3.1 全球解析における観測データの利用手法の改 良及び新規利用開始¹

3.1.1 台風ボーガス

(1) はじめに

現在、気象庁の数値予報システムでは、全球解析(サ イクル・速報)及びメソ解析の初期値作成時に、擬似的 に作成した台風ボーガスデータ(海面更正気圧と上空 の風)を同化している。海洋上で発生・発達する台風 の中心付近では、実際に観測した気圧や風などのデー タは得られない事が多い。そのため、気象庁の数値予 報システムでは、全球解析(サイクル・速報)及びメ ソ解析の初期値作成時に、擬似的に作成した観測デー タを同化することで、初期値の台風中心位置をより実 況に近づけ、台風進路予測精度を向上させている。こ の擬似データを台風ボーガスと呼ぶ。台風ボーガスの 作成には、予報課において衛星データ等から解析され た台風速報解析の台風中心位置、中心気圧、強風半径 などを利用している。台風ボーガスの作成手法につい ての詳細は大野木 (1997)、小泉 (2003)、新堀 (2005) を、最近の全球解析における台風ボーガスの改良につ いては岡垣 (2010)、高坂 (2015)を参照いただきたい。 本項では 2016 年 9 月 28 日に全球解析に適用された台 風ボーガスの改良について述べる。まず(2)で改良の 内容について説明し、次に(3)でその効果について述 べる。最後に(4)でまとめを記す。

(2) 2016 年 9 月 28 日に適用された台風ボーガスの 改良の内容

近年の全球モデルでは、水平高解像度化(北川 2005; 門脇・吉本 2012) や GSM1603 などの改良 (米原 2016) により、台風の発達をより良く表現できるようになっ てきた。それに合わせ台風ボーガスの作成手法も、中 心気圧の制限値変更などの改良(高坂 2015)を行った 結果、初期値において、よりシャープな(気圧傾度が 大きな)台風が表現されるようになった。これに伴い、 台風ボーガスの台風中心位置と第一推定値の台風中心 位置にずれがある場合、台風ボーガス中心点や第一推 定値の台風中心点で海面更正気圧の観測値と第一推定 値の差 (FG departure: First Guess departure) の絶対 値が大きくなりすぎることがある。その時に起こる問 題(計算安定性の低下など)への対応として、中心気 圧の制限値変更と同時にグロスエラーチェックが導入 された。これにより、FG departureの絶対値が極端に 大きなデータはリジェクトされるようになったものの、 それでも局所的に(台風ボーガス点のごく近辺のみに)

大きなインクリメント(第一推定値から解析値への修 正量)が入り、台風構造の軸対称性などが歪められる 事例が多く残った。

一般に、同じ FG departure と同じ背景誤差を適用した場合、より小さな観測誤差で観測データを同化する方が、解析値がより観測データの値に近づき、結果そのデータ周辺に大きなインクリメントが入りやすい²。そこで今回、観測誤差と配置を見直すこととした。変更点一覧を表 3.1.1 に示す。

観測誤差の変更

全球解析における台風ボーガスは、4次元変分法を 採用した 2005 年 2 月から速報解析で擬似観測データ として同化するようになった。その時、上空の風の観 測誤差はドロップゾンデによる台風周辺の特別観測の データを用いて算出されたが、海面更正気圧の観測誤 差は他の直接観測データのものと同じ値に設定した(新 堀 2005)。それ以降、観測誤差については変更がなかっ た。しかし本来は太田 (2015)でも述べられている通 り、観測誤差は数値予報システムの変更に合わせて見 直す必要がある。

新しい観測誤差の設定には、まず2010年から2014年 まで5年間の台風ボーガスデータを用い、FG departure と残差(観測値と解析値の差)の共分散から観測誤差 と観測誤差相関を求める手法(Desroziers et al. 2005; Desroziers and Ivanov 2001;坂本2009)を用いて値を 算出した。その値を参考に前後の値を取るいくつかの 海面更正気圧および上空の風の観測誤差を適用した実 験をそれぞれ実施し、事例ごとに問題点が改善された かどうかや、台風進路予測の改善率を調査した。その 結果から、海面更正気圧の観測誤差として、これまで の0.8 hPaより大きな値である2 hPaを採用すること とした。一方、風の観測誤差は従来の約5 m/sよりや や小さい約4 m/sを採用することとした。

配置とグロスエラーチェックの変更

台風ボーガスの水平配置は、2010年4月に大幅に見 直され、多くは半径200km内³の台風中心付近のみ に限定され、その場合、中心2地点と周囲4地点のみ に配置されるようになった(岡垣2010)。その結果、リ ジェクトされる台風ボーガスデータが1点でもあると、 残りのボーガスデータだけでは台風中心位置を意図し

² 背景誤差、観測誤差の説明については室井・佐藤 (2012) を参照。

¹ 第 3.1.1 項 岡部 いづみ・太田 行哉・高坂 裕貴(ヨーロッ パ中期予報センター)、第 3.1.2 項 平原 洋一、第 3.1.3 項 亀 川 訓男・計盛 正博、第 3.1.4 項 村上 康隆・計盛 正博、第 3.1.5 項 大和田 浩美

³ 台風ボーガスを配置する水平領域は、第一推定値の台風 中心位置と台風ボーガスの台風中心位置の距離により異な る。2つの台風中心位置間の距離(D)が120 km 以内の場 合、配置領域は台風ボーガスの台風中心位置から半径200 km 以内となる。Dが120~280 kmの場合はD+80 km、Dが 280~320 kmの場合は400 km、Dが320 km以上の場合は D+80 kmを半径とする円内が配置領域。

変更点	変更前	変更後
観測誤差	海面更正気圧: 0.8 hPa	海面更正気圧: 2.0 hPa
	風速:約5m/s	風速:約4m/s
配置(水平)	第一推定値の台風中心点、	台風ボーガス中心点から
	台風ボーガス中心点とそこから	200 km の円周内の領域に 100 km
	半径 200 km の円周上 4 点	格子ごとに1点
	(※第一推定値と台風ボーガスの台風	(※第一推定値と台風ボーガスの台風
	中心間の距離が 120 km 以内の場合)	中心間の距離が 120 km 以内の場合)
配置(鉛直)	1000, 925, 850, 800, 700, 600,	850と 300 hPa のみ
	500, 400, 300 hPa	
配置点の決定とグロスエラー	1. 配置点の決定、	1.グロスエラーチェック、
チェック処理順	2. グロスエラーチェック	2. 配置点の決定
グロスエラーチェック	海面更正気圧: 14.7 hPa	海面更正気圧: 10.0 hPa
の閾値	風速: 19–22 m/s	風速: 14–15 m/s
ボーガス中心気圧 チェック (詳細は髙坂 (2015) 参照)	台風ボーガス中心点のリジェクトを	
	避けるため第一推定値との気圧	廃止
	差が± 14.0 hPa 以内となるよう	
	ボーガスプロファイルを修正	

表 3.1.1 全球解析における台風ボーガスの変更点

た方向に修正出来ない場合や、台風中心付近の一部に のみインクリメントが入り、台風構造が歪んでしまう 場合があった。このため、配置の密度が不十分である ことが懸念された。そこで上述の観測誤差推定で観測 誤差相関を算出したところ、水平相関係数が0.2以下に なる距離が約100kmであったため、それを参考に、水 平間隔を 80 km、100 km、120 km、150 km とした実 験を実施し、解析値の各事例や進路予測精度を調査し た結果から、これまでより密な配置となる 100 km 間隔 に変更した (図 3.1.1)。また、これまでは、配置点の決 定後に行われていたグロスエラーチェックで、台風ボー ガス中心点のリジェクトを避けるために FG departure が14.0 hPa以下になるようボーガスプロファイルを修 正していた(ボーガス中心気圧チェック)。今回の変更 では、FG departure が極端に大きすぎることでデータ がリジェクトされても、その近辺の地点には配置され るよう、あらかじめ 10 km 間隔でボーガスデータを作 成し、先にグロスエラーチェックをパスした地点から 100 km 四方格子毎に1地点ずつ配置することにより、 面的に偏った配置を防ぐようにした。これに伴い、グ ロスエラーチェックの閾値を見直し、統計調査した期 間における FG departure の標準偏差の3倍を目安に、 事例調査からインクリメントが大きくなりすぎない値 を選び、以前よりも小さくした。これらの変更により、 ボーガス中心気圧チェックは不要になるため廃止した。

また、鉛直配置については、観測誤差相関の推定値か ら鉛直相関が大きいことが示唆されていた。さらに台風 ボーガスの風を1点同化した理想実験においても、鉛直



図 3.1.1 台風ボーガスの水平配置新旧比較図。左が変更前、 右が変更後の水平方向の配置を示した図。共に半径 200 km 円の中心は台風ボーガスの中心点である。変更前の白丸は 台風ボーガス(円中心)及び第一推定値の台風中心点で、 海面更正気圧のみ配置されていた。変更前後の黒丸には、 海面更正気圧と上空の風(風向風速)が配置される。

相関の高さが示された。そこで台風ボーガスの配置面を 1面もしくは2面とした複数の実験を実施した結果か ら、台風の鉛直構造を代表する850hPaと300hPaの 2面のみで十分であると判断し、そのように変更した。

(3) 改良の効果

改良の効果を確認するため、全球数値予報システム (GSM1603)による解析予報サイクル実験⁴を実施し た。実験期間は 2015 年 6 月 20 日から 10 月 25 日で、 その間には台風第 8~ 第 25 号の 18 個の台風が発生し ていた。改良前の設定による実験を CNTL、改良後の 設定による実験を TEST とする。

⁴ 数値予報現業システムの全球サイクル解析と同等に解析予 報サイクル (室井 2012)を適用した実験



図 3.1.2 左から順に、(a) 海面更正気圧(黒線が解析値、緑線が第一推定値、赤点は台風ボーガスの配置点)、(b) 海面更正気 圧のインクリメント(緑点は台風ボーガス配置点)、(c) 800 hPa 面の気温解析値、および (d) 800 hPa 面気温のインクリメ ント。上段が変更前、下段が変更後。図の中央が台風ボーガス中心点、黄丸が第一推定値の台風中心点。青線は台風ボーガス の台風中心と第一推定値の台風中心を通る線で、B 側に台風ボーガス中心点がある。



図 3.1.3 2015 年 6 月 20 日~10 月 25 日の期間に発生してい た台風第 8 号から第 25 号までの全 18 個の台風を予測対象 とした平均進路予測誤差 [km](実線、左軸)。赤線が変更 後で青線が変更前。線に付属したエラーバーは誤差の発生 が正規分布に従うと 仮定した場合の 95%信頼区間を表す。 サンプルは変更前後で揃えてあり、両者で追跡出来たもの だけを検証対象としている。このため、サンプル数(赤丸、 右軸)は変更前後で同一である。図上部の三角は差の有意 性を示すもので、上段が相関考慮、下段が独立仮定で計算 した有意判定結果を示し、緑色は有意、黒色は有意でない ことを示す。



図 3.1.4 初期値(左図) 及び 72 時間予報値(右図) の台風中 心位置誤差散布図。台風中心位置が気象庁ベストトラック からどの方向にどれくらい離れているかを示した図。青× が変更前、赤+が変更後。縦軸上が台風の進行方向で横軸 はそれと直交する向きである。上段が対象期間中の全台風 事例について、下段はそのうち転向後の事例のみをプロッ トした。



図 3.1.5 初期値、各予測時刻の予測値における台風中心気圧 (hPa) 予測の散布図。横軸は気象庁ベストトラック、縦軸は予測。 変更前(上段)と変更後(下段)。左から初期値、24 時間予測、48 時間予測、72 時間予測。

解析値の改善

本変更により局所的に大きなインクリメントが入る 事による台風構造の歪みが軽減された事例について紹 介する。図 3.1.2 は 2015 年台風第9号の発達期におい て、台風中心位置を南東方向へ修正させる台風ボーガ スデータを同化した際の解析値及びインクリメントの 水平図である。上段の変更前では、台風中心を南東(図 の右下)へ移動させるため、台風ボーガス中心から見 て北西側に位置する第一推定値の台風中心の海面更正 気圧を大きくする大きな正のインクリメントが局所的 に入った結果、800 hPaの気温場には局所的に大きく 気温を下げるインクリメントが入った(図3.1.2の上段 右図)。図 3.1.2(c) の 800 hPa 面気温の解析値を見る と、暖気核が打ち消されて寒気核が生成されてしまっ ている(変更前後とも前時刻までの解析値やこの時刻 の第一推定値には寒気核は認められない、図略)。変 更後は台風中心位置を修正しつつ、特定の台風ボーガ スデータ1点の付近に大きなインクリメントが入るこ とはなく、暖気核を残したままの台風構造を維持して いる。実験期間中の他の台風事例についても、寒気核 の出現数が変更前に比べて変更後に減少していること を確認している。なお、局所的に大きなインクリメン トが軽減することで、台風の急発達による気圧低下や 位置ずれの修正が1回の解析では十分でない場合もあ る。しかしながら台風の構造の歪みが軽減されること で、解析予報サイクルを通じて全体的に解析値におけ る中心位置誤差が減少し、次項で述べるように進路予 測の改善につながったものと考えられる。

台風進路予測の精度向上

図 3.1.3 に実験による変更前後の台風進路予測精度 を示す。初期時刻から 84 時間予報まで、台風の進路予 測誤差が約 3~8 km 減少している。初期値(解析値) の改善によって進路予測誤差の減少が予測後半まで持 続しているのは、より中心位置誤差の小さい初期値か ら始まる予測であることと、初期値における台風構造 の歪みが軽減され、歪みによる進行のふらつきが抑制 された効果によるものと考えられる。図 3.1.4 に初期 値及び 72 時間予測値の台風中心位置誤差の散布図を示 す。初期値及び予測値ともに、変更後の方がより図の 中央に集まっており、全体的に誤差が小さいことが分 かる。ただし、転向後の進行方向に対するスローバイ アスなど予報モデルの特性として知られている傾向は 変わらない。

台風強度予測の特性変化

実況の台風が最盛期を迎えるなどして台風構造がシ ャープになると、台風速報解析から推測される海面更 正気圧プロファイルの気圧傾度が大き過ぎて、モデル 解像度に適さない場合がある。その場合、台風速報解 析より台風中心気圧を高める(台風構造を浅くする) 調整がプロファイルに加えられ、その調整されたプロ ファイルに基づく台風ボーガスデータが作成される(岡 垣 2010)。変更前はこの台風ボーガスを小さい観測誤 差で同化していたため、初期値において中心気圧が低 すぎる事例はあまり見られなかった。変更後は観測誤 差がより大きくなるため、第一推定値の中心気圧が低 すぎる場合、初期値においてもその状態が残る事例が 増加する。しかし予報モデルが過発達させようとして いる場合は、初期値でそれを抑えても予測時間が進む と結局過発達な状態になる事が多い。そのため、台風 中心気圧予測の散布図(図3.1.5)において24時間予報 以降、変更前後の差は殆ど見られなくなる。また逆に 第一推定値の台風中心気圧が高すぎる場合は、変更後 の方が局所的に大きなインクリメントが入りづらくな ることから、初期値においてもその状態が残る場合も ある。このことから、初期値から24時間以内の予測 値において、より前初期値の強度が引き継がれやすく なる。

(4) まとめ

2016年9月28日に全球解析において、台風ボーガ スの改良を適用した。台風ボーガスの海面更正気圧の 観測誤差を 0.8 hPa から 2.0 hPa に、上空の風の観測 誤差については約5m/sから約4m/sに変更した。ま た、配置についても水平方向にはこれまでより密にな るように 100 km 四方格子に 1 点の配置とし、鉛直方向 には風をこれまで9層に配置していたものを 850 hPa と 300 hPaの2層にのみ配置するようにした。局所的 に大きなインクリメントが入りにくくなったことによ り、台風の急発達による気圧低下や位置ずれの修正が 1回の解析では十分ではない場合もある。しかしなが ら台風構造の歪みが軽減されることで、解析予報サイ クルを通じて全体的に解析値における中心位置誤差の 減少につながると考えられる。実験の結果、台風進路 予測精度が予測初期値から 84 時間予測値まで改善し た。また、強度予測については、初期値から24時間予 測値まではより前初期値の強度を引き継ぎやすくなっ たが、それ以降予測時間が進むと顕著な差は見られな かった。

3.1.2 全球解析における Suomi-NPP/ATMS 輝度温 度データの利用開始

(1) はじめに

衛星搭載マイクロ波サウンダは、地球大気や地表面 からのマイクロ波放射の強度(輝度温度)を複数の周 波数(チャンネル)で測定し、大気の気温や水蒸気の 鉛直分布に関する情報を取得するセンサである(岡本 1999)。全球にわたって観測データを得られるため、数 値予報にとって非常に重要な観測データとなっている。 気象庁の全球解析では、2017年3月29日にマイクロ 波サウンダ ATMS (Advanced Technology Microwave Sounder)の輝度温度データの利用を開始した。本項で はデータの概要と利用方法、およびデータ同化の解析 値、予測値への影響について解説する。

(2) ATMS

ATMS は、気象庁の数値予報システムで利用してい るマイクロ波サウンダ AMSU-A⁵(気温サウンダ。チャ



(b) MW–SOUNDER(AMSU–A) 2017/07/26 00:00(UTC) AMSULAIO AMSU-AI NOUSE[•]: 136 NOUSE[. 62 NOUSE[]: 508 NOUSE]]: 352 NOUSE[.55 NOUSE[. 169 ALL: 2212 ALL: 3483 ALL: 3271 ALL:4991 ALL: 3279 ALL: 4424

AL:424 AL:2212 AL:3483 AL:3271 AL:4991 AL:3275 図 3.1.6 全球解析で利用された ATMS, AMSU-A 輝度温度 データの分布例。2017 年 7 月 26 日 00UTC の前後 3 時間 の観測データ。(a)の赤点は Suomi-NPP 衛星の利用デー タ (ATMS)、(b)の赤点、桃点、青点、水点、橙点、紫点 は、NOAA-15, NOAA-18, NOAA-19, Aqua, Metop-A, Metop-B の各衛星の利用データ (AMSU-A) をそれぞれ 示す。黒点は品質管理処理で全チャンネルのデータが不使 用とされたことを示す。

ンネル数 15)、MHS⁶(水蒸気サウンダ。チャンネル数 5)の後継センサにあたり、一つのセンサに AMSU-A, MHSとほぼ同等のチャンネルが装備されている他、い くつかのチャンネルが追加されたマイクロ波サウンダ (チャンネル数 22)である。ATMS は 2011 年 10 月に 打ち上げられた米国の極軌道衛星 Suomi-NPP⁷に搭載 されており、今後も次世代現業用極軌道衛星 JPSS⁸シ リーズに搭載される予定となっている。気温、水蒸気 の観測情報が得られる ATMS 輝度温度データは、数値 予報精度の維持、改善において重要な衛星データであ る。ATMS の主要諸元については岡本 (2007)にまと められているので、そちらを参照されたい。

 $^{^5}$ Advanced Microwave Sounding Unit-A の略。

 $[\]overline{^{6}}$ Microwave Humidity Sounder の略。

⁷ Suomi National Polar-orbiting Partnershipの略。米国海 洋大気庁 (NOAA)の現業用極軌道衛星 NOAA シリーズと 後継の JPSS シリーズの中継ぎとして打ち上げられた。

⁸ Joint Polar Satellite System の略。JPSS-1, JPSS-2 がそ れぞれ 2017 年 11 月、2022 年に打ち上げ予定。



図 3.1.7 夏期実験における、観測値 – 第一推定値 (FG departure)の、TEST の CNTL に対する標準偏差の変化率。 (a)マ イクロ波気温サウンダ AMSU-A、マイクロ波水蒸気サウンダ MHS、 (b)マイクロ波イメージャ (SSMIS, AMSR2, GMI)、 (c) GNSS 掩蔽観測(屈折角)、 (d) ラジオゾンデ(気温)。縦軸は各観測測器のチャンネルまたは観測高度。横軸は変化率 [%]。変化率が負の場合は第一推定値の誤差の減少(改善)を示す。エラーバー((c)では細線)は 95%信頼区間、丸印は統 計的に有意な差であることを示す。赤線は ATMS の対流圏に感度のあるチャンネルを同化した場合の結果を示す。 (a)の緑 線は ATMS の対流圏を中心に感度のあるチャンネルに加えて成層圏を中心に感度のあるチャンネルも同化した場合の結果を 示す。

(3) データの利用方法

全球解析での ATMS 輝度温度データの利用方法の概要を以下に述べる。

・同化利用するチャンネル

対流圏を中心に感度をもつチャンネル (ch)を同化 に利用する。気温のサウンディング(鉛直探査)を 行うチャンネル(気温チャンネル)では ch6-9を、 水蒸気のサウンディングを行うチャンネル(水蒸 気チャンネル)では ch18-22を同化対象とする。

・データ補正

ATMS の気温チャンネルは AMSU-Aより 観測密 度が高い一方、AMSU-Aと比較して大きなノイズ が観測値に含まれる。そのため、ノイズ除去用に 空間ガウシアンフィルタを適用する (江河 2015)。 フィルタ適用後のデータを対象として、スキャン 位置に依存するバイアスを補正後、大気の状態な どに依存するバイアスを変分法バイアス補正 (佐 藤 2007; 石橋 2011)で除去する。

・データ間引き

衛星データは一つのセンサで広い領域を観測する ため、近隣の同一センサによる観測データ(の誤 差)は一定程度の水平相関を持つと考えられる。 一方、現在の同化システムは観測データの誤差相 関はないものとして扱っているため、誤差相関を 持つ程度まで近接した観測データを利用すると、 観測データに近すぎる解析値となるなどの影響が 生じる。そのため、現在の同化システムでは誤差 相関が無視できると考えられる距離でデータを間 引く等の処理を行っている。ATMS は AMSU-A と同じく、経験的に求められた値である約 250 km 間隔(岡本 2007)に間引いたデータを利用する。

品質管理

輝度温度データ同化処理では、観測された輝度温 度(観測輝度温度)に対して、数値予報モデルの 出力結果の大気プロファイルを入力とした放射伝 達計算による輝度温度(計算輝度温度)を求め、 その差を用いて解析処理を行う。現在は晴天域の データのみを同化対象とし、観測点に雲や降水粒 子が存在しないことを前提としているため、計算 輝度温度の算出には数値予報モデルの雲や降水粒 子のプロファイルは用いていない。このため、雲や 降水粒子の影響を受けた観測データが同化される と、観測データに含まれる雲や降水粒子の影響が 気温や水蒸気の影響として誤って評価され、解析 精度を低下させる可能性がある。また、計算輝度 温度の算出に必要となる地表面射出率の見積りが 困難である陸面、海氷面の影響を強く受けた輝度 温度データからも、気温や水蒸気の情報を適切に 抽出することが難しい。そのため、品質管理処理 によりこれらの影響を受けたデータを除去してい る。ATMSの雲、降水域の判別処理や、海陸分布、 標高などの観測条件に応じた利用チャンネルの選 択は、AMSU-A, MHS における処理 (岡本 2007) に準じた設定⁹とする。例えば、対流圏下層を中 心に感度を持つ ch6(気温チャンネル)のデータ は地表の影響を強く受けるため、陸域、海氷域の データを除外する。一方、対流圏上層を中心に感 度を持ち、地表の影響が小さい ch9(気温チャンネ ル)のデータは陸域、海氷域のデータも利用する。

図 3.1.6 に、全球解析で利用される ATMS と AMSU-Aの輝度温度データ分布例を示す。太平洋上な どの AMSU-A のデータが存在しない領域にも ATMS のデータが分布しており、より広い領域でマイクロ波 サウンダの輝度温度データが利用可能となっているこ とが分かる。

⁹ ATMS では標高に関する利用条件を AMSU-A よりも細か く 設定するなどしているため、厳密に同じ 設定ではない。



図 3.1.8 夏期実験における、ジオポテンシャル高度の解析値に対する RMSE の差 (CNTL-TEST) の鉛直緯度別帯状平均分 布。左図は FT=24、中図は FT=48、右図は FT=72 の結果。正の値(暖色)は RMSE の減少(改善)を示す。黒曲線はゼ ロ値の等値線。図中の茶色の部分は南極大陸付近についてマスキングした領域を示す。

(4) 同化のインパクト

現業の全球数値予報システムに対して ATMS 輝度温 度データを追加利用した場合の効果を評価するため、 2016年12月時点の数値予報ルーチンと同等のシステ ムを用いた解析予報サイクル実験を行った。実験期間 は、2015年7月10日~2015年9月11日(夏期)、 2015年12月10日~2016年2月11日(冬期)であり、 ATMS 輝度温度データを利用しない設定を CNTL、利 用する設定を TEST とする。

ATMS 輝度温度データは気温、水蒸気に関する情報 を持つことから、データを同化することにより、気温、 水蒸気の初期場が改善されることが期待される。ここ では、解析値の基となる第一推定値と既存の観測値の 整合性の変化¹⁰を確認する。

図 3.1.7 は、CNTL と TEST で共通に利用されてい るマイクロ波サウンダ AMSU-A, MHS、 マイクロ波 イメージャ SSMIS, AMSR2, GMI¹¹, GNSS 掩蔽観測 (屈折角)¹²、およびラジオゾンデ気温観測についての 観測値と第一推定値の差 (FG departure: First Guess departure)の標準偏差の変化(夏期)を示す。AMSU-A の対流圏付近に感度をもつ一部の気温チャンネル (ch6, 7)において標準偏差の増大が見られるものの、その他の観測データについては中立または減少している。 ATMS輝度温度データの同化により、第一推定値の気温場、水蒸気場が、既存の観測値と整合する傾向(改善)であり、冬期についても同様の結果であった。

なお、ATMSの成層圏を中心に感度をもつ気温チャ ンネル (ch10–15) も同化した実験では AMSU-A の成 層圏を中心に感度をもつチャンネル (ch9–14) の FG departure の標準偏差が大きく増大する傾向がみられ た(図 3.1.7 (a)の緑線)。原因として、ATMSの当該 チャンネルの輝度温度データのバイアスを適切に除去 しきれていない可能性が考えられるため、今回の変更 では対流圏を中心に感度をもつチャンネルのみを同化 対象としている。

予測実験の結果では、夏期は対流圏の気温、高度、 比湿について全球的に改善傾向であり、冬期は概ね中 立であった。例として、夏期実験におけるジオポテン シャル高度の解析値に対する RMSE の変化を示す(図 3.1.8)。対流圏で改善傾向であり、特にラジオゾンデ 観測などの直接観測が少ない南半球での改善が大きい。 台風の進路予測においても、ATMS 輝度温度データを 同化することで改善傾向となることが確認できた(図 3.1.9)。

(5) まとめ

全球解析では、2017年3月29日に ATMS 輝度温度 データの現業利用を開始した。今回示した実験の結果か ら、当該データの利用は気温場、水蒸気場の予測及び台 風進路予測を改善することが確認されている。今後の課 題として、成層圏に感度のあるチャンネル(AMSU-A では利用中)の利用や、メソ、局地解析での利用が挙 げられ、引き続き開発を進めたい。

¹⁰ 全球の解析予報サイクルにおいては、第一推定値は一初期 時刻前の解析値からの予測結果 (FT=3-9) である。ここで 示すような観測値と第一推定値の差 (FG departure)の標準 偏差の減少は、解析場の変化を通じた、観測データ同化の影 響が現れやすい予測初期での予測値と観測値の差の標準偏差 の減少(改善)を示す。

¹¹ マイクロ波イメージャの輝度温度は、主に大気中の水 蒸気量に関する情報を持つ。SSMIS: Special Sensor Microwave Imager, AMSR2: Advanced Microwave Scanning Radiometer-2, GMI: GPM (Global Precipitation Measurement) Microwave Imager

¹² GNSS (Global Navigation Satellite System) 掩蔽観測の 屈折角は、大気中の気温や水蒸気量に関する情報を持つ。



図 3.1.9 夏期実験期間に存在した5個の台風を予測対象とし た進路予測誤差 [km](実線、左軸)とサンプル数(丸、右 軸)。赤がTESTで青線がCNTL、線に付属したエラーバー は誤差の発生が正規分布に従うと仮定した場合の95%信頼 区間を示す。図上部の三角形は差の有意性を示すもので、 上段が時間方向の相関考慮、下段が独立仮定で計算した有 意判定結果を示し、緑色は有意、黒色は有意でないことを 示す。

3.1.3 全球解析における Suomi-NPP/CrIS 輝度温 度データの利用開始

(1) はじめに

ハイパースペクトル赤外サウンダ(以下ハイパーサ ウンダと呼ぶ)は、高波数分解能で数千ものチャンネ ルを有する赤外サウンダで、気温や水蒸気の鉛直分布 に関する情報を取得できる。気象庁では、2014年から 全球解析で Aqua 衛星搭載の AIRS¹³ と Metop-A, B 衛星搭載の IASI¹⁴ の輝度温度データを利用している (岡垣 2015)。今般、2011年10月に打ち上げられた 米国の Suomi-NPP 衛星(第3.1.2項(2))に搭載され ているハイパーサウンダ CrIS (Cross-track Infrared Sounder)の輝度温度データの同化により、予測精度の 改善が得られることを確認できたことから、2017年3 月29日より全球数値予報システムでの利用を開始した。

本項では、全球解析における CrIS 輝度温度データ利 用のための品質管理と解析予報サイクル実験の結果を 示し、CrIS のデータ利用による解析、予測への影響に ついて述べる。なお、CrISを含むハイパーサウンダの 主要諸元については岡本 (2011)にまとめられているの で、そちらを参照されたい。

(2) 品質管理

ハイパーサウンダ CrIS の全球解析での品質管理・利 用方法について、以下に概要を述べる。

チャンネル選択

ハイパーサウンダは、複数の波長で地球大気や地表 面からの放射強度を測定し、大気(気温・水蒸気)の鉛 直分布に関する情報を得ることができる。しかし、赤



¹⁴ Infrared Atmospheric Sounding Interferometer の略。



図 3.1.10 全球解析で利用されたハイパーサウンダの分布例。 2017 年 7 月 28 日 00UTC の前後 3 時間の観測データ。淡 青点、橙点、紫点、赤点は、Aqua, Metop-A, Metop-B, Suomi-NPP の各衛星の利用データをそれぞれ示す。セン サ横の数字は利用されたデータ数を示す。

外放射は雲(水・氷)による吸収が大きく吸収線が複 維である。また、オゾン、メタンなど微量気体の影響 も受ける。これらの影響が現在の解析システムでは十 分に考慮されていないため、AIRS, IASIの利用方法と 同様に、CrISも晴天域の気温の鉛直分布情報の利用を 優先して選択したチャンネルの輝度温度を同化するこ とで気温場の改善を目指した。

CrIS のチャンネル総数は 1305 個であり、このうち 399 チャンネルのデータセット (Antonia and Barnet 2011)が米国環境衛星資料情報局によって配信されて いる。このデータセットから、増田 (2007)の手法を用 いて情報量の多いチャンネルを選択し、さらに AIRS で現業利用されているものと同等の波数で、互いにな るべく隣接しないチャンネルを選択する。最終的に、 水蒸気に感度があるチャンネルと品質不良なチャンネ ルを除き、気温に感度がある 27 個のチャンネルを選択 した。

スキャンバイアス補正

CrIS の観測は、上昇軌道¹⁵の場合、一回の走査で 西から東へ270個の観測視野角(FOV)¹⁶で放射強度を 観測できる。このときスキャン位置に依存する補正を、 統計処理計算で事前に求めたテーブルの参照により行 う。CrIS の場合、特定のFOVに測器依存のバイアス が見られたので(図略)、利用するFOVを限定し、ス キャン位置に依存するバイアスを補正した。

雲判別

赤外域の放射は雲による吸収を強く受けるため、ハ イパーサウンダの輝度温度同化には、晴天域の全層の データと、曇天域では推定した雲頂高度より上層に感 度があるチャンネルのデータのみを利用する(雲頂よ

¹⁵ 衛星が南から北へ進行する軌道のこと。

¹⁶ Field Of View の略。

り下層に感度があるチャンネルは除く)。AIRS, IASI と同様、Split Window法 (Inoue 1985)により 雲の有 り 無し判別を、CO₂ slicing 法 (Eyre and Menzel 1989) により 雲頂高度推定を行い、雲の影響を受けていない データを同化する。

データ間引き

他のハイパーサウンダ同様、データの水平間引き間隔 は 200 km とした。ただし、Suomi-NPP 衛星は、Aqua 衛星とほぼ同じ軌道を飛行しているため、重なりの大 きい領域を近い時刻で観測する(図 3.1.10)。ハイパー サウンダは、多チャンネルがゆえ情報量が他の観測と 比べ多いため、解析で過剰な影響を与えないように、 衛星間の重なりを考慮した間引き(衛星間間引きと呼 ぶ)を行っている。また、故障したチャンネルの数や 間引き格子の中心からの距離、解析対象時刻からの時 間差を考慮するなど、重複したデータに優先順位を付 けて利用するデータを選択している。

(3) 解析予報サイクル実験

ベースライン実験

(2) で述べたとおり、Suomi-NPP 衛星は、Aqua 衛 星と観測する現地時間が近く観測領域がほぼ重複する。 このため、CrIS のみの同化の効果を明瞭に見るため に CrISと AIRSを利用しない実験(ベースラインと呼 ぶ)を準備し、これに対して CrISデータの追加、AIRS データの追加がそれぞれ、どのようなインパクトを与 えるかを確認する。

実験期間は、夏期間に 2015 年 7 月 10 日~2015 年 9 月11日(夏期)、冬期間に2015年12月10日~2016年 2月11日(冬期)の期間を設定した。図3.1.11は、CrIS のみ(赤色)、AIRSのみ(緑色)をそれぞれ同化したと きの、両期間での全球領域における観測値と第一推定 値の差 (FG departure: First Guess departure) のべー スラインに対する標準偏差の変化率である。AMSU-A では、成層圏の気温に感度をもつチャンネル (ch9-14) を中心に CrIS データ利用時の方が AIRS データの利用 時と比べて FG departure の標準偏差の減少が大きく、 GNSS 掩蔽観測(屈折角)でも同様である。さらに、従 来型観測であるラジオゾンデや航空機の気温において も、AIRSと同程度またはそれ以上に第一推定値の気 温のプロファイルが改善していることがわかる。この ことから CrIS の輝度温度データの同化により、様々な 既存の観測データと整合する方向で、対流圏上層から 成層圏における気温場が改善していると言える。つま り CrIS の輝度温度データを同化することは、AIRS の 輝度温度データを同化することと同等以上の効果が得 られることを意味する。また、CrISを同化した場合の 予測精度へのインパクトについても、500 hPa 高度に おいてベースラインに対する RMSE が南半球を中心に 約3%改善するなど、AIRSデータの同化と同程度の精 度向上への寄与が確認された(図 3.1.12)。

現業数値予報システムへのインパクト

現業の全球数値予報システム(AIRSを既に利用している設定)に対して CrISを追加した効果を評価するため、ベースライン実験と同じ実験期間を対象に、2016年12月時点の数値予報ルーチンと同等のシステムを用いて解析予報サイクル実験を行った。CrISデータを利用しない設定を CNTL、CrISデータを衛星間間引きで利用する設定を TESTとする。

解析場の変化や既存の観測についての FG departure の標準偏差の変化は、既存の AIRS による気温場の改 善があるためインパクトは小さくなるものの、気温場の 変化傾向や対流圏上層から成層圏における気温場が改 善するなど、ベースライン実験との比較結果と整合的で あった。予測精度については、対初期値検証で FT=24 の下層 850 hPa の気温場において悪化が見られたもの の、対流圏上層・成層圏では、南半球を中心に、夏期 実験・冬期実験とも高度場の予測精度が改善している ことを確認した(図 3.1.13)。また、台風の進路予測に おいては、TESTと CNTLで同等の精度であることを 確認した(図略)。

(4) まとめと今後の課題

Suomi-NPP 衛星に搭載されているハイパーサウン ダ CrIS の輝度温度データを全球解析で利用した場合 の数値予報システムの予測精度への影響を調査した結 果、対流圏上層から成層圏を中心とした高度場、気温場 の第一推定値、予測値の改善が確認できたため、2017 年3月29日より全球数値予報システムでの利用を開始 した。

今後の課題として、メソ解析での利用や水蒸気チャンネルの利用が挙げられる。さらには、他の数値予報センターでは、チャンネル間の誤差相関を考慮した利用 (Bormann et al. 2016)や雲域での利用 (McNally 2009) により予測精度向上を達成した実績があるため、これ らの課題にも取り組む予定である。

3.1.4 全球解析における DMSP-F17、F18/SSMIS 輝度温度データの利用開始

(1) はじめに

全球解析では、マイクロ波放射計 SSMIS の水蒸気サ ウンダ輝度温度データの利用を 2017 年 3 月 29 日に開 始した。本項では、SSMIS 水蒸気サウンダデータの同 化手法、及び同化による解析値、予測値への影響につ いて解説する。

(2) SSMIS 輝度温度データ

SSMIS は、米国の DMSP¹⁷ 衛星シリーズの 16 号以 降に搭載されているマイクロ波放射計である。地球か らの放射(輝度温度)を観測する 24 個のチャンネルで 構成され、可降水量や雲水量に関する情報が得られる イメージャと、気温や水蒸気の鉛直分布に関する情報

 $^{^{17}}$ Defense Meteorological Satellite Program の略。



図 3.1.11 夏期実験と冬期実験を通した全球における FG departure の CrIS のみ(赤線)を同化した実験と AIRS のみ(緑線) を同化した実験のベースラインに対する標準偏差の変化率を示した図。横軸が変化率 [%]。変化率が負の場合は第一推定値の 誤差の減少(改善)を示す。エラーバーまたは破線は 95%信頼区間、丸印は統計的に有意な差であることを示す。(a)マイク ロ波気温サウンダ AMSU-A、マイクロ波水蒸気サウンダ MHS、(b) GNSS 掩蔽観測(屈折角)、(c) ラジオゾンデ(気温)、 (d) 航空機観測(気温)。



図 3.1.12 ベースライン実験での予測精度の結果。冬期実験における海面更正気圧、850 hPa 気温、500 hPa 高度、850 hPa 風 速、250 hPa 風速のベースラインに対する RMSE の改善率 (%) を縦軸に示す。値が正のとき改善を示す。横軸は 1~11 日 までの予報時間。上段は AIRS のみ、下段は CrIS のみのベースラインに対する全球(緑線)、北半球(茶線)、熱帯(赤線)、 南半球(青線)の各領域での改善率。エラーバーは 95%信頼区間、丸印は統計的に有意な改善または改悪であることを示す。



図 3.1.13 現業数値予報システムに対して CrIS を追加した比較実験での予測精度の結果。冬期実験におけるジオポテンシャ ル高度の解析値に対する RMSE の改善率 (%) (CNTL-TEST)/CNTL を示す。左図は FT=24、中図は FT=48、右図は FT=72 における緯度別鉛直分布の結果。正の値(暖色系)は改善を示す。黒曲線は、ゼロ値の等値線。図中の茶色の部分は 南極大陸付近についてマスキングした領域を示す。

が得られるサウンダの2つの機能を有している。当庁 では、DMSP衛星の16号、17号に搭載されたSSMIS のマイクロ波イメージャの海上晴天域の輝度温度の同 化を2009年に開始し(江河・計盛2009)、現在は、全 球解析、メソ解析及び局地解析において、DMSP衛星 の17号、18号に搭載されたSSMISのマイクロ波イ メージャの海上晴天域の輝度温度を同化している。ま た、メソ解析では、海上降水域における輝度温度から リトリーブされた降水強度も同化している。マイクロ 波イメージャ及びその輝度温度同化の概要については 計盛(2011, 2015)を参照されたい。

SSMIS の水蒸気サウンダは、183 GHz の水蒸気吸収 線付近に3つのチャンネルを有し、対流圏の水蒸気の鉛 直分布に関する情報をもたらす。当庁では、既に水蒸気 サウンダの輝度温度データとして、米国及び欧州の現 業極軌道衛星(NOAA 衛星及び Metop 衛星)に搭載さ れている MHS、フランス・インドの Megha-Tropiques 衛星に搭載されている SAPHIR¹⁸、及び宇宙航空研究 開発機構 (JAXA)・米国航空宇宙局 (NASA) の GPM 主衛星に搭載されている GMI のデータを同化してい る。NOAA 衛星及び Metop 衛星は、各観測点におけ る地方時(現地時刻)がほぼ一定となる太陽同期軌道 を、Megha-Tropiques 衛星及び GPM 主衛星は各観測 点の観測時刻が変動する太陽非同期軌道を飛行してい る。DMSP 衛星は NOAA 衛星及び Metop 衛星と同じ 太陽同期衛星であるが、早朝軌道、午前軌道及び午後 軌道とそれぞれ異なる軌道を飛行しているため、互い に観測領域を補完する(図 3.1.14)。

SSMIS 輝度温度データには校正処理の異なる複数の データセットがある。当庁では、イメージャチャンネ ルの同化には米国環境衛星データ情報局 (NESDIS) 作 成のアルゴリズムにて校正処理された SDR¹⁹ データ を利用しているが、水蒸気サウンダデータの同化には、 海外の主要数値予報センターでも利用されている、英 国気象局等が作成したアルゴリズムである UPP²⁰ に て校正処理された UPP データを利用することにした。 UPP データは 24 チャンネル全ての観測位置合わせ²¹ や、SDR データより 改良された輝度温度の校正処理が 適用されており、多チャンネルを用いた高度なデータ 利用が可能である。

(3) データの品質管理

現在、全球解析の衛星輝度温度同化では晴天域のデー タのみを同化している。晴天域の輝度温度同化では、観 測点に雲や降水粒子が存在しないことを前提としてお り、数値予報モデルの大気プロファイルから放射伝達

- ¹⁹ Standard Data Record の略。
- ²⁰ Unified Pre-Processor の略。



図 3.1.14 MHSと SSMIS の観測領域(北半球)の例。観測 時刻は 2015 年 7 月 31 日 23:00UTC から 2015 年 8 月 1 日 00:50UTC。(左図) MHS のみ、(右図) MHS+SSMIS。赤 点は DMSP17 号、橙点は DMSP18 号、緑点は Metop-A、 黄緑点は Metop-B、青点は NOAA-18、紫点は NOAA-19 の観測データを示す。数字は地方時を示す。



図 3.1.15 AMSU-A 及び MHS の FG Departure の標準偏 差の CNTL に対する TEST の変化率。縦軸は各観測測 器のチャンネルの番号。横軸は変化率 [%]。(左図) 夏期、 (右図) 冬期。変化率が負の場合は第一推定値の誤差の減 少(改善) を示す。エラーバーは 95%信頼区間、丸印は統 計的に有為な差であることを示す。

計算によって輝度温度を算出する際には、気温、水蒸 気、オゾンのプロファイルのみを用いて計算を行ってい る。このため、雲や降水粒子の影響を受けた観測デー タが同化されると、雲や降水粒子の影響が、気温や水 蒸気の影響として誤って評価され、解析精度を低下さ せる可能性がある。特に、水蒸気サウンダの観測周波 数である 183 GHz 帯は、イメージャチャンネルの観測 周波数である 19~37 GHz に比べて波長が短く、より 雲や降水粒子の影響を受けやすいため、雲・降水域を 検知・除去し、晴天域のデータのみを同化するための 品質管理が重要である。

水蒸気サウンダの伝統的な品質管理手法では、気温 や水蒸気への感度が小さい窓領域(90,150 GHz帯)を 用いて、雲・降水域の検出並びに地表面温度・射出率 の精度評価を行っているが、DMSP18 号に搭載される SSMIS の一部チャンネルには不具合があるため同じ手 法は使えない。このため、UPPで処理された SSMIS の 水蒸気サウンダデータの同化にあたっては、多チャンネ ルである特性を活かし、主に雲水に感度を持つ 37 GHz 帯、主に雪に感度を持つ 90 GHz 帯、主に氷晶に感度 を持つ 183 GHz 帯のチャンネルを組み合わせて雲・降 水域を検出し、海上晴天域のデータのみを利用してい る。詳細については Murakami and Kazumori (2017) をご覧頂きたい。

¹⁸ Sondeur Atmosphérique Profil d'Humidité Intertropicale par Radiométrie(仏語) の略。

²¹ SDR データでは、いくつかのチャンネルグループ毎に観 測位置合わせが行われている。



図 3.1.16 夏期実験におけるジオポテンシャル高度の対解析値 RMSE の CNTL に対する TEST の変化の鉛直緯度別帯状平均 分布。左から順に、24 時間予測、48 時間予測、72 時間予測、96 時間予測。正の値(暖色)は RMSE の減少(改善)を示 す。黒曲線はゼロ値の等値線。図中の茶色の部分は南極大陸付近についてマスキングした領域を示す。

(4) 同化による解析、予測へのインパクト

ルーチン利用に先立ち、2015 年 7 月 10 日から 2015 年 9 月 11 日(夏期)、2015 年 12 月 10 日から 2016 年 2 月 11 日(冬期)の期間を対象に、SSMIS 水蒸気サウン ダデータの同化によるルーチン数値予報システムへの 影響評価を行った。実験には 2016 年 12 月時点の数値 予報ルーチンと同等のシステムを用い、コントロール 実験 (CNTL) はルーチンシステムと同等の設定にし、 テスト実験 (TEST) は、CNTL に SSMIS 水蒸気サウ ンダデータを追加したものである。

SSMIS 水蒸気サウンダは対流圏に感度を持つため、 予測初期を中心に、水蒸気場をはじめとする対流圏の 場が改善されることが期待される。ここでは、解析値の 基となる第一推定値(一初期時刻前の予測値)と既存の 観測値の整合性の変化を確認する。MHS について、観 測値と第一推定値の差 (FG departure: First Guess departure)の標準偏差を見ると、夏期·冬期ともに CNTL と比較して TEST において減少しており、第一推定値の 水蒸気場が改善していることを示している(図3.1.15)。 同様の傾向は、SAPHIR 及び GMI 等、他の MHS と同 種の観測との比較においても確認されている(図略)。 なお、気温、水蒸気、高度等の平均場にはほとんど変 化は見られない(図略)。

予測値の解析値に対する誤差の変化を見ると、夏期 の南半球では対流圏を中心に高度場において、CNTL と比較した TEST の対解析値 RMSE が減少しており、 予測精度が向上していることを示している(図3.1.16)。 夏期の北半球及び冬期(図略)については概ね TEST と CNTL は同等である。

(5) まとめ

本項では、2017 年 3 月 29 日から全球解析での利用 を開始した SSMIS 水蒸気サウンダデータの同化手法 及び同化による解析場・予測場への影響について述べ た。事前の実験結果から、当該データの利用は、解析 値・第一推定値の水蒸気場、及び夏期の南半球の気温・ 高度の予測場を改善することが確認されている。 今後の課題としては、SSMISイメージャチャンネル の利用データの SDR データから UPP データへの切替 えや雲・降水域の水蒸気サウンダデータの同化等が挙 げられ、継続的な開発が必要である。

3.1.5 GNSS 掩蔽観測データの利用の改良(1) はじめに

GNSS (Global Navigation Satellite System) 掩蔽観 測は、高度約2万kmの測位衛星から発信される電波 を受信し、大気による遅延を計測することで伝搬経路 上の気温や水蒸気に関係する情報を導出する観測であ る (Kursinski et al. 1997)。位相差(時間差)を計測す るため、GNSS 掩蔽観測は高精度かつ校正不要の観測 とされている。数値予報では通常、低軌道衛星に搭載 された受信機の測定値から導出された屈折角または屈 折率の鉛直プロファイルを同化利用する。

気象庁では現在、全球解析で屈折角を、メソ解析で 屈折率を利用している (大和田 2015a,b; 平原 2016)。 全球解析で使用中の掩蔽観測衛星と、そのデータの処 理機関について表 3.1.2 にまとめた。本項では、全球 解析における GNSS 掩蔽観測データ(以下、掩蔽デー タ)の高度利用に向けて、2017 年 7 月 25 日に実施し た変更について報告する。本変更により特に熱帯の対 流圏界面より上空の気温と風の解析が改善された。掩 蔽観測の原理については津田 (1998)、または小澤・佐 藤 (2007) に詳しいので、これらを参考にしていただき たい。

(2) 変更の概要

本改良における変更点は、以下の4点である。

- 1. 熱帯における屈折角同化のグロスエラーチェック の閾値の見直し
- 2. 品質フラグの参照方法の変更
- 3. 利用高度の下限の設定
- 4. 掩蔽観測データ処理パッケージ ROPP²² (Culverwell et al. 2015)の更新

 $^{^{22}\,}$ Radio Occultation Processing Package

衛星	データ処理機関	
COSMIC	米国大気研究大学連合 (UCAR:	
	University Corporation for Atmo-	
	spheric Research)	
Metop-A	欧州気象衛星開発機構	
Metop-B	(EUMETSAT: European Organi-	
	sation for the Exploitation of Me-	
	teorological Satellites)	
TerraSAR-X	ドイツ地球科学研究センター	
GRACE-A	(GFZ: GeoForschungsZentrum)	
GRACE-B		

表 3.1.2 全球解析で使用している掩蔽観測衛星と、そのデー タの処理機関。2017 年 9 月現在。

1のグロスエラーチェックは、観測データを扱う上で 行う品質管理の一つで、第一推定値との差が設定した 閾値を超える値を持つ観測に対しては品質が悪いと判 断して棄却し、同化には利用しない。最近の調査の結 果から、変更前の屈折角同化では、観測値が第一推定 値からやや離れたプロファイルは、連続して棄却され ていることがわかった。このような棄却は、特に熱帯 の対流圏界面付近より上空の、気温が急変する高度で 多く見られた。屈折角のグロスエラーチェックの閾値は 全球一律で、観測誤差の1.5倍程度としていたが、他 の領域と比較して第一推定値の精度が十分でない熱帯 では変更前の閾値は厳しめであり、観測の持つ情報を 活かしきれていなかった可能性がある。このため、緯 度0度付近を中心に、グロスエラーチェックの閾値を 観測誤差の3倍程度に緩め、より多くの観測を同化に 利用することにした。これは、屈折角同化以前に行わ れていた屈折率同化における熱帯のグロスエラーチェッ クの閾値が、観測誤差の3倍程度であったことを参考 に設定した。

閾値は南緯 40 度から 北緯 40 度の間でゆ るやかに変化するようにした。

2の品質フラグとは、表3.1.2で示した各衛星のデー タ処理機関が付加する16項目の品質情報のことであ る。変更前は屈折角の品質情報のみを参照し、それが 「異常」の場合は棄却していた。しかし、その他の品質 情報も併せて調査すると、特にMetop衛星については 屈折角が「正常」という品質情報を持っていても、プ ロファイル全体の品質情報が「異常」とされている場 合があり、このような場合については観測値と第一推 定値の差(FG departure: First Guess departure)の 統計から、観測の精度がやや悪いことがわかった(図 略)。このため、プロファイル全体の品質情報が「異 常」とされる場合も併せて棄却することにした。

3については、変更前は利用高度の下限は設定して いなかったが、Metop 衛星の高度 8 km より下層の観 測にはバイアスがあり (von Engeln et al. 2009)、その 他の衛星については Metop 衛星ほど顕著ではないもの



図 3.1.17 2016 年 1 月の 1 か月間を対象とした、変更後に おける変更前からの使用データ数の増加率。COSMIC 衛 星と Metop-A 衛星について 5 つの領域に分け、各高度で 集計してプロットした。

の、高度2kmより下では同様のバイアスが見られる ことを確認したため、Metop衛星は高度8kmより下、 その他の衛星については高度2kmより下の観測は不 使用とした。

4の ROPP は欧州の掩蔽観測データ処理機関 (ROM SAF: Radio Occultation Meteorology Satellite Application Facility) で開発されているソフトウェアである。 掩蔽データの同化で必要な計算のソースコードがこれ に含まれている。気象庁では全球解析において屈折率 同化から屈折角同化へ移行した際に、ROPP バージョ ン6を導入した。ROPP バージョン 8 では屈折角、屈 折率同化のための新しいソースコードが追加されたた め、今回バージョン 8 へのアップデートを行った。ただ し屈折角同化のためのソースコードについては、バー ジョン 8 で変更になったのは、第一推定値などの鉛直 格子点値から観測点へ鉛直内挿する部分のみであり、 バージョンアップによる結果への影響は、他の変更よ り小さい。

(3) 変更の効果

ここでは、(2) で記した変更の効果を確認するため に実施した解析予報サイクル実験²³の結果を紹介す る。実験は2015年6月から10月のうちの124日間と、 2015年11月から2016年3月のうちの123日間を同 化対象期間(以下、前者を夏期実験、後者を冬期実験) とし、どちらも変更の効果が定着した同化期間の11日 目以降に、速報解析と予測を実施した。

²³ 解析予報サイクルの仕組みについては室井 (2012) を参照 のこと。

図 3.1.17は、例として COSMIC 衛星と Metop-A 衛 星について、変更前後の使用データ数の増加率を領域 ごとに示したグラフである。変更後は利用高度の下限 値の設定により、COSMIC 衛星は高度 2 km より下、 Metop-A 衛星は高度 8 km より下の使用データ数がゼ ロになった。熱帯ではグロスエラーチェックの閾値の 見直しにより、1.2 から 2.0 倍程度にデータ数が増加し た。熱帯の高度 12 km 付近は約 200 hPa に相当する が、FG departure の統計では標準偏差の小さい高度で あり、他の高度と比較して第一推定値の精度が良いと 推測される。このためこの高度では変更前の使用デー タ数が多く、増加率は小さい。

本変更では、グロスエラーチェックの閾値を南緯40 度から北緯40度の間でゆるやかに変化するように設定 したので、熱帯を除く北半球と南半球の使用データ数 もやや増加した。また、COSMIC衛星より Metop-A 衛星の増加率が小さいのは、品質フラグの参照方法の 変更により Metop衛星で棄却されるプロファイルが増 えたことによるものである。

図 3.1.18 は、ラジオゾンデ観測の FG departure に ついて、変更前後の標準偏差の変化率を示した図であ る。熱帯では使用データ数の増加により観測情報が多 く取り込まれるようになり、対流圏界面付近から上空 で第一推定値の気温の鉛直構造が改善したことがわか る。気温の鉛直構造が改善することにより、風の鉛直 構造も改善した。

図 3.1.19 は、2015 年 8 月を対象期間とした変更後の 解析値と、その変更前との差を示した東西平均鉛直断 面図である。気温、東西風ともに熱帯の成層圏を中心 に変更後と変更前で差が見られる。

本変更で大きく変わったのは、熱帯の対流圏界面付 近から上空であり、単発の解析による北半球や南半球 の対流圏への影響は小さかった。しかし、日本付近の 領域に対して行った 500 hPa 高度場の予測の検証結果 では、予測時間が長くなるほど改善が大きくなる結果 が得られた(図略)。これは、熱帯の対流圏界面から上 空の解析場の改善が、解析予報サイクルを通じ、時間 が1日、2日と経過した後の北半球や南半球の対流圏 の予測へ影響を及ぼすものと推測している。また、夏 期実験における台風進路予測の検証(対象は 2015 年の 台風第8号から第23号まで)では、132時間予測まで 概ね変更後のほうが進路予測誤差が小さく、わずかに 改善が見られた(図略)。これは、気温の解析場の改善 により風の解析場も改善され、台風周辺の風の予測精 度が向上したためと考えられる。

(4) まとめと今後の課題

全球解析における掩蔽データの利用手法を見直し、 変更を行った。4つの変更点の中で結果に一番影響する ものは、熱帯における屈折角同化のグロスエラーチェッ クの閾値の見直しである。これにより特に熱帯の対流



図 3.1.18 観測値と第一推定値の差 (FG departure) につい て、変更前後の標準偏差の変化率を示した図。観測は熱帯 (南緯 20 度から北緯 20 度)におけるラジオゾンデの観測 で、左図が気温、右図が東西風である。赤色が夏期実験、 緑色が冬期実験である。変化率が負の場合は第一推定値の 誤差の減少(改善)を示す。エラーバーは 95%信頼区間、 丸印は統計的に有意な差であることを示す。



図 3.1.19 2015 年 8 月を対象期間とした解析値の東西平均 鉛直断面図。上図は気温、下図は東西風であり、着色は差 分(変更後 – 変更前)、コンターは変更後の気温の平均値 (上図)、東西風の平均値(下図)を示す。

圏界面付近より上の観測データが多く使われるように なり、その高度を中心に気温と風の解析値が改善され た。今回の変更では利用高度の下限を設定し、精度が 悪いとされる下層のデータの利用を廃止した。しかし 2016年11月に実施されたEUMETSATの処理の変更 後は、Metop衛星の下層の屈折角データの品質が改善 していることを確認しているので、今後はこのデータ の利用について検討する必要がある。対流圏の解析精 度の向上のためには、リアルタイムデータのモニター の強化やデータ処理センターの変更情報に注意しつつ、 利用可能なデータは積極的に利用していくべきである。 掩蔽データの利用については今後も適宜見直しを行い、 解析と予測の精度改善を図る必要がある。

参考文献

- 石橋俊之,2011: 変分法バイアス補正. 数値予報課報告・ 別冊第57号,気象庁予報部,123-127.
- 江河拓夢, 2015: マイクロ波サウンダ. 数値予報課報告・ 別冊第 61 号, 気象庁予報部, 47–49.
- 江河拓夢, 計盛正博, 2009: マイクロ波放射計 SSMIS の利用. 平成 21 年度数値予報研修テキスト, 気象庁 予報部, 54–56.
- 太田行哉, 2015: 従来型観測データの利用の現状と課題. 数値予報課報告・別冊第61号, 気象庁予報部, 3-8.
- 大野木和敏, 1997: 台風ボーガス. 数値予報課報告・別 冊第43号, 気象庁予報部, 52-61.
- 大和田浩美, 2015a: GNSS 掩蔽観測. 数值予報課報告· 別冊第 61 号, 気象庁予報部, 78-81.
- 大和田浩美, 2015b: メソ解析における GNSS 掩蔽観測 データの利用. 平成 27 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 60-63.
- 岡垣晶, 2010: 全球解析における台風ボーガスの改良. 平成 22 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 48-52.
- 岡垣晶, 2015: ハイパースペクトル赤外サウンダ. 数値 予報課報告・別冊第61号, 気象庁予報部, 43-46.
- 岡本幸三, 1999: サウンダ. 数値予報課報告・別冊第45 号, 気象庁予報部, 44-72.
- 岡本幸三, 2007: ATOVS 直接同化. 数値予報課報告・ 別冊第53号, 気象庁予報部, 58-70.
- 岡本幸三, 2011: ハイパースペクトル赤外サウンダ. 数 値予報課報告・別冊第57号, 気象庁予報部, 25-36.
- 小澤英司, 佐藤芳昭, 2007: GPS. 数値予報課報告・別 冊第53号, 気象庁予報部, 133-139.
- 計盛正博,2011: メソ解析における衛星観測輝度温度 データの同化.平成23年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部,3-8.
- 計盛正博, 2015: マイクロ波イメージャ. 数値予報課報 告・別冊第 61 号, 気象庁予報部, 50-54.
- 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.

- 北川裕人, 2007: 変更の概要. 平成 19 年度数値予報研 修テキスト, 気象庁予報部, 1-4.
- 小泉耕,2003: メソ・領域解析の台風ボーガス. 平成15 年度数値予報研修テキスト,気象庁予報部,13-16.
- 高坂裕貴,2015: 台風ボーガス作成手法の改良. 平成27 年度数値予報研修テキスト,気象庁予報部,50-53.
- 坂本雅巳,2009: 従来型観測の品質管理に関するその他 の開発. 数値予報課報告・別冊第55号,気象庁予報 部,19-26.
- 佐藤芳昭, 2007: 変分法バイアス補正. 数値予報課報告・ 別冊第 53 号, 気象庁予報部, 171–175.
- 新堀敏基, 2005: 全球 4 次元変分法の台風ボーガス. 数 値予報課報告・別冊第 51 号, 気象庁予報部, 106–110.
- 津田敏隆, 1998: GPSを用いた成層圏温度プロファイ ルの観測. 気象研究ノート, **192**, 159–178.
- 平原洋一,2016: GNSS 掩蔽観測データのメソ解析での 利用開始. 平成 28 年度数値予報研修テキスト,気象 庁予報部,53-55.
- 増田一彦, 2007: AIRS チャンネル選択. 数値予報課報 告・別冊第 53 号, 気象庁予報部, 85-88.
- 室井ちあし,2012: 解析予報サイクル、サイクル解析と 速報解析. 平成24 年度数値予報研修テキスト,気象 庁予報部,4-5.
- 室井ちあし, 佐藤芳昭, 2012: データ同化概要. 平成 24 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 18.
- 米原仁,2016:全球数値予報システムの物理過程改良の 概要.平成28年度数値予報研修テキスト,気象庁予 報部,1-3.
- Antonia, G. and C. Barnet, 2011: Methodology and Information Content of the NOAA/NESDIS Operational Channel Selection for the Cross-Track Infrared Sounder (CrIS). NOAA Technical Report NESDIS, 133, 17–26.
- Bormann, N., M. Bonavita, R. Dragani, R. Eresmaa, M. Matricardi, and A. McNally, 2016: Enhancing the impact of IASI observations through an updated observation-error covariance matrix. *Quart.* J. Roy. Meteor. Soc., 142, 1767–1780.
- Culverwell, I. D., H. W. Lewis, D. Offiler, C. Marquardt, and C. P. Burrows, 2015: The Radio Occultation Processing Package, ROPP. Atmos. Meas. Tech., 8, 1887–1899.
- Desroziers, G., L. Berre, B. Chapnik, and P. Poli, 2005: Diagnosis of observation, background and analysis-error statistics in observation space. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **131**, 3385–3396.
- Desroziers, G. and S. Ivanov, 2001: Diagnosis and adaptive tuning of observation-error parameters in a variational assimilation. *Quart. J. Roy. Meteor.*

Soc., 127, 1433–1452.

- Eyre, J. R. and W. P. Menzel, 1989: Retrieval of Cloud Parameters from Satellite Sounder Data: A Simulation Study. J. Appl. Meteor. Climat., 28, 267–275.
- Inoue, T., 1985: On the Temperature and Effective Emissivity Determination of Semi-Transparent Cirrus Clouds by Bi-Spectral Measurements in the 10 µm Window Region. J. Meteor. Soc. Japan, 63, 88–99.
- Kursinski, E. R., G. A. Haji, J. T. Schofield, R. P. Linfield, and K. R. Hardy, 1997: Observing Earth's atmosphere with radio occultation measurements using the Global Positioning System. J. Geophys. Res., 102, 23429–23465.
- McNally, A. P., 2009: The direct assimilation of cloud-affected satellite infrared radiances in the ECMWF 4D-Var. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 135, 1214–1229.
- Murakami, Y. and M. Kazumori, 2017: Assimilation of SSMIS humidity sounding channels into JMA's global NWP system. *CAS/JSC WGNE Res. Activ. Atmos. Oceanic Modell.*
- von Engeln, A., S. Healy, C. Marquardt, Y. Andres, and F. Sancho, 2009: Validation of operational GRAS Radio Occultation Data. *Geophys. Res. Lett.*, **36**, L17 809, DOI:10.1029/2009GL039 968.

3.2 局地数値予報システムにおける新規観測デー タの利用開始及び同化手法の高度化¹

3.2.1 はじめに

2017 年 1 月 26 日 03UTC から、局地モデル (LFM) の初期値を作成する局地解析に変分法バイアス補正を 導入し、晴天域の衛星輝度温度・衛星土壌水分の同化 を開始した (Ikuta 2017)。本節ではこの変更の概要と 予測へのインパクトを紹介する。

3.2.2 変分法バイアス補正

変分法バイアス補正は、変分法データ同化を行いつ つ観測のバイアスを逐次補正する手法である。Derber and Wu (1998)によって米国環境予測センター (NCEP) で実用化され現在では多くの現業数値予報センターで 採用されている。この変分法バイアス補正は、2006 年 に気象庁の全球解析に導入され (佐藤 2007)、その後の 改良 (石橋 2008)を経て、現在では衛星輝度温度同化 に欠かすことのできない技術となっている。

今回、局地解析で新たに衛星輝度温度を同化するに あたり、適切にバイアスを補正するため変分法バイア ス補正を局地解析に導入した。変分法バイアス補正の 理論的な詳細は、佐藤 (2007)、石橋 (2011)を参考に していただきたい。

3.2.3 晴天域の衛星輝度温度同化

(1) 概要

局地解析で利用を開始した衛星観測は、静止気象衛星 「ひまわり8号」に搭載されている可視赤外放射計AHI、 国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構(JAXA)が打 ち上げた水循環変動観測衛星「しずく」(GCOM-W) に搭載されている高性能マイクロ波放射計AMSR2、 JAXAと米国航空宇宙局(NASA)が共同で打ち上げた 全球降水観測計画(GPM)主衛星に搭載されているマ イクロ波放射計GMI、欧州の現業極軌道衛星 Metopや 米国の現業極軌道衛星 NOAA に搭載されているマイ クロ波気温サウンダ AMSU-A 及びマイクロ波水蒸気 サウンダ MHS、米国の地球観測衛星 Aquaに搭載され ている AMSU-A 並びに米空軍の軍事気象衛星 DMSP に搭載されているマイクロ波放射計SSMISにより観測 されたものである。

図 3.2.1 は各衛星に搭載されたセンサーのチャンネ ル毎の輝度温度観測と第一推定値からシミュレートし た計算輝度温度の差の期間平均を示したものである。 NVBCはバイアス補正を行わない場合、GVBCは全球 解析のバイアス補正係数を用いてバイアス補正を行っ た場合、LVBCは局地解析で変分法バイアス補正を行っ た場合の観測輝度温度と計算輝度温度の差を表す。ただ し、いずれの場合もスキャンバイアス補正(岡本 2007) は行っている。統計期間は、後述する性能評価試験の 実験期間である夏期間と冬期間の二つの期間を設定した。夏期間は、2015年7月19日から7月26日、8月3日から8月04日、8月31日から9月10日までである。また、冬期間は、2016年1月15日から1月29日、2月10日から2月17日までである。

まず、NVBCに着目するとマイクロ波イメージャに 大きなバイアスがある。GVBCではこれらのマイク ロ波イメージャのバイアスを補正しきれてはいない。 該当する AMSR2の観測と第一推定値の標準偏差が約 1~2 Kであることを踏まえると、GVBCの補正では 不十分であると理解できるだろう。また、水蒸気に感 度のある MHSに対しては、チャンネル4,5(157 GHz, 183 GHz付近)では補正するどころか補正無しの場合 と逆符号の正バイアスを与えてしまっている。これら と比較して、LVBCは非常にバイアスが小さく、適切 にバイアスが補正されていることが分かる。こうした バイアス補正の特徴は冬季でも同様であり、特に水蒸 気に感度のあるセンサーのバイアスが GVBCでは補 正しきれず、LVBCでは適切に補正されている。

(2) 予測精度への影響と考察

衛星輝度温度同化による予測精度の変化を調べるた め観測インパクト実験を行った。実験における相対湿 度プロファイルの対国内ゾンデ検証結果を図3.2.2と図 3.2.3に示す。検証結果は、輝度温度を同化することで 相対湿度の鉛直プロファイルの予測精度が改善したこ とを示している。降水予測精度は、夏期間では改善に 統計的有意性はなく、冬期間では改善が統計的に有意 であった(図略)。この水蒸気のプロファイルの改善は 湿潤バイアスを軽減する、つまり大気を乾燥させるも のである。これは局地解析に導入した変分法バイアス 補正が機能していることが大きな要因である。

今回、局地解析では変分法バイアス補正を導入した 事で適切に衛星輝度温度を同化することが可能となっ た。変分法バイアス補正は、観測の設定の変更、測器 の劣化、モデルの変更など誤差原因の変化に追従しバ イアスを動的に補正し続ける。こうして定常的に適切 なバイアス補正された観測は精度を維持しつつ現業的 にデータ同化を行う上で非常に重要である。

一方、図 3.2.1 において全球解析の補正係数を利用 した場合、対流圏の水蒸気に感度のある測器、例えば AMSR2 や MHS に正のバイアスが残ることを示した が、データ同化に利用する、これら AMSR2 や MHS の計算輝度温度のバイアスは、モデルの対流圏の水蒸 気バイアスと比例関係にある。つまり、正のバイアス を持った衛星輝度温度の同化は、湿潤バイアスの原因 となる。メソ解析では全球解析の補正係数を利用して いるため水蒸気に感度のある測器の輝度温度に正バイ アスがあり、その輝度温度の同化が対流圏の湿潤バイ アスの一因となっていることに注意していただきたい。

¹ 幾田 泰酵



図 3.2.1 観測輝度温度と第一推定値の計算輝度温度の差。横軸は衛星・センサー・チャンネルを表し、縦軸は観測輝度温度と 第一推定値の計算輝度温度の差の期間平均を表す。緑は NVBC、青は GVBC、赤は LVBC である。(a) に夏期間、(b) に冬 期間の統計結果を示す。



図 3.2.2 夏期間の対国内ゾンデ検証の相対湿度プロファイル の平均誤差。(a)と(b)の青破線は輝度温度無し、赤実線 は輝度温度有りを表す。(c)と(d)の黒実線は輝度温度有 りと輝度温度無しの差を表す。(a)と(c)は初期時刻、(b) と(d)は予報時間9時間の検証結果である。また、(c)と (d)のエラーバーは95%信頼区間を表す。



図 3.2.3 夏期間の対国内ゾンデ検証の相対湿度プロファイルの二乗平均平方根誤差。その他は図 3.2.2と同じ。

現在、メソ解析に同様の変分法バイアス補正を導入 すべく開発を進めている。メソ解析で変分法バイアス 補正が機能すれば、メソ解析でも衛星輝度温度をより 精度良く同化することが可能となる。その結果、局地 解析の第一推定値や境界値のバイアスが軽減し、LFM の更なる予測精度向上が期待される。

3.2.4 土壤水分量同化

(1) 概要

LFM は地中温度と土壌体積含水率を予報変数として 持ち、そして局地解析もまた地中温度と土壌体積含水 率を解析変数として持つ(幾田 2014)。そのため地中温 度や土壌水分量などの地中の観測を要素変換すること なく直接同化することができる。しかし、地中の直接 観測は定常的且つ広範には実施されていないため、同 化できる期間や場所は非常に限定される。一方、衛星 観測に着目すると様々な衛星には土壌水分に関するプ ロダクト(土壌水分量プロダクト)があり、定常的且
 つ広範に同化利用できる²。

マイクロ波散乱計による観測から推定された土壌水 分量は、英国気象局等の欧州の気象機関で既に現業利 用されている (Dharssi et al. 2010)。その手法は、事前 に土壌水分量プロダクトを同化に適した擬似観測デー タに変換し同化する手法である。具体的に、変換には 土壌水分量プロダクト値とモデルの土壌体積含水率を 用いる。それらの値を用いて、同化する擬似観測の事 前確率密度分布を正規分布型に変形する変換係数を統 計的に求める。その変換係数を用いて土壌水分量プロ ダクト値から擬似観測データを作成する。このような 手法は累積分布関数 (CDF) マッチングと呼ばれる。詳 細は Dharssi et al. (2010)を参考にしていただきたい。

なお、この CDF マッチングは、静的な補正方法で あるため、測器の劣化などによる経年変化に追随でき ない。そこで、局地解析では CDF マッチングに変分 法バイアス補正を併用しバイアスを逐次補正しつつ同 化している。

今回、局地解析に導入したデータは、「しずく」衛星に 搭載されているマイクロ波放射計 AMSR2 及び Metop に搭載されているマイクロ波散乱計 ASCAT の土壌水 分量プロダクト (Koike 2013; Bartalis et al. 2008) で ある。特に、マイクロ波放射計の観測は帯域によって は地表面からの長波放射の情報を持っている。そのた め原理的には輝度温度の同化によって陸面の状態の修 正は可能である。しかしそれを現業局地数値予報シス テムで実現するためには、モデルの地表面射出率の再 現性や陸面の計算輝度温度の計算精度、さらに陸面同 化技術の高度化が必要であり、いずれも実用段階に無 いというのが現状である。同様にマイクロ波散乱計に ついても地表面における散乱断面積を直接同化するこ とは現状技術的に困難である。そこで、まず高次プロ ダクトとして検証を経て一定の精度を持つ土壌水分量 プロダクトを同化することを陸面同化の第一歩として 本開発を行った。同化対象領域は日本の陸域に限定し、 同化に利用したデータは、森林、海、湖沼、都市域、 積雪域、降水域を除いたものである。ここで、土地利 用状況は国土数値情報を基に判別し、積雪域は積雪解 析、降水域は解析雨量の1時間積算降水量の有無を基 に判断している。これらの条件の選択は、プロダクト 自体の特性や第一推定値との乖離が大きいことを根拠 とした。

(2) 予測精度への影響と考察

土壌水分量の同化による予測精度への影響を調査す るため観測インパクト実験を行った。その結果、地上 気温予測の改善を確認した。土壌水分量を同化した実 験を TEST、同化していない実験を CNTLと呼ぶ。図

² https://www.wmo-sat.info/oscar/gapanalyses/ ?variable=149



図 3.2.4 夏期間における 全初期時刻からの地上気温予測の 対アメダス検証における (a) 平均誤差、(b) 二乗平均平方 根誤差、(c) 平均誤差の TEST-CNTL、(d) 二乗平均平方 根誤差の TEST-CNTL。横軸は予報対象時刻。(c) と (d) のエラーバーは 95%信頼区間を表す。

3.2.4 にアメダス観測地点における地上気温予測の検証 結果を示す。TEST では主に日中の負バイアスが改善 していることが分かる。土壌水分量の初期値の修正が なぜ地上気温予測に効果をもたらすかは、幾田 (2015) で示したとおり、土壌体積含水率が修正されることで 地表面フラックスを介して地上気温予測が修正される ためである。

今回の衛星土壌水分量同化の誤差の変化が相対的に 小さい理由は以下の通りである。まず現状の陸面モデ ルでは、土壌水分量の初期値の変化がもたらす地上気温 予測値の変化の値が小さいことが挙げられる。国際モデ ル比較プロジェクトのテストケース GABLS3³で初期 値の土壌体積含水率の地上気温予測への応答を調査す ると、土壌体積含水率の初期値(=5%)の10%(=0.5%) を初期摂動として初期値に与え、局地解析内の予報モ デルの時間積分間隔と同じ3時間だけ時間積分を行っ た場合、気温の変化分は約-0.05 Kとなる。第一推定 値を用いた統計調査の結果によると、土壌水分量の標 準偏差は約3%であることから、土壌水分量同化がも たらす地上気温予測の平均誤差の変化量としては、図 3.2.4 で示したオーダーとなる。また厳しい品質管理条 件を設定しているため品質管理を通過し同化される観 測データが少ないことが挙げられる。輝度温度の観測 数が数千であるのに対して土壌水分量の観測数は200 程度である。さらに、局地解析は第一推定値としてメ ソモデルの予測値を利用しておりデータ同化の効果を 次の初期時刻に引き継がない。特に土壌水分量同化に よる改善は次の解析に引き継ぐことで予測に継続的な 改善をもたらすことが期待されるが、現在は初期値毎 にリセットされている。つまり、現状では衛星土壌水 分量が同化された初期時刻の予測にのみ効果がある。 なお、メソ解析でも土壌水分量同化の導入に向けて

開発を進めている。現在のメソ解析では土壌体積含水 率は気候値を初期値としているため、現実の陸面の情 報は反映されていない。メソ解析で土壌水分量の同化 が開始できれば、MSM の地上予測の精度向上が期待 できる。さらに MSM は局地解析の第一推定値として も利用されるため LFM の精度向上も期待される。

参考文献

- 幾田泰酵, 2014: asuca 変分法データ同化システム. 数 値予報課報告・別冊第 60 号, 気象庁予報部, 91–97.
- 幾田泰酵, 2015: 局地解析の更新と改良. 平成 27 度数 値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 2-8.
- 石橋俊之,2008: 変分法バイアス補正の性質.2008 年度 日本気象学会秋季大会公演予稿集,268,D101.
- 石橋俊之, 2011: 変分法バイアス補正. 数値予報課報告・ 別冊第 57 号, 気象庁予報部, 123-127.
- 岡本幸三, 2007: ATOVS 直接同化. 数值予報課報告· 別冊第 53 号, 気象庁予報部, 58-70.
- 佐藤芳昭, 2007: 変分法バイアス補正. 数値予報課報告・ 別冊第53号, 気象庁予報部, 171-175.
- Bartalis, Z., V. Naeimi, S. Hasenauer, and W. Wagner, 2008: SCAT Soil Moisture Product Handbook. ASCAT Soil Moisture Report Series, No. 15, Institute of Photogrammetry and Remote Sensing. Vienna University of Technology, Austria.
- Derber, J. C. and W.-S. Wu, 1998: The use of TOVS cloud-cleared radiances in the NCEP SSI analysis system. *Mon. Wea. Rev.*, **126**, 2287–2299.
- Dharssi, I., K. Bovis, B. Macpherson, and C. Jones, 2010: Assimilation of ASCAT surface soil wetness. Forecasting R and D Technical Report No. 548, Met Office, Exeter, UK.
- Ikuta, Y., 2017: Assimilation of Satellite Soil Moisture Contents and Clear-sky Radiance in Operational Local NWP System at JMA. JpGU-AGU Joint Meeting 2017.
- Koike, T., 2013: Description of the GCOM-W1 AMSR2 Soil Moisture Algorithm. Descriptions of GCOM-W1 AMSR2 Level 1R and Level 2 Algorithms.JAXA/EORC, 8–1–8–13.

³ http://www.knmi.nl/samenw/gabls/