

## 4.4 観測データの新規導入と利用方法の改良

### 4.4.1 はじめに

気象庁の数値予報システムでは、初期値解析において様々な観測データが同化されている。初期値精度の向上は、予測精度向上に重要であり、新規観測データの導入や、観測データの利用法の改良が継続的に進められている。本節では、新規観測データの導入や観測データの利用法の改良に関して、現在進められている主な開発の進捗を報告する。

第 4.4.2 項及び第 4.4.3 項では、メソ解析における地上設置型 GNSS の利用高度化、及び GNSS 遮蔽観測データの利用拡充について述べ、第 4.4.4 項では局地解析における衛星土壌水分量プロダクトの利用拡充について述べる。第 4.4.5 項から第 4.4.8 項では、衛星観測輝度温度データの利用高度化として、全球・メソ・局地解析における衛星搭載ハイパースペクトル赤外サウンダの陸上での利用拡充、全球解析における静止衛星全天放射輝度温度 (ASR) の新規利用、メソ解析及び局地解析における衛星搭載マイクロ波サウンダ ATMS の利用拡充、及びメソ解析における CO<sub>2</sub> バンド晴天放射輝度 (CSR) の新規利用についてそれぞれ述べる。第 4.4.9 項では、今後のひまわり 10 号搭載赤外サウンダの利用に向けた開発状況について述べる。

### 4.4.2 メソ解析における地上 GNSS データの利用高度化

#### (1) はじめに

気象庁では、メソ解析における地上 GNSS データの利用高度化に取り組んでいる。メソ解析では、2009 年 10 月から国土地理院が展開している地上 GNSS 可降水量データを同化利用しているが (石川 2010)、今回の開発では地上 GNSS データの持つ水蒸気情報をより適切に反映することを目指し、湿潤遅延量データの同化利用に向けた開発を行った。

#### (2) 湿潤遅延量の利用

地上 GNSS では、受信機と GNSS 衛星との距離を衛星から発した電波が届くまでの時間によって測定しているが、衛星から発射される電波の伝搬速度は真空と大気との密度差 (屈折率) に応じて遅延する。この遅延を距離として解析したものが大気遅延量であり、乾燥大気からの遅延量 (静水圧遅延量) と湿潤大気による遅延量 (湿潤遅延量) で構成される。静水圧遅延量は地上気圧と比例関係があるため、高精度で推定することができ、大気遅延量から静水圧遅延量を引くことで湿潤遅延量を得ることができる。

可降水量は湿潤遅延量と比例関係にあり、その比例係数は観測点上空の気温と水蒸気分圧の鉛直プロファイルを用いて計算される水蒸気分圧で重みづけられた気温の鉛直平均値 ( $T_m$ ) から決めることができる (大谷・内藤 1998)。可降水量同化では、 $T_m$  の計算に必要

な全観測点における実況の気温と水蒸気の鉛直プロファイルデータは得られないため、ラジオゾンデ観測に基づく気候値と地上気温の関係式から  $T_m$  を推定 (観測  $T_m$ ) している。今回開発する湿潤遅延量同化では、メソモデルの第一推定値を用いて観測演算子に内包された  $T_m$  計算を行うため、観測  $T_m$  に比べてモデルが表現する時間変動を直接反映することが可能となり、初期値の水蒸気場の精度向上が期待できる。 $T_m$  の精度を確認するため、図 4.4.1 に観測  $T_m$ 、鹿児島におけるラジオゾンデ観測から計算した  $T_m$ 、メソモデルから計算した  $T_m$  の時系列を示す。メソモデルから計算した  $T_m$  は、観測  $T_m$  に比べてラジオゾンデとの対応が良いことがわかる。この結果は全てのラジオゾンデ観測点で同様であり (図 4.4.2)、第一推定値を利用することにより水蒸気の情報現在よりも適切に取り出すことが可能となる。

品質管理 (石川 2010) については、これまで利用してきた可降水量から湿潤遅延量への物理量変換に伴う閾値の変更を行った。具体的には、気候値チェック、グロスエラーチェック及び空間整合性チェックの閾値について、現在設定している可降水量での閾値を湿潤遅延量に換算した。また、観測誤差については、モデルの湿潤バイアス等を考慮し、可降水量換算にて従来に比べて増加させる 50 mm (可降水量で約 8 mm 相当) とした。

#### (3) 性能評価試験

湿潤遅延量を同化利用することによる影響を確認するため、性能評価試験を実施した。実験は、2025 年 3 月末時点の現業メソ数値予報システムと同等の実験をコントロール (CNTL)、CNTL から地上 GNSS の同化要素を湿潤遅延量に変更した実験 (TEST) を行い、CNTL と TEST の結果を比較した。2023 年 6 月 26 日から 8 月 27 日までを夏実験、2023 年 12 月 10 日～2024 年 2 月 4 日までを冬実験の試験期間とする。

第一推定値の精度に関して、他の観測データとの整合性の確認として、CNTL 実験からの観測値と第一推定値の差 (O-B) の標準偏差の変化を確認した (図 4.4.3)。湿潤遅延量を同化利用することにより、特に夏実験において第一推定値の地上比湿や地上気圧の標準偏差が CNTL より小さくなっていることがわかる。これは第一推定値の水蒸気場や気圧場が改善したことを示す結果である。ラジオゾンデや衛星観測については、概ね中立の結果であることを確認した (図略)。

可降水量における平均解析場の変化について、メソ領域全体としては水蒸気量が夏・冬ともに少し増加する結果となった (図略)。夏実験では東北から北海道で特に可降水量が増加、沖縄から九州にかけては減少する変化が見られた。この変化は、同化する要素を湿潤遅延量に変更したことに加え、湿潤遅延量の観測誤差の変更により、衛星観測を含めた水蒸気観測データの

## ■ Tm時系列@鹿児島

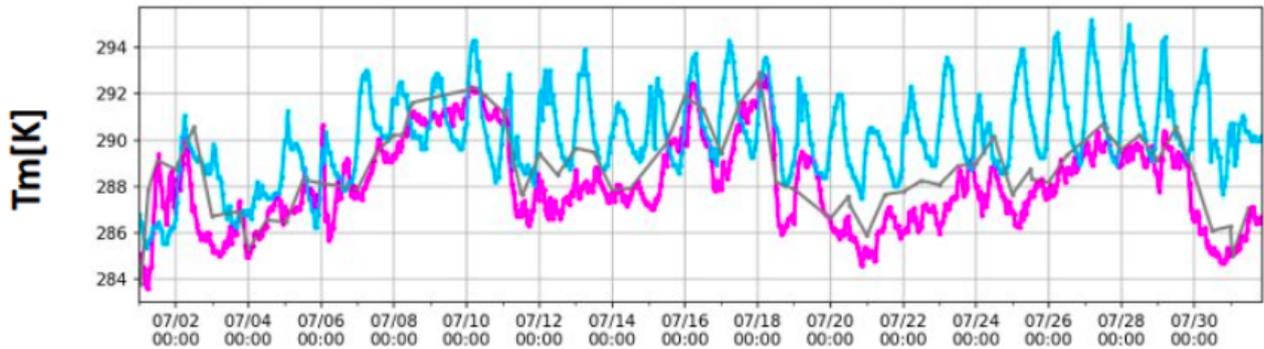


図 4.4.1 2023年7月1日～31日までの鹿児島における Tm の時系列。青線は現在利用しているラジオゾンデ気候値と地上気温から推定した結果、赤線がメソモデルから算出した Tm、黒線が鹿児島のラジオゾンデ観測から算出した Tm である。

## ■ 対ゾンデ Tm 標準偏差

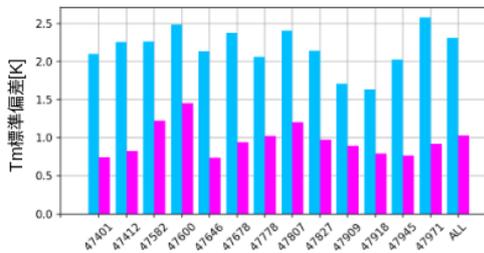


図 4.4.2 ラジオゾンデ観測点毎の Tm 標準偏差。青は現ルーチンで可降水量への変換で利用している Tm とラジオゾンデから算出した Tm の差の標準偏差、赤はメソモデルから計算した Tm とラジオゾンデから算出した Tm の差の標準偏差。観測地点は、左から、稚内 (47401)、札幌 (47412)、秋田 (47582)、輪島 (47600)、館野 (47646)、八丈島 (47678)、潮岬 (47778)、福岡 (47807)、鹿児島 (47827)、名瀬 (47909)、石垣島 (47918)、南大東島 (47945)、父島 (47971)、全ラジオゾンデ観測地点 (ALL)。統計期間は、2023年6月1日～8月15日。

## (a) 夏実験 (b) 冬実験

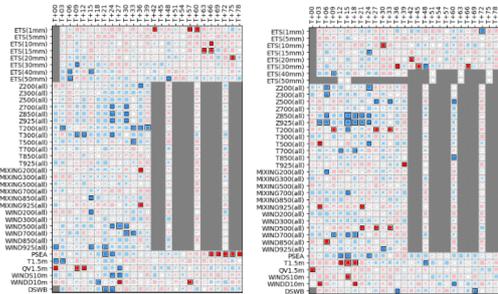


図 4.4.4 メソ数値予報システムにおける主要要素の対 CNTL 統計検証結果。降水量は解析雨量、高度場、気温、混合比、風速はラジオゾンデ、地上要素は SYNOP とアメダス観測を参照値としている。各行は統計検証要素、各列は予測時間に対応する。青が CNTL と比べて改善、赤が CNTL と比べて悪化、色付きの領域が各セルの内側の正方形以上の場合は統計的に有意であることを示しており、降水量については ETS 変化の有意性、降水量以外は RMSE 変化の有意性である。(a) は夏実験、(b) は冬実験の結果を示す。

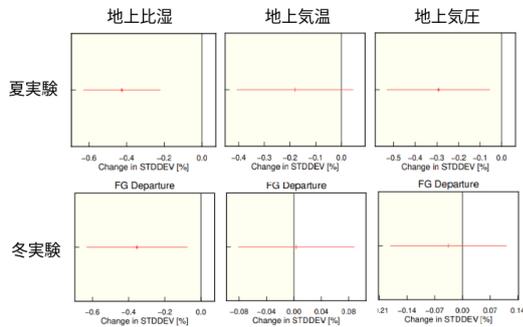


図 4.4.3 メソ解析における観測値と第一推定値の差 (O-B) の標準偏差の、TEST の CNTL に対する変化率 [%]。上段が夏実験、下段が冬実験であり、左は地上比湿、中が地上気温、右が地上気圧の結果。第一推定値が観測値により整合 (改善) している場合、0 線より左側にプロットされる。図のエラーバーは 95%信頼区間、丸い点は変化の正負が統計的に有意であることを示す。

寄与が変化した結果と考えている。

予報スコア (図 4.4.4) の変化を確認したところ、夏・冬実験ともに統計的には中立の結果となった。地上比湿の予報精度については、夏・冬実験ともに予報初期においてバイアスが改善する傾向であった (図略)。

解析雨量を用いた降水検証では、2~3 mm/3h の降水で僅かに悪化する結果があったものの、降水予測が改善する事例も見られた。図 4.4.5 は、2023年7月10日に福岡県、佐賀県及び大分県で発生した線状降水帯の事例について、2023年7月9日 18UTC の3時間前からの予測結果である。この事例では、湿潤遅延量を同化すること及び解析予報サイクルによる影響で長崎県から福岡県にかけて可降水量が増加した結果、実況で見られる九州北部の強雨域の表現が TEST で改善した。

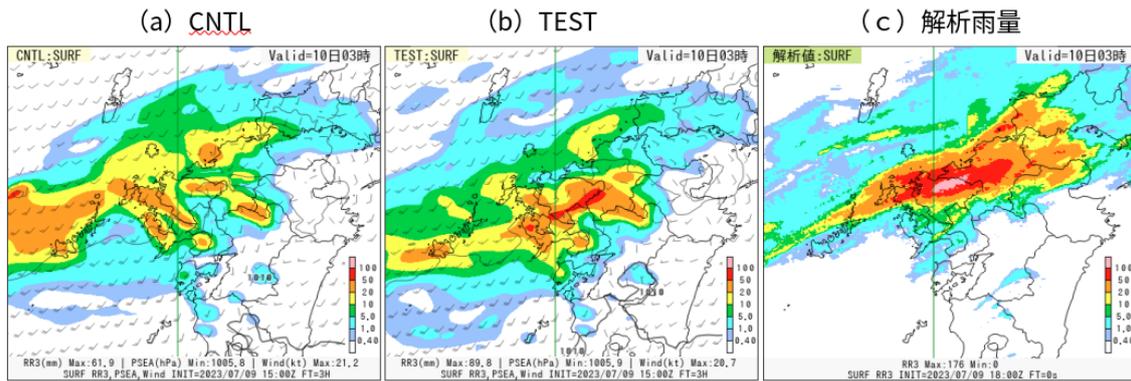


図 4.4.5 2023 年 7 月 9 日 18UTC における前 3 時間降水量 [mm/3h] の分布。(a) は可降水量を同化したメソ予報値、(b) は湿潤遅延量を同化利用したメソ予報値、(c) は解析雨量を示す。予報値は 2023 年 7 月 9 日 15UTC 初期値の 3 時間予測。

#### (4) まとめ

線状降水帯予測精度向上を目指し、メソ解析での地上 GNSS データの高度利用に向けた開発を行った。今回の開発では、同化要素を可降水量から湿潤遅延量に変更するとともに、モデルの湿潤バイアスを考慮して観測誤差を変更した。その結果、解析場としては夏実験と冬実験ともに地上比湿が改善することを確認した。予報について、統計的には中立であったが、降水予測が改善する事例があることを確認した。

#### 4.4.3 メソ解析における GNSS 掩蔽観測データの利用拡充

##### (1) はじめに

GNSS 掩蔽法は、高度約 2 万 km を飛行する測位衛星から発信される電波を低軌道衛星で連続的に受信し、大気による電波の遅延量から気温や水蒸気プロファイルを高解像度に導出する手法である (Kursinski et al. 1997)。この手法では、電波時計に基づいて精緻に計測された電波の遅延量から大気による屈折角を算出し、屈折角が屈折率の鉛直勾配の積分量であることを利用して屈折率を導出する。GNSS 掩蔽観測は高精度な観測であり、数値予報において予報モデルのバイアスを補正するための基準値としての役割を担う重要なデータの一つである。屈折角は屈折率より実観測に近く変換誤差が小さい一方で、数値予報での利用には観測点より上空の大気の情報も入力として必要となる。このため、モデルトップが高い全球解析では屈折角を、モデルトップが低いメソ解析では屈折率を利用している (大和田 2017)。全球・メソ解析ともに、GNSS 掩蔽観測は主に成層圏の気温場を中心に改善するものの、データ数が増加すると対流圏の気温・高度バイアスが拡大することが長年の課題であった。第 3.6 節で述べたように、全球解析では 2025 年 10 月に屈折角の観測誤差プロファイルの改良により、対流圏の気温・高度バイアスを改良しつつ、観測データの利用拡充を図った。メソ解析での屈折率データの利用拡充に向けては、全球

解析での知見を活かし、観測誤差プロファイルや品質管理手法の改良を進めている。本項ではその開発状況について述べる。

##### (2) Metop の GNSS 掩蔽データの品質管理手法の変更

Metop 衛星は、EUMETSAT が運用する現業の極軌道気象衛星であり、GNSS 受信機を含む多様なセンサを搭載している。現在は Metop-B および Metop-C の 2 機が運用されており、メソ解析では Metop-B の屈折率データが利用されている。Metop の GNSS 掩蔽観測データには、処理状況に応じた 16 項目の品質情報が付加されており、数値予報への同化に際して品質管理に参照されている。従来は屈折角の品質情報が「異常」と判定されたデータのみを棄却していたが、調査の結果、推定された大気プロファイル全体の品質情報が「異常」とされる場合には観測精度が劣ることが確認された。これを踏まえ、変更後はプロファイル全体の品質情報が「異常」と判定された場合も棄却することにした。図 4.4.6 に、品質情報参照方法の変更前後における観測値と第一推定値 (O-B) の標準偏差を示す。変更前 (青線) に高度 10 km から 20 km にかけて見られた標準偏差の増加は変更後 (赤線) では解消されている。

##### (3) 観測誤差設定の変更

屈折率は大気密度の情報をもつので、これを同化すると静水圧平衡の関係を通して観測点より下層の大気プロファイルも変化する。このため、GNSS 掩蔽観測データの利用拡充には鉛直方向の観測誤差を適切に設定することが重要である。図 4.4.7 に変更前後の屈折率の観測誤差の鉛直プロファイル及び観測値と第一推定値の差 (O-B) の標準偏差を示す。変更前 (青) は、高度 10 km 付近や高度 5 km 以下で O-B の標準偏差が観測誤差より大きく、観測誤差が相対的に過少であることが示唆された。変更後 (赤) は、これら的高度で観測誤差を大きくするとともに、高度 20 km 以上で観測誤差が鉛直上向きに単調に増加するようにした。

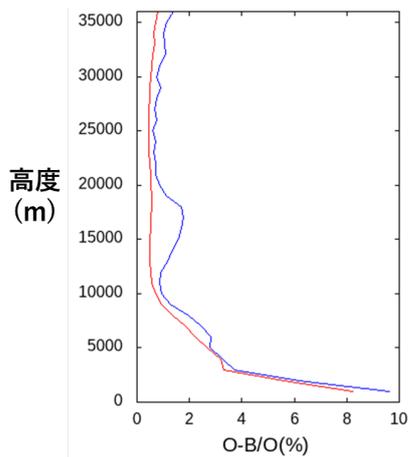


図 4.4.6 変更前（青線）及び変更後（赤線）の観測値と第一推定値との差 (O-B) の標準偏差について、観測値で規格化した鉛直高度分布 [m]。

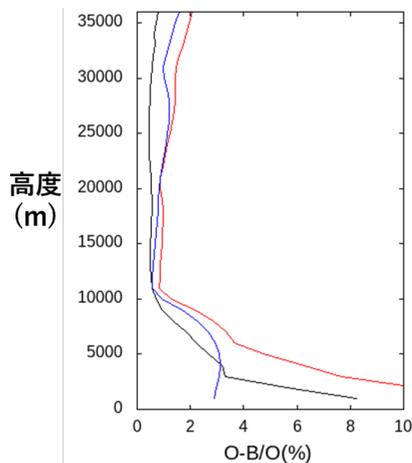


図 4.4.7 O-B の標準偏差（黒線）、変更前（青線）及び変更後（赤線）の観測誤差について、観測値で規格化した鉛直高度分布 [m]。

#### (4) 解析・予測へのインパクト

2024 年 8 月時点の現業メソ数値予報システム相当の実験 (CNTL) に対し、利用データに Metop-C を追加した上で (2), (3) で示した利用手法の変更を適用した実験 (TEST) の検証結果を示す。検証期間は夏季が 2023 年 6 月 28 日から 8 月 15 日、冬季が 2024 年 1 月 18 日から 2 月 23 日である。解析値について対ラジオゾンデの高度との平均誤差を見ると、夏季・冬季ともに CNTL と比較して TEST において対流圏中上層において低高度バイアスが減少しており、高度場が改善傾向であることを示している (図 4.4.8)。解析値の基となる第一推定値 (一初期時刻前の予測値) と既存の観測値との整合性の変化については、対ラジオゾンデ検証を含め、概ね中立であった (図略)。予測精度については、ラジオゾンデや解析雨量、地上観測を参照値として検証した結果、概ね中立であった (図略)。

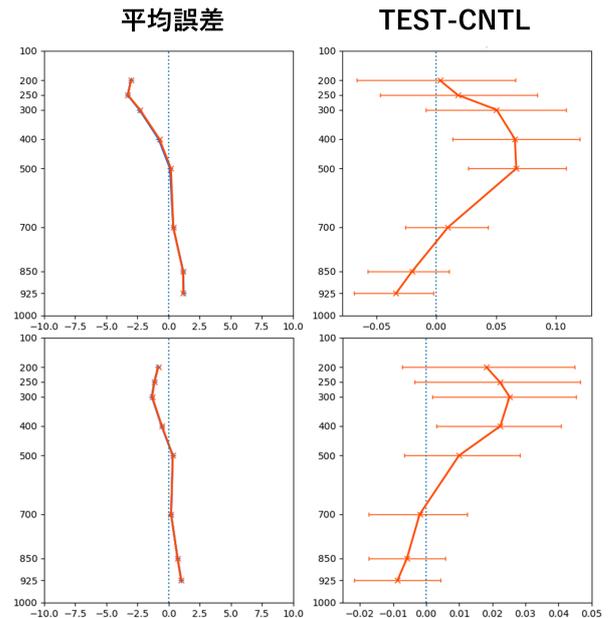


図 4.4.8 解析値の気温の対ラジオゾンデ検証結果。夏季（上段）、冬季（下段）。気温の対ゾンデ平均誤差の鉛直プロファイル（左図）、気温の対ゾンデ平均誤差の TEST と CNTL の差の鉛直プロファイル（右図）。横軸の単位はすべて K。左図で青線が CNTL、赤線が TEST を表す。

#### (5) まとめと今後

メソ解析での GNSS 掩蔽観測データの利用拡充に向けて、品質情報の参照方法や観測誤差プロファイルを変更するとともに Metop-C 屈折率データを追加した実験を行った。従来の屈折角の品質情報に加え、推定された大気プロファイルの品質情報を参照することで品質が向上し、そのデータを適切に設定した観測誤差で同化したところ、対流圏中上層の高度場のバイアスが改善する傾向であることを確認した。GNSS 掩蔽観測は数値予報において予報モデルのバイアスを補正するための基準値として用いられており、数値予報モデルのバイアス特性に影響を与えるので、観測・モデルの特性を踏まえた観測誤差の更なる改良は引き続き重要な課題である。また、相対的に品質が低い対流圏中下層データの利用手法の高度化も必要である。

#### 4.4.4 局地解析における Metop-C 土壌水分量プロダクトの新規利用

##### (1) はじめに

衛星観測土壌水分量プロダクトは、衛星による輝度温度観測データから地表面付近の土壌水分量をリトリブしたプロダクトであり、このリトリブされた土壌水分量を同化利用することにより土壌水分量の初期値の精度が向上し、地表面からの潜熱フラックスを通じて地上気温予測精度向上への効果が期待される。局地解析では、水循環変動観測衛星「しずく」(GCOM-W) に搭載されているマイクロ波放射計 AMSR2 及び

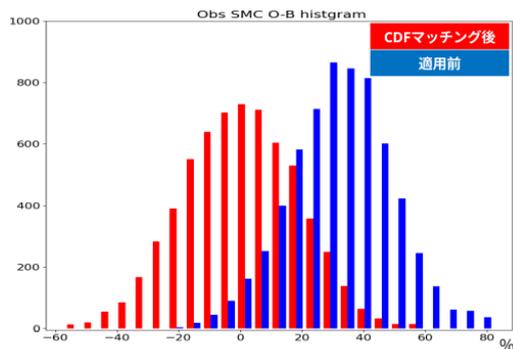


図 4.4.9 Metop-C の CDF マッチング適用前後の観測値と第一推定値の差 (O-B) のヒストグラム。赤線は CDF マッチング適用後の O-B、青線は CDF マッチング適用前の O-B を示す。期間は 2025 年 6 月 1 日～6 月 30 日。

Metop-B 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を 2017 年から現業利用している (幾田 2017)。本項では、衛星観測土壌水分量プロダクトの利用拡充を目的とし、Metop-C 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の利用に向けた開発について述べる。また、Metop-B 及び C については、高解像度化された新しいプロダクトへの切替が行われていることから、高解像度化されたデータの利用に向けた開発についても紹介する。

## (2) 観測データ利用法

局地解析では、衛星土壌水分量プロダクトを利用するための観測演算子として累積分布関数 (Cumulative Distribution Function: CDF) マッチング (Drusch and Gao 2005; Scipal and Wagner 2008) と呼ばれる手法を利用している。ここでの CDF マッチングとは、観測と第一推定値の平均と分散が合うように補正する手法である。土壌水分量プロダクトは対象としている土壌の深さや土壌水分量を表す指標が衛星毎に異なるため、衛星毎に CDF マッチングのパラメータを作成する必要がある (幾田 2017)。今回新規に利用を開始する Metop-C 土壌水分量プロダクトについては、2025 年 2 月～5 月の約 3 か月分のデータからパラメータを作成した。これに合わせて、現在利用している Metop-B 及び GCOM-W/AMSR2 についてもパラメータ更新を実施した。

新規利用する Metop-C について、CDF マッチング適用前後の観測値と第一推定値の差 (O-B) のヒストグラムを図 4.4.9 に示す。CDF マッチングを適用 (図 4.4.9 の赤) することにより、適用前に比べて O-B バias が補正されていることが分かる。なお、Metop-C の新規利用にあたり、観測誤差及び間引き間隔は観測データの特性が同じ Metop-B と同じ設定 (観測誤差を 20%、間引き間隔を 25 km) とした。

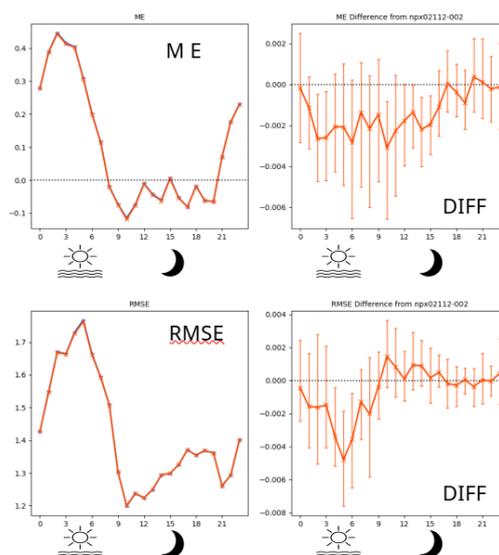


図 4.4.10 夏実験を対象にした予報対象時刻毎 (UTC) の対アメダス気温検証結果。横軸は予報対象時刻 (UTC)。左上が平均誤差 (ME)、右上が平均誤差の差 (TEST-CNTL)、左下が二乗平均平方根誤差 (RMSE)、右下が RMSE の差 (TEST-CNTL) であり、エラーバーは 95% 信頼区間を表す。縦軸の単位はすべて K。左図における赤線は TEST、青線が CNTL の結果を表す。

## (3) 局地数値予報システムへの影響

Metop-C 土壌水分量プロダクトを利用することによる効果とパラメータ更新の効果を確認するため、2025 年 6 月時点の現業局地予報システム相当の実験を CNTL、CNTL に Metop-C 土壌水分量プロダクト新規利用及び既存の土壌水分量プロダクトの CDF マッチングパラメータを更新した実験を TEST として性能評価試験を実施した。2024 年 7 月 1 日から 7 月 14 日までを夏実験、2024 年 1 月 30 日～2 月 14 日までを冬実験の試験期間とする。

統計的な降水予測スコアやラジオゾンデ検証では、夏と冬の両方とも TEST と CNTL に明瞭な差は無く中立の結果となった (図略)。地上気温予測に与える影響を確認するため、図 4.4.10 に夏実験における予報対象時刻毎の対アメダス気温の検証結果を示す。この結果から、地上気温が高い日中において、CNTL よりも TEST の方が僅かに RMSE が減少しており、改善傾向にあることが分かる。

## (4) 土壌水分量プロダクトの高解像度化

Metop-B 及び C 土壌水分量プロダクト (低解像度) は 2025 年 7 月に配信停止となり、今後は高解像度化された新プロダクト (高解像度) が配信される<sup>1</sup>。そのため、高解像度プロダクトの利用に向け、低解像度データとの違いについて調査を行った。

図 4.4.11 は、2025 年 6 月 19 日 02UTC における土

<sup>1</sup> <https://user.eumetsat.int/news-events/news/changes-to-ascats-soil-moisture-products>

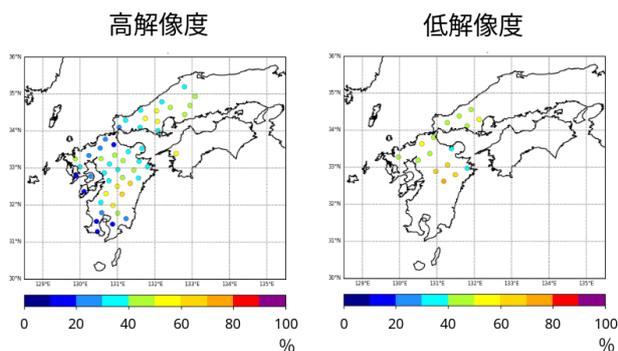


図 4.4.11 2025 年 6 月 19 日 02UTC における土壌水分量プロダクトの観測点分布。左図が高解像度データ、右図が低解像度データであり、観測点の色は土壌水分量の値 [%] である。

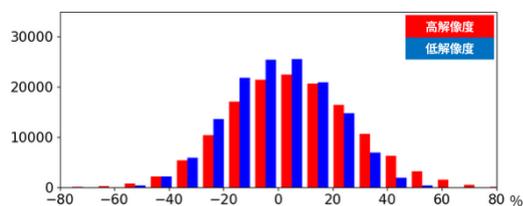


図 4.4.12 Metop-C の O-B ヒストグラム。赤は新しく配信される高解像度プロダクト、青は従来プロダクトであり、期間は 2025 年 5 月 1 日～6 月 30 日。

土壌水分量プロダクトのカバレッジを比較したものである。高解像度データの方がデータ数が多く、低解像度データに比べて広範囲のデータを利用することができる。また、低解像度データと高解像度データの特徴を比較するため、図 4.4.12 に Metop-C の低解像度データとその半径 12.5 km 内にある高解像度データのみ抽出した CDF マッチング適用後の O-B ヒストグラムを示す。プロダクトを直接比較した場合には、高解像度プロダクトに負バイアスが見られる (図略)。しかし、高解像度データについても CDF マッチングパラメータを作成・適用することにより、類似したデータ特性になることを確認した。さらに、(3) で述べた TEST の土壌水分量プロダクトを高解像度データに変更してインパクト実験 (TEST-H) を実施した結果、TEST-H は TEST と同様な結果であることを確認した (図略)。

#### (5) まとめと今後

現在局地解析で利用している土壌水分量プロダクトについて、新たに Metop-C の新規利用と CDF マッチングパラメータを更新した性能評価試験を実施し、地上気温の予測が改善傾向であること確認した。また、Metop-B 及び C については、高解像度プロダクトへの移行調査として、これまで利用していたプロダクトとの特性比較を実施した。結果、CDF マッチングを適用することにより低解像度と高解像度プロダクトの特性

の違いは小さく、高解像度プロダクトのデータ数が増加することが分かった。

今後の課題として、現在利用している GCOM-W/AMSR2 の土壌水分量プロダクトは、GOSAT-GW/AMSR3 に移行される予定であり、データ特性を把握しながら現業化に向けた開発を進める必要がある。

### 4.4.5 極軌道衛星搭載ハイパースペクトル赤外サウンダの陸上での利用

#### (1) 概要

ハイパースペクトル赤外サウンダ (以下「赤外サウンダ」) は、赤外の波長帯において高い波長分解能で多数のチャンネルを有しており、これらの観測データから気温や水蒸気量の鉛直分布に関する情報を得ることのできるセンサである。現在の赤外サウンダの利用手法においては、陸上 (本項では海水上も含むこととする) での雲頂高度推定が行えないため、陸上では対流圏界面より下層に感度の低いチャンネルのみを利用している (岡垣 2015)。赤外サウンダの水蒸気チャンネルの全天同化について調査した Okamoto et al. (2024) は、全球数値予報システムを用いて、陸上の対流圏界面より下層に感度のある水蒸気チャンネルを透過率が小さい場合において同化することにより、水蒸気場の予測精度が改善したことを示した。このため、メソ・局地数値予報システムにおいても、対流圏界面より下層に感度のあるチャンネル (以下「対流圏チャンネル」) を陸上で利用することで、数値予報の予測精度が改善すると考えられる。本項では、赤外サウンダの陸上での対流圏チャンネルのデータ同化に向けて行った品質管理の変更点や、メソ・局地数値予報システムにおける予測精度への影響を調査した結果について述べる。

#### (2) 変更点について

赤外サウンダの対流圏チャンネルを陸上において同化利用するためには、雲頂高度推定を行い、雲頂よりも上層に感度のあるチャンネルのみを利用するように品質管理を変更する必要がある。現在利用している CO2 スライシング手法 (Eyre and Menzel 1989) は透過率の高いチャンネルの計算輝度温度を利用しているが、陸上では海上と同等の精度の地表面温度や射出率が得られないため、妥当な雲頂高度が求められていない。そこで雲頂高度推定手法をこれまでの CO2 スライシング手法から McNally and Watts (2003) の手法へと変更した。この手法は、晴天を仮定した場合の観測値と第一推定値の差 (O-B) が、雲の影響を受けると負に大きくなることを利用しており、複数チャンネルの O-B を感度高度順に下層から上層にかけて参照し、O-B の値やその高度方向の傾きを利用して雲頂高度を推定する。そのため、地表面の影響を受けるような特定のチャンネルの計算輝度温度のみに依存しない手法となっている。品質管理後の O-B の統計や静止衛星赤外画像との比較から、陸上において本手法による雲頂高度推定

の結果がある程度妥当であることを確認している。海陸で統一的に処理するため、雲頂高度推定手法を海上も含めて変更した。それにより、海上においてはこれまで過剰に取り除かれていたと思われる観測が利用されるようになり、同化利用数は増加する傾向がみられた。また、CO2 スライシングでは取り除けていなかった O-B が負で雲の混入が疑われるようなデータが取り除かれるようになり、品質管理後データの O-B の標準偏差が小さくなることを確認している。雲頂高度推定手法の変更のみによる予測精度への影響は概ね中立であった。

全球数値予報システムを用いた予備実験において、気温に感度のある対流圏チャンネルを陸上で利用すると、南半球において AMSU-A や ATMS で O-B の標準偏差が増加する結果が得られた。この結果は第一推定値の気温場の精度悪化を示す結果であるが、透過率が十分小さいデータのみを利用した場合にも生じたため、今回は気温に感度のある対流圏チャンネルは陸上で利用しないようにし、水蒸気チャンネルのみについて、透過率が 0.1 未満の場合に利用することにした。また McNally and Watts の手法では O-B を計算するチャンネル数が多い方が適切な雲頂高度を推定できることから、CrIS で品質管理用に計算するチャンネル数を増加させた。これに伴い、CrIS のスキャンバイアス補正値を既存チャンネルも含めて更新した。新しいスキャンバイアス補正値は、データ間引き距離を小さくして 1ヶ月程度の O-B を計算し、晴天域のみの集計結果から求めた。なお、スキャンバイアス補正値の更新による予測精度への影響は軽微であることを別途確認している。

### (3) メソ数値予報システムにおける影響評価

メソ数値予報システムにおける上記変更の影響評価を行った。2025 年 8 月時点の数値予報システム相当を CNTL とし、上記変更を加えたものを TEST とする実験を実施した。実験は夏実験として 2023 年 6 月 21 日から 8 月 23 日、冬実験として 2023 年 12 月 5 日から 2024 年 1 月 7 日の期間で実施した。図 4.4.13 は 2023 年 6 月 30 日 06UTC の初期値解析において利用された赤外サウンダデータの分布を示す。海上においては TEST と CNTL で大きなデータ利用分布の違いは無いが、TEST では陸上でのデータ利用数が増加していることが分かる。実験期間で統計すると TEST の赤外サウンダの利用データ数は CNTL と比べて 47% 増加した。

水蒸気に感度のある衛星観測である MHS, ATMS, CSR において O-B の標準偏差が CNTL よりも減少していることが確認できた (図 4.4.14)。これは第一推定値の水蒸気場の改善を示す結果である。また CSR の ch4 の O-B の標準偏差は、主に陸上で減少していることが夏・冬実験ともに確認された (図 4.4.15)。

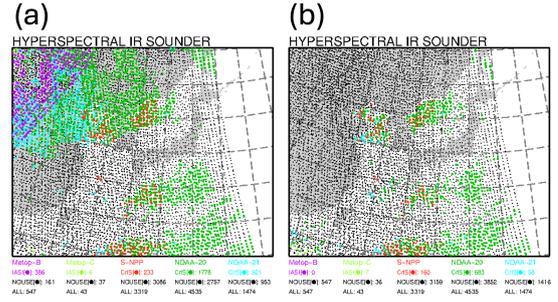


図 4.4.13 2023 年 6 月 30 日 06UTC の解析に入力された赤外サウンダデータの分布。着色点は同化利用したことを、黒点は同化利用していないことを示す。(a) は TEST、(b) は CNTL の結果。

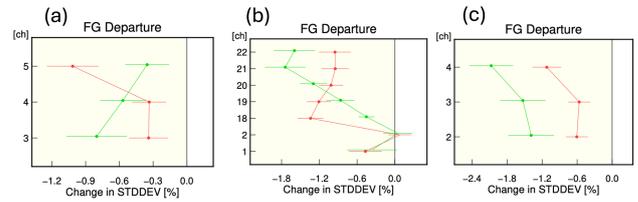


図 4.4.14 メソ解析における観測値と第一推定値の差 (O-B) の標準偏差の、TEST の CNTL に対する変化率 [%]。赤線は夏期間、緑線は冬期間を示す。(a), (b) はマイクロ波サウンダ MHS, ATMS、(c) は晴天放射輝度 CSR について示す。縦軸はチャンネル番号を示す。図の見方は図 4.4.3 と同じ。

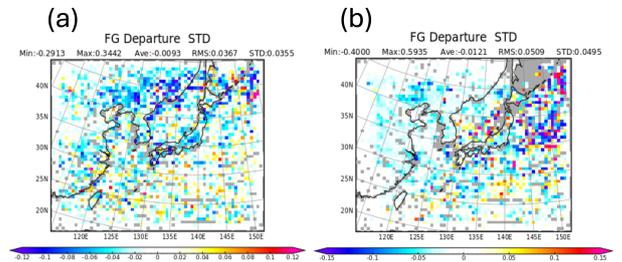


図 4.4.15 O-B の標準偏差の TEST と CNTL の差 [K]。晴天放射輝度 CSR の ch4 の結果について示す。(a) は夏実験、(b) は冬実験の結果を示す。

予測精度の変化を確認したところ、ラジオゾンデを用いた検証で、夏実験において 850 hPa から 500 hPa の水蒸気混合比が初期値から 6 時間予測にかけて改善していることが確認された (図 4.4.16)。改善した領域は概ね衛星観測での検証で改善が確認された領域と類似していた。冬実験やその他の要素 (気温・高度・風・降水など) では概ね中立であった。

### (4) 局地数値予報システムにおける影響評価

局地数値予報システムにおける上記変更の影響評価を行った。2025 年 3 月時点の数値予報システム相当を CNTL とし、上記変更を加えたものを TEST とする実

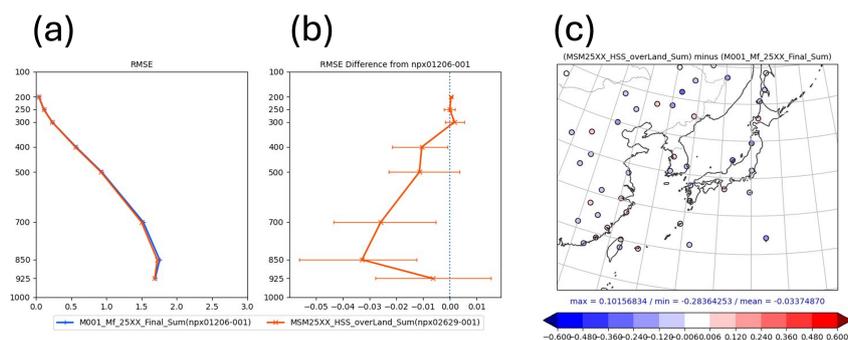


図 4.4.16 夏実験における水蒸気混合比 [g/kg] の 6 時間予測値のラジオゾンデを用いた検証結果。(a) 赤線は TEST、青線は CNTL についての RMSE の鉛直分布を示す。(b) RMSE の TEST と CNTL の差。(c) 850 hPa 面における RMSE の TEST と CNTL の差。

験を実施した。実験は夏実験として 2023 年 6 月 28 日から 7 月 12 日、冬実験として 2024 年 1 月 30 日から 2 月 14 日の期間で実施した。メソ数値予報システムでの評価と同様に、水蒸気に感度のある衛星観測である MHS, ATMS, CSR で O-B の標準偏差が CNTL よりも減少していることが確認できた。また標準偏差が減少した領域は陸上を中心であることも確認した (図略)。

予測精度の変化は小さく、概ね中立であった。メソ数値予報システムでの評価と比べて水蒸気場で改善が得られなかったのは、局地解析ではデータ同化サイクルが繋がっていないことから、観測時刻の限定されるラジオゾンデでの検証において不利であったことが原因として考えられる。

#### (5) まとめと今後

赤外サウンダの水蒸気に感度のある対流圏チャンネルを陸上において同化利用するための品質管理の変更を行い、メソ・局地数値予報システムにおける影響評価を行った。

メソ・局地数値予報システムともに陸上において水蒸気に感度のある衛星観測の O-B の標準偏差が減少したことやラジオゾンデの検証結果から、陸上の水蒸気場の予測精度に改善がみられた。降水予測やその他の要素に関しては概ね中立であった。

今後、全球解析においても同様の導入を目指すほか、気温に感度のある対流圏チャンネルの利用や、より地表面に感度のあるチャンネルの利用 (透過率の制限の撤廃) に向けた開発を行う予定である。

### 4.4.6 静止衛星全天放射輝度温度 (ASR) の利用

#### (1) 概要

静止気象衛星に搭載された赤外イメージャによる観測は、熱帯から中緯度で定常的に利用でき、全球解析では、ひまわりを始め、米国の GOES、欧州の Meteosat による水蒸気バンド及び CO<sub>2</sub> バンドの晴天放射輝度温度 (CSR: Clear Sky Radiance) を同化利用している。CSR は主に対流圏の水蒸気に感度を持ち、解析精

度の向上に寄与している。CSR は領域内の晴天域の輝度温度を平均したプロダクトで、同様に雲域を含めて輝度温度を平均した全天放射輝度温度 (ASR: All-Sky Radiance) も作成されている。CSR に代えて ASR を同化利用することで、雲域まで含めてより空間的に均質な精度向上が期待される。本項では、全球解析における ASR の同化利用に向けた開発の進捗について述べる。

#### (2) ASR の同化利用における課題

マイクロ波の衛星観測については各国の数値予報センターで全天同化が導入されている (Geer et al. 2019)。気象庁では、2019 年 12 月以降、全球解析においてマイクロ波イメージャやマイクロ波水蒸気サウンダの全天同化を順次導入してきた (気象庁 2021)。一方で赤外観測の全天同化においては、雲に対する強い非線形応答に起因して、観測値と第一推定値の差 (O-B) 分布の非ガウス性や強いチャンネル間誤差相関が存在するため、マイクロ波観測と比べてもより高度な品質管理や同化手法が必要となる。気象研究所においては、ASR を始めとして赤外観測の全天同化手法の開発が進められて

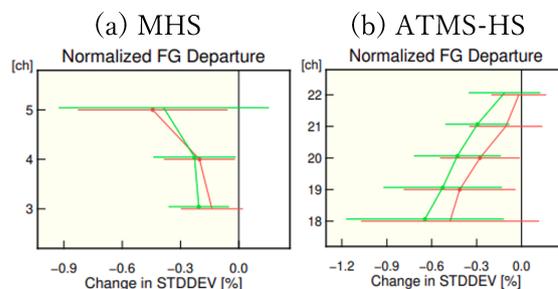


図 4.4.17 全球解析における観測値と第一推定値の差 (O-B) の標準偏差の、TEST の CNTL に対する変化率 [%]。赤線は夏期間、緑線は冬期間を示す。(a) マイクロ波水蒸気サウンダ MHS、(b) マイクロ波サウンダ ATMS (水蒸気チャンネル)。図の見方は図 4.4.3 と同じ。

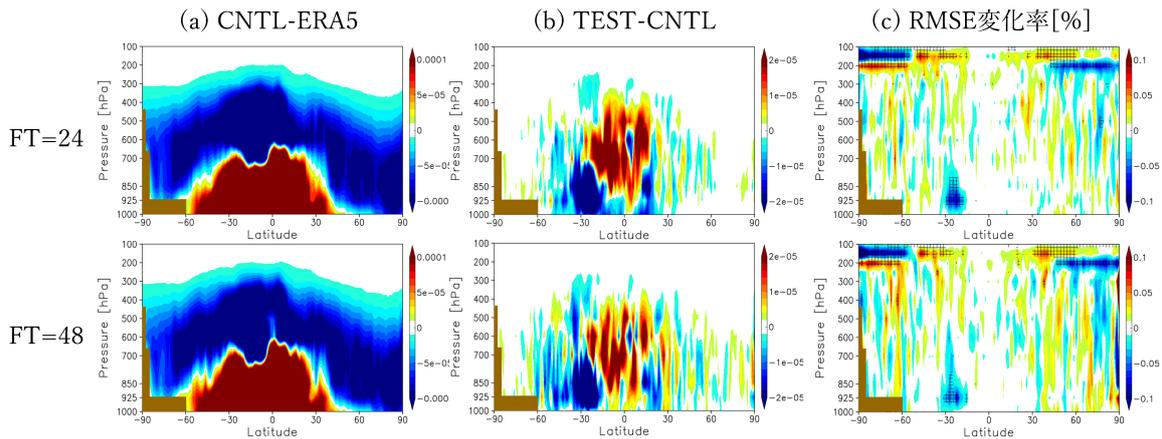


図 4.4.18 全球解析における、24 時間後（上段）、48 時間後（下段）の比湿予測値の検証結果。冬期間の結果を示す。(a) CNTL の ERA5 に対する差分の平均値 [kg/kg]、(b) TEST の CNTL に対する差分の平均値 [kg/kg]、(c) ERA5 に対する TEST の CNTL からの RMSE の変化率 [%]。RMSE の変化率は、寒色系は改善を、暖色系は悪化を示す。

おり (Okamoto et al. 2023)、数値予報開発センターでは、その成果を現業数値予報システムへ組み込むための開発と検証を進めている。以降では、ひまわりの水蒸気バンドの ASR 同化利用における品質管理手法の変更点や ASR を同化した性能評価試験の結果について記す。

### (3) 品質管理手法

全天同化における O-B は観測と第一推定値の雲の位置ずれによる外れ値を多く含み、その分布はガウス分布とならない。ガウス分布に近い O-B 分布を得るため、雲の影響度合いを評価した雲効果パラメータ ( $C_A$ ) を用いた QC を導入し、第一推定値との乖離が大きい観測を除去するとともに、 $C_A$  に応じて観測誤差が変動するように設定する。また変分法バイアス補正 (VarBC: Variational Bias Correction) の説明変数に  $C_A$  を追加し、雲由来のバイアスを除去する。従来は観測誤差相関を陽に扱う代わりに、水平間引きや観測誤差を大きくする措置 (観測誤差膨張) を行ってきた。しかし、赤外観測の全天同化では雲や降水の影響で強いチャンネル間誤差相関が存在するため、観測誤差膨張による同化では性能を十分に引き出すことが困難である。そのため、チャンネル間誤差相関を陽に扱い、 $C_A$  を用いて層別化した誤差モデル (3×3 行列) により観測誤差を与える。

### (4) 性能評価試験

2024 年 3 月時点の現業数値予報システム相当の実験 (CNTL) に対して、静止気象衛星ひまわりに搭載された可視赤外放射計 (AHI: Advanced Himawari Imager) の水蒸気バンドについて、CSR に代わって ASR を同化利用する実験 (TEST) で影響評価 (性能評価試験) を行った。実験の評価期間は、夏実験については 2023 年 8 月、冬実験については 2024 年 1 月とした。第一推定値の精度に関して、他の観測データとの整合性を

確認するため、CNTL 実験からの O-B の標準偏差の変化を確認したところ、水蒸気に感度のある MHS や ATMS (水蒸気チャンネル) で整合性の向上が見られた (図 4.4.17)。これは、第一推定値として用いられる短時間予測における水蒸気場の予測精度が向上したことを示唆する。

また ECMWF の再解析データである ERA5 を比較対象とした検証などを通じて、対流圏中下層水蒸気場の改善が見られた (図 4.4.18)。これは、CSR から ASR へ利用データを変更したことによって、湿潤な対流圏中上層水蒸気場の情報がより多く取り込まれるようになり、モデルが持つ低中緯度帯における対流圏中上層の乾燥バイアス及び対流圏下層の湿潤バイアスが軽減したことに起因すると考えられる。

### (5) まとめと今後

赤外イメージャ観測の CSR から ASR への利用高度化に向けて調査を行っている。AHI の水蒸気バンドについて CSR に代えて ASR を同化利用することで、対流圏中下層における水蒸気場の予測精度が向上することを確認した。2026 年は GOES 及び Meteosat を含めた静止気象衛星観測において ASR への利用高度化を目指している。また、ハイパースペクトル赤外サウンダの水蒸気チャンネルへの全天同化手法の適用に関する研究も進んでおり、さらなる観測の利用拡充と予測精度向上を目指している。

## 4.4.7 衛星搭載マイクロ波サウンダ ATMS の利用チャンネル拡充

### (1) 概要

米国の極軌道衛星 Suomi-NPP, NOAA-20, NOAA-21 に搭載されているマイクロ波サウンダ ATMS は、主に大気的气温や水蒸気の鉛直分布に関する情報を観測するセンサーで、同化利用することで解析値及び予測値の精度向上に貢献することが期待される。

ATMSのうち主に水蒸気に感度のあるチャンネル（以下、水蒸気チャンネル）は全球・メソ・局地解析で同化利用している一方、主に気温に感度のあるチャンネル（以下、気温チャンネル）については、メソ解析及び局地解析では未利用で、全球解析では一部のチャンネルのみを同化利用している。

当庁では、ATMS 気温チャンネルと同様に気温に感度のあるマイクロ波サウンダ AMSU-A を同化利用しているが、AMSU-A を搭載する衛星は徐々に運用終了となっている<sup>2</sup>。このような状況下で気温場の解析精度及び予測精度を維持するためには、メソ解析及び局地解析における ATMS 気温チャンネルの新規利用、及び全球解析における未利用チャンネルの新規利用が重要である。本開発はこれらの課題の解決を目指しており、令和7年は主にメソ解析及び局地解析に焦点を当てて取り組んだ。

## (2) ATMS 同化利用の経過

気象庁では、AMSU-A の気温チャンネルを全球・メソ・局地解析で長らく同化利用しており、特に全球解析では気温場や高度場の予測精度の維持に大きく貢献してきた（岡本 2007, 気象庁 2023b）。2012 年打ち上げの Suomi-NPP に初めて搭載された ATMS は AMSU-A の後継センサーとされ、気温チャンネルのほとんどが AMSU-A 搭載チャンネルと同じ中心周波数となっている（表 4.4.1）。そのため、当庁でも AMSU-A と同等の手法で ATMS を同化利用する開発が進められた。

全球数値予報システムにおいては、ATMS を同化利用することで気温場や高度場の予測精度に一定の改善が確認できたものの、成層圏に感度のある ATMS/ch10-15 を同化すると、主に高緯度域において、AMSU-A の同周波数のチャンネルの観測値と第一推定値の整合性が悪化する結果が得られた。このため、水蒸気チャンネル (ch18-22) と対流圏に感度のある気温チャンネル (ch6-9) に限定して、2017 年 3 月に ATMS の同化利用を開始した（平原 2017）。

メソ数値予報システム及び局地数値予報システムにおいては、ATMS の気温チャンネルで観測値と第一推定値との差 (O-B) に AMSU-A とは異なるバイアス傾向が見られ、同化利用したところ対流圏の中下層で気温場や高度場の予測精度悪化が確認された。このため、メソ解析及び局地解析では水蒸気チャンネル (ch18-22) に限定して、それぞれ 2022 年 6 月と同年 8 月に ATMS の同化利用を開始した（気象庁 2023a）。

## (3) メソ解析における開発進捗

メソ数値予報システムにおける ATMS 気温チャンネルの O-B バイアス傾向を、2025 年 3 月時点の現業システムで調査した。調査期間における ATMS/ch7 及び同周波数の AMSU-A/ch6 の O-B 分布は図 4.4.19 に示す通りで、最新のシステムでも ATMS と AMSU-A の間で O-B バイアスの差異が確認された。この課題に対処するため、マイクロ波気温サウンダの変分法バイアス補正 (VarBC) の説明変数に積算荷重気温減率 (Integrated Weighted Lapse Rate; IWLR, 岡本 2007) を追加した。IWLR は、対象とするチャンネルの荷重関数と観測地点の気温減率の積を鉛直方向に足し合わせたもので、VarBC 説明変数として利用することで、放射伝達モデルの透過率と実際の透過率との差異により生じる第一推定値のバイアスを解消することが期待できる。またこの変更と併せて、マイクロ波気温サウンダのうち海面付近に感度のないチャンネル (AMSU-A/ch7-11, ATMS/ch8-12) については、VarBC 説明変数から海面温度（陸上及び海水上では地表面温度）を除外した。新たな説明変数で VarBC を行った結果、ATMS と AMSU-A の間での O-B バイアスの差異が軽減されることを確認した（図 4.4.20）。

なお、全球解析では ATMS/ch10-15 を利用することにより高緯度域の気温の予測精度が悪化するが、メソ解析の計算領域には影響しないと考えられ、これらのチャンネルでも先に示した手法の有効性が確認された。メソモデルのモデル上端高度を考慮し、結果的に ATMS の気温チャンネルとして ch6-12 を同化利用することとした。

上記の設定で ATMS 気温チャンネルを新規に同化利用し、メソ数値予報システムにおける影響評価（性能評価試験）を行った。夏実験として 2023 年 6 月 26 日から 8 月 11 日、冬実験として 2023 年 12 月 10 日から 2024 年 1 月 10 日の期間で実験を実施した。様々な種類の観測データについて、観測値と第一推定値との整合性を確認したところ、航空機による気温観測や、ハイパースペクトル赤外サウンダ IASI, CrIS などにおいて、第一推定値が観測データにより近づき、整合性が向上した（図 4.4.21）。これは第一推定値として用いた短時間予測 (FT=0~3) の気温場や水蒸気場の精度が向上したことを示唆するものである。また、ラジオゾンデ観測を対象とした検証から、FT=6, 12 における高度場の予測誤差が減少したことを確認した（図略）。

## (4) 局地解析における開発進捗

局地解析についても、メソ解析と同様の VarBC 説明変数の変更を行うことで ATMS と AMSU-A 間の O-B バイアスの差異が軽減されることを確認した。メソ解析と同様の設定で ATMS/ch6-9 を新規に同化利用し、局地数値予報システムにおける影響評価（性能評価試験）を行った。夏実験として 2023 年 6 月 28 日から 7

<sup>2</sup> 当庁では、2025 年 4 月時点では米国の極軌道衛星 NOAA-15, NOAA-18, NOAA-19 及び欧州の極軌道衛星 Metop-B, Metop-C に搭載された AMSU-A を同化利用していたが、このうち NOAA-15, 18, 19 については 2025 年 6 月に運用が終了した。Metop-B, C についても、運用終了が 2030 年に計画されている。

表 4.4.1 AMSU-A 気温チャンネルと ATMS 気温チャンネルの対応及び同化利用状況。\* <https://space.oscar.wmo.int/spacecapabilities>, \*\* ○: 同化利用中、-: 未利用

観測中心周波数 [GHz] (WMO/OSCAR/Space *に準拠)	AMSU-A			ATMS				
	ch 番号	同化利用状況 **			ch 番号	同化利用状況 **		
		全球	メソ	局地		全球	メソ	局地
52.800	4	○	○	○	5	-	-	-
53.596 ± 0.115	5	○	○	○	6	○	-	-
54.400	6	○	○	○	7	○	-	-
54.940	7	○	○	○	8	○	-	-
55.500	8	○	○	○	9	○	-	-
$f_0=57.290344$	9	○	○	-	10	-	-	-
$f_0 \pm 0.217$	10	○	○	-	11	-	-	-
$f_0 \pm 0.3222 \pm 0.048$	11	○	○	-	12	-	-	-
$f_0 \pm 0.3222 \pm 0.022$	12	○	-	-	13	-	-	-
$f_0 \pm 0.3222 \pm 0.010$	13	○	-	-	14	-	-	-
$f_0 \pm 0.3222 \pm 0.0045$	14	○	-	-	15	-	-	-

月 12 日、冬実験として 2024 年 1 月 30 日から 2 月 13 日の期間で実験を実施した。夏実験では ATMS 水蒸気チャンネル (ch18-22) において観測値と第一推定値の整合性が悪化した (図 4.4.22 (a))。ATMS 気温チャンネルの観測誤差を大きくする措置 (観測誤差膨張) を施して追加実験を実施したが、結果として悪化傾向は改善されなかった (図 4.4.22 (b))。本件の詳細については現在調査中である。

#### (5) まとめと今後

メソ数値予報システム及び局地数値予報システムでの ATMS 気温チャンネルの新規利用に向け調査を行った。マイクロ波気温サウンダの VarBC 説明変数を変更することで、ATMS と AMSU-A の同一周波数のチャンネル間で見られていた O-B バイアスの差異が解消することを確認した。ATMS 気温チャンネルを同化することで、メソ数値予報システムについては改善効果が確認できたが、局地数値予報システムでは第一推定値の一部要素で予測精度の悪化が示唆される結果が得られ、引き続き調査している。

また、全球数値予報システムについても、成層圏に感度のある気温チャンネルの新規利用に向けた開発を別途進めている。

#### 4.4.8 メソ解析におけるひまわり CO2 バンド晴天放射輝度 (CSR) の新規利用

##### (1) 概要

メソ解析では、静止気象衛星ひまわりに搭載された可視赤外イメージャ AHI のうち、対流圏中上層の水蒸気に感度のある水蒸気バンド (バンド 8、バンド 9、バンド 10) の晴天放射輝度温度 (Clear Sky Radiance;

CSR) を同化利用している。全球解析では、2025 年 10 月より水蒸気バンドに加え、CO2 バンド (バンド 16) の同化利用を開始し、対流圏の中下層を中心に精度向上が確認された (気象庁 2025)。メソ解析においても同様の効果が期待されるため、導入に向けた開発を進めている。

バンド 8、バンド 9、バンド 10 は、それぞれ中心波長が約 6.2  $\mu\text{m}$ 、約 7.0  $\mu\text{m}$ 、約 7.3  $\mu\text{m}$  であり、対流圏の上層、中上層、中層の水蒸気場に感度がある (図 4.4.23 赤・橙・黄線)。一方、バンド 16 は中心波長が約 13.3  $\mu\text{m}$  であり、二酸化炭素の吸収帯の一部に応答を持つ。大気中の二酸化炭素の不均一性は水蒸気よりも小さいことから、輝度温度の変化には気温の変化の寄与が大きく、またバンド 16 が応答を持つ波長帯には水蒸気の吸収線も含まれることから、水蒸気にも一定の感度がある。水蒸気バンドが対流圏の中上層に感度があるのに対して、CO2 バンドは対流圏の中下層に感度がある (図 4.4.23 緑線)。

CO2 バンドは既存の水蒸気バンドに対して情報の独立性が比較的高い。現在同化利用している水蒸気バンドに加えて CO2 バンドも同化することで、上層に対する場の修正と下層に対する場の修正をより独立に扱えるようになり、インクリメントの過剰な広がりや系統的バイアスの緩和が期待される。

以降では、メソ解析においてひまわりの CO2 バンドを同化利用する際の、品質管理手法や性能評価試験の結果について記す。

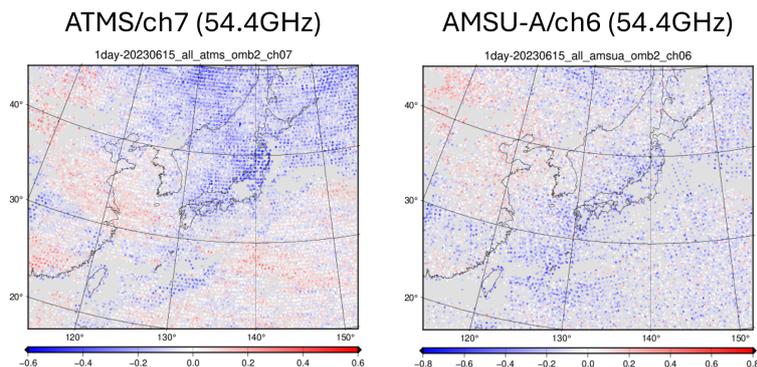


図 4.4.19 メソ解析における ATMS/ch7 と AMSU-A/ch6 (いずれも 54.4 GHz) の輝度温度観測値と第一推定値との差 (O-B)[K] の分布。VarBC による補正前の結果を示す。2023 年 6 月 15 日 00UTC~21UTC の解析結果から作成。

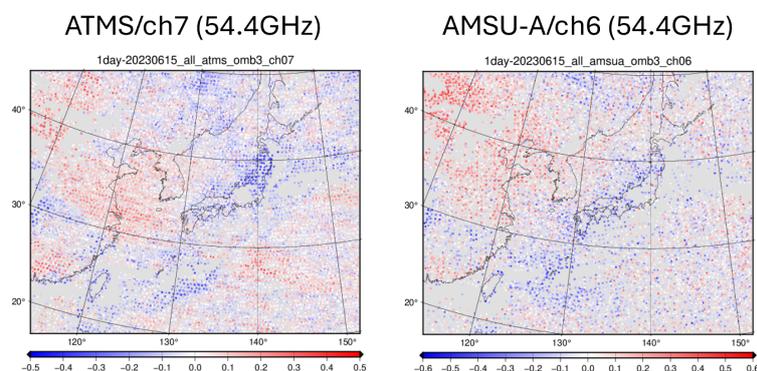


図 4.4.20 メソ解析における ATMS/ch7 と AMSU-A/ch6 (いずれも 54.4 GHz) の輝度温度観測値と第一推定値との差 (O-B)[K] の分布。ただし VarBC による補正後の結果を示す。統計期間は図 4.4.19 と同じ。

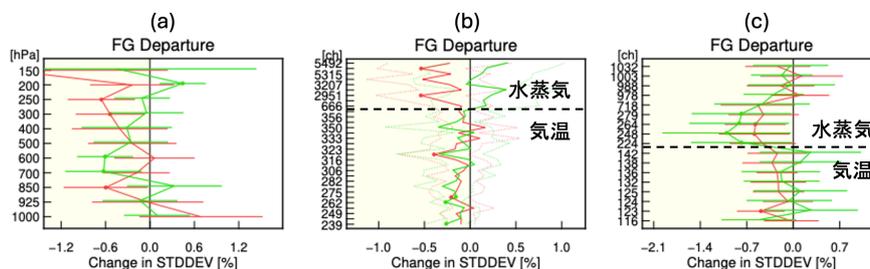


図 4.4.21 メソ解析における O-B の標準偏差の、TEST の CNTL に対する変化率 [%]。(a) 航空機気温観測, (b) ハイパースペクトル赤外サウンダ IASI, (c) ハイパースペクトル赤外サウンダ CrIS。赤線は夏期間、緑線は冬期間を示す。図の見方は図 4.4.3 と同じ。

表 4.4.2 品質管理及び観測誤差の設定

	水蒸気バンド	CO2 バンド
晴天判定率	90%以上	90%以上
海陸 QC	なし	あり
山岳 QC	4000 m 以下	4000 m 以下
画素の標準誤差	0.5 K 以下	0.5 K 以下
観測誤差	1.5 K	1.5 K
観測誤差の膨張係数	3.0	3.0
グロスエラーチェック	3.0 K	3.0 K

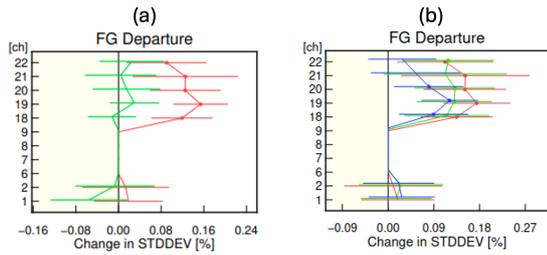


図 4.4.22 局地解析における O-B の標準偏差の、TEST の CNTL に対する変化率 [%]。(a) 性能評価試験の結果、(b) 観測誤差膨脹を変更した結果。(a) では赤線が夏実験、緑線が冬実験の結果、(b) では赤線、緑線、青線がそれぞれ観測誤差膨脹係数を  $\sqrt{3}$  倍 (デフォルト)、2 倍、3 倍とした場合の夏実験の結果を示す。図の見方は図 4.4.3 と同じ。

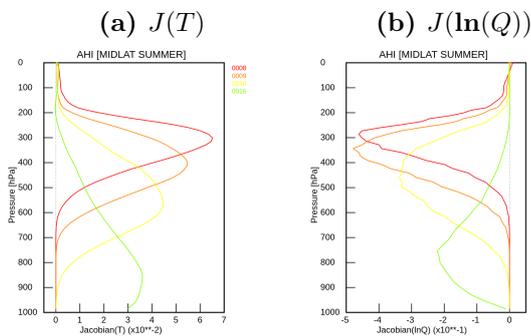


図 4.4.23 夏の北半球の中緯度帯の標準的大気を仮定した輝度温度の Jacobian (大気の変化に対する輝度温度の応答;  $\partial T_B(x)/\partial x$ )。縦軸は気圧座標 [hPa]。(a) が気温  $T$ 、(b) が比湿  $q$  の対数  $\ln(q)$  に対するもの。緑が CO2 バンド、赤・橙・黄が水蒸気バンド。

## (2) 品質管理手法

メソ解析における CO2 バンドの同化利用に向けた品質管理手法や観測誤差設定は、気象研究所で開発した手法(田上ほか 2024)を基本とする。これは、水蒸気バンドの同化利用で用いられているリトリーブ地表面温度を活用した CSR の同化手法 (Okabe and Okamoto 2023, 岡部 2020) を CO2 バンドに拡張したものである。品質管理と観測誤差の主な設定を表 4.4.2 に示す。

CO2 バンドは水蒸気バンドより大気の透過率が高いため、輝度温度の計算の際に用いるモデルの地表面温度の不確実性が、観測とモデルの輝度温度の乖離に強く影響する。水蒸気バンドにおける同化利用開発が示すように、地表面温度に窓バンドからのリトリーブ値を用いることで、この乖離を大幅に低減できるため、本開発でもこれを採用した。

さらに CO2 バンドでは、既存の水蒸気バンドで採用していた品質管理に加えて、観測とモデルの海陸判定の乖離がある観測を除外する海陸 QC を導入する。輝度温度の計算の際に想定する地表面射出率及び地表面温度の設定が海陸で異なることから、海陸判定の乖離により輝度温度の結果に誤差が生じるためであり、本

QC の導入により、特に冬季において判明した観測値と第一推定値の差 (O-B) のバイアスや分散が異なる観測点の混入を除去することができた。なお、観測誤差の設定値に関しては、既存の水蒸気バンドを参考に観測統計の分布から保守的な値を設定している。将来的に誤差の最適化や地表面温度の評価の精緻化によってさらに小さな値を採用する可能性がある。

## (3) 性能評価試験

メソ数値予報システムにおける CO2 バンド同化利用の影響評価 (性能評価試験) を行った。2025 年 8 月時点の数値予報システム相当を CNTL とし、上記変更を加えたものを TEST とする実験を、夏実験は 2023 年 6 月 21 日から 9 月 12 日、冬実験は 2023 年 12 月 10 日から 2024 年 1 月 31 日の期間で実施した。

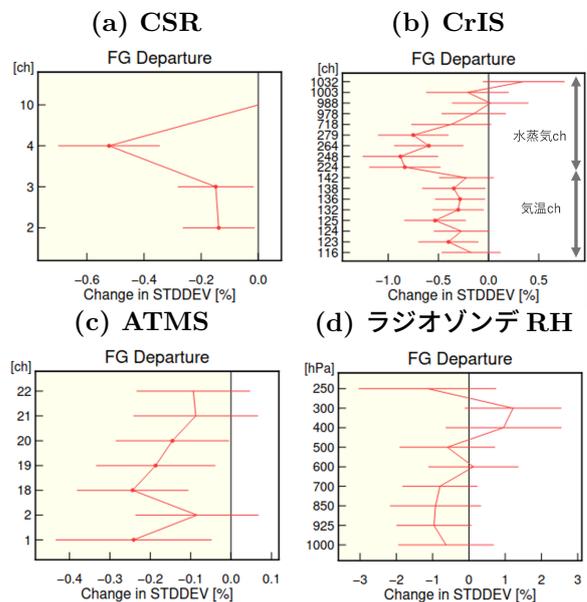


図 4.4.24 夏実験のメソ解析における観測値と第一推定値の差 (O-B) の標準偏差の、TEST の CNTL に対する変化率 [%]。それぞれ (a) Himawari CSR、(b) CrIS、(c) ATMS、(d) ラジオゾンデ相対湿度を指す。図の見方は図 4.4.3 と同じ。各観測で整合的に中下層の標準偏差が低下している。(※ CSR の ch10 は CO2 バンドであるが、CNTL に観測がないため便宜上 0 となっている)

CO2 バンドの導入による、観測とモデルの短時間予測である第一推定値との整合性の向上を確認した。その結果、夏実験において、(a) ひまわり CSR の水蒸気バンドや (b) 赤外サウンダ (CrIS の水蒸気チャンネル)、(c) マイクロ波サウンダ ATMS で特に下層に感度のあるチャンネルを中心に O-B の標準偏差が減少した。さらに (d) 従来型観測であるラジオゾンデにおいても相対湿度について対流圏の中下層を中心に O-B の標準偏差の減少が確認された (図 4.4.24)。ゾンデの水蒸気に関しては、標準偏差に加えて、同高度でみられていた乾燥バイアスをわずかに低減する結果が得られた (図略)。一方で、冬実験では顕著な改善は認められ

ず、夏実験と比較して効果は限定的であった（図略）。

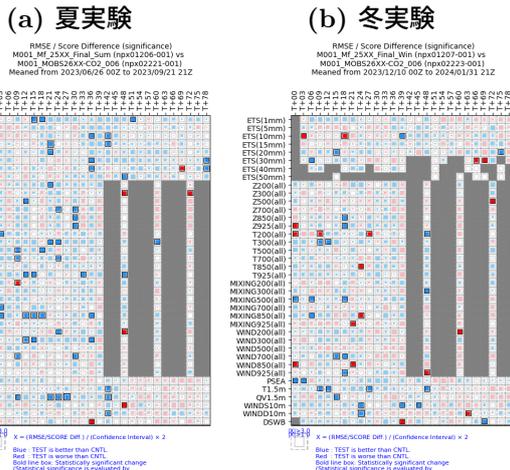


図 4.4.25 メソ数値予報システムにおける主要要素の対CNTL統計検証結果。図の見方は図 4.4.4 と同じ。(a) は夏実験、(b) は冬実験の結果を示す。

予測精度に関しても、夏実験においては降水や高度場、気温、水蒸気混合比に対して、概ね 2 日先予測にかけて改善傾向となった（図 4.4.25）。特に降水に関しては、予測で見逃し率や空振り率、バイアスが減少し、予測スコアが改善した。冬実験に関しては、概ね中立な結果であった。地上要素や予報初期の気温・水蒸気に若干の改善傾向は見られるが統計的なゆらぎの範疇と考える。

#### (4) まとめと今後

メソ解析において、水蒸気バンドに加え新たに CO2 バンドの CSR を同化利用するための変更を行い、影響評価を行った。夏実験において、第一推定値の対流圏中下層の水蒸気の精度が向上し、予測精度についても、対流圏下層から中層の気温や水蒸気、降水予測を中心に改善する傾向が見られた。夏季の下層水蒸気場や降水の改善は気象庁の防災業務において重要なことから、現業システムへ導入することとし、準備を進めている。

今後の改良として、冬季における予測精度の向上に向けて、バイアス補正や品質管理（誤差評価を含む）の精緻化を考えている。加えて、水蒸気バンドも含め、より高解像度の CSR の同化について調査を進める。また、局地解析においても導入を検討する。

### 4.4.9 ひまわり 10 号搭載赤外サウンダの利用に向けた開発

#### (1) 概要

2030 年度に運用開始予定の次期静止気象衛星ひまわり 10 号には、日本の静止気象衛星としては初めてハイパースペクトル赤外サウンダ（以下、赤外サウンダ）GHMS が搭載される（別所ほか 2024）。GHMS は日本周辺域の 3 次元的な大気構造を高頻度に観測できるこ

とから、台風や線状降水帯といった顕著現象の予測精度向上に有用であると期待されている。

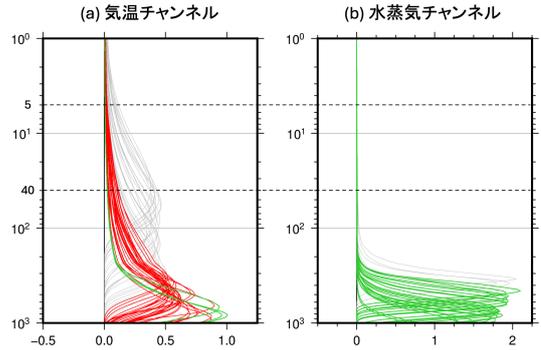


図 4.4.26 OSSE で同化利用した GHMS の各チャンネルの荷重関数。左図に気温に感度のあるチャンネル、右図に水蒸気に感度のあるチャンネルを示す。緑線が全球解析・メソ解析・局地解析で同化利用したチャンネル、赤線が全球解析及びメソ解析で同化利用したチャンネル、灰色線が全球解析のみで同化利用したチャンネル。それぞれの図の縦軸は気圧 [hPa] で、横点線はメソモデル及び局地モデルのおおよその上端高度（約 5 hPa、約 40 hPa）を示す。

数値予報開発センターでは、GHMS の観測データをひまわり 10 号の運用開始後に速やかに数値予報現業システムで利用できるよう、模擬観測データを用いた観測システムシミュレーション実験（OSSE: Observation System Simulation Experiment, 石橋 2013）を実施し、技術開発を進めている（気象庁 2025）。本項では令和 7 年の OSSE に関する開発進捗について報告する。

#### (2) 開発進捗

前回の報告（気象庁 2025）からの開発進捗として、全球数値予報システムだけでなく、メソ数値予報システム及び局地数値予報システムにおいても OSSE を実施した。同化利用するチャンネルは、全球解析用を選択した気温または水蒸気に感度のある計 86 チャンネルのうち、メソモデル及び局地モデルのそれぞれのモデル上端高度より上空に感度のあるチャンネルを除外した、それぞれ計 55 チャンネル及び計 25 チャンネルとした（図 4.4.26）。品質管理手法及び同化手法は、現業数値予報システムで利用中の極軌道衛星搭載赤外サウンダと同様（亀川・計盛 2017, 気象庁 2024）とした。

図 4.4.27 に、2023 年 6 月時点の現業メソ数値予報システムに対して実施した OSSE の結果の一例を示す。この降水事例では、図中の楕円で示した領域において、現業相当の実験（CNTL）と比較して OSSE で降水強度予測が解析雨量に近付いた。予報初期値の変化を確認すると、OSSE では降水域の風下側で下層水蒸気量が増加しており、これは ERA5 に含まれる情報が模擬観測データを通して初期値に適切に反映されたことを示している。なお、この時刻には赤外サウンダを搭載した極軌道衛星搭載は日本上空を通過していないため、静止軌道で観測可能な GHMS の利点が発揮された改善

事例といえる。ただし、OSSEで見られる変化はERA5における下層水蒸気や降水の表現に依存するため、必ずしも全ての事例で改善が得られるとは限らない。このため、ERA5の特性を踏まえながら慎重に検証を進めている。

また、観測誤差設定の妥当性などを確認するため、模擬観測データの観測誤差相関をDesroziers et al. (2005)の手法で推定した結果、チャンネル間及び水平方向において実観測 (IASI) よりも強い相関を持つことがされた (図 4.4.28)。これは、ERA5に含まれる背景誤差由来の相関に加え、本開発で利用している模擬観測データでは雑音特性が未考慮であることが原因と考えられる。現在は、解析処理内で誤差相関を陽に考慮する代わりに、実観測よりも大きく観測誤差を膨張させた上で同化することで対処している。

### (3) まとめと今後

GHMSの模擬観測データを用いて、全球・メソ・局地の各数値予報システムでOSSEを実施している。実験結果から予測精度の向上が確認されており、今後は模擬観測データに特有の性質に注意しつつ、赤外サウンダの利用高度化に向けた調査をOSSEを通じて進める予定である。

また、GHMSの利用に向けた技術開発として、中国の静止気象衛星FY-4B搭載の赤外サウンダGIIRSや、2025年7月に打ち上げられた欧州の静止気象衛星MTG-S1搭載の赤外サウンダIRSの実観測データを用いた調査も並行して実施する予定である。

### 参考文献

別所康太郎, 安藤昭芳, 隅田康彦, 安部実希, 2024: 静止気象衛星ひまわり10号について. *天気*, **71**, 511–515.

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.

Drusch, E., M. Wood and H. Gao, 2005: Observation operators for the direct assimilation of TRMM microwave imager retrieved soil moisture. *Geophys. Res. Lett.*, *32*, L15403, doi:10.1029/2005GL023623, 4317.

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.

Geer, A., N. Bormann, K. Lonitz, P. Weston, R. Forbes, and S. English, 2019: Recent progress in all-sky radiance assimilation. *ECMWF Newsletter*, **161**, 20–25.

平原洋一, 2017: 全球解析におけるSuomi-NPP/ATMS輝度温度データの利用開始. 平成29年度数値予報研

修テキスト, 気象庁予報部, 70–73.

幾田泰醇, 2017: 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. 平成29年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 82–85.

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**, 831–833.

石川宜広, 2010: 地上GPSデータのメソ解析での利用. 数値予報課報告・別冊第56号, 気象庁予報部, 54–60.

亀川訓男, 計盛正博, 2017: 全球解析におけるSuomi-NPP/CrIS輝度温度データの利用開始. 平成29年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 73–74.

気象庁, 2021: マイクロ波輝度温度全天同化とアウトグループの全球解析への導入. 数値予報開発センター年報(令和2年), 気象庁数値予報開発センター, 23–28.

気象庁, 2023a: メソ解析および局地解析におけるマイクロ波サウンダATMSの利用. 数値予報開発センター年報(令和4年), 気象庁数値予報開発センター, 42–47.

気象庁, 2023b: FSOI (Forecast Sensitivity Observation Impact). 数値予報開発センター年報(令和4年), 気象庁数値予報開発センター, 93–98.

気象庁, 2024: ハイパースペクトル赤外サウンダの全球解析における利用改良およびメソ・局地解析における新規利用. 数値予報開発センター年報(令和5年), 気象庁数値予報開発センター, 46–52.

気象庁, 2025: 観測データの新規導入と利用方法の改良. 数値予報開発センター年報(令和6年), 気象庁数値予報開発センター, 72–90.

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**, 23 429–23 465.

McNally, A. and P. Watts, 2003: A cloud detection algorithm for high-spectral-resolution infrared sounders. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **129**, 3411–3423.

大谷竜, 内藤勲夫, 1998: GPS可降水量の物理と評価. **192**, 15–33.

岡部いづみ, 2020: 静止気象衛星ひまわりCSR. 数値予報課報告・別冊第66号, 気象庁予報部, 133–141.

Okabe, I and K. Okamoto, 2023: Assimilation of surface-sensitive bands' clear-sky radiance data using retrieved surface temperatures from geostationary satellites. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **149**, 1473–1497, URL <https://doi.org/10.1002/qj.4469>.

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, 2007: ATVOS直接同化. 数値予報課報告・

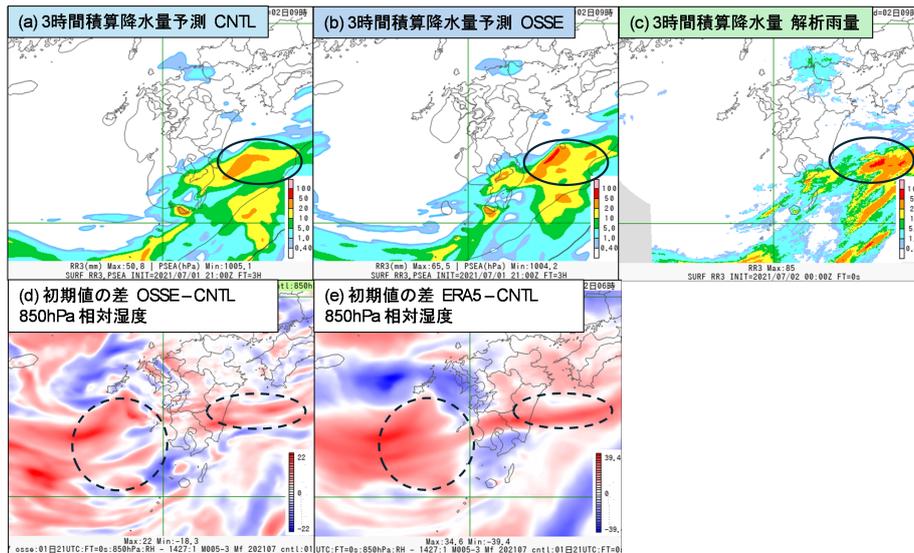


図 4.4.27 メソ数値予報システムにおける前3時間降水量 [mm/3h] の改善事例。上段は 2021 年 7 月 1 日 21UTC を初期値とした 3 時間後の予測 (7 月 2 日 00UTC) で、(a) CNTL、(b) OSSE、(c) は解析雨量。下段は初期値における 850 hPa 面の相対湿度 [%] の差で、(d) は OSSE と CNTL の差、(e) は模擬観測データの作成元である ERA5 と CNTL の差を示す。

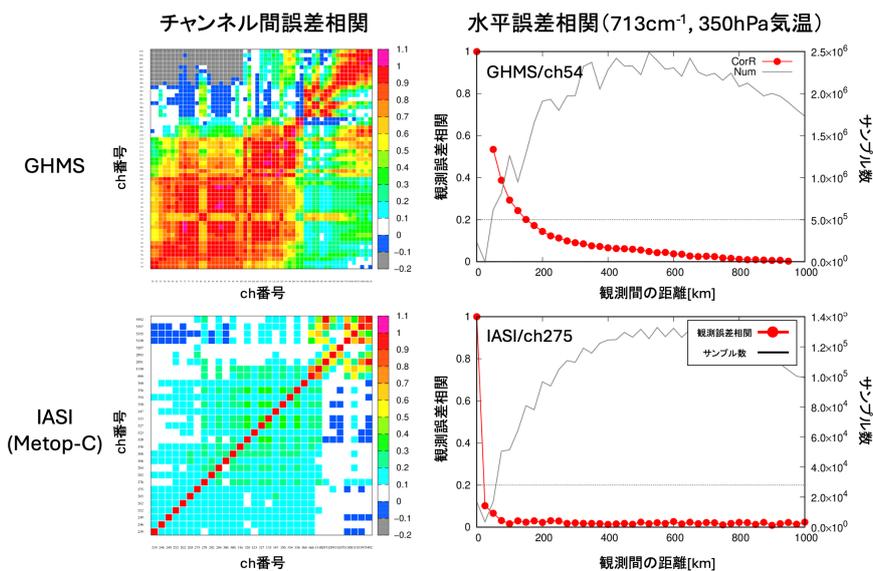


図 4.4.28 GHMS 模擬観測データのチャンネル誤差相関及び水平誤差相関の推定値。参考として、下段に Metop-C 搭載 IASI の実観測データでの推定値を示す。水平誤差相関は、350 hPa 付近の気温に感度のある GHMS/ch54 及び IASI/ch275 での計算結果を示す。

別冊第 53 号, 気象庁予報部, 58-70.

Okamoto, K., T. Ishibashi, and I. Okabe, 2023: All-sky infrared radiance assimilation of a geostationary satellite in the Japan Meteorological Agency's global system. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **149**, 2477-2503.

Okamoto, K., T. Ishibashi, I. Okabe, and H. Shimizu, 2024: Extension of all-sky radiance assimilation to hyperspectral infrared sounders. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **150**, 5472-5497.

大和田浩美, 2017: GNSS 掩蔽観測データの利用の改

良. 平成 29 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 77-80.

Scipal, M., K. Drusch and W Wagner, 2008: Assimilation of a ERS scatterometer derived soil moisture index in the ECMWF numerical weather prediction system. **31**, 1101-1112.

田上雅浩, 岡部いづみ, 近藤圭一, 幾田泰醇, 太田芳文, 川畑拓矢, 岡本幸三, 秋元銀河, 安藤慧, 草野直人, 村田英彦, 2024: メソ解析への Himawari CO2 バンド CSR データの利用検討. 日本気象学会 2024 年度秋季大会.