

3.8 全球解析における大気追跡風 (AMV) の利用 拡充

3.8.1 はじめに

大気追跡風 (AMV: Atmospheric Motion Vector) は、衛星風とも呼ばれ、時間的に連続する複数枚の衛星画像から、雲や水蒸気パターンを追跡しその移動量を求め、さらにその高度を推定することで算出される風ベクトルである (山下・今井 2007)。

全球解析でデータ同化に利用している AMV として、静止気象衛星の AMV の他に、極軌道衛星の Terra や Aqua に搭載された MODIS、及び同じく極軌道衛星の NOAA や Metop に搭載された AVHRR の画像から算出される極域の AMV (以下、極域 AMV) がある (計盛 2015)。このうち MODIS は、既に 20 年以上運用されており、近い将来 MODIS から算出した AMV (以下、MODIS AMV) を利用できなくなることが予想される。このため、全球解析で利用する極域 AMV データについては早期の補完が必須となっており、EUMETSAT から配信されている Metop-B と Metop-C の 2 機の AVHRR の画像を使った AMV (Dual-Metop AMV) について、2022 年 6 月 30 日に現業利用を開始した (気象庁 2023)。

極域 AMV のさらなる利用拡充のため、既に現業的に利用可能な Suomi-NPP と NOAA-20 の VIIRS (Visible Infrared Imager Radiometer Suite) から算出した AMV (以下、VIIRS AMV) について、利用に向けた調査・開発を行ってきた。VIIRS AMV は、2023 年 3 月 14 日より、全球解析でハイパースペクトル赤外サウンダ水蒸気チャンネル等 (3.7 参照) と併せて利用開始した。本節では VIIRS AMV の利用に関する開発について報告する。

3.8.2 VIIRS AMV の概要

VIIRS は、JPSS (Joint Polar Satellite System) シリーズに搭載される可視赤外放射計で、現在 Suomi-NPP と NOAA-20 の VIIRS の画像から算出される AMV が NOAA/NESDIS から配信されている。

VIIRS AMV は、約 100 分間隔の連続した 3 枚の赤外画像を用いて、画像の重なる高緯度域 (55° より極側) で算出される。また、AVHRR と同様に大気の窓バンド (10.8 μm) の赤外画像から NOAA/NESDIS で開発されたアルゴリズムにより算出され、個々の風ベクトルには高度情報と QI (Quality Indicator) と呼ばれる品質指標が付加されて配信されている (Daniels 2022)。

3.8.3 VIIRS AMV の品質管理

品質管理に用いる QI 及び、高度の閾値を決めるに際し、2020 年 7 月と 12 月のそれぞれ 1 か月間のデータにより VIIRS AMV の風速の東西成分、南北成分のそれぞれについて、GSM 初期値を第一推定値とした O-B 統計により特性を調査した。その結果、VIIRS AMV と第一推定値との風速差が、対流圏上層及び、陸域の

下層で大きくなる傾向がみられたことから、これらのデータは使用しないこととした。また品質管理に用いる QI 閾値は、バイアスもしくは標準偏差と QI 値との間に相関がほとんど見られなかったため、最低限の設定 (60 以上を利用) とした。Suomi-NPP と NOAA-20 の間では、AMV の特性の差異は見られなかったため、同じ品質管理を適用した。

今回の導入では数値予報で用いる計算機システム更新前に新規利用開始することを優先させるため、品質管理の設定については、従来から利用している AVHRR の AMV の利用方法 (山下・今井 2007; 山下 2015) を概ね踏襲した。VIIRS AMV に適用する品質管理の設定をまとめると以下の通り。

- 60°~88° の高緯度域のデータを利用
- 300 hPa より下層のデータを利用
- 海上では 700 hPa より上層、陸上では 400 hPa より上層のデータを利用
- QI 値が 60 以上のデータを利用

なお、同一の間引き格子に複数の極域 AMV が存在した場合は、同じ処理センターから提供された AMV については QI 値や間引き格子点からの距離を考慮したデータ選択を行い、その上で算出に用いられる衛星画像の種類によって優先順位 (MODIS、LEO GEO、Dual-Metop、VIIRS・AVHRR の順) を定めて利用する。

3.8.4 データの分布

図 3.8.1 に全球サイクル解析における極域 AMV の北半球のデータ分布図を示す。VIIRS AMV を利用することにより他の極域 AMV とともに北極域及び、南極域を観測データで広く覆うことができる。

3.8.5 VIIRS AMV 利用の影響評価

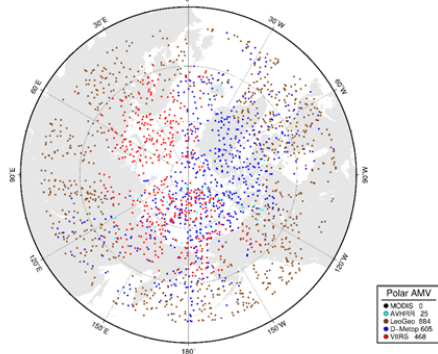
2022 年 7 月時点の現業全球数値予報システムと同等の実験をコントロール (CNTL) とし、MODIS AMV が利用できなくなった状況を想定し、CNTL から MODIS AMV を棄却したベースライン実験 (BASE) を実施した。その上で、BASE に Suomi-NPP と NOAA-20 の VIIRS AMV を追加したテスト実験 (TEST) を行い、BASE と TEST の結果を比較した。実験期間は、2021 年夏 (7 月 10 日~9 月 11 日)、2021-2022 年冬 (12 月 10 日~2 月 11 日) である。

図 3.8.2 に 500 hPa 高度の月平均解析場の TEST 及び、CNTL の BASE からの差を示す。北極域に着目すると、夏冬ともに 500 hPa 高度場に変化が見られた。冬実験では TEST、CNTL とともに同じような高度場の上昇傾向が見られた。夏実験では一部の領域で TEST と CNTL で異なる傾向が見られたものの、TEST での変化はごく小さく¹、その他の部分では同じような高度場の変化傾向が見られた。

¹ MODIS AMV については、下層 (700~850 hPa) のデータも利用しているが、VIIRS AMV については 700 hPa 以下のデータを利用していないため、CNTL に比べると下層の

2021/07/20 Da00

GBL_VIIRSv2_noMODIS_202108_19700_001_2021-07-20_Da00



2021/12/20 Da00

GBL_VIIRSv2_noMODIS_202201_19699_001_2021-12-20_Da00

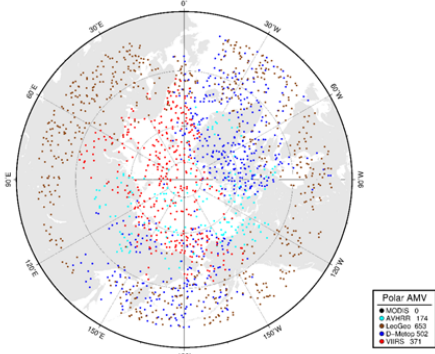


図 3.8.1 全球サイクル解析における極域 AMV の利用状況。点は観測データの位置を表す。赤色: VIIRS、水色: AVHRR、茶色: LEOGEO、青色: Dual-Metop による AMV を示す。解析時刻は上が 2021 年 7 月 20 日 00UTC、下が 2021 年 12 月 20 日 00UTC。

予測場に対する影響を確認するため、図 3.8.3 に ECMWF と気象庁の予測初期値を参照値とした予測高度場の BASE からの二乗平均平方根誤差 (RMSE) 改善率を示す。どちらの予測初期値を参照値とした場合でも、南北の中高緯度を中心に改善傾向が確認でき、気温や風速場についても同様に改善傾向であった。NCEP や UKMO など、他の海外数値予報センターの予測初期値を参照値とした場合でも同様の結果が見られた。なお、図 3.8.3 の TEST の夏実験では、北極域の予測高度場に改悪傾向が見られるが、予測時間の経過とともに改悪領域が拡大する傾向はなく、北半球 500 hPa 高度の RMSE の予測スコアにおいても有意な改悪とはなっていない (図 3.8.4)。

このように VIIRS AMV を利用することにより、MODIS AMV がない極域の観測を補い、中高緯度を中心とした予測場が全体として中立以上の改善傾向となった。

AMV の利用数が減少し、下層の風や気温場の修正が小さくなったことが影響していると考えられる。

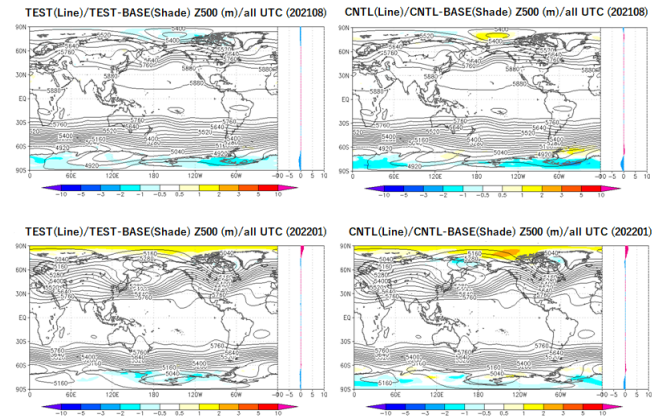


図 3.8.2 500 hPa のジオポテンシャル高度の TEST 及び、CNTL の平均解析場の BASE との差分。上段の 2 図は夏実験、下段の 2 図は冬実験の結果を示す。両実験とも左は TEST-BASE、右は CNTL-BASE の図を示す。

3.8.6 まとめ

Suomi-NPP と NOAA-20 に搭載された VIIRS から算出される極域 AMV について、全球解析での利用に向けた調査・開発を行った。特に MODIS AMV が利用できなくなった状況を想定した実験等を実施し、数値予報システムにおいて予測精度の改善傾向を確認した。このことから、ハイパースペクトル赤外サウンダの水蒸気チャンネル等と併せて、2023 年 3 月 14 日に現業利用を開始した。

今後は、早期に利用開始するために不使用とした下層データの利用の検討など、VIIRS AMV の情報を十分活用するための調査を引き続き行う予定である。

参考文献

- Daniels, J. et.al, 2022: "Enterprise Algorithm Theoretical Basis Document For Derived Motion Winds", Ver.4.0, Feb. 2022.
- 計盛正博, 2015: 衛星観測データの利用の現状と課題. 数値予報課報告・別冊第 61 号, 気象庁予報部, 9-13.
- 気象庁, 2023: 全球解析における Dual-Metop AMV の利用に関する開発の背景. 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, 37-41.
- 山下浩史, 今井崇人, 2007: 大気追跡風 (AMV). 数値予報課報告・別冊第 53 号, 気象庁予報部, 36-56.
- 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.

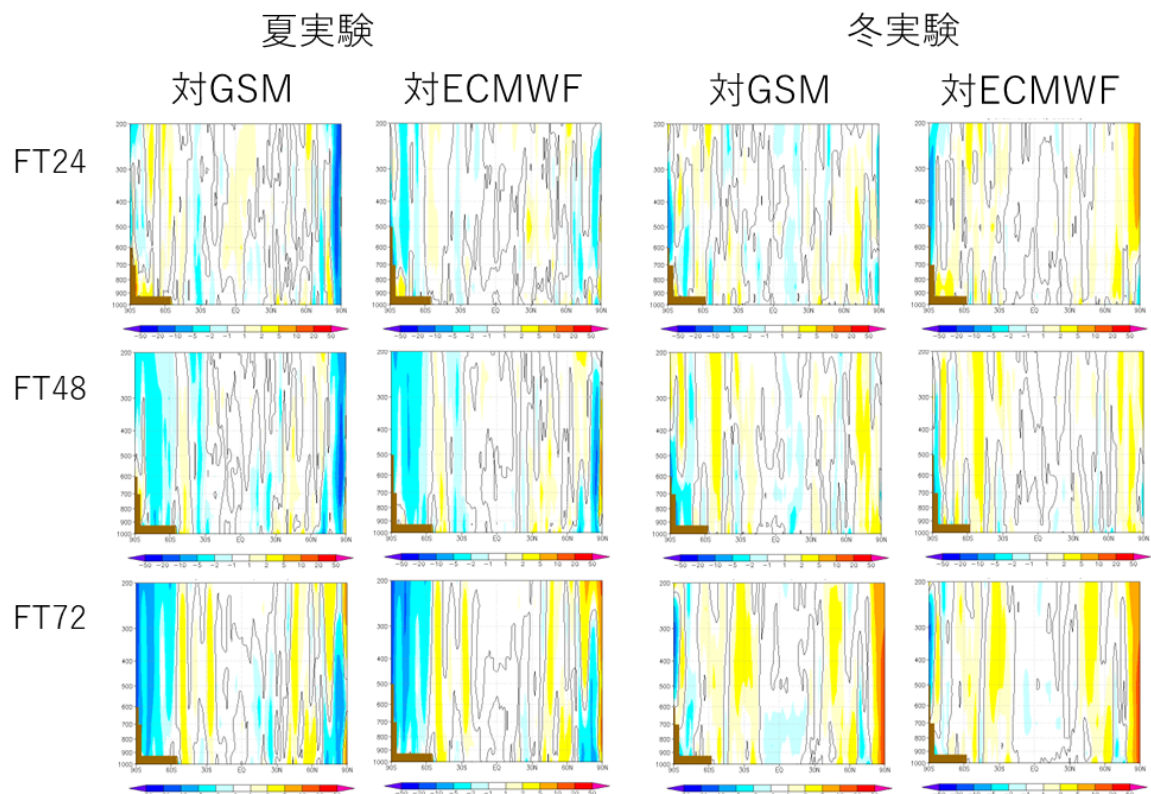


図 3.8.3 予測初期値を参照値とした予測高度場の RMSE 改善率 [%] の緯度帯平均。それぞれの図の縦軸は気圧 [hPa]、横軸は緯度 [°] である。左側の 2 列は夏実験、右側の 2 列は冬実験の 3 か月平均の対初期値検証の図であり、それぞれのパネルの左は JMA、右は ECMWF の予測初期値を参照値としている。上から 1 段目、2 段目、3 段目はそれぞれ、1 日目、2 日目、3 日目の予測精度の変化を示す。暖色系は改善、寒色系は改悪を示す。

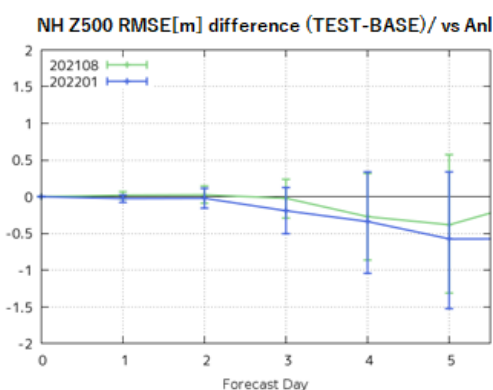


図 3.8.4 全球解析値を参照値とした、北半球の 500 hPa のジオポテンシャル高度予測精度の変化。縦軸は RMSE の TEST から BASE を引いた差分 [m]、横軸は予測時間 [日] である。青線は冬実験、緑線は夏実験を示す。エラーバーは有意検定 95%信頼区間を示している。縦軸の値が 0 よりも小さければ改善、大きければ改悪を意味している。

3.9 船舶 GNSS 観測データのメソ解析での利用改良および局地解析における新規利用

3.9.1 はじめに

気象庁では交通政策審議会気象分科会提言「2030年の科学技術を見据えた気象業務の在り方」に基づき、線状降水帯の予測精度向上に向けた取り組みを進めている。令和2年7月豪雨を受け、これらの取り組みを加速させることを目的に気象庁内に線状降水帯予測精度向上タスクフォースが立ち上げられた(気象庁2022)。

令和2年7月豪雨では発生要因の1つとして大気下層の水蒸気の流入が指摘されている。しかし特に海上においては大気下層の水蒸気観測データが不足している状況であることから、予報初期値の時点で水蒸気場の再現性に限界がある。そのため、線状降水帯の予測精度を向上させるためには、海上の水蒸気観測の強化とそのデータ同化での利用を通じて、より現実に即した水蒸気場を再現した予報初期値を作成することが重要である。可降水量を同化することで大気下層の水蒸気を同化することと同等の効果が期待できるため、船舶に搭載された全球測位衛星システム(GNSS:Global Navigation Satellite System)による可降水量観測をメソ解析で利用するための調査、開発に取り組んできた(気象庁2022)。

令和3年8月31日には冬季以外での気象庁及び海上保安庁の船舶GNSS可降水量データのメソ解析での利用を開始し(気象庁2022)、令和4年4月から通年での利用を開始した(気象庁2023b)。

令和3年度から令和4年度にかけて、海上における水蒸気観測領域のさらなる拡充を目指して、合計10隻の旅客船や貨物船などの民間船舶へのGNSS受信機の設置を行った(気象庁2023a)。これらの観測データは数値予報に利用する前に品質を調査して問題がないことを確認した上で、令和4年度中に順次同化利用を開始した。

船舶GNSS可降水量の利用について、メソ解析においては品質管理(QC: Quality Control)の改良に向けた開発を行い、また局地解析においては本データの新規利用に向けた開発を行った。これらの開発成果はメソ解析・局地解析ともに2023年3月28日にルーチンに適用された。ここでは本開発の概要について述べる。

3.9.2 メソ解析での利用改良

(1) 品質管理について

メソ解析では、国土地理院のGNSS電子基準点GEONET(GPS Earth Observation NETwork system、以降、地上GNSSとする)の可降水量を2009年10月から利用している。船舶GNSSについても令和3年8月31日より可降水量の現業利用を開始している。船舶GNSSのQCは基本的に石川(2010)で述べられている地上GNSSと同様の処理を採用しており、

以下のチェックに該当するデータは同化に利用しないこととしている(気象庁2022)。

- (a) ブラックリストチェック
観測地点ごとの観測データ時系列図による監視などにより、品質に問題があることがわかっている地点
- (b) 異常値チェック
可降水量観測値が1 mmより小さい、または90 mmより大きい地点
- (c) グロスエラーチェック
観測値と第一推定値の差(O-B: Observation-Background)の絶対値が8 mm以上
- (d) 空間整合性チェック
周辺の可降水量のO-B平均と空間整合性チェック対象観測点のO-Bの差の絶対値が5 mm以上

空間整合性チェックの実行条件を満たさない場合、O-Bの差の絶対値が5 mm以上のデータは同化に利用されない。さらに、30 km間隔での空間間引き、1時間間隔での時間間引き処理が行われ、残ったデータが同化に利用される。

令和3年の運用開始後、QCの改良に向けた調査を続けてきた。観測データの蓄積に伴い得られた知見から、今回新たに観測値と同時に通報されるQC用のパラメータ(衛星・解析時間)を利用した手法を導入した。ここでは新たに導入した手法について記載する。

- (i) 陸付近で地上GNSSを優先利用するための修正
船舶GNSS導入時の調査で、船舶GNSSのO-B平均の絶対値は地上GNSSのO-B平均の絶対値より大きかった。また、船舶GNSSが陸付近や港で観測しているときは、マルチパスの効果(周囲の建物等からの反射)の影響や、点検、機器の更新などにより、沖合で観測している時よりも品質が悪い傾向がある。また船の停泊中には、点検や機器の更新などを行うこともある。以上のことを考慮して、陸付近において船舶GNSSよりも地上GNSSが利用されやすいようにするために、船舶GNSSは地上GNSSよりも優先度を下げて間引き処理をする設定とした。
- (ii) GNSS解析で用いた衛星の数のQCへの導入
船舶GNSSでは、通常は20基前後のGNSS衛星を使って可降水量を解析するが、衛星との位置関係が悪い等の理由でGNSS解析に使われる衛星数が減少すると、解析精度は低下する。そのため、通報対象時刻の衛星数が7基未満のデータを利用しない処理を導入した。
- (iii) 解析時間のQCへの導入

船舶 GNSS による可降水量の解析には、通常は通報対象時刻の前 90 分のデータを使用している。点検直後やデータが断続的な場合は解析に使用するデータの時間（以後、解析時間）が 90 分よりも短くなり、観測データの品質が悪くなる。そのため解析時間が 30 分未満のデータを利用しない処理を導入した。

(iv) メソ領域の境界のデータ除去

現業監視や統計検証で確認したところ、メソ領域の側面境界付近の O-B の絶対値が大きくなっていったため、側面境界付近の解析格子 2 格子分のデータを利用しない処理を導入した。

(v) 動的 QC の導入

可降水量が急な変化をした場合に、観測値と第一推定値の差が大きくなり、正しいと思われる観測が QC 処理によって除去されてしまうことがある。特に船舶 GNSS は周囲に GNSS 観測点が少ないため空間整合性チェックの実行条件を満たしづらく、グロスエラーチェックでサスペクト判定になると、空間整合性チェックでの救済措置がほとんど行われずデータが除去されてしまう。

このようなデータの除去を避けるため、グロスエラーチェックの閾値として、第一推定値の時間・空間変化率に応じた閾値を設定する動的 QC(大野木ほか 1997) を導入した。

(2) 品質管理の改良の影響評価

2021 年 8 月 27 日時点の準ルーチンをベースに構築した実験を CNTL として、新たに検討した (i)~(v) の品質管理処理を追加した試験を TEST とした。統計期間は 2021 年夏（7 月 1 日~7 月 30 日）、2022 年冬（1 月 1 日~1 月 30 日）である。

影響評価の結果について、まずは (i) の QC の導入により、利用されるデータが変化した。また、(ii)~(v) の QC の導入による利用データが変化した事例もあり、例えば図 3.9.1 の 7 月 10 日 03UTC-12UTC のように (v) の動的 QC の導入により可降水量解析値が減少するタイミングが変化して、解析値が観測値に近づく事例はあったが、動的 QC が降水予測の変化に明瞭に寄与している実験期間中の事例は確認できなかった。

予測結果については概ね中立であったが、降水予測には改善傾向も確認できた。夏の評価期間中の 3 時間降水量の降水予測スコアを図 3.9.2 に示す。空振り率が 30 mm 以下、見逃し率が 20 mm 以下で減少していてエクイタブルスコア (ETS: Equitable Threat Score) が改善した。また 5 mm 以下、および 30 mm 以上の正バイアスについて縮小する傾向が見られる。

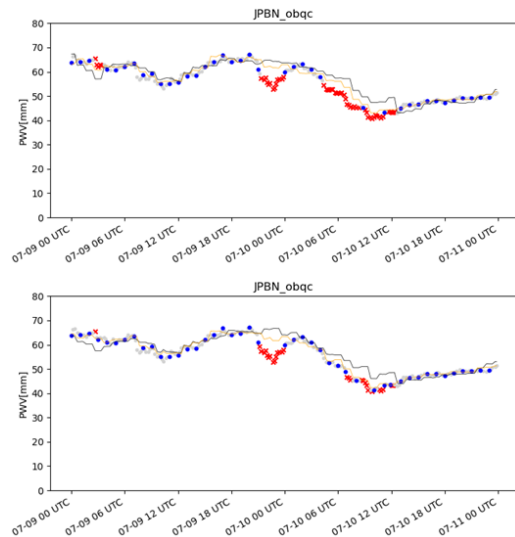


図 3.9.1 啓風丸の可降水量の時系列図。(灰色：QC で正常と判定された観測データ、赤色：QC で異常と判定された観測データ、青色：データ同化に使用したデータ、橙線：解析値、黒線：第一推定値) 上図は CNTL、下図は TEST。

3.9.3 局地解析での新規利用

局地解析では既に地上 GNSS による可降水量データを現業利用しているが、船舶 GNSS データは未利用であった。線状降水帯の予測精度向上に向けた取り組みとして、局地解析への利用に向けた調査を行った。以下、調査の概要について記載する。

(1) 品質管理について

船舶 GNSS の QC については基本的には第 3.9.2 項に記載のあるメソ解析のものと同じである。以下、異なる点について記載¹する。

- 空間間引き距離が小さい（メソ：30 km、局地：20 km）
- 船舶 GNSS では正時のデータが利用できない場合に、メソ解析では正時±20 分のデータを利用できるが、局地では正時±10 分のデータを利用
- グロスエラーチェックに動的 QC を用いない

(2) 船舶 GNSS 利用の影響評価

2022 年 3 月 22 日時点のルーチンをベースに構築した実験を CNTL として、CNTL に船舶 GNSS を利用した試験を TEST とした。統計期間は 2021 年夏（7 月 1 日~7 月 15 日）、2022 年冬（1 月 1 日~1 月 15 日）で 3 時間ごとの実行である。また同化利用した船舶 GNSS の数は、夏は船舶 4 隻、冬は船舶 6 隻であった。

観測値と解析値の差 (O-A)、O-B の標準偏差の CNTL に対する変化を確認した結果、概ね中立~やや

¹ 空間間引き距離、および正時のデータが利用できない場合に利用するデータの時間範囲については、局地解析がメソ解析より高解像度であるためメソ解析と異なる設定にしている。また早期利用開始することを優先して、動的 QC の導入は見合わせた。

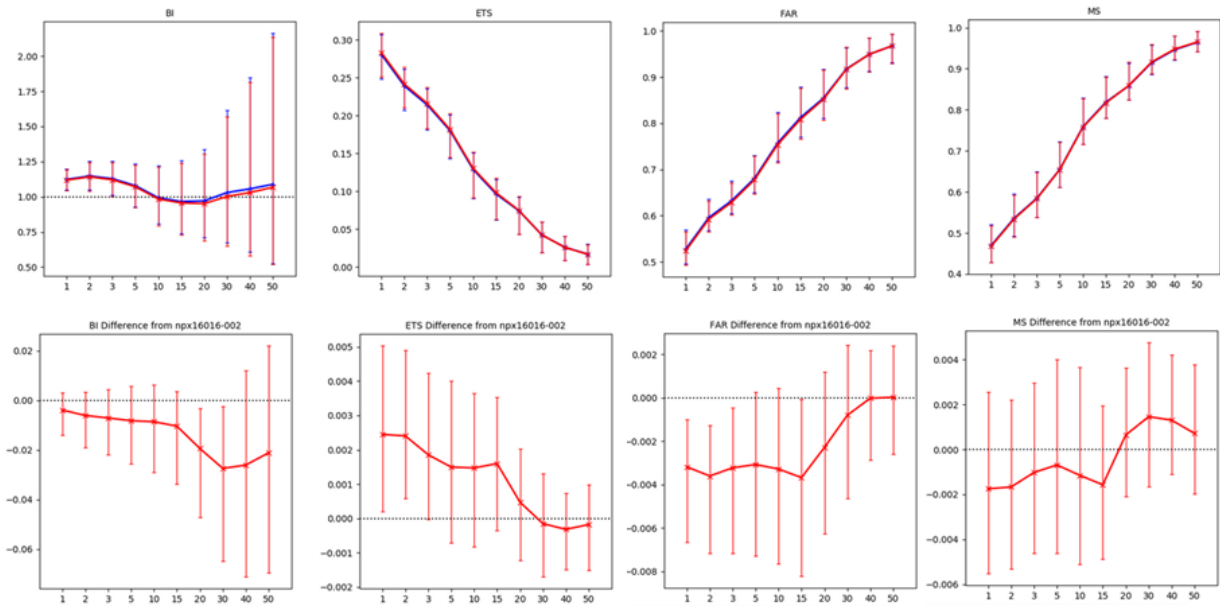


図 3.9.2 解析雨量を参照値とした 3 時間降水量別の降水予測スコア (20 km 平均)。左からバイアススコア、ETS、空振り率、見逃し率。上段は、CNTL (青) TEST (赤) のスコアを、下段は TEST-CNTL のスコアの差分を示しており、エラーバーは有意検定 95%信頼区間を示す。横軸は予測時間 [時間 (hour)]。統計期間は 2021 年 7 月 1 日から 2021 年 7 月 31 日。

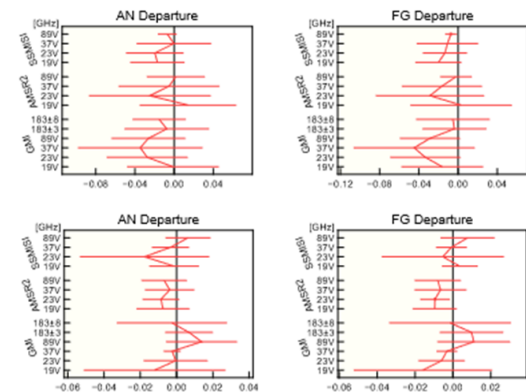


図 3.9.3 局地解析における観測値と解析値 (左図: O-A)、観測値と第一推定値との差 (右図: O-B) の標準偏差の TEST の CNTL に対する変化率 [%]。上段は夏季、下段は冬季。観測測器はマイクロ波イメージャで、縦軸に周波数 (GHz) および偏波を表す。標準偏差の図のエラーバーは 95%信頼区間、丸い点は変化の正負が統計的に有意であることを示す。

改善であり、マイクロ波イメージャ等では改善であった (図 3.9.3)。降水検証は概ね中立となった (図略)。

図 3.9.4 は鹿児島・宮崎・熊本県の大雨事例であり、2021 年 7 月 9 日に東シナ海で GNSS 観測していた船舶が航行していた。予報対象時刻 2021 年 7 月 9 日 21UTC とした 9 時間予報では、可降水量の増加した領域 (黒点線内) で、CNTL と比べると TEST では降水分布が広がり、解析雨量の分布に近づいていることが確認できる。

3.9.4 まとめ

線状降水帯予測精度向上の取り組みの一環として、船舶 GNSS 観測データのメソ解析における利用方法の改良、および局地解析での新規利用について開発、調査を進めてきた。その結果、数値予報システムに与える影響は概ね中立、もしくは、やや改善傾向であり、改善がみられる降水事例も確認できたため、2023 年 3 月 28 日より本変更を適用した。

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.
- 気象庁, 2022: メソ解析における船舶 GNSS 可降水量の利用. 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, 61-65.
- 気象庁, 2023a: 線状降水帯の予測精度向上に向けた取組の進捗状況について. 線状降水帯予測精度向上ワーキンググループ (第 6 回), 気象庁, https://www.jma.go.jp/jma/kishou/shingikai/kondankai/senjokousuitai_WG/part6/part6-shiryo1.pdf.
- 気象庁, 2023b: データ同化での船舶 GNSS 利用に関する開発. 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, 89-90.
- 大野木和敏, 高田伸一, 小室肇, 1997: データ品質管理と解析前処理. 数値予報課報告・別冊第 43 号, 気象庁予報部, 17-44.

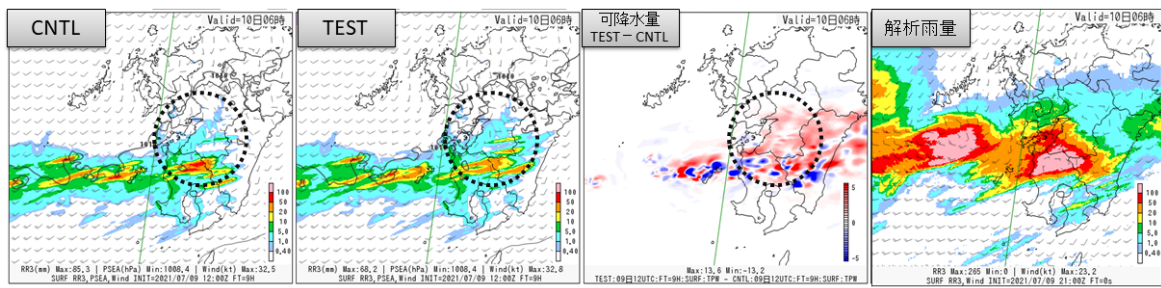


図 3.9.4 局地数値予報システムにおける降水の改善事例。2021 年 7 月 9 日 12UTC を初期値とした 9 時間予測 (2021 年 7 月 9 日 21UTC)。左から CNTL での前 3 時間雨量、TEST での前 3 時間雨量、可降水量の TEST-CNTL の差分、3 時間積算解析雨量。

3.10 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

3.10.1 はじめに

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予測精度の向上が重要であるため、令和3年3月以降、順次全国のアメダス観測所への湿度計の設置が進められている。令和2年度には54箇所、令和3年度には更に103箇所のアメダス観測所への湿度計の設置が完了しており、最終的には約700箇所のアメダス観測所に湿度計が設置される予定である。

既に局地解析では約150箇所の地上気象官署及び特別地域気象観測所で観測される相対湿度（以降、SYNOP湿度とする）をデータ同化に利用している（永戸ほか2013）。事前に行った棄却実験の結果からは、地上湿度を同化することにより、地上では高温・湿潤化して気圧が低下、降水が増加することが見込まれる。今回、このSYNOP湿度データの利用処理をベースにアメダス湿度データの局地解析での新規利用に向けて開発を進めるとともに、メソ解析での日本のSYNOP湿度、及びアメダス湿度の利用に向けた開発にも取り組み、令和5年3月28日にメソ解析、局地解析ともに運用を開始した。本節では運用に向けた調査結果について述べる。

3.10.2 開発の概要

(1) 相対湿度から地上比湿の算出手法

前述のように局地解析ではSYNOP湿度を利用しているが、相対湿度から比湿へ変換したうえで同化利用している。比湿への変換には地上気圧が必要となるが、SYNOP地点では地上相対湿度と同時に地上気圧を観測しており、その観測データを利用している。一方、アメダス観測所では地上気圧は観測していない。そのため、メソ解析、局地解析とも、アメダスでは地上気圧として第一推定値をアメダス観測点に内外挿¹した気圧（以下、推定気圧）を利用して相対湿度から比湿へ変換することとした（気象庁2023）。

なお、今回導入した相対湿度計の測定誤差である $\pm 0.8\%$ （気温 23°C ；比湿にして $\pm 0.14\text{ g/kg}$ 程度）と比べて、以下のように局地解析の推定気圧を用いて変換した地上比湿（以下、推定比湿）の誤差は十分小さく、推定気圧の利用について問題はない。図3.10.1に局地解析で見積った誤差の見積もりを示す。

- 推定気圧の誤差： $\pm 1\text{ hPa}$ 程度
- 推定比湿の誤差： $\pm 0.02\text{ g/kg}$ 程度

¹ 比湿についてはアメダス観測点の値として計算されるが、モデル面への標高補正はしていない。

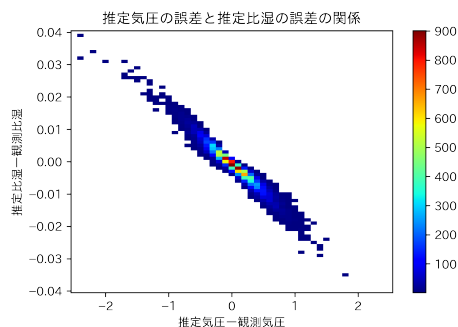


図 3.10.1 気圧と比湿の誤差の関係（SYNOP 観測による）。縦軸は局地モデルによる推定気圧を用いて変換した比湿と気圧観測値を用いて変換した比湿の差 [g/kg]、横軸は推定気圧と気圧観測値の差 [hPa]、カラーバーはサンプル数。実験期間は2020年7月2日から2020年7月15日。

(2) 品質管理処理の開発項目

品質管理処理については局地解析でのSYNOP湿度利用の処理をベースにしている。今回新たに追加した開発項目を以下に記載する。

(i) 空間整合性チェックの導入

モデルのバイアスが大きい時でも観測を利用できるようにするため、地上比湿にも空間整合性チェックを導入した。

(ii) 動的QCの導入

周囲の湿度の変化が大きい時（特に前線通過時など）にはグロスエラーの基準値を緩くすることが望ましく、この基準値を第一推定値の空間変動率によって変える動的QC(大野木ほか1997)をメソ解析²について導入した。

(iii) 観測誤差・予報誤差の設定

地上比湿の観測誤差と空間整合性チェックで使用する地上比湿の予報誤差をHollingsworth-Lönnberg法(Hollingsworth and Lönnberg 1986)³を用いて以下で設定した。

○ 局地解析⁴

- アメダス比湿の観測誤差： 0.7 g/kg
- SYNOP比湿の観測誤差： 0.7 g/kg
- 地上比湿の予報誤差： 0.7 g/kg

○ メソ解析

- アメダス比湿の観測誤差： 0.75 g/kg

² アメダス湿度計データの早期利用開始を優先させたため、今回はメソ解析のみでの導入となった。

³ 基本的には観測値と第一推定値の差(O-B)の統計等に基づいている。統計期間は2021年6月28日～2023年7月15日。

⁴ これまではSYNOP比湿の観測誤差を 0.8 g/kg にしていた。

- SYNOP 比湿の観測誤差：0.82g/kg
- 地上比湿の予報誤差：0.7g/kg

3.10.3 メソ数値予報システムへのインパクト

開発時点において最新である 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、性能評価試験を実施した。当時の現業システム相当を CNTL とし、これに SYNOP 湿度、アメダス湿度を同化して新たな品質管理手法を追加した実験を TEST とした。実験期間は、冬季については 2021 年 1 月 1 日から 1 月 31 日、夏季については 2021 年 7 月 1 日から 7 月 31 日とした。

図 3.10.2 は地上湿度同化による地上湿度の解析値・予測値の精度検証であるが、地上湿度を同化すると予測前半で湿潤に変化し予測前半を中心に地上湿度の平均誤差、RMSE を改善する効果が見られた。

図 3.10.3⁵にメソ解析で地上湿度を同化に利用した場合の改善事例を示す。この事例では、地上湿度ありの方が地上湿度なしに比べて宮城県付近の降水を強め、3 時間積算降水量の予報が実況に近づいていることが分かる。アメダス及び SYNOP の地上湿度観測の同化によって初期時刻における静岡県付近の可降水量が増加したため、12 時間予報において風下にあたる宮城県付近の降水量が増加し、より実況に近づいたと考えられる。

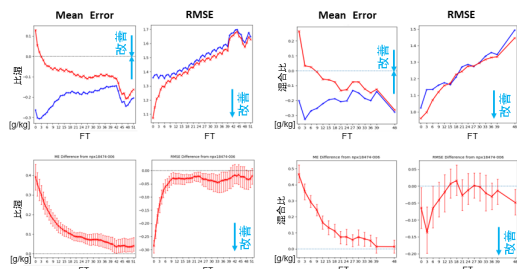


図 3.10.2 メソ数値予報システムにおける地上湿度同化による解析値・予測値の精度検証。左二列は地上観測比湿 [g/kg]、右二列はゾンデ 1000 hPa 観測混合比 [g/kg] を参照値とした平均誤差 (左) と RMSE (右)。上段はそれぞれの計算値で赤が地上湿度同化あり、青が同化無しの結果、下段は上段の赤線-青線の差でエラーバーは有意検定 95% 信頼区間を示す。

3.10.4 局地数値予報システムへのインパクト

開発時点において最新である 2022 年 3 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、性能評価試験を実施した。当時の現業システム相当を CNTL とし、これにアメダス湿度を同化し新たな品質管理手法を追加した実験を TEST とした。実験期間は、冬季については 2021 年 1 月 1 日から 1 月 31 日、夏季については 2021 年 7 月 1 日から 7 月 31 日とした。

⁵ 本事例は 2022 年 7 月中旬から 9 月初めまで実施していた準リアルタイムでの実験環境での実行結果を示している。

図 3.10.4 は冬期間における 1 時間降水量 [mm/h] (検証格子 10 km) の閾値 10 mm/h の対解析雨量検証結果と TEST と CNTL の差である。見逃し率、空振り率がともに減少して ETS が増加しており、降水予測の改善が見られた。

図 3.10.5 に局地解析でアメダス湿度を同化に利用した場合の改善事例を示す。この事例では地上湿度を同化することにより全体的に湿度が増加している。特に図に示した予報時間 10 時間では、矢印で示した京都、伊豆、東京で雨が強まり、20 mm/h 以上の降水域が拡大して実況に近づいている。

3.10.5 まとめ

局地解析についてアメダス湿度データ導入、およびメソ解析での日本の SYNOP 湿度、及びアメダス湿度の利用のための同化システムを構築した。構築したシステムを用いて品質調査や同化実験等の調査を行い、同化処理の設定に問題ないことを確認するとともに、追加した地上湿度データによって数値予報システムの解析精度や予測精度が改善することを確認した。この結果を踏まえて令和 5 年 3 月 28 日にメソ解析、局地解析ともに運用を開始した。

今後の課題としては、令和 4 年度以降に整備された湿度計の導入がある。特に令和 4 年度に整備された湿度計は測器の型式が異なるため、事前に測定値の挙動の違いや誤差の傾向の違いを調べる必要がある。

参考文献

- 永戸久喜, 原旅人, 倉橋永, 2013: 日本域拡張・高頻度化された局地モデルの特性. 平成 25 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 18-41.
- Hollingsworth, A. and P. Lönnberg, 1986: The statistical structure of short-range forecast errors as determined from radiosonde data. Part 1: The wind field. 111-136.
- 気象庁, 2023: アメダス湿度データ利用に関する開発. 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, 100-101.
- 大野木和敏, 高田伸一, 小室肇, 1997: データ品質管理と解析前処理. 数値予報課報告・別冊第 43 号, 気象庁予報部, 17-44.

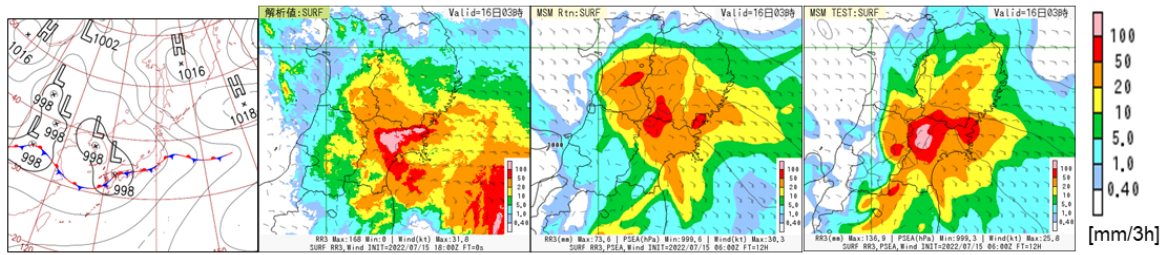


図 3.10.3 2022 年 7 月 16 日 3 時 (JST) における前 3 時間降水量 [mm/3h] の分布と天気図 (同日 9 時)。左から天気図、解析雨量、CNTL のメソ予報予測値、TEST メソ予報予測値。予測値は 2022 年 7 月 15 日 15 時 (JST) 初期値から 12 時間後の予測。

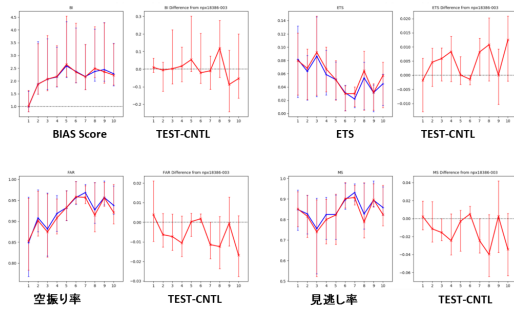


図 3.10.4 冬期間における 1 時間降水量 [mm/h] (検証格子 10 km) の閾値 10 mm/h の対解析雨量検証結果と TEST と CNTL の差で、エラーバーは有意検定 95%信頼区間を示す。(左上) バイアススコア、(右上) エクイタブルスレットスコア、(左下) 空振り率、(右下) 見逃し率でそれぞれ右に TEST-CNTL の図も併記。横軸は予報時間 [h]。青線は CNTL、赤線は TEST の結果を示す。

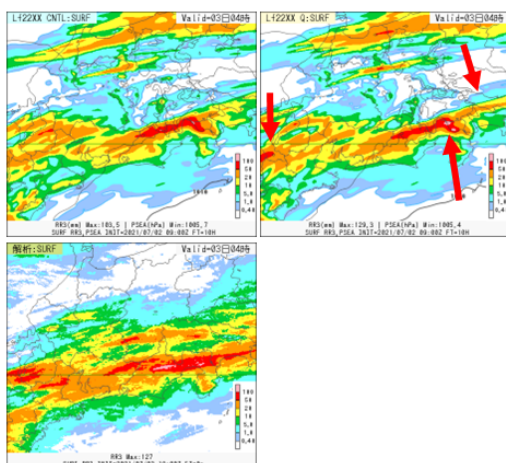


図 3.10.5 2021 年 7 月 3 日 4 時 (JST) における前 3 時間降水量 [mm/3h] の分布。上段左は CNTL の予測値、右は TEST 予測値。下段は解析雨量。予測値は 2021 年 7 月 2 日 18 時 (JST) 初期値の 10 時間予測。

3.11 局地解析における衛星搭載マイクロ波散乱計データの新規利用

3.11.1 はじめに

極軌道衛星などに搭載されたマイクロ波散乱計は、マイクロ波を海面に向けて照射し、海面の風浪に散乱されて戻ってくる散乱波の強さ（散乱断面積）を観測する能動型のセンサである。このセンサから得られる海上風は、数値予報の初期値解析、波浪の監視、天気図解析などに幅広く利用されている（大橋・今泉 2004）。全球・メソ解析いずれにおいても、海上風プロダクトを同化することにより風の場が現実近づき、気圧場の分布や収束発散の再現性が向上することがこれまでの開発成果から判明している。局地解析においても、海上風プロダクトの同化を導入することで同様の効果が得られることが期待される。

全球解析では欧州気象衛星開発機構（EUMETSAT）が運用する現業極軌道衛星 Metop-A に搭載された散乱計 ASCAT により観測され、オランダ王立気象研究所（KNMI）により算出された海上風プロダクトについて 2009 年 7 月から現業利用を開始した。その後、2013 年 11 月から同じく極軌道衛星の Metop-B、2019 年 12 月からは Metop-C 搭載の散乱計 ASCAT を現業利用している（高橋 2010; 守谷ほか 2014; 守谷 2016）。

メソ解析でも Metop-A, B に搭載された散乱計 ASCAT の海上風プロダクトを 2015 年 12 月から現業利用している（守谷 2016）。2019 年 3 月からは、より解像度の高い ASCAT 海上風プロダクトの利用を開始した（太田ほか 2019）。更に 2021 年の 12 月から Metop-C/ASCAT 海上風データも現業利用を開始した。

Metop-A の運用は 2021 年 11 月 14 日に終了しており、現在 Metop シリーズについては Metop-B、Metop-C が運用中である。このように全球解析、メソ解析では既に Metop-B,C/ASCAT 海上風を利用している状況にあるが、局地解析でもこれらの衛星データの導入に向けた開発を進め、2023 年 3 月 28 日に局地解析での利用を開始した。本節では利用開始に向けた調査についてその概要を述べる。

3.11.2 性能評価試験

(1) 実験設定

開発時点において最新である 2021 年 5 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、性能評価試験を実施した。当時の現業システム相当を CNTL とし、これに ASCAT 海上風プロダクトを追加した実験を TEST とした。実験期間と実験設定は、冬季については 2020 年 1 月 11 日から 1 月 21 日（Metop-A, B, C を同化）、夏季については 2020 年 7 月 2 日から 7 月 8 日（Metop-B, C を同化）とした。なお、局地解析に導入したマイクロ波散乱計海上風の QC 処理や観測誤差についてはメソ解析（守谷 2016）と同様の

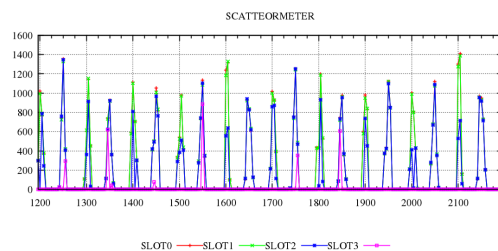


図 3.11.1 実験期間におけるデータ利用数時系列。縦軸はデータ利用数、横軸は実験期間の 2020 年の 1 月 12 日から 1 月 21 日までの期間である。なお局地解析では、解析対象時刻の 3 時間前を対象としたメソモデルの予測値を初期値とし、1 時間ごとに 3 次元変分法による解析（スロット）および 1 時間予測を 3 時間分繰り返し、解析値を得ている（永戸ほか 2012, 2013）。

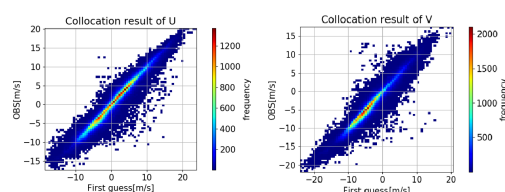


図 3.11.2 東西風（左）、南北風（右）について観測値と第一推定値の散布図（冬期間 2020 年の 1 月 12 日から 1 月 21 日）。縦軸は散乱計による観測値、横軸は第一推定値。単位は [m/s]。シェードはサンプル数を示し、暖色系ほどサンプル数が多い。

設定で 0.5° 間隔での間引き、観測誤差は 3.0 m/s とした¹。

(2) データの特性

性能評価試験結果から ASCAT プロダクトの特性について調べた結果を示す。まずは各解析時刻における、散乱計のデータ利用状況を示す（図 3.11.1）。この図より、Metop 衛星が日本付近を通過する時刻に対応する 01UTC や 12UTC を中心に、2 つのピークがあることが分かる。

解析に用いられた ASCAT 海上風の観測値と第一推定値の差（O-B）の標準偏差や平均値を確認した。O-B のヒストグラムについては正規分布に近かった（図略）。また第一推定値と観測値の散布図からも観測値は第一推定値と概ね整合的な分布をしていることがわかった（図 3.11.2）。更に、O-B 平均と標準偏差などの統計値はすでに利用開始している全球解析（O-B 平均 ± 0.13 m/s、標準偏差 1.3 m/s 程度）、メソ解析（O-B 平均 $-0.15 \sim -0.3$ m/s 程度、標準偏差 1.6 m/s 程度）とほぼ同程度となっており、風速毎に閾値を設けての比較でも極端な変動はみられなかった（表 3.11.1、表 3.11.2）。

¹ マイクロ波散乱計データの利用を早期に開始するため、局地解析向けの設定の最適化は実施しなかった。

表 3.11.1 局地解析におけるマイクロ波散乱計の東西風、南北風に関する O-B 統計 (夏期間)。

統計量	東西風 (m/s)	南北風 (m/s)
平均	-0.262	-0.232
標準偏差	1.028	1.054
サンプル数	629527	629527

表 3.11.2 局地解析におけるマイクロ波散乱計の東西風、南北風に関する O-B 統計 (冬期間)。

統計量	東西風 (m/s)	南北風 (m/s)
平均	-0.248	-0.417
標準偏差	1.323	1.305
サンプル数	155534	155534

(3) 実験結果の評価

図 3.11.3 に AMV 風速について O-B の標準偏差変化率の例を示すが、風の場合については第一推定値に対して概ね中立であった。その他全般的にも統計検証の結果は中立であった (図略)。

予報実験の結果はおおむね中立~改善で、地上の気温や比湿などにも改善効果がみられた (図略)。図 3.11.4 は冬期間における 1 時間積算降水量 (検証格子 20 km) の閾値別検証結果であるが、特に降水量 5 mm 以上について統計的に有意ではないが改善傾向が見られていることが分かる。

2020 年 7 月 6 日の九州の豪雨事例において、散乱計海上風データを同化した実験では、前線に伴う降水帯の 3 時間最大降水量が解析雨量に近づくことが確かめられた。これは本データを同化したことによって風の分布が影響を受け、地上の収束発散場を改善したためと考えられる (図 3.11.5)。以上により、散乱計海上風の利用については特段問題ないことが確かめられた。

3.11.3 まとめ

局地解析におけるマイクロ波散乱計データの利用を早期に開始するために、QC 処理や観測誤差をメソ解析と同様の設定にして局地解析用のマイクロ波散乱計海上風のデータ同化システムを構築した。構築したシステムを用いてマイクロ波散乱計の東西風速、南北風速の O-B 平均、標準偏差や同化に使用されるデータの分布などを調査し、同化処理の設定に問題がないことを確認した。さらに同化実験の結果から下層風で中立、降水の改善等が見られた。この結果を踏まえ、2023 年 3 月 28 日に、局地解析での利用を開始した。

散乱計海上風についての今後の課題については、以下に挙げる通りとなっている。

一つ目は、中国が運用している極軌道衛星 HY-2 の同化利用開始である。HY-2 衛星については、2024 年 3 月の計算機更新後早期の利用に向けて、データ品質の確認やデータ同化実験などを開始している。

二つ目は、間引き間隔および観測誤差の最適化を含

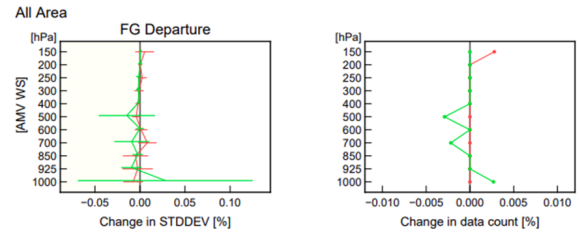


図 3.11.3 O-B の標準偏差 (左)、データ利用数 (右) の変化率 (AMV 風速)。赤が夏期間、緑が冬期間のもの。

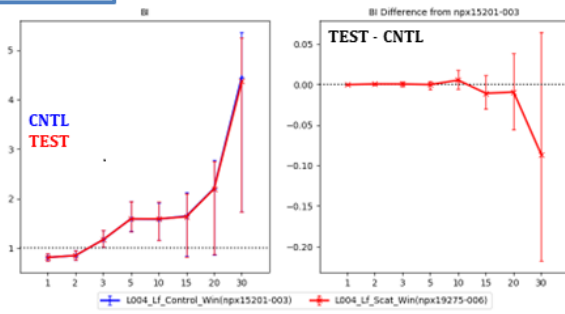
む高密度データの有効利用である。今回の海上風プロダクトの利用では間引き間隔は従来と同一にしたため、高密度データの大部分を利用できていない。観測誤差や間引き間隔の最適な設定値を得るための調査だけでなく、スーパーオプザベーションに代表されるような複数の観測データを空間平均化して同化する新たな手法の導入も視野に入れ、データを最大限に活かす改良が必要である。

三つ目は、EUMETSAT が提供している EARS-ASCAT² という速報性を重視した配信サービスのデータの利用である (小屋松 2020; 気象庁 2021)。局地解析では解析時刻の 30 分後、メソ解析は解析時刻の 50 分後までに入電したデータしか利用されないため、観測後できるだけ早くデータを入手する必要がある。EARS-ASCAT は観測から 30 分程度で配信されており、通常配信までの時間 (観測から 2 時間程度) と比較して早期にプロダクトが入手可能であり、既に全球解析では利用が開始されている。一方、メソ解析では同化ウィンドウの一部が前解析時刻と重複していることから、前解析時刻で利用された EARS-ASCAT のデータと同一内容の通常配信データが重複して利用される問題が生じる (気象庁 2021) ため、これまでは利用を見送ってきた。今後メソ解析でも EARS-ASCAT の利用が可能になれば、より解析時刻に近い気象現象の情報を持つ観測データを局地解析やメソ解析へ反映することが期待されるので、メソ解析、局地解析での利用可能性について検討する。

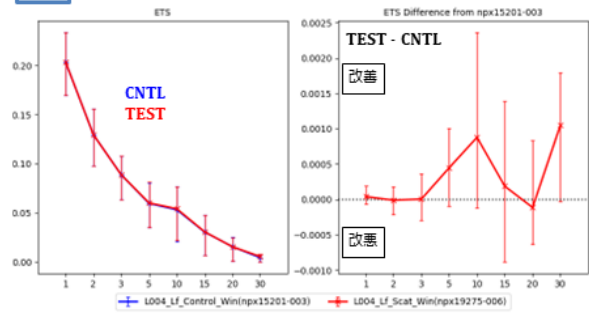
四つ目は、ASCAT Coastal Wind の利用に関する海岸周りの処理の見直しである。現在の同化システムでは、ASCAT 海上風について海岸付近ではモデル地形を用いることによる海陸境界の誤判定を避けるため、陸地から遠方のデータのみを使っている。しかし、現在の数値予報モデルは ASCAT 海上風が利用開始された時と比較して高解像度化されており、従前の処理を今後も続けるべきかどうかは検討の余地がある。特にメソ・局地解析では陸地に近いものを使っても問題ないかどうかを検討する必要があると考えられる。

² <https://www.eumetsat.int/ears-ascats>

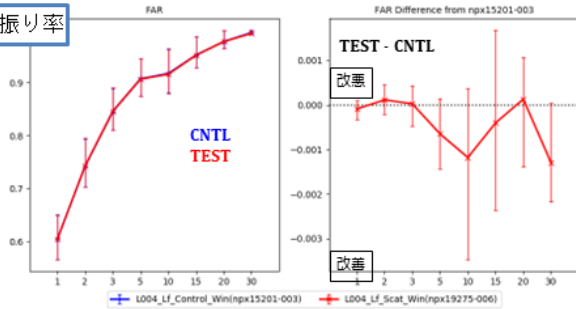
バイアスコア



ETS



空振り率



見逃し率

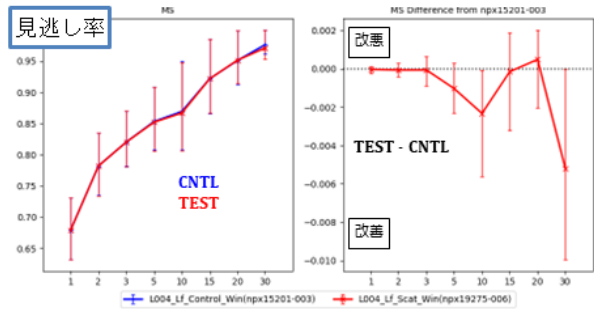


図 3.11.4 冬期間における 1 時間積算降水量（検証格子 2 km）の閾値別検証結果。左上：バイアスコア、右上：エクイタブルスレットスコア (ETS)、左下：空振り率、右下：見逃し率をそれぞれ表す。青線が CNTL、赤線が TEST の結果を示す。

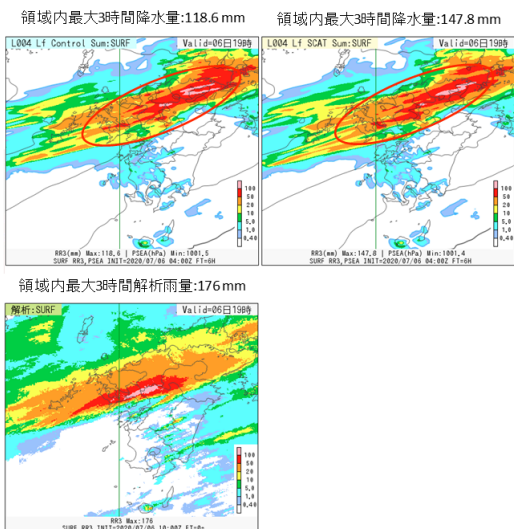


図 3.11.5 局地数値予報システムにおける降水の改善事例。2020 年 7 月 6 日 13JST を初期値とした 3 時間積算解析雨量の 6 時間後予測（2020 年 7 月 9 日 19JST）。上段左から CNTL、TEST、下段は解析雨量。

参考文献

永戸久喜, 原旅人, 倉橋永, 2012: 局地モデルの本運用. 平成 24 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 78-86.
 永戸久喜, 原旅人, 倉橋永, 2013: 局地モデル運用の目的と仕様. 平成 25 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 78-86.

気象庁, 2021: ASCAT 早期配信データの利用. 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, 30.
 小屋松進, 2020: マイクロ波散乱計. 数値予報課報告・別冊第 66 号, 気象庁予報部, 124-128.
 守谷昌己, 大和田浩美, 山下浩史, 江河拓夢, 2014: Metop-B データの利用開始. 平成 26 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 104-107.
 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.
 大橋康昭, 今泉孝男, 2004: メソ解析へのマイクロ波散乱計海上風の利用. 平成 16 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 66-70.
 太田行哉, 岡部いづみ, 小屋松進, 西本秀祐, 谷寧人, 2019: 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. 令和元年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 61-67.
 高橋昌也, 2010: マイクロ波散乱計 ASCAT 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, 43-47.

3.12 全球波浪モデルの高解像度化および延長予報の頻度増強

3.12.1 概要

現在、気象庁では波浪注意報・警報のための基礎となる波浪予測を行うための決定論波浪モデルとして、全球波浪モデル (GWM) と沿岸波浪モデル (CWM) を運用している (竹内ほか 2012)。これら波浪モデルの精度向上のため、気象庁は 2023 年 1 月に、GWM の水平解像度高解像度化と、264 時間先までの延長予報頻度増強を実施した。前者は、「波浪モデルは、沿岸域などの高波をより精緻に表現するため、高解像度化などによる改善を図っていく必要がある」とした「2030 年に向けた数値予報技術開発重点計画」に示された目標の一つである。変更の詳細や業務化試験による統計検証については、数値予報開発センター年報 (令和 4 年) 第 4.12 節 (気象庁 2023) を参照されたい。以下に概要を示す。

- GWM の水平解像度を 0.5° (約 55km) から 0.25° (約 27km) へ高解像度化した。業務化試験による統計検証では、従来 GWM と比較して概ね中立だったが、地形が高解像度化されることで島嶼・海峡等の周辺での波高表現に改善が認められた。
- GWM を側面境界条件として用いる CWM、全球波浪解析を初期値として用いる WENS (波浪アンサンブル予報システム) への影響評価を行ったところ、精度は概ね中立であった。
- 264 時間先までの延長予報の頻度を 1 日 1 回 (12UTC 初期値) から 1 日 2 回 (00,12UTC 初期値) に増強した。00UTC 延長予報は 12UTC と同様の精度であった。

3.12.2 今後

以上のように、2022 年度までに概ね開発が終了していた GWM 改善 (高解像度化および延長予報の高頻度化) について、2023 年 1 月に現業化を行った。今後は GWM に引き続いて CWM の水平高解像度化による予測精度改善等に取り組む予定である。

参考文献

気象庁, 2023: 波浪モデル. 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, 128–129.
竹内仁, 高野洋雄, 山根彩子, 松枝聡子, 板倉太子, 宇都宮忠吉, 金子秀毅, 長屋保幸, 2012: 日本周辺海域における波浪特性の基礎調査及び波浪モデルの現状と展望. 測候時報, **79**, S25–58.