4.5 観測データの新規導入と利用方法の改良

4.5.1 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、予測精度向上には重要であり、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。

4.5.2 項及び 4.5.3 項では、全球・メソ・局地解析に おける輝度温度データの利用方法の改良として、放射 伝達モデル RTTOV の更新、及び衛星搭載マイクロ波 気温サウンダの利用チャンネル拡充について、それぞ れ述べる。4.5.4 項から 4.5.6 項、並びに 4.5.8 項では、 全球解析における観測データの利用方法の改良として、 静止衛星全天放射輝度温度 (ASR)の利用、CO2 バン ドの晴天放射輝度温度 (CSR)の利用、CO2 バン ドの晴天放射輝度温度 (CSR)の利用、マイクロ波水蒸 気サウンダの利用高度化、極域 AMV の利用拡充につ いて、それぞれ述べる。4.5.7 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、4.5.9 項では、メソ・局地解析における、アメ ダス地上湿度の観測誤差の調整について述べる。

4.5.2 放射伝達モデル RTTOV の放射伝達計算用係 数および界面射出率モデルの更新

(1) 概要

数値予報システムにおける輝度温度データの同化に は、観測演算子として EUMETSAT の NWP SAF で 開発された高速放射伝達モデル RTTOV(Eyre 1991)を 利用している。RTTOV は計算精度向上や機能追加、新 規衛星への対応など常に改良が行われており、数年ご とに新しいバージョンがリリースされている。現在数 値予報開発センターでは、RTTOV-10.2 から RTTOV-13.0(Saunders et al. 2020) への更新作業を行っている。 更新については大規模な変更を確実に実施するため二 段階に分けて行っており、第一段階としてモジュール の差し替えや定数ファイル名の変更など RTTOV-13.0 が動作するための必要最低限の変更を、全球およびメ ソ解析については 2022 年 6 月 30 日に、局地解析につ いては 2022 年 8 月 9 日に導入した (気象庁 2023b)。現 在は RTTOV-13.0 のシステムへの組み込みによって利 用可能となった、最新の気体吸収データベースに基づ く新しい放射伝達計算用係数や海面射出率モデルの導 入に向けて開発を進めている。本項ではこれらの導入 に向けた品質管理 (QC) の変更点やメソ・局地解析に おける数値予報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

放射伝達計算用係数については、利用中のセンサに おいて CrIS 以外の係数を更新する。CrIS は係数の更 新により観測値と第一推定値の差 (O-B) の標準偏差が 増大するなど計算精度の向上が確認できなかったため、 今回は更新を見送ることとした。また CSR について は、これまで微量気体としてオゾンのみを考慮した係 数を利用してきたが、新しいバージョンの係数ではオ ゾンと二酸化炭素を考慮した係数が開発元から推奨さ れる標準の係数となった。オゾンのみを考慮した係数 と計算精度に大きな違いが無かったため、オゾンと二 酸化炭素を考慮した係数を利用することにした。また これまで利用してきた係数の水蒸気の単位について、 マイクロ波は湿潤空気における体積混合比、赤外は乾 燥空気における体積混合比を前提としたものであった ところ、これまでの解析システムでは RTTOV には共 通して湿潤空気における体積混合比を与えていたため、 赤外のセンサでは不整合が生じていた。新しい係数で はマイクロ波、赤外ともに乾燥空気における体積混合 比を前提として作られており、RTTOV へ乾燥空気に おける体積混合比を与える変更を加え、不整合を解消 した。

海面射出率モデルとしてマイクロ波は FASTEM-6(Kazumori and English 2015)、赤外は IREMIS が利 用可能となった。FASTEM-6では衛星のセンサから見 た相対的な風向 (RWD: Relative Wind Direction) に依 存して海面射出率が変化する特性を適切にモデル化し ている。これを利用することで RWD に依存する O-B のバイアスが解消することが期待される。全球解析に おいて、データ同化サイクルを行わずに一定期間の QC 処理のみを行った実験結果より、当庁のシステムにおい てもマイクロ波イメージャについて RWD に依存したバ イアスが縮小していることを確認した。一方で、メソ・ 局地解析で利用している FASTEM-4 から FASTEM-6 へ更新した場合、地上風速に依存するバイアスが拡大 することが分かった。これはメソ・局地解析では変分 法バイアス補正 (VarBC) の説明変数として地上風速を 利用していない (全球解析では利用している) ことに起 因すると考え、VarBC の説明変数に地上風速を追加し た実験を実施したが、改善の効果が確認できなかった。 そのためメソ・局地解析については FASTEM-6 の利用 は見送ることとした。一方で、赤外の IREMIS を利用 すると、海上における赤外サウンダの地表面に感度の あるチャンネルで、地上風速に依存して計算輝度温度 が変化することが確認できた。IREMIS の利用に関し て、想定通りの変化であったため、赤外では IREMIS を利用することとした。

上記の放射伝達計算用係数や海面射出率モデルの更新 に伴って、計算輝度温度の統計的特性が変化する。QC で利用しているパラメータのうち、計算輝度温度の統 計等から作成したスキャンバイアス補正量、AMSU-A の降水判別係数を今回の変更に合わせて更新した。ス キャンバイアス補正量の更新については係数や海面射 出率モデルの更新に伴う変化に加えて、経年変化によっ て補正が不十分になっているセンサもあるため、この機 会にスキャンバイアス補正が必要な全てのセンサの補 正量を更新することとした¹。また AMSU-A について は、主にスキャンバイアス補正量の更新に伴って、QC で用いる雲水量のリトリーブ値が従来よりも大きく算 出されるようになり、雲判定によって利用されないデー タが増加した。利用されなくなったデータの O-B を確 認したところ、雲域として過剰に取り除かれていると 考えられたため、従来と利用されるデータ数が同程度 になるように雲判定に用いる雲水量の閾値を 100 g/m²

(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。2024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 験を実施した。実験は夏実験として2023年5月27日 から8月15日、冬実験として2022年12月10日から 2023年2月28日の期間で実施した。

輝度温度データの利用数は AMSU-A や ATMS で減 少し、MHS、CSR、赤外サウンダで概ね増加した。デー タ利用数の減少についてはスキャンバイアス補正量を 更新したことによって、これまで適切に取り除けてい なかった雲の影響を受けたデータが取り除けるように なった結果であることを確認した。MHS、CSRのデー タ数増加については、変更による放射計算精度の向上 に伴って QC をパスするデータが増加したこと、赤外 サウンダについては海面射出率モデルの更新によって 雲判定されるデータが減少したことが主な要因である ことを確認した。他の独立な観測データの観測値と第 一推定値との整合性の変化を確認したが、概ね中立の 結果であった。

平均解析場の変化としては、メソモデルの領域南側 で可降水量が減少し、北側で可降水量が増加する変化 が見られた。これはマイクロ波イメージャの係数更新 による計算輝度温度の変化に対応していたことを確認 した。またラジオゾンデによる 850hPa の水蒸気混合 比の検証結果より、この変化がモデルバイアスを解消 させる変化であったことを確認した。

予報スコア (図 4.5.1) の変化を確認したところ、夏 実験では概ね中立であった。冬実験では地上 1.5m 気 温が悪化したが、ジオポテンシャル高度の予測精度が 改善する結果であった。地上 1.5m 気温の悪化につい ては、もともとあった大きな正バイアスがごく僅かに 拡大した結果であり、深刻な悪化ではないことを確認 した。

(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。2024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 験を実施した。実験は夏実験として2023年7月23日 から7月30日、冬実験として2023年1月23日から1 月30日の期間で実施した。

輝度温度データの利用数は AMSU-A や ATMS で減 少し、MHS、CSR、赤外サウンダで概ね増加した。デー タ利用数の減少の原因としてはメソ数値予報システム と同様の理由で、適切な QC ができるようになった結 果であることを確認した。他の独立な観測データの観 測値と第一推定値との整合性の変化については概ね中 立であった。



図 4.5.1 メソ数値予報システムにおける主な要素の対 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 と比べて改悪を表しており、色付きの領域が各セルの内側 の正方形以上の場合、統計的に有意であることを示す。(a) は夏実験、(b) は冬実験の結果を示す。



図 4.5.2 図 4.5.1 と同様。ただし、局地数値予報システムに おける検証結果。

¹ ただし、補正量の見積もり時に利用が終了していたセンサ などについては据え置きとしている

平均解析場の変化についてもメソと同様であり、局 地モデルの領域南側で減少し、北側で増加する傾向で あった。予報スコア (図 4.5.2) について、夏実験は概 ね中立の結果であった。冬実験については地上気圧が 悪化したが、それ以外は概ね中立であった。地上気圧 の悪化については、もともとあった大きな正バイアス がごく僅かに拡大したことに起因するものであり、深 刻な悪化では無いことを確認した。

(5) まとめと今後

RTTOV-13.0 の導入に伴って利用可能となった、最 新の放射伝達計算用係数および海面射出率モデルの利 用に向けて開発を進めており、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予測精度は概ね 中立の結果であったが、経年変化によって不十分になっ ていたスキャンバイアス補正量を更新したことで、雲 の影響を受けたデータが適切に取り除けるようになり、 より適正な解析システムになったと考えられる。

今回の利用を見送った CrIS の放射伝達計算用係数や FASTEM-6 について、今後原因を詳しく調査し、可能 であれば更新を目指して開発を進めていく予定である。 また今後、全球数値予報システムにおける影響を調査 する予定である。

4.5.3 衛星搭載マイクロ波気温サウンダの利用チャンネル拡充

(1) 概要

衛星搭載のマイクロ波気温サウンダ (AMSU-A, ATMS等)は、主に大気の気温の鉛直分布に関する情 報を観測するセンサーで、全球、メソ、局地解析で同化 利用している (岡本 2007; 平原 2017; 気象庁 2023a)。 一方で、AMSU-A および ATMS には気温の鉛直分布 に関する情報を観測するチャンネル (気温チャンネル) に加え、大気の透過率が高く、対流圏下層の水蒸気に 感度のあるチャンネル(窓チャンネル)も搭載されてい る。現在、窓チャンネルは品質管理処理でのみ利用し ているが、同化利用することで解析値の水蒸気場の改 善を通じた予測精度の向上が期待できることから、数 値予報システムでの全球、メソ、局地解析における現 業利用に向けた開発を進めている。本項ではその開発 状況について述べる。

(2) 窓チャンネルの同化設定

新規利用する窓チャンネルは、23.8GHz(AMSU-A/ch1, ATMS/ch1) および 31.4GHz(AMSU-A/ch2, ATMS/ch2) のチャンネルとした。両センサには、同 様に大気の透過率が高い 89GHz 帯 (AMSU-A/ch15, ATMS/ch16) のチャンネルも搭載されているが、高周波 帯の輝度温度は雲氷や降水粒子による散乱の影響を受け やすいため、後述の品質管理 (QC) 処理がより複雑にな ることが判明し、今回は新規利用の対象外とした。なお、

表 4.5.1 窓チャンネルの観測誤差の設定値 [K]

衛星名/センサ名	ch1	ch2
Metop-C/AMSU-A	2.80	2.40
NOAA-15/AMSU-A	3.00	2.60
NOAA-18/AMSU-A	2.80	2.40
NOAA-19/AMSU-A	2.80	2.40
Suomi-NPP/ATMS	2.80	2.20
NOAA-20/ATMS	3.00	2.70
NOAA-21/ATMS	3.00	2.70

衛星やセンサに関する情報は WMO/OSCAR/Space² に詳細な情報が掲載されている。

同化手法は、気温チャンネルに倣って雲・降水の影響 を受けない地点 (晴天域や薄い雲域) のデータのみを利 用する晴天同化とした。晴天域を抽出するための QC 処理について、リトリーブした雲水量と散乱インデッ クスに対して複数の閾値を設けて調査したところ、下 層気温に感度のあるチャンネルと同じ閾値 (岡本 2007) を適用することで雲・降水の影響を受けたデータを十 分に除去できることが分かったため、そのような処理 とした。

また、陸面や海氷面では射出率の不確実性が大きいこ とから、海上のデータのみを同化利用する。その際、観 測視野の中心が海上であっても、視野内にわずかでも陸 面や海氷面が含まれる場合は同化利用に適さないことか ら、陸域や海氷域との境界に近いデータをなるべく利用 しないように QC 処理を一部変更した。また、さらに安 全のため、観測視野が大きくなる端寄りの FOV(Field of view, 観測視野角)³のデータについては全て同化利 用しないこととした。

観測誤差は、全球解析の 15 日間の統計から算出した 観測値と第一推定値の差 (O-B)の標準偏差をもとに衛 星ごとに設定した (表 4.5.1)。観測誤差膨張係数は、窓 チャンネルと近い周波数をもつマイクロ波イメージャ (AMSR2 等) に倣って、全球解析で 3 倍、メソ解析で 4 倍、局地解析で 6 倍とした。

これらの設定で、全球、メソ、局地の各数値予報シ ステムにおいて性能評価試験を実施した。以降では、 2024 年 7 月時点の現業数値予報システム相当の実験 (CNTL) に対する、窓チャンネルを新規に同化利用し た実験 (TEST) の検証結果を示す。

(3) 全球数値予報システムにおける性能評価試験

実験の評価期間は、夏季については 2023 年 8 月、冬 季については 2024 年 1 月とした。また、窓チャンネル

² https://space.oscar.wmo.int/spacecapabilities ³ AMSU-A および ATMS の走査方法として採用されている

クロストラックスキャンの性質によるもの (気象庁 1999)。

の変分法バイアス補正の説明変数には、海面水温、海 上風速、雲水量、軌道の上昇下降フラグ、衛星天頂角 および定数を用いた。

様々な種類の観測データについて、解析処理における 観測値と第一推定値の整合性を確認したところ、TEST では水蒸気に感度のあるマイクロ波イメージャAMSR2 やマイクロ波サウンダ ATMS(水蒸気チャンネル) など において、整合性の向上が見られた (図 4.5.3)。これは、 第一推定値として用いられる短期予測 (3~9 時間) 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。

予測精度については、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して、48 時 間後予測までの範囲で低中緯度を中心に対流圏下層の 水蒸気場の改善がみられた (図 4.5.6)。これは、GSM がもつ低中緯度帯における対流圏下層の湿潤バイアス が、窓チャンネルの新規利用によってわずかに軽減し たことに起因すると考えられる。

(4) メソ数値予報システムにおける性能評価試験

実験の評価期間は、夏季については 2023 年 7 月、冬季については 2024 年 1 月とした。窓チャンネルの変分 法バイアス補正の説明変数には、他の輝度温度データ と同様、海面水温、軌道の上昇下降フラグ、衛星天頂 角および定数を用いた。

様々な種類の観測データについて、解析処理における 観測値と第一推定値の整合性を確認したところ、TEST では水蒸気に感度のある AMSR2 や ATMS(水蒸気チ ャンネル)、およびハイパースペクトル赤外サウンダ CrIS(水蒸気チャンネル)で整合性の向上が見られた(図 4.5.4)。

予測精度については、3時間あたり5mm までの比較的弱い雨の予測において、解析雨量に対する空振り率および見逃し率が減少した。複数の事例検証結果から、降水域周辺を通過したAMSU-AまたはATMSの



図 4.5.3 全球解析における、観測値と第一推定値との差 (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) マイクロ波イメー ジャAMSR2、(b) マイクロ波サウンダ ATMS(水蒸気チャ ンネル)。縦軸はチャンネル番号またはチャンネル周波数。 標準偏差の図のエラーバーは 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。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。 窓チャンネルがもつ下層水蒸気に関する情報が予報初 期値に適切に反映され、降水域予測の精度向上に寄与 していることが確認できた (図 4.5.5)。

(5) 局地数値予報システムにおける性能評価試験

実験の評価期間は、夏季については 2023 年 7 月、冬季については 2024 年 1 月のそれぞれ 1 週間とした。窓 チャンネルの変分法バイアス補正の説明変数は、メソ 解析と同様とした。

様々な種類の観測データについて、解析処理における 観測値と第一推定値の整合性を確認したところ、メソ 解析と同様に、TESTでは水蒸気に感度のある AMSR2 や ATMS(水蒸気チャンネル)、CrIS(水蒸気チャンネル) で整合性の向上が見られた。

予測精度については、夏期間において、3時間あたり10mmまでの比較的弱い雨の予測において、空振り



図 4.5.4 メソ解析における、観測値と第一推定値との差 (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) マイクロ波イメー ジャGMI, AMSR2, SSMIS、(b) ハイパースペクトル赤外 サウンダ CrIS。CrIS は上から 9 チャンネルが水蒸気チャ ンネル、以降は気温チャンネル。縦軸はチャンネル番号ま たはチャンネル周波数。標準偏差の図のエラーバーは 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。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 4.5.5 メソ予報における前 3 時間降水量の改善事例。2023 年 7 月 7 日 15UTC を初期値とした 3 時間後の予測 (7 月 7 日 18UTC)。左上: CNTL、右上: TEST、左下: TEST と CNTL の差、右下: 解析雨量。



図 4.5.6 全球予報における、24 時間後 (上段)、48 時間後 (中段)、72 時間後 (下段) の比湿予測値の検証結果。夏期間の結果 を示す。(a)CNTL の ERA5 からの差分の平均値 [kg/kg]、(b)TEST の CNTL に対する差分の平均値 [kg/kg]、(c)ERA5 を 参照値とした TEST の CNTL に対する RMSE の変化率 [%]。(c)RMSE の変化率は、寒色系は改善、暖色系は改悪を示す。

率および見逃し率の減少が見られた。冬期間に関して は概ね中立であった。

(6) まとめと今後

AMSU-A および ATMS に搭載されている窓チャン ネルの輝度温度データを、全球、メソ、局地の各数値 予報システムで新規利用するための調査を行った。実 験結果から、予報初期における下層水蒸気場の予測精 度が改善し、メソ、局地モデルでは比較的弱い降水域 の予測精度が改善することが確認できた。

マイクロ波気温サウンダの利用に関する今後の課題 としては、観測誤差設定の最適化や、全天同化 (晴天域 だけでなく、雲域および降水域も含めた輝度温度デー タの同化利用) への移行などが挙げられる。マイクロ 波気温サウンダから得られる情報は予測精度に与える 改善インパクト (FSOI) が大きいため (気象庁 2023c)、 これらの情報をさらに適切に解析値に反映できるよう に開発を進めることが重要である。また、メソおよび 局地解析では ATMS の気温チャンネルが未利用である ため (気象庁 2023a)、バイアス補正にみられる課題へ の対処や、RTTOV 係数の更新 (第 4.5.2 項) による効 果の確認など、利用に向けた調査に引き続き取り組む 予定である。

4.5.4 全球解析における静止衛星全天放射輝度温度 (ASR)の利用

(1) 概要

気象庁では「2030年に向けた数値予報技術開発重点 計画」で目標に掲げられた豪雨防災と台風の予測精度 向上に向けて、数値予報システムの改良を進めている。 その一環として、精度の高い初期値作成のため、衛星 による輝度温度データの利用高度化に取り組んでおり、 雲や降水の影響を受けた観測データの利用の開発を進 めている。本項では、全球解析において来年度の現業 化を目標に進めている、静止気象衛星ひまわりに搭載 された AHI の全天放射輝度温度 (ASR)の利用に向け た開発について述べる。

(2) 全天同化の開発状況と赤外放射での課題

衛星観測は現代の数値予報システムにおいて不可欠 である。従来型観測は、陸上や航空路などまばらな地 域での観測であるのに対し、衛星観測は、海洋上を含 む全球的なカバレッジを有するため、予報精度の維持 に大きく貢献している。

衛星放射観測のデータ同化の歴史を振り返ると、雲 がない領域(晴天域)のみの観測(CSR: Clear Sky Radiance)に限定された同化が主流であった。これは雲が 存在すると、雲の影響によって観測される放射輝度が複 雑な特性を示し、モデルや観測演算子のバイアスや不 確実性が増すことから同化が困難であったためである。 しかし近年では、マイクロ波領域において雲や降水の 影響を受けた領域も含めて利用する全天同化の技術が 確立され (Bauer et al. 2010; Geer and Bauer 2011)、 気象庁を含めた世界の数値予報センターで現業利用さ れている。

一方、赤外領域での全天同化 (赤外 ASR) は依然とし て困難な課題である。赤外放射は雲物理やエーロゾル、 地表面特性に敏感で、その放射伝達を正確にモデル化 することは容易ではない (Geer 2019; Bormann et al. 2016)。また、雲や降水下での赤外観測は非線形性や誤 差の非ガウス性が顕著であり、観測誤差共分散行列へ の非対角成分導入や品質管理 (QC) 強化など、いまま で以上に高度な技術が必要となる。

現業数値予報センターの取り組みとしては、欧州中 期予報センター (ECMWF) が IASI や CrIS などの先 進的な赤外サウンダ観測を雲条件下で同化する試みを 行ってきた (Bormann et al. 2016)。これらの研究は予 報精度向上の可能性を示唆する一方、QC、放射伝達 モデルの改良、雲のパラメタリゼーション、バイアス 補正、計算コスト、さらには誤差モデルの高度化など、 多くの技術的障壁が残されていることも明らかにして いる。

気象研究所では赤外領域での ASR 同化手法の開発 が進められており (Okamoto et al. 2023)、気象庁数値 予報開発センターではその成果を受け、研究を現業シ ステムへ組み込むべく、開発と検証を進めている。

(3) 赤外 ASR の利用方法

ASR では、同化可能な観測数は従来の CSR の 2~ 3 倍程度に増加し (図 4.5.7)、熱帯域の水蒸気場を中心 に予報の改善が期待される。

放射伝達計算には、引き続き欧州の NWP SAF が開 発する RTTOV を用いる。RTTOV には雲粒子・降水 粒子の散乱効果を考慮する機能が実装されており、こ れを活用することで雲条件下での放射をより適切に表 現する。気象庁は RTTOV のバージョンを 10 から 13 へ更新を進めており (第 4.5.2 項参照) 赤外 ASR では 13 を使用する。これにより、雲域での放射計算を以前 よりも精緻に行うことが可能になった。開発対象のバ ンドは CSR で使用実績のあるバンド 8, 9, 10 とする。



図 4.5.7 CSR(左図赤点) と ASR(右図赤点) で同化利用する ひまわりの観測地点数の違い

ASR 同化では、観測とモデルの残差 (O-B) の分布が 非対称的かつ外れ値を含みやすく、品質管理 (QC) の 強化が不可欠である。対流域や薄い上層雲下での観測 除外などの QC を導入する。

さらに、雲や降水の影響下ではチャンネル間誤差相 関が顕著になるため、観測誤差共分散行列の非対角項 を考慮する必要がある (Geer et al. 2019; Weston et al. 2014)。このとき雲の影響に応じたパラメタリゼーショ ンを導入し、観測誤差を層別化することで、実情に即 した誤差モデルを構築する (Okamoto et al. 2023)。完 全な誤差のモデリングは依然困難であり、現時点では 誤差のインフレーションや使用チャンネルを限定する など、現実的な対策を講じている。

(4) まとめと今後

赤外 ASR の同化は先行研究から予報精度向上効果が 期待される一方、モデル水平分解能の変更に伴う誤差 特性の変化、長期的な安定性検証など、実運用への導 入には様々な検証と最適化が求められる。また、エー ロゾルや雲微物理の変更への対応、非ガウス的な観測 誤差分布への対処など、困難な課題も山積している。

2025 年度はひまわり衛星観測における赤外 ASR の 導入を目指している。その後は GOES や Meteosat な ど、他の気象衛星のデータにも順次適用する計画を進 めている。また、ハイパーサウンダの水蒸気チャンネ ルへの適用に関する研究も進んでおり、さらなる観測 の利用拡充と予報精度向上を目指している。

4.5.5 全球解析における CO2 バンドの晴天放射輝 度温度 (CSR) の利用

(1) 概要

晴天放射輝度温度 (CSR: Clear Sky Radiance) とは、 静止気象衛星搭載の赤外イメージャにより観測された 輝度温度を、小領域ごとに雲の影響を受けた画素を除 き平均したプロダクトである。現在、全球解析、メソ 解析及び局地解析では水蒸気バンドの CSR が現業利用 されており、主に対流圏中上層の水蒸気場等の解析値 と予測値の精度向上に貢献している (Kazumori 2018; 岡部 2019; 気象庁 2021b)。

CO2 バンド⁴の CSR(以降、CO2 バンド) は対流圏下 層の気温や水蒸気に感度を持つため、CO2 バンドから 大気の情報を適切に取り出すことで解析値や予測値の 対流圏下層での精度向上が期待される。これまで全球 解析における CO2 バンドの同化利用に向けた開発が 気象研究所で行われ (岡部・岡本 2020; 岡部ほか 2022; Okabe and Okamoto 2023)、熱帯から夏半球で解析値 と予測値の精度が改善することが確認されている。

本項では、気象研究所での開発成果を受けて実施し た、最新の現業数値予報システムにおける静止気象衛

⁴ 中心波長 13µm 付近の二酸化炭素の吸収帯を含むバンド。 雲頂高度及び有効雲量の推定等に活用されており (Menzel et al. 2008)、Himawari ではバンド 16 に搭載されている。

表 4.5.2 現在同化利用している水蒸気バンドと CO2 バンドの品質管理 (QC) の内容。

	水蒸気バンド			CO2 バンド
同化バンドの中心波長	約 6.2µm	約 7.0µm	約 7.3µm	約 13 3um
		(Meteosat には搭載なし)		#J 10.5µm
同化バンドの晴天率	90%以上		90%以上	
同化バンドの	1.0K 以下		1.0K 以下	
輝度温度標準偏差			Meteosat は 0.5K 以下	
同化バンドの	3.0K 以下		3.0K 以下	
グロスエラーチェック				
窓バンドの晴天率	55% LV F	60%以上	65%LZ E	65%レト
(Meteosat では適用なし)				

星 (Himawari, GOES, Meteosat) の CO2 バンドの同 化利用に関する開発状況について述べる。

(2) 品質管理手法

CO2 バンドは大気の透過率が比較的高く地表面の影響を受けやすい。そのため、地表面射出率や地表面温度 の誤差に起因して誤ったインクリメントを与える可能 性がある。特に地表面温度の誤差が地表面射出率の誤 差よりも計算輝度温度の誤差への寄与が大きく (Okabe and Okamoto 2023)、CO2 バンドの計算輝度温度を求 めるには精度の良い地表面温度を用いる必要がある。岡 部 (2020) では、窓バンド⁵から地表面温度をリトリー ブすることで第一推定値よりも高精度な地表面温度と して利用できることが示され、本開発においても CO2 バンドの輝度温度計算では窓バンドからリトリーブし た地表面温度を用いることとした。

雲域が混入した CSR を同化すると、初期値の精度が 悪化する要因となる。そのため、現在同化利用してい る水蒸気バンドでは主に雲域が混入した観測データを 取り除く品質管理 (QC)として、同化バンドの晴天率 チェック、窓バンドの晴天率チェック、輝度温度の標準 偏差チェック、及びグロスエラーチェック (観測値と第一 推定値の差 (O-B)が 3K 以下)を行っている (表 4.5.2)。 CO2 バンドに対しても水蒸気バンドと同様の QC を 適用し、雲域が混入した観測データを取り除く。ただ し、Meteosat は、プロダクトの仕様の都合上、窓バン ドの晴天率を使用した QC は適用できないため、代わ りに輝度温度の標準偏差チェックの閾値を Himawari や GOES の 1.0K から 0.5K とより厳しく設定した。

(3) 同化実験

2024年3月時点の現業全球数値予報システム相当の 実験 (CNTL) に対する、CO2 バンド⁶ を新規に同化利 用した実験 (TEST) の検証結果を示す。実験の評価期 間は、夏季については 2023 年 8 月、冬季については 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 合性の確認として、CNTL実験からの O-B の標準偏差 の変化を確認した (図 4.5.8)。CO2 バンドを利用する ことで、CO2 バンドが感度を持つ高度に対応し、対流 圏の水蒸気に感度のある MHS や ATMS、CrIS の水蒸 気チャンネルで標準偏差が小さくなった他、ラジオゾ ンデ観測で相対湿度の標準偏差が対流圏下層で小さく なった。第一推定値として用いた短期予測 (3~9 時間) について、特に水蒸気の精度が改善したことを示唆す る結果が得られた。

平均解析場は、特に気温と水蒸気で熱帯を中心に、 陸上で気温が上昇する場で水蒸気が減少し、反対に気 温が低下する場では水蒸気が増加するように変化が見 られた (図 4.5.9)。これらは、複数の海外数値予報セン ターの解析値との差異を概ね解消する方向へ変化して おり (図略)、変化の方向としては妥当であると考える。 冬期間の平均解析場についても同様な結果が得られた (図略)。

第一推定値と整合性向上が顕著に見られた MHS チャンネル 5 について、観測値と解析値の差 (O-A) の CNTL、及び CNTL と TEST の差を水平分布で確認 したところ (図 4.5.10)、夏期間ではアフリカ北部や南 アメリカで、元々のバイアスが解消する方向に変化し ていた。CO2 バンドを加えることにより、熱帯から夏 半球の陸上を中心に精度が向上したことを示唆してお り、前述の平均解析場の改善の結果とも整合的であっ た。冬期間ではアフリカ南部やオーストラリアで、バ イアスが解消する変化が見られ、同様に精度が向上し たと考える (図略)。

予測値について、海外数値予報センターの解析値を 参照値とした検証を行った。緯度別平均した予報の改 善率について、夏期間では北緯 30 度付近、冬期間では

⁵ 中心波長 10~11µm の大気の透過率の高いバンド。

⁶ Himawari-9/AHI, GOES-16,-18/ABI, Meteosat-9,-10/SEVIRI に搭載された CO2 バンドを利用する。



図 4.5.8 全球解析における、O-B の標準偏差の変化率 [%]。 TEST の CNTL に対する変化率で、赤線は夏期間、青線は 冬期間を示す。(a) マイクロ波水蒸気サウンダ、(b) マイク ロ波サウンダ (水蒸気チャンネル)、(c) ハイパースペクト ル赤外サウンダ CrIS、(d) ラジオゾンデ(相対湿度)。縦軸 はチャンネル番号、ラジオゾンデの場合は気圧高度 [hPa]。 CrIS は上から 9 チャンネルが水蒸気チャンネル、以降は 気温チャンネル。標準偏差の図のエラーバーは 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。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 4.5.9 700hPa の比湿における平均解析場の変化 (TEST-CNTL)。夏期間。単位は g/kg。

南緯 30 度付近を中心に、それぞれ気温と水蒸気の予測 精度に改善が見られた (図 4.5.11)。前述の陸上を中心 とした解析値や第一推定値の精度向上に対応し、予測 値の精度も向上していることが確認できた。

(4) まとめと今後

CO2 バンドの追加利用によって、熱帯から夏半球の 対流圏下層で解析値と予測値の精度向上が確認できた。 これまでの調査と同様の結果が、最新の数値予報シス テムを用いた実験においても得られたことから、2025 年度の全球解析における現業化を進める予定である。

今後の展望として、CO2バンドのメソ解析や局地解 析での利用が挙げられる。気象研究所では、メソ解析 での利用に向けた開発を進めており、品質管理(QC)の 改良や同化実験による予測精度の評価が行われている。



図 4.5.10 マイクロ波水蒸気サウンダ MHS チャンネル 5 の (a) 平均 O-A(CNTL) と (b) 変化 (TEST-CNTL)。夏期 間。単位は K。



図 4.5.11 対 ECMWF 解析値検証における 24 時間予測 値の改善率 [%] の緯度別鉛直分布。ECMWF の解析値 を参照値とした二乗平均平方根誤差について、 (CNTL-TEST)/CNTL を改善率とした。正の値 (暖色) は改善、負 の値 (寒色) は改悪を意味する。左から順に気温、比湿。上 段は夏期間、下段は冬期間。縦軸は気圧 [hPa]、横軸は緯 度。黒曲線は、ゼロ値の等値線。茶色の部分はデータのな い南極大陸付近についてマスキングした領域を示す。

4.5.6 全球解析におけるマイクロ波水蒸気サウンダ の利用高度化

(1) 概要

マイクロ波水蒸気サウンダは、183GHz 付近の水蒸 気の吸収帯に複数のチャンネルを持ち、対流圏中上層 の水蒸気量に感度を持つセンサである。全球解析にお いては、雲・降水域を含む観測データを同化 (全天同 化) している (気象庁 2022)。

全球解析におけるマイクロ波水蒸気サウンダの利用

手法の改良として、動的射出率推定手法を利用した地 表面に感度のあるデータの利用および、平滑化した水 蒸気サウンダの同化利用の開発を行っている。本項で はその開発状況について述べる。

(2) 動的射出率推定手法を利用した地表面に感度のあ るデータの利用

(2.1) はじめに

マイクロ波水蒸気サウンダは観測地点の水蒸気量が 少ない場合、大気の透過率が高くなり、地表面への感 度が高くなる。そのため地表面温度や地表面射出率の 設定が計算精度に大きく影響する。現在、海上では比 較的精度が良い地表面射出率モデルである FASTEM-5(Bormann et al. 2012)を使用している。一方、陸上 では気候値である CNRM Atlas(Karbou et al. 2006, 2010) もしくは一定値を使用しているが、マイクロ波 は地表面射出率が地表面の状態に強く依存するため、 気候値もしくは一定値では同化に十分な精度が得られ ない。また海氷上では利用できる気候値データセット もないため、便宜的な一定値(0.9)を設定している。こ のような状況から、可降水量が 5mm 未満の場所では 地表面射出率の精度が低い陸上や海氷上では同化利用 しないようにしており (気象庁 2022)、この品質管理 (QC)によって冬季ユーラシア大陸や海氷上では観測 データの利用数が少ない現状がある。

陸上や海氷上の射出率を比較的精度良く得る方法と して動的射出率推定手法 (DE: Dynamic Emissivity)の 有効性が先行研究により示されている (Karbou et al. 2006; Baordo and Geer 2016)。当庁においても同様の 手法を取り入れ、地表面に感度のある状況下における 水蒸気サウンダデータの利用可能性を調査した。

(2.2) 変更点について

陸上では 89GHz、海氷上では 165GHz の観測輝度 温度から DE により射出率を計算し、183GHz の射出 率として利用することとした。射出率の周波数依存性 を考慮すると 165GHz の射出率を利用するのが適切だ が、165GHz は水蒸気量が多いときは水蒸気の連続吸 収の効果によって地表面の影響が小さくなり、射出率 推定に適さなくなる。そのため乾燥していることが多 い海氷上では 165GHz を利用し、陸上では水蒸気量が 多い場合でも地表面への感度が比較的大きい 89GHz を 利用することとした。また今回導入した DE には雲の 影響や地表面温度に伴う誤差が混入するため、DE で 求めた射出率が現実的な値の範囲内(0.55~1)である こと、陸上では気候値との差が 0.15 より小さいことを チェックし、条件を満たさない場合は気候値を採用する QCを導入した。この閾値には、晴天域データだけを抽 出した時の DE と気候値の差の標準の3倍を用いてい る。GMI、SSMIS、MWHS-2 では CNRM Atlas が利 用できないため、気候値として TELSEM2 Atlas(Wang et al. 2017)を利用することとした。これらの処理の考

え方については Baordo and Geer (2016) に準拠し、当 庁のシステムでの調査に基づいて閾値を設定した。

これまで地表面に感度のある場合では、海氷上で観 測値と第一推定値の差 (O-B) が負バイアス、ユーラシ ア大陸北部では正バイアスとなっていたところ、DEを 利用することでバイアスを軽減することが確認できた ため、可降水量が 5mm より小さい場合もデータを利 用するように変更した。しかしながら透過率が高い場 合は依然として O-B のバイアスや標準偏差が大きいた め、データの利用は透過率が 0.4 より低い場合に限定 することとした。

(2.3) 動的射出率推定手法を利用した地表面に感度のあ るデータの同化実験

2022 年の現業全球数値予報システム相当の実験を CNTLとし、本変更を加えた実験をTESTとする数値 予報実験を実施した。本変更は特に冬季にデータ利用 分布が変化するため、実験期間は 2021 年 12 月 10 日 から 2022 年 2 月 11 日とし、2022 年 1 月の検証を実施 した。本実験では水蒸気サウンダ ATMS と SSMIS に DE の導入と QC の変更を適用した。

今回の変更とは独立な観測値において、第一推定値 との整合性の変化を確認したところ、マイクロ波気温 サウンダ AMSU-A、晴天放射輝度 CSR、ラジオゾン デ相対湿度において O-B の標準偏差が CNTL よりも 概ね小さくなっていた (図 4.5.12)。これは第一推定値 の気温場や水蒸気場が改善したことを示す結果である。 また、AMSU-A/ch6、Himawari-CSR/ch3、850hPaの ラジオゾンデ相対湿度ではユーラシア大陸や北極など の海氷域を中心に O-B のバイアスを解消する方向に変 化していることが確認できた (図 4.5.13)。これは北極 周辺のモデルの高温バイアス、ユーラシア大陸上のモ デルの乾燥バイアスを解消する方向へ変化したことを 示す結果である。ECMWF 解析値を用いた予測精度の 検証では、特にユーラシア大陸や北極の海氷周辺にお いて水蒸気場が ECMWF 解析値に近づく変化をした ことが確認できた。



図 4.5.12 観測値と第一推定値との差 (O-B)の標準偏差の、 TEST の CNTL に対する変化率 [%]。(a) はマイクロ波気 温サウンダ AMSU-A、(b) は晴天放射輝度 CSR、(c) は ラジオゾンデ相対湿度について示す。縦軸はチャンネル番 号または気圧高度。標準偏差の図のエラーバーは 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。



図 4.5.13 (a),(b),(c) は CNTL における観測値と第一推定値との差 (O-B) の実験期間平均 。(d),(e),(f) は O-B の実験期間平 均の TEST-CNTL の結果。(a),(d) はマイクロ波気温サウンダ AMSU-A/ch6、(b),(e) は晴天放射輝度 Himawari-CSR/ch3、 (c),(f) は 850hPa ラジオゾンデ相対湿度について示す。

(3) 平滑化した水蒸気サウンダの同化利用

(3.1) はじめに

水蒸気サウンダの観測データはQCでの間引きによっ て、入電しているデータの1%程度のみを同化利用し ている。これはデータ同化において観測誤差の水平相 関を考慮していないために水平相関が無視できる程度 に間引く必要があること、計算機資源を節約すること が理由である。もう一つの課題として、水蒸気サウン ダの観測データは全天同化を行っているが、実際には モデルと観測で雲の表現の乖離が大きいため、雲の影 響を受けたデータの多くは QC で取り除いて利用して いるという現状がある。この雲表現の乖離の原因の一 つとして、代表性誤差に起因するものが考えられる。同 じ全天同化をしているマイクロ波イメージャでは、代 表性誤差の減少を狙って、全球モデルのインナーモデ ル格子 (約 55km) に平滑化した輝度温度を同化してい るが (気象庁 2021a)、水蒸気サウンダでは平滑化して いない。また、Duncan et al. (2024) は水蒸気サウン ダを平滑化して同化することで水蒸気サウンダの代表 性誤差を減らし、データ同化の効果を高めることを示 した。そこで当庁においても水蒸気サウンダに平滑化 を導入し、より雲の影響を受けたデータの利用可能性 を調査した。

(3.2) 変更点について

マイクロ波イメージャと同じ平滑化をマイクロ波水 蒸気サウンダに適用した。マイクロ波水蒸気サウンダ の多くはクロストラックスキャンであるため、スキャ ン位置に応じて観測視野の大きさやスキャン間隔が異 なるが、これらに関しては今回考慮していない。

図 4.5.14 は雲の影響の指標である散乱インデックス SI(気象庁 2021a 参照) を観測値とモデル計算値の両方

で算出し、一定期間の頻度分布を描画したものである。 値が大きいほど雲の影響が大きいことを示している。 CNTL では観測に比べてモデルのほうが SI が大きいサ ンプルが少ないが、TEST ではその乖離が少なくなっ ていることが確認できる。このことから、平滑化によっ て観測とモデルの雲表現の乖離が小さくなることが確 認できたため、雲に感度のあるデータをより利用でき るように通常の O-B によるグロスエラーチェックでは なく、観測誤差で規格化した O-B によるグロスエラー チェックに変更した。全天同化している水蒸気サウン ダでは観測誤差が雲の影響に応じて大きくなるように 設定しているため、雲の影響が大きくなるとグロスエ ラーチェックの閾値も大きくなり、観測とモデル間の 雲の位置ずれによる大きな O-B のデータも許容するよ うになる変更である (マイクロ波イメージャでは既に 導入済み)。ただし完全に乖離がなくなったわけではな いため、観測とモデルの SI が 25 未満のデータのみを 利用することにした。



図 4.5.14 観測の SI(赤線) およびモデルの SI(青線) のヒス トグラム。(a) は CNTL、(b) は TEST の結果を示す。

(3.3) 平滑化した水蒸気サウンダの同化実験

平滑化した水蒸気サウンダデータの同化インパクト を調査するために、2023年3月時点の現業全球数値予 報システム相当 (CNTL) をベースに、利用している水 蒸気サウンダ全て (ATMS、MWHS-2、MHS、GMI、 SSMIS) に平滑化を適用した実験 (TEST) を実施した。 また、より雲の影響を受けたデータの利用に関する QC 変更の効果を確かめるために、平滑化無しで QC のみ を変更した実験 (CNTL-CL)、平滑化した上で QC の 変更も行った実験 (TEST-CL) も実施した。実験期間 は 2023年6月10日~8月11日とし、7月の検証を実 施した。

CNTLに対して TEST では、CSR において O-B 標準 偏差が減少傾向であった (図 4.5.15(a))。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、ECMWF の再解析データである ERA5 を比較対象とした検証 では解析値における水蒸気混合比の RMSE が改善し ており、水蒸気場の改善を示唆する結果であった (図 4.5.15(b))。改善の効果はわずかであるものの、平滑化 により同化利用する観測データの数を増やすことなく、 効率良く観測データの持つ情報を引き出せるようになっ たと考えられる。なお、平滑化により水蒸気サウンダの 代表性誤差が小さくなり、O-B 標準偏差が小さくなっ たため、設定する観測誤差を小さくできる余地があっ



図 4.5.15 (a) 晴天放射輝度 CSR の観測値と第一推定値との 差 (O-B) の標準偏差の TEST の CNTL に対する変化率。 (b)ERA5 を参照値とした解析値における水蒸気混合比の 帯状平均の RMSE 改善率。寒色は予測精度の改善、暖色 は悪化を示す。網掛けは信頼区間 95%で有意であることを 示す。



図 4.5.16 観測値と第一推定値との差 (O-B)の標準偏差の CNTL-CLのCNTLに対する変化率 (緑線)および TEST-CLのTEST に対する変化率 (赤線)。(a) はマイクロ波イ メージャAMSR2、(b) は晴天放射輝度 CSR について示 す。縦軸はチャンネル番号または周波数。標準偏差の図の 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。

たが、平滑化の効果を切り分けて調査するために今回 は観測誤差の変更は行わなかった。

次に雲の影響を受けたデータの利用に関する QC 変 更の効果を確認した。CNTL に対して CNTL-CL では AMSR2 において O-B 標準偏差が大きくなっており、 第一推定値の下層水蒸気場の悪化を示す結果であった。 一方で、TEST に対して TEST-CL では AMSR2 にお ける O-B 標準偏差に大きな変化は見られず、第一推定 値の下層水蒸気場について中立を示す結果であった。 また、CSR については平滑化の有無に関わらず O-B 標準偏差が減少しており、雲に感度のあるデータを増 やしたことで第一推定値の中上層の水蒸気場が改善し たことを示す結果となった (図 4.5.16)。ERA5 を用い た検証では、CNTL に対して CNTL-CL では解析値に おける熱帯付近の 500~200hPa 高度場が悪化していた が、TEST に対して TEST-CL では悪化が解消してお り概ね中立であった (図 4.5.17)。またラジオゾンデを 用いた北半球の 500hPa 高度場の検証では、CNTL に 対して CNTL-CL では中立から若干の悪化であった一 方、TEST に対して TEST-CL では中立から改善の結 果となった (図 4.5.18)。以上から、平滑化による代表 性誤差の減少及び QC の変更によって、より多くの雲 の影響を受けたデータを利用できるようになることを 確認できた。



図 4.5.17 ERA5 を参照値とした解析値におけるジオポテン シャル高度の帯状平均の RMSE 改善率。寒色は予測精度の 改善、暖色は悪化を示す。網掛けは信頼区間 95%で有意で あることを示す。(a) は CNTL に対する CNTL-CL の改 善率、(b) は TEST に対する TEST-CL の改善率を示す。



図 4.5.18 ラジオゾンデ観測を参照値とした北半球 500hPa 高度の RMSE 変化。0 より下で RMSE が減少し改善したこ とを示す。緑線は (CNTL-CL)-(CNTL)、赤線は (TEST-CL)-(TEST) の結果を示す。

(4) まとめと今後

全球解析におけるマイクロ波水蒸気サウンダの利用 手法改良として開発している、動的射出率推定手法を 利用した地表面に感度のあるデータの利用および、平 滑化した水蒸気サウンダの同化利用についてそれぞれ の性能評価を行った。

動的射出率推定手法を利用することで、これまでデー タを利用できていなかった冬季ユーラシア大陸上や海 氷上においても観測データが利用できるようになり、 当該領域において下層水蒸気場が改善する結果が得ら れた。

平滑化した水蒸気サウンダの同化は水蒸気場の予測 精度改善に寄与した。また平滑化することで、観測と モデルの雲表現の乖離が小さくなり、雲に感度のある データを利用した際に見られていた下層水蒸気場や高 度場の悪化が解消し、中上層の水蒸気場の改善のみが 得られるようになった。

今後、現業化に向けて両者を合わせた実験を実施し、 平滑化した状態での動的射出率推定手法の有効性など を調査する予定である。

4.5.7 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

2029 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(Geostationary HiMawari Sounder)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。

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、技術開発を進めている。本 項ではその開発状況について報告する。

(2) 開発方針

気象庁では、赤外サウンダの利用技術開発のため、 ひまわり 10 号が東経 140 度の静止軌道から GHMS に よる観測を行った場合を想定した模擬観測データを作 成した。模擬観測データは ECMWF の再解析データ である ERA5 を入力し、放射伝達モデル RTTOV で輝 度温度を計算して作成されている。数値予報開発セン ターでは、この模擬観測データを用いて、観測システ ムシミュレーション実験 (OSSE: Observation System Simulation Experiment, 石橋 2013) を実施することと した。

ひまわり 10 号搭載赤外サウンダによる予測精度改善 効果の検証を目的とした OSSE は岡本ほか (2020) で既 に実施済みであるが、本調査では、GHMS の現業利用 に向けた衛星データ同化システムの高度化を目的とし て OSSE を再度実施する。OSSE によって得られる解 析値および予測値を、模擬観測データ作成時に真値と みなした ERA5 と比較することによって、観測データ の情報をより適切に解析値に反映できるような QC お よび同化処理の設定を精査することが主な狙いである。

岡本ほか (2020) との実験設定の違いは、模擬観測 データに対しても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じ設定で QC 処理を行 う点⁷、全球解析だけでなく、メソ、局地解析において も輝度温度データを晴天域で直接同化する点⁸などが挙 げられる。

本調査で用いた模擬観測データの具体仕様について は、上述の別所ほか (2024) を参照されたい。

(3) 開発進捗

OSSE を構築するにあたって、まずは同化利用する チャンネルを選択した。気温、水蒸気、オゾンおよび その他の大気分子への鉛直方向の感度を示すヤコビア ンや、チャンネルの持つ情報の自由度 (DFS: Degree of Freedom for Signal, Cardinali et al. 2004) を参照し、 Collard (2007) の手法で気温または水蒸気に感度のあ るチャンネルを合計 86 個選択した。同化システムに与 える観測誤差は、観測値と第一推定値の差 (O-B) の標 準偏差や極軌道衛星搭載の赤外サウンダでの現在の設 定値をもとに決定した。

その後、2024 年 7 月の現業全球数値予報システムに 対して OSSE を実施した。実験期間は 2021 年 7 月 10 日から 9 月 11 日の 2ヶ月間とした。以降では、ルーチ ン相当の実験 (CNTL) に対する OSSE の検証結果を 示す。

予測精度について、CNTL および模擬観測データの 入力元である ERA5 のいずれからも独立していると考 えられる NCEP の全球数値予報モデル GFS の予報初 期値を参照値とした検証結果では、少なくとも3日先 までの予測において、低中緯度域の気温場や水蒸気場 の予測精度が改善することが確認できた (図 4.5.19)。

GHMS の模擬観測データに含まれる情報が解析値お よび予測値に与えた影響を詳細に調査するため、ERA5 を参照値とした検証を行ったところ、OSSE では多く の領域で GSM と ERA5 の差を打ち消す方向に解析 値および予測値が変化していることが確認できた (図 4.5.20)。一方で、南半球の低中緯度域では、GSM と ERA5 の差が拡大する方向に解析値が変化している領 域が見られた (同図の破線枠内)。

この領域について詳しく調べたところ、低層雲が存 在する観測シーンにおいて、CO2 Slicing 法による晴

⁷ 岡本ほか (2020) では、雲がないと仮定して計算した晴天 の輝度温度観測値 (現実の同化処理においては得られない) を、晴天判定処理や同化に用いている。

⁸ 岡本ほか (2020) では、メソ解析では ERA5 の気温およ び水蒸気の鉛直プロファイルを同化している。局地解析では OSSE を実施していない。



図 4.5.19 全球予報における NCEP/GFS 解析値を参照値とした OSSE の CNTL に対する RMSE 改善率。上段が気温 [K]、 下段が比湿 [kg/kg] の改善率で、左から順に、24 時間予測、48 時間予測、72 時間予測を示す。それぞれの図の縦軸は気圧 [hPa]、横軸は緯度 [°]。暖色系は改善、寒色系は改悪を示す。

天域判定 (亀川・計盛 2017) で対流圏下層に感度のある チャンネルが棄却され、対流圏中上層に感度のあるチャ ンネルのみが同化された結果、対流圏下層に関する情 報が中上層に比べて不足し、中上層での解析インクリ メントが下層にまで影響している可能性があることが 分かった。この問題への対処として、CO2 Slicing 法で 設定しているパラメータを再設定することで、下層の 解析値への影響を軽減できることを確認している。中 長期的な対処案としては、雲域での赤外サウンダデー タの取り扱いを高度化し、対流圏下層に感度のあるチャ ンネルを含めより多くのデータを同化利用することな どが挙げられる。

また、メソ数値予報システムにおいても OSSE を実施した。実験構築にあたっては、気象庁 (2024a) に倣っ て、メソモデルのモデル上端高度 (約 5hPa) より上層 に感度のある GHMS のチャンネルを除いて、気温また は水蒸気に感度のある計 55 チャンネルを選択した (図 4.5.21)。実験結果については現在確認中である。



図 4.5.20 全球予報における予報初期値と ERA5 の比較。上 段が気温 [K]、下段が比湿 [kg/kg] で、左図は CNTL と ERA5 の差分、右図は OSSE と CNTL の差分を示す。そ れぞれの図の縦軸は気圧 [hPa]、横軸は緯度 [°]。

(4) まとめと今後

赤外サウンダの利用技術開発のために整備された GHMS の模擬観測データを用いて、全球数値予報シ ステムにおいて OSSE を実施した。実験結果から、雲 域での赤外サウンダデータの取り扱いに改良の余地が あることが示唆され、課題への対処に取り組んでいる。 メソおよび局地数値予報システムにおいては、各シス テムの特性を踏まえた OSSE の実施と検証を今後予定 している。

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 年打ち上げ予定の欧州の静止気象衛星 MTG-S1 搭載の赤外サウンダ IRS の観測データを用いた調査も 実施予定である。模擬観測データでは観測器の雑音特 性等が考慮されていないため、これら実観測データを 用いた調査も重要である。



図 4.5.21 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。灰色線が全球解析で のみ同化利用したチャンネル、赤色線または青色線が全球 およびメソ解析で同化利用したチャンネルを示す。それぞ れの図の縦軸は気圧 [hPa] で、横点線はメソモデルの上端 高度 (約 5hPa) を示す。

4.5.8 全球解析における極域 AMV の利用拡充(1) 極域 AMV について

大気追跡風 (AMV) は、気象衛星の観測する可視や赤 外の時間的に連続した画像を用いて雲や水蒸気のパター ンを時間的に追跡することにより算出される。AMV は、 ひまわり 8 号・9 号をはじめ、様々な衛星の観測画像 を利用して各国の衛星運用機関や研究機関で作成され ており、従来型観測のように観測データが乏しい海洋 上などにも多くのデータが存在するため、これらを数 値予報システムに同化利用することで、広範囲に風の 観測情報を取り込むことができる。

一方、極域を含む高緯度域については、ひまわり8 号・9号のような静止気象衛星による観測が困難である ため、NOAA や Metop といった極軌道衛星の赤外画 像が AMV の算出に用いられ、単一の極軌道衛星が観 測する画像であっても、極域については時間的に連続 した画像の間に観測領域の重なりが存在するため、こ の領域で AMV を算出することができる(以下、極域 AMV)。

北極海や南極付近の上空では航空機や高層観測デー タが非常に少ないため、極域 AMV を GSM の初期値 解析で利用することにより、対流圏内の風や気温を中 心に高緯度域の解析場を改善する効果が得られ、気象 庁の数値予報システムの予測精度向上に寄与している。

図 4.5.22 に、現在全球解析で現業利用している AMV の分布を示す。全球解析では、概ね 60°より低緯度で は静止気象衛星の AMV、高緯度では極域 AMV を利 用している。

本項では、全球解析における極域 AMV の利用拡充 に向けた開発について報告する。



図 4.5.22 全球解析で利用している AMV の分布。

(2) 新規に利用する極域 AMV データ

GSM の初期値解析では、従来から Terra や Aqua に 搭載された MODIS や NOAA・Metop 衛星に搭載さ れた AVHRR の赤外画像から算出される極域 AMV を 利用している (山下 2015)。最近では、2 機の Metop 衛星(Metop-B 及び Metop-C) で得られる約 50 分間 隔の AVHRR の赤外画像から算出される AMV (Dual-Metop AMV) と米国の Suomi-NPP や NOAA-20 の VIIRS の赤外画像から算出される AMV を、それぞれ 2022 年 6 月 30 日と 2023 年 3 月 14 日に極域 AMV とし て現業利用を開始した (Nonaka 2023; 気象庁 2024b)。

現在 GSM の初期値解析で利用している極域 AMV の衛星の中には、設計寿命を大きく超えて運用されて いるものがあり、米国の NOAA-15,18,19 については 2025 年 9 月までの運用とされ(2024 年 12 月現在)⁹、 NOAA/NESDIS でこれらの衛星から算出される AMV は、2024 年 4 月に配信が終了した。また、欧州の Metop-B についても打ち上げから 10 年以上経過しており、 Metop-B から算出される現在利用中の極域 AMV に は、単独の Metop-B で CIMSS で作成している AMV と EUMETSAT で作成している Dual-Metop AMV が あるが、これらは近い将来に利用できなくなることが 予想される。このため、GSM 初期値の解析精度を維 持・改善するためには、継続して新規の極域 AMV を 追加・拡充しておくことが重要である。

現在、新規に利用できる極域 AMV としては、EU-METSAT より配信されている Metop-B,C/AVHRR の AMV (以下、Metop AMV) と NOAA/NESDIS より 配信されている NOAA-21/VIIRS の AMV が挙げられ る。Metop AMV については、2025 年 9 月の利用開始を 目標に現在開発を進めているところである。NOAA-21 の AMV は、すでに全球解析で利用している Suomi-NPP や NOAA-20 の AMV と同様のアルゴリズムによ り算出され、2024 年 3 月より配信されている。これに ついても品質を確認した上で順次利用する計画として いる。

次に、Metop AMV の全球解析での利用に向けた開 発状況について簡単に報告する。

(3) Metop AMV の利用に向けた開発状況

Metop AMV は、Metop-B,C それぞれの衛星で観測 された約 100 分間隔の 2 枚の AVHRR の赤外画像を使っ て算出される (Hautecoeur and Borde 2017)。Metop-B と Metop-C の AMV の算出には、ともに EUMETSAT で開発された同じアルゴリズムが用いられており、配 信データの品質に衛星間の差異は見られなかったこと から、Metop-C だけでなく Metop-B の AMV につい ても同じ品質管理 (QC)を適用し、あわせて利用開始 する予定である¹⁰。

Metop AMV は、図 4.5.23 に示すように、北極海や 南極海付近で対流圏上層から下層まで広くデータが分 布しており、これらの領域で利用する観測データの拡

⁹ https://space.oscar.wmo.int/satellites/view/ noaa_15

¹⁰ 2025 年に打ち上げが計画されている Metop の後継機 (Metop-SG) が正式に運用されるまで、Metop-B は 2026 年 以降も運用が継続される可能性がある。



図 4.5.23 2023 年 8 月 1 日 12UTC の全球解析で利用される Metop AMV の分布。開発中の QC 及び間引き処理を適用した 後のもの。橙色と赤色はそれぞれ Metop-B と Metop-C の AMV を示している。左から順に水平分布、緯度高度別の分布、 高度別の頻度分布を示している。上段は 60°N 以北、下段は 60°S 以南の分布。

充が期待できる。

Metop AMV の新規利用による GSM の解析場や予測 場への効果を確認するため、2023 年 3 月時点の現業全球 数値予報システムを使い、全ての極域 AMV を棄却した 実験をコントロール (CNTL)、CNTL に Metop AMV (Metop-B と Metop-C の両方)を追加した実験をテス ト (TEST) として性能評価試験を実施した。2022 年 12 月 10 日から 2023 年 2 月 11 日までを冬実験、2023 年 6 月 10 日から 2023 年 8 月 11 日までを夏実験とし て解析予報サイクルを行い、それぞれ 2023 年 1 月と 2023 年 7 月を対象として 12UTC 初期値の予測につい て検証を行った。

図 4.5.24 は、GSM 初期値を参照値とした CNTL に対 する東西風の予測値の RMSE 改善率 (*CNTL_TEST* × 100 [%])の東西帯状平均を示している。南北の高緯度 域で RMSE が減少しており、Metop AMV を利用する ことにより予測初期の対流圏内の風速場が改善してい ることがわかる。

(4) まとめと今後

現在全球解析で利用している極域 AMV については、 衛星の運用終了などにより利用データ数の減少が予想 され、利用する極域 AMV を拡充しておく必要がある。 このため、EUMETSAT の配信している Metop AMV を新規利用するための開発を行っている。Metop AMV を GSM の初期値解析で利用することにより、他の極



図 4.5.24 Metop AMV を利用した場合 (TEST)の CNTL に対する 24 時間と 48 時間の東西風の予測値の東西帯状平 均 RMSE 改善率 [%]。図の縦軸は気圧 [hPa]、横軸は緯度 [[°]]である。暖色系は改善、寒色系は改悪を示している。上 段は 2023 年 1 月、下段は 2023 年 7 月の期間の検証結果。

域 AMV と同様に高緯度域の解析場を改善し、予測精 度向上が期待できる結果が得られた。今後さらに利用 方法について検討を行い、現業化に向けた試験を実施 する方向で開発を進めている。

4.5.9 アメダス湿度計データの観測誤差の調整 (メ ソ解析・局地解析)

(1) 概要

線状降水帯などに伴う集中豪雨の予測精度の向上に は大気下層の水蒸気の監視能力の強化及び、その観測 のデータ同化での利用による初期値の精度向上が重要 である。そのため、2020年3月以降、全国のアメダス 観測所への湿度計の設置が順次進められており、最終 的には約700地点のアメダス観測所に湿度計が設置さ れる予定である。整備されたアメダス湿度計は、現業 メソ解析や現業局地解析で2023年3月に同化利用開 始されており、2024年6月には、2023年7月までに 整備された433地点のアメダス湿度計が同化利用され ている。また、アメダスに設置された湿度計では相対 湿度(RH: Relative Humidity)を観測しているが、メ ソ解析・局地解析においては地上比湿に変換して同化 利用している(気象庁 2024c)。

アメダス湿度計は整備時期によって異なる2種類の 型式の測器が整備されている。両者の整備が進み、数 百地点規模、年単位の時間スケールで詳細な統計調査 が可能になったことから、それぞれの特性の統計的な 調査を行った結果、それぞれの測器の特性の違いから 高湿時における観測精度が乾燥時よりも相対的に低い ことが示唆された。そのため、高湿時の観測精度の低 下に対応するために高湿時の地上比湿の観測誤差を大 きく設定した。本項では、湿度計のデータ品質及び観 測誤差の調査内容とそのメソ・局地数値予報システム へのインパクトについて報告する。

(2) 湿度計のデータ品質

アメダスにはこれまでに rotronic MP-102H と VAISALA HMP155 の2種類の湿度計が整備されて いる。HMP155 にはヒーターがついているなどの測器 の構造やそれに伴う内部処理アルゴリズムの違いのた め MP-102H と HMP155 の測定特性が異なっている。

- rotronic MP-102H
 - ヒーターなし
 - 測定誤差:±0.8%RH(23°C、0−100%で結露 なきこと)
- VAISALA HMP155
 - ヒーターあり
 - 測定誤差:±1%RH(15-25°C、0-90%)
 - $\pm 1.7\%$ RH(15–25°C, 90–100%)
- (参考)VAISALA HMT333
 - ヒーターなし
 - 測定誤差:±1%RH(15−25°C、0−90%)
 - $\pm 1.7\%$ RH(15–25°C, 90–100%)
 - (地上気象官署及び特別地域気象観測所で 使用)

図 4.5.25 にアメダス湿度計の観測値、地上気象官署 及び特別地域気象観測所の湿度計の観測値、局地解析 の第一推定値における相対湿度の頻度分布を示す。こ れらを比較すると、90%以下では測器・モデルともに 同じような頻度分布であるが、MP-102Hは100%を観 測する割合が極端に多い。一方でHMP155は加温して いるため100%をほとんど観測せず、95%付近に他の測 器の頻度分布よりも大きなピークがある。



図 4.5.25 2023 年 3 月 10 日から 2024 年 2 月 29 日の相対湿度 観測、第一推定値の頻度分布。左上は rotronic MP-102H、 右上は VAISALA HMP155、左下は VAISALA HMT333、 右下は地上湿度観測点における局地解析の第一推定値の頻 度分布を表す。縦軸は頻度(割合)を、横軸は相対湿度[%] を示す。

次に地点ごとの観測時系列を確認した。MP-102H は 夜間に 100%を観測することが多かったものの、相対 湿度の増加はほとんど夜間の気温低下で説明できる程 度であった。また、100%を観測する割合が極端に多い 観測点は水田の近隣など、夜間以外でも湿度が高いと 考えられる地点であった。これに対して HMP155 は雨 が降り続いているときや水田の近くであっても 97%程 度までしか湿度が上がらなかった。晴れている日の日 中など、低湿度環境においては両測器の特性の差は小 さかった。

以上の調査からアメダス湿度計は 90%以上の高湿域 で測器ごとのデータ特性が異なり、乾燥時よりも観測 誤差が大きいことが示唆される。

(3) 開発の内容

前述したアメダス湿度計の特性調査の通り、アメダ ス湿度計は高湿時は乾燥時よりも相対的に観測精度が 落ちるという特性が確認された。しかし、高湿時でも ある程度高湿であるという情報を持っており、欠測扱 いとするよりも観測精度の低下を考慮して利用するべ きだと考えられるため、90%以上を観測した場合は地 上比湿の観測誤差を増加させて対処した。

現在のアメダス地上比湿の観測誤差は、メソで 0.7g/kg(RHに換算して 25°C で 3.6%に相当)、局地で 0.75g/kg(同じく、3.8%)と設定している。また、メソ 解析において、モデル面第 1 層の気候学的予報誤差標 準偏差は、夏の陸上では RH に換算して 5%程度となっ ている。高湿域では観測誤差が大きいと考えられるの で、モデルの予報誤差や水蒸気の代表性誤差を考慮し て、100%における湿度計の観測誤差をモデルの 2 倍程 度、すなわち現状の 3 倍とした。90%までは従来どお りの観測誤差、90%から 100%までは、90%で現状の 1 倍、100%で現状の 3 倍となるように線型に増加させた。

(4) メソ・局地数値予報システムへのインパクト

メソ解析において、2023 年 3 月時点の現業メソ数値 予報システム相当に NOAA-21/ATMS・CrIS 及び 2022 年度以降に整備された整備のアメダス湿度計データを 追加したものを CNTL、CNTL に上記の高湿時の観測 誤差調整を行ったものを TEST として、2023 年 6 月 26 日から 2023 年 7 月 25 日までの期間で性能評価試験 を行った。

図 4.5.26 に観測誤差調整による比湿の解析値・予測 値の予報時間ごとの精度検証を示す。高湿域の観測誤 差を増加させることで、予測初期の地上比湿の高湿バ イアスが改善し RMSE が改善することを確認した。ま た、水蒸気が減って地上下向き長波放射が減ることで、 地上気温は高温バイアスが改善されて平均誤差、RMSE のどちらも予測初期を中心に改善することを確認した (図略)。



図 4.5.26 メソ数値予報システムの性能評価試験における比 湿の解析値・予測値の予報時間ごとの精度検証(対地上気 象官署及び特別地域気象観測所の湿度計)。上段左から平 均誤差の推移、平均誤差の変化量、下段左から RMSE の 推移、RMSE の変化量を示す。誤差の推移図では青線は 観測誤差調整なし、赤は観測誤差調整ありを示し、変化量 図では観測誤差調整ありから観測誤差調整なしを引いたも のを示す。縦軸は平均誤差 [g/kg]、RMSE [g/kg]を示し、 横軸は予報時間 (0-78h) を示す。

降水予測については弱い雨の空振りが減り、ETS が 改善した(図略)。図 4.5.27 に九州南部の梅雨前線近傍 で 176 mm/3h の降水を解析した 2023 年 7 月 3 日 18 時の 3 時間前からの予測事例について示す。この事例 では九州南部で同化した地上湿度観測値の観測誤差を 大きくしたことや、サイクルによる影響で地上比湿の 第一推定値が乾燥したことで降水域付近の水蒸気量を 少なく解析したことにより、CNTL で見られた宮崎県 での空振りを TEST では改善することを確認した。



図 4.5.27 2023 年 7 月 3 日 18 時における前 3 時間降水量 [mm/3h]の分布と天気図。上段左から天気図、観測誤差調 整なしのメソ予報予測値、下段左から観測誤差調整ありメ ソ予報予測値、解析雨量を示す。予測値は 2023 年 7 月 3 日 15 時初期値の 3 時間予測。

局地数値予報システムにおいては予測初期において 地上比湿の乾燥バイアスが改善するものの、雨やその 他の要素は変化が小さいことを確認した (図略)。

(5) まとめと今後

アメダス湿度計は整備時期により異なる種類の測器 が整備されている。今回の検証から測器の特性の違い により高湿時の測定誤差が大きいことが示唆されたた め、アメダス地上比湿の観測誤差を大きく設定して対 応した。メソ解析・局地解析において観測誤差の調整 をしたところ、予測初期の湿潤バイアスや RMSE が改 善した。また、メソ解析の空振り事例について、降水 域付近の水蒸気量を少なく解析したことにより空振り が改善する事例を確認できた。これらの結果から、高 湿時におけるアメダス地上比湿の観測誤差調整につい て、2025 年 2 月に現業化をする予定である。

参考文献

- Baordo, F. and A. J. Geer, 2016: Assimilation of SS-MIS humidity - sounding channels in all - sky conditions over land using a dynamic emissivity retrieval. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 142, 2854–2866.
- Bauer, P., A. J. Geer, P. Lopez, and D. Salmond, 2010: Direct 4D-Var assimilation of all-sky radiances: Part I. Implementation. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **136**, 1868–1885.

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.

Bormann, N., A. J. Geer, and S. English, 2012:

Evaluation of the microwave ocean surface emissivity model FASTEM-5 in the IFS. *ECMWF Tech. Memo.*, **667**, 18pp.

- 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, doi: 10.1002/qj.2774.
- Cardinali, C., S. Pezzuli, and E. Andersson, 2004: Influence matrix diagnostic of a data assimilation system. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 130, 2767– 2786.
- Collard, A. D., 2007: Selection of IASI channels for use in numerical weather prediction. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **133**, 1977–1991.
- Duncan, D. I., N. Bormann, A. J. Geer, and P. Weston, 2024: Superobbing and Thinning Scales for All-sky Humidity Sounder Assimilation. *Mon. Wea. Rev.*, **152**, 1821–1837, doi:10.1175/ MWR-D-24-0020.1.
- Eyre, J. R., 1991: A fast radiative transfer model for satellite sounding systems. ECMWF Tech. Memo., 176, 28pp.
- Geer, A. J. and P. Bauer, 2011: Observation errors in all-sky data assimilation. *Quart. J. Roy. Meteor.* Soc., 137, 2024–2037.
- Geer, A. J., S. Migliorini, and M. Matricardi, 2019: All-sky assimilation of microwave humidity sounders sensitive to mid/upper tropospheric moisture and cloud. *Atmospheric Mea*surement Techniques, **12**, 4903–4929, doi:10.5194/ amt-12-4903-2019.
- Geer, A. J., 2019: Correlated observation error models for assimilating all-sky infrared radiances. *Atmospheric Measurement Techniques*, **12**, 3629– 3657.
- Hautecoeur, O. and R. Borde, 2017: Derivation of Wind Vectors from AVHRR/MetOp at EUMET-SAT. J. Atmos. Oceanic Technol., 34, 1645–1659.
- 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, 70–72.
- 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.
- 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.
- Karbou, F., E. Gérard, and F. Rabier, 2006: Microwave land emissivity and skin temperature for

AMSU-A and -B assimilation over land. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **132**, 2333–2355, doi:10.1256/qj. 05.216.

- Karbou, F., E. Gérard, and F. Rabier, 2010: Global 4DVAR assimilation and forecast experiments using AMSU observations over land. Part I: Impacts of various land surface emissivity parameterizations. Wea. Forecasting, 25, 5–19.
- Kazumori, M. and S. J. English, 2015: Use of the ocean surface wind direction signal in microwave radiance assimilation. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 141, 1354–1375, doi:10.1002/qj.2445.
- Kazumori, M, 2018: Assimilation of Himawari-8 Clear Sky Radiance Data in JMA 's Global and Mesoscale NWP System. J. Meteor. Soc. Japan, 96B, 173–192.
- 気象庁, 1999: 衛星測器. 数値予報課報告・別冊 45 号 付録, 気象庁予報部, 117–120.
- 気象庁, 2021a: マイクロ波輝度温度全天同化とアウ ター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, 2021b: 局地解析におけるひまわり 8 号 CSR データ利用拡大.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, 60-61.
- 気象庁, 2022: 全球解析における全天同化マイクロ波水 蒸気サウンダデータ利用の拡充.数値予報開発セン ター年報 (令和3年), 気象庁数値予報開発センター, 40-43.
- 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: 放射伝達モデル RTTOV の更新. 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, 85-87.
- 気象庁, 2023c: 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,2024a: 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, 2024b: 全球解析における大気追跡風 (AMV) の利用拡充. 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, 53-55.
- 気象庁, 2024c: メソ解析および局地解析におけるアメダ ス湿度計データの新規利用. 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, 60–62.
- Menzel, W. P., R. A. Frey, H. Zhang, D. P. Wylie,

C. C. Moeller, R. E. Holz, B. Maddux, B. A. Baum, K. I. Strabala, and L. E. Gumley, 2008: MODIS global cloud-top pressure and amount estimation: Algorithm description and results. *J. Appl. Meteor. Climat.*, **47**, 1175–1198, doi:10.1175/2007JAMC1705.1.

- Nonaka, K., 2023: Operational use of Dual-Metop AMVs at high latitudes in JMA's global NWP system. WGNE. Res. Activ. Earth Sys. Modell., 53, 1.09.
- 岡部いづみ, 2019: ひまわり 8 号のバンド 9, 10 の CSR データの追加利用. 令和元年度数値予報研修テキス ト, 気象庁予報部, 61.
- 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.
- 岡部いづみ, 岡本幸三, 2020: 気象庁全球解析システム を用いた静止気象衛星 CO2 バンドの晴天放射輝度 温度データ同化インパクト調査. 日本気象学会 2020 年度春季大会予稿集, 304.
- 岡部いづみ, 岡本幸三, 石橋俊之, 2022: リトリーブ地 表面温度を用いた静止気象衛星 CO2 バンドの晴天 放射輝度温度データ同化. 日本気象学会 2022 年度春 季大会予稿集, 199.
- Okabe, Izumi and Kozo 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.
- 岡本幸三, 2007: ATVOS 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, 大和田浩美, 藤田匡, 別所康太郎, 高橋昌也, 太田芳文, 計盛正博, 大塚道子, 瀬古弘, 石田春磨, 上 清直隆, 石元裕史, 林昌宏, 安藤昭芳, 横田寛伸, 2020: ひまわり 8・9 号後継衛星検討のためのハイパースペ クトル赤外サウンダの数値予報インパクト調査. 測 候時報第 87 号, 気象庁, 99–150.
- Okamoto, K., T. Ishibashi, and I. Okabe, 2023: Allsky infrared radiance assimilation of a geostationary satellite in the Japan Meteorological Agency ' s global system. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **149**, 2477–2503.
- Saunders, R., J. Hocking, E. Turner, S. Havemann, A. J. Geer, C. Lupu, J. Vidot, P. Chambon, C. KöpkenWatts, L. Scheck, and others, 2020: RTTOV-13 science and validation report. Tech. rep., EUMETSAT NWP SAF, URL https://nwp-saf.eumetsat.int/site/ download/documentation/rtm/docs_rttov13/ rttov13_svr.pdf.
- Wang, D., C. Prigent, L. Kilic, S. Fox, R. C. Harlow,

C. Jimenez, F. Aires, C. Grassotti, and F. Karbou, 2017: Surface emissivity at microwaves to millimeter waves over Polar Regions: parameterization and evaluation with aircraft experiments. *Atmos. and Oceanic Tech.*, **34**, 1039–1059, doi: 10.1175/JTECH-D-16-0188.1.

- Weston, P., W. Bell, and J. R. Eyre, 2014: Accounting for correlated error in the assimilation of highresolution sounder data. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **140**, 2420–2429.
- 山下浩史, 2015: 大気追跡風. 数値予報課報告・別冊第 61号, 気象庁予報部, 70-77.