

非線形性の強い観測データの全球大気解析での利用

石橋俊之（気象研究所）

1. はじめに

衛星輝度温度や GPS 大気遅延量のようなリモートセンシング観測は、ラジオゾンデなどの直接観測と並んで、大気解析においてすでに主要な情報源となっている。将来的にも米欧の NPP, JPSS, METOP 衛星によるマイクロ波サウンダや赤外超多チャンネルセンサ観測の継承、第 3 世代 Meteosat による静止衛星による赤外超多チャンネルセンサ観測の開始、マイクロ波イメージャについても JAXA の GCOM-W 衛星(2012 年 2 月打ち上げ予定)に搭載される AMSR2 センサ等による観測計画が進められている。大気状態を精度良く解析するには、データ同化によってこれらの衛星観測から十分な情報を取り出す必要があるが、そのためにはこれらの観測データがもつ“非線形性”を同化システムで適切に扱えることが必要である。

大気についての観測量と数値予報モデル内の状態量の関係や大気状態の時間発展は、一般に非線形である。現実大気の状態を精度良く解析する手法の一つである 4 次元変分法(4D-Var)による大気解析は、観測演算子の随伴演算子による評価関数の勾配の計算とそれを用いた非線形最適化アルゴリズム(共役勾配法や準ニュートン法)によって実現される。したがって、演算子の非線形性が弱いことが前提となっている(*)。水平スケール 20km 程度の離散格子で表現できる大気現象については、接線形仮定は良い近似となっており、接線形性はまた同化システムが安定して精度の良い解析を行うためにも望ましい性質である。しかし、はじめに述べたように今後さらに衛星観測、特に雲や降水の影響を受けた観測を十分に利用するには、接線形性と非線形性を同化システムの中で共存させることが必要である。(*以上は、随伴演算子を必要としない手法であるアンサンブル・カルマンフィルタについても理論的枠組みの共通性から同様である。)

本稿では、演算子の接線形性と非線形性という相反する性質を共立させるアルゴリズムである基本場の更新(Courtier et al. 1994)を気象庁全球 4D-Var に実装し、1 ヶ月の同化・予報サイクル試験を実施した結果について報告し、その結果を受けて、今後のスキームの改良、非線形観測の同化に向けた研究開発について述べる。

2. 基本場更新の定式化

基本場の更新とは、演算子を接線形展開する場合(基本場)を更新することである。基本場更新では、D 値(観測とモデル推定値の差)も更新する必要があるが、高解像度モデルや観測データの前処理を再実行するのは計算コストから見て望ましくないばかりでなく、システム全体の近似精度から見て必須でない可能性がある。観測とアウトモデルによる推定値の代表性誤差に関して暗黙に使われている仮定を陽に用いることで、アウトモデルの再実行をせずに D 値を更新することができる(石橋 2011)。

3. 解析・予報サイクル実験

気象庁全球数値予報システムの実験システム(MRI-NAPEX(大野木他 2011))に上記の基本場更新スキームを実装し、2009 年 7 月 20 日 00UTC から 2009 年 9 月 9 日 18UTC の 52 日間のデータ同化サイクルを実施し、8 月 1 日から 31 日の 12UTC 解析を初期値とする 9 日予報を実施した。これを TEST 実験と呼ぶ。比較のため、基本場更新をしない通常の同化・予報サイクルも行った。これを CNTL 実験と呼ぶ。実験は低解像度版の解析予報システムで行った。水平分解能は、予報モデルは約 60km、インナーモデルは約 120km であり、水平分解能以外は現業システムと同一スペックである。

4. 実験結果

TEST 実験の解析場は CNTL に比べて、熱帯を中心に可降水量が増加傾向、大陸西岸で対流圏下層の気温低下が見られた。比湿解析場の帯状平均では、熱帯対流圏中層の湿潤化と下層の乾燥化、ハドレー循環の強化傾向が見られた(以上図略)。ゾンデを真値とする検証では、熱帯や夏半球の対流圏中層で解析場に見られる対流圏中層の乾燥・バイアスの改善が見られる(図 a)。予報場では、熱帯の ITCZ の初期 24 時間降水量の増加、周辺での減少傾向があり(図 b)、上記解析場の変化と対応する。これらの変化は、基本場更新によって非線形性の強い水蒸気量に関する観測情報がより適切に解析場に取り込まれる一方、モデルはそれを大気中に維持せず、予報初期段階で降水とし

て落としてしまうことが示唆される。また、大陸西岸の下層の低温化は、静止衛星の窓チャンネル(対流圏下層の温度、水蒸気量に感度がある)の輝度温度を同化した場合にも見られる応答である。この領域は現実大気では下層雲が発生しやすい領域であるが、この雲は数値予報モデルでは表現が難しい。

予報精度(図 c)を見ると、対初期値検証では特に予報初期の精度悪化が顕著であり、とくに熱帯域で著しい。解析場の変化は主に熱帯の湿度場にあったこと、そこではモデルの誤った応答が示唆されたことと整合する。予報期間中期以降では改善傾向が見られるが統計的な有意性はない。これに対して、対ゾンデ検証(図 d)では、予報初期では概ね改善、中期以降は熱帯以外は概ね改善、熱帯は振動しており、予報初期と熱帯では対初期値検証と整合が良くない。対初期値検証は、“初期値誤差が大きいほど予報誤差も大きい”という線形誤差成長的な仮定に基づいている。対初期値検証と対ゾンデ検証の不整合から示唆されるのは、解析場がモデルバイアスに起因するバイアスを持っている可能性であり、前述の中層の乾燥・バイアスや大陸西岸の雲表現に関わるモデルの系統的な誤差の存在を支持するものである。

5. 議論

前節で記したサイクル試験の結果は、先行して行った単発試験で示唆された対流圏中層の乾燥・バイアスに代表されるモデルバイアスへの対応の必要性を確認するものとなった。今後の課題としてはまず、4D-Var でモデル誤差を考慮することがある。これは弱拘束化と呼ばれるが、観測項や背景項と同様にモデル誤差に対応する項を評価関数に付加するものである。この場合、モデル誤差の期待値は 0 が仮定される。モデル誤差の期待値が 0 でない場合(バイアス)は、変分法バイアス補正的なアプローチがある。

また、別途、進めている非晴天域の輝度温度衛星観測との併用試験がある。非線形性の強いこれらのデータを適切に同化することが、基本場更新スキーム導入の目的であるが、現状で同化した場合の応答を解析することで、本スキームや、モデルバイアスについて有効な情報が得られると考える。

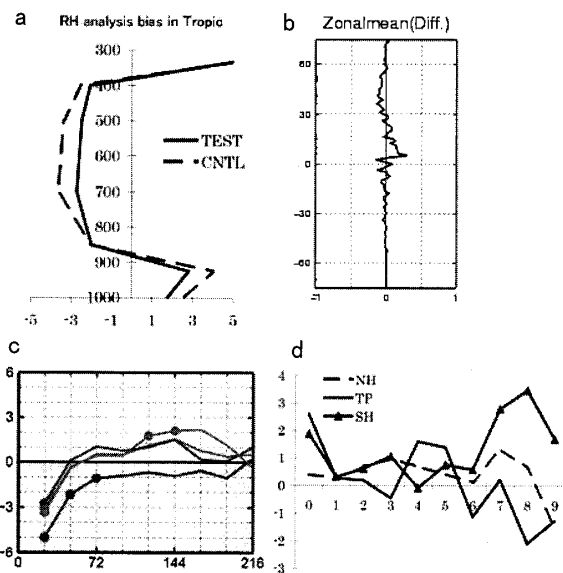


図 a はゾンデを真とする解析場の湿度・バイアス、b は予報初期 24 時間雨量の TEST と CNTL の差 (TEST - CNTL) の帯状平均、c と d は 850hPa 気温の予報誤差の改善率、c は対初期値、d は対ゾンデである。

謝辞: 本研究は、JAXA「GCOM 研究公募共同研究」に一部支援を受けている。