

第3章 観測データ利用の改良及びメソ・局地数値予報システムの改良

3.1 全球解析における観測データ利用の改良¹

3.1.1 はじめに

本節では、2018年4月から2019年3月までの間に気象庁全球数値予報システムに導入した、観測データの利用に関する各改良項目について述べる。

3.1.2 ひまわり8号のバンド9, 10及びMeteosatのチャンネル6の晴天放射輝度温度(CSR: clear-sky radiance)データの追加利用

(1) はじめに

気象庁全球解析では、日本の静止気象衛星ひまわり、米国のGOES (Geostationary Operational Environmental Satellite) 2機、及び、欧州のMeteosat2機の計5機の静止気象衛星による観測データからそれぞれ作成されるCSRのデータを同化している。CSRとは、静止気象衛星に搭載された赤外イメージャにより観測された輝度温度データを、ある領域(ひまわり8号の場合は約32 km × 32 km)の晴天域だけについて平均した輝度温度の値である。主な目的は、対流圏の水蒸気に関する情報を持つ水蒸気バンドのCSRを同化することで、初期値における水蒸気場の解析精度を向上させることである。ひまわり8号には水蒸気バンドが3つ(バンド8, 9, 10)、Meteosatには水蒸気チャンネルが2つ(チャンネル5, 6)があるが、本改良により未使用となっていたひまわり8号バンド9, 10の陸域のCSRデータ²、Meteosatのチャンネル6のCSRデータを追加利用することとした。これらのバンド・チャンネル³(以下、チャンネル)のCSRデータを利用するために必要な品質管理手法の改良を行った。以下、CSRの利用チャンネル拡大のための新しい品質管理手法の概要と、上記の改良を適用した実験の結果について報告する。

(2) 品質管理手法の改良

今回、追加利用したチャンネルの波長帯は、これまで利用してきたチャンネルよりも下層まで感度がある。そのため、冬期の中国大陸上など大気が非常に乾燥し、水蒸気量が少ない場合には、地表面からの放射の影響が無視できなくなる。そこで、地表面からの放射の影響をより正確に見積もるために、計算輝度温度⁴の算出

に必要な地表面に関する2種類のデータを、より現実を反映したものに変更した。1つ目は地表面射出率で、これまで利用していた固定値(0.90)から、季節変化や地表面の植生の違いを反映した気候値を利用するよう変更した。2つ目は地表面温度で、これまでの気象庁全球モデルの地表面温度予測値に替えて、窓チャンネル⁵のCSRデータから算出した地表面温度を使うよう変更した。

また、標高の高い領域では大気中に存在する水蒸気量が通年で少なくCSRデータが持つ水蒸気に関する情報が希薄である割に、モデルと現実の地形の差に起因する第一推定値の誤差が大きく同化の効果が小さいことから、モデル標高が4000 m以上の地点⁶において全てのCSRデータを利用しない変更も併せて行った。さらに、GOESとMeteosatのCSRデータに適用していた2時間ごとの時間間引き処理を廃止し、ひまわり8号と同様に1時間毎に同化するよう変更した⁷。

(3) 解析・予測への影響

2018年6月時点の全球数値予報システムと同等の設定とする全球解析予報サイクル実験をCNTL, CNTLに(1), (2)で示した変更を加えた実験をTESTとした。実験期間は、2017年6月10日~10月11日と2017年11月10日~2018年3月11日である。以下、第一推定値に関する検証の統計期間は実験期間開始の10日間を含まず、予測値に関する検証の統計期間は夏は2017年7月~9月、冬は2017年12月~2018年2月の各3か月とした。

図3.1.1に、本改良とは独立な観測データで、CNTL, TEST共通に利用しているマイクロ波水蒸気サウンダMHS (Microwave Humidity Sounder) と、マイクロ波気温サウンダAMSU-A (Advanced Microwave Sounding Unit-A)の観測値と第一推定値の差(FG departure)の標準偏差のTESTのCNTLに対する変化率を示す。図からTESTでは、CNTLよりもFG departureの標準偏差が小さくなったことがわかる⁸。特に対流圏の水蒸気に感度のあるMHSでその変化は大きい。これは、TESTに加えられた改良により、第一推定値の水蒸気場が改善し、他の観測データと整合するように変化したことを意味する。冬期間について実施したCNTL, TESTの結果からも、同様に第一推定値と他の観測デー

¹ 第3.1.1項 村田 英彦、第3.1.2項 岡部 いづみ、第3.1.3項 村田 英彦、亀川 訓男

² 陸域では輝度温度同化のための放射計算に与える地表面温度や地表面射出率の第一推定値が十分な精度を持っていることが確認されていなかったため、これらのデータは未使用としていた(計盛 2016)。

³ それぞれの静止気象衛星運用機関が各々のイメージャの仕様を説明する際の呼称であり、本質的な違いはない。

⁴ CSRなどの輝度温度データを同化する際に第一推定値として使われる値。計算にはRTTOV v10 (Hocking et al. 2010)という放射伝達モデルを利用している。

⁵ 中心波長10~11 μmの大気の透過率の高いチャンネル。ひまわり8号のバンド13、Meteosat-8, -11のチャンネル9。

⁶ 主にチベット高原が該当する。

⁷ 時間間引き処理の導入当時より静止気象衛星の世代交代が進みCSRの水平解像度が向上したことに伴い、時間方向の観測誤差相関が減少したと考えられるため、ひまわり8号のCSRは利用開始時から1時間ごとの同化とした。これを他の衛星のCSRにも適用した。

⁸ 標準偏差の減少と併せて、利用データ数の増加も確認した。

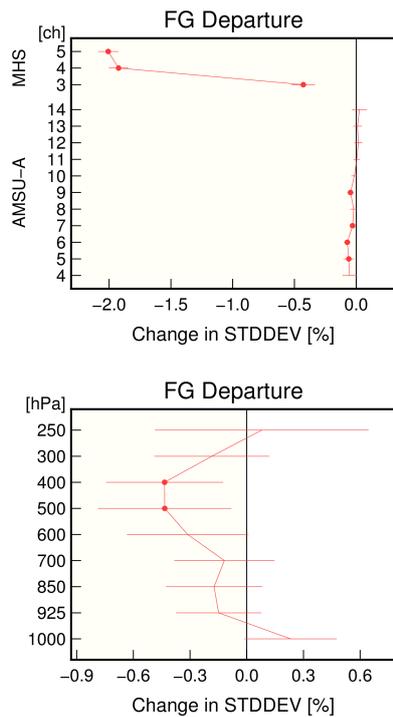


図 3.1.1 TEST の CNTL に対する FG departure 標準偏差 (STDDEV) の変化率 [%]。上図がマイクロ波水蒸気サウンダ MHS とマイクロ波気温サウンダ AMSU-A、下図がラジオゾンデ観測データの相対湿度。エラーバーは 95%信頼区間、丸印は変化率の正負が統計的に有意な差であることを示す。縦軸はチャンネル [ch] または気圧高度 [hPa]。統計期間は、2017 年 6 月 20 日～10 月 11 日。

タとの整合性の向上が見られた (図略)。第一推定値は、ひとつ前のサイクルにおける解析値を初期値とした短時間予測値であることから、その精度向上は解析値の精度向上を示唆する。さらに、CNTL, TEST に対して共に独立な参照値として、複数の他数値予報機関の解析値を使用し予測精度検証を実施した。その結果、熱帯・中緯度の対流圏中層を中心に、比湿等の 2 日予測までの精度が改善したことが確認された。ここでは、欧州中期予報センター (ECMWF) 解析値⁹ に対する検証結果を示す (図 3.1.2)。冬期間の実験でも同様の結果が確認された (図略)。

(4) まとめ

気象庁全球解析において、以下の変更を加え実験を行った。

- ひまわり 8 号水蒸気バンド 9, 10 の陸域での CSR を追加利用する。
- Meteosat の水蒸気チャンネル 6 の CSR データを追加利用する。
- ひまわり 8 号と Meteosat の CSR 全チャンネルの計算輝度温度算出の際に用いる地表面射出率と地

⁹ 世界天気研究計画 (WWRP) の下で実施されている TIGGE (<https://doi.org/10.1175/2010BAMS2853.1>) のデータを利用。

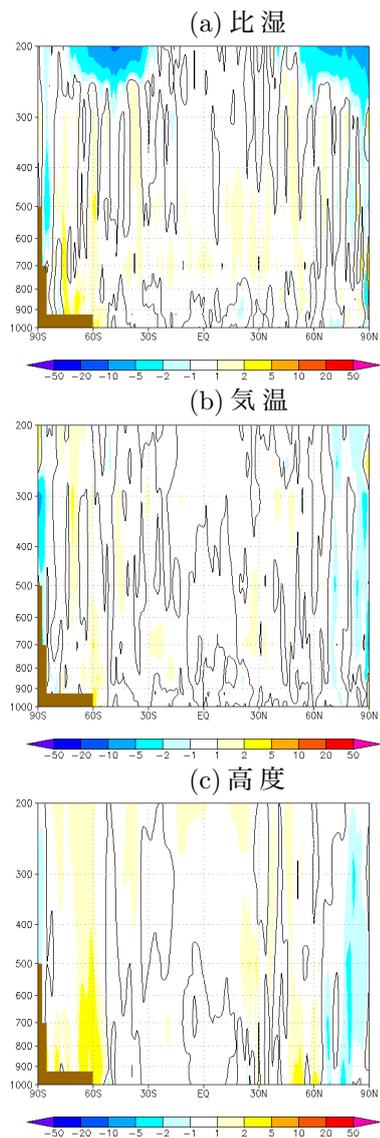


図 3.1.2 対 ECMWF 解析値検証における 48 時間予測値の改善率 [%] の緯度別鉛直分布。ECMWF の解析値を参照値とした二乗平均平方根誤差について、(CNTL-TEST) / CNTL を改善率とした。正の値 (暖色) は改善、負の値 (寒色) は改悪を意味する。気象要素は (a) 比湿、(b) 気温、(c) 高度。縦軸は気圧 [hPa]、横軸は緯度。黒曲線は、ゼロ値の等値線。茶色の部分はデータのない南極大陸付近についてマスキングした領域を示す。検証期間は 2017 年 7 月から 9 月の 3 か月間。

表面温度を変更する。

- Meteosat と GOES に適用していた時間間引き (2 時間ごと) を廃止し毎時データを利用する。
 - 標高 4000 m 以上の地点で全 CSR を利用しない。
- その結果から、上記の改良により対流圏の第一推定値の水蒸気場の精度が改善したことが示された。また、ECMWF 等他センターの解析値検証の結果から、熱帯・中緯度の対流圏中層を中心に比湿などの 2 日予測までの精度が改善したことが示された。2018 年 10 月 18 日より、本改良を数値予報現業システムに適用した。

3.1.3 NOAA-20 搭載 ATMS および CrIS 輝度温度データの利用開始

(1) はじめに

2017年11月18日に打ち上げられた NOAA-20 は、米国海洋大気庁 (NOAA) の次世代現業極軌道衛星 JPSS (Joint Polar Satellite System) シリーズ衛星の1号機で、JPSS シリーズの準備衛星である Suomi-NPP (Suomi National Polar-orbiting Partnership) (2011年10月28日打ち上げ) と同様のセンサーが搭載されている。気象庁では既に、Suomi-NPP 搭載のマイクロ波サウンダ ATMS (Advanced Technology Microwave Sounder) および、ハイパースペクトル赤外サウンダ CrIS (Cross-track Infrared Sounder) の輝度温度データを2017年3月29日より全球解析で利用しており (平原 2017; 亀川・計盛 2017)、NOAA-20 についても ATMS および CrIS の輝度温度データの利用を2019年3月5日より開始した。本項では、新規に利用を開始したこれらのデータによる解析・予測への影響について解説する。

(2) ATMS および CrIS について

ATMS および CrIS は、いずれもサウンダ (鉛直探査計) と呼ばれるタイプのセンサーである。衛星に搭載されたサウンダは、複数の波長で地球大気や地表面からの放射強度 (輝度温度) を測定することにより、大気における気温や水蒸気の鉛直分布に関する情報を広範囲にわたって取得することができるため、数値予報にとっては非常に重要な観測手段である (岡本 1999)。

ATMS を含むマイクロ波サウンダは、酸素の 60 GHz 吸収帯や水蒸気の 183 GHz 吸収帯などを用い、気温や水蒸気の鉛直分布に関する情報を取得するセンサーである。ATMS は、米国の現業極軌道衛星シリーズ NOAA や欧州の現業極軌道衛星シリーズ Metop 等に搭載された気温サウンダ AMSU-A および水蒸気サウンダ MHS の後継センサーで、これらのセンサーと概ね同等の波長帯を合わせた 22 チャンネルで構成されている。ATMS の主要諸元については、岡本 (2007) にまとめられているほか、ATMS の利用方法の詳細については平原 (2017) に記載されているので参照されたい。2019年10月時点で、ATMS については気温チャンネル 6-9 (主に対流圏の気温に感度) および水蒸気チャンネル 18-22 (主に対流圏中上層の水蒸気量に感度) をデータ同化に利用している。

CrIS を含むハイパースペクトル赤外サウンダは、赤外波長帯に高い波数分解能で数千ものチャンネルを有しており、二酸化炭素や水蒸気などの吸収帯を用いて気温や水蒸気の鉛直分布に関する情報を取得するセンサーである。CrIS を含むハイパースペクトル赤外サウンダの主要諸元については、岡本 (2011) にまとめられているほか、CrIS の利用方法の詳細については亀川・計盛 (2017) に記載されているので参照されたい。2019

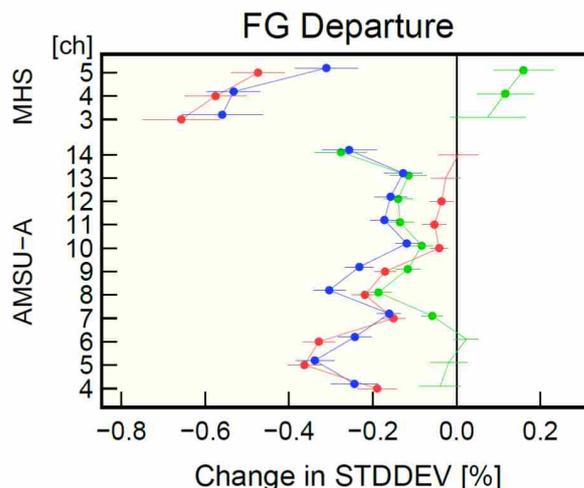


図 3.1.3 マイクロ波気温サウンダ AMSU-A およびマイクロ波水蒸気サウンダ MHS に関する、FG departure (観測値と第一推定値の差) の標準偏差 (STDDEV) のコントロール実験に対する変化率。NOAA-20/ATMS のみを追加した実験 (TEST1、赤線)、NOAA-20/CrIS のみを追加した実験 (TEST2、緑線)、NOAA-20/ATMS および CrIS を合わせて追加した実験 (TEST3、青線) についての結果。横軸は変化率 [%]、縦軸はチャンネル番号。エラーバーは 95% 信頼区間、丸印は変化率の正負が統計的に有意であることを示す。統計期間は 2018 年 8 月 1 日～10 月 31 日。統計対象領域は全球。

年 10 月時点で、CrIS については、数値予報での利用を目的に全 2211 チャンネルから抽出して作成・配信されている 431 チャンネルのデータセットのうち、気温に感度のある 27 チャンネルをデータ同化に利用している。

なお、ATMS および CrIS とともに、今後も NOAA の JPSS シリーズ衛星に搭載予定であり、当庁の数値予報システムでも継続してデータを利用する予定である。

(3) データ品質および同化設定

NOAA-20 のデータ品質については、全球数値予報システムを用いた計算輝度温度との比較調査により、Suomi-NPP と比較して、ATMS の気温チャンネルはノイズが少なく品質が若干良いこと、水蒸気チャンネルは同程度の品質であることが確認された。また CrIS についても同程度以上の品質が確認された。

間引き距離や観測誤差といった同化に用いる設定値は、Suomi-NPP とのデータ品質の差異が同程度または若干の改善程度であったことから、既に利用中の Suomi-NPP と同じ値を適用した。ただし、スキャンバイアス補正量 (観測視野ごとの補正量) については衛星・センサー固有の値が必要なため、上記の調査結果から統計処理により求めた。

NOAA-20 の追加による利用データ数は、Suomi-NPP の観測と重複する領域においてどちらか一方の衛星のデータのみを使用するという間引きが適用され

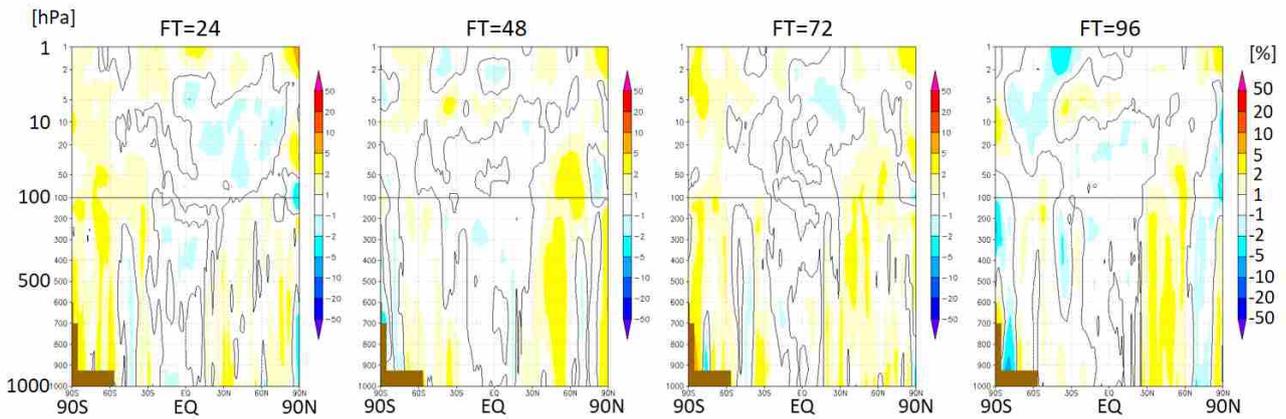


図 3.1.4 NOAA-20/ATMS および CrIS を追加した実験 (TEST3) の、コントロール実験 (CNTL) に対するジオポテンシャル高度の改善率 [%] の緯度別鉛直分布。それぞれの実験の解析値を参照値とした二乗平均平方根誤差 (RMSE) について、 $(CNTL-TEST3) / CNTL$ を改善率とした。正の値 (暖色) は改善、負の値 (寒色) は改悪を意味する。左図から予測時間 24 時間、48 時間、72 時間および 96 時間を対象とした結果。黒曲線は、ゼロ値の等値線。図中の茶色の部分はデータの無い南極大陸付近についてマスキングした領域を示す。統計期間は 2018 年 8 月 1 日～10 月 31 日。

た結果、ATMS および CrIS のいずれについても、追加前のデータ量と比較して 1.8 倍程度となった。

(4) 解析・予測への影響

NOAA-20/ATMS および CrIS の解析・予測への影響を確認するため、2018 年夏季を対象に全球解析予報サイクル実験を実施した。NOAA-20 を利用しない実験 (コントロール実験、CNTL) に対し、NOAA-20/ATMS のみを追加した実験 (TEST1)、NOAA-20/CrIS のみを追加した実験 (TEST2)、ならびに NOAA-20/ATMS および CrIS を同時に追加した実験 (TEST3) をそれぞれ実施した。検証期間は 2018 年 8 月 1 日～10 月 31 日とした。

上記の NOAA-20 データを追加した各実験において、利用された観測データの FG departure の標準偏差のコントロール実験に対する変化率を確認した (図 3.1.3)。ここでは、各実験において共通に利用されていて、ATMS や CrIS と同様に気温や水蒸気の鉛直分布に感度があり、今回は利用方法を変更していない AMSU-A および MHS についての結果に着目する。変化率が負の場合は、追加されたデータにより第一推定値が観測データと整合するように変化することを意味し、観測データに対する第一推定値の誤差が減少し、精度が改善したことを示す。第一推定値の精度向上は、解析予報サイクルを通じて同化される観測値の影響を受けた結果であり、解析値の精度が向上したことを示唆する。NOAA-20/ATMS のみを追加した実験 (TEST1、赤線) では、ATMS で同化した気温チャンネル 6-9 に相当する AMSU-A のチャンネル 5-8 (主に対流圏の気温に感度) を中心に、標準偏差の減少が確認できる。また水蒸気チャンネル 18-22 に相当する MHS のチャンネル 3-5 (主に対流圏中上層の水蒸気量に感度) の標準偏差の減少も確認できる。NOAA-20/CrIS のみを追

加した実験 (TEST2、緑線) では、雲域の影響を受けない成層圏に感度のある CrIS のチャンネルが多く利用されたことに対応し、AMSU-A のチャンネル 8-14 (主に成層圏の気温に感度) を中心に標準偏差の減少が確認できる。NOAA-20/ATMS および CrIS を合わせて追加した実験 (TEST3、青線) では、ATMS、CrIS それぞれを単体で追加した効果を合算したような結果となり、ここに示した AMSU-A および MHS の全チャンネルにわたって標準偏差の減少が確認できる。その他の観測データについても、AMSU-A や MHS にみられた結果に整合的な標準偏差の減少が確認できた (図省略)。

予測への影響について、NOAA-20/ATMS および CrIS を追加した実験 (TEST3) における、ジオポテンシャル高度予測の解析値に対する二乗平均平方根誤差 (RMSE) の改善率の緯度別鉛直分布を図 3.1.4 に示す。中緯度帯を中心に対流圏から成層圏にわたって全体的に改善しており、特に北半球で顕著であった。

(5) まとめと今後

NOAA-20 に搭載されているマイクロ波サウンダ ATMS およびハイパースペクトル赤外サウンダ CrIS の輝度温度データを利用した全球解析予報サイクル実験を実施した。その結果、第一推定値における他の観測データとの整合性の向上により、解析値における気温や水蒸気量の誤差の減少が示唆されたほか、予測値では主に中緯度帯において対流圏から成層圏にわたるジオポテンシャル高度の精度向上が確認できた。この結果を受け、2019 年 3 月 5 日より、NOAA-20 の ATMS および CrIS 輝度温度データの全球数値予報システムでの利用を開始した。

今後の課題として、ATMS に関しては、概ね成層圏に感度のあるチャンネル 10-15 (AMSU-A のチャンネル

ル9-14に相当)の利用が挙げられる。2019年10月時点の利用方法では、上記のATMSチャンネルの利用により、既存のAMSU-A観測値において第一推定値との整合性が悪化する傾向を示すことから(平原2017)、バイアス補正の見直しなど適切な対処が必要と考えられる。CrISに関しては、水蒸気に感度のあるチャンネルの利用が今後の課題として挙げられる。さらには、メソ解析や局地解析におけるATMS、CrISの利用開始に向けた開発や、観測誤差の最適化、観測誤差相関の考慮などの課題について取り組む必要がある。

参考文献

- 岡本幸三, 1999: サウンダ. 数値予報課報告・別冊第45号, 気象庁予報部, 44-72.
- 岡本幸三, 2007: ATOVS 直接同化. 数値予報課報告・別冊第53号, 気象庁予報部, 57-70.
- 岡本幸三, 2011: ハイパースペクトル赤外サウンダ. 数値予報課報告・別冊第57号, 気象庁予報部, 25-36.
- 計盛正博, 2016: ひまわり8号晴天放射輝度温度の利用開始. 平成28年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 46-49.
- 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.
- 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.
- J. Hocking and P. Rayer and R. Saunders and M. Matricardi and A. Geer and P. Brunel, 2010: RT-TOV v10 Users Guide. *NWPSAF-MO-UD-023, EUMETSAT*.

3.2 メソ解析における観測データ利用の改良及びメソ数値予報システムにおける北西太平洋高解像度日別海面水温解析の利用開始¹

3.2.1 はじめに

気象庁メソ数値予報システムに、2019年3月26日に次の5つの改良を導入した。

- 静止気象衛星ひまわり8号から算出される晴天放射輝度温度 (CSR: clear-sky radiance) データの利用拡大 (第3.2.2項)
- 高解像度のマイクロ波散乱計 Advanced Scatterometer (ASCAT) 海上風データの利用開始 (第3.2.3項)
- 航空機気温データバイアス補正の導入 (第3.2.4項)
- 地上 GNSS (Global Navigation Satellite Systems)² 可降水量データの利用手法の改良 (第3.2.5項)
- 北西太平洋高解像度日別海面水温解析 (HIMSST) の利用開始 (第3.2.6項)

本節では、これらの改良の概要や解析・予報への影響を解説し、第3.2.7項にて、全ての変更を加えた実験結果を示す。最後に第3.2.8項で、本節のまとめを示す。

3.2.2 ひまわり8号のバンド9, 10のCSRデータの追加利用

メソ解析では、ひまわり8号による観測データから作成した水蒸気バンド8 (中心波長は6.2 μm) のCSRデータを利用してきた (計盛 2016)。この水蒸気バンド8は、主に対流圏上層の水蒸気の情報を持つバンドである。今回、第3.1.2項で示した全球解析におけるCSRの利用高度化で採用した手法と同じ品質管理手法を適用し、メソ解析でも、バンド8より下層の水蒸気の情報を持つバンド9, 10 (中心波長はそれぞれ6.9 μm , 7.3 μm) のCSRデータを利用開始した。観測誤差やグロスエラーチェックの閾値は、メソ解析においてバンド8のCSRに適用しているものと同じ設定とした。

ひまわり8号バンド9, 10のCSRを同化することにより、対流圏中下層の水蒸気場の改善が期待される。期待される効果が見られるか確認するため、2018年10月時点の現業メソ数値予報システムと同等の実験システムをベース (以下、ベース実験) として、それにひまわり8号バンド9, 10のCSRを利用するよう変更を加えた実験 (以下、追加実験) を夏 (2017年6月27日~7月31日)・冬 (2017年12月11日~2018年1月15日) のそれぞれ約1か月間実施した。その結果、他の対流圏の水蒸気場に感度のある観測データの観測値

と第一推定値の差 (FG departure) の標準偏差が、追加実験ではベース実験と比較し減少したことが確認された。対流圏水蒸気場に感度のある観測データの例として、ベース実験と追加実験で共に利用されているマイクロ波水蒸気サウンダ (MHS: Microwave Humidity Sounder) のFG departureの標準偏差の変化率と、追加実験でのひまわり8号バンド9のCSR利用データ数の水平分布を図3.2.1に示す。夏・冬期間とも、それぞれCSRの利用データ数が多い領域とその周辺で、MHSのFG departureの標準偏差の減少が顕著に見られる。これは、追加したバンドのCSRの同化により、第一推定値の水蒸気場が改善したことを示している³。

3.2.3 高解像度ASCAT海上風の利用開始

マイクロ波散乱計 (以下、散乱計) は、地球に向かってマイクロ波を放射して地表面での後方散乱強度を測定する能動型の測器で、海面の状態を介して海上の風ベクトルを推定することができる⁴。メソ解析では2015年12月より、オランダ王立気象研究所 (KNMI: the Royal Netherlands Meteorological Institute) により作成されたASCAT海上風プロダクトをデータ同化に利用している (守谷 2016)。ASCATは欧州気象衛星開発機構が運用する極軌道衛星Metopシリーズに搭載されている散乱計であり、現在、Metop-A衛星およびMetop-B衛星によるASCAT海上風プロダクトを利用している。2018年11月に打ち上げられたMetop-C衛星によるASCAT海上風プロダクトも今後利用する予定である。

プロダクト作成元のKNMIでは海上風を導出する際の空間平滑化の処理の違いにより、「25 km 風プロダクト」と「沿岸風プロダクト」と呼ばれる2種類の水平解像度のASCAT海上風プロダクトを配信している。今回、メソ解析において、これまで利用していた25 km 風プロダクトに代えて、新しくより高解像度な沿岸風プロダクトの利用を開始した。沿岸風プロダクトは12.5 km間隔で風ベクトルを算出しており、25 km 風プロダクトと比較してデータは密に存在するが、観測誤差の空間的な相関を除去するために従来通り0.5°間隔で間引き処理を行う。このため、利用される海上風データの空間密度は変わらないが、より海岸近くまでデータが利用できるため、全体的に利用されるデータ数は増加する (図3.2.2)。

¹ 太田 行哉、岡部 いづみ、小屋松 進、西本 秀祐、谷 寧人 (企画課防災企画室)

² 全球航法衛星システム。米国の全球測位システムGPS (Global Positioning System) を含む国際的な測位衛星システムの総称。

³ 同化する観測データを増やした場合、解析値はその観測データに寄り、他の観測データへは近づいたり遠のいたりするが、それぞれの観測値の誤差を考慮した上で尤もらしい値を算出したのが解析値なので、観測データへの整合性の変化から解析値の精度の変化を評価するのは難しい。短時間予報である第一推定値は、解析値や観測値より誤差が大きいため、改良とは独立の観測データとの整合性が向上すれば、それは解析精度が改善したからであると考えられる。

⁴ 散乱計の詳細な観測原理については太原 (1999) を参照。

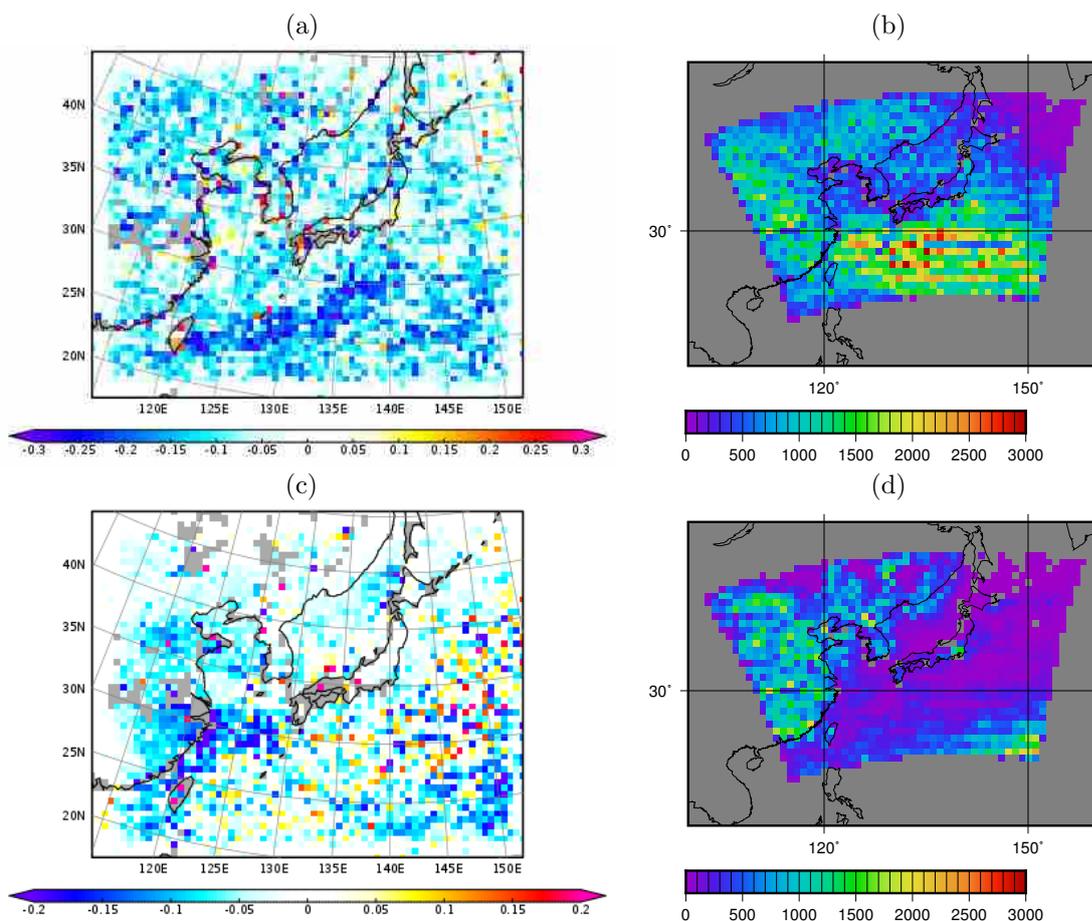


図 3.2.1 (a), (c) はマイクロ波水蒸気サウンダのチャンネル 4 において、ベース実験に対するバンド 9, 10 追加実験の FG departure の標準偏差の変化率 [%]。 (b), (d) はバンド 9, 10 追加実験における、ひまわり 8 号バンド 9 の CSR 利用データ数。統計期間は、(a), (b) が 2017 年 6 月 27 日～7 月 31 日 (夏期間)、(c), (d) が 2017 年 12 月 11 日～2018 年 1 月 15 日 (冬期間)。

3.2.4 航空機気温データバイアス補正の導入

航空機の気温データには、機体毎に固有のバイアスがあることが知られている (Ballish and Kumar 2008)。全球解析では機体・高度別に気温データの FG departure の前月統計値からバイアス補正值を算出して、当月の航空機気温データを補正する手法 (酒匂 2010) を 2010 年に導入した。メソ解析においても FG departure の統計から、日本付近の航空機気温データのバイアスがラジオゾンデ気温データと比較して全体的に高温バイアスである (図 3.2.3) ことから、バイアス補正の必要性が生じている。そこで、メソ解析に全球解析で算出したバイアス補正值を利用する手法を導入した。この手法は全球モデルの第一推定値のバイアスに依存するが、各機体の気温データには気象場によらず一定のバイアスが生じていることが多いこと、打ち切り時間が長い全球解析の方が統計に必要なサンプル数が多いこと、後で示すようにメソ解析でもバイアス補正の効果が見られたことから、この手法を採用することにした。

このバイアス補正手法の効果を確認するため、2018 年 6 月 12 日から 7 月 21 日までのデータ同化実験を実施した。図 3.2.4 に、航空機気温データの FG departure

統計値のバイアス補正導入前実験とバイアス補正導入後実験の比較図を示す。バイアス補正によって、航空機気温データの高温バイアスが減少した。さらに、バイアス補正をすることで、各データの第一推定値に対するばらつきが小さくなり、FG departure の標準偏差も大幅に減少した。航空機気温データのバイアスは一律に高温ではなく、機体によって異なったバイアス量を持つため、FG departure のばらつきの要因となっていたためである。

3.2.5 地上 GNSS 可降水量データの利用手法の改良

メソ解析と局地解析では、国土地理院の整備する GEONET (GNSS Earth Observation NETWORK system) から取得した約 1300 地点の地上 GNSS 観測点のデータから、気象官署の地上気圧、地上気温データを用いて可降水量データを算出し同化している。小司・国井 (2008) や石川 (2010) は、降水域の地上 GNSS 可降水量データには第一推定値に対して負バイアスを持っていることを示した。そのため、2009 年 10 月 28 日からのメソ解析における GNSS 可降水量データの利用開始時には、解析雨量で 1.5 mm/h 以上の降水が観測された地点では、可降水量データを使用しないこととし

ていた。

しかし、近年の GNSS 可降水量データを用いた再調査では、第一推定値に対する負バイアスが見られないことがわかった。図 3.2.5 に、2018 年 8 月の現業メソ解析で降水域と判定された可降水量データの FG departure ヒストグラムを示す。比較のために非降水域の可降水量データも載せている。この調査の結果、降水域の可降水量データにはバイアスが認められなかった。調査可能な 2015 年 6 月以降、現在までの可降水量データでも同様であった。観測機器や可降水量データ算出アルゴリズムは利用開始当時から変わらないため、バイアスが見られなくなった要因は、主に第一推定値側の変化であると考えられる。近年の数値予報システムの改良によって、モデルの降水域における水蒸気の表現が改善したためと推測される。これらの結果を受けて、メソ解析での解析雨量による品質管理処理を廃止し、降水域を含めた可降水量データの利用を開始した。

併せて、2018 年 3 月に気象庁で入手した GEONET

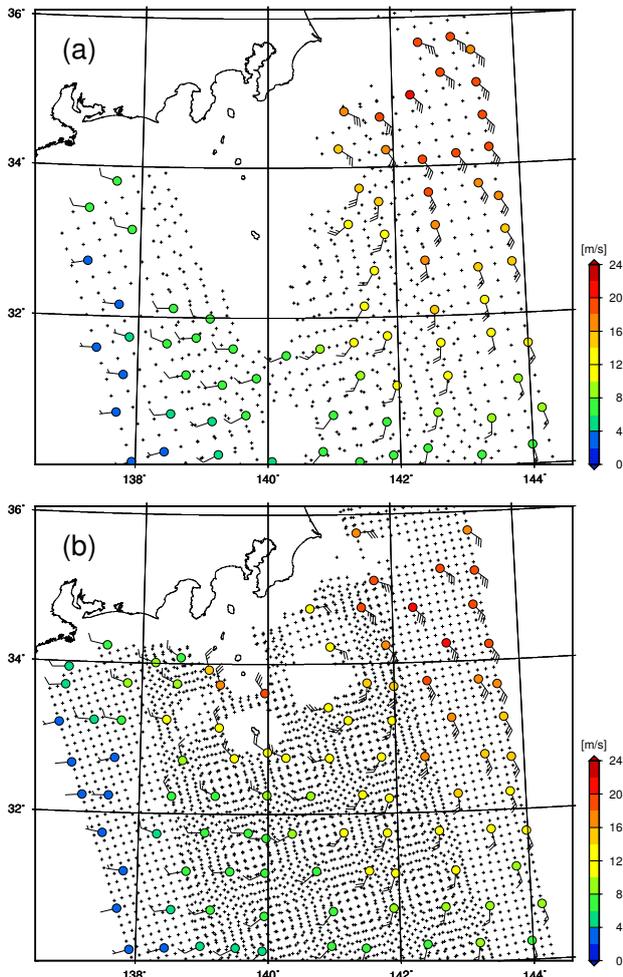


図 3.2.2 2016 年 8 月 16 日 12UTC のメソ解析における (a) ASCAT 25 km 風プロダクト、および (b) 沿岸風プロダクトのデータ分布。品質管理または間引き処理によりデータ同化に利用されないデータを黒十字で、同化に利用されるデータを風速 [m/s] に応じた色つきの丸と矢羽で表す。

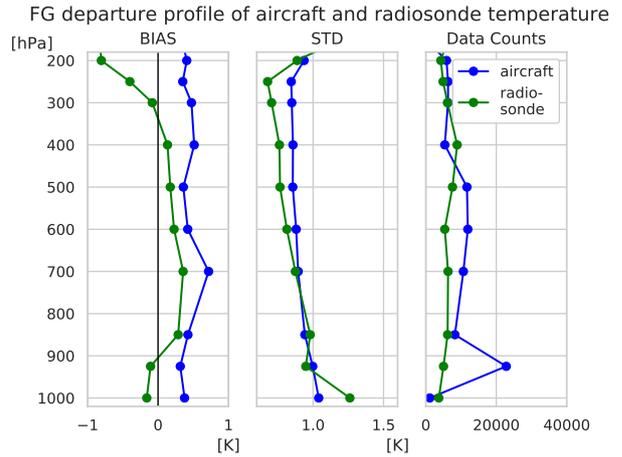


図 3.2.3 日本付近にある航空機気温データの FG departure 統計の鉛直分布 (青) とラジオゾンデ気温データの FG departure 統計の鉛直分布 (緑)。左から、FG departure の平均 (BIAS)、標準偏差 (STD)、データ数 (Data Counts)。航空機気温データはラジオゾンデ観測時刻に近い 00UTC と 12UTC 付近を選んでいる。統計期間は 2018 年 6 月 12 日から 7 月 21 日まで。

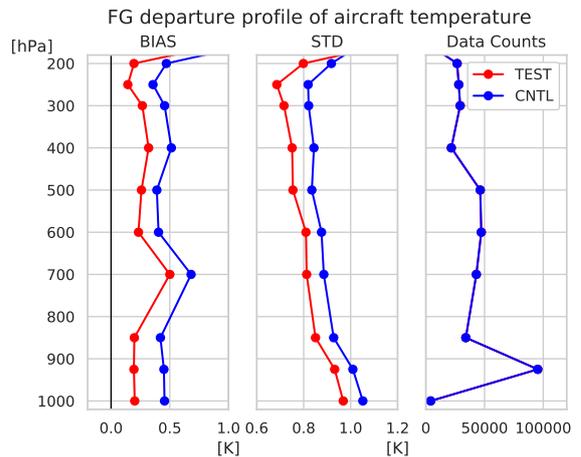


図 3.2.4 日本付近の航空機気温データの FG departure 統計の鉛直分布。バイアス補正導入後実験 (赤) とバイアス補正導入前実験 (青)。図の並びや統計期間は図 3.2.3 と同じ。航空機気温データは全時刻を用いて、データ数はどちらの実験もほぼ変わらない。

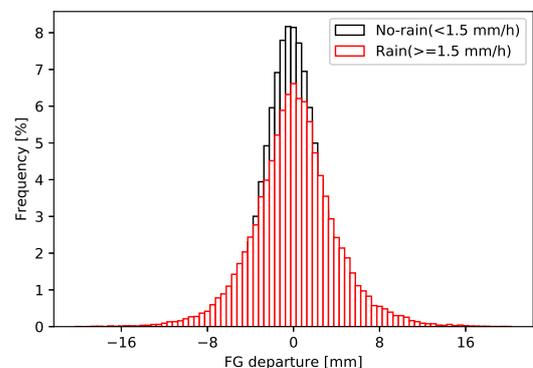


図 3.2.5 地上 GNSS 可降水量データの FG departure ヒストグラム。非降水域 (黒) と降水域 (赤)。統計期間は 2018 年 8 月の 1 か月。

観測の地点数が約 100 地点増加したため、可降水量データの品質に問題がないことを確認し、それらの地点を追加利用した。

3.2.6 HIMSST の利用開始

(1) 変更の概要

メソ数値予報システムの下部境界条件に使われている海面水温 (SST: Sea Surface Temperature) を、全球日別海面水温解析 (MGDSST: Merged satellite and in-situ data Global Daily Sea Surface Temperature; 栗原ほか 2006) から北西太平洋高解像度日別海面水温解析 (HIMSST: High-resolution Merged satellite and in-situ data Global Daily Sea Surface Temperature; 気象庁地球環境海洋部 2016) に変更した。HIMSST は MGDSST が利用している観測データに加えてひまわり 8 号の高解像度・高頻度の観測データを用いて計算した海面水温解析である。

(2) メソモデル (MSM) における SST の役割

SST は海上における数値予報モデルの下部境界条件の役割を持ち、海面と大気間の熱・水蒸気の輸送 (潜熱・顕熱フラックス) 等の計算に用いられる。詳細については草開 (2012) 等を参照されたい。

(3) SST 変更によるインパクト

HIMSST, MGDSST はどちらも解析対象時刻以前の観測データを用いて解析時刻における SST を計算している。そのため SST の変動が観測船やブイによる観測データよりも遅れる傾向があり、HIMSST や MGDSST をもとに計算する顕熱・潜熱フラックス等の精度に影響を与えている。しかし、HIMSST はひまわり 8 号の高頻度な観測データを用いることにより、MGDSST よりも SST 変動の遅れが小さいことが分かっている (気象庁地球環境海洋部 2016)。SST を HIMSST に変更したことにより、潜熱フラックスの対 OAFflux (Objectively Analyzed air-sea heat Fluxes)⁵ 誤差に減少が見られた。その実例を 1 つ示す。

図 3.2.6 (a) は、2018 年 7 月 2 日に台風第 7 号が通過した 28.5°N, 127.5°E の地点における潜熱フラックスの時系列図である。2018 年 6 月 19 日から 7 月 15 日における、SST にそれぞれ MGDSST, HIMSST を用いた場合の MSM の FT=6 の潜熱フラックスと OAFflux 解析値をプロットしている。同様に図 3.2.6 (b) は同じ地点における SST の時系列図であり、それぞれ MGDSST, HIMSST, MGDSST 遅延解析⁶ をプロットしている。

⁵ WHOI (Woods Hole Oceanographic Institution) が作成しているプロダクトの名称。ECMWF、NCEP の全球再解析、観測船や衛星の観測データをもとに推定した全球の顕熱・潜熱フラックスの日別解析値が含まれる。詳しくは Yu et al. (2008) を参照。

⁶ 気象庁海洋気象情報室が約 5ヶ月後に作成する MGDSST の再解析。解析対象時刻よりも後の時刻の観測データも用いて解析を行う。

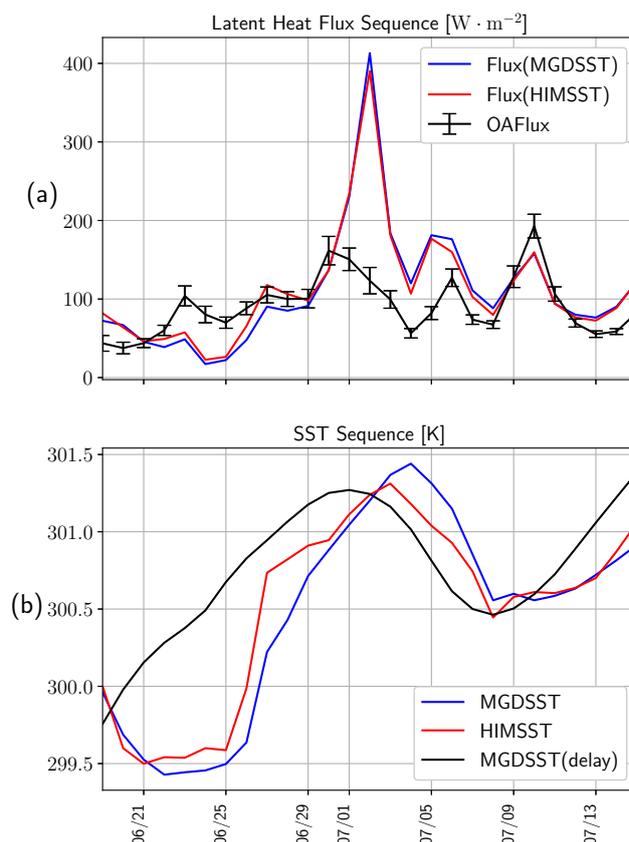


図 3.2.6 2018 年 6 月 19 日から 7 月 15 日までの、28.5°N, 127.5°E における (a) 潜熱フラックス [Wm^{-2}] と (b) SST [K] の時系列。 (a) において、青、赤はそれぞれ SST に MGDSST, HIMSST を用いた場合の FT=6 における MSM の潜熱フラックス、黒は OAFflux 解析値を表す。また (b) において、青、赤、黒はそれぞれ MGDSST, HIMSST, MGDSST 遅延解析の値を表す。

台風の接近に伴い MGDSST 遅延解析では 7 月 1 日ごろから海面水温の低下を表現し始めるのに対して、HIMSST は 7 月 3 日ごろから、MGDSST は 7 月 4 日ごろから海面水温の低下を表現し始める。台風通過後の数日間、MSM の潜熱フラックスは HIMSST を利用した場合、MGDSST を利用した場合のどちらにおいても対 OAFflux で大きな正の誤差がある。しかし HIMSST の方が MGDSST よりも早く海面水温低下を表現し始めるため、HIMSST を利用した結果の方が潜熱フラックスは小さくなり、対 OAFflux 誤差も小さくなる。

このように、下部境界条件に用いる SST を HIMSST に変更したことにより、SST 変動の遅れに伴う潜熱フラックスの誤差が減少する。特に台風や前線の移動に伴って激しく SST が変動する夏に誤差の減少は大きくなる。

3.2.7 解析・予報への影響

2018 年 10 月時点の現業メソ数値予報システムと同等の対照実験 (CNTL) と、本節で述べた 5 つの改良をすべて加えたテスト実験 (TEST) を行い、解析や予報への効果を確認した。実験期間は 2018 年 6 月 18 日か

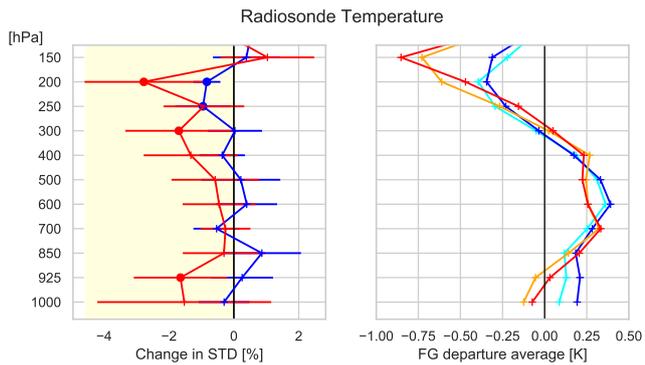


図 3.2.7 データ同化で使用したラジオゾンデの気温データの FG departure 統計の鉛直分布。左図は TEST の CNTL に対する FG departure の標準偏差の変化率 [%]。赤色が夏実験、青色が冬実験。エラーバーは 95% の信頼区間、丸印は変化率の正負が統計的に有意な差であることを示す。右図は FG departure の平均。赤線が TEST の夏実験、橙線が CNTL の夏実験、青線が TEST の冬実験、水色線が CNTL の冬実験。

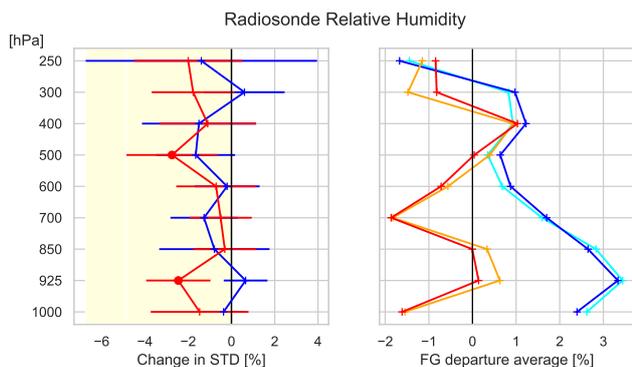


図 3.2.8 図 3.2.7 と同じ。ただしラジオゾンデの相対湿度データの FG departure 統計。

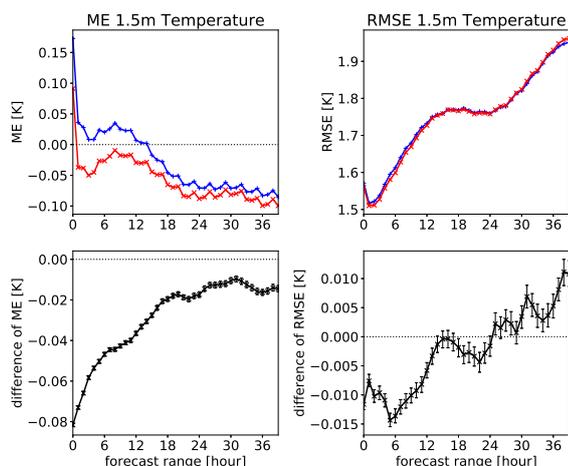


図 3.2.9 夏実験の予報時間別のアメダス気温に対する検証結果。左図は平均誤差 (ME)、右図は二乗平均平方根誤差 (RMSE)。上段が TEST (赤)、CNTL (青) それぞれの誤差の値。下段が TEST と CNTL の差 (TEST-CNTL)、エラーバーは 95% の信頼区間を示す。

ら 7 月 23 日 (夏実験)、2017 年 12 月 23 日から 2018 年 1 月 27 日 (冬実験) である。データ同化実験は、上記期間の 5 日前から行った。

今回の改良には直接関係していないラジオゾンデ観測データを用いて、第一推定値への影響を確認した⁷。図 3.2.7 のラジオゾンデの気温データの FG departure 統計から、主に航空機気温データバイアス補正の効果によって、CNTL と比べて TEST では対流圏上層の 200 hPa~300 hPa⁸ で第一推定値の高温バイアス (負の FG departure) が減少したことがわかる。一方、CNTL と比べて TEST では、対流圏下層で夏実験の最下層を除き、低温バイアスが増加 (FG departure が正の方向に変化) した。また、夏季の対流圏で FG departure の標準偏差が減少した。続いて、図 3.2.8 のラジオゾンデの相対湿度データの FG departure 統計から、夏季の下層乾燥バイアス (正の FG departure) が減少し、夏季、冬季ともに対流圏で FG departure の標準偏差が減少したことがわかる。これは主に CSR の利用高度化による効果である。ラジオゾンデ気温・相対湿度の FG departure の標準偏差が減少したことから、今回の改良によって第一推定値の精度が改善したことを確認した。ラジオゾンデ以外の各種衛星センサーにおいても同様の効果を確認した。このことから、本改良によって解析値・第一推定値の精度が向上したと言える。

図 3.2.9 に夏実験の予報時間別のアメダス気温に対する検証結果を示す。二乗平均平方根誤差 (右図) は 24 時間予報まで減少し、気温場の解析精度改善の効果が現れている。一方、平均誤差 (左図) では予報時間の経過に伴う負バイアスがわずかに拡大した。これは、航空機気温データバイアス補正で解析値の下層気温を低下させた影響が大きい。冬実験でも同様の結果であった (図略)。

図 3.2.10 に夏実験の降水統計検証結果を示す。多くの閾値でバイアスコアが減少し、閾値 10 mm/3h から 30 mm/3h までバイアスコアが 1 に近づいて改善した。エクイタブルスレットスコアでは閾値 10 mm/3h 以外で改善した。空振り率が全ての閾値で減少し改善した一方、15 mm/3h 以下の弱い降水の閾値で見逃し率が増加した。閾値 10 mm/3h の改悪は、特に閾値 10 mm/3h の見逃し率が大きかったことに起因する。冬実験では大きな違いは見られなかった (図略)。

降水予測が改善した 2018 年 7 月 6 日 15UTC 初期値の事例を図 3.2.11 に示す。九州地方に東西にのびる降

⁷ 同化する観測データを増やした場合、解析値はその観測データに寄り、他の観測データへは近づいたり遠のいたりするが、それぞれの観測値の誤差を考慮した上で尤もらしい値を算出したのが解析値なので、観測データへの整合性の変化から解析値の精度の変化を評価するのは難しい。短時間予測である第一推定値は、解析値や観測値より誤差が大きいため、改良とは独立の観測データとの整合性が向上すれば、それは解析精度が改善したからであると考えることが出来る。

⁸ 一般的な航空機の巡航高度

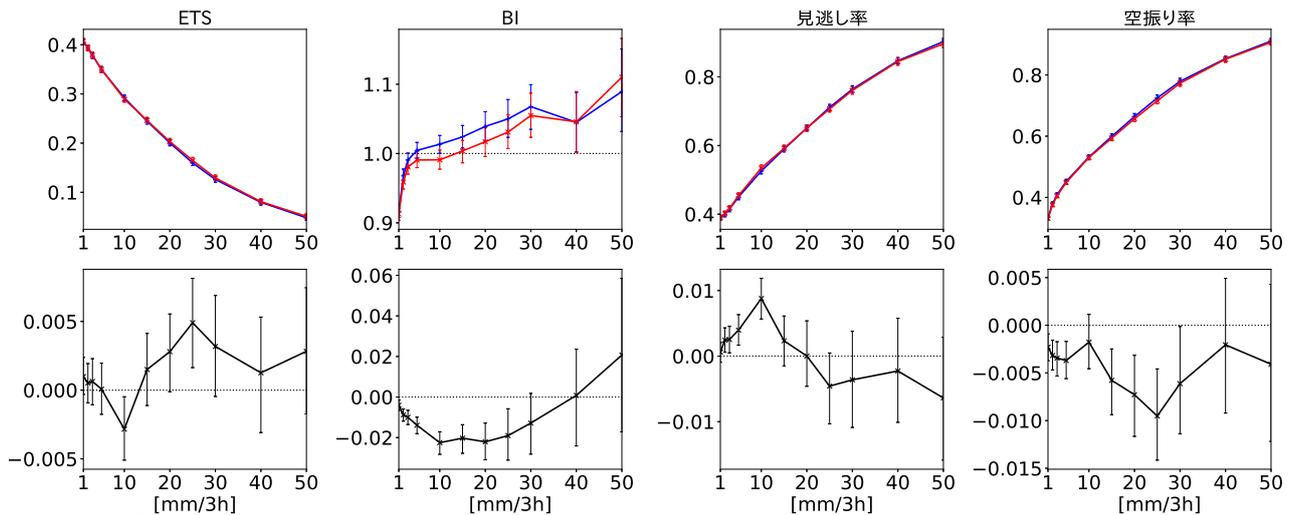


図 3.2.10 夏実験の解析雨量に対する 3 時間降水量の閾値別の統計検証結果。検証格子は 20 km。左からエクイタブルスレットスコア (ETS)、バイアスコア (BI)、見逃し率、空振り率。上段が TEST (赤)、CNTL (青) それぞれのスコア。下段が TEST と CNTL の差 (TEST-CNTL)、エラーバーは 95% の信頼区間を示す。

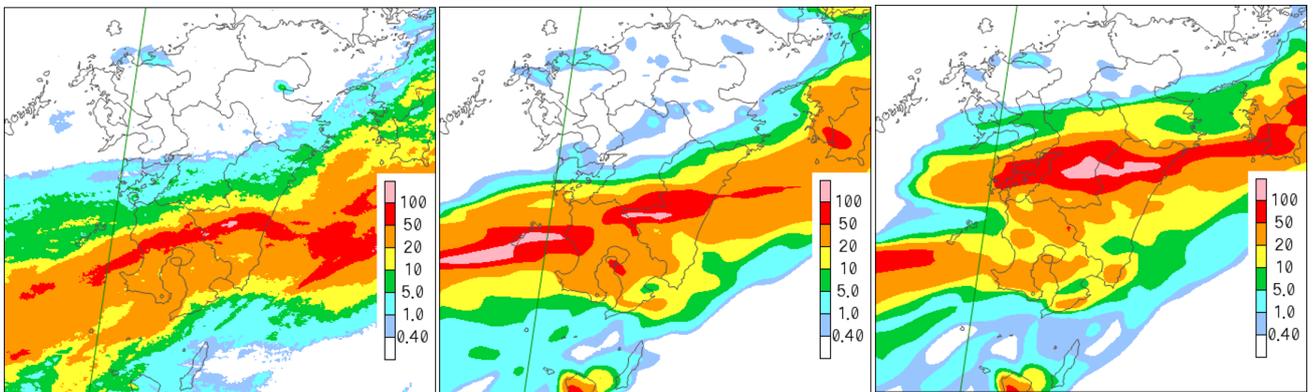


図 3.2.11 2018 年 7 月 7 日 03UTC の前 3 時間降水量 [mm/3h]。左から解析雨量、TEST 予測値、CNTL 予測値。予測値は 2018 年 7 月 6 日 15UTC 初期値の FT=12 の降水量を示す。

水域が CNTL では北にずれていたが、TEST ではより南側に予測しており、解析雨量に近づいていた。観測データ利用の改良や HIMSST の導入により、全体的に気温や水蒸気の解析値の精度が改善したことによって、このように降水帯の予測位置が改善した事例が、初期値に近い予報期間前半を中心にいくつか見られた。

3.2.8 まとめ

2019 年 3 月 26 日、メソ数値予報システムに本節で述べた 5 つの改良を導入した。ひまわり 8 号バンド 9、10 の CSR データを利用することにより、対流圏中下層の水蒸気の解析精度が向上した。高解像度 ASCAT 海上風を利用することにより、海岸付近までの海上風データが利用可能になった。航空機気温データバイアス補正を導入することで対流圏上層および下層の高温バイアスを軽減させた。地上 GNSS では、解析雨量による品質管理処理を廃止し、降水域を含めた可降水量データを利用可能とした。北西太平洋高解像度日別海面水温解析 (HIMSST) を利用することで、台風や前線

の移動による SST の変動により迅速に追従するようになり、それに伴い潜熱フラックスの誤差が減少した。

解析・予報への主な効果は以下の通りである。ラジオゾンデなどの観測データとの比較により、気温や水蒸気の解析精度の改善を確認した。アメダス気温に対する検証では、24 時間予報まで二乗平均平方根誤差の減少が見られたが、それ以降の予報時間では気温の負バイアスがわずかに拡大することになった。降水スコアは、夏実験においてバイアスコアや空振り率の減少が見られ、エクイタブルスレットスコアが改善したことを確認した。気温や水蒸気の解析精度が改善したことによって、降水帯の予測位置が改善した事例が、予報期間前半を中心にいくつか見られた。

参考文献

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.
計盛正博, 2016: ひまわり 8 号晴天放射輝度温度の利用開始. 平成 28 年度数値予報研修テキスト, 気象庁

- 予報部, 46–49.
- 気象庁地球環境海洋部, 2016: 北西太平洋高解像度日別海面水温解析格子点資料の提供について. 配信に関する技術情報 (海洋編) 第 444 号.
- 草開浩, 2012: 地表面過程. 数値予報課報告・別冊第 58 号, 気象庁予報部, 29–41.
- 栗原幸雄, 桜井敏之, 倉賀野連, 2006: 衛星マイクロ波放射計, 衛星赤外放射計及び現場観測データを用いた全球日別海面水温解析. 測候時報, 73, S1–S18.
- 酒匂啓司, 2010: 航空機気温データの全球解析での利用. 平成 22 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 33–37.
- 小司禎教, 国井勝, 2008: 地上 GPS 観測網による可降水量の同化. 気象研究ノート, 228–238.
- 太原芳彦, 1999: マイクロ波散乱計. 数値予報課報告・別冊第 45 号, 気象庁予報部, 27–43.
- 守谷昌己, 2016: マイクロ波散乱計の全球解析での利用方法の変更及びメソ解析での利用開始. 平成 28 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 55–57.
- Ballish, B. A. and K. Kumar, 2008: Systematic differences in aircraft and radiosonde temperatures. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **89**, 1689–1708.
- Yu, L., X. Jin, and R. A. Weller, 2008: Multidecade Global Flux Datasets from the Objectively Analyzed Air-sea Fluxes (OAFlux) Project: Latent and Sensible Heat Fluxes, Ocean Evaporation, and Related Surface Meteorological Variables. *Technical Report OA-2008-01, Woods Hole Oceanographic Institution, Woods Hole, MA.*

3.3 局地解析の高度化¹

3.3.1 はじめに

局地予報の初期値を作成する局地解析では、変分法バイアス補正手法によって衛星輝度温度・土壌水分量のバイアスを逐次的に補正しデータ同化をしている(幾田 2017)。2019年3月26日の局地解析の更新では、変分法バイアス補正手法の高度化、衛星輝度温度観測データの品質管理処理の変更、北西太平洋高解像度日別海面水温解析(HIMSST)の利用開始(第3.2.6項)と地上GNSS可降水量データの利用地点の拡大(第3.2.5項)を実施した。本節では、変分法バイアス補正手法の高度化及び衛星輝度温度観測品質管理の変更について概要を述べる。

3.3.2 変分法バイアス補正の高度化

局地解析の変分法バイアス補正の背景誤差の計算方法を佐藤・石橋の方法(佐藤 2007; 石橋 2008)からCameronの方法(Cameron and Bell 2018)に変更した。どちらの変分法バイアス補正の背景誤差の計算式にも、開発者が決めるパラメータが含まれている。佐藤・石橋の方法では観測データ数の下限値を開発者が与え、Cameronの方法では観測データ数の下限値と補正係数の収束期間の半減期を開発者が与える。Cameronの方法は、半減期のパラメータによって学習速度を制御できるため、より柔軟な設定が可能となり、将来的に様々な観測データへの適用や機能拡張の際にも個別に設定が可能で実装上の利便性が大きい。

3.3.3 衛星輝度温度観測データの品質管理の変更

局地解析のデータ同化本体では、変分法バイアス補正の導入(幾田 2017)によって衛星輝度温度観測データのバイアスは除かれているが、品質管理プログラムでは全球解析で求めたバイアス補正係数と説明変数でバイアスを補正した観測データで品質管理を行う仕様となっていた。幾田(2017)で述べられているように、全球解析のバイアス補正係数では局地解析で利用する衛星輝度温度観測データのバイアスを適切に補正することはできない。そのため、局地解析では観測データにバイアスが残った状態で品質管理を行っており、図3.3.1の青色実線のようにD値(観測値と第一推定値の差)が正負で偏った観測データが選択されていた。現在のデータ同化システムは、誤差が正規分布に従うことを仮定している。このように偏ったデータを利用することは、本来利用可能なデータを排除するだけでなく、解析値の誤差を拡大する原因となる。そこで局地解析の変分法バイアス補正係数と説明変数を使用するように変更し、観測データのバイアスが補正された状態で品質管理を行えるようにした。その結果、図3.3.1の赤色実線のように、偏りの無い正規分布に近い状態

で衛星輝度温度観測データを利用できるようになった。

3.3.4 まとめ

本節では2019年3月に行われた局地解析の更新のうち、変分法バイアス補正手法の高度化、衛星輝度温度観測データの品質管理処理の変更を概説した。変分法バイアス補正手法の高度化は、より柔軟なバイアス補正処理を可能とすることに加え、今後の拡張において重要な役割を果たすものでもある。また衛星輝度温度観測データの品質管理処理の変更により品質管理で不当に排除されていた観測データを救うことが可能となり、観測データの持つ情報を一層有効に活用できるようになった。これらの変更によって局地解析は、データ同化システムとして柔軟でより正しい実装へと更新されたことになる。

参考文献

- 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, 2008: 変分法バイアス補正の性質. 2008年度日本気象学会秋季大会公演予稿集, 268, D101.
- 佐藤芳昭, 2007: 変分法バイアス補正. 数値予報課報告・別冊第53号, 気象庁予報部, 171-173.
- Cameron, James and William Bell, 2018: The testing and implementation of variational bias correction (VarBC) in the Met Office global NWP system. *Weather Science Technical Report No: 631, Met Office*, 1-22.

¹ 幾田 泰醇

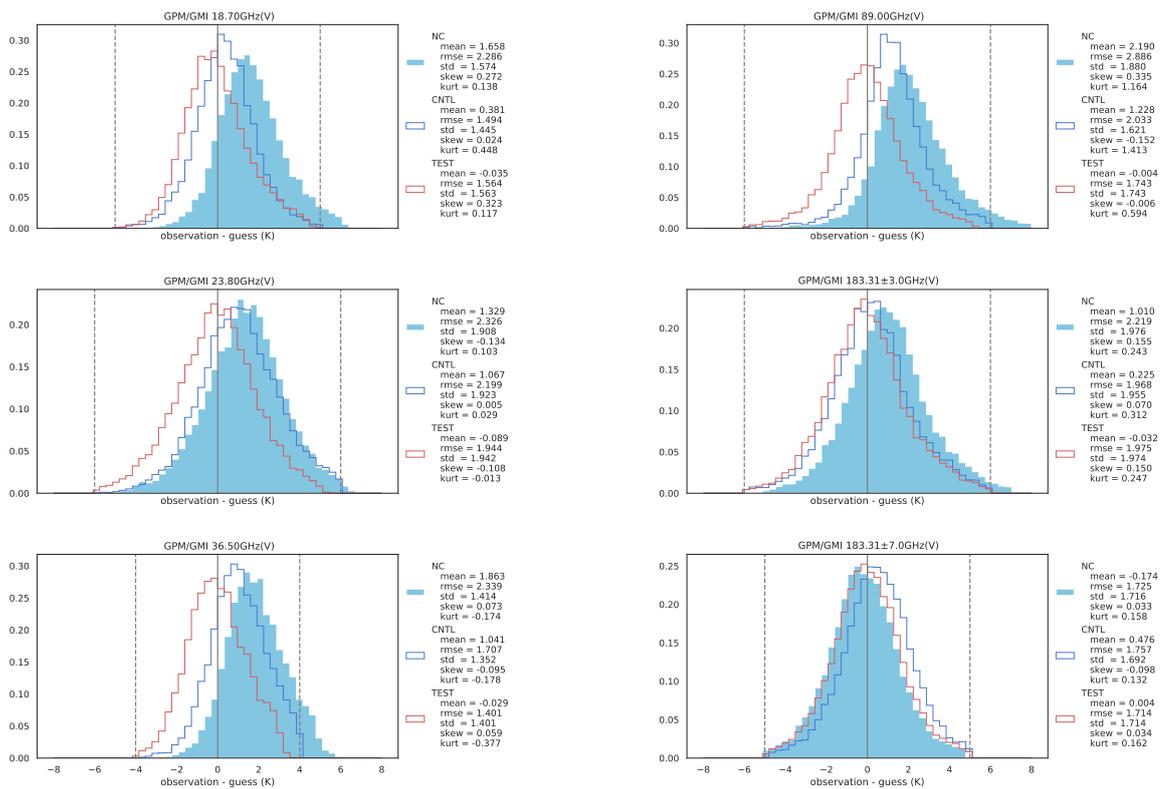


図 3.3.1 局地解析の衛星輝度温度観測データの品質管理プログラムで計算された異なる周波数の GPM/GMI の D 値ヒストグラム。統計期間は 2016 年 7 月 5 日 00UTC から 2016 年 8 月 22 日 21UTC とし、変分法バイアス補正の高度化と品質管理を変更した実験を TEST、変更前の実験を CNTL とする。青色の実線は CNTL、赤色の実線は TEST のバイアス補正済みの D 値ヒストグラム、水色の塗りつぶしはバイアス補正なしの D 値ヒストグラムを表す。また、図中の mean は平均値、rmse は二乗平均平方根誤差、std は標準偏差、skew は歪度、kurt は尖度を表す。