

3.6 局地モデルの物理過程改良

3.6.1 はじめに

局地数値予報システムは、時空間スケールの小さな現象の予測を迅速に提供することを目的として、水平格子間隔 2 km で 10 時間先までを予測するシステムとして運用しており、防災気象情報・航空気象情報の作成を支援する重要な基盤システムの一つに位置づけられている。

「2030 年に向けた数値予報技術開発重点計画」では、豪雨防災を重点目標の一つに掲げており、線状降水帯に代表される集中豪雨の発生前に、明るいうちからの避難等、早期の警戒・避難を実現するために、局地モデルによる豪雨の予測精度向上が求められている。そのためには局地解析の改良による初期値の精度向上、局地モデルの改良による予測精度の向上を積み重ねていく必要がある。

局地数値予報システムは、2012 年 8 月に運用を開始した後、局地解析と局地モデルのそれぞれに対して、継続的に改良を加えてきた。本節では、2023 年 3 月に行った局地数値予報システムの更新の概要と、改良による予測特性の変化について報告する。

3.6.2 局地数値予報システム改良の概要

2023 年 3 月に行った局地数値予報システムの改良の概要は以下の通りである。詳細は 気象庁 (2023) を参照いただきたい。

- 局地解析および局地モデルで用いる格子平均標高の作成元データを、水平解像度約 1 km である米国地質調査所の GTOPO30 (Gesch et al. 1999) から、水平解像度約 90 m で、より高解像度・高精度である MERIT DEM (Yamazaki et al. 2017) に変更。
- 雲物理過程について、メソモデルで用いているスキーム (Ikuta et al. 2021) を導入した上で、混相雲の扱いの変更、雲水の質量-粒径関係の変更、部分雲過程の見直し等の改良。
- サブグリッドスケールの地形の起伏によって生じる乱流による抵抗の効果 (Turbulent Orographic Form Drag; TOFD) の新規導入。同スキームに必要なサブグリッドの地形に関する統計量も MERIT DEM から算出。
- 放射過程で用いる微量気体濃度 (CO₂, N₂O, CH₄) を 2020 年の全球気候値 (WMO 2021) に更新。
- 境界層乱流スキームである MYNN スキーム (Nakanishi and Niino 2009) で用いられる、乱流混合や乱流エネルギー散逸を特徴づける長さスケールの定式化の改良。

3.6.3 予測特性の変化 (統計検証結果)

前項の改良による予測特性の変化を調べるために行った試験の結果を示す。ここでは、改良前のルーチン相当の設定の実験をコントロール (CNTL) とし、上で述べた局地数値予報システムの改良を適用した実験をテスト (TEST) とした実験結果を示す。実験期間は、夏期間は 2020 年 7 月 2 日から 7 月 15 日まで、冬期間は 2020 年 1 月 11 日から 1 月 21 日までであり、1 日 24 回の実行を行っている。

図 3.6.1 は、夏期間における閾値 20 mm/h の降水についての予報時間毎の検証結果である。バイアスコアの図は、TEST は CNTL に対して降水頻度が増大し、特に予報時間 3 時間以降で過剰傾向であることを示している。しかしながら、空振り率はリードタイムが短く利用不可能な予測のごく初期に増大が見られる程度であり、見逃し率が大きく改善することでエクイタブルスレットスコアは改善している。図 3.6.2 は、冬期間における閾値 1 mm/h の降水についての予報時間毎の検証結果である。TEST は CNTL に対して、降水頻度が過剰となり、エクイタブルスレットスコアも全体的には中立から悪化の傾向である。雲物理過程の改良により、雲水の過小傾向が改善される一方で、あられの増加により降水頻度が増加することが原因と考えられる。夏期間、冬期間ともに降水頻度が過剰となっており、この改善は今後の課題である。

図 3.6.3 は夏期間の対ラジゾンデによる鉛直プロファイル検証の結果であり、TEST は CNTL に対して、高度場や気温が全般的に改善した。図 3.6.4 は冬期間の検証結果であり、気温、風速の予測精度が全般に良くなり、特に下層の改善は顕著である。夏期間の上層の改善は、雲物理過程の改良により上層雲が減ったことで、雲放射を通じて対流圏上層の高温バイアスが減少したことが寄与したと考えられ、下層の改善は、主に TOFD の導入および境界層過程の改良によるものと考えられる。

図 3.6.5 および図 3.6.6 は、地上風速・地上比湿についての検証結果であり、それぞれ夏期間および冬期間のものである。これらの要素については、ほぼすべての予報時間について RMSE の減少がみられ、精度向上が確認できる。これらの改善は、主に TOFD の導入による効果であることが確認されている。

3.6.4 事例検証

第 3.6.2 項で述べた物理過程等の改良の効果が降水強度の面的分布にどのようなインパクトを与えるかを確認するため、性能評価試験の中からいくつかの事例を取り上げる。

図 3.6.7 は、令和 2 年 7 月豪雨の事例の 1 つである。解析雨量では、五島列島の西から熊本県にかけて広がった強雨域が見られる。CNTL (上段中央) では五島列島付近で橙・赤・桃色 (20 mm/3 h 以上) で示される

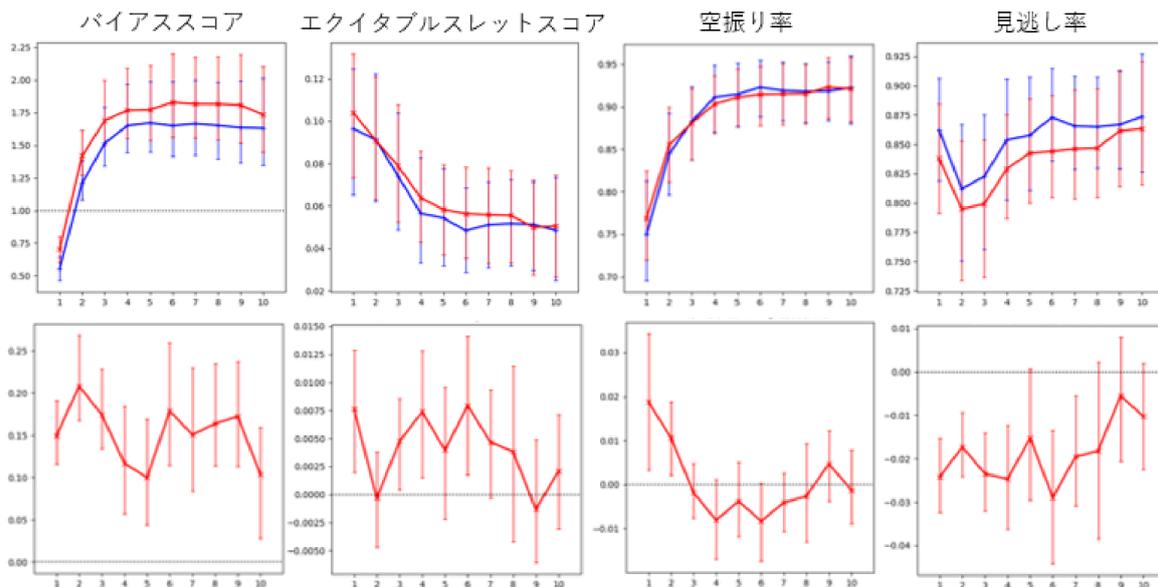


図 3.6.1 夏期間における 1 時間降水量 [mm/h] (検証格子 10 km) の閾値 20 mm/h の予報時間毎の対解析雨量検証結果 (上段) と TEST と CNTL の差 (下段)。横軸は予報時間、エラーバーは 95 %信頼区間。左からバイアススコア、エクイタブルスレットスコア、空振り率、見逃し率。上段の青線は CNTL、赤線は TEST の結果を示している。

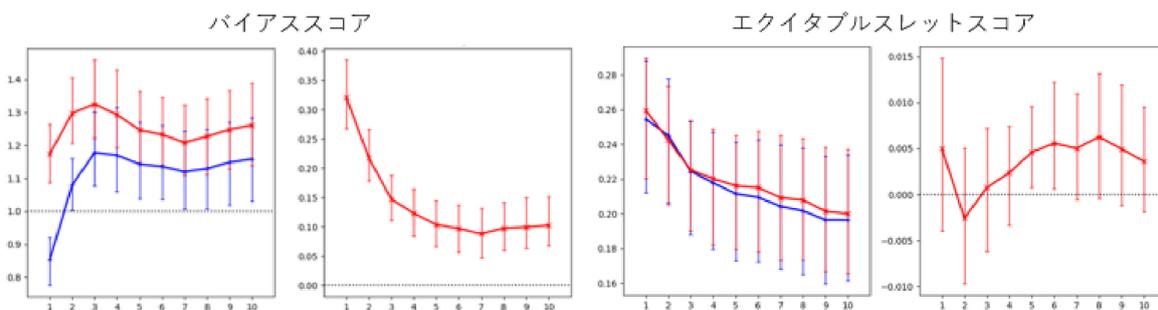


図 3.6.2 冬期間における 1 時間降水量 [mm/h] (検証格子 10 km) の閾値 1 mm/h の予報時間毎の対解析雨量検証結果。横軸は予報時間、エラーバーは 95 %信頼区間。左からバイアススコア、バイアススコアの差、エクイタブルスレットスコア、エクイタブルスレットスコアの差。線の種類は図 3.6.1 と同様。

降水域に抜けが見られ、図下段の四分分割表では見逃しとなっている。一方、TEST (上段右) では橙色で示される降水域にしっかりと覆われており、解析雨量に近づいている。下段の図を見比べてみると、上で述べた五島列島付近で見逃しからの変わった領域が広がっている一方で、空振りの領域は全体に極端に増えていない。統計検証で見た空振りの領域が極端に増えていないという特徴が現れている事例である。

図 3.6.8 は 2020 年 7 月 6 日の沖繩付近の事例である。解析雨量で見られる弱い降水域について、CNTL では対応する降水域がはっきり見られないのに対し、TEST では降水域がよりはっきりしており、解析雨量に近づいている。AMSAR2 の 36.5 GHz 帯チャンネルで観測された輝度温度では、沖繩付近で雲水の存在に対応する輝度温度の高い領域 (238 K 以上) が見られる。モデルの予測結果をもとにシミュレートされた輝度温度の図を見ると、TEST では観測で見られた輝度温度の高い領域が CNTL よりも明瞭に表現されるようになる

ことがわかる。これは、雲物理過程で部分雲過程を見直した効果であることがわかっている。

3.6.5 まとめ

2023 年 3 月に更新された局地数値予報システムでは、第 3.6.2 項で示した地形データの変更、モデルの物理過程の改良により、降水予測精度の改善や、下層を中心とする風速等の鉛直プロファイルの予測精度の改善、地上風速や地上比湿の予測精度の改善が確認された。今後も局地数値予報システムの改良を継続して進めていく。

参考文献

Gesch, D. B., K. L. Verdin, and S. K. Greenlee, 1999: New land surface digital elevation model covers the Earth. *Eos Trans. AGU*, **80**, 69.
Ikuta, Yasutaka, Masaki Satoh, Masahiro Sawada, Hiroshi Kusabiraki, and Takuji Kubota, 2021: Im-

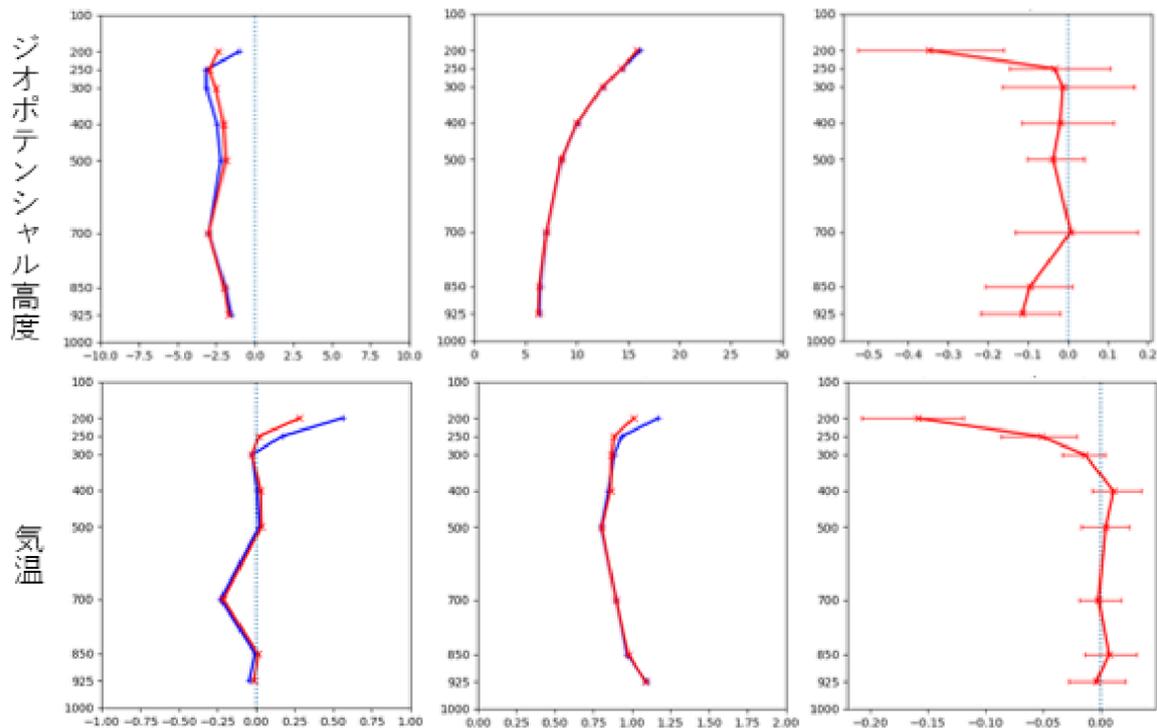


図 3.6.3 夏期間のジオポテンシャル高度 (m, 上段)、気温 (K, 下段) の予報時間 9 時間における対ラジゾンデの検証結果。検証対象は局地モデル領域内の全ラジゾンデ観測。左列が平均誤差、中央列が二乗平均平方根誤差 (RMSE)、右列が RMSE の TEST と CNTL の差。縦軸は気圧 (hPa) でエラーバーは 95 % 信頼区間を表す。平均誤差および二乗平均平方根誤差の図 (左、中央) において、赤線は TEST、青線は CNTL。

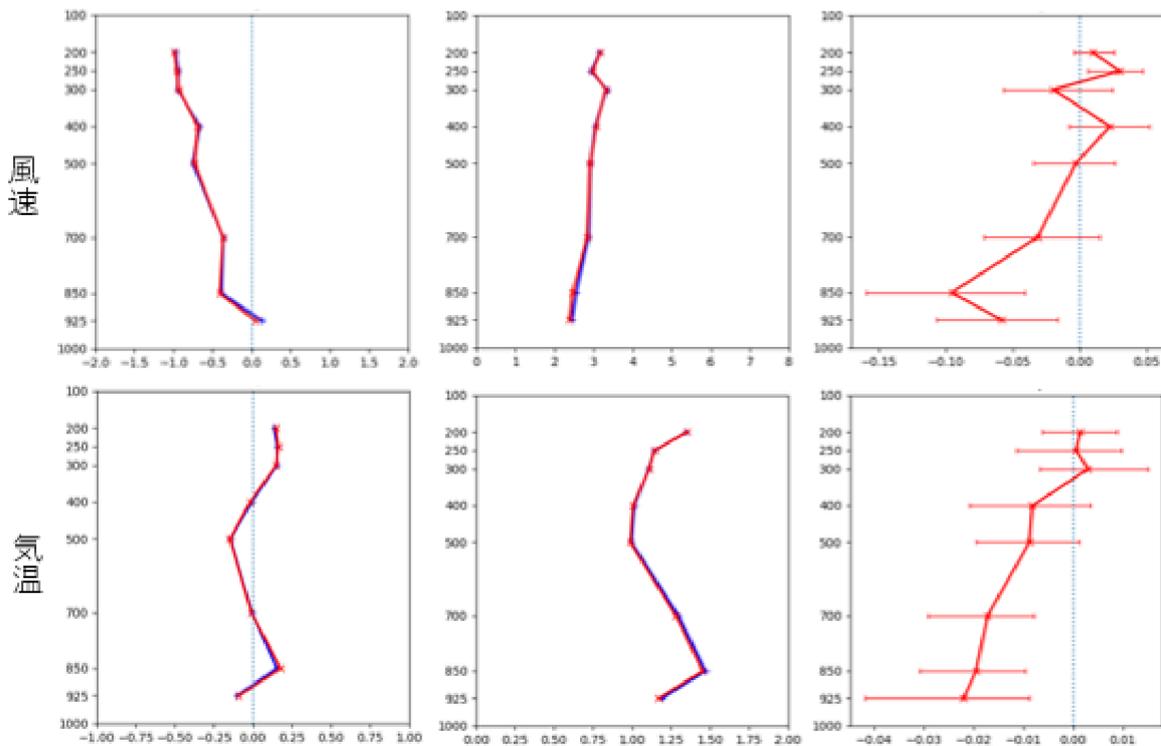


図 3.6.4 図 3.6.3 と同様。ただし、冬期間の風速 (m/s, 上段) および気温 (K, 下段) のもの。

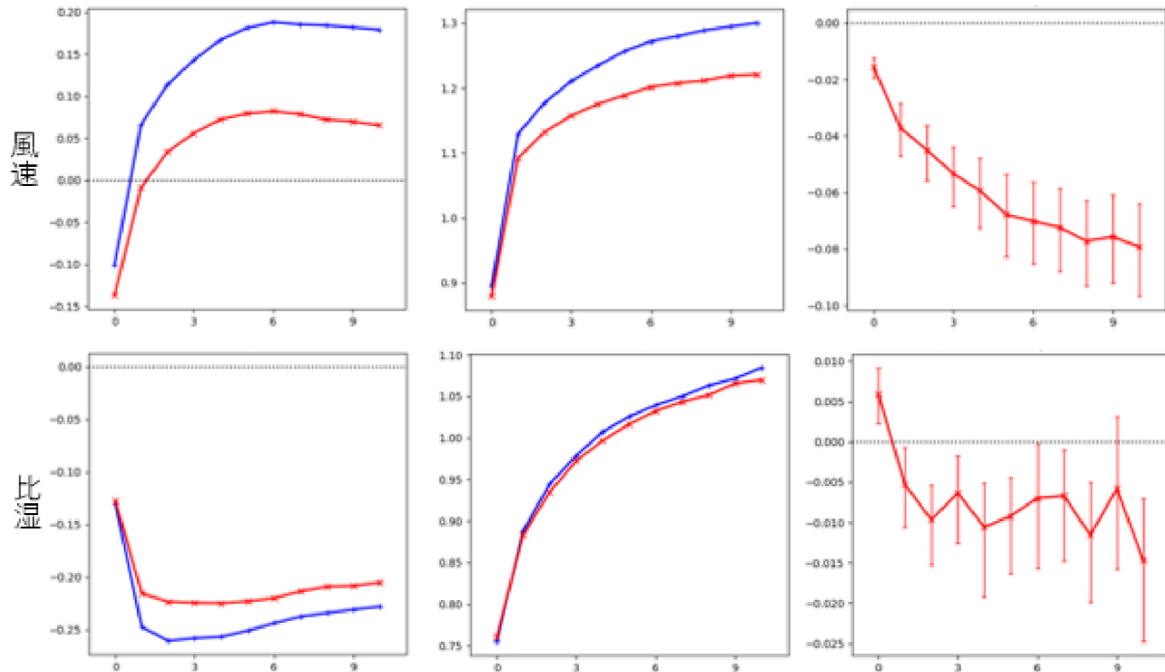


図 3.6.5 夏期間の地上風速 (m/s, 上段) および地上比湿 (g/kg, 下段) の予報時間毎の対地上観測検証の結果。左列は平均誤差、中央列は RMSE、右列は RMSE の TEST と CNTL との差。平均誤差および二乗平均平方根誤差の図 (左、中央) において、赤線は TEST、青線は CNTL。エラーバーは 95 % 信頼区間を表す。

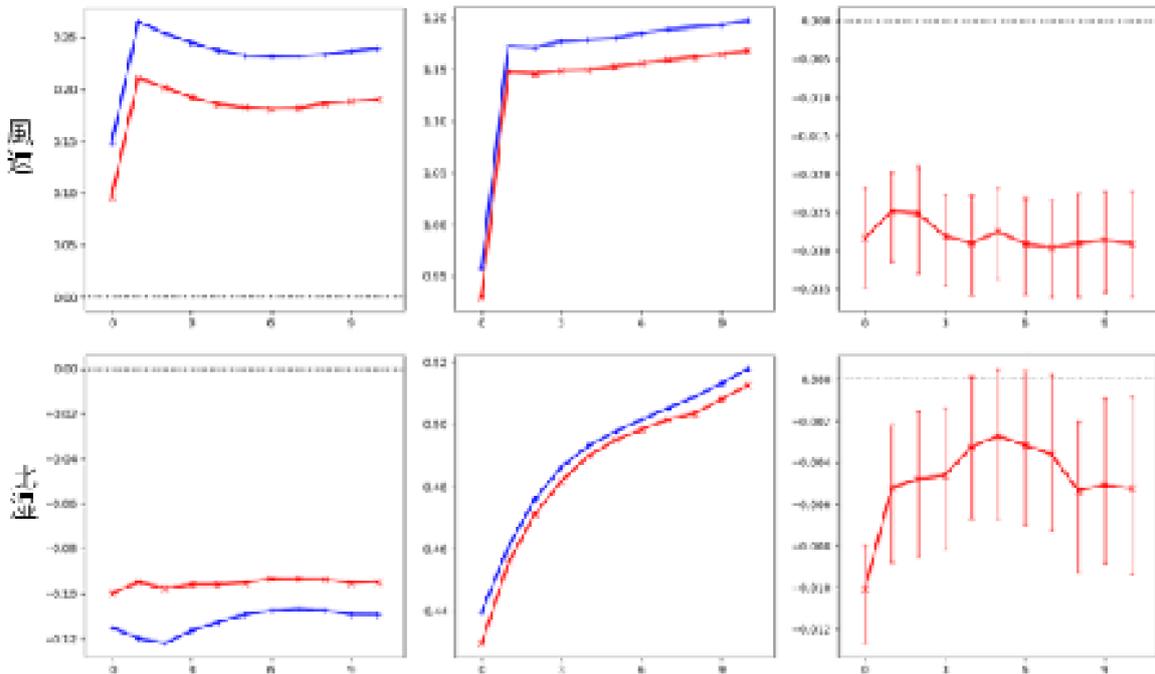


図 3.6.6 図 3.6.5 と同様。ただし、冬期間のもの。

provement of the Cloud Microphysics Scheme of the Mesoscale Model at the Japan Meteorological Agency Using Spaceborne Radar and Microwave Imager of the Global Precipitation Measurement as Reference. *Mon. Wea. Rev.*, **149**, 3803 – 3819.
 気象庁, 2023: 局地モデルの改良. 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, 81–84.

Nakanishi, M. and H. Niino, 2009: Development of an Improved Turbulence Closure Model for the Atmospheric Boundary Layer. *J. Meteor. Soc. Japan*, **87**, 895–912.

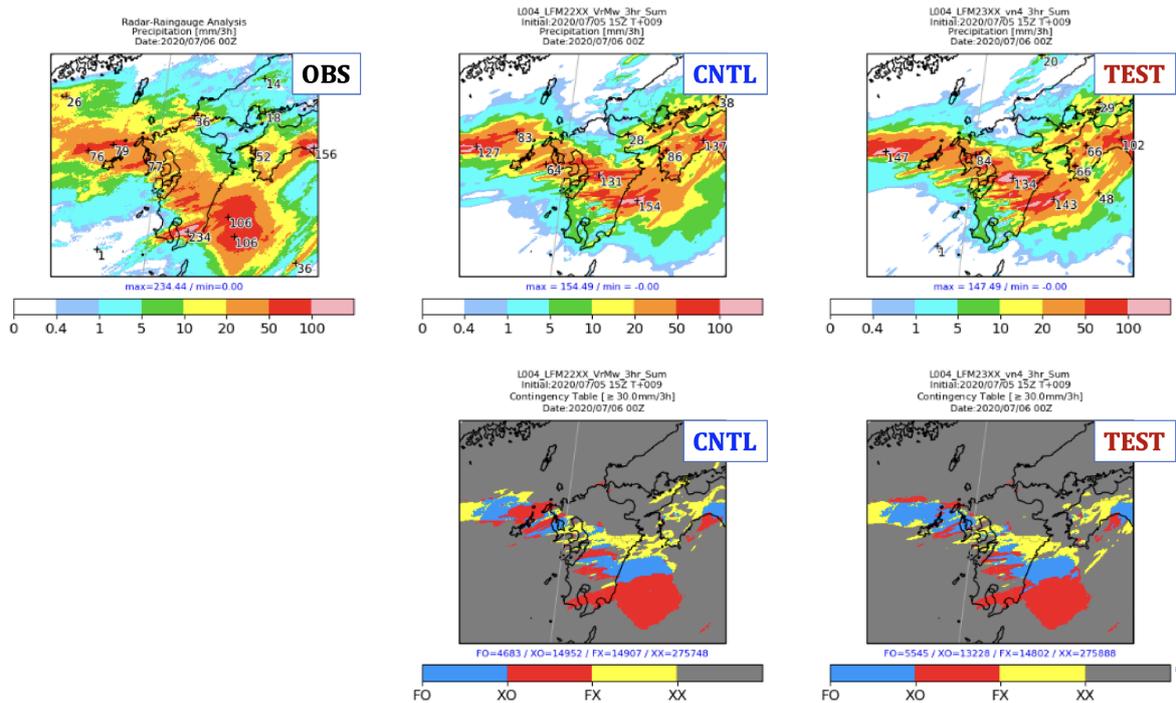


図 3.6.7 上段は 2020 年 7 月 6 日 00UTC を対象とする前 3 時間積算降水量 (mm/3 h) で、左は解析雨量、中央および右はそれぞれ CNTL および TEST の 9 時間予報値。下段はスロットスコア等を計算する際に用いる四分分割表を閾値 30 mm/3 h 以上について描画したもので、青色が中、赤色が見逃し、黄色が空振り、灰色が予測なし観測なし。中央が CNTL、右が TEST。

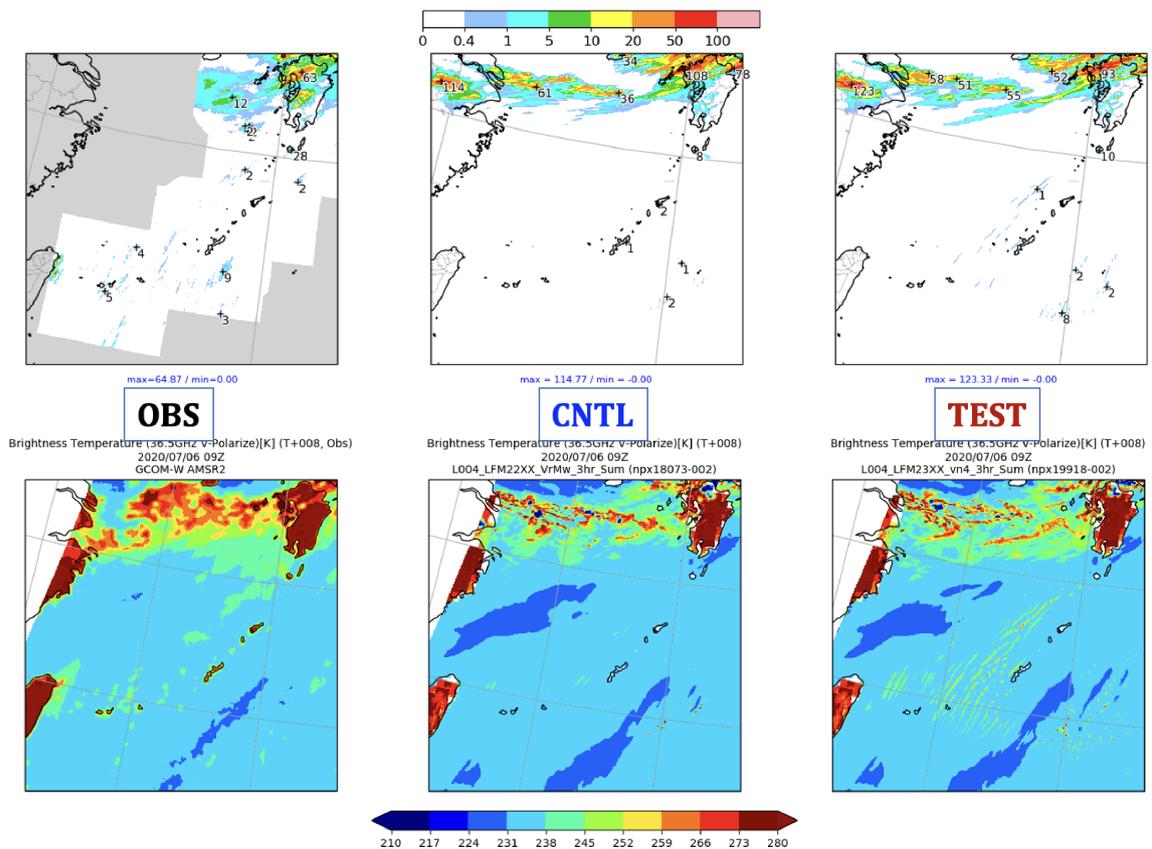


図 3.6.8 2020 年 7 月 6 日 09UTC を対象とする観測および予測結果。上段は、左が解析雨量、中央が CNTL の 1 時間降水量 (mm/h)、右が TEST の 1 時間降水量 (mm/h)。下段は左が GCOM-W の AMSR2 の 36.5 GHz 帯チャンネルで観測された輝度温度と、中央および右がそれぞれ CNTL および TEST の結果をもとにシミュレートした輝度温度。

WMO, 2021: The State of Greenhouse Gases in the Atmosphere Based on Global Observations through 2020. *WMO GREENHOUSE GAS BULLETIN*, **17**, 1–10.

Yamazaki, D., D. Ikeshima, R. Tawatari, T. Yamaguchi, F. O'Loughlin, J. C. Neal, C. C. Sampson, S. Kanae, and P. D. Bates, 2017: A high-accuracy map of global terrain elevations. *Geophys. Res. Lett.*, **44**, 5844–5853.

3.7 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

3.7.1 はじめに

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の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。これまで当庁の現業数値予報システムにおいては、全球解析で気温に感度のあるチャンネル（以下「気温チャンネル」）のみを利用して来た。その後開発を進め（気象庁 2022a, 2023）、全球解析では 2023 年 3 月 14 日に水蒸気チャンネルの追加利用を開始し、メソ・局地解析では 2023 年 3 月 28 日に赤外サウンダの新規利用を開始した。本稿では、これらの開発の概要を述べる。

3.7.2 全球解析における水蒸気チャンネルの利用

先に述べたように、これまで全球解析では赤外サウンダの気温チャンネルのみを利用して来た。その理由は、水蒸気に感度のあるチャンネル（以下「水蒸気チャンネル」）の利用には、気温チャンネルと比較してチャンネル間誤差相関が強いことや、気温にも感度があることから水蒸気の情報に気温に反映され気温の情報が損なわれる恐れがある（エイリアシング問題）といった難点があったためである（岡垣 2015）。これらの難点に留意し、以下のように水蒸気チャンネルを選択し、利用中の気温チャンネルに追加して利用することとした。

(1) 水蒸気チャンネルの選択

様々な高度の水蒸気情報を効率よく取得しながら、チャンネル間誤差相関を考慮していないことの悪影響を避けるよう、少ないチャンネルで同化による効果が十分に得られるようなチャンネル一式を検討する。対象とする赤外サウンダ IASI および CrIS について、まず、各センサの全チャンネルから利用候補となる水蒸気チャンネルを選択した。利用候補の選択では、輝度温度の同化に用いる放射伝達モデル RTTOV による Jacobian（図 3.7.1）の計算を用い、各高度における気温や水蒸気量、微量気体等の摂動によって生じる各チャンネルの輝度温度の応答特性を精査して、水蒸気情報の純度が低いチャンネルを棄却した。その上で、各チャンネルの水蒸気観測情報の自由度を算出し（Rodgers 2000; Rabier et al. 2002）、解析誤差をより減少させることが期待できるチャンネルを優先的に選択した。具体的には、以下の基準により同化利用チャンネルの選択を行った。

- 既に利用中の気温チャンネルは変更しないこととし、気温チャンネルを含む CO_2 帯 ($< 725[cm^{-1}]$) を除く。
- RTTOV の計算精度の低い波数 $1600[cm^{-1}]$ 付近

の水蒸気 Q 枝帯や、太陽光の影響がある短波長帯 ($> 2030[cm^{-1}]$) は除く。

- 分布が局所的かつ変動する微量気体 (O_3 , N_2O , CH_4) に感度のあるチャンネルは誤差要因になるため除く。
- 対流圏の水蒸気を重視し、50hPa より上層に感度ピークをもつチャンネルを除く。
- 地表から大気上端までが光学的に厚い ($\tau > 35$) チャンネルを除く。（RTTOV の計算では $\tau = 50$ で飽和するため精度が低い。）
- チャンネル番号が近いチャンネル（チャンネル番号の違いが 2 つまで）は、観測原理や処理方法に起因するチャンネル間誤差相関があるため、1 つを残し取り除く。
- 取得している赤外サウンダデータのサブセット¹に含まれるチャンネルを選択する。

次に、これらすべての水蒸気チャンネルの候補を同化した 2 週間程度の予備実験を実施し、Desroziers et al. (2005) の手法を用いてチャンネル間誤差相関を診断した（図 3.7.2）。この結果を踏まえ、荷重関数の重なり等も考慮し、誤差相関が強いチャンネルを排除しながら、互いに誤差相関の弱い複数チャンネルを選択した。最終的に IASI、CrIS ともに 9 個のチャンネルを選択した（図 3.7.3、表 3.7.1）。

(2) 性能評価試験

利用中の気温チャンネルに、上記で選択した水蒸気チャンネルを追加した効果を確認するため、同化サイクル実験によりその性能を評価した。追加した水蒸気チャンネルに対する品質管理や変分法バイアス補正の説明変数は気温チャンネルと同等（岡垣 2015）で、品質管理手法に水蒸気チャンネルの追加に対応した変更はない。水蒸気チャンネルの観測誤差はグロスエラーチェック以外の品質管理を施した後の観測値と第一推定値の差の標準偏差をもとに設定し、観測誤差の膨脹係数は気温チャンネルと同様の 3 倍とした。

2021 年 12 月時点の現業全球数値予報システム相当の実験システムを用い、赤外サウンダの水蒸気チャンネルを同化する性能評価試験を実施した。実験期間は、夏実験では 2020 年 7 月 10 日～9 月 11 日、冬実験では 2020 年 12 月 10 日～2021 年 2 月 11 日であり、それぞれ 8 月および 1 月を検証期間とした。その結果、特に水蒸気に感度のある衛星観測データ（マイクロ波イメージャ、マイクロ波水蒸気サウンダ、静止衛星 CSR）において、観測値と第一推定値との整合性が向上していることを確認した（図 3.7.4）。これは第一推定値の水蒸気場の予測精度向上を示唆している。また、複数の外国数値予報センターの解析値を用いた予測値の検

¹ 数値予報での利用のため、全チャンネルではなく一部のチャンネル（IASI で 500、CrIS で 431 チャンネル）のみを格納したデータセットが配信されている。

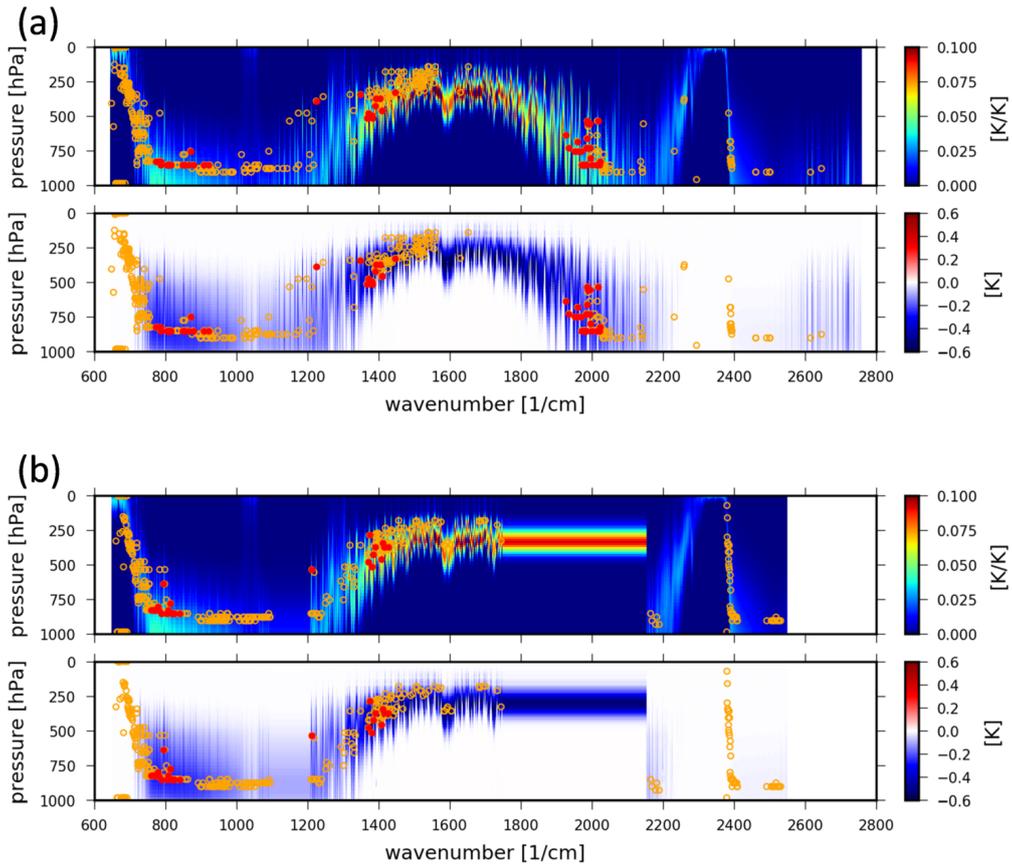


図 3.7.1 (a) IASI における Jacobian。横軸は波数 [cm^{-1}]、縦軸は気圧高度 [hPa]。上段：気温の Jacobian（気温 T を変化させたときの輝度温度 T_B の変化 $(\frac{\partial T_B}{\partial T})$ ）。下段：水蒸気の Jacobian（比湿 q の対数を変化させたときの輝度温度 T_B の変化 $(\frac{\partial T_B}{\partial(\ln(q))})$ ）。橙○印はサブセットに含まれるチャンネルを、赤●印は候補として選択されたチャンネルを、それぞれ Jacobian のピーク高度に配置したもの。(b) CrIS における Jacobian。詳細は (a) と同様。

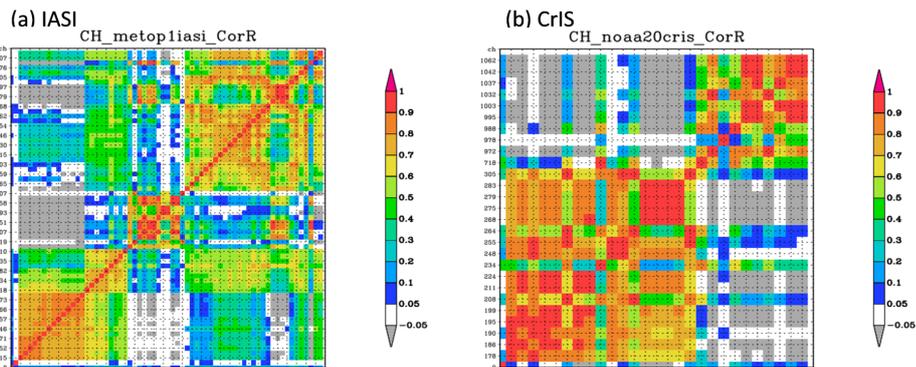


図 3.7.2 Desroziers et al. (2005) の手法を用いて診断した水蒸気チャンネルの候補に対するチャンネル間誤差相関。(a) IASI、(b) CrIS の診断結果。縦軸の数字はチャンネル番号を表す（横軸の番号は省略）。暖色ほど誤差相関が大きいことを示す。

証では、水蒸気場を中心に 3 日先程度まで RMSE が減少し、精度が向上することを確認した。

3.7.3 メソ解析における赤外サウンダの新規利用

メソ解析においては、以前まで独自のバイアス補正を行っていなかったことや、メソモデルの上端の高度が全球モデルと比較して低く放射伝達モデルによる輝

度温度の計算に誤差が生じるなど課題があり、赤外サウンダの利用に向けた開発が進んでいなかった (岡本ほか 2020)。その後、2020 年の asuca-Var 導入 (Ikuta et al. 2021) により独自にバイアス補正ができるようになった他、メソモデルの上端の高度が衛星観測データの利用拡充を主な目的として引き上げられるなど (気象庁 2022b)、システムの改善により赤外サウンダの利

用が進めやすくなったことを受け、気温チャンネルおよび水蒸気チャンネルを新規に利用開始した。

(1) チャンネルの選択

メソ解析で利用するチャンネルは、全球解析において利用するチャンネルに準じることとし、気温チャンネルおよび追加利用を開始する前述の水蒸気チャンネルを合わせた一式を元に、モデル上端高度（およそ 5hPa）よりも上部の大気に感度があり輝度温度の計算精度が低いチャンネルを除外するという方針で選択を行った。メソ解析や局地解析においては、放射伝達モデルに入力する気温や水蒸気の鉛直分布について、モデル上端高度よりも上部では標準大気の気温減率を元に外挿している（図 3.7.5）。そのため、外挿した鉛直分布の精度が十分ではなく、放射伝達モデルによる輝度温度の計算精度に悪影響を及ぼす。実際、荷重関数による主観的な判断によりチャンネルを選択し利用すると、モデル上端高度より上部への感度がわずかなチャンネルでも、その利用により解析値の精度に悪化が確認された。そこで、計算精度への影響の程度を客観的に判断するため、モデルの鉛直分布を十分上層まで入力できている全球解析と、輝度温度の計算精度を比較した。計算精度の比較には、観測値と第一推定値の差（O-B）のヒストグラムを用いてその形状に着目し、分布の幅が著しく異なるチャンネルは計算精度が不十分であると判断し除外した（図 3.7.6）。メソ解析で利用するチャンネルの一覧は表 3.7.1 に示した。なお、全球解析では地表面には感度がないとして陸上でも利用しているチャンネルは上記の判断により除外されるため、メソ解析では現在のところ海上のみでデータが利用される。

(2) 性能評価試験

メソ解析で赤外サウンドアを利用するための品質管理処理や、スキャンバイアスならびに観測誤差等の設定については、全球解析に準じた。ただし、メソ解析における変分法バイアス補正（VarBC）の説明変数については、他の輝度温度センサを含め全球解析と統一されおらず、メソ解析における他の輝度温度センサと同様に、定数、衛星天頂角、海面水温を用いた²。また、間引き距離はメソ解析における他の輝度温度センサの利用に準じ 45km とした。メソ解析における赤外サウンドアの利用データの分布を図 3.7.7 に示す。衛星の通過地方時により数の変動はあるものの、多くの解析時刻で赤外サウンドアが利用されている。

2022 年 3 月時点の現業メソ数値予報システム相当の実験システムを用い、赤外サウンドア同化の性能評価試験を実施した。実験期間は、夏実験では 2020 年 6 月 26 日～7 月 31 日、冬実験では 2019 年 12 月 18 日～2020

² 他の極軌道衛星搭載輝度温度センサでは軌道上昇下降フラグも用いているが、赤外サウンドアでは上昇／下降軌道の違いによるバイアスの差異は顕著ではないと見られることから導入していない。

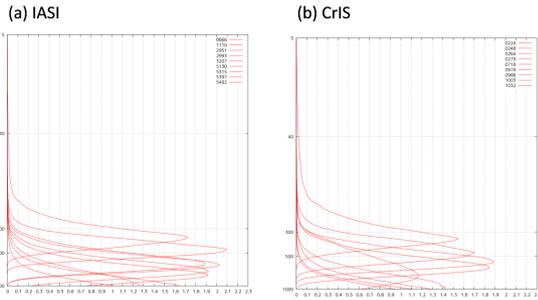


図 3.7.3 選択された水蒸気チャンネルの荷重関数。(a) IASI、(b) CrIS の結果。縦軸は気圧高度 [hPa]。

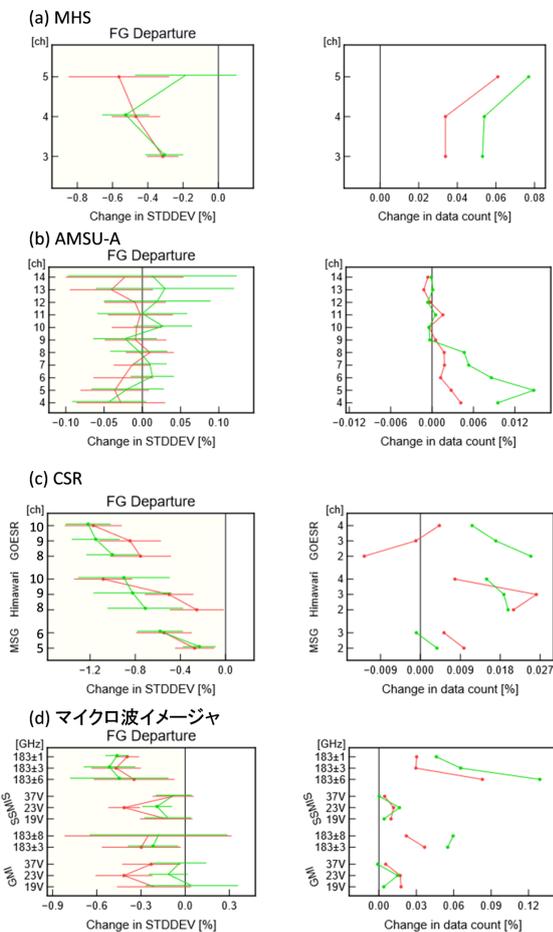


図 3.7.4 全球解析における、観測値と第一推定値との差（O-B）の標準偏差（左列）と利用データ数（右列）の、TEST のCNTL に対する変化率 [%]。赤色は夏実験、緑色は冬実験の結果を示す。(a) マイクロ波水蒸気サウンドア MHS、(b) マイクロ波気温サウンドア AMSU-A、(c) 静止衛星 CSR、(d) マイクロ波イメージャ。縦軸は (a)(b)(c) はチャンネル番号、(d) は周波数 (GHz) および偏波。標準偏差の図のエラーバーは 95%信頼区間、丸い点は変化の正負が統計的に有意であることを示す。第一推定値が観測値により整合（改善）している場合、標準偏差の図では 0 線より左側にプロットされ、利用データ数の図では利用データが増加し 0 線より右側にプロットされる。

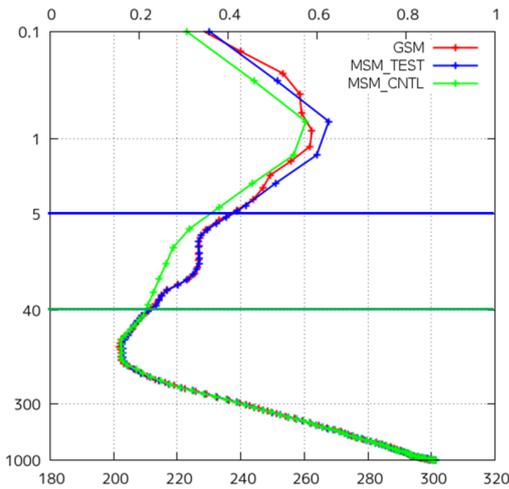


図 3.7.5 RTTOVに入力される気温鉛直分布の違いの例。赤線は全球モデル、青線はメソモデル（モデル上端高度引き上げ後）、緑線はメソモデル（モデル上端高度引き上げ前、局地モデルでの鉛直分布に相当）。青横線はメソモデル上端高度引き上げ後の上端（およそ 5hPa）、緑横線はメソモデル上端高度引き上げ前の上端（およそ 40hPa、局地モデルの上端に相当）。青線および緑線で示した鉛直分布は、それぞれのモデル上端高度より上部において標準大気の気温減率を元に外挿したもの。

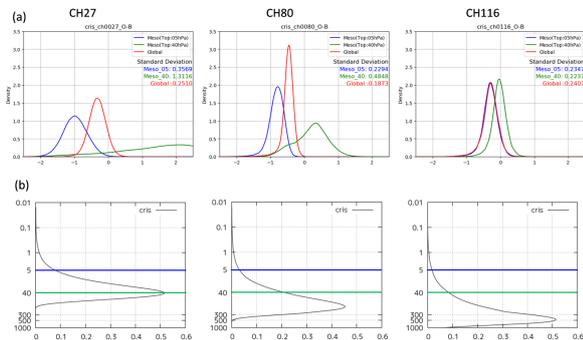


図 3.7.6 (a) 全球解析およびメソ解析における O-B ヒストグラム形状の差異。赤線は全球モデル、青線はメソモデル（モデル上端高度引き上げ後）、緑線はメソモデル（モデル上端高度引き上げ前、局地モデルでの鉛直分布に相当）。(b) 各チャンネルの荷重関数およびモデル上端高度。青横線、緑横線は図 3.7.5 に同じ。CrIS の ch27(666.25 cm^{-1}) (除外)、ch80(699.375 cm^{-1}) (除外) および ch116(721.875 cm^{-1}) (選択) について示す。

年 1 月 31 日であり、それぞれ 7 月および 1 月を検証期間とした。その結果、主に水蒸気に感度のある衛星観測において、観測値と第一推定値との整合性の向上を確認した（図 3.7.8）。またラジオゾンデ観測を用いた予測値の検証では、対流圏中層付近における乾燥バイアスが改善することを確認した（図 3.7.9）。降水の予測については、夏実験において分布が改善する事例を確認した。

3.7.4 局地解析における赤外サウンダの新規利用

局地解析においてもこれまで赤外サウンダを利用していなかったが、VarBC 説明変数や間引き距離などの同化の設定はメソ解析に準じているため、メソ解析と合わせて利用に向けた開発を進めた。

(1) チャンネルの選択

局地モデルの上端高度はメソモデルよりもさらに低く（およそ 40hPa）、局地解析では全球解析で利用している気温チャンネルは利用できないことが、メソ解析での利用チャンネルの検討の段階で判明していた。そのため、局地解析ではモデル上端高度より上空への感度が小さい水蒸気チャンネルのみを利用するようにした。局地解析で利用するチャンネルの一覧は表 3.7.1 に合わせて示した。

(2) 性能評価試験

2022 年 8 月時点の現業局地数値予報システム相当の実験システムを用い、赤外サウンダ同化の性能評価試験を実施した。実験期間は、夏実験では 2021 年 7 月 1 日～15 日、冬実験では 2022 年 1 月 1 日～15 日である。メソ解析と同様に、主に水蒸気に感度のある衛星観測において、観測値と第一推定値との整合性の向上を確認した（図 3.7.10）。ラジオゾンデ観測や解析雨量、地上観測等を用いた予測精度の検証では、顕著な変化は見られず、概ね中立であった。

3.7.5 まとめと今後の課題

全球解析における赤外サウンダの水蒸気チャンネルの利用および、メソ・局地解析における赤外サウンダの新規利用について開発を進めた。それぞれの数値予報システムの性能評価試験では、水蒸気場の予測精度の改善が得られた。特に今回全球解析で新たに利用を開始した水蒸気チャンネルは、荷重関数の大部分が対流圏に分布することから、モデル上端高度の低いメソ・局地数値予報システムにおいても利用しやすく、精度改善への寄与が大きかった。この結果を踏まえ、全球解析では 2023 年 3 月 14 日に、メソ・局地解析では 2023 年 3 月 28 日に、それぞれ現業数値予報システムでの利用を開始した。

赤外サウンダ利用に関する今後の課題としては、チャンネル間誤差相関の考慮、利用チャンネルの拡充やさらなるチャンネル選択の最適化、地表面の影響を考慮した陸上での利用、雲判定の高度化、全天同化への移行などが挙げられる。赤外サウンダから得られる情報をより適切に解析値に反映できるように着実に開発していく必要があると考えている。また近年では衛星データ等から得られる観測データ量の増大によって、解析処理に必要な計算機資源が増大している。今後も観測機器の高度化によって更なるデータ量の増大が予想されるため、より効率よく赤外サウンダの情報を取り込むための開発にも取り組んでいく必要があると考える。

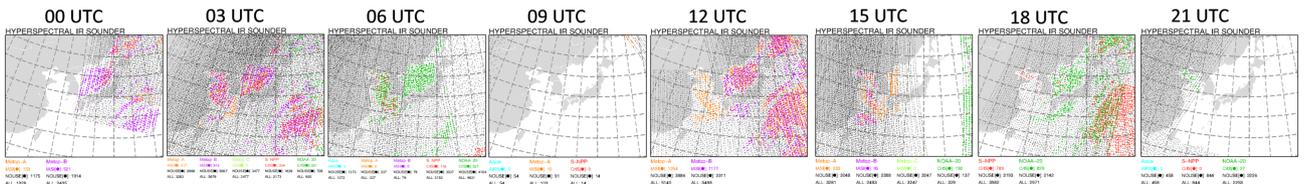


図 3.7.7 メソ解析における赤外サウンダのデータ分布の例 (2020 年 7 月 1 日)。左列からそれぞれ、解析時刻 00,03,06,09,12,15,18,21UTC におけるデータの分布を示す。色の違いは衛星を示す。黒点は、雲域の除去等の品質管理や陸上で利用しない等の利用設定により、いずれのチャンネルも同化されなかった地点。

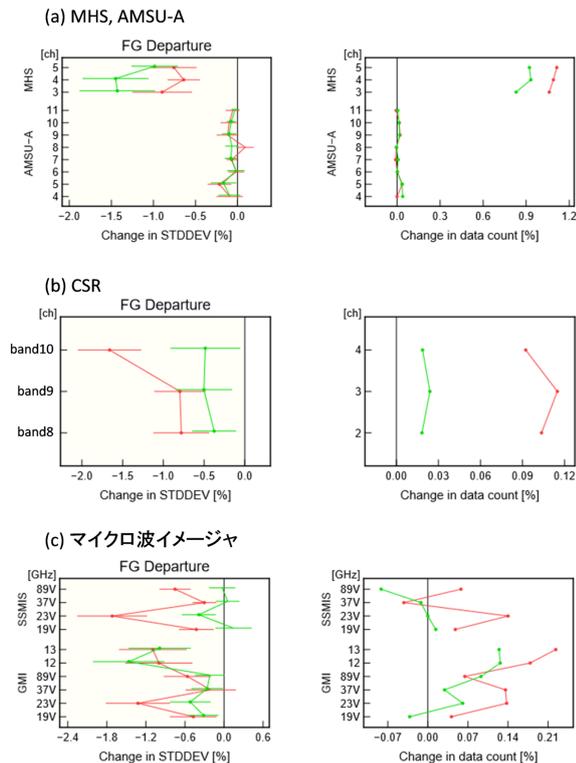


図 3.7.8 メソ解析における、観測値と第一推定値との差 (O-B) の標準偏差 (左列) と利用データ数 (右列) の、TEST のCNTL に対する変化率 [%]。赤色は夏実験、緑色は冬実験の結果を示す。(a) マイクロ波水蒸気サウンダ MHS およびマイクロ波気温サウンダ AMSU-A、(b) ひまわり CSR、(c) マイクロ波イメージャ。縦軸は (a)(b) はチャンネル番号、(c) は周波数 (GHz) および偏波。詳細は図 3.7.4 と同様。

メソ・局地数値予報システムにおける赤外サウンダの課題としては、モデル上端高度が低いことへの対処の方法を引き続き検討する必要がある。現在はモデル上端高度より上空への感度があるチャンネルを排除しているが、より多くのチャンネルの情報を活かすためには、上部境界値として全球モデルのプロファイルを用いてより上層のチャンネルも利用することや、1D-Var でトリートメントした気温や水蒸気のプロファイルを同化する方向性もあるため検討を進めている。

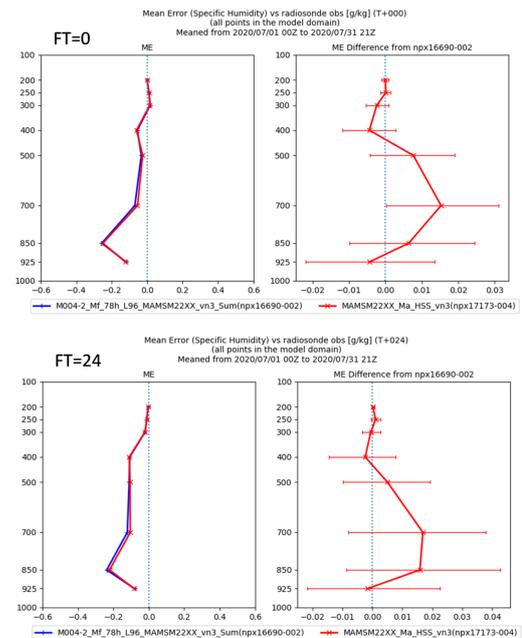


図 3.7.9 ラジオゾンデ観測に対する混合比のバイアス (ME) の変化。夏実験の結果 (検証期間 2020 年 7 月) を示す。上段は解析値、下段は 24 時間予測の検証結果。左列は CNTL (青線) および TEST (赤線) の ME、右列は TEST と CNTL の差異。

参考文献

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.

Ikuta, Yasutaka, Tadashi Fujita, Yukinari Ota, and Yuki Honda, 2021: Variational Data Assimilation System for Operational Regional Models at Japan Meteorological Agency. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, **99**, 1563–1592.

気象庁, 2022a: メソ解析におけるハイパースペクトル赤外サウンダの利用. 令和 3 年度数値予報開発センター年報, 気象庁数値予報開発センター, 111.

気象庁, 2022b: メソ数値予報システムの鉛直層増強、予報時間延長、物理過程の改良. 令和 3 年度数値予報開発センター年報, 気象庁数値予報開発センター,

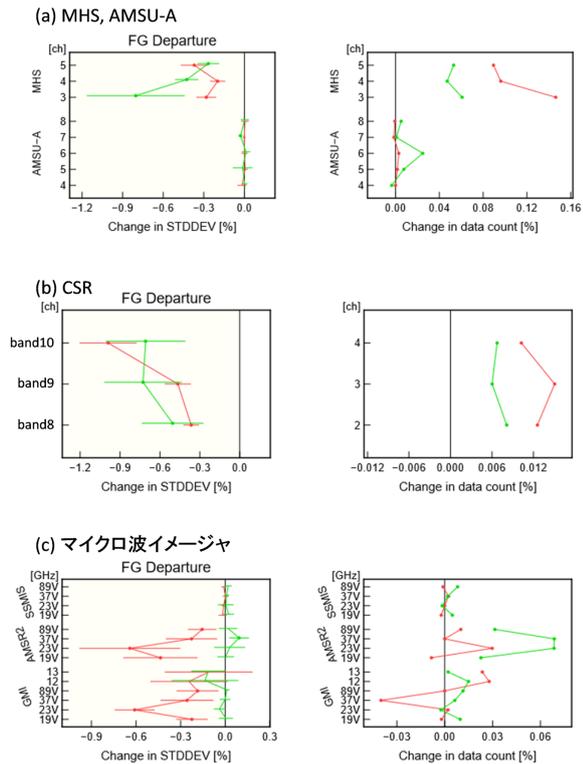


図 3.7.10 局地解析における、観測値と第一推定値との差 (O-B) の標準偏差 (左列) と利用データ数 (右列) の、TEST の CNTL に対する変化率 [%]。赤色は夏実験、緑色は冬実験の結果を示す。(a) マイクロ波水蒸気サウンダ MHS およびマイクロ波気温サウンダ AMSU-A、(b) ひまわり CSR、(c) マイクロ波イメージャ。縦軸は (a)(b) はチャンネル番号、(c) は周波数 (GHz) および偏波。詳細は図 3.7.4 と同様。

92–99.

気象庁, 2023: 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. 令和 4 年度数値予報開発センター年報, 気象庁数値予報開発センター, 87–88.

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, 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, **87**, 99–150.

Rabier, Florence, Nadia Fourrié, Djalil Chafäi, and Pascal Prunet, 2002: Channel selection methods for infrared atmospheric sounding interferometer radiances. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **128**, 1011–1027.

Rodgers, Clive D, 2000: *Inverse methods for atmospheric sounding: theory and practice*, Vol. 2. World scientific.

表 3.7.1 全球解析、メソ解析、局地解析での同化チャンネル一覧。左：IASI、右：CrIS。「種類」には主に感度のある気温または水蒸気を記した。水蒸気チャンネルは今回選択されたもの。荷重関数ピークは米国標準大気における気圧高度の参考値。

IASI ch	波数 [cm ⁻¹]	波長 [μm]	荷重関数 ピーク [hPa]	全球	メソ	局地	種類	CrIS ch	波数 [cm ⁻¹]	波長 [μm]	荷重関数 ピーク [hPa]	全球	メソ	局地	種類
38	654.25	15.28	61.0	○	×	×	気温	27	666.25	15.01	39.3	○	×	×	気温
49	657.00	15.22	39.3	○	×	×	気温	31	668.75	14.95	5.9	○	×	×	気温
51	657.50	15.21	56.1	○	×	×	気温	37	672.50	14.87	39.3	○	×	×	気温
55	658.50	15.19	39.3	○	×	×	気温	51	681.25	14.68	39.3	○	×	×	気温
57	659.00	15.17	56.1	○	×	×	気温	69	692.50	14.44	71.5	○	×	×	気温
61	660.00	15.15	39.3	○	×	×	気温	73	695.00	14.39	77.2	○	×	×	気温
63	660.50	15.14	56.1	○	×	×	気温	75	696.25	14.36	110.2	○	×	×	気温
70	662.25	15.10	56.1	○	×	×	気温	79	698.75	14.31	110.2	○	×	×	気温
85	666.00	15.02	43.1	○	×	×	気温	80	699.38	14.30	142.4	○	×	×	気温
87	666.50	15.00	43.1	○	×	×	気温	81	700.00	14.29	117.8	○	×	×	気温
109	672.00	14.88	56.1	○	×	×	気温	83	701.25	14.26	151.3	○	×	×	気温
116	673.75	14.84	56.1	○	×	×	気温	85	702.50	14.23	160.5	○	×	×	気温
122	675.25	14.81	56.1	○	×	×	気温	87	703.75	14.21	190.3	○	×	×	気温
128	676.75	14.78	56.1	○	×	×	気温	88	704.38	14.20	260.0	○	×	×	気温
135	678.50	14.74	56.1	○	×	×	気温	93	707.50	14.13	300.0	○	×	×	気温
141	680.00	14.71	61.0	○	×	×	気温	96	709.38	14.10	328.7	○	×	×	気温
146	681.25	14.68	43.1	○	×	×	気温	102	713.12	14.02	374.7	○	×	×	気温
148	681.75	14.67	56.1	○	×	×	気温	106	715.62	13.97	441.9	○	×	×	気温
154	683.25	14.64	61.0	○	×	×	気温	116	721.88	13.85	478.0	○	○	×	気温
159	684.50	14.61	56.1	○	×	×	気温	123	726.25	13.77	617.5	○	○	×	気温
161	685.00	14.60	61.0	○	×	×	気温	124	726.88	13.76	515.7	○	○	×	気温
167	686.50	14.57	71.5	○	×	×	気温	125	727.50	13.75	596.3	○	○	×	気温
173	688.00	14.53	77.2	○	×	×	気温	132	731.88	13.66	496.6	○	○	×	気温
180	689.75	14.50	77.2	○	×	×	気温	136	734.38	13.62	535.2	○	○	×	気温
185	691.00	14.47	83.2	○	×	×	気温	138	735.62	13.59	575.5	○	○	×	気温
187	691.50	14.46	83.2	○	×	×	気温	142	738.12	13.55	555.2	○	○	×	気温
193	693.00	14.43	103.0	○	×	×	気温	148	741.88	13.48	441.9	○	×	×	気温
205	696.00	14.37	142.4	○	×	×	気温	224	789.38	12.67	1070.9	○	○	○	水蒸気
212	697.75	14.33	151.3	○	×	×	気温	248	804.38	12.43	1070.9	○	○	○	水蒸気
217	699.00	14.31	151.3	○	×	×	気温	264	814.38	12.28	958.6	○	○	○	水蒸気
219	699.50	14.30	160.5	○	×	×	気温	279	823.75	12.14	1070.9	○	○	○	水蒸気
224	700.75	14.27	170.1	○	×	×	気温	718	1212.50	8.25	753.6	○	○	○	水蒸気
226	701.25	14.26	170.1	○	×	×	気温	978	1375.00	7.27	343.6	○	○	○	水蒸気
230	702.25	14.24	170.1	○	×	×	気温	988	1381.25	7.24	639.1	○	○	○	水蒸気
232	702.75	14.23	180.0	○	×	×	気温	1003	1390.62	7.19	459.7	○	○	○	水蒸気
236	703.75	14.21	260.0	○	×	×	気温	1032	1408.75	7.10	555.2	○	○	○	水蒸気
239	704.50	14.19	272.9	○	○	×	気温								
243	705.50	14.17	286.3	○	×	×	気温								
246	706.25	14.16	300.0	○	○	×	気温								
249	707.00	14.14	300.0	○	○	×	気温								
252	707.75	14.13	328.7	○	○	×	気温								
256	708.75	14.11	300.0	○	×	×	気温								
262	710.25	14.08	328.7	○	○	×	気温								
265	711.00	14.06	359.0	○	○	×	気温								
267	711.50	14.05	328.7	○	×	×	気温								
269	712.00	14.04	328.7	○	×	×	気温								
271	712.50	14.04	441.9	○	×	×	気温								
273	713.00	14.03	374.7	○	×	×	気温								
275	713.50	14.02	359.0	○	○	×	気温								
278	714.25	14.00	515.7	○	○	×	気温								
282	715.25	13.98	328.7	○	○	×	気温								
284	715.75	13.97	515.7	○	○	×	気温								
288	716.75	13.95	343.6	○	×	×	気温								
292	717.75	13.93	478.0	○	×	×	気温								
294	718.25	13.92	314.1	○	×	×	気温								
296	718.75	13.91	272.9	○	×	×	気温								
306	721.25	13.86	260.0	○	○	×	気温								
308	721.75	13.86	515.7	○	○	×	気温								
316	723.75	13.82	459.7	○	○	×	気温								
320	724.75	13.80	683.7	○	○	×	気温								
323	725.50	13.78	374.7	○	○	×	気温								
327	726.50	13.76	617.5	○	○	×	気温								
333	728.00	13.74	639.1	○	○	×	気温								
347	731.50	13.67	374.7	○	○	×	気温								
350	732.25	13.66	575.5	○	○	×	気温								
354	733.25	13.64	343.6	○	○	×	気温								
356	733.75	13.63	575.5	○	○	×	気温								
360	734.75	13.61	343.6	○	○	×	気温								
666	811.25	12.33	1070.9	○	○	○	水蒸気								
1110	922.25	10.84	1013.9	○	○	○	水蒸気								
2951	1382.50	7.23	617.5	○	○	○	水蒸気								
2993	1393.00	7.18	459.7	○	○	○	水蒸気								
3207	1446.50	6.91	359.0	○	○	○	水蒸気								
5130	1927.25	5.19	802.4	○	○	○	水蒸気								
5315	1973.50	5.07	1042.2	○	○	○	水蒸気								
5397	1994.00	5.02	729.9	○	○	○	水蒸気								
5492	2017.75	4.96	639.1	○	○	○	水蒸気								