の相当温位、SSI ² 、SSI(925~700 hPa)、500 hPa の渦度、500 m 高度の水蒸気フラックス、500 m 高度の相当温位、500 m 高度と 700 hPa の風速鉛直シア、地形性上昇流 (下層代表風と風向に応じた地形勾配の積) と下層比湿の積、可降水量、(EHQ, ESHS) ² 、等温位面渦位 (305, 345, 355 K) の上位主成分から 7 つ) 及び各予報対象時間単位の平均降水量ガイダンス。
目的変数	解析雨量 (1 km 格子) から算出した 20 km (MSM, MEPS は 5 km) 格子内の降水量の最大値。ただし、MSM, MEPS の 1, 3 時間最大降水量は、5 km 格子を中心とする 20 km 格子内の最大を目的変数としている。
層別化処理の対象	格子毎、平均降水量
備考	1, 3 時間最大降水量は、ニューラルネットで比率 (最大降水量/平均降水量) を予測し、平均降水量ガイダンス (MRR) に比率を掛けて最大降水量を予測する。 24 時間最大降水量は、各予報対象時間単位の平均降水量ガイダンス及びモデル予測値の主成分から線形重回帰式により最大降水量を予測する。

³ 入力を x とした時に、出力が $1/[1 + \exp(-wx)]$ の形で表される関数 (w は係数)。

大雨発生確率ガイダンス	
作成対象	MSM, MEPS : 5 km 格子
作成方法	ロジスティック回帰 ⁴
作成対象とするモデル	MSM, MEPS (MEPS は各メンバー)
予報対象時間単位	3 時間
予報期間と間隔	MSM : FT=3 から FT=39 (00, 12 UTC 初期値は 51) まで 1 時間間隔 MEPS : FT=3 から FT=39 まで 1 時間間隔
逐次学習の有無	なし
説明変数	モデル予測値 (3 時間降水量、500 m 高度の水蒸気フラックス、500 m 高度の相当温位、地形性上昇流 (下層代表風と風向に応じた地形勾配の積) と下層比湿の積、700 hPa の上昇流)
目的変数	各 5 km 格子を中心とした 11×11 (55 km 四方) の範囲の 3 時間降水量 ⁵ が閾値以上か否か
層別化処理の対象	初期時刻、予報時間、地域
備考	予測式は 5 つの地域別に作成する。 3 時間降水量の閾値は 100, 150 mm/3h である。

⁴ ロジスティック関数³を用いる。

⁵ 本ガイダンスにおける 3 時間降水量は、前 1 時間降水量にその前後の前 1 時間降水量を加えた値。

4.2.2 降雪ガイダンス

降雪量ガイダンス ⁶	
作成対象	5 km 格子
作成方法	平均降水量ガイダンスに雪水比をかけて算出する。雪水比は、ロジスティック関数による非線形回帰で決定した回帰式 ⁴ に、格子形式気温ガイダンスを入力して予測する。 1時間毎の降雪量（1時間に線形内挿した3時間平均降水量ガイダンス×1時間雪水比）を計算し、それを積算して3, 6, 12, 24時間降雪量を算出。
作成対象とするモデル	GSM, MSM, MEPS（MEPSは各メンバー）
予報対象時間単位	3, 6, 12, 24時間
予報期間と間隔	GSM： 3時間：FT=6からFT=84まで3時間間隔 6時間：FT=9からFT=84まで3時間間隔 12時間：FT=15からFT=84まで3時間間隔 24時間：FT=27からFT=84まで3時間間隔 MSM： 3時間：FT=3からFT=39（00, 12 UTC 初期値は78）まで3時間間隔 6時間：FT=6からFT=39（00, 12 UTC 初期値は78）まで3時間間隔 12時間：FT=12からFT=39（00, 12 UTC 初期値は78）まで3時間間隔 24時間：FT=24からFT=39（00, 12 UTC 初期値は78）まで3時間間隔 MEPS： 3時間：FT=3からFT=39まで3時間間隔 6時間：FT=6からFT=39まで3時間間隔 12時間：FT=12からFT=39まで3時間間隔 24時間：FT=24からFT=39まで3時間間隔
逐次学習の有無	なし（入力としている平均降水量ガイダンスはあり）
説明変数	平均降水量：4.2.1 降水ガイダンス参照 雪水比：格子形式気温ガイダンス
層別化処理の対象	雪水比：降水量
備考	雪水比は格子形式気温ガイダンス（4.2.3の備考欄を参照）を回帰式に入力して予測する。 1時間毎の降雪量（3時間平均降水量ガイダンスを3等分×1時間雪水比）を計算し、それを積算して3, 6, 12, 24時間降雪量を算出。 天気ガイダンス（降水種別）（4.2.5参照）が「雨」の場合または、格子形式気温ガイダンスの地上気温が2℃以上の場合には降雪量を0 cmとする。

⁶ 詳細は数値予報課報告・別冊第64号第4.3節を参照のこと。

4.2.3 気温ガイダンス

時系列気温ガイダンス ⁷	
作成対象	アメダス
作成方法	カルマンフィルタ
作成対象とするモデル	GSM, MSM, MEPS (MEPSは各メンバー)
予報対象時間	毎正時
予報期間と間隔	GSM : FT=3 から FT=84 まで 1 時間間隔 MSM : FT=1 から FT=39 (00, 12 UTC 初期値は 78) まで 1 時間間隔 MEPS : FT=1 から FT=39 まで 1 時間間隔
逐次学習の有無	あり
説明変数	モデル予測値 (地上の西・東・南・北風成分、地上風速、地上気温、中・下層雲量、気温減率、降水量、前日との気温差)
目的変数	アメダスで観測された毎正時の気温
層別化処理の対象	作成対象地点、初期時刻、予報時間、季節 (暖候期 (4~9 月)、寒候期 (10~3 月)) 暖・寒候期の係数切替前に 1 か月間の事前学習を行う。
備考	時系列気温ガイダンスを格子に分配して格子形式気温ガイダンスが作成され、降雪量ガイダンス (雪水比)、天気ガイダンス (降水種別) に利用される。

⁷ 詳細は数値予報課報告・別冊第 64 号第 4.4 節を参照のこと。

最高・最低気温ガイダンス ⁷																																																																																											
作成対象	アメダス																																																																																										
作成方法	カルマンフィルタ																																																																																										
作成対象とするモデル	GSM, MSM, MEPS (MEPS は各メンバー)																																																																																										
予報対象時間単位	9 時間 (最低気温 15~00 UTC、最高気温 00~09 UTC) 24 時間 (週間予報用の明後日の最高・最低気温)																																																																																										
予報期間 (対象要素)	<p>GSM :</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>初期値</th> <th>当日</th> <th>翌日</th> <th>翌々日</th> <th>3 日後</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>00 UTC</td> <td>最高</td> <td>最高・最低</td> <td>最高・最低</td> <td>最低</td> </tr> <tr> <td>06 UTC</td> <td></td> <td>最高・最低</td> <td>最高・最低</td> <td>最高・最低</td> </tr> <tr> <td>12 UTC</td> <td></td> <td>最高・最低</td> <td>最高・最低</td> <td>最高・最低</td> </tr> <tr> <td>18 UTC</td> <td>最高</td> <td>最高・最低</td> <td>最高・最低</td> <td>最低</td> </tr> </tbody> </table> <p>MSM :</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>初期値</th> <th>当日</th> <th>翌日</th> <th>翌々日</th> <th>3 日後</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>00 UTC</td> <td>最高</td> <td>最高・最低</td> <td>最高・最低</td> <td>最低</td> </tr> <tr> <td>03 UTC</td> <td></td> <td>最高・最低</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>06 UTC</td> <td></td> <td>最高・最低</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>09 UTC</td> <td></td> <td>最高・最低</td> <td>最低</td> <td></td> </tr> <tr> <td>12 UTC</td> <td></td> <td>最高・最低</td> <td>最高・最低</td> <td>最高・最低</td> </tr> <tr> <td>15 UTC</td> <td>最高</td> <td>最高・最低</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>18 UTC</td> <td>最高</td> <td>最高・最低</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>21 UTC</td> <td>最高</td> <td>最高・最低</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table> <p>MEPS :</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>初期値</th> <th>当日</th> <th>翌日</th> <th>翌々日</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>00 UTC</td> <td>最高</td> <td>最高・最低</td> <td></td> </tr> <tr> <td>06 UTC</td> <td></td> <td>最高・最低</td> <td></td> </tr> <tr> <td>12 UTC</td> <td></td> <td>最高・最低</td> <td>最低</td> </tr> <tr> <td>18 UTC</td> <td>最高</td> <td>最高・最低</td> <td></td> </tr> </tbody> </table> <p>「翌日」等は、日本時間で初期時刻から見た日付を示す。</p>	初期値	当日	翌日	翌々日	3 日後	00 UTC	最高	最高・最低	最高・最低	最低	06 UTC		最高・最低	最高・最低	最高・最低	12 UTC		最高・最低	最高・最低	最高・最低	18 UTC	最高	最高・最低	最高・最低	最低	初期値	当日	翌日	翌々日	3 日後	00 UTC	最高	最高・最低	最高・最低	最低	03 UTC		最高・最低			06 UTC		最高・最低			09 UTC		最高・最低	最低		12 UTC		最高・最低	最高・最低	最高・最低	15 UTC	最高	最高・最低			18 UTC	最高	最高・最低			21 UTC	最高	最高・最低			初期値	当日	翌日	翌々日	00 UTC	最高	最高・最低		06 UTC		最高・最低		12 UTC		最高・最低	最低	18 UTC	最高	最高・最低	
初期値	当日	翌日	翌々日	3 日後																																																																																							
00 UTC	最高	最高・最低	最高・最低	最低																																																																																							
06 UTC		最高・最低	最高・最低	最高・最低																																																																																							
12 UTC		最高・最低	最高・最低	最高・最低																																																																																							
18 UTC	最高	最高・最低	最高・最低	最低																																																																																							
初期値	当日	翌日	翌々日	3 日後																																																																																							
00 UTC	最高	最高・最低	最高・最低	最低																																																																																							
03 UTC		最高・最低																																																																																									
06 UTC		最高・最低																																																																																									
09 UTC		最高・最低	最低																																																																																								
12 UTC		最高・最低	最高・最低	最高・最低																																																																																							
15 UTC	最高	最高・最低																																																																																									
18 UTC	最高	最高・最低																																																																																									
21 UTC	最高	最高・最低																																																																																									
初期値	当日	翌日	翌々日																																																																																								
00 UTC	最高	最高・最低																																																																																									
06 UTC		最高・最低																																																																																									
12 UTC		最高・最低	最低																																																																																								
18 UTC	最高	最高・最低																																																																																									
逐次学習の有無	あり																																																																																										
説明変数	モデル予測値 (地上の西・東・南・北風成分、地上風速、地上気温、中・下層雲量、気温減率、降水量、前日との気温差)																																																																																										
目的変数	アメダスの気温観測 (1 分値) から算出した最高・最低気温 当日・翌日の、最高気温は 00~09 UTC の最高気温、最低気温は 15~00 UTC の最低気温。																																																																																										
層別化処理の対象	作成対象地点、初期時刻、季節 (暖候期 (4~9 月)、寒候期 (10~3 月))、予報対象要素 (最高気温、最低気温)、予報時間 (日単位) 暖・寒候期の係数切替前に 1 か月間の事前学習を行う。																																																																																										

4.2.4 風ガイダンス

定時風ガイダンス ⁸	
作成対象	アメダス
作成方法	カルマンフィルタによる予測に風速の頻度バイアス補正を行う。
作成対象とするモデル	GSM, MSM, MEPS (MEPSは各メンバー)
予報対象時間	3時間毎の正時(GSM)、毎正時(MSM, MEPS)
予報期間と間隔	GSM : FT=3 から FT=84 まで 3時間間隔 MSM : FT=1 から FT=39 (00, 12 UTC 初期値は 78) まで 1時間間隔 MEPS : FT=1 から FT=39 まで 1時間間隔
逐次学習の有無	あり
説明変数	モデル予測値 (地上風の東西・南北成分)
目的変数	実況とモデルの地上風の東西・南北成分との差 アメダスで観測された 1, 3 時間毎の正時の風の東西・南北成分
層別化処理の対象	作成対象地点、初期時刻、予報対象時刻 (1 時間毎 1 日分)、 風向 (4 方位 : 北東、南東、南西、北西)
備考	頻度バイアス補正の閾値はアメダスには 2.5, 5.5, 9.5, 13.0 m/s を使用。

最大風速ガイダンス ⁸	
作成対象	アメダス
作成方法	カルマンフィルタによる予測に風速の頻度バイアス補正を行う。
作成対象とするモデル	GSM, MSM, MEPS (MEPSは各メンバー)
予報対象時間単位	3時間
予報期間と間隔	GSM : FT=3 から FT=84 まで 3時間間隔 MSM : FT=3 から FT=39 (00, 12 UTC 初期値は 78) まで 3時間間隔 MEPS : FT=3 から FT=39 まで 3時間間隔
逐次学習の有無	あり
説明変数	モデル予測値 (地上風の東西・南北成分)
目的変数	実況とモデルの地上風の東西・南北成分との差 前 3 時間の最大風速時 (10 分毎の観測から算出) の風の東西・南北成分
層別化処理の対象	作成対象地点、初期時刻、予報対象時刻 (1 時間毎 1 日分)、 風向 (4 方位 : 北東、南東、南西、北西)
備考	頻度バイアス補正の閾値はアメダスには 3.0, 7.0, 11.0, 15.0 m/s を使用。

⁸ 詳細は数値予報課報告・別冊第 64 号第 4.5 節を参照のこと。

4.2.5 天気ガイダンス

天気ガイダンス ⁹	
作成対象	20 km 格子 (GSM) 、 5 km 格子 (MSM)
作成方法	日照率、降水量、降水種別から天気を判別。 天気を晴れ、曇り、雨、雨または雪、雪に判別。
作成対象とするモデル	GSM, MSM
予報対象時間単位	前 3 時間
予報期間と間隔	GSM : FT=6 から 84 まで 3 時間間隔 MSM : FT=3 から 39 (00, 12 UTC 初期値は 78) まで 3 時間間隔

⁹ 詳細は数値予報課報告・別冊第 64 号第 4.6 節を参照のこと。

4.2.6 発雷確率ガイダンス

発雷確率ガイダンス ¹⁰	
作成対象	GSM : 20 km 格子、MSM, MEPS (MEPS は各メンバー) : 5 km 格子 ¹¹
作成方法	ロジスティック回帰
予報対象時間単位	3 時間
予報期間と間隔	GSM : FT=6 から 84 まで 3 時間間隔、 MSM : FT=3 から 39 まで (00, 12 UTC 初期値は 78) の 3 時間間隔 MEPS : FT=3 から 39 まで 3 時間間隔
逐次学習の有無	なし
説明変数	下表に発雷確率ガイダンスの説明変数をまとめる。
目的変数	対象とする 20 km 格子を含む周囲 9 格子 (60 km 四方) における前 3 時間の発雷の有無。 LIDEN、飛行場観測、地上気象観測から作成する。
層別化処理の対象	地域、-10 °C 高度、予報時間、予報対象時刻。
備考	予測は LAF (過去初期値との重み付き平均) ありと LAF なしを作成する。

発雷確率ガイダンスの説明変数		
必須変数	FRR3	数値予報モデルの 3 時間降水量予測 [mm/3h]。log ₁₀ (1 + FRR3) と変換する。
	CAPE	対流有効位置エネルギー [J kg ⁻¹]。モデル地上面及び 925 hPa 面から持ち上げた CAPE のうち大きい方を選択。CAPE × 1/1000 と変換する。
	SSI	シヨワルターの安定指数。-10 °C 高度が 3 km 未満の場合には 925 hPa と 700 hPa の間で計算した SSI9 を用いる。
候補変数	ZM10	-10 °C 高度 [km] (大気の温度が -10 °C となる高度)。
	LLU	地上から 700 hPa の間の平均風の東西成分 [m/s]。-10 °C 高度が 3 km 以上のときは最大 15 m/s に制限する。
	LLV	地上から 700 hPa の間の平均風の南北成分 [m/s]。-10 °C 高度が 3 km 以上のときは最大 15 m/s に制限する。
	TPWR	気柱相対湿度。鉛直方向に飽和していると仮定した飽和可降水量に対する可降水量の比率。
	VOR5	500 hPa の渦度 [10 ⁻⁶ s ⁻¹]。最大 99×10 ⁻⁶ s ⁻¹ に制限する。
	LAPS	地上から 850 hPa の間の気温減率 [°C km ⁻¹]。
	DXQV	冬型の降水指数。風向別降水率 × 850 hPa の風速 [m/s] × 海面と下層温位の飽和比湿差 [g kg ⁻¹]。詳細は降水ガイダンス (4.2.1) を参照。
VSHR	850 hPa と 500 hPa の間の風ベクトル差の大きさ [m/s]	

¹⁰ 詳細は数値予報課報告・別冊第 64 号第 4.7 節を参照のこと。

¹¹ 予測値は 20 km 格子で作成し、20 km 格子内の 5 km 格子に同じ値を割り振る。

4.2.7 湿度ガイダンス

最小湿度ガイダンス ¹²																																																																					
作成対象	気象官署（特別地域気象観測所含む）																																																																				
作成方法	ニューラルネットワーク																																																																				
作成対象とするモデル	GSM, MSM																																																																				
予報対象時間単位	24 時間 (15~15 UTC)																																																																				
初期時刻と予報対象日	使用する数値予報モデルと予報対象日は以下のとおり。「翌日」等は、日本時間で初期時刻から見た日付を示す。																																																																				
	<table border="1"> <thead> <tr> <th>モデル</th> <th>初期時刻</th> <th>当日</th> <th>翌日</th> <th>2 日後</th> <th>3 日後</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="4">GSM</td> <td>00 UTC</td> <td></td> <td>○</td> <td>○</td> <td></td> </tr> <tr> <td>06 UTC</td> <td></td> <td>○</td> <td>○</td> <td>○</td> </tr> <tr> <td>12 UTC</td> <td></td> <td>○</td> <td>○</td> <td>○</td> </tr> <tr> <td>18 UTC</td> <td></td> <td>○</td> <td>○</td> <td></td> </tr> <tr> <td rowspan="8">MSM</td> <td>00 UTC</td> <td></td> <td>○</td> <td>○</td> <td></td> </tr> <tr> <td>03 UTC</td> <td></td> <td>○</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>06 UTC</td> <td></td> <td>○</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>09 UTC</td> <td></td> <td>○</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>12 UTC</td> <td></td> <td>○</td> <td>○</td> <td>○</td> </tr> <tr> <td>15 UTC</td> <td>○</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>18 UTC</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>21 UTC</td> <td></td> <td></td> <td>○</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	モデル	初期時刻	当日	翌日	2 日後	3 日後	GSM	00 UTC		○	○		06 UTC		○	○	○	12 UTC		○	○	○	18 UTC		○	○		MSM	00 UTC		○	○		03 UTC		○			06 UTC		○			09 UTC		○			12 UTC		○	○	○	15 UTC	○				18 UTC					21 UTC			○	
	モデル	初期時刻	当日	翌日	2 日後	3 日後																																																															
	GSM	00 UTC		○	○																																																																
		06 UTC		○	○	○																																																															
		12 UTC		○	○	○																																																															
		18 UTC		○	○																																																																
	MSM	00 UTC		○	○																																																																
		03 UTC		○																																																																	
		06 UTC		○																																																																	
		09 UTC		○																																																																	
		12 UTC		○	○	○																																																															
		15 UTC	○																																																																		
		18 UTC																																																																			
21 UTC				○																																																																	
逐次学習の有無	あり																																																																				
説明変数	予報対象日における 03, 12, 21 JST の地上気温、03, 12, 21 JST の 850 hPa の風速、 03, 12, 21 JST の 3 層 (1000, 925, 800 hPa) の平均相対湿度、 03, 12, 21 JST の 1000 hPa と 700 hPa の間の気温減率、地上最高気温、 地上と 925 hPa の日最高気温出現時の比湿、地上最小比湿、地上最小湿度、 各層（地上、1000, 925, 850, 700, 500 hPa）の日平均相対湿度																																																																				
目的変数	観測された日最小湿度（1 分値から算出）																																																																				
層別化処理の対象	作成対象地点、季節（暖候期（4~10 月）、寒候期（11~3 月））																																																																				

¹² 詳細は数値予報課報告・別冊第 64 号第 4.8 節を参照のこと。

4.2.8 視程ガイダンス

視程ガイダンス（格子形式、MSM） ¹³	
作成対象	5 km 格子（等緯度経度格子）
作成方法	消散係数による診断法 視程 VIS = $3 / (\sigma_p + \sigma_c + \sigma_r + \sigma_s)$ [km] $\sigma_p = 0.35 (1 - RH)^{-0.2}$: 浮遊塵の消散係数 $\sigma_c = \begin{cases} 8.0 \times QC^{0.9} : \text{雲の消散係数（無降水格子）} \\ 5.0 \times QC^{0.9} : \text{雲の消散係数（降水格子）} \end{cases}$ $\sigma_r = 0.47 \times RAIN^{0.5}$: 雨の消散係数 $\sigma_s = 8.0 \times SNOW^{0.7} + 0.07 \times FF$: 雪の消散係数
作成対象とするモデル	MSM
予報対象時間単位	3 時間
予報期間と間隔	FT=3 から FT=39（00, 12 UTC 初期値は 78）まで 3 時間間隔
逐次学習の有無	なし
説明変数	モデル予測値 QC : モデル面第 2~9 層の雲水量の和 [g/kg] RAIN : モデル内の前 1 時間降水量（雨）の予測 [mm/h] SNOW : モデル内の前 1 時間降水量（雪、霰、雲氷）の予測 [mm/h] RH : モデル面第 1 層の湿度 [%]。85%を上限。 FF : モデル面第 1 層の風速 [m/s]
目的変数	各格子の前 3 時間の最小視程
層別化処理の対象	なし
備考	MSM（ランベルト）とガイダンス（等緯度経度）の座標系の違いにより、南北端で一部欠損値が入る。

¹³ 詳細は数値予報課報告・別冊第 64 号第 4.9 節を参照のこと。

視程ガイドンス（格子形式、GSM） ¹³	
作成対象	20 km 格子（等緯度経度格子）、赤道～65 °N, 100～180 °E
作成方法	消散係数による診断法 視程 VIS = $3 / (\sigma_p + \sigma_c)$ [km] $\sigma_p = 0.162 (1 - RH)^{-0.5}$: 浮遊塵の消散係数 $\sigma_c = 100.0 \times CWC_1^{0.96}$: 雲の消散係数 $\sigma_r = 0.403 \times RAIN^{0.5}$: 雨の消散係数 $\sigma_s = 2.14 \times RAIN^{0.7} + 0.167 \times FF$: 雪の消散係数
作成対象とするモデル	GSM
予報対象時間単位	3 時間
予報期間と間隔	FT=3 から FT=84 まで 3 時間間隔
逐次学習の有無	なし
説明変数	モデル予測値 CWC ₁ : 地表気圧より上層の P 面 1 層の雲水量 [g/kg] RH : 地上面の湿度 [%]。85%を上限。 RAIN : 降水量（3 時間内の 1 時間降水量の最大） [mm/h] FF : 地上面の風速 [m/s]
目的変数	各格子の前 3 時間の最小視程
層別化処理の対象	なし
備考	降水の雨雪判別は天気ガイドンス（降水種別）に準じている。

4.3 プロダクトの送信時刻

2022年10月現在のプロダクト送信終了時刻を、表4.3.1に示す。なお、解析や予測にかかる計算時間は日々変化するため、送信終了時刻も日々変動する。これらの変動も考慮しプロダクト利用者には気象業務支援センターを通じてあらかじめ表4.3.2のように周知している。なお、周知した送信時刻より30分以上の遅延が生じるか遅延が見込まれる場合には、その旨を伝える連絡報を発信する。

表 4.3.1 プロダクトの送信終了時刻（2022年10月現在）

仕様 ¹	プロダクト名	初期時刻	プロダクトの送信終了時刻 ²
12501	全球数値予報モデル GPV	00, 06, 12, 18UTC	初期時刻 + 3時間 45分程度
12502	GSM ガイダンス	延長プロダクト 00, 12UTC	初期時刻 + 6時間 30分程度
12802	週間アンサンブル数値予報予報モデル GPV	00UTC 12UTC	初期時刻 + 5時間 55分程度 初期時刻 + 7時間 55分程度
12802	台風アンサンブル数値予報予報モデル GPV	06, 18UTC (台風発生時)	初期時刻 + 5時間 40分程度
12802	2週間アンサンブル数値予報モデル GPV	12UTC	初期時刻 + 10時間程度
12802	1か月アンサンブル数値予報モデル GPV	火・水曜 12UTC	水曜 12UTC + 11時間程度
20114	6か月アンサンブル数値予報モデル GPV	00UTC	初期時刻 + 22時間 15分程度
12401	毎時大気解析 GPV	毎正時	初期時刻 + 23分程度
12601	メソ数値予報モデル GPV	00, 03, 06, 09,	初期時刻 + 2時間 15分程度
12602	MSM ガイダンス	12, 15, 18, 21UTC	
12901	MSM 大雨発生確率ガイダンス		
12701	局地数値予報モデル GPV	毎正時	初期時刻 + 1時間 20分程度
13101	メソアンサンブル数値予報モデル GPV	00, 06, 12, 18UTC	初期時刻 + 3時間 40分程度
13102	メソアンサンブルガイダンス		
12901	MEPS 大雨発生確率ガイダンス		
20201	黄砂解析予測モデル格子点値	12UTC	初期時刻 + 6時間 55分程度
20301	オゾン全量データ GPV	12UTC	初期時刻 + 6時間 40分程度
30401	全球波浪数値予報モデル GPV	00, 06, 12, 18UTC	初期時刻 + 3時間 45分程度
30402	沿岸波浪数値予報モデル GPV	延長プロダクト 12UTC	初期時刻 + 6時間 45分程度
30403	波浪アンサンブル数値予報モデル GPV	00UTC 12UTC	初期時刻 + 5時間 30分程度 初期時刻 + 7時間 30分程度
30504	北太平洋, 北西太平洋格子点値 (水温, 海流等)	00UTC	初期時刻 + 13時間程度
30508	日本沿岸海況監視予測システム GPV	00UTC	初期時刻 + 24時間 10分程度
30701	高潮予測 GPV	00, 03, 06, 09, 12, 15, 18, 21UTC	初期時刻 + 2時間 25分程度

¹ 「配信資料に関する仕様」の仕様番号。 <https://www.data.jma.go.jp/add/suishin/shiyou/>

² スーパーコンピュータシステムから気象情報伝送処理システム（アデス）等への送信が終了した時刻のこと。

³ 気象業務支援センターへの配信が終了する時刻のこと。

表 4.3.2 プロダクト利用者にあらかじめ周知した送信時刻（2022 年 10 月現在）

仕様 ¹	プロダクト名	初期時刻	プロダクトの送信終了時刻 ³
12501	全球数値予報モデル GPV	00, 06, 12, 18UTC	初期時刻 + 4 時間以内
12502	GSM ガイダンス	延長プロダクト 00, 12UTC	初期時刻 + 7 時間以内
12802	週間アンサンブル数値予報予報モデル GPV	00UTC 12UTC	初期時刻 + 6 時間以内 初期時刻 + 8 時間以内
12802	台風アンサンブル数値予報予報モデル GPV	06, 18UTC (台風発生時)	初期時刻 + 6 時間以内
20114	6 か月アンサンブル数値予報モデル GPV	00UTC	初期時刻 + 23 時間頃
12401	毎時大気解析 GPV	毎正時	初期時刻 + 30 分以内
12601	メソ数値予報モデル GPV	00, 03, 06, 09,	初期時刻 + 2 時間 30 分以内
12602	MSM ガイダンス	12, 15, 18, 21UTC	
12901	MSM 大雨発生確率ガイダンス		
12701	局地数値予報モデル GPV	毎正時	初期時刻 + 1 時間 30 分以内
13101	メソアンサンブル数値予報モデル GPV	00, 06, 12, 18UTC	初期時刻 + 4 時間以内
13102	メソアンサンブルガイダンス		
12901	MEPS 大雨発生確率ガイダンス		
20201	黄砂解析予測モデル格子点値	12UTC	初期時刻 + 7 時間 30 分以内
20301	オゾン全量データ GPV	12UTC	初期時刻 + 8 時間 45 分以内
30504	北太平洋, 北西太平洋格子点値 (水温, 海流等)	00UTC	初期時刻 + 13 時間 30 分以内
30508	日本沿岸海況監視予測システム GPV	00UTC	初期時刻 + 25 時間以内
30701	高潮予測 GPV	00, 03, 06, 09, 12, 15, 18, 21UTC	初期時刻 + 2 時間 40 分以内

4.4 最近の改善のまとめ

2021年10月から2022年9月までに実施した数値予報システム、数値予報プロダクトの変更を表4.4.1にまとめた。以下にこれらの概略を記す。

4.4.1 数値予報システムの変更

2022年1月18日に日本沿岸海況監視予測システム（JPNシステム）において、海氷下の混合層における水温低下量の改善を行い、北海道沿岸部の海水密接度の予測精度が向上した。

2022年2月10日に季節アンサンブル予報システムにおいて、大気部分の水平格子間隔を約110 kmから約55 kmに、鉛直層数を60層から100層に増強すると共に、海洋同化システムを3次元変分法から4次元変分法に高度化するなどの改善を行った。これにより、3か月予報、暖・寒候期予報、エルニーニョ予測の精度が改善した。

2022年3月22日に全球アンサンブル予報システムの改良として、水平分解能を約40 kmから約27 kmに（初期時刻から432時間予報まで）、約55 kmから約40 kmに（432時間予報から816時間予報まで）、それぞれ高解像度化するとともに、季節アンサンブル予報システムによる海面水温予測値をより短い予報時間から活用するように変更した。これにより、日本周辺域の850 hPaの気温の予測精度が向上するなどの改善が見られた。

2022年3月22日にメソ数値予報システム、メソアンサンブル数値予報システムにおいて、鉛直層数を76層から96層に増強すると共に、モデルトップを約21.8 kmから37.5 kmに引き上げてより多くの観測データを利用できるようにした。海面・海洋過程では、海洋混合層モデルを導入し、海上風が海洋表層をかき混ぜることにより海面温度が変化する効果などを考慮することで、台風の強度や最大風速の予測精度を改善した。陸面過程、雲・放射過程、境界層過程の改良により、地上気象要素の予測が改善した。

2022年3月22日に局地数値予報システムにおいて、気象場に応じた予測誤差を考慮できるよう、ハイブリッド同化を導入したほか、物理過程の改善を行った。これにより、夏季を中心とした降水予測精度などが改善した。

2022年6月16日にメソモデル、MSMガイダンスの予報時間を、00 UTC、12 UTC 初期値に限り51時間から78時間に延長した。これにより、メソモデルを用いて3日先までの総降水量が求められるようになった。

2022年6月30日に全球モデルによる予測の初期値を作成する全球解析において、欧州の極軌道衛星Metopの観測データから算出される大気追跡風の利用を開始した。これにより、全球モデルの対流圏中層のジオポテンシャル高度予測の精度が改善した。また、メソモデルによる予測の初期値を作成するメソ解析において米国の極軌道衛星Suomi-NPP及びNOAA-20搭載のマイクロ波センサ(ATMS)の観測データを利用開始すると共に、国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構(JAXA)が米国航空宇宙局(NASA)と共同で開発した二周波降水レーダ(DPR)の利用方法の改良を行った。これにより、メソモデルの降水予測の精度が改善した。

2022年8月9日に局地モデルによる予測の初期値を作成する局地解析において、Suomi-NPP及びNOAA-20搭載のATMSの観測データを利用開始し、局地モデルの降水予測の精度が改善した。

2022年9月8日に高潮に関する早期注意情報（警報級の可能性）の運用開始に資するため、日本域台風時高潮確率予測システムの運用を開始した。

4.4.2 数値予報プロダクトの変更

数値予報プロダクトの変更では、2021年12月1日に、日本沿岸海況監視予測システムにおいて海氷GPVの提供を開始した。

2022年2月10日に季節アンサンブルの運用を毎日5メンバーに増強した。

2022年3月22日に全球アンサンブル予報システムの日本域のGPVを高解像度化した。

2022年6月1日に大雨発生確率ガイダンスの提供を開始した。これにより、線状降水帯による大雨の半日程度前からの呼びかけにおいて、判断のための客観的な資料を提供することができるようになった。

2022年6月16日には、メソモデルおよびMSMガイダンスの予報時間を、00 UTCおよび12 UTC 初期時刻に限り、51時間から78時間に延長した。

表 4.4.1 2021 年 10 月から 2022 年 9 月までに実施した数値予報システム、数値予報プロダクトの主な変更

変更日	概要	参考文献
2021 年 12 月 1 日	日本海沿岸海況監視予測システムにおける海水 GPV の提供	配信資料に関するお知らせ (2021 年 11 月 11 日)、配信資料に関する技術情報 第 546 号
2022 年 1 月 18 日	日本海沿岸海況監視予測システムにおける海水予測の精度向上	配信資料に関する技術情報 第 576 号
2022 年 2 月 10 日	季節アンサンブル予報システムの改良に伴う予測精度向上と新形式 GPV の提供開始	配信資料に関するお知らせ (2022 年 1 月 18 日)、配信資料に関する技術情報 第 569 号
2022 年 3 月 22 日	全球アンサンブル予報システムの改良に伴う予測精度向上と新形式 GPV の提供開始	配信資料に関する技術情報 第 572 号 第 578 号
2022 年 3 月 22 日	メソ数値予報システム、メソアンサンブル予報システムの改良に伴う精度向上	配信資料に関する技術情報 第 582 号
2022 年 3 月 22 日	局地数値予報システムの改良に伴う精度向上	配信資料に関する技術情報 第 583 号
2022 年 6 月 1 日	大雨発生確率ガイダンスの提供開始	配信資料に関する技術情報 第 584 号
2022 年 6 月 16 日	メソ数値予報システムおよび MSM ガイダンスの予報時間延長	配信資料に関する技術情報 第 575 号 第 589 号
2022 年 6 月 30 日	観測データ利用手法の改良による全球・メソモデルの予測精度向上	配信資料に関する技術情報 第 590 号
2022 年 8 月 9 日	観測データ利用手法の改良による局地モデルの予測精度向上	配信資料に関する技術情報 第 592 号
2022 年 9 月 8 日	日本域台風時高潮確率予測システムの開発	報道発表資料 (2022 年 8 月 23 日)

4.5 プロダクトの物理量の算出手法

2022年10月時点において気象業務支援センターを通じて提供する数値予報資料のうち、全球数値予報モデル GPV、週間アンサンブル数値予報モデル GPV¹、台風アンサンブル数値予報モデル GPV²、メソ数値予報モデル GPV、メソアンサンブル数値予報モデル GPV 及び局地数値予報モデル GPV に含まれる物理量及びその算出手法についてまとめた。

4.5.1 全球数値予報モデル GPV、週間アンサンブル数値予報モデル GPV 及び台風アンサンブル数値予報モデル GPV

地上	
海面更正気圧 [Pa]	地上気圧及び静力学平衡を仮定して算出した地上気温から、温度減率 5 K km^{-1} を仮定して標高 0 m の気圧を算出する。
地上気圧 [Pa]	予報変数でありそのまま値を格納する。
風 [m/s]	高度 10 m の値として接地境界層の安定度を考慮して算出する。東西風と南北風の 2 成分。草開 (2012) も参照。
気温 [K]	高度 2 m の値として接地境界層の安定度を考慮して算出する。草開 (2012) も参照。
相対湿度 [%]	高度 2 m の値として接地境界層の安定度を考慮して算出する。草開 (2012) も参照。
積算降水量 [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$]	予報初期時刻から対象となる予報時間まで積算した値。
上層雲量、 中層雲量、 下層雲量、 全雲量 [%]	まず、雲スキーム (中川 2012) を用いて、モデル面の各鉛直層における雲量を算出する。続いて、下層・中層・上層に含まれる鉛直層での雲量を用い、マキシマムランダムオーバーラップ (長澤 2008) を仮定して下層雲量、中層雲量、上層雲量を算出する。ここで、地上気圧を 1000 hPa とした時に、850 hPa となる鉛直層及び 500 hPa となる鉛直層を決定し、それぞれ下層と中層の境界及び中層と上層の境界とする。さらに、全雲量は全ての鉛直層の雲量からマキシマムランダムオーバーラップを仮定して算出する。
日射量 [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$]	放射過程で計算したモデル面各層の雲量と大気による散乱・吸収を考慮して、地表に到達した下向き短波放射フラックス。
気圧面	
高度 [gpm]	ジオポテンシャル高度である。ただし、重力加速度は一定値を用いる。モデル面各層から鉛直内挿して算出する。気圧面が地上気圧より低い場合は温度減率 5 K km^{-1} で鉛直外挿する。
風 [m/s]	東西風と南北風の 2 成分。モデル面各層から鉛直内挿して算出し、高度が標高より低い場合はモデル面最下層の値を与える。
気温 [K]	モデル面各層から鉛直内挿して算出し、高度が標高より低い場合は温度減率 5 K km^{-1} で鉛直外挿する。
上昇流 [Pa/s]	鉛直 p 速度である。モデル面各層から内挿し、高度が標高より低い場合はモデル面最下層の値を与える。
相対湿度 [%]	氷に対する飽和水蒸気量を考慮して算出する。 $-15 \text{ }^\circ\text{C}$ 以下では氷に対する飽和水蒸気量を、 $0 \text{ }^\circ\text{C}$ 以上では水に対する飽和水蒸気量を、 $-15\sim 0 \text{ }^\circ\text{C}$ では両者を線形内挿した値をそれぞれ用いる。モデル面各層から内挿し、高度が標高より低い場合は最下層の値を与える。

¹ 00UTC、12UTC の全球アンサンブル予報システムの GPV をこの名称で提供している。

² 台風時に、06UTC、18UTC の全球アンサンブル予報システムの GPV をこの名称で提供している。ここで、台風時とは、 $0^\circ\text{--}60^\circ\text{N}$ 、 $100^\circ\text{E--}180^\circ\text{E}$ の領域に台風が存在する、または同領域内で 24 時間以内に台風となると予想される熱帯低気圧が存在する場合、もしくは、 $0^\circ\text{--}60^\circ\text{N}$ 、 $100^\circ\text{E--}180^\circ\text{E}$ の領域外に最大風速 34 ノット以上の熱帯低気圧が存在し、24 時間以内に予報円または暴風警戒域が領域内に入ると予想される場合である。

4.5.2 メソ数値予報モデル GPV、メソアンサンブル数値予報モデル GPV 及び局地数値予報モデル GPV

地上	
海面更正気圧 [Pa]	モデル面の下から 2 層目の気圧及び仮温度から、仮温度減率 5 K km^{-1} として標高 0 m の気圧を算出する。
地上気圧 [Pa]	モデル面の下から 2 層目の気圧及び仮温度から、仮温度減率 5 K km^{-1} としてモデル標高の気圧を算出する。
風 [m/s]	高度 10 m の値として接地境界層の安定度を考慮して算出する。東西風と南北風の 2 成分。原 (2008a)、草開 (2012) も参照。
気温 [K]	高度 1.5 m の値として接地境界層の安定度を考慮して算出する。原 (2008a)、草開 (2012) も参照。
相対湿度 [%]	高度 1.5 m の値として接地境界層の安定度を考慮して算出する。原 (2008a)、草開 (2012) も参照。
時間降水量 (メソ) [kg·m ⁻²]	対象となる予報時刻の 1 時間前から予報時刻まで積算した値。
積算降水量 (局地) [kg·m ⁻²]	予報初期時刻から対象となる予報時間まで積算した値。
上層雲量、中層雲量、下層雲量、全雲量 [%]	まず、部分凝結スキーム (原 2008b) を用いて、モデル面各鉛直層で各層における雲量を算出する。続いて、上層・中層・下層に含まれる鉛直層での雲量を用い、マキシマムオーバーラップ (長澤 2008) を仮定して算出する。下層と中層の境界となる気圧を地上気圧 $\times 0.85$ とし、中層と上層の境界となる気圧を下層と中層の境界の気圧 $\times 0.8$ と 500 hPa の小さい方とする (地上気圧が 1000 hPa の場合、境界はそれぞれ 850 hPa と 500 hPa となる)。全雲量は上層雲・中層雲・下層雲からマキシマムオーバーラップを仮定して算出する。
日射量 [W·m ⁻²]	放射過程で計算したモデル面各層の雲量と大気による散乱・吸収を考慮して、地表に到達した下向き短波放射フラックス。
気圧面	
高度 [gpm]	ジオポテンシャル高度である。ただし、重力加速度は一定値を用いる。モデル面各層から鉛直内挿して算出する。気圧面が地上気圧より低い場合は温度減率 5 K km^{-1} で鉛直外挿する。
風 [m/s]	東西風と南北風の 2 成分。モデル面各層から鉛直内挿して算出し、高度が標高より低い場合はモデル面最下層の値を与える。
気温 [K]	モデル面各層から鉛直内挿して算出し、高度が標高より低い場合は温度減率 5 K km^{-1} で鉛直外挿する。
上昇流 [Pa/s]	鉛直 p 速度であり数値予報モデルの予報変数である風の鉛直成分及び密度を用いて算出する (藤田 2004)。モデル面各層で算出した鉛直 p 速度を内挿し、高度が標高より低い場合はモデル面最下層の値を与える。なお、初期値において風の鉛直成分をゼロとして計算を行っているため、初期値における上昇流はゼロとしている。
相対湿度 [%]	氷に対する飽和水蒸気量を考慮して算出する。 $-15 \text{ }^\circ\text{C}$ 以下では氷に対する飽和水蒸気量を、 $0 \text{ }^\circ\text{C}$ 以上では水に対する飽和水蒸気量を、 $-15 \sim 0 \text{ }^\circ\text{C}$ では両者を線形内挿した値をそれぞれ用いる。モデル面各層から内挿し、高度が標高より低い場合は最下層の値を与える。

参考文献

- 草開浩, 2012: 地表面過程. 数値予報課報告・別冊第 58 号, 気象庁予報部, 29–41.
- 中川雅之, 2012: 雲過程. 数値予報課報告・別冊第 58 号, 気象庁予報部, 70–75.
- 長澤亮二, 2008: 放射過程. 数値予報課報告・別冊第 54 号, 気象庁予報部, 149–165.
- 原旅人, 2008a: 地上物理量診断. 数値予報課報告・別冊第 54 号, 気象庁予報部, 181–184.
- 原旅人, 2008b: 部分凝結スキーム. 数値予報課報告・別冊第 54 号, 気象庁予報部, 133–137.
- 藤田司, 2004: メソ数値予報狭域 GPV. 平成 16 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 43.

4.6 プロダクトに関する参考情報

気象庁から気象事業者などに配信される数値予報プロダクトに関する参考情報を以下に示す。

4.6.1 数値予報プロダクトにおける格子点値の統計処理について

気象庁から気象業務支援センター経由で GRIB2 形式により配信されている数値予報 GPV に関して、GPV の値はその格子点領域の代表値を意味する。数値モデルでは、格子点の値をその格子点領域の平均状態を示すものと捉えて予測計算をしており、例えば GPV の風は観測値のような 10 分平均値などではなく、数値モデルが計算する、その瞬間の値となる。一方、積算降水量（一定期間（例：前 1 時間など）の降水量を積算した値）や日射量（一定期間（例：前 1 時間など）の平均値）など、数値モデルの出力結果に対して何らかの統計的処理が施される要素もあるため、詳細については各プロダクトに関する「配信資料に関する仕様」¹を参照されたい。なお、GPV プロダクトの作成時には、数値モデルの格子点から利用者が利用しやすい格子点へ水平内挿されたり、気圧面に鉛直内挿されることによって平滑化されていることにも留意が必要である。

4.6.2 GRIB2 形式配信資料で積算降水量の差を取ると稀に負の値を生じることについて

気象庁から気象業務支援センター経由で GRIB2 形式により配信されている数値予報 GPV において、降水量が初期時刻からの積算値として格納されている場合、任意の期間の降水量は起点終点の積算降水量の差から求まるが、この値が稀に負の値となる。その場合、負の値を無視するなどの対応が必要となる。この負の値が生じる理由について解説する。

GRIB2 形式は、多次元のデータを水平 2 次元配列データに分解して格納する。その水平 2 次元配列データは 1 格子点あたり一定のビット数の整数値の列 x_i (i は格子番号) として表現される。この整数値列 x_i から次式によってデータ Y_i が復元される。

$$Y_i = (R + x_i \cdot 2^E) \cdot 10^{-D} \quad (4.6.1)$$

ここで、 R 、 E および D はそれぞれ参照値 (reference value)、二進尺度因子 (binary scale factor) および十進尺度因子 (decimal scale factor) と呼ばれ、要素、水平面、予報時間により異なる。

気象庁が作成する数値予報 GPV (GRIB2 形式) では大抵の場合、1 格子点あたり 12 ビットを用いて x_i を表現する。つまり $0 \leq x_i \leq (2^{12} - 1) = 4095$ の範囲に収まるように、表現すべき値に応じて自動的に R および E が選択されている。 D は物理量ごとに固定値が使用され、実際の積算降水量データに含まれる GRIB2 では次のようになっている。

R : 常にゼロ

E : -7 程度の負値から予報時間と共に単調増加

D : 常にゼロ

積算降水量の配信領域内での最大値 Y_{\max} は初期時刻から予報時間が経過するにつれて単調に増加する。 E を小さい値のままにしておくと $x_i > 4095$ となってオーバーフローする (12 ビット整数で表現できなくなる) ため、 E は予報時間とともに単調増加することとなる。以下、具体例を挙げる。

$E = -5$: $Y_{\max} > 127.97$ [kg/m²] でオーバーフロー

$E = -2$: $Y_{\max} > 1023.75$ [kg/m²] でオーバーフロー

$E = -1$: $Y_{\max} > 2047.50$ [kg/m²] でオーバーフロー

2^E は Y_{\max} を表現するための降水量の刻み幅に相当する。ここで、 E が異なる 2 つの予報時間の積算降水量の値の差から降水量を求めると、負の降水量となる場合がある。たとえば $E = -2$ から $E = -1$ に変わるとき、降水量は $2^{-2} = 0.25$ [kg/m²] 刻みから、 $2^{-1} = 0.5$ [kg/m²] 刻みで表現されること变为る。仮にある格子点の積算降水量がその両者の時刻で変わらなかったとして、GRIB2 に書かれる整数値 x_i と復元結果 Y_i は表 4.6.1 のようになる。この例では元の値が 10.20 [kg/m²] だと、降水量の差は負値 -0.25 [kg/m²] になる。

表 4.6.1 E が異なる 2 つの予報時間について積算降水量を GRIB2 格納・解読した結果

元の値 [kg/m ²]	$E = -2$		$E = -1$		降水量の差 [kg/m ²]
	x_i	Y_i [kg/m ²]	x_i	Y_i [kg/m ²]	
10.10	40	10.00	20	10.00	0.00
10.20	41	10.25	20	10.00	-0.25
10.30	41	10.25	21	10.50	0.25
10.40	42	10.50	21	10.50	0.00

また、数値モデルの GRIB2 プロダクトは、以下のような 2 つのステップによる処理により作成される。

1. 数値モデルの結果を一旦 (GRIB2 形式とは異なる) GPV として出力
2. その GPV をさらに GRIB2 形式に変換

1. の処理においても、ストレージなどの計算機資源を効率的に使用することを目的に、数値モデルの結果を小さいビット数で表現するよう圧縮しており、この時点で丸めの影響により負の降水量が生じる場合がある。この場合、GRIB2 において時間降水量を算出する際の起点終点における GRIB2 二進尺度因子 E が同じ場合でも、負の降水量となる場合がある。

このように、GRIB2 形式により配信されている数値予報 GPV において、積算降水量が予報時間の経過に伴い見かけ上減少する場合がある。GRIB2 プロダクトの積算降水量が時間を追って減少するような場合は、減少分を無視するなどの対応をお願いしたい。

¹ <https://www.data.jma.go.jp/add/suishin/shiyou/>

4.7 表記と統計的検証に用いる代表的な指標

数値予報解説資料集で用いた表記と統計的検証に用いる代表的な指標などについて以下に説明する。

4.7.1 数値予報解説資料集で用いた表記

(1) 時刻の表記について

本資料集では、時刻を表記する際に、通常国内で用いられている日本標準時 (JST: Japan Standard Time) のほかに、協定世界時 (UTC: Coordinated Universal Time) を用いている。数値予報では国際的な観測データの交換やプロダクトの利用等の利便を考慮して、時刻は UTC で表記されることが多い。JST は UTC に対して 9 時間進んでいる。また、単に「時」を用いる場合は、日本標準時を意味する。

(2) 分解能の表記について

本資料集では、全球モデルの分解能について、xx を水平方向の切断波数、yy を鉛直層数として、“TxxLyy”¹ と表記することがある。また、セミラグランジアンモデルで線形格子 (北川 2005) を用いる場合は “TLxxLyy”² と、二次格子 (氏家ほか 2019) を用いる場合には “TQxxLyy”³ と表記する。北緯 30 度において、TL959 は約 20 km 格子、TL479 は約 40 km 格子、TL319 は約 55 km 格子、TL159 は約 110 km 格子、TQ479 は約 27 km 格子、TQ319 は約 40 km 格子に相当する。

(3) 予測時間の表記について

数値予報では、統計的な検証や事例検証の結果を示す際に、予報対象時刻のほかに、初期時刻からの経過時間を予報時間 (FT: Forecast Time⁴) として表記している。

本資料集では、予報時間を

「予報時間」= 「予報対象時刻」- 「初期時刻」

で定義し、例えば、6 時間予報の場合、FT=6 と表記しており、時間の単位 [h] を省略している。

(4) アンサンブル予報の表記について

アンサンブル予報では、複数の予測の集合 (アンサンブル) を統計的に処理し、確率予測等の資料を作成する。本資料集では、予測の集合の平均を「アンサンブル平均」、個々の予測を「メンバー」と呼ぶ。また、摂動を加えているメンバーを「摂動ラン」、摂動を加えていないメンバーを「コントロールラン」と呼ぶ。全メンバーの数に対する、予測がある閾値を超える (または下回る) メンバーの数の割合を超過確率と呼ぶ。

(5) 緯度、経度の表記について

本資料集では、緯度、経度について、アルファベットを用いて例えば「北緯 40 度、東経 130 度」を「40°N,

130°E」、「南緯 40 度、西経 130 度」を「40°S, 130°W」などと略記する。

4.7.2 統計的検証に用いる代表的な指標

(1) 平均誤差、二乗平均平方根誤差、誤差の標準偏差、改善率

予測誤差を表す基本的な指標として、平均誤差 (ME: Mean Error、バイアスと表記する場合もある) と二乗平均平方根誤差 (RMSE: Root Mean Square Error) がある。これらは次式で定義される。

$$ME \equiv \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - a_i) \quad (4.7.1)$$

$$RMSE \equiv \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - a_i)^2} \quad (4.7.2)$$

ここで、 N は標本数、 x_i は予測値、 a_i は実況値である。ME は予測値の実況値からの偏りの平均であり、0 に近いほど実況からのずれが小さいことを示す。RMSE は最小値の 0 に近いほど予測が実況に近いことを示す。

RMSE は ME の寄与とそれ以外を分離して、

$$RMSE^2 = ME^2 + \sigma_e^2 \quad (4.7.3)$$

$$\sigma_e^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - a_i - ME)^2 \quad (4.7.4)$$

と表すことができる。 σ_e は誤差の標準偏差である。

本資料集では、予測に改良を加えた際の評価指標として、RMSE の改善率 (%) を用いる場合がある。RMSE の改善率は次式で定義される。

$$RMSE \text{ 改善率} \equiv \frac{RMSE_{\text{cntl}} - RMSE_{\text{test}}}{RMSE_{\text{cntl}}} \times 100 \quad (4.7.5)$$

(RMSE 改善率 \leq 100)

ここで、 $RMSE_{\text{cntl}}$ は基準となる予測の、 $RMSE_{\text{test}}$ は改良を加えた予測の RMSE である。

(2) スプレッド

スプレッドは、アンサンブル予報のメンバーの広がり示す指標であり、次式で定義される。

$$\text{スプレッド} \equiv \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \left(\frac{1}{M} \sum_{m=1}^M (x_{mn} - \bar{x}_n)^2 \right)} \quad (4.7.6)$$

ここで、 M はアンサンブル予報のメンバー数、 N は標本数、 x_{mn} は m 番目のメンバーの予測値、 \bar{x}_n は

$$\bar{x}_n \equiv \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M x_{mn} \quad (4.7.7)$$

で定義されるアンサンブル平均である。

¹ T は三角形 (Triangular) 波数切断、L は層 (Level) を意味する。

² TL の L は線形 (Linear) 格子を意味する。

³ TQ の Q は二次 (Quadratic) 格子を意味する。

⁴ 英語圏では Forecast Range などと記述されることも多い。

(3) アノマリー相関係数

アノマリー相関係数 (ACC: Anomaly Correlation Coefficient) とは、予測値の基準値からの偏差 (アノマリー) と実況値の基準値からの偏差との相関係数であり、次式で定義される。

$$ACC \equiv \frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})(A_i - \bar{A})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^N (A_i - \bar{A})^2}} \quad (-1 \leq ACC \leq 1) \quad (4.7.8)$$

ただし、

$$X_i = x_i - c_i, \quad \bar{X} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i \quad (4.7.9)$$

$$A_i = a_i - c_i, \quad \bar{A} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N A_i \quad (4.7.10)$$

である。ここで、 N は標本数、 x_i は予測値、 a_i は実況値、 c_i は基準値である。基準値としては気候値を用いることが多い。アノマリー相関係数は予測と実況の基準値からの偏差の相関を示し、基準値からの偏差の増減のパターンが完全に一致している場合には最大値の 1 をとり、相関が全くない場合には 0 をとり、逆に完全にパターンが反転している場合には最小値の -1 をとる。なお、アノマリー相関係数や ME, RMSE の解説は、梅津ほか (2013) に詳しい。

4.7.3 カテゴリー検証で用いる指標

カテゴリー検証では、まず、対象となる現象の有無を予測と実況それぞれについて判定し、その結果により標本を分類する。そして、それぞれのカテゴリーに分類された事例数を基に、予測の特性を検証するという手順を踏む。

(1) 分割表

分割表は、カテゴリー検証においてそれぞれのカテゴリーに分類された事例数を示す表 (表 4.7.1) である。(2) から (12) に示す各スコアは、表 4.7.1 に示される各区分の事例数を用いて定義される。また、以下では全事例数を $N=FO+FX+XO+XX$ 、実況「現象あり」の事例数を $M=FO+XO$ 、実況「現象なし」の事例数を $X=FX+XX$ と表す。

表 4.7.1 カテゴリー検証で用いる分割表。FO, FX, XO, XX はそれぞれの事例数を示す。

		実況		計
		あり	なし	
予測	あり	適中 (FO)	空振り (FX)	FO+FX
	なし	見逃し (XO)	適中 (XX)	XO+XX
計		M	X	N

(2) 適中率

適中率は、予測が適中した割合であり、次式で定義される。

$$\text{適中率} \equiv \frac{FO + XX}{N} \quad (0 \leq \text{適中率} \leq 1) \quad (4.7.11)$$

最大値の 1 に近いほど予測の精度が高いことを示す。

(3) 空振り率

空振り率は、予測「現象あり」の事例数に対する空振り (予測「現象あり」かつ実況「現象なし」) の割合であり、次式で定義される。

$$\text{空振り率} \equiv \frac{FX}{FO + FX} \quad (0 \leq \text{空振り率} \leq 1) \quad (4.7.12)$$

最小値の 0 に近いほど空振り率が小さいことを示す。本資料集では分母を FO+FX としているが、代わりに N として定義する場合もある。

(4) 見逃し率

見逃し率は、実況「現象あり」の事例数に対する見逃し (実況「現象あり」かつ予測「現象なし」) の割合であり、次式で定義される。

$$\text{見逃し率} \equiv \frac{XO}{M} \quad (0 \leq \text{見逃し率} \leq 1) \quad (4.7.13)$$

最小値の 0 に近いほど見逃し率が小さいことを示す。本資料集では分母を M としているが、代わりに N として定義する場合もある。

(5) 捕捉率

捕捉率 (H_r : Hit Rate, POD (Probability Of Detection) と呼ばれる) は、実況「現象あり」のときに予測が適中した割合であり、次式で定義される。

$$H_r \equiv \frac{FO}{M} \quad (0 \leq H_r \leq 1) \quad (4.7.14)$$

最大値の 1 に近いほど見逃し率が小さいことを示す。捕捉率は、ROC 曲線 4.7.4 (5) のプロットに用いられる。

(6) 体積率

体積率 (V_r : Volume Ratio) は、全事例のうち予測の「現象あり」の事例の割合を示す。

$$V_r \equiv \frac{FO + FX}{N} \quad (4.7.15)$$

複数の予測の捕捉率が等しい場合、体積率が小さい予測ほど空振り率が小さい良い予測と言える。

(7) 誤検出率

誤検出率 (F_r : False Alarm Rate) は、実況「現象なし」のときに予測が外れた割合である。空振り率 (4.7.12) 式とは分母が異なり、次式で定義される。

$$F_r \equiv \frac{FX}{X} \quad (0 \leq F_r \leq 1) \quad (4.7.16)$$

最小値の 0 に近いほど、誤検出率が小さく予測の精度が高いことを示す。誤検出率は捕捉率 (5) とともに ROC 曲線 4.7.4 (5) のプロットに用いられる。

(8) バイアスコア

バイアスコア (BI: Bias Score) は、実況「現象あり」の事例数に対する予測「現象あり」の事例数の比であり、次式で定義される。

$$BI \equiv \frac{FO + FX}{M} \quad (0 \leq BI) \quad (4.7.17)$$

予測と実況で「現象あり」の事例数が一致する場合に 1 となる。1 より大きいほど予測の「現象あり」の頻度が過大、1 より小さいほど予測の「現象あり」の頻度が過小であることを示す。

(9) 気候学的出現率

現象の気候学的出現率 P_c は、標本から見積もられる「現象あり」の平均的な出現確率であり、次式で定義される。

$$P_c \equiv \frac{M}{N} \quad (0 \leq P_c \leq 1) \quad (4.7.18)$$

この量は実況のみから決まり、予測の精度にはよらない。予測の精度を評価する際の基準値の設定にしばしば用いられる。

(10) スレットスコア

スレットスコア (TS: Threat Score) は、予測または実況で「現象あり」の場合の予測適中事例数に着目して予測精度を評価する指標であり、次式で定義される。

$$TS \equiv \frac{FO}{FO + FX + XO} \quad (0 \leq TS \leq 1) \quad (4.7.19)$$

出現頻度の低い現象 ($N \gg M$ 、したがって、 $XX \gg FO$, FX , XO となって、予測「現象なし」による寄与だけで適中率が 1 に近い現象) について XX の影響を除いて検証するのに有効である。本スコアは最大値の 1 に近いほど予測の精度が高いことを示す。なお、スレットスコアは現象の気候学的出現率の影響を受けやすく、異なる標本や出現率の異なる現象に対する予測の精度を比較するには適さない。この問題を緩和するため、次項で説明するエクイタブルスレットスコアなどが考案されている。

(11) エクイタブルスレットスコア

エクイタブルスレットスコア (ETS: Equitable Threat Score) は、前項のスレットスコアが現象の気候学的出現率の影響を受けやすいため、気候学的な確率で「現象あり」が適中した頻度を除いて求めたスレットスコアであり、次式で定義される (Schaefer 1990)。

$$ETS \equiv \frac{FO - S_f}{FO + FX + XO - S_f} \quad \left(-\frac{1}{3} \leq ETS \leq 1\right) \quad (4.7.20)$$

ただし、

$$S_f = P_c(FO + FX) \quad (4.7.21)$$

である。ここで、 S_f は「現象あり」をランダムに $FO+FX$ 回予測した場合 (ランダム予測) の「現象あり」の適中事例数である。本スコアは、最大値の 1 に近いほど予測の精度が高いことを示す。また、ランダム予測で 0 となり、 $FO=XX=0$, $FX=XO=N/2$ の場合に最小値 $-1/3$ をとる。

(12) スキルスコア

スキルスコア (Skill Score) は気候学的確率などによる予測の難易を取り除いて、予測の技術力を評価する指数であり、一般に次式のように定義される。

$$\text{スキルスコア} \equiv \frac{S_{\text{fcst}} - S_{\text{ref}}}{S_{\text{pfct}} - S_{\text{ref}}} \quad (4.7.22)$$

ここで、 S_{fcst} , S_{pfct} , S_{ref} は、評価対象の予測・完全予測・比較の基準となる予測 (気候学的確率など) の各スコア (適中率) である。本スコアは、最大値の 1 に近いほど予測の精度が高いことを示し、比較の基準となる予測よりも精度が劣る場合、負の値となる。

代表的なスキルスコアは Heidke のスキルスコア (HSS: Heidke Skill Score) で、気候学的な確率で「現象あり」および「現象なし」が適中した頻度を除いて求める適中率であり、次式で定義される。

$$HSS \equiv \frac{FO + XX - S}{N - S} \quad (-1 \leq HSS \leq 1) \quad (4.7.23)$$

ただし、

$$S = P_c(FO + FX) + P_x(XO + XX),$$

$$P_x = \frac{X}{N} \quad (4.7.24)$$

である。ここで、 P_x は「現象なし」の気候学的出現率、 S は「現象あり」を $FO+FX$ 回 (すなわち、「現象なし」を残りの $XO+XX$ 回) ランダムに予測した場合 (ランダム予測) の適中事例数である。HSS は、最大値の 1 に近づくほど精度が高く、ランダム予測で 0 となり、 $FO=XX=0$, $FX=XO=N/2$ の場合に最小値 -1 をとる。前項のエクイタブルスレットスコアもスキルスコアの一つで、Gilbert Skill Score とも呼ばれている。

(13) Roebber ダイアグラム

Roebber (2009) はカテゴリ検証による複数のスコア (捕捉率、空振り率、バイアスコア、スレットスコア) を一つのグラフに表す方法を考案した。検証結果を縦軸に捕捉率 (POD: Probability Of Detection)、横軸に 1-空振り率 (SR: Success Ratio) をとってプロットすると、捕捉率と空振り率から BI と TS が計算できるため、等値線を目安にバイアスコアとスレットスコアも確認できるグラフとなる (図 4.7.1)。本資料集では、これを Roebber ダイアグラムと呼ぶ。各スコアが 1 に近づくほど (グラフの右上へ近づくほど)、良い予測となる。このグラフでは 4 つのスコアを一目で確認でき、予測特性の変化を把握しやすい。特に、バイアスコアとスレットスコアの変化を捕捉率と空振り率の変化で説明することが容易となる。

例えば、図 4.7.1 の①のようにスコアが変化する場合、捕捉率、空振り率、バイアスコア、スレットスコアのいずれも改善となる。これに対し②の場合には、①と同様にバイアスコア、スレットスコアとも改善しているが、空振り率が増加している。空振り率が大きいにもかかわらず、バイアスコア・スレットスコアが改善している理由は、捕捉率の増加の割合が空振り率の増加に比べて大きいためである。このように①と②ではいずれもバイアスコアとスレットスコアがともに改善しているが、本グラフを用いることで予測の変化傾向の違い (捕捉率と空振り率の変化の違い) が一目で確認できる。

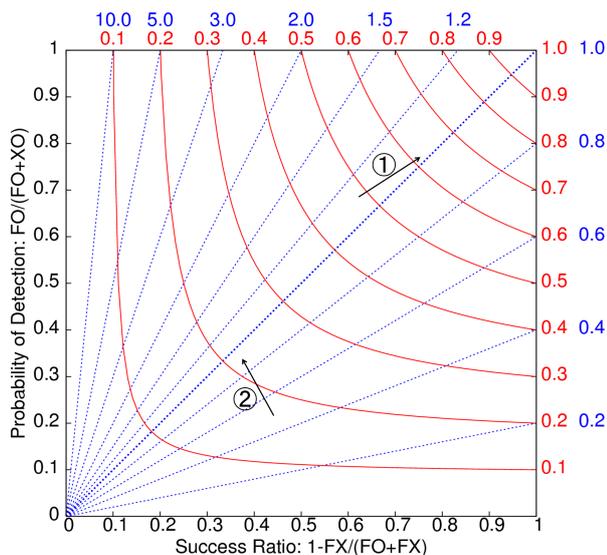


図 4.7.1 Roebber ダイアグラムの模式図。横軸は 1-空振り率、縦軸は捕捉率、青の破線はバイアスコアの、赤の実線はスレットスコアの各等値線。

(14) FSS

FSS(Fractions Skill Score) は、現象の表現に空間的な曖昧さを与えて評価する検証スコアである (Roberts and Lean 2008 参照、幾田 2010 に詳しい)。

平面上のある変量の観測の分布を O_r 、予報の分布を F_r とする。変量は任意の閾値 q で 2 値化でき、2 値化した観測を I_O 、予報を I_F とすると、次式のように表せる。

$$I_O = \begin{cases} 1 & O_r \geq q \\ 0 & O_r < q \end{cases} \quad (4.7.25)$$

$$I_F = \begin{cases} 1 & F_r \geq q \\ 0 & F_r < q \end{cases} \quad (4.7.26)$$

この 2 値化した変量を用いた検証は空間的な位置ずれを許容せず、検証格子のスケールでの適合を厳密に検証することを意味する。

次に、この I_O と I_F に空間スケールを考慮し、分布の適合の判定に曖昧さを追加するため、分数化を行う。具体的には、検証対象格子を中心とする 1 辺 n 格子の正方形領域を考え、この正方形領域に含まれる 2 値化した格子情報を次式に従って領域平均する。

$$O(n)_{i,j} = \frac{1}{n^2} \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n I_O \left[i+k-1 - \frac{n-1}{2}, \right. \\ \left. j+l-1 - \frac{n-1}{2} \right] \cdot K(n)_{k,l}$$

$$F(n)_{i,j} = \frac{1}{n^2} \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n I_F \left[i+k-1 - \frac{n-1}{2}, \right. \\ \left. j+l-1 - \frac{n-1}{2} \right] \cdot K(n)_{k,l} \quad (4.7.27)$$

ここで $O(n)$ と $F(n)$ は分数化した観測と予報、添字の i, j は格子番号である。また、 $K(n)$ はカーネル関数で一般的にはガウシアンカーネルなどが考えられるが、ここでは格子内平均を取り扱うためカーネル関数は一様とする。

分数化した変量 $O(n)$ と $F(n)$ によって二乗平均誤差 (MSE) が次式によって計算される。

$$MSE(n) = \frac{1}{N_x N_y} \sum_{i=1}^{N_x} \sum_{j=1}^{N_y} [O(n)_{i,j} - F(n)_{i,j}]^2 \quad (4.7.28)$$

ここで、 N_x と N_y は検証領域の x 方向の格子数と y 方向の格子数である。ここでは、簡単のため検証領域は矩形領域であると仮定している。

FSS は分数化された観測 $O(n)$ と予報 $F(n)$ によって記述される MSE のスキルスコアであるため、予報スキルを評価するための相対的な基準となる参照値が必要である。FSS の参照値は、 $O(n)$ と $F(n)$ を用いて次

式のように定義される。

$$\text{MSE}_{(n)\text{ref}} = \frac{1}{N_x N_y} \sum_{i=1}^{N_x} \sum_{j=1}^{N_y} [O^2(n)_{i,j} + F^2(n)_{i,j}] \quad (4.7.29)$$

この参照値 $\text{MSE}_{(n)\text{ref}}$ は、任意の MSE の取りうる最大の値であり、予報と観測の総数が検証領域の格子数を超えない場合において、予報と観測の適合が無い場合の MSE に相当する。

FSS は、分数化した観測と予報によって記述される $\text{MSE}_{(n)}$ 、その参照値である $\text{MSE}_{(n)\text{ref}}$ 、そして完全予報の $\text{MSE}_{(n)\text{perfect}} (= 0)$ を用いて次式で定義される。

$$\text{FSS}_{(n)} = \frac{\text{MSE}_{(n)} - \text{MSE}_{(n)\text{ref}}}{\text{MSE}_{(n)\text{perfect}} - \text{MSE}_{(n)\text{ref}}} = 1 - \frac{\text{MSE}_{(n)}}{\text{MSE}_{(n)\text{ref}}} \quad (4.7.30)$$

この式から分かるように FSS は 0 から 1 の値をとり、1 で完全予報、0 で観測と予報の適合がまったく無い場合となる。

4.7.4 確率予測に関する指標など

(1) ブライアスコア

ブライアスコア (BS: Brier Score) は、確率予測の統計検証の基本的指標である。ある現象の出現確率を対象とする予測について、次式で定義される。

$$\text{BS} \equiv \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (p_i - a_i)^2 \quad (0 \leq \text{BS} \leq 1) \quad (4.7.31)$$

ここで、 p_i は確率予測値 (0 から 1)、 a_i は実況値 (現象ありで 1、なしで 0)、 N は標本数である。BS は完全に適中する決定論的な ($p_i=0$ または 1 の) 予測 (完全予測と呼ばれる) で最小値の 0 をとり、0 に近いほど予測の精度が高いことを示す。また、現象の気候学的出現率 P_c (4.7.18) 式を常に確率予測値とする予測 (気候値予測と呼ばれる) のブライアスコア BS_c は

$$\text{BS}_c \equiv P_c(1 - P_c) \quad (4.7.32)$$

となる。ブライアスコアは、現象の気候学的出現率の影響を受けるため、異なる標本や出現率の異なる現象に対する予測の精度を比較するのには適さない。例えば上の BS_c は P_c 依存性を持ち、同じ予測手法 (ここでは気候値予測) に対しても P_c の値に応じて異なる値をとる (Stanski et al. 1989)。この問題を緩和するため、次項で説明するブライアスキルスコアが考案されている。

(2) ブライアスキルスコア

ブライアスキルスコア (BSS: Brier Skill Score) は、ブライアスコアに基づくスキルスコアであり、通常気候値予測を基準とした予測の改善の度合いを示す。本スコアは、ブライアスコア BS、気候値予測によるブライアスコア BS_c を用いて

$$\text{BSS} \equiv \frac{\text{BS}_c - \text{BS}}{\text{BS}_c} \quad (\text{BSS} \leq 1) \quad (4.7.33)$$

で定義され、完全予測で 1、気候値予測で 0、気候値予測より誤差が大きいと負となる。

(3) Murphy の分解

Murphy (1973) は、ブライアスコアと予測の特性との関連を理解しやすくするため、ブライアスコアを信頼度 (Reliability)、分離度 (Resolution)、不確実性 (Uncertainty) の 3 つの項に分解した。これを Murphy の分解と呼ぶ (高野 2002 などに詳しい)。

確率予測において、確率予測値を L 個の区間に分け、標本を確率予測値の属する区間に応じて分類することを考える。確率予測値が l 番目の区間に属する標本数を N_l ($N = \sum_{l=1}^L N_l$)、このうち実況が「現象あり」であった事例数を M_l ($M = \sum_{l=1}^L M_l$)、確率予測値の l 番目の区間の区間代表値を p_l とすると、Murphy の分解によりブライアスコアは以下のように表される。

$$\text{BS} = \text{信頼度} - \text{分離度} + \text{不確実性} \quad (4.7.34)$$

$$\text{信頼度} = \sum_{l=1}^L \left(p_l - \frac{M_l}{N_l} \right)^2 \frac{N_l}{N} \quad (4.7.35)$$

$$\text{分離度} = \sum_{l=1}^L \left(\frac{M}{N} - \frac{M_l}{N_l} \right)^2 \frac{N_l}{N} \quad (4.7.36)$$

$$\text{不確実性} = \frac{M}{N} \left(1 - \frac{M}{N} \right) \quad (4.7.37)$$

信頼度は、確率予測値 (p_l) と実況での現象の出現相対頻度 (M_l/N_l) が一致すれば最小値の 0 となる。分離度は、確率予測値に対応する実況での現象の出現相対頻度 (M_l/N_l) が気候学的出現率 ($P_c = M/N$) から離れているほど大きい値をとる。不確実性は、現象の気候学的出現率のみによって決まり、予測の手法にはよらない。例えば、 $P_c = 0.5$ の場合に不確実性は最大値の 0.25 をとる。また、不確実性 = BS_c が成り立つ。これらを用いて、ブライアスキルスコアを次のように書くことができる。

$$\text{BSS} = \frac{\text{分離度} - \text{信頼度}}{\text{不確実性}} \quad (4.7.38)$$

(4) 確率値別出現率図

確率値別出現率図 (Reliability Diagram, Attributes Diagram とも呼ばれる) は、予測された現象出現確率 P_{fcst} を横軸に、実況で現象が出現した相対頻度 P_{obs} を縦軸にとり、確率予測の特性を示した図である (図 4.7.2 参照、Wilks 2011 などに詳しい)。一般に、確率予測の特性は確率値別出現率図上で曲線として表される。この曲線を信頼度曲線 (Reliability curve) と呼ぶ。

信頼度曲線の特性は、Murphy の分解 (3) の信頼度、分離度と関連付けることができる。横軸 P_{fcst} の各値について、信頼度 (あるいは分離度) への寄与は、信頼度曲線上の点から対角線 $P_{obs}=P_{fcst}$ (理想直線) 上の点 (あるいは直線 $P_{fcst}=P_c$ 上の点) までの距離の二乗として表現される。 P_{fcst} の各値でのこれらの寄与を、標本数に比例する重みで平均して信頼度 (あるいは分離度) が得られる。例えば、no-skill line (直線 $P_{obs} = (P_{fcst} + P_c)/2$) 上の点では、信頼度と分離度への寄与は等しい大きさを持ち、ブライアスキルスコアへの寄与が 0 となる。また no-skill line と直線 $P_{fcst} = P_c$ との間の領域 (分離度への寄与 > 信頼度への寄与、図 4.7.2 灰色の領域) 内に位置する点は、ブライアスキルスコアに正の寄与を持つ。

特別な場合として、気候値予測 4.7.4 (1) では 1 点 $(P_{fcst}, P_{obs}) = (P_c, P_c)$ が信頼度曲線に対応する。また、次の 2 つの特性を示す確率予測は精度が高い。

- 信頼度曲線が対角線に (信頼度への寄与が最小値の 0 に) 近い。
- 信頼度曲線上の大きい標本数に対応する点が点

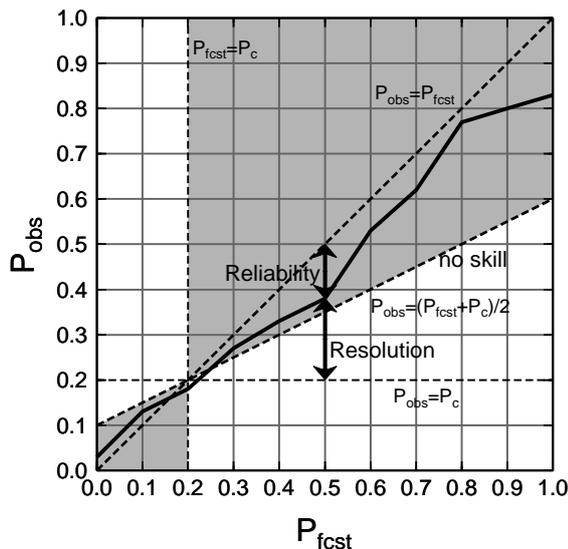


図 4.7.2 確率値別出現率図の模式図。横軸は予測現象出現確率、縦軸は実況現象出現相対頻度、実線が信頼度曲線である。対角線、直線 $P_{obs} = P_c$ との差の二乗がそれぞれ信頼度 (Reliability)、分離度 (Resolution) への寄与に対応している。灰色の領域内の点はブライアスキルスコアに正の寄与を持つ。

$(P_{fcst}, P_{obs}) = (P_c, P_c)$ (気候値予測) から離れた位置 (確率値別出現率図の左下または右上寄り) に分布する (分離度が大きい)。

(5) ROC 曲線、ROC 面積、ROC 面積スキルスコア

現象の予測出現確率にある閾値を設定し、これを予測の「現象あり」「現象なし」を判定する基準とすることが可能である。様々な閾値それぞれについて作成した分割表を基に、閾値が変化したときの F_r-H_r 平面上の軌跡をプロットしたものが ROC 曲線 (ROC curve: Relative Operating Characteristic curve、相対作用特性曲線) である (図 4.7.3 参照、高野 2002 などに詳しい)。平面内の左上方の領域では $H_r > F_r$ であり、平面の左上側に膨らんだ ROC 曲線特性を持つ確率予測ほど精度が高いものと見なせる。したがって、ROC 曲線から下の領域 (図 4.7.3 灰色の領域) の面積 (ROCA: ROC Area、ROC 面積) は、情報価値の高い確率予測ほど大きくなる。ROC 面積スキルスコア (ROCASS: ROC Area Skill Score) は、情報価値のない予測 ($H_r = F_r$) を基準として ROC 面積を評価するものであり、次式で定義される。

$$\text{ROCASS} \equiv 2(\text{ROCA} - 0.5) \quad (-1 \leq \text{ROCASS} \leq 1) \quad (4.7.39)$$

本スコアは、完全予測で最大値の 1 をとる。また、情報価値のない予測 (例えば、区間 $[0, 1]$ から一様ランダムに抽出した値を確率予測値とする予測など) では 0 となる。

(6) CRPS

CRPS (Continuous Ranked Probability Score) は、確率予測の統計検証の指標の 1 つである。連続物理量

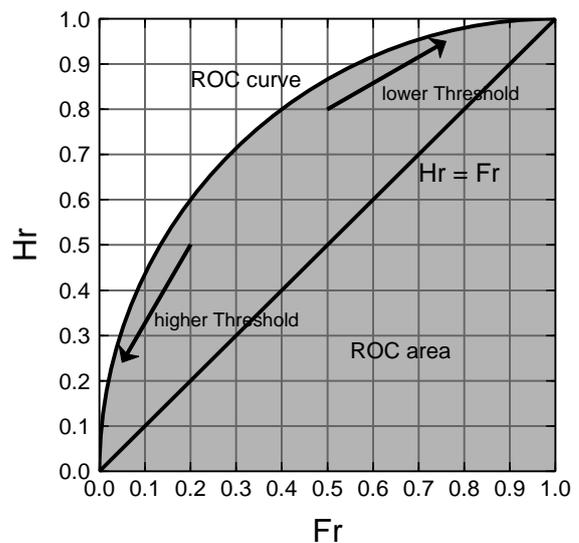


図 4.7.3 ROC 曲線の模式図。横軸は F_r 、縦軸は H_r である。灰色の領域の面積が ROC 面積である。

x に対する CRPS は次式で定義される。

$$\text{CRPS} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \int_{-\infty}^{\infty} [P_i(x) - A_i(x)]^2 dx$$

$$(0 \leq \text{CRPS}) \quad (4.7.40)$$

ここで、 N は標本数、 P_i と A_i はそれぞれ予測と実況の累積分布関数であり、次式で定義される。

$$P_i(x) = \int_{-\infty}^x \rho_i(x') dx' \quad (4.7.41)$$

$$A_i(x) = H(x - a_i) \quad (4.7.42)$$

ここで、 ρ_i は予測された確率密度関数、 a_i は実況値、 $H(x)$ は階段関数である。

$$H(x) = \begin{cases} 0 & x < 0 \\ 1 & x \geq 0 \end{cases} \quad (4.7.43)$$

CRPS は完全に適中する決定論的な予測で最小値 0 をとり、0 に近いほど予測の精度が高いことを示す。単位は物理量 x と同じである。

また、物理量 x が閾値 t 以下となる現象の確率予測に対するブライアスコアを $\text{BS}(t)$ とおくと、

$$\text{CRPS} = \int_{-\infty}^{\infty} \text{BS}(t) dt \quad (4.7.44)$$

の関係がある。

参考文献

- 幾田泰醇, 2010: 高分解能モデルの降水予報精度評価に適した検証手法. 平成 22 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 11–17.
- 梅津浩典, 室井ちあし, 原旅人, 2013: 検証指標. 数値予報課報告・別冊第 59 号, 気象庁予報部, 6–15.
- 北川裕人, 2005: 全球・領域・台風モデル. 平成 17 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 38–43.
- 高野清治, 2002: アンサンブル予報の利用技術. 気象研究ノート, **201**, 73–103.
- 氏家将志, 堀田大介, 黒木志洸, 2019: スペクトラルブロッキングの軽減. 数値予報課報告・別冊第 65 号, 気象庁予報部, 25–29.
- Murphy, A. H., 1973: A new vector partition of the probability score. *J. Appl. Meteor.*, **12**, 595–600.
- Roberts, N. M. and H. W. Lean, 2008: Scale-Selective Verification of Rainfall Accumulations from High-Resolution Forecasts of Convective Events. *Mon. Wea. Rev.*, **136**, 78–97.
- Roebber, P. J., 2009: Visualizing Multiple Measures of Forecast Quality. *Wea. Forecasting*, **24**, 601–608.
- Schaefer, J. T., 1990: The critical success index as an indicator of warning skill. *Wea. Forecasting*, **5**, 570–575.

Stanski, H. R., L. J. Wilson, and W. R. Burrows, 1989: Survey of common verification methods in meteorology. *Research Rep.*, **89-5**, Forecast Research Division, Atmospheric Environment Service, Environment Canada, 114 pp.

Wilks, D. S., 2011: *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*, International Geophysics, Vol. 100. Academic Press, 334–340 pp.

令和4年度数値予報解説資料集

令和5年1月20日発行

ISSN 2758-1330

編集 気象庁情報基盤部 数値予報課

〒105-8431 東京港区虎ノ門3-6-9

発行 気象庁情報基盤部

Copyright © 気象庁情報基盤部 2023

Printed in Japan

著作権法で定める範囲を超えて、無断で転載または複写
することを禁止します。