

3.10 全球解析におけるハイパースペクトル赤外サウンダ IASI の利用データセット移行および Metop-C/IASI の利用

3.10.1 はじめに

欧州の極軌道気象衛星 Metop に搭載されているハイパースペクトル赤外サウンダ IASI には 8461 のチャンネルがあり、そのうちの数百チャンネルを抽出したサブセットデータが、数値予報での利用を目的として作成・配信されている。気象庁では、NOAA/NESDIS (米国海洋大気庁/米国環境衛星資料情報局) が作成・配信している、616 チャンネルのデータセット (以降「NESDIS 形式」とする) を、全球解析におけるハイパースペクトル赤外サウンダの利用開始時に用いていた (岡本 2011; 岡垣 2015)。その後、このデータセットに加え、欧州気象衛星開発機構 (EUMETSAT) が作成・配信している 500 チャンネルのデータセット (以降「EUMETSAT 形式」とする) も取得し、利用に向けた開発を進めてきた (気象庁 2021c)。

数値予報センターが利用するデータセットとしては EUMETSAT 形式の方が主流であり、数値予報での利用を主目的とした DBNet データ (WMO 2017) も EUMETSAT 形式で配信されている。DBNet データは、世界各地の衛星データ利用機関が、衛星から直接受信した受信局周辺のデータを処理し、即時交換することによって得られるデータで、データの得られる範囲は限られるものの、衛星運用機関が軌道一周分のデータをまとめて処理・配信したデータ (全球データ) と比較して、観測から入電までの時間が短いことが特徴である。つまり、全球データのみが配信される NESDIS 形式から、DBNet データを含む EUMETSAT 形式データセットの利用に移行することで、全球速報解析において利用データ数の増加が見込まれる。また、DBNet データはデータ入電から利用までの待ち時間の短いメソ解析や局地解析で特に有効で、今後計画しているこれらの解析システムでの利用に向けて、同化システムを EUMETSAT 形式データセットに適合させておくことは重要である。

Metop-C は、EUMETSAT が運用する、現業極軌道気象衛星 Metop シリーズの 3 機目の衛星で、2018 年 11 月 7 日に打ち上げられた。Metop-C に搭載の IASI データは、前述の EUMETSAT 形式データセットが先にユーザーへ配信が開始されたことから、その利用に向けた開発は EUMETSAT 形式データセットへの移行を前提として着手した。

ここでは、2021 年 6 月 29 日に現業化された、ハイパースペクトル赤外サウンダの EUMETSAT 形式データセットへの移行および、それに伴う品質管理手法の変更、ならびに、2021 年 11 月 24 日に現業化された、Metop-C/IASI の全球解析での利用開始について述べる。

USEチャンネル										
32	38	44	49	51	55	57	61	63	70	
85	87	109	116	122	128	135	141	146	148	
154	159	161	167	173	180	185	187	193	199	
205	212	217	219	224	226	230	232	236	237	
239	243	246	249	252	256	259	262	265	267	
269	271	273	275	278	279	282	284	285	288	
292	294	296	306	308	309	313	316	320	323	
326	327	329	332	333	335	345	347	350	354	
356	360	363								
QCチャンネル										
404	405	769	797	1090	1098	1338	1352			

図 3.10.1 同化利用および品質管理のために選定された IASI のチャンネル番号。黒字：両データセットに共通して含まれるチャンネル、青字：NESDIS 形式のみに含まれるチャンネル、赤字：代替とした EUMETSAT 形式のチャンネル。

3.10.2 データセット移行における品質管理の変更

利用中の IASI データセットを、NESDIS 形式のデータセットから、EUMETSAT 形式のデータセットに移行するために行った品質管理処理の変更について、以下に述べる。方針としては、データセットの移行の前後で、IASI データの品質管理処理が従来と同等の性能を維持し、IASI データの同化による解析や予測への影響も同様であることを確認することとした。なお、性能評価試験にはサイクル解析を用い、NESDIS 形式のデータセットと EUMETSAT 形式のデータセットで、利用できるデータ数 (地点数) に本質的な差異はない。DBNet データによりデータ数増加が見込める速報解析での評価は行わないが、データ数が増加することで IASI データ利用の効果がより多く得られると期待される。

(1) 同化利用チャンネルの選定

NESDIS 形式データセットと EUMETSAT 形式データセットには、それぞれ共通して抽出されているチャンネルもあれば、どちらかにしかないチャンネルもある。同化や品質管理に使用しているチャンネルのうち、共通のチャンネルについてはそのまま移行し、EUMETSAT 形式データセットにないチャンネルについては、同化や品質管理といった用途に応じて相当するチャンネルを選定した。図 3.10.1 に、選定前後のチャンネルの一覧を示す。

現在同化利用しているチャンネルは、いずれも 15 μ m 付近の二酸化炭素の吸収帯にあり、気温に感度のあるチャンネルである。同化して利用するチャンネルについては、標準大気における荷重関数から、感度高度が近いチャンネルを選定することとした。その際、荷重関数のテールがモデル最上面にかかっているチャンネルや、荷重関数に歪みがあるチャンネル、水蒸気やオゾンにも感度があり計算精度のやや劣るチャンネルは

除いた。また、チャンネル番号が隣り合う場合は、観測原理に起因するチャンネル間誤差相関が考えられるため、片方のチャンネルを除いた。

(2) 品質管理用チャンネルの選定

ハイパースペクトル赤外サウンダデータの同化における放射伝達計算では雲の影響を考慮していないため、雲の影響を受けた観測データを除去する必要がある。雲判別は、雲の有無の判別と、判別された雲についての雲頂高度の推定という、2段階で行っている。

(i) 巻雲検出用チャンネル

雲の有無の判別では、窓チャンネルにおいて観測値と晴天放射計算値を比較する手法と、11 μm 帯と12 μm 帯のチャンネルをペアとして用い巻雲を検出する手法の、2つの手法により行っている。このうち、巻雲の検出では、氷粒子に対する特性が波長によって異なることを利用し、2つのチャンネルの差分値が閾値を超えた場合を巻雲とする。巻雲が検出された観測地点では、対流圏に感度のないチャンネルのみを利用する。

EUMETSAT形式のデータセットには、これまで巻雲の検出に使用していたチャンネルが含まれていなかったため、新たなチャンネルのペアを選定した。ペアの選定においては、従来のペアの差分値との相関が高いことを重視し、また閾値は従来の検出結果と同等となるように調整した。

(ii) 雲頂高度推定用チャンネル

窓チャンネルの観測値を利用して雲と判定され、巻雲が検出されなかった場合には、雲頂高度を推定し、推定した雲頂高度より下層に感度が低いチャンネルのみを利用する。雲頂高度の推定には、Eyre and Menzel (1989)の方法¹を用い、同化していないチャンネルからチャンネルのペアを選択して用いる。これまで使用していたチャンネルのペアがEUMETSAT形式のデータセットに含まれていなかったため、荷重関数の形状や感度のピーク高度が近いチャンネルから、新たなチャンネルのペアを選定した。

上記のように品質管理チャンネルを選定したのち、品質管理の結果を確認した。EUMETSAT形式の同化チャンネルについて、対応するNESDIS形式の同化チャンネルと雲除去の結果が概ね同等となることを確認した。

(3) 上層に感度があるチャンネルのグロスエラーチェックの閾値緩和

データセット移行に伴う配信チャンネルの違いに対応するため、ここまで述べてきた利用チャンネルおよび品質管理チャンネルの変更を行い、数値予報精度に変化が生じないように対応を行った。しかしながら、本開

¹ ある高度に単層・黒体の雲があると仮定し、放射伝達モデルを用いて計算した放射輝度が観測値と最も合致する雲量と高度を求める手法。CO₂スライシング法と呼ばれる。複数のチャンネルを用いると雲量と高度が同時に求められる。

発とは別に先行して実施した、データ利用方法や解析システムの変更（マイクロ波輝度温度全天同化とアウターループ(気象庁2021a)およびハイブリッド同化(気象庁2021a)の導入)により、これまでのハイパースペクトル赤外サウンダの品質管理方法では解析値の精度が悪化する問題(後述)が生じた。そのため、IASIだけでなく利用中の他のハイパースペクトル赤外サウンダ²についても、品質管理手法を見直す必要が生じた。

上記の問題は、システムの変更に伴って成層圏を中心とした上層の平均解析場が変化したことによって、同化利用するデータに偏りが出たために生じたと考えられる。実装されていた品質管理では、雲の影響を受けたデータをより厳しく取り除くため、バイアス補正後のO-B(観測値と第一推定値との差)に対するグロスエラーチェック(外れ値を除く処理)の閾値として、O-Bの統計から見積もった標準偏差の1.5倍を用いていた(岡垣2015)。これは0のまわりに正規分布するO-Bのうち、正規分布の裾に当たるデータを取り除き、0に近いデータを厳選して利用することを想定していたものである。ところが、システムの変更により上層の平均解析場が変化することで、正規分布の中心が0から外れ、片側のデータが過剰に取り除かれることで、偏ったデータが抽出されることとなった。また、それらに変分法バイアス補正(VarBC, 佐藤2007)が適合することにより、偏ったデータが使われ続けることとなった。その結果、解析値の精度が悪化したと考えられる。また成層圏より上部の大気上層では雲の影響はないことから、雲の影響を受けたデータを厳しく取り除く目的のこの閾値の設定はそもそも適切ではない。これらのことから、上層に感度があるチャンネル(具体的には波数680.0 cm^{-1} 以下のチャンネル)のグロスエラーチェックの閾値をO-Bの標準偏差の2.5倍に緩和し、正規分布するO-Bの大部分のデータを利用することで、データの偏りが生じないようにした。

なお、下層に感度のあるチャンネルについては、上記のシステム変更に伴う悪影響はみられていないことから、今回は変更を加えず、これまで通り標準偏差の1.5倍を閾値として用いる。ただし、本来は正規分布の裾に当たるデータも含めて利用することが望ましいため、下層チャンネルについても、グロスエラーチェック閾値を緩和できるような品質管理の改良を進める必要がある。

(4) スキャンバイアス補正テーブルの再作成

バイアス補正は、スキャン位置に依存する補正をテーブル参照により補正するスキャンバイアス補正と、大気状態に依存する補正を行う変分法バイアス補正の2段階で行っている。前述のように、システムの更新により平均解析場が変化したことから、最新のシステム

² 米国の地球観測衛星Aquaに搭載のAIRS、並びに米国の現業気象衛星Suomi-NPPおよびNOAA-20に搭載のCrIS。

における O-B の統計結果に基づき、スキャンバイアス補正テーブルを再作成した。

(5) 観測誤差の再設定

観測誤差は O-B の統計における標準偏差を用いて設定されている。更新後のシステムにおいて、グロスエラーチェックを適用する前のデータ³を用いて O-B の統計を取り直し、その標準偏差を改めて観測誤差とした。設定した観測誤差を、後述する Metop-C と合わせて、図 3.10.3 に示した。再設定後の観測誤差は、変更前の観測誤差と比較して極端な差異はなく、また Desroziers et al. (2005) の手法により診断された値とも近い値となっていることを確認している。

3.10.3 データセット移行に関する性能評価試験

IASI データセットの移行やハイパースペクトル赤外サウンダに対する品質管理変更の影響を確認するため、2020 年 10 月時点の現業全球数値予報システムと同等の対照実験 (CNTL) と、これに上記の変更を加えた実験 (TEST) の比較を行った。実験期間は 2019 年 7 月 10 日から 9 月 11 日 (夏実験)、2019 年 12 月 10 日から 2020 年 2 月 11 日 (冬実験) で、8 月および 1 月のそれぞれ 1 か月が検証対象期間である。

(1) 利用データ数

性能評価試験では、データセット移行による利用データ数に本質的な差異は見られなかった。性能評価試験で実施している全球サイクル解析では、どちらの形式のデータも通常はデータ待ち受け時間内に全てのデータの入電が完了する。

なお、全球速報解析の場合には、EUMETSAT 形式データセットに移行することで、データ数は 2% 程度増加することを確認している。これには DBNet データの追加が寄与している。

(2) 解析値・第一推定値の変化

現在利用しているハイパースペクトル赤外サウンダのチャンネルは気温に感度のあるチャンネルのみであることから、解析値の平均場は主に気温で変化が見られた (図 3.10.2)。対流圏中層付近 (400-700hPa) や上部成層圏 (50hPa 以上) では気温が若干上昇し、対流圏海面付近 (100-200hPa) では若干低下した。上層に感度があるチャンネルのグロスエラーチェック閾値の緩和やスキャンバイアス補正テーブルの更新など、バイアス補正に関わる変更の効果と思われる。

解析に用いられた各種観測データについて、第一推定値との差異や利用データ数の変化を確認したところ、いずれも顕著な変化はなく、第一推定値の精度の向上や悪化は確認されなかった。

³ グロスエラーチェック後のサンプルによる統計では、閾値が厳しく設定されている下層チャンネルにおいて観測誤差が不自然に小さくなってしまったため、グロスエラーチェック前のデータを母集団とした。

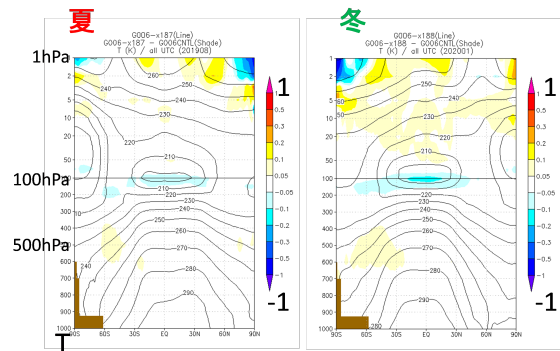


図 3.10.2 気温の解析場の TEST と CNTL の差異の帯状平均。左：夏実験、右：冬実験。

(3) 予測値の変化

解析値およびラジオゾンデ観測を対象とした予測値の検証では、500hPa 高度場や 850hPa 気温などの代表的な要素に対し概ね中立であり、同等の精度が得られることを確認した。

その後、性能評価試験のベースとなる実験を、2021 年 3 月末に現業化された全球解析の鉛直層増強等 (第 3.1 節) を適用したシステムに更新して、同様の実験を実施した。その結果、更新したシステムにおいても、データ形式の変更前後で、解析、予測とも同等の精度が得られ、新たな対処は不要であることを確認した。これらをふまえ、本変更をその他の観測データの利用改良 (第 3.6 節、第 3.8 節および第 3.12 節) とともに、2021 年 6 月 29 日に現業システムの全球解析に適用した。

3.10.4 Metop-C/IASI の利用

EUMETSAT 形式の IASI データ利用を現業化したのち、Metop-C 搭載の IASI についても新たに EUMETSAT 形式データを取得し、利用に向けた開発を進めた。

Metop-C は、Metop-A や Metop-B と同様に、日中に衛星が通過する時間帯が午前中に当たる太陽同期軌道 (午前軌道と呼ばれる) で運用されている。ただし、複数の Metop 衛星は観測時刻が近くなり過ぎないように、時間間隔を開けて通過するように運用されている。このうち、Metop-A は 2021 年 11 月に運用を終了 (IASI については 9 月に通常観測を終了) し、利用中の午前軌道の衛星は Metop-B だけとなったことから、午前軌道におけるハイパースペクトル赤外サウンダのデータ数やカバレッジを確保する上で、特に Metop-B の障害や点検時の備えとして、Metop-C の利用は重要である。

方針として、既に Metop-A および Metop-B の IASI は利用していることから、Metop-C の IASI についてデータ品質が同程度であることを確認した上で、同様の方法で利用することとした。同化に必要なパラメータとして、スキャンバイアス補正テーブルの作成および、観測誤差の設定を行った。いずれも、2021 年 7 月時点の現業システム相当の実験システムを用い、O-B の

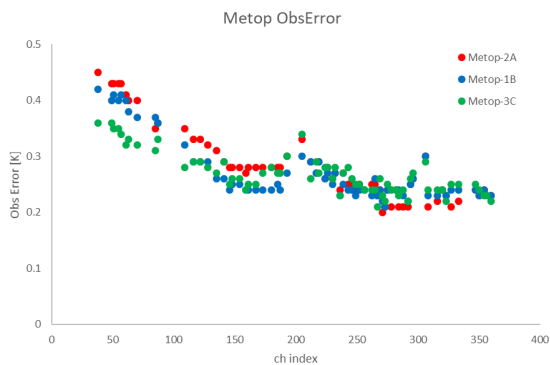


図 3.10.3 O-B 統計に基づき IASI に設定した観測誤差。横軸はチャンネルインデックス (500 チャンネル中の通番)。赤 : Metop-A、青 : Metop-B、緑 : Metop-C。

統計により作成した。図 3.10.3 に、設定した Metop-C の観測誤差を、Metop-A および Metop-B とともに示す。Metop-C は既存の Metop-A や Metop-B と顕著な差異はなく、波長帯によっては若干ノイズが少ないという特徴も見られた。

品質管理の結果について、O-B のヒストグラムや平均値のマップ、雲判別結果等の品質管理フラグの状況などを確認した。既存の Metop とほぼ同等となり、利用方法に問題はないことを確認した。

3.10.5 Metop-C 利用に関する性能評価試験

Metop-C/IASI の利用による効果を確認するため、性能評価試験を実施した。その際、Metop-C/IASI 利用開始時点では Metop-A の運用は既に終了している状況を想定し、Metop-A の利用を止め Metop-C を利用した場合に、解析・予測精度が同程度に維持できることを確認することとした。

2021 年 7 月時点の現業全球数値予報システムと同等の対照実験 (CNTL) と、これに Metop-C/IASI を追加し Metop-A/IASI を棄却した実験 (TEST) の比較を行った。(つまり IASI については、CNTL では Metop-A および Metop-B が利用され、TEST では Metop-B および Metop-C が利用される。) 実験期間は 2020 年 12 月 16 日から 2021 年 2 月 11 日 (冬実験)、2021 年 6 月 18 日から 8 月 11 日 (夏実験) で、1 月および 7 月のそれぞれ 1 か月が検証対象期間である。

(1) 利用データ数

冬実験、夏実験とも TEST における Metop-C/IASI の利用データ数は、CNTL における Metop-A/IASI と同程度であることを確認した。IASI の利用データ数合計は TEST で約 3% 減少したが、これは Metop-B との重複領域が Metop-A と Metop-C で若干異なるためである。TEST では Metop-C により、IASI データのカバレッジが Metop-B のみを利用するより拡大していることが確認できた。

(2) 解析値・第一推定値の変化

平均解析場の差異は微小であった。解析に用いられた各種観測データについて、第一推定値との差異や利用データ数の CNTL に対する TEST の変化を確認した。ラジオゾンデの気温観測など、変化は小さく概ね中立の結果であった。気温に感度のあるマイクロ波サウンダ AMSU-A の結果を確認すると、熱帯や南半球の上層チャンネルで O-B のばらつきが減少し、第一推定値の精度向上を示す傾向が見られた一方、対流圏上層付近に感度のあるチャンネルで、O-B 標準偏差が若干増加し、第一推定値の精度悪化を示す傾向が確認された。詳細については調査中であり今後の課題であるが、顕著な予測精度の悪化にはつながらないことを確認している。

(3) 予測値の変化

予測場の精度について、解析値およびラジオゾンデ観測を対象として、主要な要素 (500hPa 高度、地上気圧、250hPa 風速、850hPa 風速、700hPa 相対湿度) の検証を行った。顕著な改善や改悪はみられず、概ね精度を維持していることを確認した。他センター解析値や自分解析値を対象とした予測場の検証、台風進路予測精度についても同様に、顕著な改善や改悪はなく、いずれも概ね精度を維持していることを確認した。

3.10.6 まとめと今後の課題

全球数値予報システムにおいて、同化利用するハイパースペクトル赤外サウンダ IASI のデータセットを、NESDIS 形式のデータセット (616 チャンネル) から EUMETSAT 形式のデータセット (500 チャンネル) に移行した。その際、移行後のデータセットに含まれないチャンネルについては、代替として移行前のチャンネルの用途に応じて相当するチャンネルを選定した。また、最新のシステムに品質管理を適合させるため、すべてのハイパースペクトル赤外サウンダに対し、上層に感度のあるチャンネルのグロスエラーチェック閾値の緩和や、スキャンバイアス補正テーブルの再作成、観測誤差の更新を実施した。性能評価試験により、この変更前後で解析、予測とも意図通り同等の精度が得られることを確認し、2021 年 6 月 29 日に、現業システムに適用した。

Metop-C に搭載された IASI について、EUMETSAT 形式のデータセットを取得し、利用に向けた開発を進めた。データ品質は他の Metop 衛星に搭載されている IASI と同程度であることが確認できたことから、同様の手法で利用することとした。性能評価試験は、Metop-A の運用終了を考慮し、Metop-A を除いた上で Metop-C を利用する設定で実施した。その結果、この設定でも解析・予測精度を同程度に維持できることを確認した。この結果をふまえ、2021 年 11 月 24 日に、全球システムでの Metop-C/IASI の現業利用を開始した。なお、第一推定値の精度については、解析に用い

た観測データとの比較において、一部のデータで悪化を示す傾向が確認されるなどの課題もあり、今後品質管理を中心に同化手法の改善に向けて取り組むこととしたい。

現在、ハイパースペクトル赤外サウンダの利用は、気温に感度のあるチャンネルにとどまっている。今後は、水蒸気チャンネルなど利用チャンネルの拡充を図るとともに、より多くの観測情報を予測精度に反映させるため、チャンネル間の観測誤差相関を考慮したデータ同化手法の改良に取り組む。また、メソ解析や局地解析での利用に向けた開発にも取り組む予定である。

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.
- Eyre, J. R. and W. P. Menzel, 1989: Retrieval of Cloud Parameters from Satellite Sounder Data: A Simulation Study. *J. Appl. Meteor. Climat.*, 267–275.
- 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, 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.
- 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, 171–175.
- WMO, 2017: Guide to the Direct Broadcast Network for Near-real-time Relay of Low Earth Orbit Satellite Data: Attachment to the Guide to the WMO Information System (WMO-No. 1061).
- 気象庁, 2021a: ハイブリッド同化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, 18–22.
- 気象庁, 2021b: 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, 2021c: 全球解析におけるハイパースペクトル赤外サウンダ IASI のデータセット移行. 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, 105.

3.11 航空機観測データの高度利用

3.11.1 はじめに

航空機観測データは上空の気象要素を直接観測した貴重なデータであり、利用高度化のための開発に取り組んでいる。気象庁の全球解析ではデータ同化手法として4次元変分法が導入されており、利用する観測データにはバイアスがないことを前提としている。しかし航空機観測の気温データには機体ごとにバイアスがあることが知られている (Ballish and Kumar 2008) ため、気象庁の全球解析でもバイアス補正を実施している。このバイアス補正について、従来の手法 (酒匂 2010) には課題があったため、2021年6月30日にカルマンフィルタを用いた新しい手法に変更した。

本節では、全球解析へのカルマンフィルタによる航空機気温バイアス補正適用に関する性能評価試験の結果を報告する。従来のバイアス補正手法の課題、カルマンフィルタを用いた新しいバイアス補正の実装内容については、気象庁 (2021) を参照されたい。

3.11.2 性能評価試験の設定

性能評価試験では、コントロール実験 (CNTL) として2020年8月27日時点の現業の全球解析・予報モデル相当のシステムを利用した。CNTLには酒匂 (2010) による航空機気温バイアス補正が実装されている。テスト実験 (TEST) はCNTLの航空機気温バイアス補正手法を気象庁 (2021) で解説したカルマンフィルタを用いた手法に置き換えた実験であり、その他についてはCNTLと同一である。カルマンフィルタによるバイアス補正に必要なランダム誤差共分散の実験開始時の値については、実験期間前の2年分の航空機気温データから作成し、調整パラメータ (D) については0.001とした。実験期間は、夏季、冬季それぞれ2019年7月10日～9月11日、2019年12月10日～2020年2月11日とした。

バイアス補正の対象となる航空機気温データはAM-DAR報で通報されたデータであり、AIREP報で通報されるデータに対してはTEST・CNTLともにバイアス補正は実行されない。夏季実験・冬季実験の検証期間はそれぞれ2019年8月・2020年1月である。

3.11.3 性能評価試験の結果

(1) 航空機観測のデータ分布

全球解析で使用される航空機観測のデータ分布の例を図3.11.1に示す。航空機観測は北半球で多く南半球では少ないといった特徴がある。同じ直接観測データであるSYNOPやTEMPのデータ分布と比較すると観測データ数は多いが、航空機の運行状況の影響を受けるため、時刻や天候、平日・休日の違いによっても利用できるデータ数が変化する。

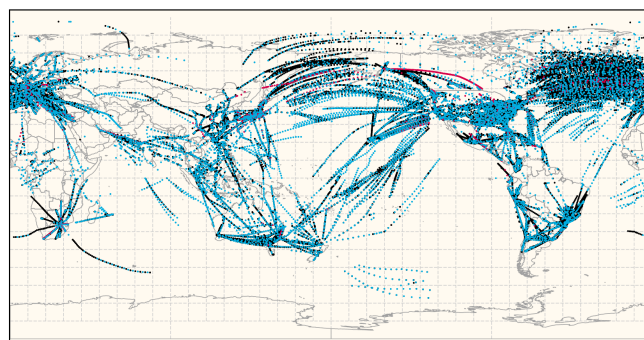


図 3.11.1 2019年8月1日00UTCの全球解析における航空機観測データの分布図。青点はデータ同化に利用されたデータ、赤点は品質管理でリジェクトされたデータ、黒点は品質管理はパスしたが、データ同化には使用されなかったデータを示している。

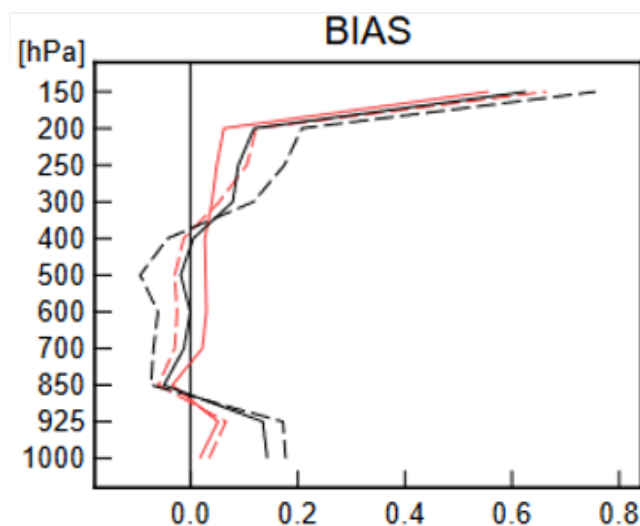


図 3.11.2 第一推定値と解析値に対する航空機気温観測のバイアスの鉛直プロファイル。赤線、赤破線はそれぞれTESTの解析値と第一推定値に対するバイアスを示し、黒線、黒破線はそれぞれCNTLの解析値と第一推定値に対するバイアスを示している。単位はKである。

(2) 第一推定値、解析値に対する航空機気温データのバイアスの変化

CNTLとTESTの第一推定値、解析値に対する航空機気温データのバイアスの鉛直プロファイルを図3.11.2に示す。統計期間は2019年7月2日から2019年9月11日である。第一推定値に対するバイアスに着目すると、概ね全ての鉛直レベルでTESTはCNTLに比べてバイアスが0に近くなっており、新しいバイアス補正手法が有効に機能していることが確認できる。図3.11.3は200hPa付近を飛行するある特定の航空機のCNTLとTESTのD値(観測値から第一推定値を引いた値)の時系列を示している。CNTLでは期間平均で+1K程度のバイアス(D値平均)が存在するが、TESTではバイアスが大幅に減少している。

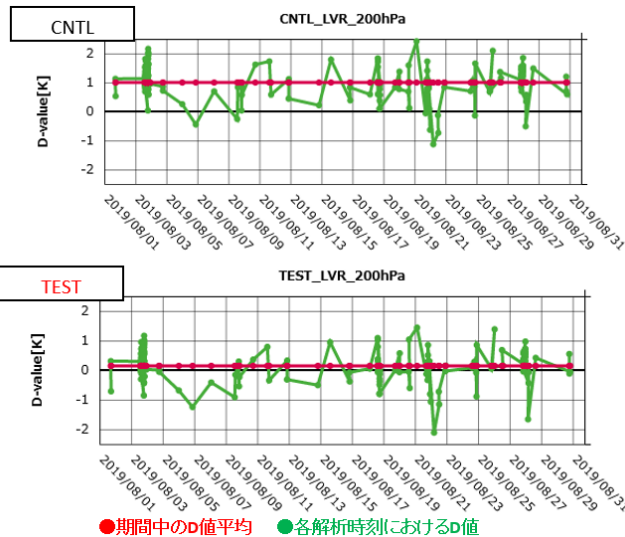


図 3.11.3 200hPa 付近を飛行するある特定の航空機の D 値時系列。上は CNTL、下は TEST の時系列を示す。単位は K である。

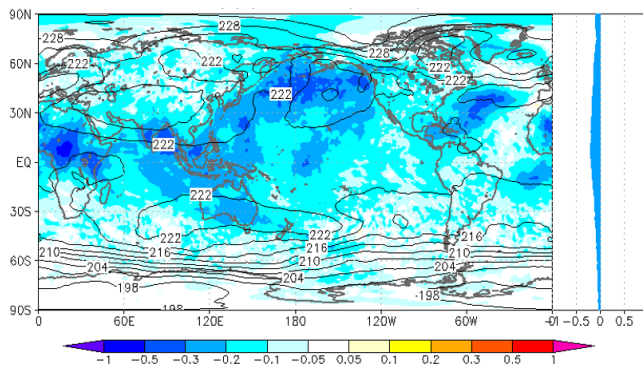


図 3.11.4 2019 年 8 月の 200hPa における月平均気温解析場の変化 (TEST-CNTL)。図の右には緯度帯平均値を示している。単位は K である。

(3) 解析場への影響

図 3.11.2 に示した通り、航空機気温データは 200hPa 付近では解析値に対して高温バイアスを持っているが、カルマンフィルタによるバイアス補正の実装により概ね半分程度に減少している。2019 年 8 月の 200hPa における月平均気温解析場の変化 (TEST-CNTL) を図 3.11.4 に示す。全面的に気温の解析場を下げるインパクトが見られるが、熱帯、北半球中緯度の海上で比較的变化が大きく、航空機観測が少ない南半球の極付近では変化が小さい。また、CNTL では、ECMWF・NCEP・UKMO といった海外の数値予報センターの解析値に対して高温傾向であったが、TEST ではこの傾向が軽減した。例として、図 3.11.5 に ECMWF の解析値を用いて計算した 2019 年 8 月の 200hPa における月平均気温解析場との比較を示す。従来の手法では 200hPa の気温解析場が ECMWF よりも高温傾向にあったが、新しい手法の導入によりこの傾向が軽減している。

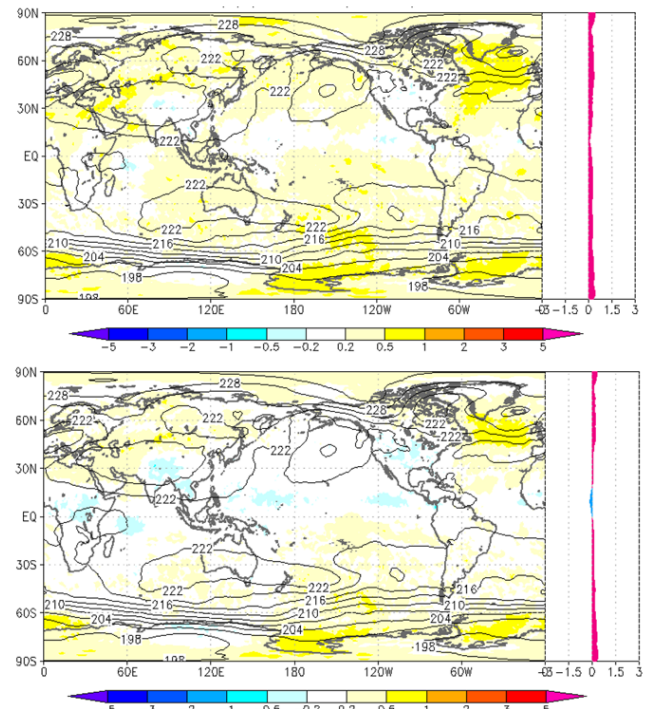


図 3.11.5 2019 年 8 月における ECMWF の 200hPa の月平均気温解析場との比較。上図は CNTL-ECMWF、下図は TEST-ECMWF である。図の右には緯度帯平均値を示している。単位は K である。

(4) 予測精度への影響

図 3.11.6 はラジオゾンデを参照値とした全球モデルの 264 時間予測までの予測精度の変化を示している。これらの図は二乗平均平方根誤差 (RMSE) の TEST-CNTL の差分を示しており、マイナス (黄色) の領域にプロットがあれば改善であることを示している。予測中盤の大気下層の気温、東西風など、やや改悪傾向の要素・高度も見られるものの、その他多くの要素・高度では、概ね中立からやや改善となっている。特に高度の予測値については他の要素と比較して改善傾向がよく現れている。高度の予測値はモデルの気温場と水蒸気場から計算されているため、バイアス補正手法改良による気温の鉛直プロファイルの改善が比較的分かりやすく現れていると考えられる。

台風予測への影響を確認するため、2019 年 7 月 20 日から 10 月 11 日に存在した台風に対して精度検証を行ったところ今回の変更が台風進路予測に与える影響は概ね中立であったが、改善事例として 2019 年台風第 8 号 (T1908) に対する 2019 年 8 月 3 日 00UTC 初期値の予測を示す。図 3.11.7 に示すとおり、T1908 は気象庁ベストトラックでは 8 月 6 日から 7 日にかけて九州に上陸後、対馬海峡を通過し朝鮮半島南東領域を北上しているが、CNTL の進路予測はベストトラックに対して西にずれ、九州西海上を北西進して 7 日 00UTC には黄海に進む予測となっている。TEST でもベストトラックに対して西にずれた予測となっているが、48

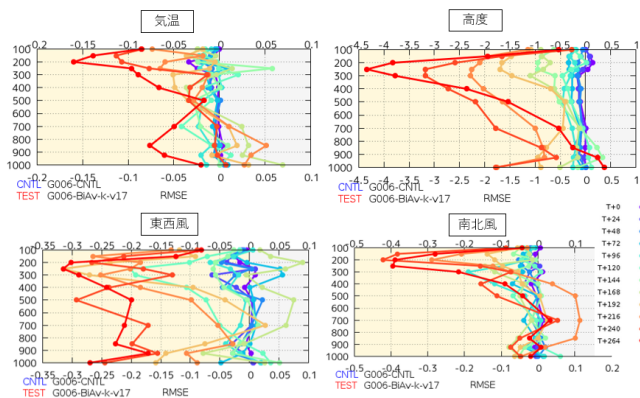


図 3.11.6 ラジオゾンデを参照値とした予測時間別 (FT=0 から FT=264 までの 24 時間毎) の予測精度 (RMSE) の変化。T+0 は予測初期値の変化、T+264 は 264 時間予測の変化を示す。縦軸は気圧高度 (hPa)、横軸は RMSE の TEST-CNTL の差分 (単位は気温:K、ジオポテンシャル高度:m、東西風、南北風:m/s) を示す。マイナス領域 (黄色) にプロットがあれば改善である。

時間以降の予測は CNTL よりややベストトラックに近づいており、九州西海上を北西進して朝鮮半島南西領域付近を北上する予測となっている。このような違いが生じた要因を次に示す。

予測初期時刻の 275hPa から 350hPa において解析に利用された航空機データの位置における TEST と CNTL の解析インクリメント (解析値 - 第一推定値)、300hPa の気温、及び 200hPa の高度の予測初期値 (図 3.11.8) を比較すると、300hPa 付近の黒破線で示した領域における気温のインクリメントが CNTL (図 3.11.8 (b)) では正となっているが TEST (図 3.11.8 (a)) では負となり、これに対応して CNTL に比べて TEST の 300hPa の気温の初期値が低くなっている (図 3.11.8 (c))。初期値の時点では 200hPa の高度に大きな違いは見られないが (図 3.11.8 (d))、この初期値の違いが 200hPa のジオポテンシャル高度の予測に影響を与えたと考えられる。その後の 200hPa 高度の予測を TEST と CNTL で比較 (図 3.11.9) すると、予測時間の進行とともに黒破線内の差分が東進して 72 時間後の予測に当たる 6 日 00UTC には黄海付近に達している。この影響を受けて太平洋高気圧に対応する高圧部の西への張り出しが弱まっており、TEST の進路予測が CNTL に比べて東寄りになったと推測される。

3.11.4 まとめと今後の予定

2009 年に気象庁全球解析システムに導入された航空機気温データのバイアス補正手法には複数の課題があったため、それらを解決するバイアス補正手法を考案・実装し、解析・予測精度へ与える影響を調査した。夏・冬 1 か月の性能評価試験の結果、従来の手法に比べて航空機気温データのバイアスが適切に補正され、概ね全ての鉛直レベルで第一推定値に対するバイアスが改善した。また、複数の海外数値予報センターの解析値

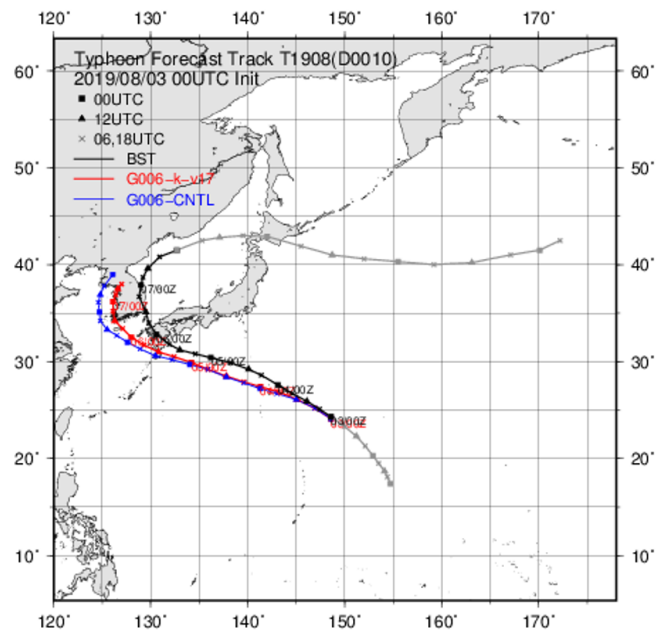


図 3.11.7 T1908 に対する 2019 年 8 月 3 日 00UTC 初期値の進路予測。赤線は TEST、青線は CNTL の台風進路予測を示す。黒線及び灰色線は気象庁ベストトラックである。

との比較から 200hPa の気温解析場の高温傾向が減少することを確認した。ラジオゾンデを参照値とした気温・高度・風の予測精度検証では、概ね中立からやや改善の検証結果が得られた。台風進路予測に与えるインパクトについては概ね中立であったが、当手法の導入により予測初期時刻における気温の修正が上空の気象場の予測に影響を与え、台風進路予測が改善する事例を確認した。

本報告では夏季の性能評価試験結果について報告したが、冬季についても概ね同様の結果となった。以上の試験結果からバイアス補正手法を従来の手法から変更した方がメリットが大きいと考えられたため、当手法は 2021 年 6 月に気象庁の全球解析システムに導入された。現在は当手法の気象庁領域モデルへの導入を検討している。

参考文献

- Ballish, B. A. and V. K. Kumar, 2008: Systematic differences in aircraft and radiosonde temperatures. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **89**, 1689–1708.
- 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.
- 気象庁, 2021: 観測データの新規導入と利用方法の改良. 数値予報開発センター年報 (令和 2 年), 気象庁数値予報開発センター, 103–104.

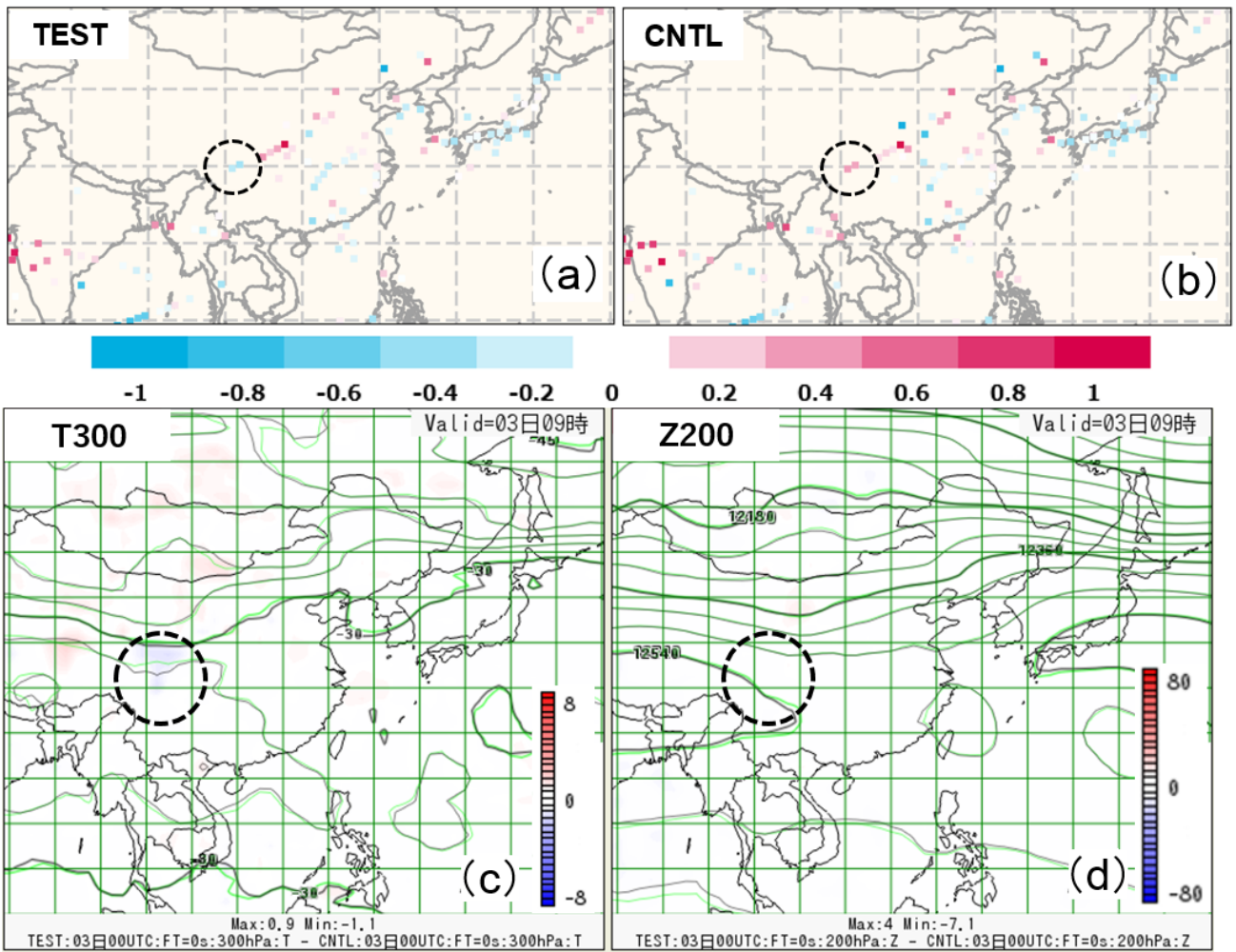


図 3.11.8 予測初期時刻 (2019 年 8 月 3 日 00UTC) において高度 275hPa から 350hPa で解析に利用された航空機気温データの位置における、(a): TEST、(b): CNTL の解析インクリメント、ならびに (c): 300hPa の気温、(d): 200hPa の高度の TEST と CNTL の比較。(c)、(d) の黒線は TEST、緑線は CNTL の等値線を示しており、カラーは TEST と CNTL の差分である。気温の単位は K、高度の単位は m である。なお、300hPa の気温と 200hPa の高度の図には以前の解析サイクルによる差分も含まれる。

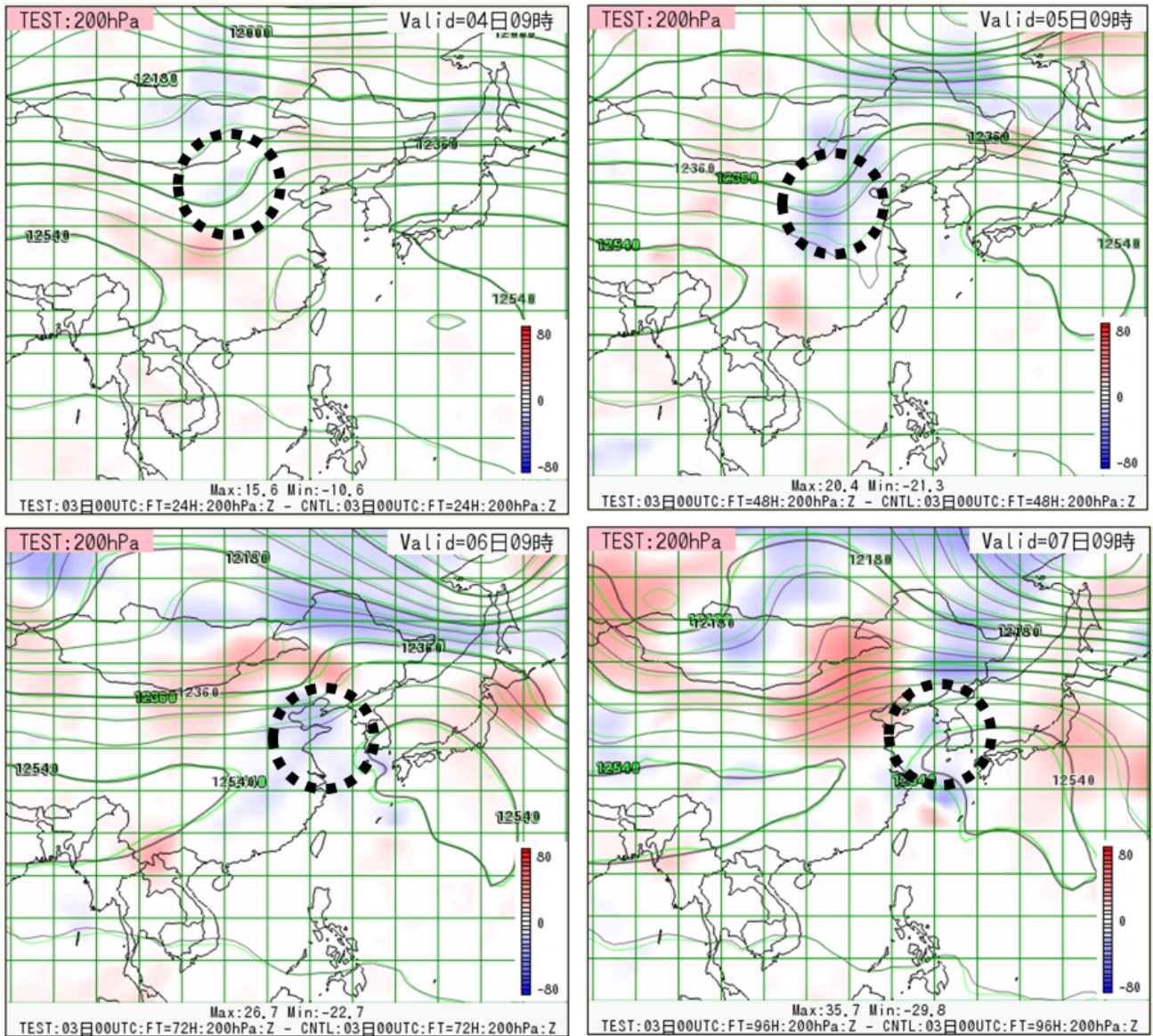


図 3.11.9 TESTとCNTLの200hPa高度の予測。左上、右上、左下、右下の図はそれぞれ24時間後、48時間後、72時間後、96時間後の予測を示す。黒線はTEST、緑線はCNTLの等値線を示しており、カラーはTESTとCNTLの差分である。高度の単位はm。

3.12 オリパラ向けガイダンス

3.12.1 はじめに

東京オリンピック・パラリンピック競技大会（以下、オリパラ）組織委員会に対する詳細な気象予測資料の提供を目的として、各オリパラ競技会場の気温・風の予報を支援するための専用のガイダンスを開発した。

当ガイダンスは、アメダス地点を対象とした既存のMSM気温ガイダンス(三戸 2018)及びMSM風ガイダンス(松本 2018)の予測手法を適用して競技会場の気温と風を予測した。予測地点はオリパラ競技会場に設置された14の観測点で、その位置を図3.12.1に示す。

図3.12.2は当ガイダンスを閲覧するためのモニターの例である。オリパラ委員会から委託された気象予報士が当モニター図の予測値をベースにして適宜修正した後、各競技会場のオフィシャルな予報として発表された。

ここでは、オリパラに向けて開発・提供したガイダンスについて、概要と経緯、仕様及び精度評価について述べる。

3.12.2 概要と経緯

2019年6月、オリパラ組織委員会より、風の影響を強く受けやすい、サーフィン、セーリング、ボート、自転車等の競技において、競技の安全で公平な運営のために詳細な風の予測が求められた。また、選手のみならずボランティアやスタッフの健康対策のために競技時間の設定の判断に資する詳細な気温の予測も要望された。そこで、気象庁が運用する既存の風・気温ガイダンスの手法を用い、会場周辺の風と気温の詳細な予測プロダクトを提供することとした。図3.12.3に、観測の入手からガイダンス提供までのデータの流れを示す。観測データはオンラインで当庁のスーパーコンピュータシステムに入電し、その観測及びMSMのデータを用いてガイダンスを作成する。提供したガイダンスは、観測とMSMのデータからカルマンフィルタにより日々学習し、予測式を最適化する「逐次学習型ガイダンス」である。このため、観測が継続的に提供されれば徐々に予測精度が向上し、かつ季節変動など説明変数と目的変数の対応関係の変化にも対応できる。

ガイダンス作成に必要な2つのデータについて述べる。一つは、数値予報であるMSMであり、5km間隔で39または51時間先までの予測を行う領域モデルである。日本周辺を高精度で予測でき、防災情報、航空気象情報、天気予報などに利用されている。もう一つのデータは観測データであり、可能な限り多くの観測データで学習することが高精度な予測につながる。アメダスを対象とした通常のMSM風・気温ガイダンスについては安定的に観測が得られるが、今回は予測が必要とされる期間が短く、かつ大会の延期があったために特殊な作業が必要となった。具体的には2020年夏



図 3.12.1 予測対象地点である各オリパラ競技会場の位置。地理院タイルを加工して作成。



図 3.12.2 オリパラ向けガイダンスのモニター図の例。

のオリパラに向けて2019年3月からオリパラ競技会場において順次観測が開始されたが、地点により観測開始日時が異なったこと、またオンライン/オフラインの違いがあったこと、一時閉鎖の地点もあったことなど安定的にオンラインで観測データを入手できず、手作業でのデータハンドリングによる開発となった。全ての地点がオンラインで提供されたのは2021年7月初めで、その後は安定的に観測データを入手できていた。

オリパラ組織委員会との連携について簡単に述べる。ガイダンスの提供期間、モニターの仕様の決定、観測データの状況などについて、2019年7月、2020年6月、2021年3月にオリパラ組織委員会と打合せを実施した。また、2021年4月には提供するガイダンスをより有効に利用してもらうため、予報を発表する予報士と勉強会を行った。その後も追加の質問に対応し、また大会直前には直近のガイダンスの精度検証資料も提供した。

3.12.3 仕様

前述したように、オリパラ向けガイダンスはMSM気温・風ガイダンスの仕様準拠しており、詳細は(三戸 2018)及び(松本 2018)を参照願いたい。ここでは概要及びMSM気温・風ガイダンスと異なっている点を述べる。

- 予測要素
 - 気温：毎正時の気温、日中の最高気温、朝の最低気温
 - 風：毎正時の風速・風向、前1時間の最大風速とその風向
- 実行頻度（初期時刻）：1日8回（00, 03, 06, 09, 12, 15, 18, 21UTC）

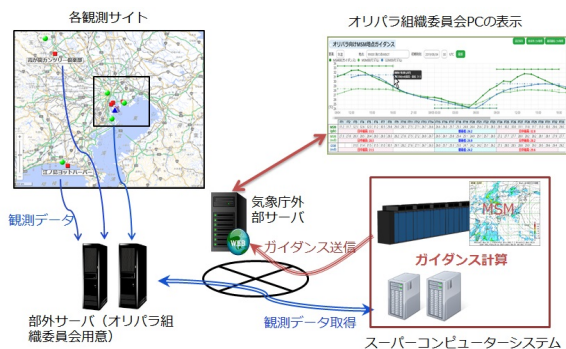


図 3.12.3 オリパラ向けガイダンスにおけるデータの流れの模式図。

- 予測地点：図 3.12.1 に示す 14 地点。
- 予報時間：39 時間 (00, 12UTC 初期値のみ 51 時間)
- 予測手法：目的変数 (予測地点の実況と MSM 地上気温・風との差) を MSM 予測値から算出した説明変数による線形式で求め、カルマンフィルタで線形式の係数を日々逐次更新する。風については、風速を頻度バイアス補正で補正している。

前述したように継続した長期間の観測データを得られる地点は少なく、少ない観測データで予測式 (係数) の最適化を行う必要があったことから、オリパラ向け風ガイダンスの学習方法及び初期係数の設定を見直した。具体的には、気温ガイダンスは通常 2 週間程度で係数の最適化がおおむね完了するため、MSM 気温ガイダンス (三戸 2018) と同様の設定とした。その一方で、MSM 風ガイダンスは係数の最適化に通常数か月以上かかる (高田 2018) ため MSM 風ガイダンス (松本 2018) から一部変更した。変更点としては、学習回数を増やすために、学習条件 (モデル風向と観測風向の差による学習の制限) を緩和した。¹ また、通常の地点ガイダンスでは、新規予測地点が追加された場合に近隣地点の係数を自動的にコピーしてから係数を逐次的に更新するが (高田 2018)、今回は初期係数を近接観測地点のコピーではなく、係数ゼロ (最初は MSM の地上風に同じとする) からスタートとした。これは、後者の方がより早く係数が最適化されたためである²。今回の観測点のほとんどが東京湾海岸といった特殊な地勢に設置されており、近距離でも地点間の観測特性の違いが大きかったことがその要因と考えられる。

3.12.4 精度評価

以下に大会期間中のオリパラ向けガイダンスの精度評価の一例と利用者側のコメントを記す。図 3.12.4 は、競技会場の一つであるお台場海浜公園の日別の最高気

¹ MSM 風ガイダンスでは、MSM の地上風と観測された風の風向が 90 度違うと学習しない。今回はそれを 135 度の違いまで許容することとした。

² MSM のバイアスが適切に補正できているか否かで判断する。

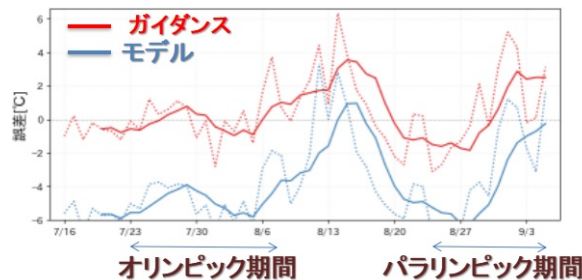


図 3.12.4 お台場海浜公園における、気温ガイダンス及び MSM (地上) の翌日日中の最高気温の誤差。青線が MSM (図中モデル)、赤線が気温ガイダンス。破線が日別値、実線は 10 日移動平均。期間は 2021 年 7 月 16 日～9 月 4 日。

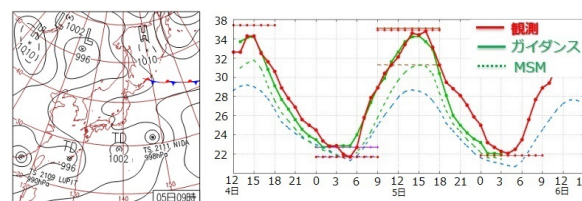


図 3.12.5 2021 年 8 月 5 日 9 時の地上天気図 (左)、8 月 4 日 12 時初期値の気温ガイダンスの毎正時の予測値 (右)。赤実線は実況値、緑実線は気温ガイダンス、緑破線は MSM の予測値。

温の誤差を時系列でみたものである。誤差に着目すると、気温ガイダンスはオリパラ期間中では適切に MSM (モデル) の負バイアスを補正していることが分かる。ただし、大会期間中ではなかったが、8 月中旬はガイダンスはモデルを上方修正して、逆に精度を悪化させている日がある。この期間は前線が停滞して雨の日が多く、太平洋高気圧に覆われる通常の夏のパターンと異なっていたためである。夏季の雨天時に高めに外すことについては、大会前に組織委員会に利用上の留意点として伝えている。なお、お台場海浜公園以外の地点に関しても同様に MSM の誤差の軽減を確認している。

図 3.12.5 は、2021 年 8 月 4 日 12 時初期値の霞ヶ関カンツリー倶楽部における気温ガイダンスの予測及び 5 日 9 時の地上天気図である。翌日は最高気温が 35℃ を超える猛暑日になったが、気温ガイダンスは実況に近い値を予測している。大会期間中は暑い日が多かったが、その他の地点でもおおむね最高気温を適切に予測していた。

図 3.12.6 は、カヌー・スラロームセンターの大会期間中における風ガイダンス、MSM (モデル) の風速の日別 ME と RMSE である。カヌー・スラロームセンターは 2019 年 7 月 13 日から観測が開始され、その後継続して観測データが提供され続けた地点である。当地点の風ガイダンス RMSE は MSM の地上風の正バイアスを補正し、MSM の風速予測の誤差を大きく軽減していることがわかる。なお、予測対象であるオリパラ競技会場の中には、観測データが十分に得られなかった地点もあり、その地点においてはやや精度が落

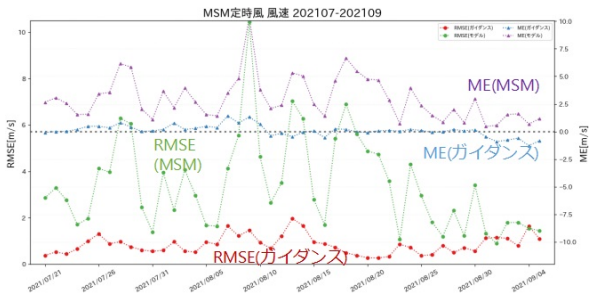


図 3.12.6 大会期間中のカヌー・スラロームセンターにおける、風ガイダンス及び MSM 地上風の風速の日別 ME (右軸)と日別 RMSE (左軸)。赤点線が風ガイダンスの RMSE、緑点線が MSM 地上風の RMSE、青点線が風ガイダンスの ME、紫点線が MSM 地上風の ME。期間は 2021 年 7 月 21 日～2021 年 9 月 4 日。

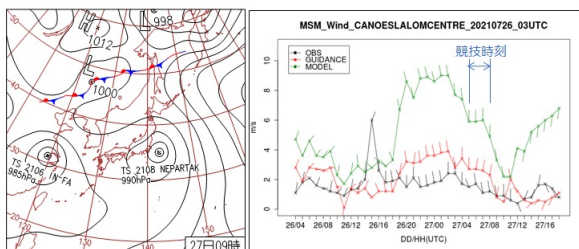


図 3.12.7 2021 年 7 月 27 日 9 時の地上天気図 (左)、7 月 26 日 12 時初期値の風ガイダンス及び MSM 地上風の毎正時の予測値 (右)。黒線は実況値、赤線はガイダンス、緑線は MSM の予測値。

ちる傾向があった。

図 3.12.7 は、2021 年 7 月 26 日 12 時初期値のカヌー・スラロームセンターにおける風ガイダンスの予測及び 27 日 9 時の地上天気図である。翌日に関東の南海上を台風が進む見込みとなっており、風の予測に注目が集まった事例である。競技が行われた時間帯において、MSM の予測を下方修正し、より実況に近い風速を予測していた。

大会終了後、オリパラ組織委員会及びオフィシャルな予報を作成した気象予報士などの関係者を交えて勉強会が行われた。関係者からは今回提供したガイダンスが非常に役に立ち、頻繁にモニター図を確認していたとのコメントを頂いた。特に気温はガイダンスをほぼ全面的に採用してオフィシャルな予報を出していたとのことである。一方、風ガイダンスも頻繁に利用したが、風の変わり目などで実況と差がある場合があり、適宜修正していたとのコメントがあった。風ガイダンスは気温ガイダンスに比べて学習期間が長く必要であり、大会前に観測が途中停止した影響があったと考えられる。また、大会運営では風の詳細な変化が求められるが、現在の MSM 及びその風ガイダンスでは詳細な風の変動の表現が難しいといった現状もあり、これについては今後の課題である。

参考文献

- 松本智文, 2018: 風ガイダンス. 数値予報課報告・別冊第 64 号, 気象庁予報部, 144-153.
- 三戸洋介, 2018: 気温ガイダンス. 数値予報課報告・別冊第 64 号, 気象庁予報部, 132-143.
- 高田伸一, 2018: 観測所の移設等の影響と対応. 数値予報課報告・別冊第 64 号, 気象庁予報部, 91-93.

3.13 メソ解析における船舶 GNSS 可降水量の利用

3.13.1 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（TF）が立ち上げられた。

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が、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。そのため、線状降水帯の予測精度を向上するには、海上の水蒸気観測を強化してデータ同化に利用することにより、予報初期値における水蒸気場の精度を上げ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 GNSS（Global Navigation Satellite System: 全球測位衛星システム）による可降水量観測をメソ解析で利用するための調査、開発に取り組んでいる。

本節では、メソ解析における船舶 GNSS 可降水量の利用に関する開発について報告する。

3.13.2 船舶 GNSS 観測

船舶 GNSS はリアルタイムで 10 分毎にデータが配信されており、可降水量、天頂遅延量といった観測値の他に、GNSS 解析に利用した衛星の数、遅延量残差などの品質管理（Quality Control: QC）に利用可能なパラメータも含まれている。利用可能な船舶 GNSS は試験運用が開始された 2021 年 6 月時点では、気象庁の観測船である凌風丸、啓風丸のみであったが、海上保安庁の測量船にも GNSS 観測機器が順次設置され、2021 年 8 月 31 日には気象庁の観測船 2 隻、海上保安庁の測量船 4 隻の合計 6 隻のデータが利用可能となった。但し、海上保安庁のデータには可降水量導出に必要な気圧や湿度の観測が含まれていないため、これらのデータについてはメソモデルの予測値を利用している。船舶 GNSS の解析手法等は Shoji et al. (2017) をご参照いただきたい。

3.13.3 船舶 GNSS 可降水量の QC 処理

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 についても可降水量を同化に用いる。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。

- 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や海外数値予報センターの観測データ品質管理レポートなどにより、品質に問題があることがわかっている地点
- 異常値チェック
 - 可降水量観測値が 1mm より小さい、または 90mm より大きい
- グロスエラーチェック
 - D 値¹の絶対値が 8mm 以上
- 空間整合性チェック²
 - 周辺の可降水量の D 値平均と空間整合性チェック対象観測点の D 値との絶対値の差が 5mm 以上

空間整合性チェックの実行条件を満たさない場合、D 値の絶対値が 5mm 以上のデータは同化に利用されない。さらに、30km 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。

3.13.4 船舶 GNSS の事後解析データを利用した調査

前述の通り、メソ解析では地上 GNSS の可降水量がデータ同化に利用されているが、これらは陸上の固定点のデータである。船舶 GNSS では、船舶の移動や波浪の影響によるアンテナの不規則な動きが観測精度に与える影響が懸念された。このため、2021 年 5 月時点の現業システムに相当するメソ解析予報システムに凌風丸の GNSS 可降水量を加えて品質調査を実施した。ただし、2021 年度初頭の時点では現業利用を想定したリアルタイムデータの提供が開始されていなかったため、事後解析データ³を利用して調査を行った。

凌風丸の船舶 GNSS 可降水量の事後解析データの品質を表 3.13.1 に示す。また、地上 GNSS の可降水量（船舶 GNSS を含む）のデータ品質を表 3.13.2 に示す。表中の ALL は入電したデータ、QCPASS は QC 処理を通過したデータ、USE は同化に使用されたデータを示す。これらから、船舶 GNSS 可降水量の事後解析データの D 値標準偏差は地上 GNSS 可降水量の D 値標準偏差と概ね同等であることがわかる。船舶 GNSS 可降水量は ALL, QCPASS でやや負バイアスの傾向となっているが、Shoji et al. (2017) では船舶 GNSS の可降水量はラジオゾンデ観測から計算した可降水量と比較して負バイアス傾向があることが述べられており、船舶 GNSS の可降水量を算出する GNSS 解析手法も負バ

¹ 観測値から第一推定値を引いた値

² グロスエラーチェックで D 値の絶対値が 5mm 以上でかつ、周囲 20km 以内に地上 GNSS 観測点もしくは船舶 GNSS 観測点が合計で 5 地点以上ある場合に実行される。

³ GNSS 解析で使用する衛星軌道情報として精密歴を使用したデータ。精密歴は観測時刻から約 2~3 週間後に公開されるため、リアルタイムで使用することはできない。

表 3.13.1 凌風丸の事後解析 GNSS 可降水量の D 値統計

統計期間:2020年6月10日から2020年7月15日			
統計量	ALL	QCPASS	USE
データ数	742	686	431
平均 (mm)	-0.28	-0.29	0.28
標準偏差 (mm)	2.89	2.18	2.10

表 3.13.2 地上 GNSS 可降水量の D 値統計 (船舶含む)

統計期間:2020年6月10日~2020年7月15日			
統計量	ALL	QCPASS	USE
データ数	1058913	886048	282981
平均 (mm)	0.26	0.10	0.15
標準偏差 (mm)	2.64	2.25	2.22

イアスの一因になっていると考えられる。

メソモデルの予測に対しても中立からやや改善の影響があることを確認し、2021年6月1日からメソ解析において船舶 GNSS の試験運用を開始した。

3.13.5 リアルタイムでの性能評価試験の検証結果

メソ解析での試験運用開始後、リアルタイムの船舶 GNSS 可降水量を利用した試験運用環境のメソ解析・予報のデータ (TEST) と船舶 GNSS を利用しない運用環境のメソ解析・予報のデータ (CNTL) を比較することにより船舶 GNSS 可降水量利用の性能評価を実施した。評価期間は2021年6月1日から2021年7月15日である。なお、気象庁の観測船2隻のデータは6月1日から利用しているが、海上保安庁の測量船のデータについては期間中に入電が開始した2隻からのデータ品質を確認した後、2021年7月9日から利用している。

(1) 船舶 GNSS 可降水量のリアルタイムデータの品質調査

リアルタイムの船舶 GNSS 可降水量の D 値統計による品質調査結果を表 3.13.3 に、D 値の空間分布を図 3.13.1 に示す。また、事後解析データの D 値ヒストグラムとの比較を図 3.13.2 に示す。これらから、船舶 GNSS 可降水量の事後解析データとリアルタイムデータにはそれほど大きな違いがないことがわかる。海上保安庁の可降水量データについても同様の検証を行ったところ、平均については気象庁観測船に比べ負バイアス傾向が見られたものの、標準偏差についてはほぼ同程度であった (図略)。

(2) メソモデルの降水予測への影響

図 3.13.3 に TEST と CNTL の閾値別 3 時間降水量 (20km 格子平均) の予測スコアを示す。図から降水予測への影響については、強い雨ではバイアスコアにやや悪化の傾向が見られるものの概ね中立である。空振り率、スレッツスコアについては概ね中立であるが、30mm/3h の降水ではやや改善の傾向が確認できる。ス

表 3.13.3 凌風丸のリアルタイム GNSS 可降水量の D 値統計

統計期間:2021年6月1日~2021年7月15日			
統計量	ALL	QCPASS	USE
データ数	5228	5055	743
平均 (mm)	-0.38	-0.39	-0.10
標準偏差 (mm)	2.58	2.12	2.30

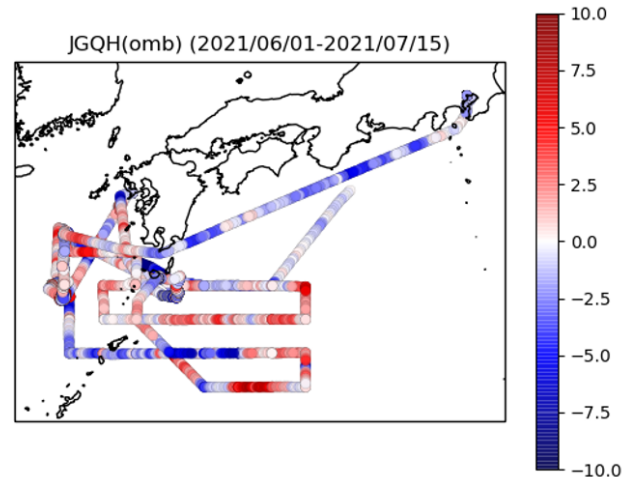


図 3.13.1 性能評価試験期間中の凌風丸の可降水量の D 値分布。期間は2021年6月1日から2021年7月15日。カラーは可降水量の D 値を示している。単位は mm。

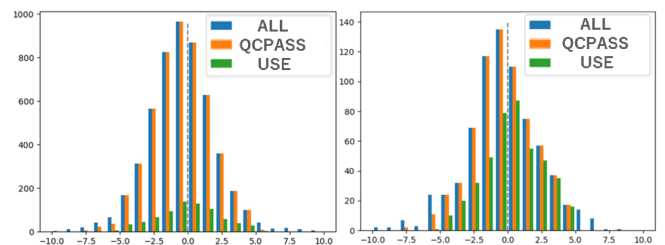


図 3.13.2 凌風丸のリアルタイム GNSS 可降水量 (左) と事後解析 GNSS 可降水量 (右) の D 値ヒストグラム。横軸の単位は mm。ALL は入電したデータ、QCPASS は QC 処理を通過したデータ、USE は同化に使用されたデータを示す。リアルタイムデータは試験運用期間の 2021 年 6 月 1 日から 2021 年 7 月 15 日、事後解析データは事前調査の 2020 年 6 月 15 日から 2020 年 7 月 15 日のデータを使用している。リアルタイムデータの観測時間間隔は 10 分であるが、事後解析データの観測時間間隔は 30 分である。

レッツスコアでは 1 から 3mm/3h 程度の降水でやや悪化が見られる。

(3) 事例検証

2021年6月3日から4日にかけて発生した九州南部の大雨の事例の中から、2021年6月3日0時 UTC 初期値のメソモデルの予測に対する船舶 GNSS 可降水量同化の影響を示す。この事例では、梅雨前線上の低気圧が朝鮮半島南部から日本海を発達しながら北東進し、この低気圧や前線に向かって暖かく湿った空気が

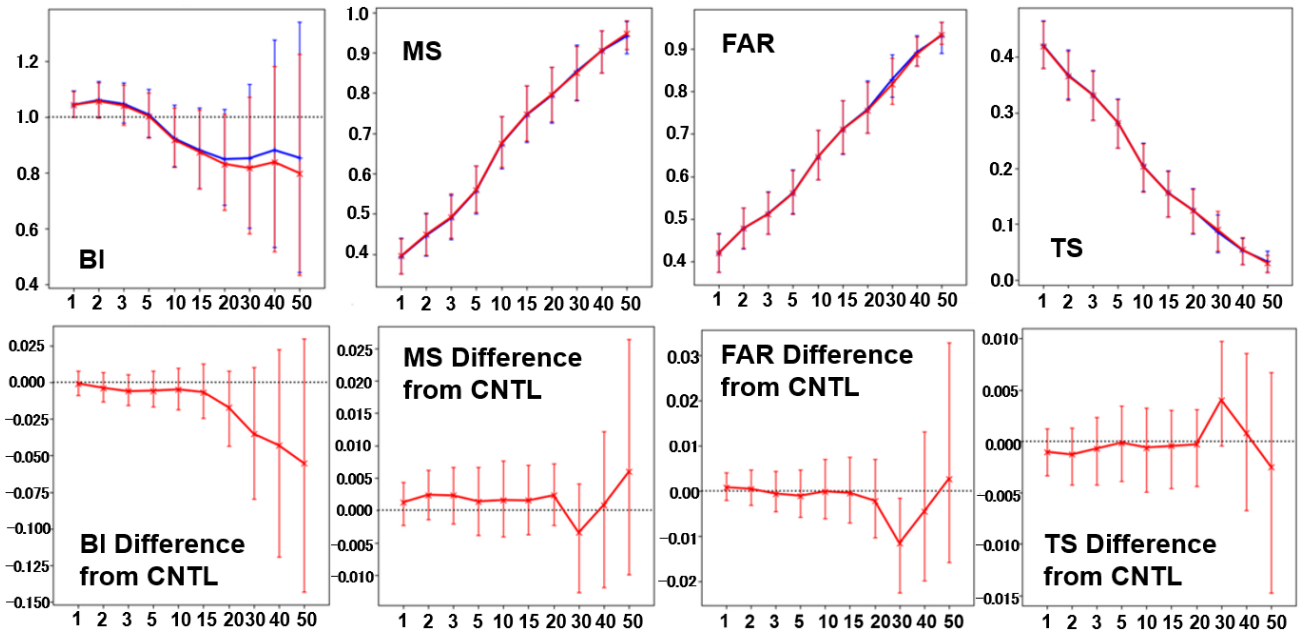


図 3.13.3 降水強度閾値別の対解析雨量のCNTL（青線）とTEST（赤線）のバイアスコア、見逃し率、空振り率及びスレットスコア（上段）と、それらのTESTとCNTLの差（下段）。横軸は3時間降水強度閾値 [mm/3h] を表す。検証格子は20km × 20km。エラーバーは有意検定95%信頼区間を示している。

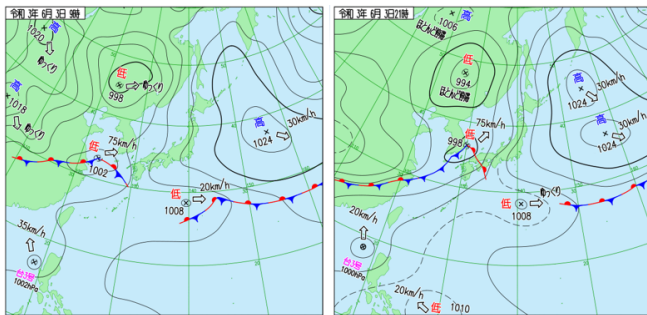


図 3.13.4 2021年6月3日から4日にかけて発生した九州南部の大雨の事例の気象状況。左は2021年6月3日9時、右は2021年6月3日21時の天気図である。

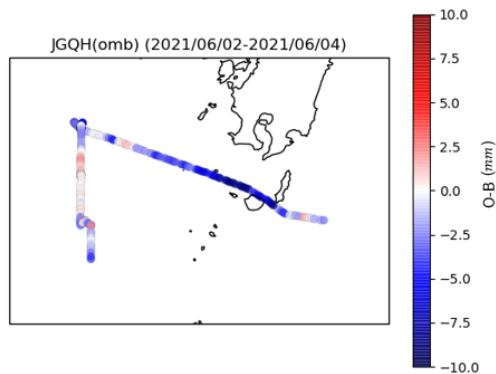


図 3.13.5 2021年6月2日から4日にかけての凌風丸のGNSS可降水量のD値分布。カラーは可降水量のD値を示している。単位はmm。

流れ込んだ（図 3.13.4）ため大気の状態が不安定となり、九州南部で大雨となった。

この時、凌風丸は図 3.13.5 に示す九州南部付近の海上で観測を行っていた。図 3.13.5 から、一連の大雨期間において、凌風丸の可降水量観測値は第一推定値に比べやや少ないことが確認できる。図 3.13.6 に示すとおり、該当の予報初期時刻では、観測地点の周辺においてTESTの方がCNTLに比べて可降水量の空間変化がより明瞭に表現されるようになったが、この変化は以前の解析サイクルによる修正の効果も影響していると思われる。図 3.13.7 は2021年6月3日0時UTCを初期値とした9時間予測における前3時間降水量をTESTとCNTLで比較した図である。TESTはCNTLに比べて赤丸で示した九州南部の強い降水をより実況に近い形で予測しているのが確認できる。

上述のように予測が改善した事例が見られた一方、実況と第一推定値の擾乱の位置ずれが大きい場合には修正が不十分な事例もみられた。特に擾乱近傍のような可降水量の空間変化が大きい領域では、正常と思われる観測がQCでリジェクトされ、同化に利用されない事例もあった。一例を図 3.13.8 に示す。この事例では啓風丸の可降水量のD値は概ね -5 mm から 5 mm の範囲に収まっており、第一推定値との整合性が良いが、2021年6月24日12UTCから2021年6月25日06UTCまではD値が大きくなり観測データがリジェクトされている。この期間、啓風丸は擾乱近傍の可降水量の変化が比較的大きい領域を航行しており、実況と第一推定値の擾乱の位置ずれによってD値が大きくなっ

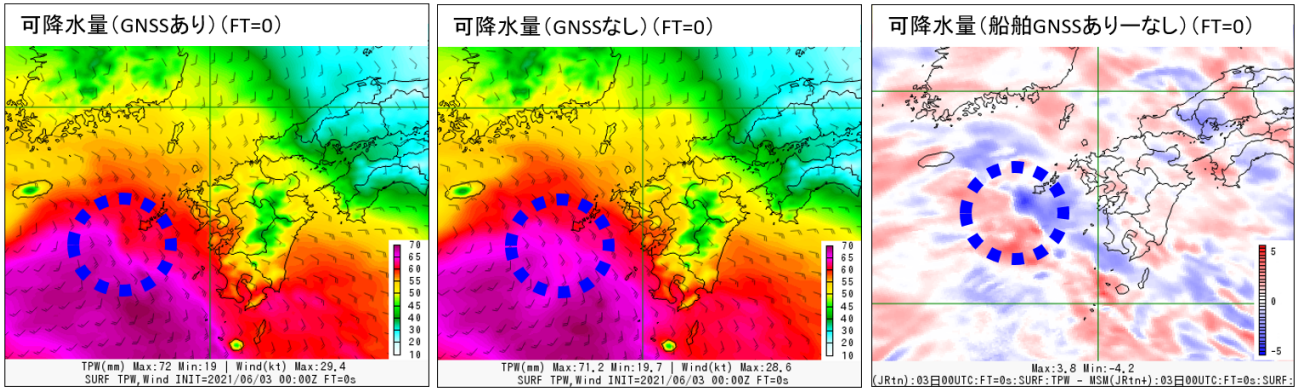


図 3.13.6 2021 年 6 月 3 日 0 時 UTC 初期値における可降水量と風の分布。左は TEST、中央は CNTL の可降水量（カラー）と風（矢羽）の分布を示す。右は可降水量の差分（TEST - CNTL）を示す。

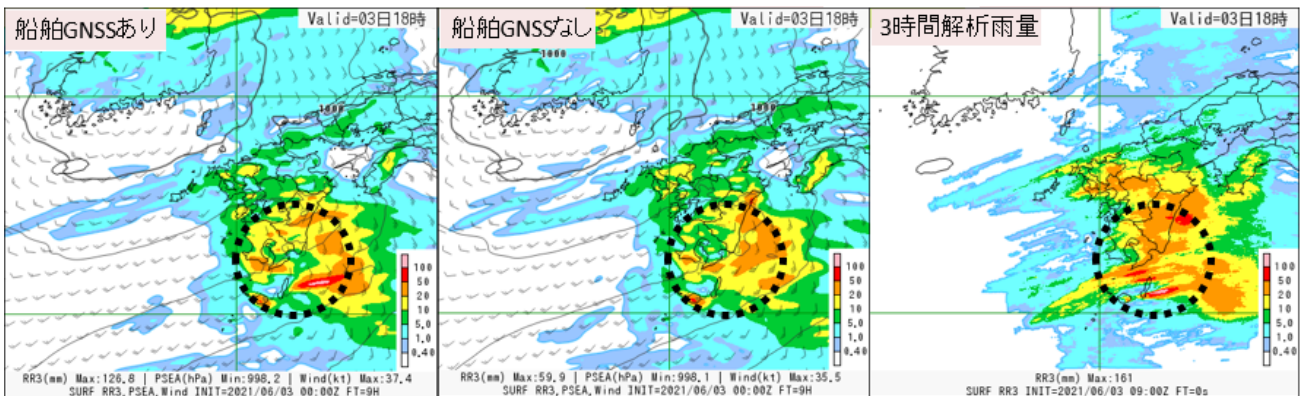


図 3.13.7 2021 年 6 月 3 日 0 時 UTC 初期値の 9 時間予測の前 3 時間降水量予測の比較。左は TEST、中央は CNTL、右が解析雨量。

た（図略）。第一推定値の時間・空間変化率の大きさに応じてリジェクトの閾値を変化させる Dynamic QC(大野木ほか 1997)を導入することにより、船舶 GNSS 観測をより有効に利用できる可能性がある。

3.13.6 まとめと今後の課題

線状降水帯発生の一因として大気下層の水蒸気流入が指摘されているが、特に海上では実況を予報初期値に反映するために必要な水蒸気観測が不足している。そのため、船舶 GNSS による可降水量観測をメソ解析で利用する調査、開発に取り組んでいる。

2021 年 6 月 1 日からのメソ解析における船舶 GNSS の試験運用期間において、船舶 GNSS 可降水量がメソ解析、予報に与える影響を調査した。その結果、船舶 GNSS 可降水量のリアルタイムデータの品質は地上 GNSS 可降水量と比較するとやや負バイアスであるが、標準偏差は概ね同等であることが分かった。降水予測スコアについては統計的に概ね中立であった。事例検証では降水量予測が改善した事例もあったが、実況と第一推定値の擾乱の位置ずれが大きい場合などは周辺の場合を十分に修正できず、予測があまり改善しない事例もみられた。リアルタイムの船舶 GNSS 可降水量データの品質に問題がないこと及び、降水予測改善の事例

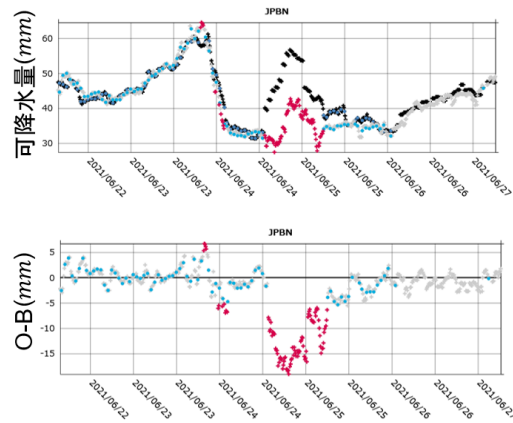


図 3.13.8 啓風丸の可降水量観測の時系列図。上図は可降水量観測値（灰色：QC で正常と判定されたデータ、赤色：QC で異常と判定されたデータ、水色：データ同化に使用されたデータ）及び第一推定値（黒）を示し、下図は D 値（灰色：QC で正常と判定されたデータ、赤色：QC で異常と判定されたデータ、水色：データ同化に使用されたデータ）を示す。

が確認されたことから、2021 年 8 月 31 日にメソ解析において船舶 GNSS 可降水量の現業利用を開始した。ただし、リアルタイムデータを用いた冬季の性能評価試験を実施していないことから、冬季においてはいつ

たん船舶 GNSS の利用を停止する計画である。冬季についてもリアルタイムデータを用いた性能評価試験を行い、検証を行ったのち現業利用を行う予定である。

また、擾乱近傍のような可降水量の空間変化が大きい領域で船舶 GNSS をより有効に利用するために Dynamic QC の導入を進め、更なるデータの高密度・高頻度利用に向けて調査・開発を行う。

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.

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.

Shoji, Yoshinori, Kazutoshi Sato, Masanori Yabuki, and Toshitaka Tsuda, 2017: Comparison of shipborne GNSS-derived precipitable water vapor with radiosonde in the western North Pacific and in the seas adjacent to Japan. *Springer*.