



第2章 応用編

2.3 メソ数値予報システムの改良

はじめに

2020年3月25日 メソ数値予報システム(メソ解析・メソ予報)改良

- メソ解析 (MA; Meso-scale Analysis)
 - 非静力学モデル asuca に基づく4次元変分法データ同化システム asuca-Var を導入
 - 変更前は JMA-NHM に基づく JNoVA
 - メソ解析における時間推進演算子としての予報モデルとメソ予報における予報モデルを一致させる
- メソ予報 (MSM; Meso-Scale Model)
 - 科学的な知見に基づいて力学過程、雲物理過程、雲量診断、境界層過程、地表面過程を改良

以下では、更新されたシステムについて概要を示し、関連する留意点などを述べる

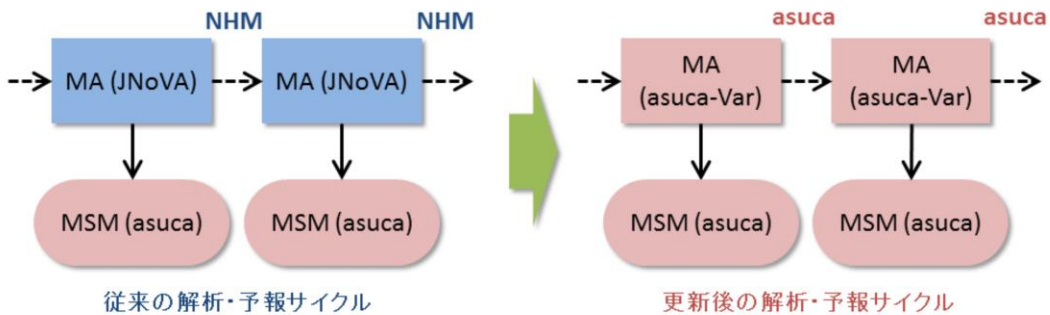
2020年3月25日に、メソ数値予報システム(メソ解析・メソ予報)改良が実施された。主な変更点としては、メソ解析に非静力学モデル asuca に基づく4次元変分法が導入され、またメソ予報(MSM)では力学過程、雲物理過程、雲量診断、境界層過程、地表面過程の改良が行われた(2017年2月よりMSMには asuca が導入されている)。

ここでは、変更の概要と予報特性の変化、および留意点について示す。なお、 asuca に関する全般的な説明は「数値予報課報告・別冊60号」に、それ以降の開発成果については「数値予報課報告・別冊第66号」に詳しい。

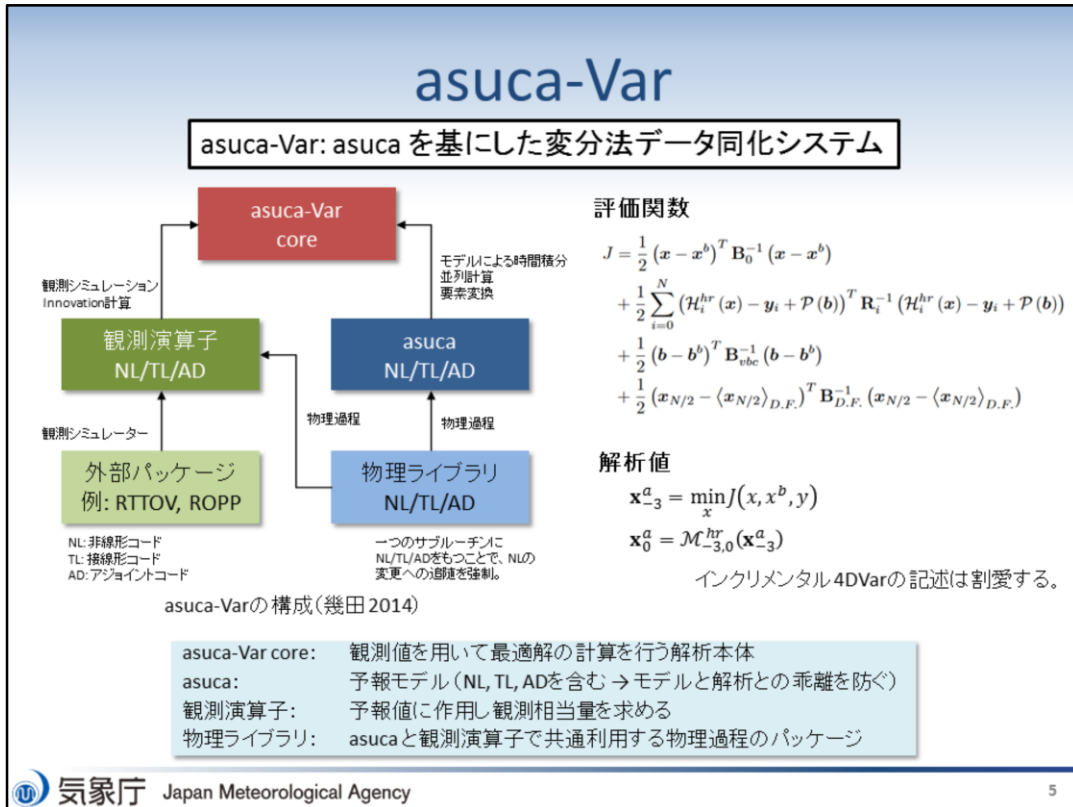
改良の概要

メソ解析 (MA) の更新

- JNoVA (JMA-NHMベース) から asuca-Var (asucaベース) にシステムを更新
 - 今回の更新で、利用されるモデルが解析と予報とで同じものとなり、より統合的なシステムとなる
 - イニシャルショックの軽減、マスバランスの向上
 - 予報・解析コードの共存を実現 → 持続可能な開発環境



これまでのメソ数値予報システムでは、メソ解析はNHMベースの4次元変分法 (JNoVA, Honda et al. 2005) が利用される一方で、メソ予報 (MSM) には2017年2月より asucaが利用されていた。このため、解析と予報とで異なるモデルが用いられており、予報初期のインバランスや異なるシステム維持に関わるコスト等が課題となっていた。今回の更新で、予報・解析共に asucaベースのシステムとなることで、イニシャルショックの軽減、マスバランスの向上に加えて、両者のコードが共有化されることで持続可能な開発環境が実現されることとなった。



asuca-Var(幾田 2014)は、asucaの初期値を作成することを目的とした変分法データ同化システムである。局地解析には2015年1月に3次元変分法として導入された(幾田 2015)実績があり、メソ解析には今回、4次元変分法として実装された。

図で示されるように、asuca-Varは予報モデル「asuca」、観測値を用いて最適解の計算を行う解析本体「asuca-Var コア」、予報値に作用し観測相当量を求める「観測演算子」で構成されており、asucaと観測演算子では、気象庁の物理過程ライブラリ(原 2014)が利用されている。また、asuca、物理過程ライブラリ、観測演算子には、それぞれ非線形(NL)、接線形(TL)、随伴(AD)コードが実装されている(TLとADコードは、4次元変分法における評価関数の極小値探索で利用される)。このようにNL、TL、ADコードをデータ同化システムの心臓部から分離することにより、予報モデルや観測演算子の更新に伴うasuca-Varコアの修正を最小限に抑えることができ、バグの混入防止や複数開発者による作業効率の向上が期待できる。特に、予報モデルがNLの他にTL、ADを持つことは、データ同化システムと予報モデルとの乖離を防止する点で非常に有意義となる(幾田 2014)。

スライド右部にasuca-Varによるメソ解析で用いられる評価関数を示す。右辺の各項はそれぞれ以下の通り。

- 右辺第1項: 背景項
- 右辺第2項: 観測項(バイアス補正項を含む)
- 右辺第3項: バイアス補正係数に関する項
- 右辺第4項: デジタルフィルタによる拘束項

輝度温度データに対する変分法バイアス補正手法を新規導入したため、従来の評価関数からバイアス補正に関する変更が加えられている。

メソモデル(MSM)の更新

- 雲量・雲物理
 - 氷雲量診断手法を更新
 - 雲物理過程の見直し
- 放射
 - 氷雲量診断手法を更新
- 境界層
 - MYNN3の逆勾配項の陰的評価を導入
- 地表面
 - 地表面フラックス交換係数の新しい計算手法を導入
 - 森林域での積雪被覆率を更新
 - 土壌水分スキームを更新
- 力学・モデルフレーム
 - 水平気圧傾度力の計算における最上下層の係数を修正
 - 有限体積法のセル中心で最適化した地形を導入

略称

MSM1702: 2017年2月更新版MSM

MSM2003: 2020年3月更新版MSM

次にMSMの更新について概要を示す。従来のMSMでは、以下の課題が挙げられていた。

- 上層雲が過多
- 雲水量と下層雲が過少
- 予報開始直後を除いて冬季の対流圏下層に低温バイアス
- 予報初期に見られる不自然な弱い降水
- 低気圧の過発達

MSM2003ではこれらの課題を解決することを目的とし、科学的な知見に基づいて力学過程、雲物理過程、雲量診断、境界層過程、地表面過程の改良を行った。なお、ここでは2017年2月に導入されたMSMを「MSM1702」、2020年3月に改良が行われたMSMを「MSM2003」と呼ぶことにする。

予測特性の変化

MSM予測特性の変化の概要

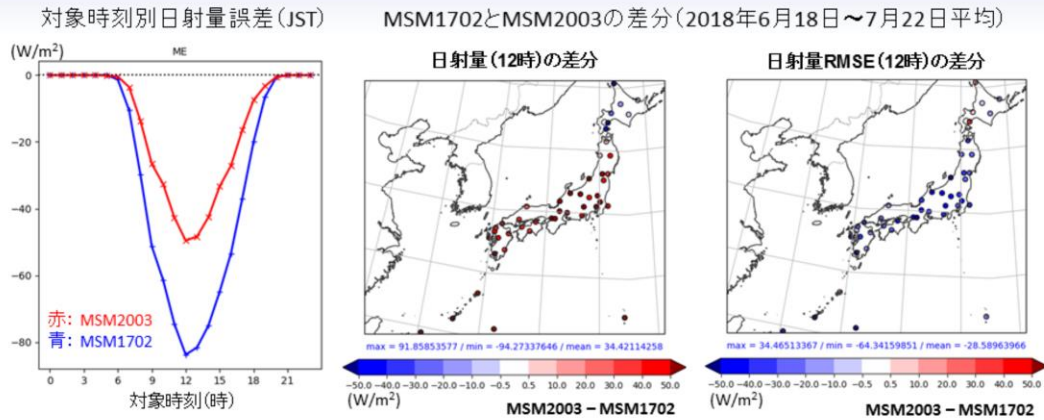
- 過大傾向にあった上層雲量が減少
 - OLRや地上日射量が増加(誤差縮小)、地上気温の改善、熱雷の表現が若干改善
- 過小傾向にあった雲水量・下層雲量が増加(主に高緯度域・海上)
 - 北海道での日射過多・日中の高温誤差が大幅に縮小
- 冬季対流圏下層の低温誤差が縮小(特に寒気流入時)
- 地上付近の水蒸気量が増加、850hPaは減少
- MSM予測開始直後の誤差の変動の解消
 - 対アメダスで見られた地上要素の初期ショックが大幅に軽減
 - 予測初期にだけ見られる弱雨の解消
- 全体的に弱雨が増加、強雨が減少
 - 弱雨の頻度が高くなる(空振りがやや増加) & 強雨の空振りが減少(見逃しはほとんど変わらず)

はじめにMSM2003における予測特性の変化の概要についてまとめる。今回の改良により従来のMSMの課題であった、上層雲量の過多や雲水量と下層雲量の過小評価傾向がそれぞれ改善した。また、冬季対流圏下層の低温誤差が縮小し、地上付近の水蒸気量が増加、850hPaで減少する傾向が見られた。さらにMSMと同じasucaベースのシステムをメソ解析に導入したことにより、MSM予測開始直後の誤差の変動が解消した。降水予測については、夏冬ともにすべての閾値において降水の予測精度が改善または中立であり、以下の特性変化が見られた。

- 夏は弱雨の頻度が高くなるが空振りは増えない
- 夏は強雨の頻度が低くなり空振りが減るが見逃しも減る

上記の特性変化は、MSMと同じ予報モデルを使うメソアンサンブル予報システム(MEPS)も同様となる。

日射量誤差の傾向

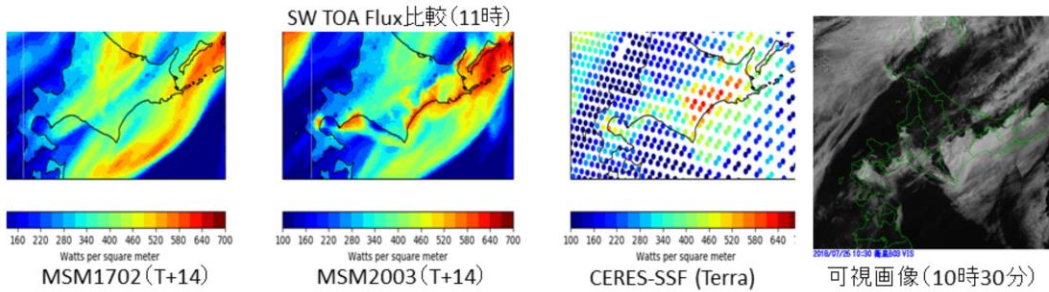


地上日射量の誤差が30W/m² 近く縮小。
本州から南の負バイアス、北海道東部の正バイアスがともに縮小。

ここから、具体的な誤差特性の変化について紹介する。まず日射量誤差についてだが、主に雲物理過程や雲量診断手法の更新により上層雲が減少したことにより、日中の日射量の誤差が平均で30W/m²近く縮小し(左図)、MSM領域南側を中心に地上日射量が増加するようになった(中図)。一方で夏季の北日本では、下層雲増加により日射量が減少した(中図)。結果として、MSM1702で見られた本州から南の負バイアス、北海道東部の正バイアスがともに縮小した(対アメダス検証結果は以降のスライドで示す)。

雲水量増加のインパクト

(例) 2018年7月26日 北海道東部で発生した霧



雲水から雨への変換が少なくなり、下層雲が多く表現されるようになった。
北海道東部の夏季に特徴的な下層雲・霧の表現性が向上。

雲水量増加のインパクトを示す。MSM2003では雲水から雨への変換の閾値を大きくしたことで、雲水から雨への変換が少なくなり、下層雲が多く表現されるようになった。図は、ある事例における短波放射 (Shortwave radiation; SW) の大気上端 (top of atmosphere) におけるフラックスのモデルの値 (MSM1702, MSM2003)、および観測データとの比較を示す。MSM2003の結果は観測データとより整合的になっており、北海道東部の夏季に特徴的な下層雲・霧の表現性が向上していることがわかる。

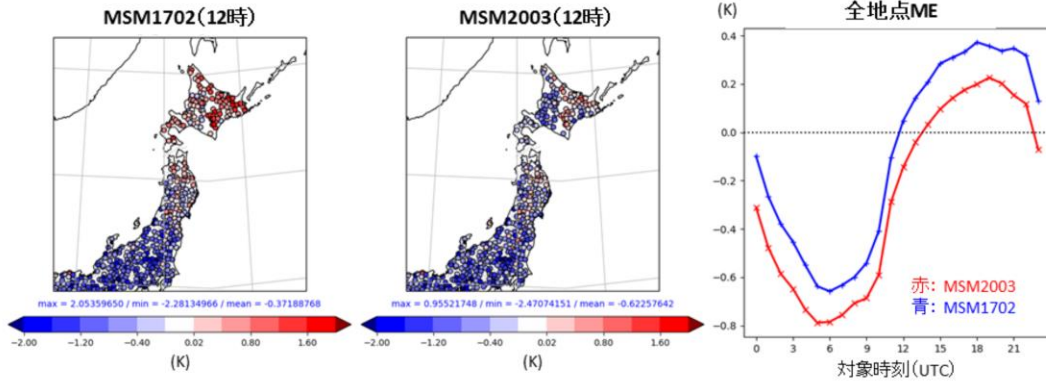
※観測データ: Terra衛星の地球放射収支放射計CERESによる単独衛星フラックス(SSF)

CERES: Clouds and the Earth's Radiant Energy System

SSF: Single Satellite Flux

夏季日中の地上気温予測

対象時刻別 対アメダス地上気温誤差(2018年6月18日~7月22日平均)

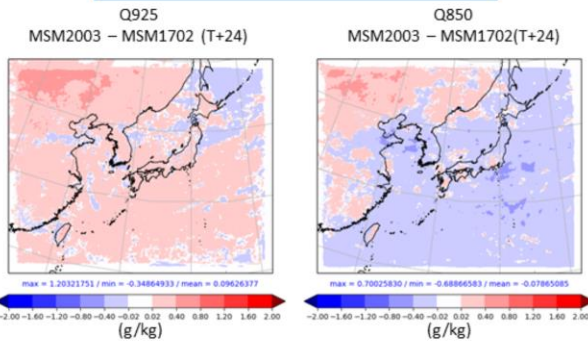


北海道の地上高温バイアスが大幅に縮小(下層雲増による)。
本州は日射量増加によりわずかにプラスだが、誤差特性に大きな変化はない。

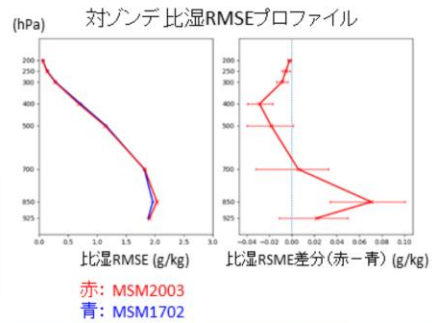
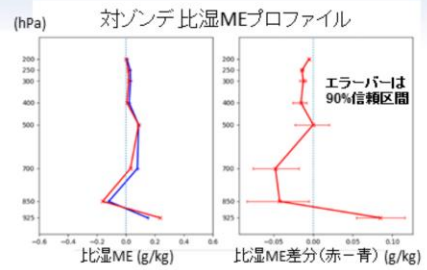
続いて、気温、水蒸気に関する予測特性の変化について紹介する。初めに夏季の日中における地上気温予測の対アメダス検証結果を示す。MSM1702では北海道や東北地方北部において高温バイアス傾向が見られていたが、MSM2003では下層雲が増加したことによりこのバイアスが大幅に縮小した。本州は日射量増加によりわずかにプラスだが、誤差特性に大きな変化はない。全地点における平均誤差では、MSM1702と比較すると全ての対象時刻で低めの予測となっており、日中は負バイアスが減少、夜間は正バイアスが減少している。

夏季対流圏下層比湿へのインパクト

夏実験期間での比湿平均場
(2018年6月18日～7月23日平均)



日本域および太平洋上の、925hPaで増加、850hPaで減少。
雲物理改良により、850hPa付近での蒸発冷却が抑制されたため。
気温の誤差は大幅に縮小する(次スライド)。
境界値の特性や鉛直方向の輸送の不足。

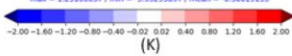
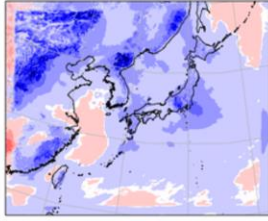


夏季の対流圏下層の比湿への影響を示す。左図は夏季実験期間(2018年6月18日～7月23日)における比湿の差分の水平分布であり、MSM2003では925hPaで増加、850hPaで減少する傾向が見られた。この傾向は、対ゾンデの平均誤差の鉛直プロファイル(右上図)でも確認できる。これは雲物理改良により、850hPa付近で蒸発冷却が抑制されたため、より乾燥するようになったことに起因する。この結果から、MSM2003では水蒸気の鉛直輸送が不足していることが示唆されるが、これについては今後の課題としたい。一方で次のスライドで示す通り、気温の誤差は大幅に縮小する。

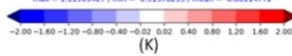
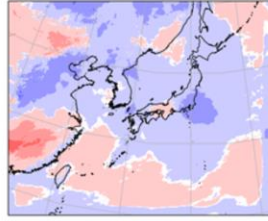
冬季対流圏下層気温への インパクト

冬実験期間でのT925対初期値差分
(2017年12月23日～2018年1月23日平均)

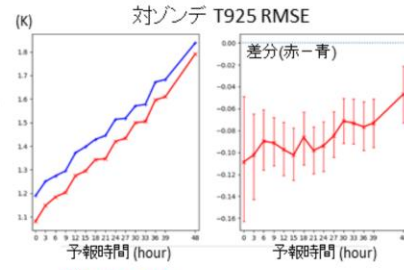
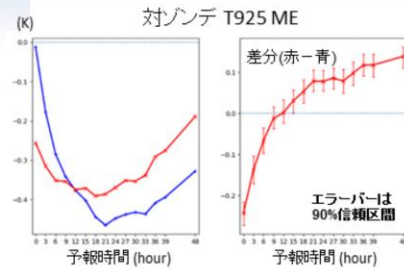
MSM1702 (T+24)



MSM2003 (T+24)



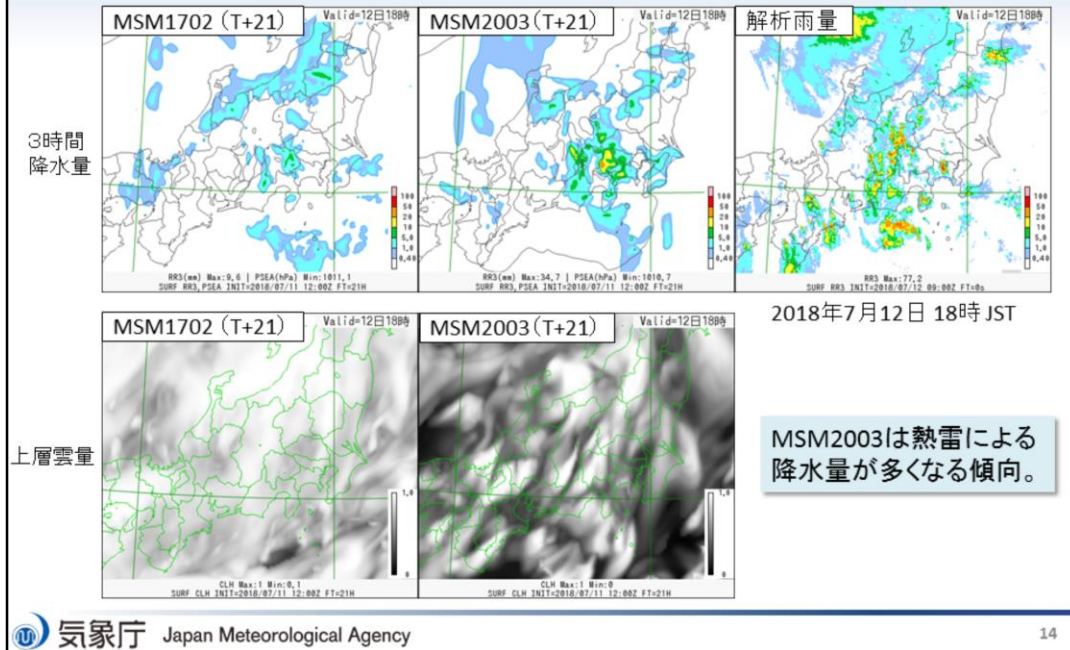
低温誤差は完全解決しないが、誤差は大幅に減少した。
システム更新による解析・予報整合性向上、地形作成処理
改良、地表面過程改良が改善に貢献。



赤: MSM2003
青: MSM1702

冬季対流圏下層の気温の予測特性の変化を示す。左図は冬季実験期間(2017年12月23日～2018年1月23日)における925hPa気温(24時間予報)の対初期値差分の水平分布である。MSM1702では特に大陸上で低温バイアスが顕著であるが、MSM2003では大幅に減少している。また右に示す対ゾンデ検証においても、すべての予報時間でRMSEの大幅な改善が見られおり、また予報初期の予測特性の変化も軽減された。これは主に、システム更新による解析・予報整合性向上、地形作成処理改良、地表面過程改良が貢献していると考えられる。

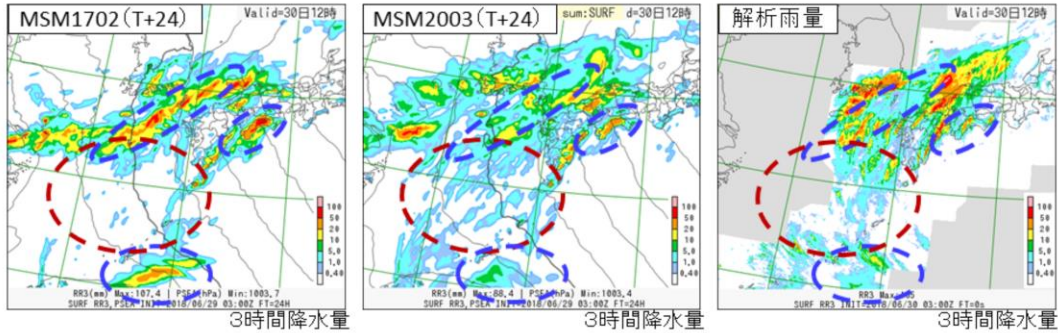
日射量増加と 熱雷予測表現の変化



最後に、降水予測の特性変化について紹介する。先に記述したように、MSM2003では上層雲量が減少し日射量の誤差が軽減したことに加え、地上付近の水蒸気量が増加したことで、熱雷による降水量が多くなる傾向が見られる。図は2018年7月12日18時を対象とした21時間予報における前3時間積算降水量であるが、MSM2003では実況により近い降水が再現されている。

降水予測の面的な特性の変化

2018年6月30日 12時 JST

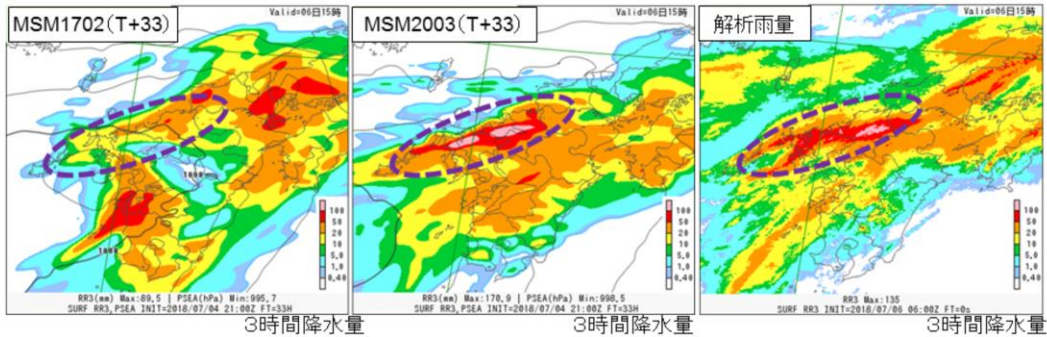


弱雨の領域が広がる → 過小傾向が改善(見逃しが減少)
強雨の空振りが減少、見逃しはほとんど変わらず

降水予測の面的な特性について、2018年6月30日の事例を例に挙げて述べる。赤点線で示されるように、MSM1702では弱雨の領域が狭く、過小評価傾向があった(左図)。これに対してMSM2003では、弱雨の領域が広くなり、より観測に整合するようになった(中図)。また青点線で示されるように、MSM2003では強雨の空振りが減少したが、見逃しについてはほとんど変化はなかった。上記の傾向は本事例のみでなく、統計検証の結果としても示される。

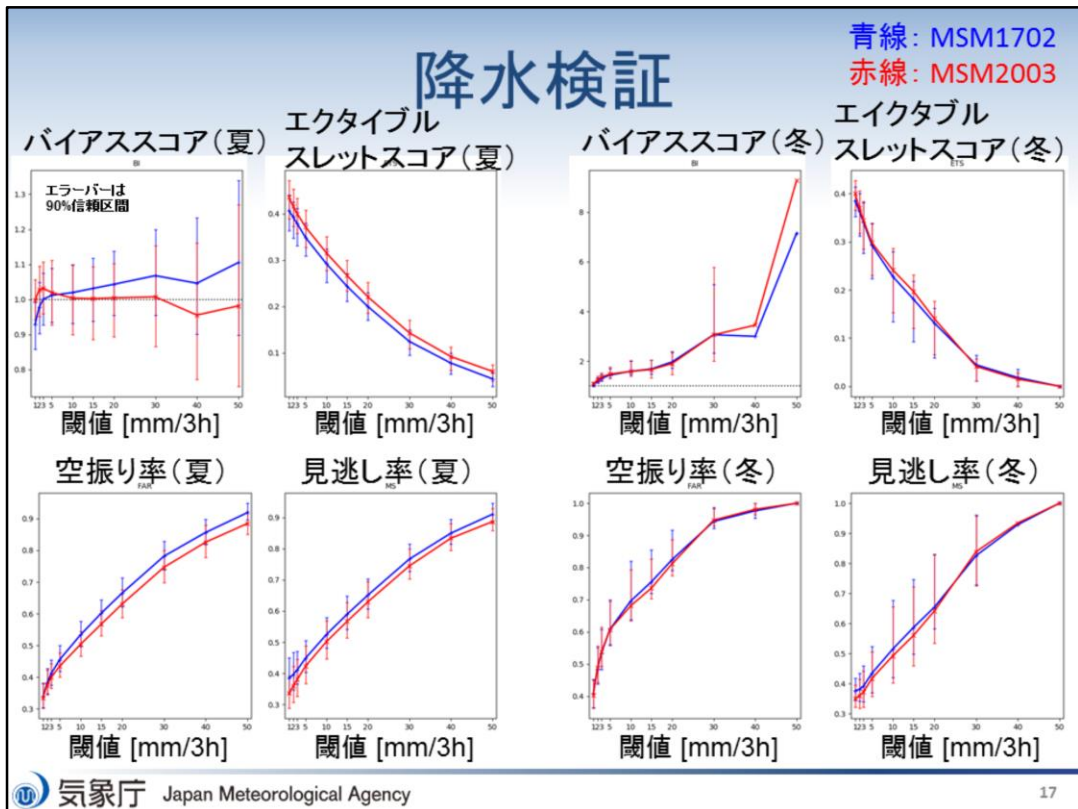
降水予測の面的な特性の変化

2018年7月6日 15時 JST



MSM2003で降水予測精度が改善した事例(平成30年7月豪雨)。

降水予測の面的な特性の変化として、2018年7月6日の事例についても挙げておく。この事例では、九州北部地方に線状の強い降水が観測されているが、MSM2003では観測により整合する降水帯を再現することができている。

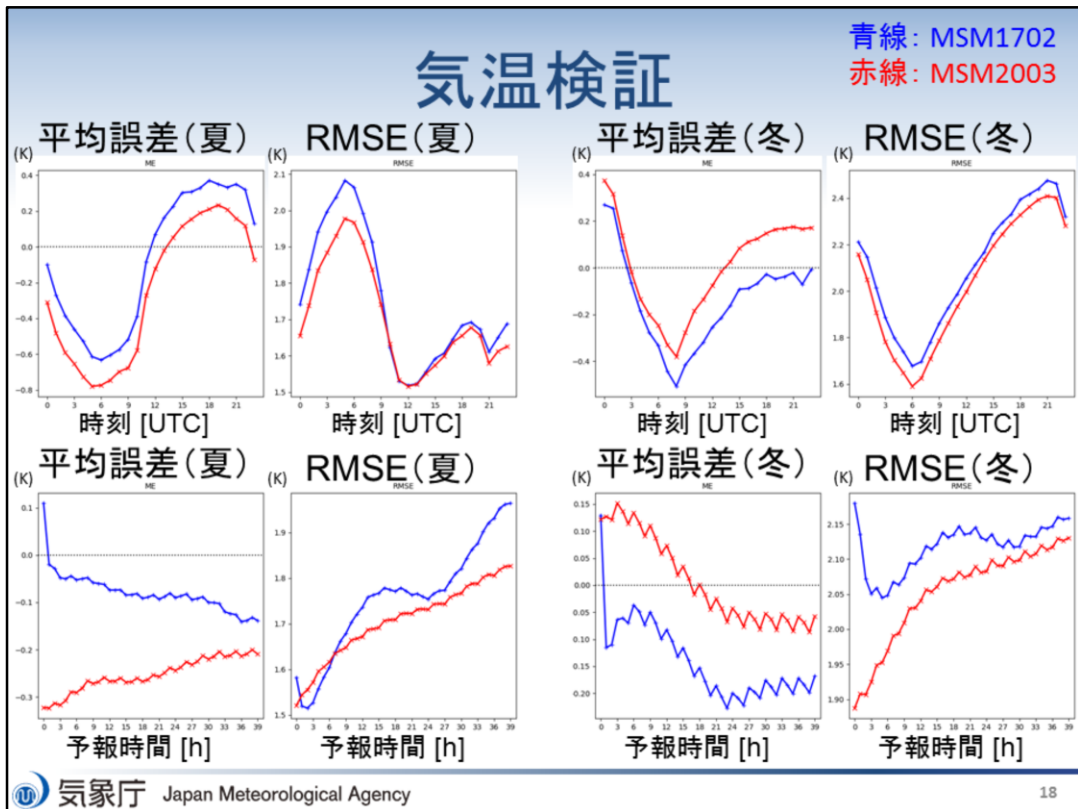


前述した予測特性の変化について、統計検証結果(降水、気温、風速)を示す。統計期間はすべて

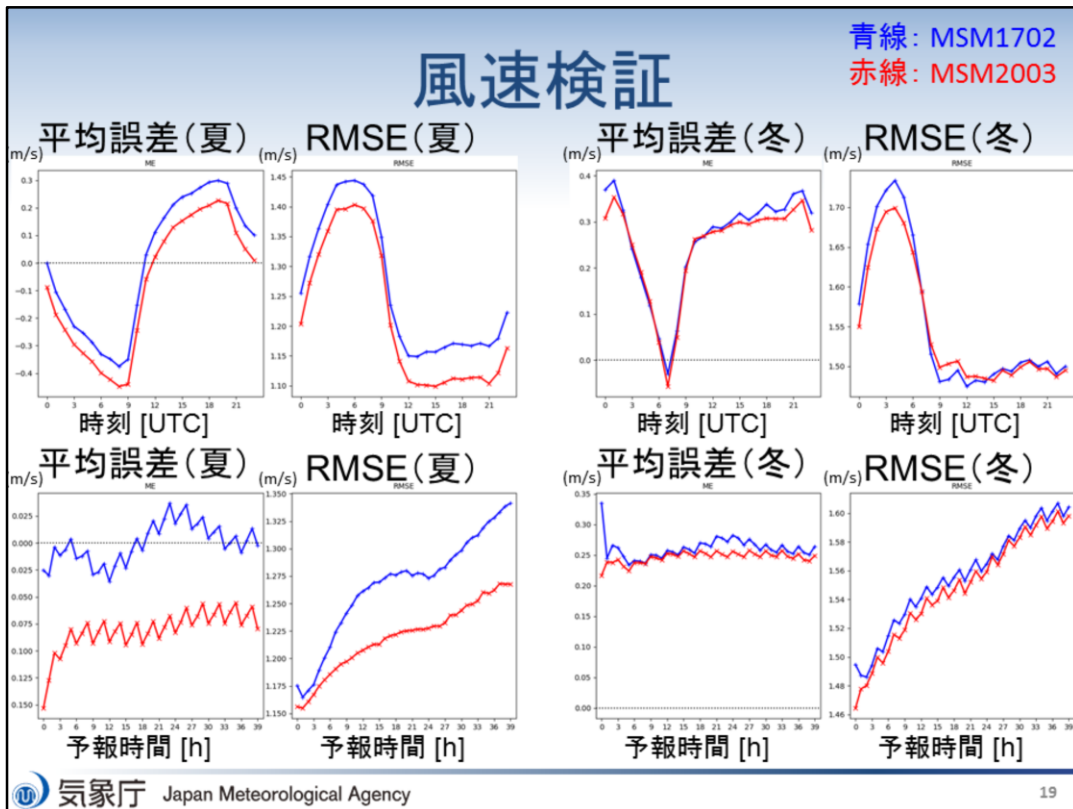
- 夏実験: 2018年6月18日～7月23日
- 冬実験: 2017年12月23日～2018年1月23日

である。降水検証については、日本の陸域を対象に20kmの水平格子間隔、対解析雨量で検証を行っている。

降水検証結果としてはまず、夏季は5mm/3hour以下の弱雨の頻度が高くなるものの、それより強い降水では頻度が低くなり実況に近くなる。ただし、弱雨の頻度が高くなったことに伴い、空振りが増えるということはない。また見逃しも減り、エクタイブルスレットスコア(ETS)は全ての閾値で改善が見られる。冬季についても、全般的に降水の予測精度は改善または中立である。



次に対アメダス地上気温の統計検証結果を示す。夏季の予報初期を除いて、すべての対象時刻において気温の予測精度(RMSE)は改善または中立である。また、予報初期に見られる平均誤差の急激な変化が解消した。これは、初期値を作成するメソ解析がasucaベースのシステムに刷新され、解析、予報がより整合的になったためである。



最後に対アメダス地上風速の検証結果を示す。冬の日中を対象とする時刻を除いて、すべての予報時間において風速の予測精度(RMSE)が改善または中立となる。地上気温検証と同様、予報初期において冬季の平均誤差に見られる急激な変化が解消されている。

MSM の予測特性の変化

- 夏の予報初期を除いて、すべての対象時刻において気温の予測精度 (RMSE) が改善または中立
- 冬の日中を対象とする時刻を除いて、すべての予報時間において風速の予測精度 (RMSE) が改善または中立
- 予報初期に夏と冬の気温、冬の風速の平均誤差に見られる急激な変化を解消

以上をまとめると、MSM2003における予測特性の変化は以下ようになる。

MSM の予測特性の変化

- 夏冬ともにすべての閾値において降水の予測精度が改善または中立
 - 夏は弱雨の頻度が高くなるが空振りは増えない
 - 夏は強雨の頻度が低くなり空振りが減るが見逃しも減る
 - MSM と同じ予報モデルを使うメソアンサンブル予報システムも同様
- 予報初期に見られる実況との対応が悪い弱雨を解消(図略)

変化しないMSMの弱点

- 低気圧の過発達
 - 総観場(とくに強風軸の位置)や相当温位の分布から不自然な過発達であるかを判断できる(原2015)
 - 改善に向けて取り組んでいく予定
- 熱雷や線状降水帯を適切に予測できない
 - 熱雷の場合、MSM1702では狭い範囲に強い降水が集中、MSM2003では広い範囲に弱い降水
 - MSMの分解能では劇的な改善は難しいと考えられる

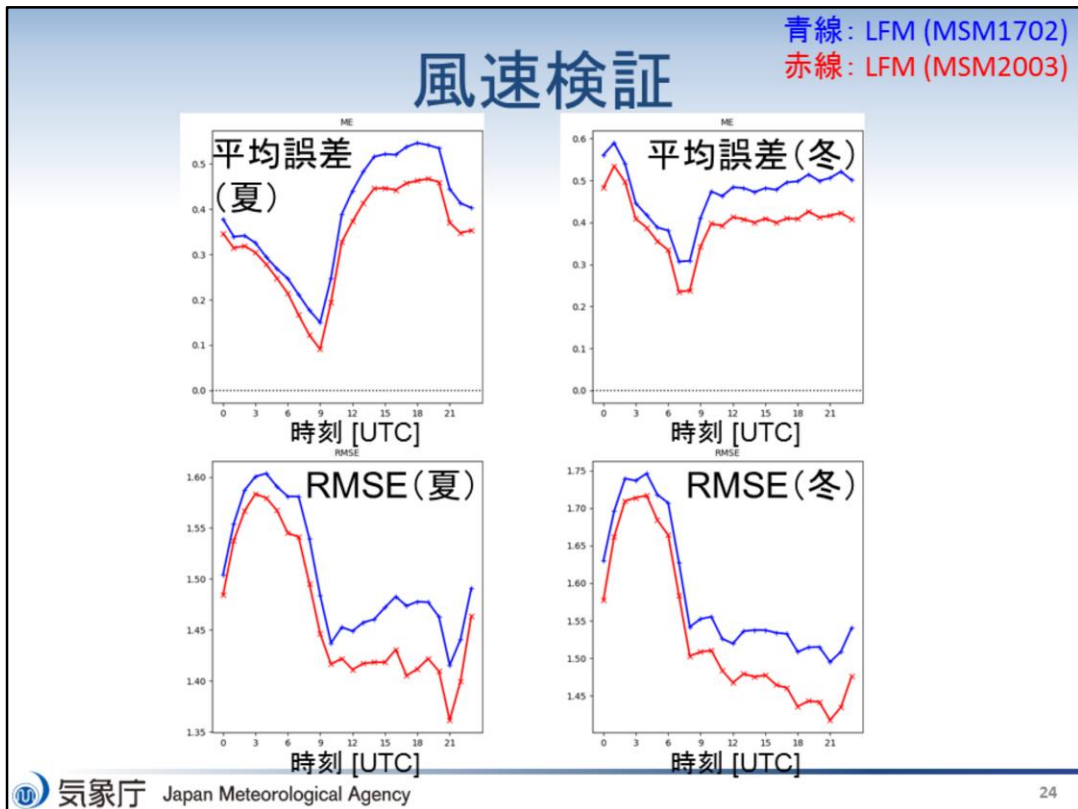
ここでは、今回の改良で解決できなかったMSMの課題について述べる。まず、原・倉橋(2017)で示されるように、MSM1702には低気圧や台風の中心示度を低く予測する傾向があった。この傾向はMSM2003においても継続しており、今後、改善に向けて取り組んでいく予定である。なお、低気圧の過発達傾向については原(2015)で考察されているが、それと同じ知見がMSM2003にも適用できる。

また、熱雷や線状降水帯の予測については、一部の事例で改善する傾向も見られるものの、依然として予測は困難である。これらの現象の予測は、MSMの水平分解能(5km)では劇的な改善は難しいものと考えられ、これはMSMと同一のモデルを用いているMEPSについても同様である。

MSM更新に伴うLFMへの影響

- MSM予測値を第一推定値および側面境界値として利用するLFMの予測特性についても調査した。
- 主なLFMの特性の変化は以下の通り。
 - 夏冬ともに地上風速が弱くなり実況に近づき、予測精度が改善
 - 夏は降水量の予測頻度が低くなる
 - 15 mm/3h 以下は実況より過少
 - 15 mm/3h 以上は実況より過多
 - 冬は 20 mm/3h 以上の降水量の予測頻度が低くなり、実況より過大なものの実況に近づく
 - 夏は 5 mm/3h～40 mm/3h の降水量の予測精度がやや改悪、冬はやや改善または中立

MSM2003の導入に伴い、局地モデル(LFM)の予測特性の変化についても調査を行った。これは、MSMの予測値がLFMの初期値を提供する局地解析において第一推定値として利用されることに加え、LFMの側面境界値としても用いられているためである。以下、MSM改良に伴うLFMの予測特性の変化の概要を示す。概ね、MSM更新のインパクトから期待される結果が得られている。



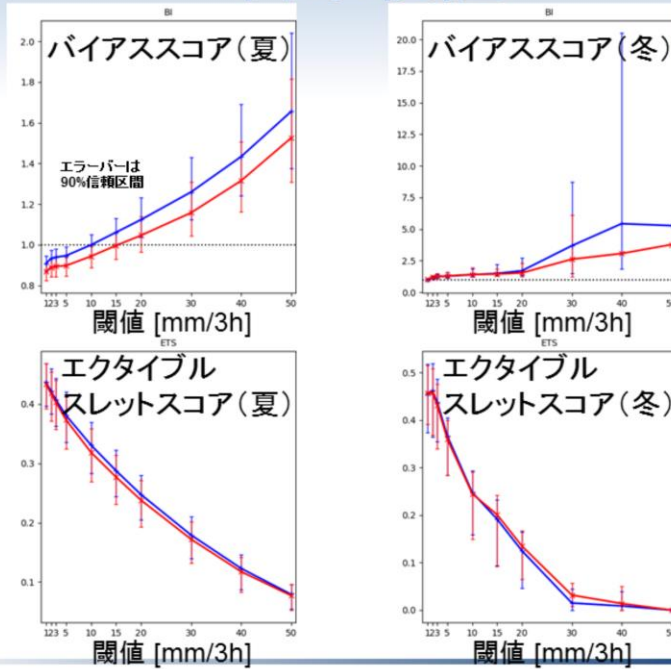
ここから、LFMの予測特性の変化について統計検証結果を示す。統計期間は夏季、冬季それぞれ

- 夏季: 2018/06/27 ~ 2018/07/08 (00~23 UTC)、全288初期値
 - 冬季: 2018/01/16 ~ 2018/01/27 (00~23 UTC)、288初期値
- である。

まず、地上風速の対アメダス検証結果を示す。夏季、冬季ともにすべての対象時刻において地上風速の強風バイアスが減少し、予測誤差 (RMSE) が改善されている。

降水検証

青線: LFM (MSM1702)
赤線: LFM (MSM2003)



次に、降水検証結果について示す。夏季は全般的に降水量が減少し、1~3mm/h程度の弱い降水は特に予報初期でさらに過小評価となる一方で、10mm/h以上の強い降水は過大であった降水が減少する。結果としてETSは中立~やや悪化となる。冬季については強い降水で過大評価傾向が軽減され、ETSも中立~やや改善となっている。

MSM変更による効果のまとめ

- 過大傾向にあった上層雲量が減少
 - OLRや地上日射量が増加(誤差縮小)、地上気温の改善、熱雷の表現が若干改善
- 過小傾向にあった雲水量・下層雲量が増加(主に高緯度域・海上)
 - 北海道での日射過多・日中の高温誤差が大幅に縮小
- 冬季対流圏下層の低温誤差が縮小(特に寒気流入時)
- 地上付近の水蒸気量が増加、850hPaは減少
- MSM予測開始直後の誤差の変動の解消
 - 対アメダスで見られた地上要素の初期ショックが大幅に軽減
 - 予測初期にだけ見られる弱雨の解消
- 全体的に弱雨が増加、強雨が減少
 - 弱雨の頻度が高くなる(空振りがやや増加) & 強雨の空振りが減少(見逃しはほとんど変わらず)

最後に、MSM2003導入に伴う、MSMの予測特性の変化について再掲する。

参考文献

- 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, 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.
- 原旅人, 2014: asucaにおける物理過程の組み込みの考え方. 数値予報課報告・別冊第60号, 気象庁予報部, 104-106.
- 原旅人, 2015: 事例検討. 平成 27 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 82-99.
- 原旅人, 倉橋永, 2017: メソ数値予報システムの特性の変化. 平成 29 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 48-55.
- Honda, Y., M.Nishijima, K.Koizumi, Y.Ohta, K.Tamiya, T.Kawabata, and T.Tsuyuki, 2005: A pre-operational 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.