

2. 衛星データ同化・再解析

岡 本 幸 三*

1. はじめに

観測と数値モデルを融合させるデータ同化においては、観測の重要性は言を俟たない。本講演では、衛星観測データの同化に着目して、数値予報や再解析の精度の向上という観点から、観測データの重要性を紹介する。そしてデータ同化を用いた、将来の観測システムの評価についても紹介する。

2. 衛星観測同化の数値予報・再解析精度への影響 2.1 OSE

衛星観測データを同化することによって数値予報や再解析の精度がどのように変わるか（インパクト）を調べるためには、対象となる衛星観測データの有無によるデータ同化の結果（解析場）、及びそれを初期値とする予報の結果を比較するのが最も直接的である。このように観測データの有無や利用方法の変更に対して、それぞれデータ同化実験を行い、その結果を比較・評価することを OSE (Observing System Experiment) と呼ぶ。例えば気象庁では、宇宙航空研究開発機構 (JAXA) のマイクロ波イメージャ AMSR2 (Advanced Microwave Scanning Radiometer 2) が観測する輝度温度データを新たに同化した OSE を実施し、2012年7月11日に九州で発生した豪雨の予測精度などが改善することを確認した (気象庁・JAXA 2013)。これは、豪雨をもたらした海上下層の水蒸気情報の把握が従来の観測網だけでは難しかったのに対し、AMSR2を追加することによって改善したためである。

一方、既に同化されている観測データを除去するこ

とによる予報誤差の変化を調べることで、その観測のインパクトを調査することも可能である。これは観測除去実験 (denial experiment) と呼ばれる、OSE の一種である。McNally *et al.* (2014) は、2012年当時の欧州中期予報センター (ECMWF) で同化されていた、全ての低高度衛星を除去することにより、2012年に米国東岸に上陸し大きな被害をもたらしたハリケーン Sandy の進路予測が大幅に改悪することを示した。衛星観測タイプ毎にいくつか OSE を実行したところ、特に低高度衛星に搭載された、赤外及びマイクロ波域の輝度温度観測データが利用できないことによる影響が大きかった。またデータ同化システムを高度化することにより (場に依存した背景誤差を導入)、この悪化が若干緩和することも示した。

2.2 FSOI

観測データのインパクトを評価する手法として OSE の他に、FSOI (Forecast Sensitivity to Observation Impact) と呼ばれる手法がある (Langland and Baker 2004 ; Cardinali 2009)。これは、予報モデルなどのデータ同化システムを構成する各要素を、線形仮定に基づき分解することにより、予報誤差をもたらす個々の観測の寄与を計算するものである。FSOI を使うことにより、個々の観測データ (ある場所・時刻の観測点ごと、チャンネルごとなど) が予報の改善・改悪にどの程度寄与したかを詳細に調査することが可能である。

気象庁全球同化システムにおける FSOI の結果を第 1 図に示す (石橋 2015)。2015年のシステムにおいて予報改善への寄与率が最も高いのは、極軌道衛星搭載マイクロ波サウンダ (AMSU-A : Advanced Microwave Sounding Unit-A) で、次にラジオゾンデ、航空機、極軌道衛星搭載ハイパースペクトル赤外サウンダ (HSS : Hyperspectral Sounder)、静止衛星画像に基づ

* 気象研究所。

kokamoto@mri-jma.go.jp

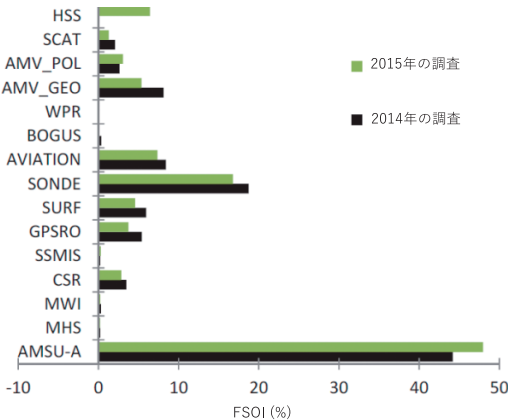
© 2020 日本気象学会

く大気追跡風 (AMV : Atmospheric Motion Vector) と続く (第1図の緑の横棒). AMSU-A のインパクトが最も大きいのは, 観測の品質が高いことに加え, チャンネル数・搭載衛星数が多いことにも起因する. 2014年の寄与率 (黒の横棒) と比較すると衛星観測の寄与率が増加しているが, これはHSSなどの新規衛星観測の導入や衛星の高度利用によるものである. ラジオゾンデの寄与率は衛星に次いで大きい, 一観測あたりの寄与率はさらに大きくなる (図略). またラジオ

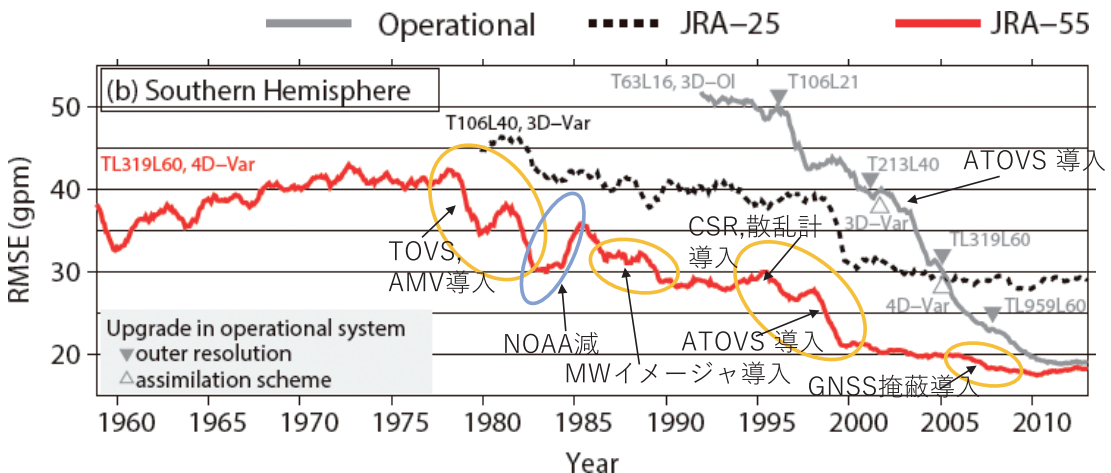
ゾンデは衛星プロダクトのリトリブ処理の作成や数値予報検証にも用いられるため, この指標に現れない寄与もあることにも注意が必要である. また, 衛星マイクロ波イメージャ (MWI : Microwave Imager) は寄与率が小さいが, これは現在の気象庁の同化システムでは晴天域の輝度温度しか利用していないことが関係している. 実際, ECMWFでは, 晴天だけでなく全天候域でマイクロ波イメージャを同化することにより, インパクトが大きく上昇することを示している (Geer *et al.* 2017).

2.3 再解析へのインパクト

データ同化の応用としての再解析においても, 衛星観測の有無や品質がその精度に大きく影響する. 第2図は, 気象庁55年長期再解析 (JRA-55; Kobayashi *et al.* 2015) を初期値とした48時間予報値の誤差 (RMSE : Root Mean Square Error) を表し, 要素は南半球の500hPa 高度場である. 参考のため, JRA-25長期再解析と気象庁現業解析を初期値とした48時間予報誤差もそれぞれ掲載している. 現業予報の精度は, モデル・同化システムの日々の更新や利用観測データの変化により, 大きく変動・改善している. 一方, 再解析を初期値とした予報精度の変化は, モデル・同化システムを固定しているため, 観測システムの変化や大気の前測可能性の自然変動によって決まる. 実際, 図中に示した衛星観測の導入や利用衛星数の減少 (1980年代前半のNOAA衛星減少など) によって, 予報精度が大きな影響を受けていることが分かる. 特



第1図 観測種別 (縦軸) ごとの FSOI. 2014年 (黒棒) と2015年 (緑棒) の気象庁全球データ同化システムで利用された観測データに対して計算. 2014年7月26日から28日の3日間の積算値. 石橋 (2015) を一部改訂.



第2図 気象庁全球モデルを用いた2日予報誤差の経年変化. 南半球の500hPa 高度場のRMSEを示す. 各線は異なる解析場を初期値による予報誤差を表しており, 赤実線がJRA-55, 黒点線がJRA-25, 灰実線が現業解析を示す. 主要な衛星センサの導入時期を挿入している. Kobayashi *et al.* (2015) を一部改訂.

に、マイクロ波サウンダ AMSU-A を含んだ ATOVS (Advanced TIROS Operational Vertical Sounder, 赤外サウンダや AMSU-A 等の複数のサウンダから構成される測器の総称) の導入は誤差減少への寄与が大きく、これは前節の FSOI の結果で紹介した結果と整合的である。なお北半球の予報誤差では、衛星観測システム変化との対応は第 2 図ほど明瞭ではない(図略)。これは、北半球ではラジオゾンデなどの陸上の現場観測の影響が相対的に大きいためである。

また再解析結果を用いた現象の解析においても、衛星観測データの影響は大きい。Taguchi (2017) は、衛星観測データを同化しない再解析 (JRA-55C ; Kobayashi *et al.* 2014) と JRA-55 を比較し、JRA-55C はいくつかの成層圏突然昇温の発生を再現できないこと、再現できても 1~4 日程度遅れが生じることがあることを示した。また Noguchi and Kobayashi (2018) は、2002年 9 月に南半球成層圏上層で生じた顕著な極渦分裂現象が、JRA-55C では表現できないことを示し、突然昇温の発生メカニズムについての仮説を示した。Kobayashi *et al.* (2014) は、JRA-55 と JRA-55C の気候学的特性は、対流圏や成層圏下層においては類似しているものの、ラジオゾンデ観測などが少ない南半球高緯度や成層圏上層は異なることを確認した。

3. 将来観測システムの評価

本節では、データ同化システムを利用して、将来の観測システムの評価を行う手法について紹介する。現在存在しない観測データであっても、それを何らかの方法で擬似的に作成することができれば、OSE と同様にその疑似観測データの有効性を評価することが可能となる。このような手法は OSSE (Observing System Simulation Experiment) と呼ばれる (石橋 2013)。OSSE は同化システム自体の評価などにも使われるが、観測システムの評価という目的で用いる際には、疑似観測データの作成が大きな課題となる。疑似観測データの作成は、高精度な解析場や、ネイチャーランと呼ばれる高精度な予報モデル出力を入力として、高精度な衛星シミュレーターを用いて計算する。Okamoto *et al.* (2018) は、衛星搭載ドップラー風ライダーの OSSE を行うため、感度解析を用いて作成した高精度な解析場から、極軌道衛星と低緯度域だけを観測する衛星に搭載した場合をそれぞれ想定して、風速疑似観測データを算出した。この風速疑似観測データを同化したところ、いずれの衛星においても数値予報精度

は改善し、特に熱帯域で大きな改善を確認した。ただし両軌道はそれぞれ異なる改善を示すため、どちらが良いかはさらに調査が必要といった結論を得た。

OSSE を用いた観測システムのインパクト評価は、同化研究者と衛星機関が連携して古くから行われている (例えば Atlas 1997)。さらに米国では、CGOP (Community Global OSSE Package) と呼ばれる、OSSE を基盤的システムとして広く実行できる環境が整備されており、小型衛星など様々な将来衛星データの評価を行うなど、OSSE への取り組みを強化している (Boukabara *et al.* 2016)。

OSSE は、将来衛星観測を評価するための定量的な材料を提供する有効な手段であり、衛星計画やその他の大規模な観測システム計画を策定する上で重要なプロセスの 1 つとなる可能性がある。さらに現実的な同化システムをベースに構築することにより、その観測が実現後に現業利用を開始するまでの時間を大幅に短縮することができるという利点がある。一方で、疑似観測データの作成に含まれる不確実性や、将来の観測データを現在の同化システムを用いて同化することによる制約、データ同化システムで評価できない価値があること (例えば、モデル検証や実況監視での利用) など、OSSE だけでは観測システムの評価に限界があることにも注意が必要である。

4. 最後に

本稿では、数値予報のためのデータ同化において、観測データ、とくに衛星観測データがいかに重要な役割を果たしているかを述べてきた。このような衛星観測の大きな寄与は、広域・高頻度・均質・高精度という衛星観測の特性に起因し、近年の衛星観測技術の発展や、データ同化技術の高度化や計算機能力の拡大によって、その重要性はさらに増している。衛星データを有効に同化するためには、衛星やセンサの観測原理やメカニズム、リトリブ処理方法、誤差分布などの統計的特性を把握する必要があり、測器・データ処理・衛星・データ同化・モデルそれぞれの分野の開発者が緊密に連携することが重要である。

参考文献

- Atlas, R., 1997: Atmospheric observations and experiments to assess their usefulness in data assimilation. *J. Meteor. Soc. Japan*, **75**, 111-130.
- Boukabara, S.-A. *et al.*, 2016: Community Global Observ-

- ing System Simulation Experiment (OSSE) Package (CGOP): Description and usage. *J. Atmos. Ocean. Technol.*, **33**, 1759-1777.
- Cardinali, C., 2009: Monitoring the observation impact on the short-range forecast. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **135**, 239-250, doi:10.1002/qj.366.
- Geer, A. J. *et al.*, 2017: The growing impact of satellite observations sensitive to humidity, cloud and precipitation. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **143**, 3189-3206.
- 石橋俊之, 2013: 観測システムシミュレーション実験 (OSSE). *天気*, **60**, 831-832.
- 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.
- 気象庁, JAXA, 2013: 第一期水循環変動観測衛星「しずく」の気象庁での利用について (平成25年9月12日合同報道発表資料).
http://www.jaxa.jp/press/2013/09/20130912_shizuku_j.html (2018.9.3閲覧)
- Kobayashi, C., H. Endo, Y. Ota, S. Kobayashi, H. Onoda, Y. Harada, K. Onogi and H. Kamahori, 2014: Preliminary results of the JRA-55C, an atmospheric reanalysis assimilating conventional observations only. *SOLA*, **10**, 78-82.
- Kobayashi, S. *et al.*, 2015: The JRA-55 reanalysis: General specifications and basic characteristics. *J. Meteorol. Soc. Japan*, **93**, 5-48.
- Langland, R. H. and N. L. Baker, 2004: Estimation of observation impact using the NRL atmospheric variational data assimilation adjoint system. *Tellus A*, **56**, 189-201.
- McNally, T., M. Bonavita and J. Thépaut, 2014: The role of satellite data in the forecasting of hurricane Sandy. *Mon. Wea. Rev.*, **142**, 634-646.
- Noguchi, S. and C. Kobayashi, 2018: On the reproducibility of the September 2002 vortex splitting event in the Antarctic stratosphere achieved without satellite observations. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **144**, 184-194.
- Okamoto, K. *et al.*, 2018: Feasibility study for future space-borne coherent Doppler wind lidar, part 3: Impact assessment using sensitivity observing system simulation experiments. *J. Meteor. Soc. Japan*, **96**, 179-199.
- Taguchi, M., 2017: Comparison of large-scale dynamical variability in the extratropical stratosphere among the JRA-55 family data sets: impacts of assimilation of observational data in JRA-55 reanalysis data. *Atmos. Chem. Phys.*, **17**, 11193-11207.