

第5章 トピックス

5.1 WMO 第5回観測システムの数値予報へのインパクトワークショップ¹

5.1.1 はじめに

「観測システムの数値予報へのインパクトワークショップ (WS-IVOS: workshop on the impact of various observing systems on numerical weather prediction)」は、世界各国の数値予報 (NWP) センターや研究機関等が実施する「各種観測システムが NWP システム(以下単に NWP と書く)に与える影響調査」の知見を集成するためのワークショップであり、世界気象機関 (WMO) の主催で、4年に1回の頻度で開催されている。第1回は1997年に開催され (Pailleux 1997)、それ以降は、2000年 (Pailleux and Böttger 2000)、2004年 (Böttger et al. 2004)、2008年 (Pailleux et al. 2008) にそれぞれ開催された。これらの会合では、全球及び領域 NWP を用いたさまざまな観測システム実験 (OSE)²、観測システムシミュレーション実験 (OSSE)³ 及び観測感度解析⁴ 等の結果が紹介された。この WS-IVOS で得られる知見は、NWP にとって望ましい今後の観測のあり方を検討する上で極めて有益な情報をもたらすものであり、WMO における全球観測システムの再構築や WMO 統合全球観測システム (WIGOS) 検討のための、重要な情報源となってきた。

最新の会合である第5回 WS-IVOS(WS-IVOS-5)は、2012年5月に米国アリゾナ州セドナ市で開催された。会合に先立ち、WS-IVOS-5の科学組織委員会から推奨研究課題(表5.1.1)が提示された。これらの課題はWMOの今後の勧告策定等で重要とされているものである。同会合には、世界各国の気象機関や研究機関など、13カ国30機関から59名が参加し、講演と討議からなる3つのセッション(全球予報インパクト研究、領域予報インパクト研究、特定研究)が行われ、さらに全体討議が行われた。

本節では、WS-IVOS-5で注目された話題や、討議等を通してとりまとめられた報告の抜粋を示す。まず特に重要な話題である欧州の高層観測再配置検討について第5.1.2項で示し、次に観測感度解析に関する話題について第5.1.3項で示す。その後、会合でまとめられた話題のうち推奨研究課題に関するものを抜粋して第5.1.4項で示し、最後に次回会合に関する検討状況を第5.1.5項で示す。

¹ 佐藤 芳昭

² ある既存の観測を追加(排除)するなどして解析予報実験を実施し、その観測がNWPにどのような効果をもたらす(もたらしている)かを評価する手法

³ シミュレーションにより作成された仮想観測を追加するなどして解析予報実験を実施し、その仮想観測がNWPにどのような効果をもたらすかを評価する手法

⁴ アジョイントモデルやアンサンブル予報等を用いて、個々の観測がどの程度NWPの精度改善に寄与しているかを定量的に推定する手法

なお、WS-IVOS-5の最終報告は Andersson and Sato (2012) にまとめられているので、詳細についてはそちらを参照願いたい。

5.1.2 欧州高層観測再配置調査

欧州では、29の国家気象機関で欧州気象サービスネットワーク (EUMETNET⁵) を構成している。EUMETNET は、観測や予報、研究や訓練などにおけるメンバー間の協力活動を推進する枠組みであり、観測に関しては EUMETNET 複合観測システム (EUCOS) がこれを担当している。

EUCOS は、欧州における最適な観測ネットワークを構築するための調査活動を行っており、その一環として高層観測の再配置調査を実施した。これは、航空機観測の拡大や NWP の進歩により高層観測の効率化が可能と考えられているためである。この事情は欧州だけにとどまるものではないため、本調査の結果は、世界の気象機関の重要な関心事項となっている。

この調査において EUCOS は、6つの高層観測削減シナリオ(表5.1.2)を提示し、これに基づき欧州中期予報センター (ECMWF) が全球 NWP で、ハンガリー気象局が領域 NWP で、それぞれ OSE を実施した。本調査における特に重要な情報として、2通りの 100km 間隔ラジオゾンデ間引き実験 (Sc3a,3b) の結果があげられる。全球 NWP ではどちらの実験も(全球スケールの評価指標で)予報改悪がほとんど見られなかった。一方領域 NWP では、00UTC で間引きを行わない実験 (Sc3b) では予報改悪が見られなかったが、全ての時間で間引きを行う実験 (Sc3a) では予報改悪が見られた。この原因として、航空機による観測の時間分布が考えられる。欧州では 00UTC が深夜であり航空機の離着陸がほとんどないことから、航空機による大気鉛直プロファイル観測データが得られず、結果としてラジオゾンデ観測が重要となる一方、他の時間帯は航空機観測データが得られることから、ラジオゾンデ観測の重要性が相対的に低くなると考えられるのである。また報告では、ラジオゾンデ観測の間引きにより下層水蒸気解析に負のインパクトが見られること、航空機による気温観測にはバイアスがあることなども述べられた。この結果を受け、EUCOS 科学諮問委員会は以下の勧告を出した。

- 航空機観測により3時間毎に大気鉛直プロファイルが得られる空港とラジオゾンデ観測の重複は避けるべきであり、Sc3b 実験で用いた観測配置が推奨される。
- 下層水蒸気解析精度の悪化は望ましくない。下層水蒸気観測を強化すべきである。
- より一様な観測を目指した、さらなる研究の実施が推奨される。

この勧告を受け、EUCOS では以下のアクションを、

⁵ <http://www.eumetnet.eu/>

表 5.1.1 WS-IVOS-5 の推奨研究課題。説明の後の括弧内の記号は WS-IVOS-5 における成果の状況を示し、○：十分成果があったとされた課題、△：ある程度成果があったとされた課題、×：成果がなかったとされた課題、をそれぞれ示す。

	省略名	名称	科学的課題
地上ベース観測	S1MarinePS	海上気圧観測	衛星高密度海上風観測がある中で、どの程度の密度の海上気圧観測が必要か。実験提案：(a) 北大西洋における間引き実験、(b) 南半球における OSSE (○)
	S2Strat	成層圏のゾンデ観測	現在の衛星観測がある中、どの程度ゾンデ観測が必要か。特に熱帯域ではどうか (○)
	S3AMDAR	航空機観測の観測範囲	現在の AMDAR 等の航空機観測の、同化のインパクトはどのようなものか。ネットワーク拡大における優先課題は何か (○)
	S4ASAP	海上ゾンデ観測の観測範囲	現在の自動海上ゾンデ観測 (ASAP) の同化のインパクトはどのようなものか。限られた資源における最適な配置はどのようなものか (○)
	S5Radar	レーダー観測	現在のレーダー観測 (動径風や反射強度) のインパクトは何か (○)
宇宙ベース観測	S6RO	掩蔽観測の飽和	掩蔽観測衛星は、どの程度の観測プロファイル数があれば、情報飽和 (これ以上データの情報が入らず、予報精度向上が望めない) となるか (○)
	S7SatLand	陸域放射輝度観測	陸上における新たな放射輝度同化開発のインパクトはどのようなものか (○)
	S8Sounders	複数衛星のサウンダデータ利用	利用可能な補間軌道の衛星搭載サウンダの複数利用により得られる利点は何か。たとえば複数の、マイクロ波気温サウンダや、ハイパースペクトル赤外気温・水蒸気サウンダの同時利用はどうか (○)
	S9AMVs	大気追跡風	現在の大気追跡風の同化のインパクトはどのようなものか (○)
一般	S10Thinning	データ密度と間引き	様々な観測の密度や間引き方法により得られるインパクトや恩恵は何か (○)
	S11PBL	領域高解像度 NWP のための境界層の観測	領域高解像度 NWP のための境界層 (PBL) の観測の改善すべき注目点は何か。どのような観測でどのような時間空間解像度か (○)
	S12UA	ゾンデ観測インパクト調査	欧州で行われたような高層観測最適化研究は他の地域で可能か (×)
	S13AdjEns	(観測感度解析の) 領域 NWP への応用とアジョイント、アンサンブル手法	全球大気エネルギーよりも適切な評価指標が存在する可能性がある熱帯やメソスケールでの、アジョイント及びアンサンブル手法観測インパクト解析によって得られる知見は何か (○)
	S14ExtRange	延長予報における観測のインパクト	延長予報 (7~14 日) のために特に重要な観測は何か (×)
	S15Targeting	機動的観測	注目した現象に対して特別観測を行う各種機動的観測実験が、観測システムデザインについて示すものは何か (○)
	S16aAMMA, S16bIPY	AMMA と IPY の残したものの	アフリカモンスーン学際的分析 (AMMA) や国際極年 (IPY) での特別観測の継続運用要素により、どのような効果や恩恵が期待されるか (○)

欧州の気象機関に提示した。

- ラジオゾンデと航空機による複合観測として、90 のラジオゾンデ地点と 60 の空港を設定する。このうち、空港近傍の 12UTC のラジオゾンデ観測の必要性を検討すること。
- 鉛直プロファイル観測間の水平距離が 100km を超える場合に、その空白を埋めること。
- 高密度下層水蒸気鉛直プロファイル観測の実施に向けた活動をする。

なお、会合中の議論において、航空機観測が有用であることは間違いないが、その運行は気象状況等⁶ や人間活動⁷ などに大きく影響されるので、航空機観測

だけに頼ることにならないように注意が必要であるとのコメントがあった。

5.1.3 観測感度解析

観測感度解析は、観測が NWP に対して与える影響を定量的に解析する手法であり、代表的な指標として、アジョイントモデルを用いて観測が NWP による予測に与える影響を見積もる FSO (Langland and Baker 2004) や、観測が客観解析に与える影響を見積もる DFS (Cardinali et al. 2004) などがある。前回の会合 (WS-IVOS-4, Pailleux et al. 2008) では全球 NWP を用いた研究結果が多く紹介されたが、WS-IVOS-5 では領域 NWP を用いた研究結果も多数紹介された。これらの指標は各種観測の NWP に対する重要性を客観的に測る重要な指標であり、観測当局にとっても観測の意義を示すのに重要であることから、その継続的な調査が求められている。

⁶ 2010 年のアイスランドの火山噴火により欧州の航空機運行が制限され、データが大幅に減少したことが記憶に新しい
⁷ たとえば欧州ではクリスマスや元日に航空機の運行が大幅に減少することが会合で示された

表 5.1.2 EUCOS 高層観測再配置計画で EUCOS が提示した実験シナリオ。ただしここで間引きされる観測データは欧州域の観測データに限られる。

実験名	内容
Sc1	ベースライン実験（全球気候観測システム高層観測ネットワーク (GUAN) に登録されたラジオゾンデのみを利用）
Sc2	コントロール実験（現在の利用可能なデータをすべて利用）
Sc3a	ラジオゾンデデータ水平 100km 間隔間引き実験
Sc3b	ラジオゾンデデータ水平 100km 間隔間引き実験、ただし 00UTC では間引きを行わない
Sc4	ラジオゾンデ・航空機データ水平 250km 間隔間引き実験
Sc5	ラジオゾンデ・航空機データ水平 500km 間隔間引き実験

このような要請から、米国の WRF モデル用データ同化システム⁸ 向けには、FSO を求めるパッケージが開発されており、これを用いた調査研究を容易に実施できるようになっていることが紹介された。

また、WS-IVOS-5 では、各国の観測感度解析調査の結果をとりまとめた。それによれば、2012 年現在全球 NWP の予測精度向上に特に寄与している重要な観測はマイクロ波気温サウンダ AMSU-A、ハイパースペクトル赤外サウンダ AIRS / IASI、ラジオゾンデ観測、航空機観測、及び大気追跡風 (AMV) であり、さらに GNSS 掩蔽観測も重要な観測であるということである。一方、領域 NWP では地理的な条件等によって重要な観測が異なるとされた。

なお、DFS や FSO などの指標は、ある期間の平均値で評価されることが多いが、必ずしも平均値で評価されるべきでないとの意見がある。これは、観測感度は気象条件に依存するので、台風などの社会的影響の大きい現象の予測に重要な観測が、通常の大気現象の予測に重要な観測に埋没してしまう可能性があるためである。適切な評価のためには、社会的影響の大きい現象を条件付きサンプリングなどで抽出して調査する、もしくはそのような現象を適切に評価する指標を用いるなどの工夫が必要と参加者間で議論が行われた。

また観測感度解析は、全ての観測が存在する状態で個別の観測の影響を、線形を仮定して評価した結果である。このため悪影響を与えるとされる観測の排除を行っても、非線形の効果等もあり想定と異なる結果となる可能性もある。データ排除等のためには観測感度解析だけでなく OSE/OSSE も実施するなど、非線形の効果も取り入れた総合的な評価が必要とされた。

5.1.4 議論のまとめ

会合では各セッションや全体で討議が行われ、会合のとりまとめが行われた。そこでまとめられた内容のうち、推奨研究課題に関連する事項を以下に示す。

(1) 海上気圧観測

観測感度解析による調査によれば、個々の観測当りで比較すると浮遊ブイの海上気圧観測データの影響が

非常に大きいこと、また OSE では、その影響が中緯度帯において対流圏全体に及んでいることが示された。

(2) 成層圏のゾンデ観測

成層圏のラジオゾンデ観測は、特に熱帯の風の予測精度に重要であることが ECMWF により示された。この理由として、中緯度と異なり低緯度では気温構造が必ずしも風の場に反映されないことから、気温に感度のある観測（輝度温度や GNSS 掩蔽観測など）が風の代替観測として機能しないことが考えられる。

(3) 航空機観測の観測範囲

AMDAR 等の航空機観測は費用対効果が非常に大きな観測であることがさまざまな NWP センターによって示された。特にアフリカのラジオゾンデ観測縮小に対する代替手段となりうると考えられる。一方で、航空機の運行は気象条件や人間活動等に依存するため必要な時に観測データが得られない可能性があり、注意が必要とされた。

(4) 海上ゾンデ観測の観測範囲

自動海上ゾンデ観測 (ASAP) が短時間予報に顕著な正のインパクトをもたらすことが ECMWF により示された。また英国気象局による観測感度解析でその重要性が示された一方で、実際の運用の少なさ（1日 10~20 程度）が指摘され、観測数拡大が求められた。

(5) レーダー観測

WS-IVOS-4 のときに比べて多くの動径風や反射強度データ利用の話題があり、利用が進展していることが示された。今後、近隣諸国間でのレーダーや地上 GNSS 観測などを含む地上リモートセンシングデータの交換を、全世界的に推進する必要があることが確認された。

(6) 掩蔽観測の飽和

ECMWF が GNSS 掩蔽観測の情報飽和について調査した。それによれば必ずしも情報飽和に達するデータ量は定かではないが、少なくとも 8,000 プロファイル/日では、情報飽和に達していないとのことである。

(7) 陸域放射輝度観測

陸域におけるマイクロ波や赤外の射出率モデルの改良が進展し、その結果として陸域での輝度温度データ

⁸ <http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/wrfda/>

利用が進展した。特にラジオゾンデ観測の少ない熱帯の水蒸気解析にその効果が見られた。一方、雪氷域や海氷域では射出率モデルの改良にはまだ課題があり、これらの地域での同データ利用に拡大の余地があるとされた。

(8) 複数衛星のサウンダデータ利用

観測感度解析で AMSU-A の重要性が非常に大きいことが示された。AMSU-A が複数衛星に搭載されていることにより、従前より強靱な観測システムがあるといえるものの、運用中の衛星の寿命や後継衛星計画が策定されていないことなどにより、その強靱性が損なわれることが懸念されている。

(9) 大気追跡風

AMV データの有用性については様々な NWP センターの観測感度解析や OSE などでも示された。国際風作業部会 (IWWG) は、気象庁を含む各国の NWP センターに多様な調査課題を示し、その結果をとりまとめて報告した。

(10) データ密度と間引き

間引きについては、第 5.1.2 項で示した高層観測間引き実験結果のほか、浮遊ブイの間引き実験の結果などが示され、一定の観測密度があれば現状の NWP の予測精度が維持されることが示された。ただし、全球 NWP と領域 NWP で求められる観測密度は異なっていることに注意が必要とのことである。

(11) 領域高解像度 NWP のための境界層の観測

レーダーや地上観測の活用など、境界層に関する話題はあったものの、明示的に境界層観測に注目した話題はなかった。

(12) ゾンデ観測インパクト調査

オーストラリアで EUCOS の実験 (第 5.1.2 項) と同様の実験が行われ、その結果が紹介されたものの、課題設定が欧州と同一であり、地方時の違いなどが考慮されていなかったことから不十分とされた。

(13) (観測感度解析の) 領域 NWP への応用とアジョイント、アンサンブル手法

第 5.1.3 項で示したとおり。

(14) 延長予報における観測のインパクト

延長予報に対する観測のインパクトを検証した研究は報告されなかった。

(15) 機動的観測

機動的観測の研究については以前に比べて大きな進捗があり、その活動が WMO 世界天気研究計画 (WWRP) の報告書にまとめられた (Majumdar 2011)。現在も様々な関連研究が行われており、基本的に台風進路予測に機動的観測は効果的との議論があった。

(16) AMMA と IPY の残したもの

アフリカモンスーン学際的分析 (AMMA) によりアフリカ西部に配置されたラジオゾンデ観測データの同化により改善された場合は 2-3 日で欧州地域まで広がり、予測に正のインパクトがあることがフランス気象局に

より示された。なお、国際極年 (IPY) に整備された観測についての言及はなかった。

5.1.5 次回会合

次回会合 (WS-IVOS-6) については 2015 年 1 月現在、2016 年春季に中国で開催することが検討されている。WS-IVOS-5 同様、事前に推奨研究課題が提示される計画であり、これについては前年 (2015 年) 中に決定、アナウンスされる予定である。

参考文献

- Andersson, E. and Y. Sato, (Eds.) , 2012: *Final report of the fifth WMO workshop on the impact of various observing systems on numerical weather prediction*. WIGOS Technical Report 2012-1, WMO, 25 pp., URL http://www.wmo.int/pages/prog/www/OSY/Meetings/NWP5_Sedona2012/Final_Report.pdf.
- Böttger, H., P. Menzel, and J. Pailleux, (Eds.) , 2004: *Proceedings of the third WMO workshop on the impact of various observing systems on numerical weather prediction*. WMO/TD No.1228, WMO, 329 pp., URL <http://www.wmo.int/pages/prog/www/GOS/Alpbach2004/Proceedings.pdf>.
- Cardinali, C., S. Pezzuli, and E. Andersson, 2004: Influence matrix diagnostic of a data assimilation system. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **130**, 2767-2786.
- Langland, R. H. and N. L. Baker, 2004: Estimation of observation impact using the NRL atmospheric variational data assimilation adjoint system. *Tellus-A*, **56A**, 189-201.
- Majumdar, S. J., (Ed.) , 2011: *Targeted observations for improving numerical weather prediction: An overview*. WMO/WWRP/THORPEX No.15, WMO, 37 pp., URL http://www.wmo.int/pages/prog/arep/wwrp/new/documents/THORPEX_No.15.pdf.
- Pailleux, J., (Ed.) , 1997: *Proceedings of the CGC/WMO workshop on the impact of various observing systems on numerical weather prediction*. WMO/TD No.868, WMO, 198 pp.
- Pailleux, J., E. Andersson, and M. Ondráš, (Eds.) , 2008: *Proceedings of the fourth WMO workshop on the impact of various observing systems on numerical weather prediction*. WMO/TD No.1445, WMO, 218 pp., URL http://www.wmo.int/pages/prog/www/OSY/Meetings/NWP-4-Geneva2008/Abridged_Version.pdf.
- Pailleux, J. and H. Böttger, (Eds.) , 2000: *Proceedings of the second CGC/WMO workshop on the impact of various observing systems on numerical weather prediction*. WMO/TD No.1034, WMO, 204 pp.

5.2 FSO による評価¹

5.2.1 はじめに

データ同化システムで同化された観測データが解析や予報場に与える影響(観測データのインパクト)を知ることが、数値予報システムの改善において重要である。FSO (Forecast Sensitivity to Observations; Langland and Baker (2004)) は、観測データが数値予報に与える影響を評価する指標の一つであり、各観測データが予測誤差をどれだけ減らしたかを表すものである。FSO による評価は線形の観測データインパクト評価²の一つであり、観測システム実験 (OSE) を補完するものとして主要数値予報センター等で利用されている。気象庁でも 2009 年頃から評価を行っており (Ishibashi 2010)、基本的な性質や課題については石橋 (2011) にまとめられている。本節では FSO による気象庁全球数値予報システムの診断結果を他センターや気象庁システムの世代間で比較しながら見ていく。

5.2.2 FSO による気象庁全球数値予報システムの診断

FSO を用いて気象庁全球数値予報システムを診断する。比較のため、2014 年 8 月頃のシステム (JMA14) と 2011 年 5 月頃のシステム (JMA11) の新旧 2 つのシステムについての診断を行う。JMA11 から JMA14 までに行われた主な改良は、4D-Var のインナーモデルと背景及び観測誤差共分散行列の更新 (門脇・吉本 2012)、GNSS 掩蔽データ同化手法の改良 (第 4.8 節) 数値予報システムの鉛直 100 層化と物理過程の改良 (米原 2014) である。これら 2 つのシステムに加えて 2015 年 1 月現在の最新システム (JMA15) についても短期間の評価結果を示す。JMA14 から JMA15 までの主な改良はハイパースペクトル赤外サウンダの導入 (第 4.1 節) である。

ここでの FSO の計算では、24 時間予測誤差を乾燥全エネルギーノルム³ で評価する。FSO の単位は J/kg である。任意の観測の FSO は、全観測の FSO の合計を単位として表すこともできる。この場合の FSO の単位は % である。ある観測データの同化によって予測誤差が減少した場合、FSO (J/kg) は負、FSO (%) は正とする。計算負荷軽減のため、FSO の計算は水平解像度を T1319 (約 55km) とした低解像度実験システム⁴ で行う。FSO の評価期間は、JMA11 については 2010 年の 1 月と 8 月、JMA14 については 2014 年 7 月 20 日

¹ 石橋 俊之 (気象研究所)

² 各観測データが解析場や予報場に与える影響を適当な条件や近似の下で線形に分解して行う評価のこと。

³ FSO の計算では、予測誤差場の特徴を一つのスカラー関数で表す必要がある。ノルムの選択や問題点については、石橋 (2011) 等を参照。

⁴ 現業全球数値予報モデルの分解能は T1959 (約 20km) である。代表的な予測誤差指標の分解能への依存性は例えば、(宮本 2009) を参照。FSO の計算結果は分解能に過度に依存しないことが期待できる。また、本節で参照している他センターの FSO 計算も現業システムではなく、低解像度化等を行ったシステムで実施されている。

表 5.2.1 観測データ種別

種別名	説明
SCAT	マイクロ波散乱計 (海上風)
AMV_POL	大気追跡風 (極軌道衛星)
AMV_GEO	大気追跡風 (静止気象衛星)
WPR	ウィンドプロファイラ
BOGUS	ボーガスデータ
AVIATION	航空機観測 (気温、風)
SONDE	ラジオゾンデ (気温、風、湿度)
SURF	地上観測 (地上気圧、可降水量)
GPSRO	GNSS 掩蔽観測
SSMIS	SSMIS センサ観測
CSR	静止気象衛星の輝度温度
MWI	マイクロ波イメージャ
MHS	マイクロ波サウンダ (主に水蒸気に感度)
AMSU-A	マイクロ波サウンダ (主に気温に感度)
HSS	ハイパースペクトル赤外サウンダ

から 8 月 5 日の 17 日間、JMA15 については 2014 年 7 月 26 日から 28 日の 3 日間である。いずれも 00UTC 解析のみを対象とする。観測データは、表 5.2.1 のように区分する。

5.2.3 結果

はじめに比較基準として JMA11 の FSO について見る。図 5.2.1 は各観測種別の FSO である。図からすべての観測種別が予測精度の向上に寄与しており、また、季節変化は小さいことがわかる。寄与の大きな観測種別としては、AMSU-A (約 35%)、ラジオゾンデ (約 25%)、航空機観測 (約 12%)、AMV (約 10%)、地上観測 (約 9%) となっている。観測数でみると AMSU-A が全体の約 55% 以上を占めるため、一観測当たりの FSO はラジオゾンデ等の従来型観測の方が大きい。図 5.2.2 は FSO の空間分布である。ほとんどの領域で FSO は負であり、観測データは予測誤差を減らしていることがわかる。FSO が正の領域では観測データや同化手法の系統的な問題が存在する可能性がある。図 5.2.3 は FSO の累積確率分布である。(50% を僅かに超える) ほぼ半数の観測が予測誤差を減らし、残りのほぼ半数は予測誤差を増加させている。これは同化システムの中で個々の観測データは確率的に振る舞うためである。ラジオゾンデと AMSU-A の分布の違いは、観測データ一つ当たりの影響の大きさの違いを反映している。

次に新しいシステムについて見てみる。図 5.2.4 は、JMA14 の FSO である。JMA14 では JMA11 と比較して、ラジオゾンデや航空機に対する AMSU-A のインパクトが相対的に増加している。これは背景及び観測誤差共分散行列やインナーモデルの更新によって、輝度温度データからより多くの情報を同化できるようになったためと考えられる。また、GNSS 掩蔽観測の寄与が顕著に増加している。JMA11 では 1% 前後だった FSO が、JMA14 では 5.4% となっている。これは GNSS 掩蔽データの同化手法の改良やモデル 100 層化によるものと考えられる。データ数では、AMSU-A の割合が 45% に減り、GPSRO が 23% に増えている。

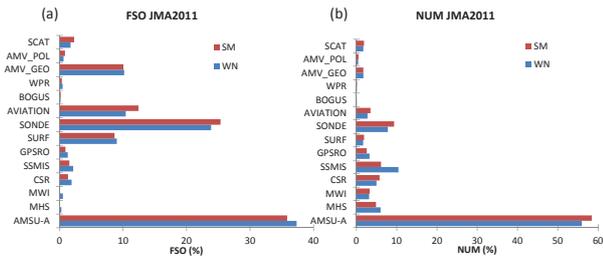


図 5.2.1 JMA11 の FSO。2010 年 1 月 (WN) と 8 月 (SM) の 1 か月ずつで積算。左図は FSO、右図は観測数の相対割合。横軸は観測種別ごとの相対割合 (%)。縦軸は観測種別である。

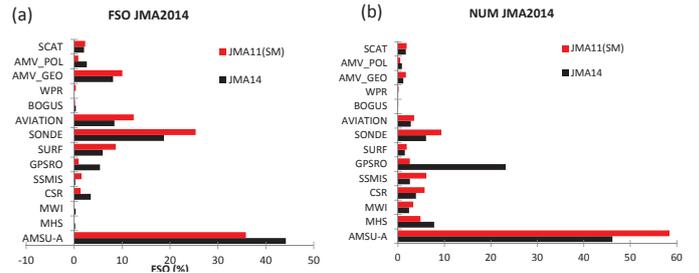


図 5.2.4 図 5.2.1 と同様。ただし JMA14 の FSO。2014 年 7 月 20 日から 8 月 5 日の 17 日積算。黒棒が JMA14 の FSO。赤棒は参考のために JMA11(SM) の FSO を再掲。

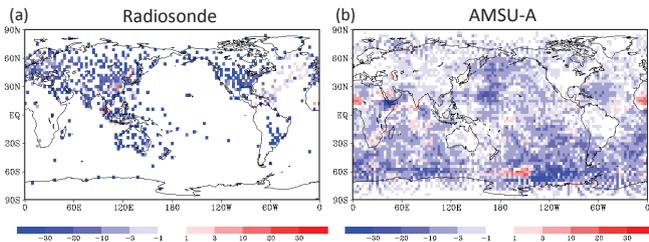


図 5.2.2 JMA11 の FSO の水平分布。左図はラジオゾンデ、右図は AMSU-A。色は FSO の値で単位は規格化したエネルギー。青い(赤い)領域の観測は予測誤差を減らす(増やす)のに貢献。

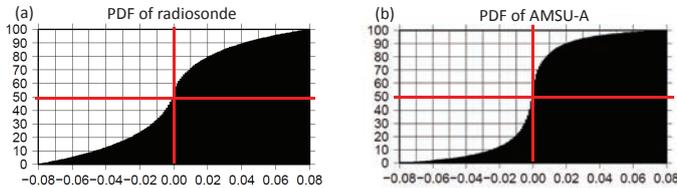


図 5.2.3 JMA11 の FSO の積算確率分布。横軸は FSO の大きさと負値は予測誤差を減らしたことを意味する(単位は規格化したエネルギー)。縦軸は積算確率。左図はラジオゾンデ、右図は AMSU-A。

図 5.2.5 は ECMWF(Cardinali and Healy (2014), CH2014) と UKMO(Lorenc and Marriott (2014), LM2014) での FSO の診断結果である⁵。両センターとも、AMSU-A と HSS の FSO がいずれも 20%以上、航空機、ラジオゾンデがいずれも 10%前後である。GPSRO については ECMWF で 10%程度に対して UKMO では 2.8%であり、JMA14 の 5.4%はこの間に位置する。JMA14 は、両センターに比べて AMSU-A とラジオゾン

⁵ UKMO は、湿潤全エネルギーノルム(全ての水蒸気が蒸発すると仮定したエネルギー)での評価である。ECMWF は水蒸気のエネルギーの考慮については論文に明確な記載がない。乾燥全エネルギーでの両センターの評価結果として、Cardinali (2009) と LM2014(但し評価期間が短い)がある。これらの結果も考慮すると、センター間の FSO の違いは、ノルムの違いよりも、数値予報システムの違いによるものと考えられる。

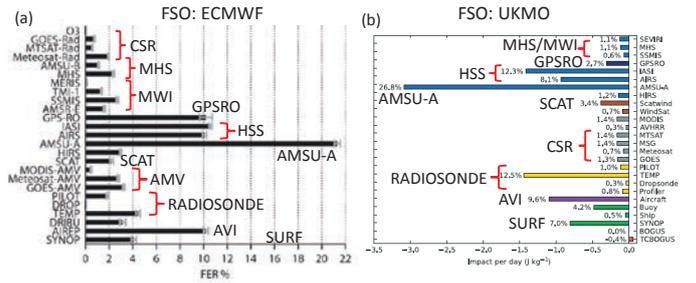


図 5.2.5 ECMWF と UKMO の FSO。ECMWF の FSO (左図)は CH2014 から、UKMO の FSO(右図)は LM2014 から引用。UKMO の評価期間は 2010 年 8 月 22 日から 9 月 29 日。ECMWF の評価期間は 2011 年 6 月。予測誤差評価時間は共に 24 時間。表 5.2.1 との対応を赤中括弧で示している。

デの寄与が大きく、HSS のインパクトを埋める形になっている。水蒸気に感度のある輝度温度データ (MHS, MWI) については、JMA では ECMWF や UKMO に比べて寄与が小さい。これは、水蒸気の観測情報が十分に同化されていないこと、同化された情報が予測時刻の力学場の精度向上に十分寄与していないことを示している。図 5.2.6 は GPSRO の FSO の鉛直分布である。ECMWF と JMA の FSO のピークはいずれも 15 km よりやや下にあるが、UKMO ではさらに数 km 下にピークがある。また、ECMWF では 30 km 以上まで明瞭な正のインパクトが見られるが、JMA や UKMO では不明瞭である。

最後に JMA15 について見る。図 5.2.7 から JMA15 では新たに導入された HSS の FSO は 6%以上であり予測精度への寄与が明瞭である。データ数では全体の 58%を占めている。図 5.2.8 は AIRS と IASI のチャンネルごとの FSO である。AIRS ではチャンネル 140、IASI ではチャンネル 200 前後で FSO の大きさが大きく変わるなどの大まかな分布は ECMWF(Cardinali 2009) と共通である。個々のチャンネルの寄与について見るにはより長期間での評価が必要である。

5.2.4 応用

FSO はシステムの診断以外にも応用できる。ここでは 2 つの応用例を見る。

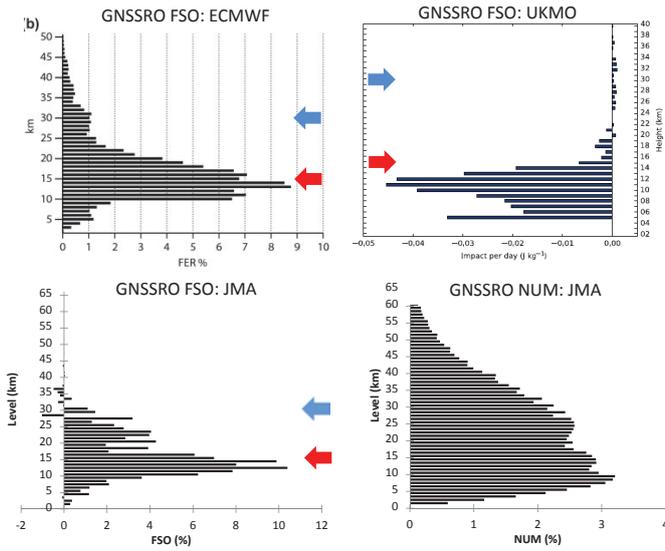


図 5.2.6 GNSS 掩蔽観測の FSO の高度分布。左上図は ECMWF(CH2014 より引用) 右上図は UKMO(LM2014 より引用) 左下図は JMA14 の FSO の高度分布。右下図は JMA14 の同化された GNSS 掩蔽データのデータ数の高度分布。青矢印は高度 30 km、赤矢印は高度 15 km を表す。

図 5.2.9 は、FSO の診断結果に基づいて、予測誤差を減らす観測のみ同化した場合の予測精度の変化を示している(2010年8月1日から14日の平均)。図から予測初期で4から6%程度の改善があることがわかる。このような高精度の解析場は、予測精度の評価や観測システムシミュレーション実験における真値代替場等として利用できる。

図 5.2.10 は、FSO を拡張した Daescu (2008) によって予測誤差のデータ同化システムで使用する観測誤差分散への感度を計算し、これに基づいて観測誤差を調整した場合の予測精度の変化である。2010年7月20日00UTC初期値の結果である。調整により予測精度が向上している。これは観測誤差を客観的に設定できる可能性を示唆している。

5.2.5 まとめと今後の課題

本節では、気象庁の全球数値予報システムについて、FSO による診断を行った。JMA14 では JMA11 に比べて AMSU-A や GPSRO の寄与が大きくなっており、これらのデータからより多くの情報が同化されていることがわかった。水蒸気データからはより多くの情報が得られる可能性があり、今後、予報モデルの物理過程の改良、同化システムへの基本場更新による非線形性の導入(石橋 2011)、誤差共分散行列の改良(ハイブリッド化等)等によって大きな改善が期待される。また、FSO の計算を定常的に行うことができれば、台風等の特定の現象ごとのインパクト評価に必要な十分なサンプル数が蓄積でき、観測データや解析予報システムのモニタリングとしても有効だろう。そのためには、数値予報システムのバージョンアップへの対応、計算

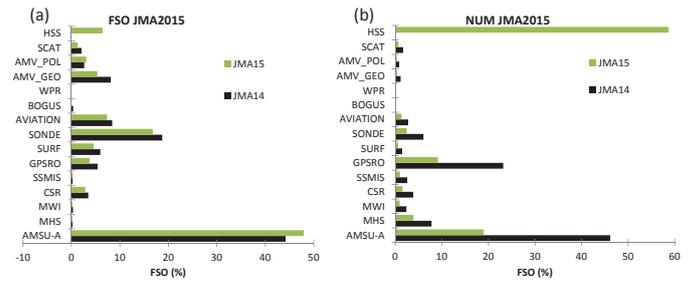


図 5.2.7 図 5.2.1 と同様。ただし JMA15 について示している。2014年7月26日から28日の3日間の積算。JMA15 は緑棒。比較のため JMA14 を黒棒で再掲する。

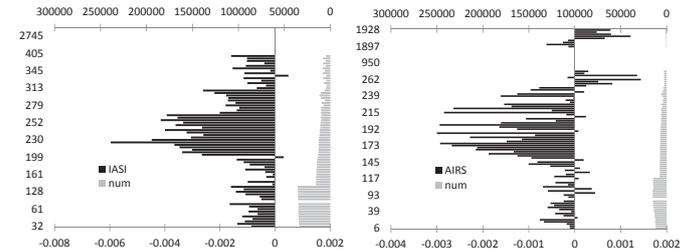


図 5.2.8 JMA15 の HSS の FSO 分布。2014年7月26日から28日の3日間の合計。左図はIASI、右図はAIRS。黒棒は FSO の値で下軸(J/kg)が対応。灰棒はデータ数(上軸)。縦軸はチャンネル番号。負の FSO は予測誤差を減らしていることを意味する。

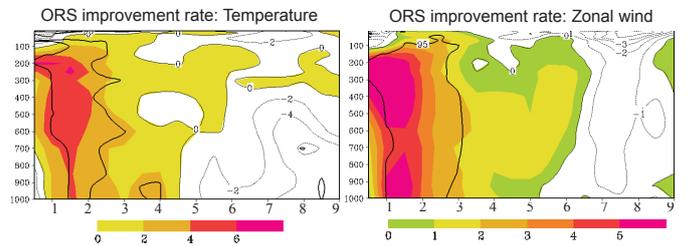


図 5.2.9 FSO 診断結果に基づいて予測誤差を減らす観測のみ同化した解析場から予測した場合(TEST)と通常の予測(CNTL)の予測精度を比較し、改善率で示している。改善率は TEST と CNTL の全球平均 RMSE によって、 $(RMSE_{CNTL} - RMSE_{TEST}) / RMSE_{CNTL} \times 100(\%)$ と定義する。真値は CNTL の解析。改善率が正(TEST の方が誤差が小さい)の領域は色で、負の領域は等値線(点線)で改善率の大きさを示している。黒実線は95%信頼区間。2010年8月1日から14日の平均。左図は気温、右図は東西風。縦軸は気圧レベル(1000-10hPa)、横軸は予測時間で FT=12 から9日予測まで。Ishibashi (2012) を修正引用。

機資源の確保が必要である。

参考文献

Cardinali, C., 2009: Monitoring the observation impact on the short-range forecast. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **135**, 239–250.
 Cardinali, C. and S. Healy, 2014: Impact of GPS ra-

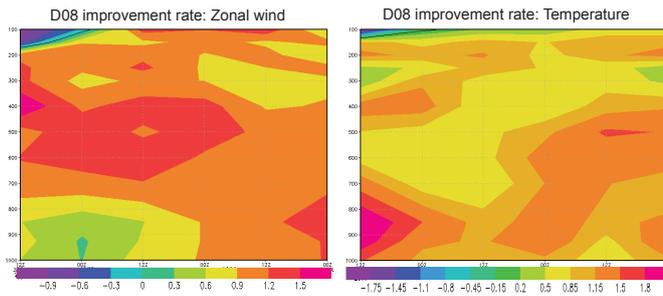


図 5.2.10 Daescu (2008) に基づいて観測誤差を調整した場合の全球平均の予測精度の変化。暖色系(寒色系)は調整により予測誤差が減った(増えた)領域。左図は東西風、右図は気温。縦軸は気圧レベル(1000-100hPa)、横軸は予測時間でFT=12から84時間まで。2010年7月20日00UTCの一初期値についての結果。Ishibashi (2012) を修正引用。

dio occultation measurements in the ECMWF system using adjoint-based diagnostics. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*

Daescu, D. N., 2008: On the sensitivity equations of four-dimensional variational (4D-Var) data assimilation. *Mon. Wea. Rev.*, **136**, 3050–3065.

石橋俊之, 2011: データ同化システムの課題. 数値予報課報告・別冊第57号, 気象庁予報部, 93–129.

Ishibashi, T., 2010: Optimization of error covariance matrices and estimation of observation data impact in the JMA global 4D-Var system. *CAS/JSC WGNE Res. Activ. Atmos. Oceanic Modell.*, **40**, 1–11.

Ishibashi, T., 2012: Diagnosis of Data Assimilation Systems. *4th International Conference on Reanalyses*.

門脇隆志, 吉本浩一, 2012: 全球解析の高解像度化. 平成24年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 87–91.

Langland, R. and N. L Baker, 2004: Estimation of observation impact using the NRL atmospheric variational data assimilation adjoint system. *Tellus A*, **56**, 189–201.

Lorenc, A. C. and R. T. Marriott, 2014: Forecast sensitivity to observations in the Met Office Global numerical weather prediction system. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **140**, 209–224.

宮本健吾, 2009: 適合ガウス格子版全球モデル. 数値予報課報告・別冊第55号, 気象庁予報部, 27–49.

米原仁, 2014: 改良された全球数値予報システムの特徴・変更の概要. 平成26年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 1–3.