

図 1.2.1 気象庁のスーパーコンピュータと数値予報システムの歴史(2019年12月現在)

## (2) 気象庁数値予報システム<sup>1</sup>

気象庁は1959年(昭和34年)3月に官公庁として初めてスーパーコンピューター(当時は、大型計算機と呼ぶ)を導入し、その年の6月から数値予報業務を開始しました。米国気象局が世界で初めて数値予報業務を開始した1955年から遅れること4年です。当庁の数値予報は、北半球バランス・バロトロピックモデルからスタートしました。これまで現業運用されてきた数値予報モデルの歴史を図1.2.1に示しています。第1項で書いたように、平成の30年間(1989~2019年)に気象庁で現業運用された数値予報システムは第5世代数値解析予報システム(NAPS5)から第10世代数値解析予報システム(NAPS10)の6世代にわたります。数値予報50周年を迎えた2009年はNAPS8が運用されていました。

NAPS5では全球モデル(GSM)を、NAPS6ではメソモデル(MSM)を、NAPS7では全球アンサンブル予報システム(GEPS)の前身である週間アンサンブル予報システムを、NAPS8では台風アンサンブル予報システムを、NAPS9では局地モデル(LFM)を、NAPS10ではメソアンサンブル予報システム(MEPS)の運用を開始しています。以下、それぞれについて振り返ってみます。現在運用されている数値予報システムは表1.2.1に示す通りです。

表 1.2.1 現在運用中の数値予報システム一覧(但し、毎時大気解析、季節アンサンブルを除く)

数値予報システム	全球数値予報システム	メソ数値予報システム	局地数値予報システム	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)
主な利用目的	天気予報 週間天気予報 台風進路予報・強度予報 MSM側面境界条件	防災気象情報 降水短時間予報 航空気象情報 天気予報 LFM側面境界条件	航空気象情報 防災気象情報 降水短時間予報	台風進路予報 週間天気予報 早期天候情報 2週間気温予報 1か月予報	防災気象情報 航空気象情報
予報領域	全球	日本とその周辺領域 (3160 km x 2600 km)	日本とその周辺領域 (4080 km x 3300 km)	全球	日本とその周辺領域 (3160 km x 2600 km)
予報モデル	全球モデル (GSM)	メソモデル (MSM)	局地モデル (LFM)	GSM+確率的物理過程強制法	MSM
水平格子間隔	TL959 (≈ 20 km)	5 km	2 km	TL479 (≈ 40 km) (~432時間) TL319 (≈ 55 km) (432時間~)	5 km
鉛直層数 (上端高度)	100層 (0.01 hPa)	76層 (21.8 km)	58層 (20.2 km)	100層 (0.01 hPa)	76層 (21.8 km)
予報時間、メンバー数 (初期時刻)	264時間 (12 UTC) 132時間 (00, 06, 18 UTC)	51時間 (00, 12 UTC) 39時間 (03, 06, 09, 15, 18, 21 UTC)	10時間 (毎正時)	132時間、27メンバー(06,18UTC、台風等が存在する時※) 216時間、27メンバー(00,12UTC、毎日) 432時間、13メンバー (00, 12 UTC、毎日) 816時間、13メンバー (00, 12 UTC、火水)	39時間 (00, 06, 12, 18 UTC)
初期値	全球解析	メソ解析	局地解析	全球解析+初期摂動	メソ解析+初期摂動
解析手法/初期摂動作成手法	ハイブリッド4次元変分法	4次元変分法	3次元変分法	特異ベクトル法、局所アンサンブル変換カルマンフィルター	特異ベクトル法
データ待受時間	[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)	50分	30分	-	-

(※) 全般海上予報区(赤道~北緯60度、東経100~180度)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24ノット以上の熱帯低気圧が存在し、24時間以内に予報区または風暴警戒域が同区内に入ると予想された場合に実行される

<sup>1</sup> 本田 有機(数値予報モデル開発推進官)

(a) 全球数値予報システム(全球モデルと全球解析)

平成が始まる直前の1987年12月に全球を計算対象とする全球モデル(GSM)の試験運用を開始しました。1988年3月には北半球スペクトルモデルの運用を終了し、GSMの本運用を開始しました。運用開始以降のGSMの主な変更は米原(2019)に、非常に良くまとめられています。ここでは、米原(2019)の表1.1.1を再掲することで、GSMの変更履歴の概要を紹介することといたします(表1.2.2)。なお、表1.2.2のGSMyyymmはGSMに改良が導入された西暦の下二桁(yy)と月(mm)を示しています。表の中の分解能の表記について、はじめのTもしくはTLは三角形波数切断を意味し、その後の数字は切断波数を表わしています。Tの場合は2次格子、TLの場合は線形格子を意味しています。また、その後のLは鉛直層を意味し、直後の数字は層数を表わしています。

GSMの改良は継続的に行われていますが、2002年度から2004年度前半までの2年間半には「全球モデル開発推進プロジェクト」が実施されました(気象庁予報部2004, 2005)。「短期予報の精度を世界のトップレベルに」というビジョンのもと、「500hPa高度の24時間予報誤差の前12ヶ月平均値を、プロジェクト開始時点(2002年度当初)に比べて25%減らすこと」という具体的な数値目標を設定して様々な開発に取り組み、プロジェクトが終了した2004年9月には、数値目標に対する達成率が北半球は78%、南半球は100%という成果を挙げました。なお、本プロジェクトの開発課題の一つであった全球4次元変分法(全球4DVar)を2005年2月に全球解析に導入しています。

数値予報50周年を迎えた2009年以降は、2012年12月から2017年5月まで5回、GSMの改良が行われていますが、それぞれの改良について変更点の概要と狙い、および、主な改善点が米原(2019)に記載されています。水平解像度に関しては、2007年11月に、当時としては世界最高の水平解像度を誇るTL959(約20km)に高解像度化されて以来特に変わりはありません。全球解析のインナーモデルの水平解像度は、既にGSMに実装されていたセミラングレンジ法などの技術を導入することで、2011年11月にT159からTL319(約55km)に更新されました(門脇・吉本2012)。GSM及び全球解析の鉛直層は、大気成層圏・対流圏における鉛直構造の表現の精緻化や、人為的な上部境界の影響の低減、衛星観測データのさらなる利用を目指して、2014年3月に60層から100層へ増強され、モデルトップも0.1hPaから0.01hPaへ引き上げられ、合わせて放

表 1.2.2 GSM の主な更新履歴  
(米原 (2019) 表 1.1.1 再掲)

バージョン	主な変更内容
GSM8803	運用開始 (T63L16、最上層 10 hPa)
GSM8911	T106L21 へ仕様向上、ハイブリッド座標系と新陸面過程の導入
GSM9603	T213L30 へ仕様向上、新積雲対流スキームの導入
GSM9912	雲水スキームの導入、積雲対流過程と放射過程の改良
GSM0103	T213L40・最上層 0.4 hPa へ仕様向上、積雲対流過程の改良
GSM0305	積雲対流過程の改良、及び雪の近赤外アルベドの調整
GSM0407	層積雲スキームの導入、雲水落下・積雲対流スキームの改良、氷床アルベドの調整
GSM0412	晴天放射スキームの改良
GSM0502	TL319L40 へ仕様向上、セミラングレンジ移流スキームの導入
GSM0507	放射過程における雲の取扱いの改良、オゾン気候値の改定
GSM0711	TL959L60・最上層 0.1 hPa へ仕様向上、時間積分の 2 タイムレベル化、エーロゾル気候値の改定
GSM0801	積雲対流過程の改良
GSM0808	力学過程の改良、適合ガウス格子の採用
GSM1212	層積雲スキームの改良
GSM1304	放射過程 (エーロゾル気候値、水蒸気吸収係数) の改良
GSM1403	TL959L100・最上層 0.01 hPa へ仕様向上、放射・境界層・重力波・積雲過程の改良、陸面初期値利用の改良
GSM1603	積雲対流・雲・陸面・放射・海水・海面過程、及び力学過程の改良
GSM1705	積雲対流・雲・陸面・放射・海水過程、及び力学過程の改良

射や重力波、境界層等の各物理過程も改良されています(米原 2014)。その後 2 年かけて、「予測誤差はモデルの諸過程が持つ問題が複雑に絡み合った結果生じている」という認識のもと、科学的な正しさを重視しつつ、GSM 全体を各過程の開発者が共同で開発する方針に則り、積雲対流・雲・放射・海面などの多くの物理過程を改良し、長年の課題であった中層乾燥バイアスや下層低温バイアスなどの予測特性の改善に成功しました(米原 2016)。NAPS9 の最後の更新となる 2017 年 5 月には、前回の更新時に認識はされつつも改善出来ていなかった問題に取り組み、再び積雲対流、雲、放射、陸面、海面等多くの物理過程を改良しています(米原 2017)。2019 年 12 月には、全球アンサンブル予報システム(全球 EPS)から算出した予報誤差を考慮した手法(ハイブリッド同化)へ高度化しました(気象庁 2019)。

GSM は全球アンサンブル予報システムとともに、台風予報や短期・週間天気予報を支援する基盤モデルとなっており、季節予報モデルや気候モデルとしても利用されており、今日では全庁的な開発体制がとられています。全球モデルについて書かれた最新の数値予報課報告・別冊(気象庁予報部 2019)も、数値予報課、気候情報課や気象研究所などが分担して執筆しています。

#### (b) 全球アンサンブル予報システム(週間アンサンブルと台風アンサンブル)

2001 年 3 月に NAPS7 の運用とともに、週間天気予報の支援を目的として、週間アンサンブル予報システム(週間 EPS)の運用を開始しました(経田 2001)。運用開始当初は、初期値摂動は成長モード育成法により作成していましたが、2007 年 11 月に特異ベクトル法を導入しました。更に、予報モデルの不確実性を考慮するためにモデルアンサンブル手法として、2010 年 11 月には確率的物理過程強制法が導入されました。週間 EPS の改良については越智(2016)にまとめられています。

台風への適切な防災対応判断の支援に向けて台風進路情報を充実させるため、アンサンブル予報による不確実性の情報を付加し、また、アンサンブル平均による台風進路予報の精度向上を期待して、2008 年の台風第 1 号(つまり、2008 年 2 月)より、台風アンサンブル予報システム(台風 EPS)の運用を開始しました(小森・山口 2008)。台風 EPS は、気象庁予報部予報課の予報担当者による熱帯低気圧の解析に基づいて熱帯低気圧が日本付近に発生する場合<sup>2</sup>に、1 日 4 回 00, 06, 12, 18UTC を初期時刻として実行されました。台風 EPS の改良については経田(2016)を参照ください。

気象庁は、週間 EPS と台風 EPS に加えて、1 か月予報支援のために 1 か月アンサンブル予報システム運用をしていました。これらのシステムを一体的に開発し、開発成果の共有や相互活用を促進するとともに、システム間の数値予報資料の整合性の向上や、運用に必要な計算機資源の効率的な利用を図るため、2017 年 1 月に週間 EPS と台風 EPS を置き換える形で全球 EPS の運用を開始し、同年 3 月には予報時間を 1 か月先まで延長しました(山口 2017)。これに伴い、1 か月

---

<sup>2</sup> 全般海上予報区(赤道～北緯 60 度、東経 100～180 度)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に実行される。

EPS の運用は終了しました。全球 EPS を導入するにあたり、大きな改良がされています。鉛直層数が 60 層から 100 層に増強され、予報モデルも導入当時の最新のバージョンに更新されました。初期値摂動作成手法には、新たに局所アンサンブル変換カルマンフィルタ(LETKF)が導入されました(太田・堀田 2016a)。そして、海面水温摂動を新たに導入し、下部境界の不確実性も考慮し始めました(太田・堀田 2016a)。これ以降、2019 年末まで大きな変更は行われていません。

### (c) メソ数値予報システム(メソモデルとメソ解析)

メソ数値予報システムは、NAPS7 が導入された 2001 年 3 月に運用を開始しました。運用開始から今日までのメソ数値予報システムの変遷については、本田(2008)と成田(2020)にまとめられています。

運用当初はメソモデル(MSM)として領域スペクトルモデル(RSM)と同じ静力学モデルが用いられていましたが、2004 年 9 月に気象庁非静力学モデル(JMA-NHM)(気象庁予報部 2003, 2008; Saito et al. 2006)が導入されました(藤田 2004)。NAPS8 が導入された 2006 年 3 月には、水平格子間隔が 10km から 5km に高解像度化され、予報頻度も 1 日 4 回から 8 回になりました(荒波ほか 2006)。2007 年 5 月には予報時間が 15 時から 33 時間へ延長されています<sup>3</sup>(原 2007)。その後、NAPS9 が導入されて 1 年後の 2013 年 3 月に、側面境界に近い地域の予報精度の向上と、局地モデル(LFM)へのより適切な側面境界値の提供を目的に、予報領域が拡張されました(越智・石井 2013)。また、同年 5 月には、予報作業の支援強化と、TAF(運航用飛行場予報)の有効期間と発表時刻の変更への対応のために、全初期時刻における予報時間を 39 時間に延長しました(越智・石井 2013)。NAPS10 になり、防災気象情報等の作成支援への MSM の利活用を更に進めるために、2018 年 3 月に、00, 12UTC 初期値の予報時間を 39 時間から 51 時間へと延長しました(荒巻・氏家 2018)。

2004 年に導入された JMA-NHM は、導入時に力学・物理過程が大幅に改良されていますが、2006 年の高解像度化、2007 年の予報時間延長に合わせて力学・物理過程の改良が行われています(石田ほか 2005; 荒波ほか 2006)。2010 年 11 月には、地形に沿った不自然な降水を改善するため、積雲対流スキームを改良しています。(成田・森安 2010)。その後は、局地モデルの開発やスパコン更新への対応により注力していましたが、2015 年 5 月に、局地モデルに導入された asuca(後述)の開発の中で得られた知見を活かして、境界層の改良等が行われています(原ほか 2015b)。

一方、JMA-NHM の改良を行う傍ら、2007 年から次世代非静力学モデル asuca の開発が進められました(気象庁予報部 2014)。asuca の開発理念は、基本的に、長年改良が続けられてきた JMA-NHM の良いところを引き継ぎつつ、最先端の知見を取り入れて、データ同化も一体に効率的な開発を行える現業数値予報システムを構築することです(石田・藤田 2014)。4DVar に必須である接線形・随伴コードは予報モデルと同じプログラムに組み込まれ(小野 2014)、物理過程は

---

<sup>3</sup> 1 日 8 回のうち 4 回(03,09,15,21UTC 初期値)の予報時間を延長しています。

JMA-NHM とも共有出来るように独立したライブラリとして整備されました。asuca は局地モデル (LFM) に先ずは導入され(後述)、2017 年 2 月に MSM として導入されました(原 2017)。

MSM の初期値を作成するメソ解析には、2002 年 3 月に、領域解析としては世界初の 4 次元変分法(4DVar)である静力学メソ 4DVar が導入されました(石川・小泉 2002)。しかし、その翌年から JMA-NHM に基づいた非静力学メソ 4 次元変分法(JNoVA)(気象庁予報部 2010)の開発が開始され、2009 年 4 月に更新されました(本田・沢田 2009)。その後、2015 年 12 月には背景誤差共分散行列の定式化を改良し誤差統計を取り直す(藤田ほか 2016)など改良されています。

asuca 同様、asuca に基づいた変分法解析システム(asuca-Var)(幾田 2014)の開発も進められており、局地解析に先ずは導入され(後述)、2020 年 3 月にはメソ解析として導入される予定です。

この他、2019 年 3 月には、下部境界条件に使われている海面水温(SST)を、全球日別海面水温解析(MGDSST; 栗原ほか 2006)から北西太平洋高解像度日別海面水温解析(HIMSST; 気象庁地球環境海洋部 2016)に変更しました(太田ほか 2019)。

#### (d) メソアンサンブル予報システム

2019 年 6 月に本運用が始まったメソアンサンブル予報システム(MEPS)は、MSM の予測に対し信頼度・不確実性等の情報を付加することを目的とした、最も新しい現業数値予報システムです(河野ほか 2018)。その開発の歴史は長く、2005 年に JNoVA のために開発をしていた JMA-NHM の接線形・随伴モデルを用いた特異ベクトル法(SV 法)によるメソアンサンブル予報の研究が気象研究所で始まり、この研究成果を引き継いで 2007 年から数値予報課で現業化に向けて開発が進められました(小野 2010)。全球特異ベクトル法とメソ特異ベクトル法を組み合わせる初期摂動を作成する MEPS を構築し、2015 年 3 月から部内試験運用を開始しています(小野 2016)。当初は 1 日 1 回、11 メンバーの仕様でしたが、NAPS9 から NAPS10 へ更新されたのを機に、1 日 4 回 21 メンバーへと仕様が拡張されました。部内試験運用期間中は、MEPS の特性を確認し、正式運用に向けた改良を随時導入するとともに、気象庁内において現業予報作業での利用方法の検討を行ってきました。量的予報の基礎資料である MSM のアンサンブル予報システムであることから、MEPS の解像度も MSM と同じにしています。その分計算コストが高いため、MSM の予報頻度が 1 日 8 回であるのに対して、1 日 4 回に抑えられています。

2020 年 3 月には、MEPS の各メンバーに MSM ガイダンスと同じ手法を適用したメソアンサンブルガイダンスの本運用が始まります(石川ほか 2019)。

#### (e) 局地数値予報システム(局地モデルと局地解析)

防災気象情報や飛行場予報の高度化を目的に、NAPS9 での本運用を目指して NAPS8 から局地モデル(LFM)の開発は始まっています(竹之内ほか 2008)。当初は計算機資源が十分確保出来ないことを危惧して、日本領域を複数の計算領域(具体的には 3 領域)で被うようなことも検討されていました(氏家 2009)。2010 年 11 月から LFM の試験運用を開始していますが、この時も東北地方南部から九州地方を覆う西日本を中心とした領域でした(永戸ほか 2010)。予報モデルは

MSM と同じ JMA-NHM を採用していましたが、積雲対流パラメタリゼーションの不確実性を避けるため、水平格子間隔を 2km として、このパラメタリゼーションを利用していませんでした。試験運用では 1 日 8 回 9 時間予報を行っていましたが、本運用時には毎時の運用を計画しており、限られた時間内で最新の観測データを有効に使うことが求められていました。このため、LFM の初期値を作成する局地解析には、計算に要する時間の短い非静力学メソ 3 次元変分法 (JNoVA-3DVAR) が採用されました(藤田・倉橋 2010)。局地解析の水平格子間隔も 5km としています。しかし、より多くの観測データを利用して解析の精度を高めるために、初期時刻の 3 時間前から JNoVA-3DVAR による解析と 1 時間予報を繰り返す同化システムとなっています。2011 年 3 月の東日本大震災を機に、北海道～近畿地方を覆う東日本を中心とした領域に変更して試験運用を継続し、NAPS9 が導入された 2 か月後の 2012 年 8 月に本運用となりました(永戸ほか 2013)。2013 年 5 月には、予報頻度を 1 日 24 回に増強し、予報領域も日本全域を覆うように拡張されました。

2015 年 1 月に、次世代非静力学モデル asuca を LFM として、変分法データ同化システム asuca-Var (3 次元変分法) を局地解析として導入しました(原ほか 2015a)。この際に、積雲対流の発達初期における鉛直輸送の表現向上を主目的としたパラメタリゼーションを導入しています(河野・原 2014)。また、asuca-Var により、地中温度と土壌体積含水率の解析変数化や偽相対湿度インクリメント調節の導入など高度化されています。NAPS10 へ更新後の 2019 年 3 月には、航空交通管理のための気象情報提供での利用における利便性の向上を目的として全初期値の予報時間を 9 時間から 10 時間に延長しています(荒巻・氏家 2018)。

#### (f) 毎時大気解析

大気の実況監視を目的として、1 日 24 回毎正時に風と気温の客観解析を行っています。2001 年 4 月に「毎時下層風解析」として運用を開始し、2003 年 11 月に航空ユーザー向けに上層風の解析を開始するのを契機に「毎時風解析」となり、2006 年 3 月には「毎時大気解析」として気温の解析も開始しました(西嶋 2005)。2007 年 3 月には、最適内挿法から、当時開発中であった JNoVA を元にした 3 次元変分法へと更新されました(藤田 2007)。3 次元変分法に高度化したことで、ドップラーレーダによる風を動径風データとして同化することが可能となりました。

2017 年 7 月には、局地解析にも導入されていた asuca-Var (3 次元変分法) に更新されています(原・工藤 2017)。

#### (g) 観測データの利用

初期値作成のために、多種多様な観測データが利用されています。2000 年代には解析手法として変分法が採用されはじめ、解析変数と線形関係にない観測データを同化することが出来るようになり、衛星輝度温度データ等の直接同化が可能となりました。2001 年 9 月、全球解析に 3 次元変分法が導入され、2003 年 5 月には ATOVS 輝度温度の直接同化が始まりました(計盛・岡本 2004)。メソ解析には 2002 年 3 月に 4 次元変分法が導入され、同時に解析雨量の同化が始まりました(石川・小泉 2002)。2000 年代は衛星データを中心に新規利用が進みましたが、2010 年代も

その傾向は変わりありません。図 1.2.2 及び図 1.2.3 は、全球解析及びメソ解析に同化されている観測データの量と種類について時系列で示していますが、今日では衛星データの占める割合が非常に大きくなっています。この図でも際立っているハイパースペクトル赤外サウンダ(HSS)データなど、ここ 10 年に着目して新規に利用開始した観測データのいくつかについて紹介したいと思います。なお、2015 年頃までの観測データの利用の現状については、気象庁予報部(2015)にまとめられています。

まずは、それぞれ 2014 年と 2016 年に打ち上げられた、次世代イメージャを搭載したひまわり 8・9 号です。空間解像度が赤外画像で 4 km から 2 km に、観測チャンネル(バンド)数が 5 チャンネルから 16 チャンネルへ、時間分解能が 30 分から 10 分(フルディスク観測)へと増強されました。水蒸気チャンネルの晴天放射輝度温度データ(CSR)は 1 チャンネルから 3 チャンネルになり、2016 年 3 月より利用を開始しています(計盛 2016)。また、大気追跡風も算出方法を高度化したことで質と量も改善しており、CSR と同時に利用を開始しています(山下 2016)

次は、HSS データに着目します。HSS は数千のチャンネルをもつ赤外サウンダで、対流圏や成層圏の気温や水蒸気の鉛直分布に関する情報が得られます。2002 年に打ち上げられた Aqua 搭載 AIRS をはじめ、Metop 搭載 IASI や Suomi-NPP および NOAA-20 搭載 CrIS のデータが利用可能です。他国の数値予報センターから数年遅れとなりましたが、2014 年 9 月に AIRS と IASI データの利用を開始し(岡垣 2015)、2018 年 3 月には CrIS データも利用を開始しました(亀川・計盛 2017)。

Suomi-NPP および NOAA-20 に搭載された次世代マイクロ波放射計 ATMS は、マイクロ波気温サウンダ AMSU-A や同水蒸気サウンダ MHS の後継センサーで、今後も米国の次世代現業極軌

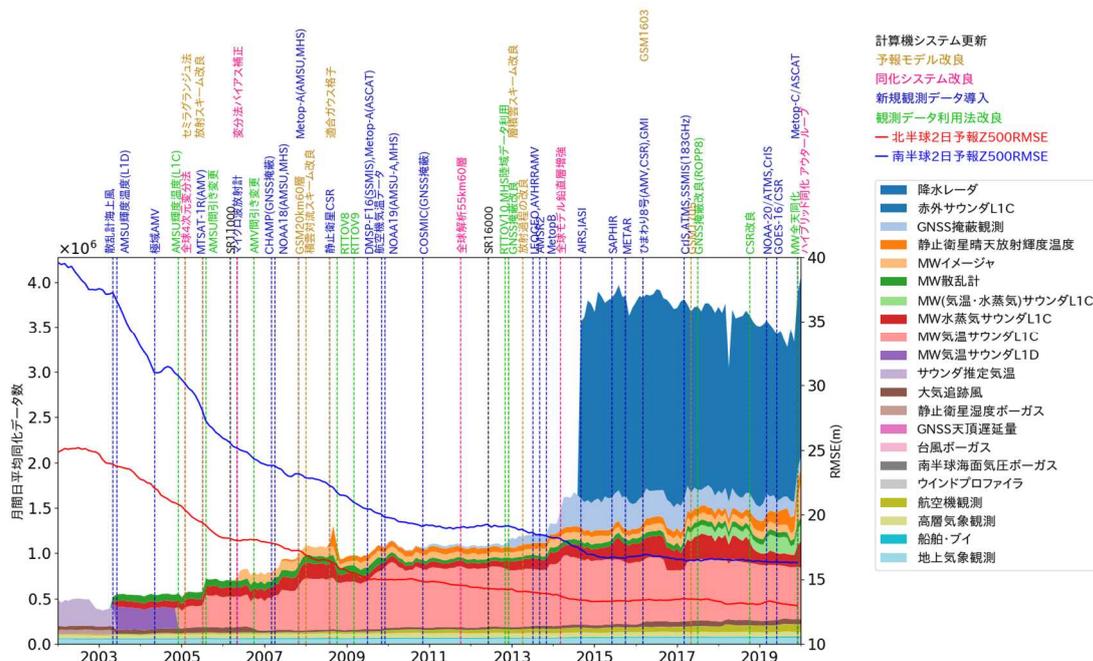


図 1.2.2 全球解析に同化されている観測データ数の時系列 (2002 年 1 月～2020 年 1 月)

道衛星に搭載される予定です。2017年3月に全球解析で利用を開始しています(平原 2017)。

地上リモートセンシングについては、レーダー反射強度に着目します。前述のとおり、解析雨量という形でメソ解析に同化されていますが、解析雨量には地上付近の低い仰角データしか利用されていません。数値予報結果から反射強度をシミュレートし、これを観測と比較し、最終的には観測された反射強度から推定される疑似的な相対湿度の鉛直1次元プロファイルデータを算出し同化する方法を新たに開発し、2011年6月より3次元の反射強度データの同化を開始しています(幾田 2011)。この手法を応用して、世界で初めて全球降水計画(GPM)衛星搭載二周波降水レーダ(DPR)のデータ同化をメソ解析で開始しました(幾田 2016)。

従来型観測については、高層観測データの利用に着目します。気象庁の高層観測では2010年までにレーウィンゾンデからGPSゾンデへの切り替えが完了しています。また、BUFR形式での高層観測データ通報の開始により、鉛直方向に高解像度のデータを取得することが出来るようになりました。2016年3月より、この高解像度データの利用をメソ解析で開始しましたが、これを機に、ゾンデが上昇するときに風に流された位置で同化出来るようになりました(酒匂 2016)。

最も新しい改良は、2019年12月に実施されたマイクロ波輝度温度データの全天同化です。全球解析のハイブリッド同化と合わせて実施され、これまで未使用であった雲・降水域のデータの利用を開始しています(気象庁 2019)。

ここで紹介したもの以外にも、初期値の精度改善のため、多くの新規観測データの利用を開始し、また、既に利用している観測データの利用方法の改良を実施しています。

なお、観測データの利用に際しては、予報精度への影響を評価するために、観測システム実験(OSE)を行っています。しかしこの手法は計算コストが非常にかかります。これを補うために、

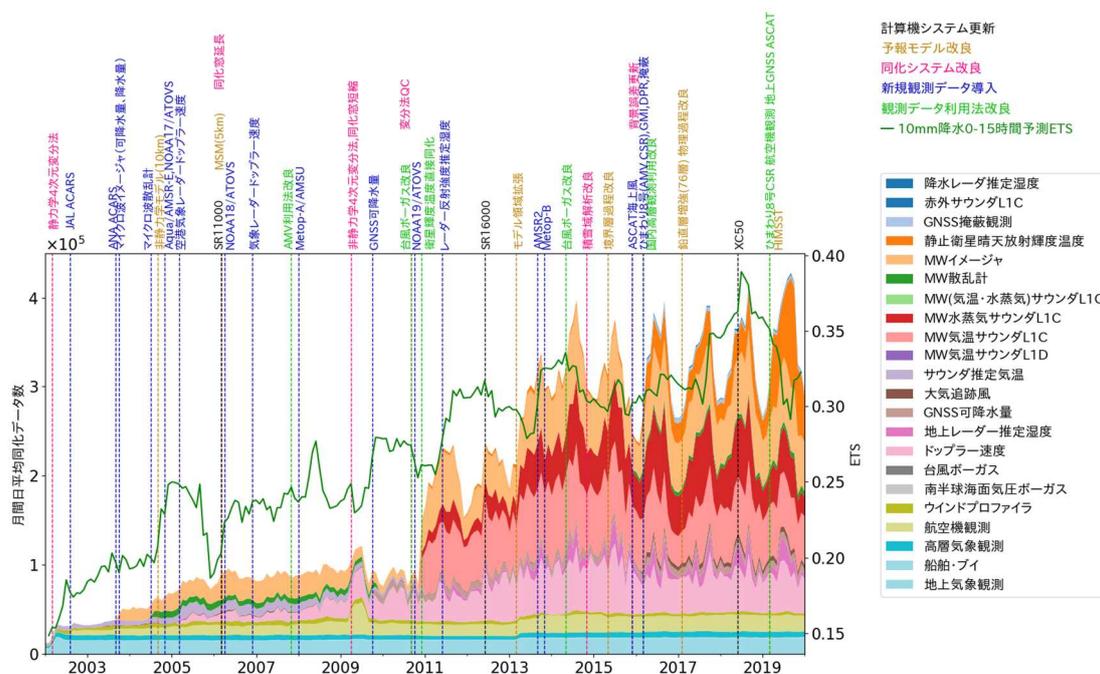


図 1.2.3 メソ解析に同化されている観測データ数の時系列(2002年1月～2020年1月)

4DVarのインナーモデルとして開発された接線形・随伴モデルを用いたFSOI(Forecast Sensitivity to Observation Impact)という感度解析手法が提唱されており、気象庁でもこれまで数度評価を実施し、他の数値予報センターと同様、今日の予測精度は衛星データに大きく依存していることなどが分かっています(石橋 2015)。

## (h) ガイダンス

1977年6月に初めて降水ガイダンスの配信を開始し、今日では天気予報や航空気象予報向けに様々なガイダンスが作成されています(表 1.2.3 参照)。ガイダンスについては気象庁予報部(2018)にまとめられています。

平成以降では1996年3月からカルマンフィルタ(KF)やニューラルネットワーク(NN)と呼ばれる逐次学習型ガイダンスが導入され始めました。

天気予報ガイダンスについては、2010年以降では、視程分布予想の追加(MSM2011年、GSM 2013年)、GSM・MSM24時間最大降水量ガイダンスの手法をNNから線形重回帰(MLR)に変更(2013年)、時系列湿度ガイダンスの追加(2016年)、MSM降雪量地点ガイダンスの追加や仕様拡充(2016年)、LFM降水量ガイダンスの開始(2018年)等が実施されています。2019年3月には、MSMやLFMの予報時間延長に合わせて、ガイダンスの予報時間も延長されています。また、2019年7月には、

表 1.2.3 現在運用中のガイダンス一覧

天気予報ガイダンスの一覧			
ガイダンス名	予測要素	手法	対象
降水ガイダンス	平均降水量	KF, FBC	20km格子 (GSM)
	降水確率	KF, FBC	5km格子 (MSM)
	最大降水量	NN, MLR	
降雪ガイダンス	雪水比・降水種別・最大降雪量	DM	5km格子
	降雪量地点	NN, FBC	アメダス地点
気温ガイダンス	時系列・最高・最低気温	KF	アメダス地点
	格子形式気温	KF	5km格子
風ガイダンス	定時・最大・最大瞬間風速	KF, FBC	アメダス地点
天気ガイダンス	日照率	NN	20km格子 (GSM)
	天気	FC	5km格子 (MSM)
発雷確率ガイダンス	発雷確率	LR	20km格子
湿度ガイダンス	時系列湿度	KF	気象官署(特別地域)
	日最小湿度	NN	気象観測所含む)
視程ガイダンス	視程分布予想	DM	20km格子 (GSM) 5km格子 (MSM)

航空気象予報ガイダンス			
ガイダンス名	予測要素	手法	対象
気温ガイダンス	時系列・最高・最低気温	KF	国内空港
風ガイダンス	定時・最大・ガスト風速	KF, FBC	
	ガスト発生確率	LR	
視程ガイダンス	天気	FC	
	視程、視程確率	KF, FBC	
雲ガイダンス	雲量、雲底高度	NN, FBC	
	雲底確率	LR	
発雷確率ガイダンス	発雷確率	天気予報Gから作成	
降雪ガイダンス	最大降雪量		
航空悪天GPV	乱気流指数	LR	0.5度格子(GSM) 1.25度格子(GSM) 40 km格子(MSM) 10 km格子(LFM)
	着氷指数	DM	
	積乱雲量、雲頂高度	DM	
	視程分布予報	DM	
	風、気温、湿度などの一般要素	モデルから内挿	

(※手法) MLR(線形重回帰)、KF(カルマンフィルタ)、NN(ニューラルネットワーク)、LR(ロジスティック回帰)、DM(診断手法)、FBC(頻度バイアス補正)、FC(フローチャート)

GSM12 時間・48 時間・72 時間最大降水量ガイダンス、MSM12 時間最大降水量ガイダンスの部内運用を開始しています。

また、航空気象予報ガイダンスについては、視程ガイダンスの改良(2010 年)、風ガイダンスの改良(2010, 2013 年)、雲底確率ガイダンスの追加(2010 年)、ガストガイダンスの追加(2011 年)が実施されている他に、飛行場予報(TAF)の予報時間延長に対応するため、航空気象予報ガイダンスの予報時間も 39 時間に延長されています(2013 年)。さらに、空域予報を支援する資料である航空悪天 GPV に乱気流指数が追加され(2010 年)、改良が実施されています(2014 年, 2018 年)。

なお、2020 年 3 月には、MEPS ガイダンスの運用が開始される予定です。

## 参考文献

- 気象庁, 2019: 台風進路予測や降水予測の精度が改善します～全球モデルの初期値作成処理の高度化～. 令和元年 12 月 10 日付け報道発表.
- 気象庁地球環境海洋部, 2016: 北西太平洋高解像度日別海面水温解析格子点資料の提供について. 配信に関する技術情報(海洋編)第 444 号.
- 気象庁予報部, 2003: 気象庁非静力学モデル. 数値予報課報告・別冊第 49 号, 気象庁予報部, 194pp.
- 気象庁予報部, 2004: 全球モデル開発プロジェクト(I). 数値予報課報告・別冊第 50 号, 気象庁予報部, 142pp.
- 気象庁予報部, 2005: 全球モデル開発プロジェクト(II). 数値予報課報告・別冊第 51 号, 気象庁予報部, 117pp.
- 気象庁予報部, 2008: 気象庁非静力学モデル II - 現業利用の開始とその後の発展 -. 数値予報課報告・別冊第 54 号, 気象庁予報部, 265pp.
- 気象庁予報部, 2010: 非静力学メソ 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.
- 気象庁予報部, 2014: 次世代非静力学モデル asuca. 数値予報課報告・別冊第 60 号, 気象庁予報部, 151pp.
- 気象庁予報部, 2015: 観測データ利用の現状と課題. 数値予報課報告・別冊第 61 号, 気象庁予報部, 98pp.
- 気象庁予報部, 2018: ガイダンスの解説. 数値予報課報告・別冊第 64 号, 気象庁予報部, 248pp.
- 気象庁予報部, 2019: 全球モデルの改良と展望. 数値予報課報告・別冊第 65 号, 気象庁予報部, 164pp.
- 荒波恒平, 原旅人, 瀬川知則, 三浦大輔, 成田正巳, 本田有機, 2006: メソ数値予報モデルの改良と予報時間延長. 平成 18 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 55-92.
- 荒巻健智, 氏家将志, 2018: メソ・局地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, 7-8.
- 幾田泰醇, 2011: メソ解析におけるレーダー反射強度データの同化. 平成 23 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 9-12.
- 幾田泰醇, 2014: asuca 変分法データ同化システム. 数値予報課報告・別冊第 60 号, 気象庁予報部, 91-97.
- 幾田泰醇, 2016: GPM/DPR データのメソ解析での利用開始. 平成 28 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 51-53.
- 石川宜広, 小泉耕, 2002: メソ 4 次元変分法. 数値予報課報告・別冊第 48 号, 気象庁予報部, 37-59.
- 石川宜広, 山下浩史, 井上卓也, 森祐貴, 工藤淳, 小林大輝, 土田尚侑, 井藤智史, 2019: メソアンサンブルガイダンス. 令和元年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 16-55.

- 石田純一, 瀬川知則, 大森志郎, 中山寛, 2005: 新しいメソ数値予報モデル. 平成 17 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 14-32.
- 石田純一, 藤田匡, 2014: asuca の開発理念. 数値予報課報告・別冊第 60 号, 気象庁予報部, 19-28.
- 石橋俊之, 2015: FSO による評価. 数値予報課報告・別冊第 61 号, 気象庁予報部, 90-93.
- 氏家将志 2009: 高分解能局地モデルの開発と実験運用. 平成 21 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 90-96.
- 永戸久喜, 石田純一, 藤田匡, 石水尊久, 平原洋一, 幾田泰醇, 福田純也, 佐藤芳昭, 石川宜広, 吉本浩一, 2010: 局地モデルの試験運用. 平成 22 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 1-27.
- 永戸久喜, 原旅人, 倉橋永, 2013: 日本域拡張・高頻度化された局地モデルの特性. 平成 25 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 18-41.
- 太田行哉, 岡部いづみ, 小屋松進, 西本秀祐, 谷寧人, 2019: メソ解析における観測データ利用の改良及びメソ数値予報システムにおける北西太平洋高解像度日別海面水温解析の利用開始. 令和元年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 61-67.
- 太田洋一郎, 堀田大介, 2016a: 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.
- 太田洋一郎, 堀田大介, 2016b: 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.
- 大野木和敏, 入口武史, 2003: 数値解析予報実験システム NAPEX. 気象庁測候時報, 70, 171-187.
- 岡垣昌, 2015: ハイパースペクトル赤外サウンダ. 数値予報課報告・別冊第 61 号, 気象庁予報部, 43-46.
- 越智健太, 2016: 週間アンサンブル予報システム. 数値予報課報告・別冊第 62 号, 気象庁予報部, 27-34.
- 越智健太, 石井憲介, 2013: 領域拡張・予報時間 39 時間化されたメソモデルの特性. 平成 25 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 1-17.
- 小野耕介 2010: メソ特異ベクトル法. 数値予報課報告・別冊第 56 号, 気象庁予報部, 93-104.
- 小野耕介 2014: 接線形・随伴モデルの実装. 数値予報課報告・別冊第 60 号, 気象庁予報部, 98-103.
- 小野耕介 2016: メソアンサンブル予報システムの開発状況. 数値予報課報告・別冊第 62 号, 気象庁予報部, 100-113.
- 計盛正博, 岡本幸三, 2004: ATOVS 輝度温度の直接同化. 数値予報課報告・別冊第 50 号, 気象庁予報部, 93-104.
- 計盛正博, 2016: ひまわり 8 号晴天放射輝度温度の利用開始. 平成 28 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 46-49.
- 亀川訓男, 計盛正博, 2017: 全球解析における SuomiNPP/CrIS 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, 73-74.
- 門脇隆志, 吉本浩一, 2012: 全球解析の高解像度化. 平成 24 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 87-91.
- 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.
- 河野耕平, 氏家将志, 國井勝, 西本秀祐, 2018: メソアンサンブル予報システム. 平成 30 年度数値予報研修テキ

スト, 気象庁予報部, 1-15.

経田正幸, 2001: 週間アンサンブル予報. 平成 13 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 38-41.

経田正幸, 2016: 台風アンサンブル予報システム. 数値予報課報告・別冊第 62 号, 気象庁予報部, 35-42.

栗原幸雄, 桜井敏之, 倉賀野連, 2006: 衛星マイクロ波放射計, 衛星赤外放射計及び現場観測データを用いた全球日別海面水温解析. 測候時報, **73**, S1-S18.

小森拓也, 山口宗彦, 2008: 台風アンサンブル予報システムの導入. 平成 20 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 27-30.

酒匂啓司, 2016: 国内ラジオゾンデ高解像度観測データのメソ解析での利用開始. 平成 28 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 59-62.

竹之内健介, 荒波恒平, 中山寛, 藤田匡, 2008: 高分解能局地モデル. 数値予報課報告・別冊第 54 号, 気象庁予報部, 195-222.

成田正巳, 森安聡嗣, 2010: メソモデルの対流スキームの変更. 平成 22 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 53-62.

成田正巳, 2020: メソ・局地数値予報システムの改良. 数値予報課報告・別冊第 66 号, 気象庁予報部, 1-7.

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, 2007: モデルの変更点の概要. 平成 19 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 29-31

原旅人, 幾田泰醇, 伊藤享洋, 松林健吾, 2015a: asuca が導入された局地数値予報システム. 平成 27 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 1-23.

原旅人, 飯塚義浩, 白山洋平, 工藤淳, 草開浩, 2015b: メソ数値予報システムの改良. 平成 27 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 24-49.

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.

原旅人, 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, 61-65.

原旅人, 雁津克彦, 江河拓夢, 佐藤芳昭, 石橋俊之, 2017: 数値解析予報実験システム(NAPEX). 数値予報課報告・別冊第 62 号, 気象庁予報部, 62-75.

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, 70-74.

藤田司, 2004: 非静力学メソ数値予報モデルの概要. 平成 16 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 1-9.

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, 福田純也, 塚本暢, 2016: メソ数値予報システムの背景誤差の改良. 平成 28 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 63-67.

藤田匡, 倉橋永, 2010: 局地解析. 数値予報課報告・別冊第 56 号, 気象庁予報部, 68-72.

本田有機, 2008: メソ数値予報モデルと気象庁非静力学モデルの歴史. 数値予報課報告・別冊第 54 号, 気象庁予報部, 1-6.

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 29 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 65-71.

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.

山下浩史, 2016: ひまわり 8 号大気追跡風データの利用開始. 平成 28 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 43-46.

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.

米原仁, 2016: 全球数値予報システムの物理過程改良の概要. 平成 28 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 1-3.

米原仁, 2017: 全球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, 1-7.

米原仁, 2019: 気象庁全球モデルにおける近年の改良. 数値予報課報告・別冊第 65 号, 気象庁予報部, 1-11.

Saito, K., T. Fujita, Y. Yamada, J. Ishida, Y. Kumagai, K. Aranami, S. Ohmori, R. Nagasawa, S. Kumagai, C. Muroi, T. Kato, H. Eito and Y. Yamazaki, 2006: The Operational JMA Nonhydrostatic Mesoscale Model. *Mon. Wea. Rev.*, **134**, 1266-1298