

現業数値予報結果の評価に基づく全球モデル改良への試み

梅津 浩典・古河 貴裕・下河邊 明・米原 仁・村田 英彦・計盛 正博（気象庁数値予報課）
小野田 浩克（気象庁気候情報課）

1 はじめに

気象庁では的確な防災気象情報を提供するため、その支援資料作成に用いられる、全球モデル・データ同化システムの精度向上を目指して開発を行っている。気象庁の全球数値予報の精度は年々向上しており、北半球 500 hPa 面ジオポテンシャル高度の前 12 カ月移動平均した 120 時間予報の RMSE はこの 15 年間で約 65 m から約 45 m になっており、約 20 m 減少している。また、北西太平洋領域の 72 時間台風進路予報誤差はこの 20 年間で約 600 km から約 300 km に半減している。気象庁では、数値予報精度のさらなる精度向上を目指して数値予報システムの改良・検証・評価を継続して行っている。

本稿では全球数値予報の精度向上のため、気象庁内で行っている評価検証の取り組みについて紹介する。2 節で数値予報システムの開発とその評価について、3 節で数値予報結果の評価に向けた取り組みについて述べ、4 節でまとめを行う。

2 数値予報のシステムの開発とその評価

日常的に数値予報を行っている数値予報システムは巨大で非常に複雑なシステムである。数値予報課における数値予報システムの開発は大きく分けて 3 つの柱から成り立っている。まず、1 つ目が数値予報モデルの開発である。ここでは、物理法則に基づく、現実の大気をより正確にシミュレート可能なモデルの開発が行われる。2 つ目に観測データ処理の開発がある。これは、初期値を作成するた

に必要な観測データを集めてデータ同化を行うための観測データ前処理の開発である。具体的には、観測データの品質を検査し、誤った観測データを除去する処理や観測データのバイアスを除去する処理である。3 つ目に、実際に観測データを同化して初期値を作成する解析システムの開発がある。4 次元変分法に基づく同化システムの開発やアンサンブル同化の開発が行われる。

開発の主軸は、モデルの精度向上のために数値予報システム全体の中で改良すべき部分を、最新の物理学・気象学・計算科学などの知見に基づき十分考察した上で各自の担当部分を修正や変更することによって行われる。そして、その修正や変更に関して評価・検証を行い、プロダクトの精度向上が見込まれれば現業の数値予報システムに組み込むことになる。こうした数値予報システムの各部分の問題意識に基づいた開発に加えて、気象庁では数値予報の誤差が大きかった問題事例等の予報結果を評価することによって誤差の原因を可能な限り絞り込み、数値予報システム全体としての特性の検討を各部分の改良に還元しようとする取り組みを行っている。

数値予報モデルの評価する客観的な指標として国際的に標準と認められているものに CBS 検証があり、北半球・南半球の 500 hPa のジオポテンシャル高度や 850 hPa の気温の RMSE 等を算出し、数値予報モデルの性能を継続的にモニターする指標として広く利用されている。しかし、前述のとおり、現在の全球数値予報システムは非常に複雑であるので、標準的な評価指標や予報結果から誤差の原

因を絞り込み、数値予報システムの各部分の改良につなげるというのが容易ではないというのが実情である。それは予報誤差が生じる原因として主に以下の3つがあるからである。1つ目は予報モデルの不完全さによるものである。この誤差は数値モデルが地球大気を完全に再現できていないことから生じる誤差である。例えば、地球大気の離散化によって生じる誤差や物理過程のパラメタリゼーションが現実大気をうまく再現できずに生じる誤差がある。2つ目は観測データによる誤差である。この誤差は観測データの空間・時間分布密度が不十分であることや観測測器によるものである。観測測器による誤差は、前処理によって補正されるが、それを完全に除去することはできない。3つ目はデータ同化手法の不完全さによる誤差である。例えば、データ同化は計算コストが非常に大きいため、現状、予報モデルを低解像度化・簡素化したモデルで計算を行っている。このように誤差を生じさせる要素は多数存在し、誤差の原因の絞り込みを行うためには、開発者の専門的な知識と精密な組織だったアプローチが必要である。

3 現業数値予報結果の評価に基づく改良の取り組みの例

全球数値予報システムの問題点を共有し、予報誤差の原因を追求するため、庁内の開発者や予報現業者が定期的に集まって議論を行っている。議論の内容は、解析インクリメント、短期予報や季節予報のいわゆる「大外し」事例、台風の進路予報など多様である。議論の目的は、数値予報システムの問題点を抽出し、予報誤差が生じる原因を可能な限り絞り込み、数値予報システム改良のきっかけを得ることである。本項では、解析インクリメントの評価が数値予報モデルの改良や観測データの利用改善につながった例を紹介する。

3.1 解析インクリメントとは

解析値は第一推定値を観測データで修正することによって作成される。その修正量を解析インク

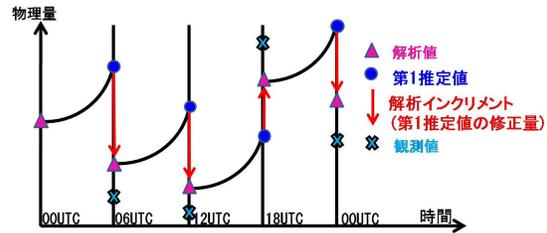


図 1: 気象庁数値予報ルーチンにおける全球解析の流れの模式図。00UTC、06UTC、12UTC、18UTC の1日4回実行されている。ピンクのマークはそれぞれの初期時刻の解析値、水色の×印はそれぞれの初期時刻の観測値、青丸は6時間前の解析値から時間積分した第一推定値、赤色の矢印は第一推定値の修正量である解析インクリメントを示す。

リメントという。これは解析値と第一推定値の差とも言える。図1に気象庁数値予報ルーチンにおける全球解析の模式図を示す。00UTC初期値の解析値から時間積分した6時間予報値を06UTCにおける解析の第一推定値とし、解析時刻前後3時間の観測値を用いて、これを修正して解析値を作成する。このときの第一推定値の修正量が解析インクリメントである。数値予報ルーチンの全球解析はこの手続きを繰り返して動いている。解析インクリメントはどの季節、どの初期時刻でもランダムに出ることが基本的には良い。しかし、ある特定の決まった時間や場所に解析インクリメントが生じる場合等は数値予報システムや観測データそのものに問題があると考えられる。解析インクリメントは予報初期の誤差であり、時間発展した誤差と比べて誤差の原因を理解しやすいという長所もある。

3.2 特定の時間と場所で現れる解析インクリメント

気象庁では、毎日現業等で初期値ごとの解析インクリメントをモニターしている。図2は2011年10月18日00UTCの解析インクリメントを示す。カナダ南西部のアメリカ国境付近において海面更正気圧を下げる解析インクリメントが現れている。その他の日でも、この解析インクリメントは00UTCでいつも現れていた。バイカル湖周辺でも

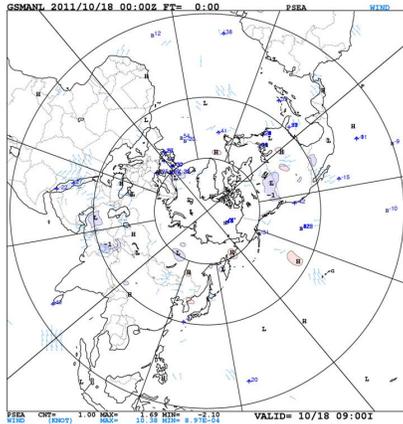


図 2: 2011 年 10 月 18 日 00UTC 初期値の海面更正気圧の解析インクリメント (hPa)。

毎日 12UTC になると同様な解析インクリメントが現れていた (図略)。どちらの事例も現地時刻の夕方時間帯に対応している。この解析インクリメントの原因を調査した。

まず、ゾンデデータとモデルの下層の気温の比較により、これらの解析インクリメントの原因はゾンデデータの同化であることが分かった (図略)。次にモデルの中で実際に起こっていることを調べるために、図 2 の負の解析インクリメント領域における 00UTC の前 6 時間の気温の鉛直プロファイル調べた。図 3 は 2011 年 10 月 17 日 18UTC 初期値の 3 時間予報の鉛直プロファイルである。

この図を見るとモデル面 8 層目から 10 層目にかけて逆転層が見られる。このような場合には、層積雲スキーム (Kawai and Inoue, 2006) が発動しやすいと考えられる。層積雲スキームは亜熱帯大陸西岸付近の海洋上に見られる層積雲を表現する目的で導入されたものであり、以下の 3 つの条件が満たされたときに発動して雲を生成する。

- ・直上に強い逆転層がある。
- ・地表近くが強安定でない。
- ・地表を 1000 hPa としたとき 927 hPa より下層に限る。

実際に層積雲スキームの発動状況を見てみる。図

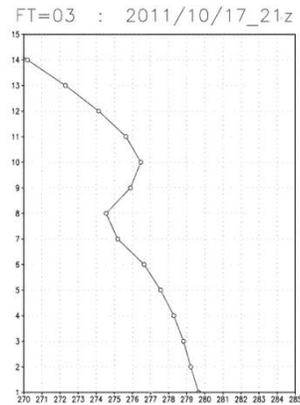


図 3: 北緯 48.26 度、西経 105.00 度の地点の 2011 年 10 月 17 日の 18UTC 初期値の 3 時間予報の鉛直プロファイル。横軸は気温 (K), 縦軸はモデル面の地表面からの層数である。9 層目と 10 層目の間が地上を 1000 hPa としたときの 927 hPa に相当する。

4 は層積雲スキームの 2011 年 10 月 18 日 00UTC の前 6 時間の層積雲スキームの発動率である。発動率とはある格子点で前 6 時間にスキームが発動したタイムステップの割合のことを言う。図 2 の負の解析インクリメントが現れている領域において高頻度で層積雲スキームが発動しており、モデルの中では層積雲が生成している。放射データや衛星画像を用いて実況を見るとモデルに現れている

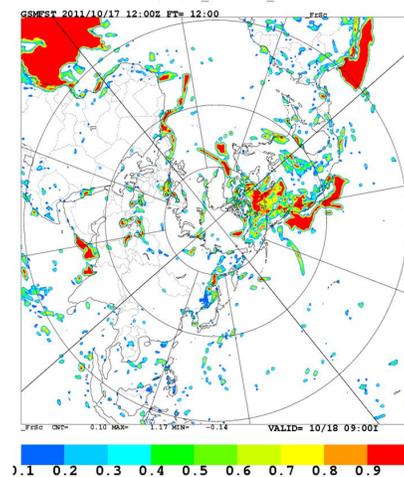


図 4: 10 月 18 日 00UTC の前 6 時間の層積雲スキームの発動率。

ような下層雲は見られない(図略)。大陸上に本来亜熱帯海洋西岸に下層雲を出す目的で使っていた層積雲スキームが原因で過剰な雲が生成していたことが判明した。解析インクリメントの原因は以下の3つのプロセスで起こっていたと考えられる。

1. 大気下層に大量の雲が生成した。
2. 短波放射が遮られ、大気下層が冷やされた。
3. 観測データにより下層の気温を上げる修正が入り、海面更正気圧を上げる解析インクリメントが生じた。

この調査をうけて陸上に過剰に雲が出ないように層積雲スキームが相対湿度 80 %より小さい場合は発動しないという条件を加えて改良を行った(Shimokobe, 2012)。この改良は 2012 年 12 月 18 日 00UTC 初期値より現業化され、解析インクリメントの減少と予報精度の改善が確認された。この事例は解析インクリメントの評価がモデルの改良につながった一例である。

3.3 周期的に現れる解析インクリメント

図 5 は 2011 年 8 月 15 日の 00UTC から 18UTC までの 30 hPa 面のジオポテンシャル高度の解析インクリメントを示している。特に 8 月から 10 月になると解析インクリメントが南極上空から見て反時計まわりに 1 日周期で周回するという症状が見られていた。また、この解析インクリメントは成層圏から対流圏の下層まで伸びている(図略)こともわかり、この解析インクリメントの原因が議論された。

まず、観測データによる問題なのかモデルが 1 日周期の変動を表現できていないのかが議論され、衛星データに問題がありそうなことがわかった。次に解析インクリメントの場所と衛星の軌道の対応を調査すると、解析インクリメントの原因は、NOAA-18 に搭載されている改良型マイクロ波気温探査計(AMSU-A)の観測データの問題であることが判明した。図 6 は 2010 年 10 月 6 日の 30 hPa 面ジオポテンシャル高度の解析インクリメントと NOAA-18 に搭載されている AMSU-A のチャンネ

ル 9 の輝度温度(30 hPa から 200 hPa 付近の気温に感度がある)の観測値と第一推定値の差(D 値)である。解析インクリメントの青色の領域は D 値の青色の領域と対応している。また、この領域というのは衛星が南から北に動いている軌道の領域に対応している。今回の調査で NOAA-18 だけでなく衛星データには衛星が南から北に動いている軌道と衛星が北から南に動いている軌道でバイアスが異なることが分かった。このバイアスを軽減するため、従来のバイアス補正の手法に加えて衛星の軌道による補正パラメーターを追加して 2012 年 11 月に現業化している。この事例は解析インクリメントの評価から同化する観測データのバイアス軽減に成功した一例である。

4 まとめと今後の課題

気象庁では数値予報結果を評価することによって数値予報システムの各部分の開発への還元に取り組んでいる。しかし、現在の数値予報システムは複雑化しており、誤差の原因を絞り込むのは容易ではないのが実情である。ここでは、気象庁で定期的に行っている開発者や予報現業者を集めた議論の中から一例を紹介した。数値予報のプロダクト・GPV は大学の研究者らにも提供されており、数値予報の特性についてプロダクト利用者と開発者が議論することは、数値予報の精度向上に向けて重要であると考えている。

参考文献

- Kawai, H., and T. Inoue, 2006: A simple parameterization scheme for subtropical marine stratocumulus. *SOLA*, **2**, 17-20.
- Simokobe, A., 2012: Improvement of the Stratocumulus Parameterization Scheme in JMA's Operational Global Spectral Model. *CAS/JSC WGNE Reserch Activities in Atmospheric and Oceanic Modelling*, **42**,04-17.

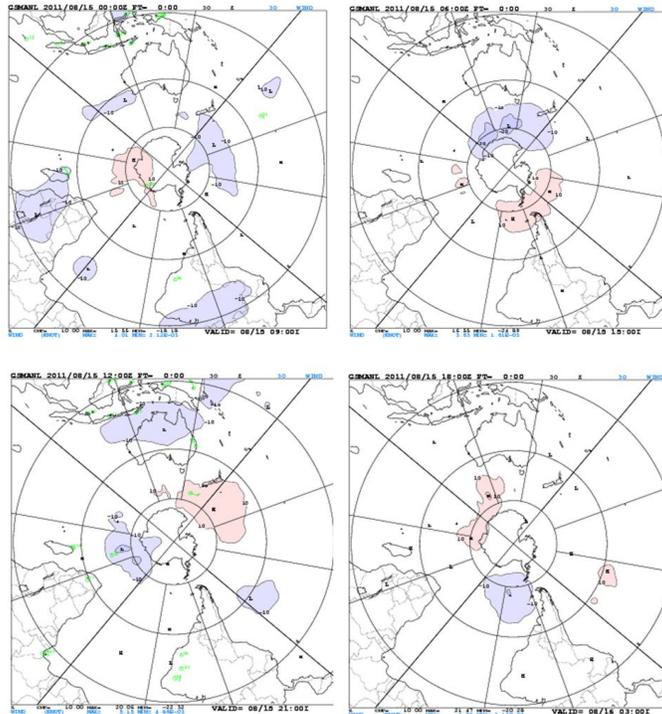


図 5: 30 hPa 面ジオポテンシャル高度の解析インクリメント (m)。 (左上)2011 年 8 月 15 日 00UTC 初期値。 (左下)2011 年 8 月 15 日 06UTC 初期値。 (右上)2011 年 8 月 15 日 12UTC 初期値。 (右下)2011 年 8 月 15 日 18UTC 初期値。

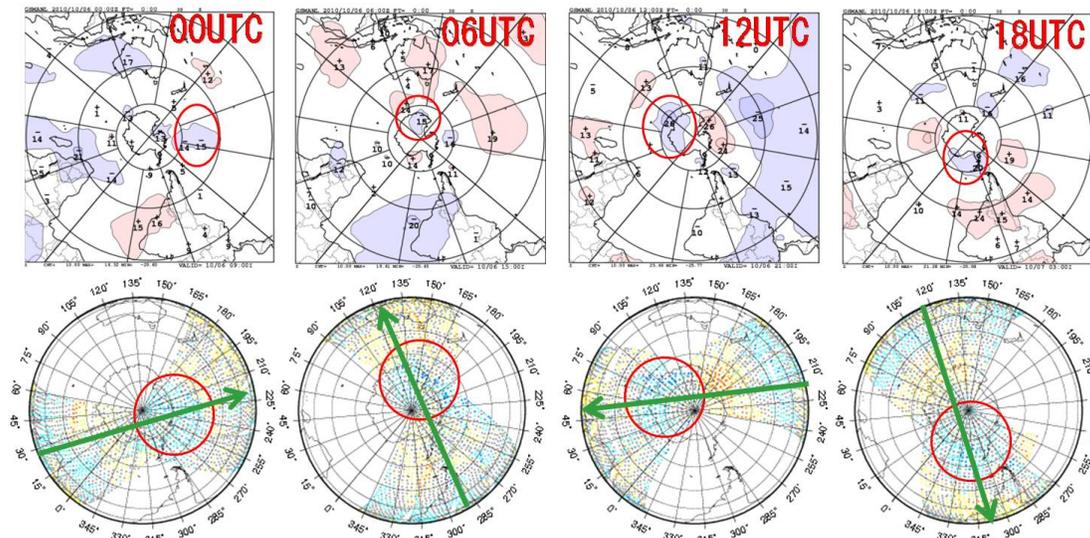


図 6: (上)2010 年 10 月 6 日の 30 hPa 面ジオポテンシャル高度の解析インクリメント (m)。 左から 00UTC、06UTC、12UTC、18UTC である。 青色が負の解析インクリメント、赤色が正の解析インクリメントを示す。 (下)2010 年 10 月 6 日の NOAA-18 に搭載されている AMSU-A のチャンネル 9 の入電状況 (プロット) と輝度温度の観測値と第一推定値の差 (K)。 青色が負で赤色が正であることを示す。 左から 00UTC、06UTC、12UTC、18UTC である。 緑の矢印は衛星の軌道を示す。 どちらの図も南極上空から見たものを描いている。