第1章 基礎編

1.9 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1.9.1項で数値予報の留意点、第1.9.2項でガイダンスの留意点）を述べる。

第1章 基礎編

1.9.1　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

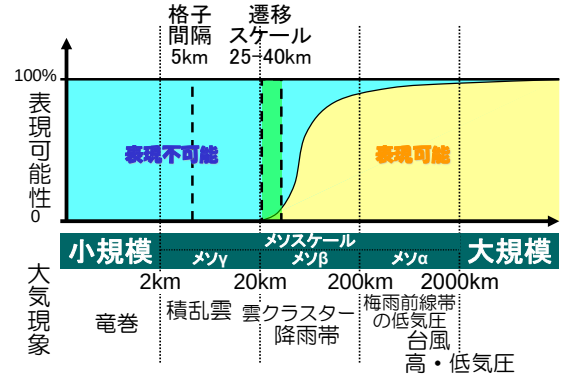
- 数値予報の限界
  - 大気現象を完全には表現できない（分解能）
  - 誤差の急速な成長（カオス的性質）
- 予報誤差の要因
  - 数値予報モデル（力学過程、物理過程）
  - 初期値
  - 境界値
- 数値予報の限界と誤差特性の把握が重要

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、そのカオス的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

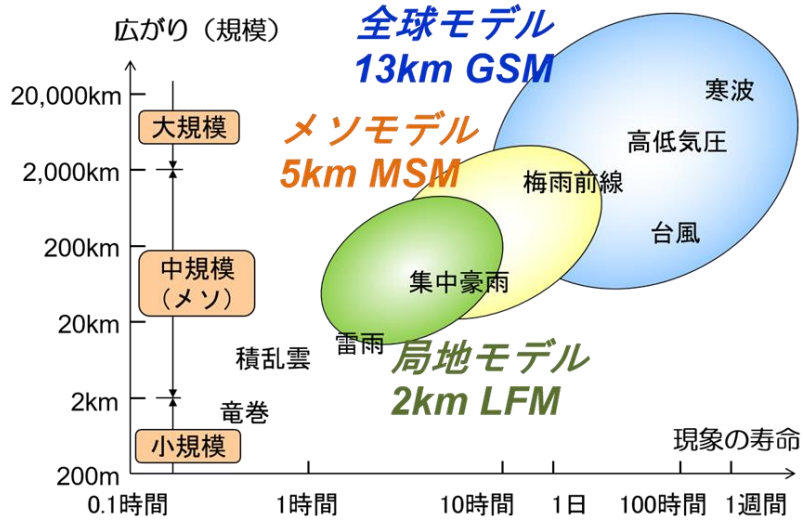
- 格子点値はその格子内の平均的な状態を示す
- モデルの実効解像度よりも細かい現象は表現できない
- 実効解像度は格子の 5 ～ 8 倍程度
  - GSM:65～105km
  - MSM:25～40km
  - LFM:10～15km

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13km、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65～105km、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。

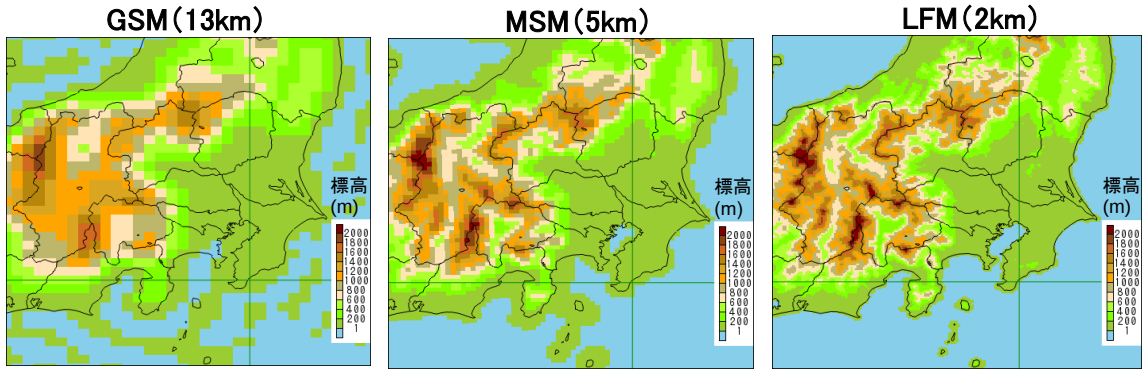
GSMでは、現象の寿命が1日～1週間、広がりが数千km前後の大～中規模の高低気圧や台風等の総観規模の擾乱を表現することができる。

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、LFMの地形は、90° N－60° SにMERIT DEM（Yamazaki et al. 2017）、60° S－90° SにRAMP2 (Liu et al. 2015)のデータを、MSM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データをそれぞれ平滑化して作成
- 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、LFMの地形は、90° N－60° SにMERIT DEM（Yamazaki et al. 2017）、60° S－90° SにRAMP2 (Liu et al. 2015)のデータを、MSM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データをそれぞれ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

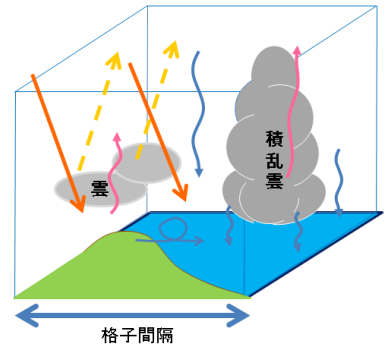
- 物理過程は格子より小さいスケールの効果を格子平均値で計算するためにモデル化を行う
  - モデル化には統計的関係も含まれる
- そのモデル化は不完全で予測誤差の大きな原因
  - 各過程についての知見が不足
    - 解くべき方程式が分かっていない（乱流、対流など）
  - 計算資源が不足
    - 現象の物理過程が複雑なため簡略化が必要（放射過程の波長への依存性など）
  - そもそも導入されていない効果も
    - MSM・LFMでは積雪の変化、LFMでは海面水温の変化
  - パラメタリゼーションの原理的制約

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と述べた。

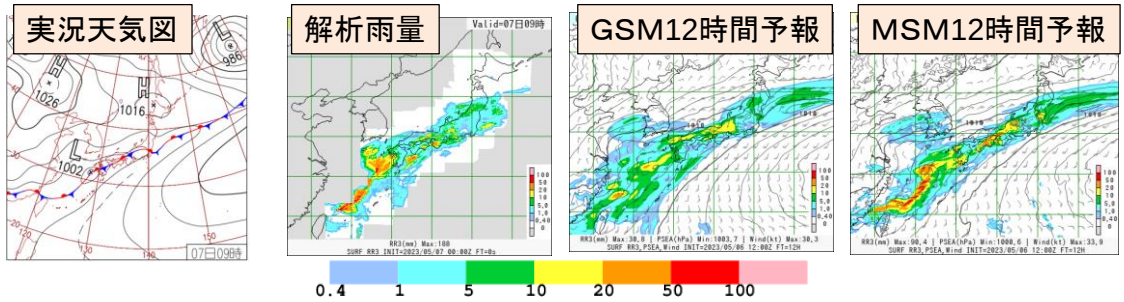
その一つとして、格子間隔より小さな現象（サブグリッドスケールの現象）が予報変数（格子点値）に及ぼす効果を格子点の物理量で評価（パラメタリゼーション）して、格子平均からのずれの効果として、その格子点の値に取り入れている。

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

2023年5月7日9時の地上天気図、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（5月6日21時初期値）、MSM（5月6日21時初期値）それぞれによる予報。



- 西日本から東シナ海に着目する
- 〔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が狭い。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2023年5月7日9時の地上天気図、および同時刻の前3時間解析雨量、5月6日21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。西日本から東シナ海に着目する。

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。

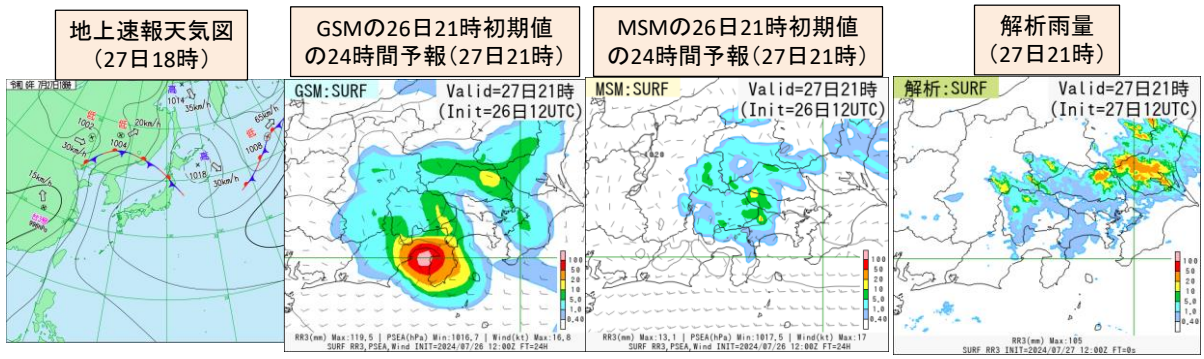
GSMは、対流パラメタリゼーションとしてASスキームを採用している。そのため、大気安定度がそれほど低くない段階から積雲対流が発生するものとして成層を安定化するため、弱い降水を広めに予想する傾向がある（原 2013）。そして、安定化はゆっくり行われ、長時間に渡り広い降水域が予想されることがある。

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。

GSMの降水予測について

- 令和5（2023）年3月にGSMの改良により、水平解像度が約 20km から約 13km へ高解像度化された（気象庁情報基盤部　2024）。この改良以降、不安定降水時に強い降水を局所的に予測する傾向がみられるようになった
- 大雨のポテンシャルがあるとの見方もできるが、以下に示す令和6（2024）年7月27日の事例のように過大な降水予測となる場合があるので、プロダクトを利用する際は留意する必要がある



気象庁 Japan Meteorological Agency　令和6年度数値予報解説資料集　265

令和5（2023）年3月にGSMの改良により、水平解像度が約 20km から約 13km へ高解像度化された（気象庁情報基盤部　2024）。この改良以降、不安定降水時に強い降水を局所的に予測する傾向がみられるようになった。

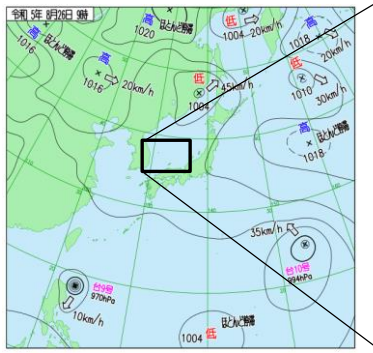
例として、令和6（2024）年7月27日21時対象の事例を紹介する。図は、左から27日18時の地上速報天気図、26日21時初期値のGSM、MSMの24時間予報の前3時間降水量（mm）・風（矢羽根：kt）・海面更正気圧（hPa）および27日21時の前3時間解析雨量である。東日本では太平洋高気圧に覆われて気温が上昇したことにより、大気の状態が不安定となって、解析雨量で示すとおり、茨城県を中心に強い又は激しい降水があった。GSMでは、27日21時の前3時間降水量について、静岡県付近で100mm/3hを超える予測が直近の初期時刻まで継続して見られた。一方、MSMでは対応する降水はほとんど予測されておらず、実況でも対応する降水はほとんど見られなかった。

一般的に、GSMは前頁で示したように、弱い降水を広く予測する傾向があるが、本事例について調査した結果、強い上昇流に起因する凝結により、過大な降水がもたらされている可能性があることが分かった。大雨のポテンシャルがあるとの見方もできるが、本事例のように過大な降水予測となる場合があるので、プロダクトを利用する際は留意する必要がある。

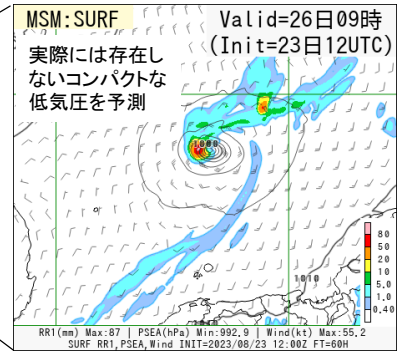
MSMにおける低気圧の過発達

- MSMによる予測では、現在でも低気圧が過発達する場合がある
- 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

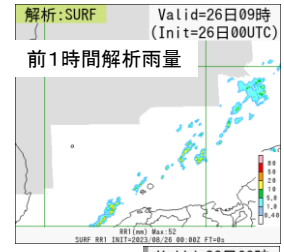
（典型例）2023年8月26日9時を対象とした23日21時初期値のMSMの予測において、島根県隠岐島の北の日本海で発達しながら北東進する低気圧を表現していた。

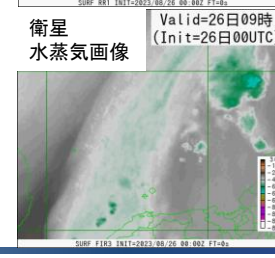


2023年8月26日9時の
地上天気図



2023年8月26日9時を対象とした
MSM予測（FT=60）



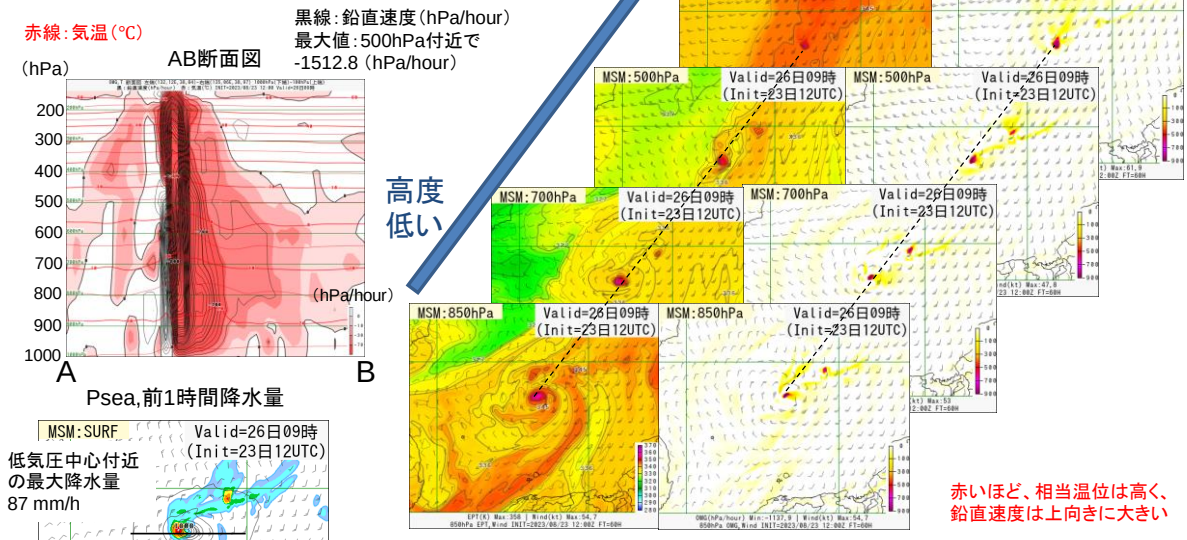


MSMの低気圧の発達の予測については、積雲対流スキームによる不安定の解消が不十分な場合に格子スケールの上昇流が強く予測され、その結果として、低気圧の過発達につながることが知られている（原 2015）。

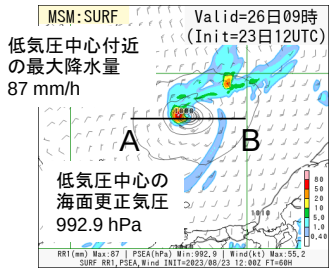
典型例として、2023年8月26日9時を対象とした23日21時初期値のMSMの予測を示す。図は、左から2023年8月26日9時の地上天気図、26日9時を対象とした23日21時を初期値とする60時間予測、26日9時の前1時間解析雨量と衛星水蒸気画像である。島根県隠岐島の北の日本海上に着目すると、MSMの前1時間予測降水量は解析雨量や衛星水蒸気画像などと比較して過大な予測になっていることが推察される。また、MSMでは実際には存在しないコンパクトな低気圧が予測されている。

予測された過発達した低気圧の特徴

2023年8月23日21時を初期時刻とする
MSMの60時間予測の例



Psea,前1時間降水量



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いれる必要がある

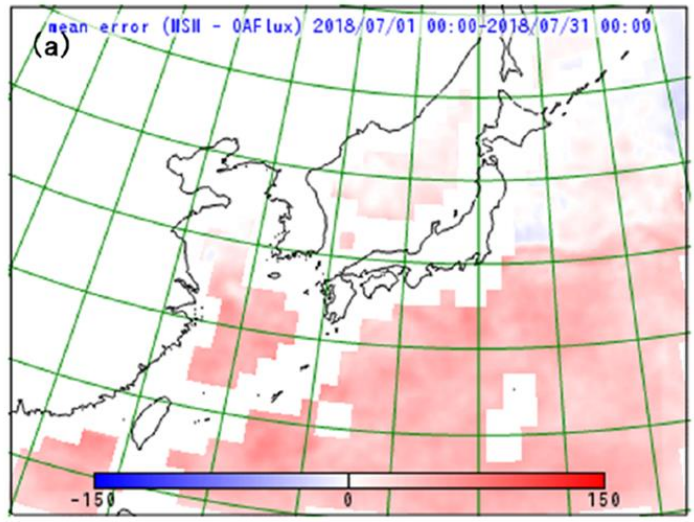
- **低気圧中心≒強雨域にほぼ対応する場所で、局所的な強い上昇流が上層まで伸びている**
- **また、その場所は周囲よりも相対的に暖かい**

2023年8月23日21時を初期値とするMSMの60時間予報で島根県隠岐島の北の日本海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更正気圧および前1時間降水量、鉛直P速度および気温および相当温位の鉛直分布を示す。

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MSM による潜熱フラックス[W m^{-2}] の全予報時間のOAFlux プロダクト(Yu et al. 2008) 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OAFlux 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

MSMの予測には、下層の水蒸気が多いバイアスがある。この系統誤差は、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。

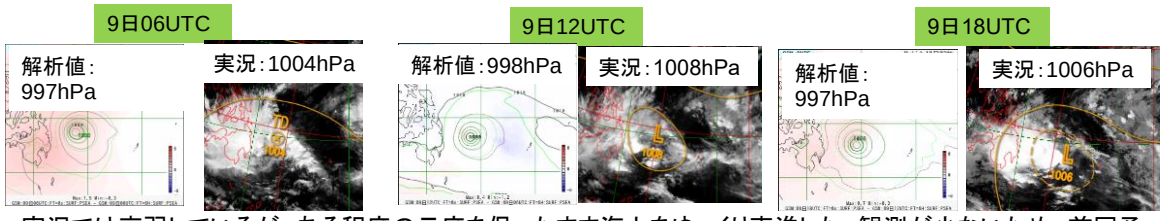
※OAFlux（Objectively Analyzed air-sea Fluxes:客観解析された大気海洋フラックス）

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・空間的に十分にない
    - 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、この時間帯に台風ボ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。

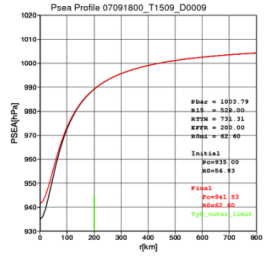
一方で、擾乱が海上を進む際に、予測に影響を与える観測が少ない場合は、新しい時刻の観測により、かえって擾乱の予測が大きく変化する場合があるので、利用の際には慎重に判断する必要がある。

台風ボーガス

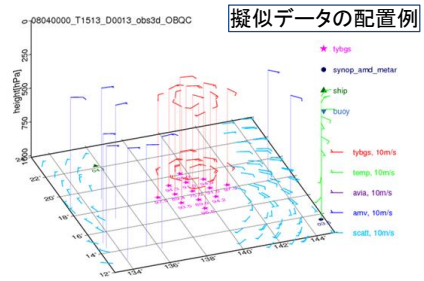
- 台風中心付近では、実観測データが十分に得られない場合があり、それを補完するために**疑似観測データ（台風ボーガス）**を作成・同化利用している
- 予報官による台風速報解析の中心気圧、強風半径などから単純化されたモデルをあてはめて疑似観測データを作成する
  - 要素は海面気圧、上空の風向風速
  - 台風ボーガスで表現する台風の強度や空間対称性が実際の台風の状態と一致するとは限らない

  →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



擬似データの配置例



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。

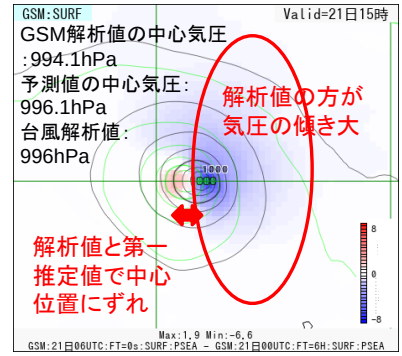
左図は、ある台風事例におけるボーガスの海面気圧プロファイル例を示している。緑色の線が、台風ボーガスの一番外側の範囲を示し、この例では200kmである。黒線が台風の中心示度を考慮した初期のプロファイル、赤線は黒線に第一推定値や周辺の観測を考慮した後のプロファイルを示している。赤線のプロファイルを元に解析に利用される台風ボーガスデータを作成する。そのデータの例が右図で、疑似データの配置例を示している。桃色が地上の海面気圧、赤色が風向風速（矢羽根）である。

台風ボーガスの投入位置が予測の中心位置とずれたことによる台風の過発達について

- GSMで予測された台風中心位置より東側に台風ボーガスがデータ同化されたため、台風が過発達し解析値に反映するケースがみられた（2023年台風第1号）
  - 台風の中心から東側の解析値の気圧の傾きが大きくなり、それに伴い地上風速が強くなって海面での蒸発が進み、台風の発達に寄与した可能性が考えられる
  - 台風東側の対流雲の強い場所を実況解析の台風中心としているようなので、それに合わせて下層渦も東へ修正して、台風を発達させている可能性も考えられる
  - 初期値の不完全さに起因する誤差（前々頁参照）として残ることになるため、解析値や予測値の利用の際には慎重に判断する必要がある

GSMの海面更正気圧の解析値と台風ボーガス

4月21日15時の解析時に台風ボーガス（★印で示されたもので、海面更正気圧の観測値として同化される：詳しくは前頁の台風ボーガスを参照）が6時間前の予測値の中心位置よりやや東側に投入された。解析値はやや予測値寄りに解析された。



GSMの海面更正気圧の解析値（黒線）と6時間前からの予測値（緑線）との差
（4月21日15時対象：青色ほど解析値の気圧が低い）

台風ボーガスは、前頁で説明したように、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。

一方で、令和5（2023）年4月20日15時にマーシャル諸島で発生した台風第1号について、台風ボーガスの投入位置が予測の中心位置とずれた場合に、GSM内で台風が過発達し、GSM解析値に反映されたケースが見られたので、プロダクトを利用する際の留意点として紹介する。

左図はGSMの21日15時の海面更正気圧の解析値（黒線）と解析時に観測値として同化された台風ボーガスデータ（茶色の★で示され、数字は同化された海面更正気圧値（小数点第1位を含む下3桁の値））である。詳しくは前頁の台風ボーガスを参照。台風ボーガスは、6時間前の予測値の中心位置よりやや東側に投入された。解析値はやや第一推定値寄りに解析された。

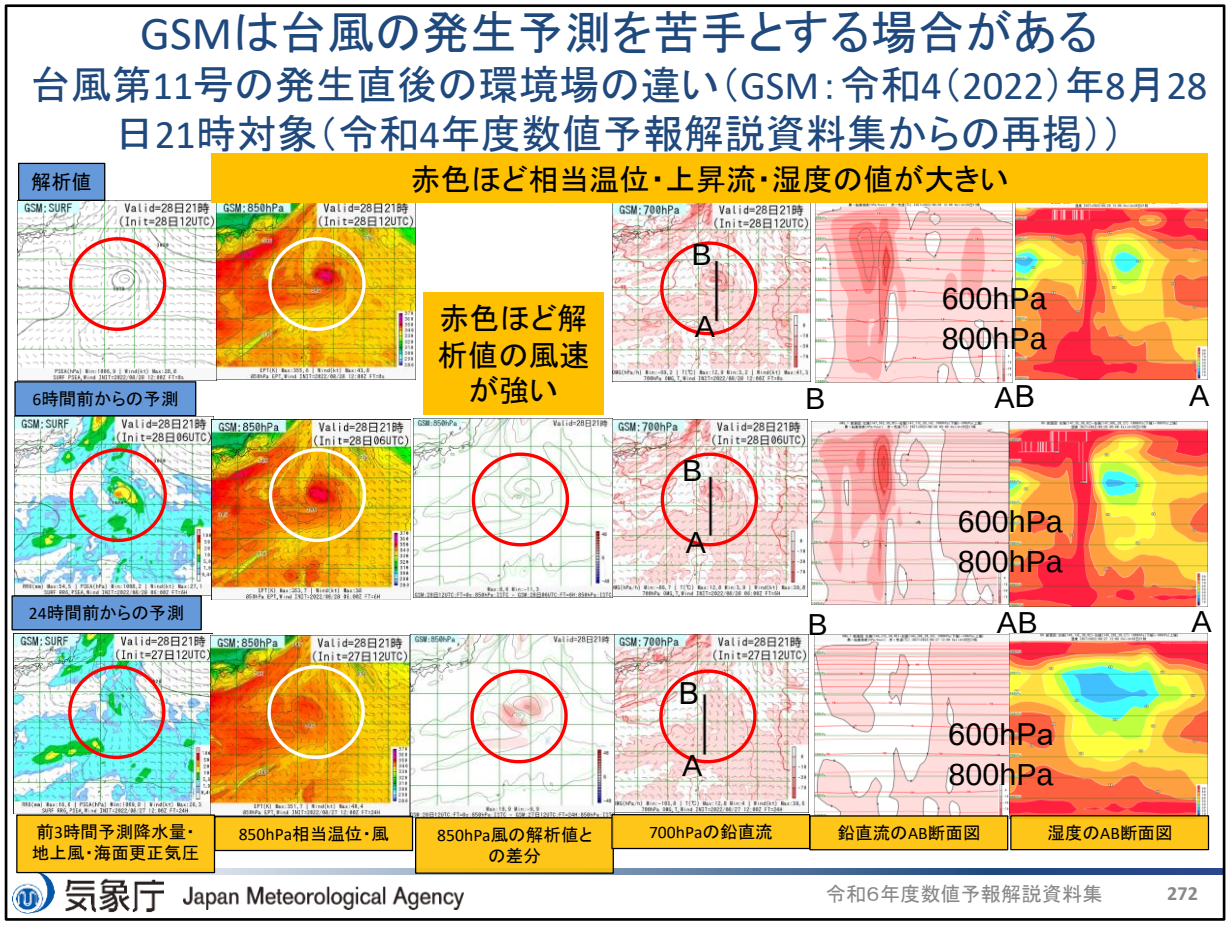
右図は、GSMの21日15時の海面更正気圧の解析値（黒線）と6時間前からの予測値（緑線）との差を示す。青色ほど解析値の気圧が低いことを示す。解析値と第一推定値との中心位置の差が確認でき、台風中心の東側で解析値の方が気圧の傾きが大きいことも確認できる。この後、21日21時のGSM解析値での中心気圧は988.9hPaに発達、6時間前からの第一推定値では993.5hPa、台風ベストトラック（台風解析値）では1000hPa（図略）となり、GSM解析値と台風解析値と乖離が進んだ。

台風が過発達し、GSM解析値に反映され、台風解析値との乖離が進んだ原因は、以下の2点が考えられる。

・ 台風の中心から東側の解析値の気圧の傾きが大きくなり、それに伴い地上風速が強くなって海面での蒸発が進み、台風の発達に寄与した可能性

・ 台風東側の対流雲の強い場所を実況解析の台風中心としているようなので、それに合わせて下層渦も東へ修正して、台風を発達させている可能性

このように、GSM内で台風が過発達した場合は、前々頁に示した初期値の不完全さに起因する誤差として残ることになるため、解析値や予測値の利用の際には慎重に判断する必要がある。



GSMは台風の発生予測を苦手とする場合があるため、留意する必要がある。令和4年度数値予報解説資料集（気象庁情報基盤部 2023）から2022年台風第11号を例として、再掲して紹介する。

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ボ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、台風ボ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、熱帯擾乱の発達が抑えられ、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。

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。

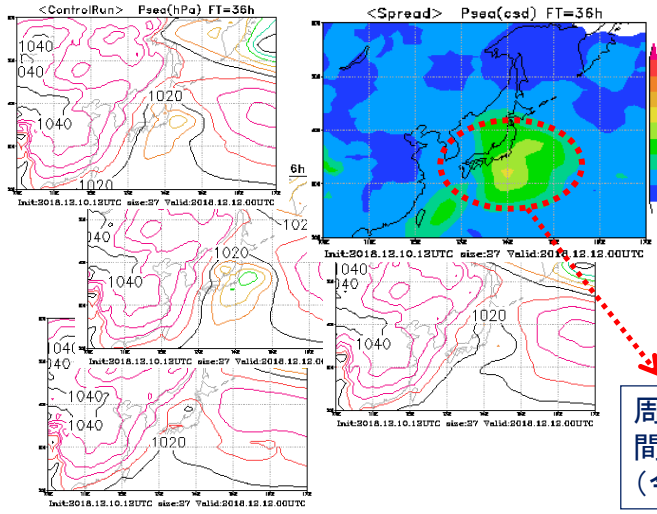
3の品質に問題のある観測が同化された場合については、短期解説資料等を通じて、お知らせすることになるので、留意願いたい。6については、初期値の不完全さに起因する誤差で述べたように実況と異なる場合があるので、十分確認する必要がある。

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

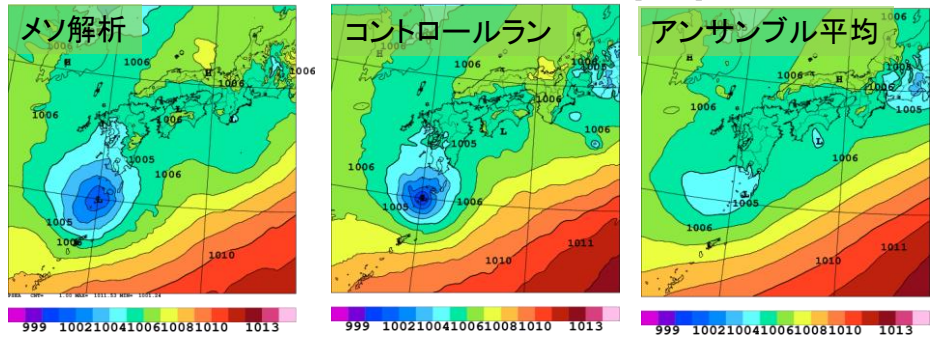
周辺と比べて、アンサンブルメンバー間の予測のばらつきが大きい
（今後も予測が変わる可能性が高い）

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、カオス的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。

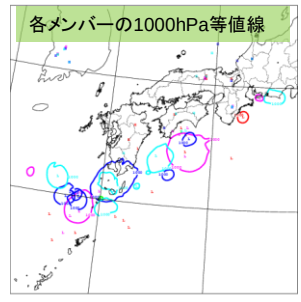
アンサンブル予報の利用により、誤差幅や不確実性を見積もることで予測情報の確からしさを得ることができる。例えば、予測の不確実性が高い場については、アンサンブル予報のスプレッド（ばらつき程度）が大きくなるという特徴がある。

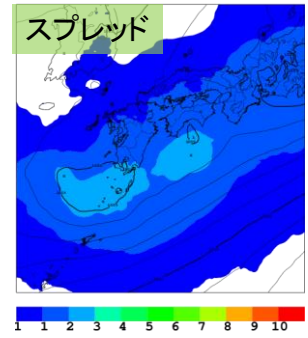
アンサンブル平均で低気圧の中心がぼやけてしまう例

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





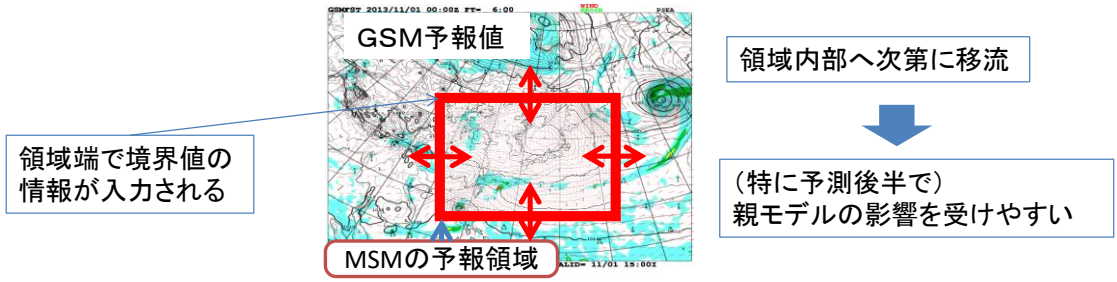
アンサンブル予報を利用する際には、以下の点に注意する必要がある。アンサンブル平均では予測のばらつきが大きい部分は打ち消し合うことにより変動の振幅が小さく、前線の動きや低気圧の示度等がぼけてしまうことがある。

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）。

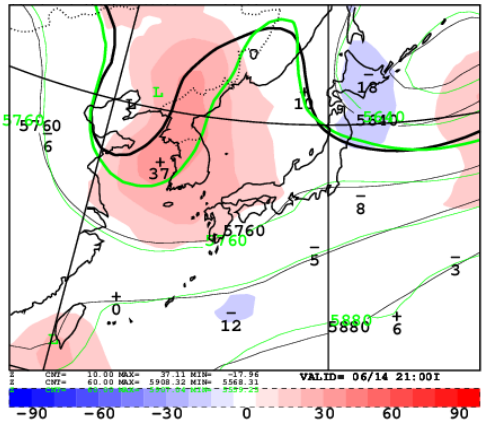
そのため、予報時間が長くなるにつれて、側面境界の内部に運動量、熱、水蒸気が移流することによりMSMやLFMの予測値に影響を与えるとともに、解析予報サイクルを通じて解析値にも影響を与える。この効果は、以下のように現われる場合がある。

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

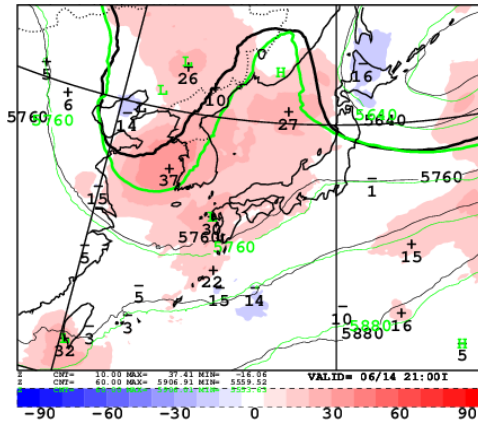
2. 親モデルの特性が変われば、その予測値を境界値として用いるモデルの予測特性にも影響を及ぼしうる。2016年のGSM更新による乾燥バイアスの軽減に伴って、MSMの解析値・予報値の乾燥バイアスが軽減し、降水頻度が増加した例があげられる

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)



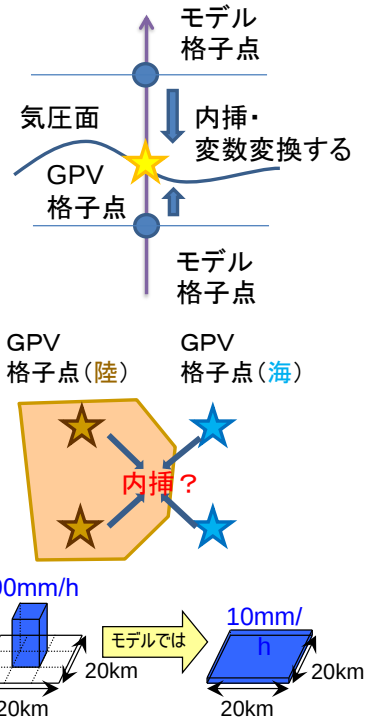
500hPaジオポテンシャル高度 2018年6月14日21時の予想
黒線：予測値、緑線：解析値　塗りつぶしは予測値と解析値の差

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。実際の場所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を伴うために、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がある。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.
- 気象庁情報基盤部, 2023: 令和4年の台風の数値予報の結果（台風第11号）. 令和4年度数値予報解説資料集, 気象庁情報基盤部, 468-484.
- 気象庁情報基盤部, 2024: 全球数値予報システムの改良. 令和5年度数値予報解説資料集, 気象庁情報基盤部, 296-309.
- 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の変化. 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

- Liu, H., K. Jezek, B. Li and Z. Zhao, 2015: Radarsat Antarctic Mapping Project Digital Elevation Model, Version 2. NASA National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center.
- Yamazaki, D., D. Ikeshima, R. Tawatari, T. Yamaguchi, F. O'Loughlin, J. C. Neal, C. C. Sampson, S. Kanae and P. D. Bates, 2017: A high-accuracy map of global terrain elevations. Geophysical Research Letters, Vol.44, No.11, pp. 5844–5853.
- 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.