

3.7 波浪アンサンブル予報システムのメンバー数増強

3.7.1 はじめに

気象庁では、波浪の早期注意情報（警報級の可能性）で必要となる波浪の確率論的予測情報を提供するため、波浪アンサンブル予報システム（Wave ENsemble prediction System, WENS）を運用している（高野 2016）。波浪アンサンブルの予測結果は、WMO の荒天予測計画（Severe Weather Forecasting Programme, SWFP）を支援するための気象庁 SWFP ウェブサイト上の波浪予測図 <https://www.data.jma.go.jp/gmd/waveinf/wens/wave.html> 提供の用途でも活用されている。

2021 年 3 月 30 日には、第 3.3 節で報告されている全球アンサンブル予報システム（全球 EPS）のアンサンブルメンバー数の 27 メンバーから 51 メンバーへの増強に合わせて、波浪アンサンブルのアンサンブルメンバー数を 51 に増強した。本稿では、メンバー数増強の予測精度の評価結果を報告する。

3.7.2 予測精度の検証

メンバー数増強の効果を確認するため、全球 EPS 51 メンバー予測結果を大気外力として用いた波浪アンサンブルの実験を実施した。実験期間は、暖候期 2019 年 6 月 20 日～10 月 21 日、寒候期 2019 年 11 月 20 日～2020 年 3 月 11 日である。比較対象とするコントロール実験（以下、CNTL）は当時の現業波浪アンサンブル（アンサンブルメンバー数 27）の予測結果である。有義波高アンサンブル平均のバイアス、RMSE を図 3.7.1 に示した。バイアス、RMSE 共に、CNTL に対して 51 メンバー実験はほぼ中立という結果であった。また、図 3.7.2 に示した信頼度曲線でも 51 メンバー実験と CNTL はほぼ同等であった。このように 51 メンバー実験を実施した結果、概ね中立の結果が確認できたことから、2021 年 3 月に波浪アンサンブルのメンバー数増強の現業化を行った。

参考文献

高野洋雄, 2016: 波浪アンサンブルシステムと週間波浪ガイダンス. 量的予報技術資料（予報技術研修テキスト）, 79–84.

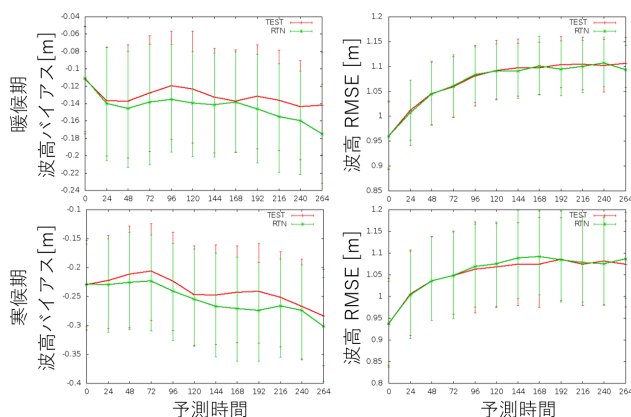


図 3.7.1 波浪アンサンブルでの有義波高アンサンブル平均の対衛星観測検証結果。上段は暖候期、下段は寒候期、左列がバイアス、右列が RMSE。緑線が CNTL（現業 27 メンバー）、赤が 51 メンバー実験の結果。

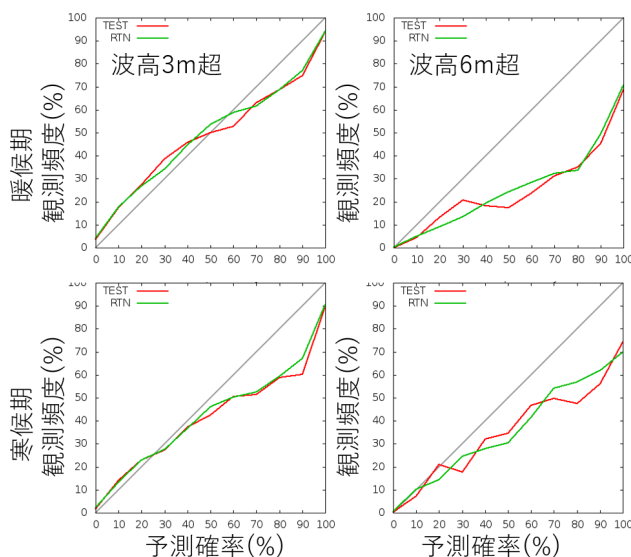


図 3.7.2 波浪アンサンブル 96 時間予測の信頼度曲線。上段は暖候期、下段は寒候期、左列は波高 3 m 超過の確率予測、右列は波高 6 m 超過の確率予測に対応する。緑線が CNTL（現業 27 メンバー）、赤が 51 メンバー実験の結果。

3.8 全球解析における全天同化マイクロ波水蒸気サウンダデータ利用の拡充

3.8.1 はじめに

気象庁の全球解析では、衛星に搭載されたセンサーによって観測される様々な輝度温度データを利用している。輝度温度を観測するセンサーのうち、マイクロ波イメージャやマイクロ波水蒸気サウンダに対し、2019年12月11日に、晴天域に加え雲・降水域を含む観測データの同化(全天同化)を導入した。これにより、雲・降水域においても気温や水蒸気の情報を取り込まれ、解析値や予測値において、特に水蒸気場の精度が改善した(気象庁 2021a)。

マイクロ波水蒸気サウンダは、183GHz帯の水蒸気の吸収帯付近に複数のチャンネルを持ち、対流圏中上層の水蒸気量に感度を持つセンサーである。いくつかのマイクロ波水蒸気サウンダについては、前述の全天同化導入後も引き続き晴天域のみのデータの利用にとどまっていたが、その後全天同化での利用に向けた開発を進めた(気象庁 2021b)。

ここでは、2021年6月29日に現業化した、マイクロ波水蒸気サウンダの全天同化への移行や新規衛星の追加利用について述べる。

3.8.2 変更の概要

本変更で対象とした衛星/センサーは、Suomi-NPP, NOAA-20/ATMS、DMSP-F17, F18/SSMIS、Megha-Tropiques/SAPHIR、FY-3C/MWHS-2で、いずれも水蒸気の吸収帯183GHz付近のチャンネルを全天同化とする。このうち、FY-3C/MWHS-2は晴天域も含め新規に利用を開始するセンサーで、それ以外のセンサーは、晴天域のデータのみの利用から全天同化へと移行した。また、同化チャンネルには問題がないものの、雲・降水の量を表すパラメータの算出に用いるチャンネルの故障により利用できなくなっていたMetop-A/MHSについて、別のチャンネルを用いた代替的なパラメータ算出手法により、全天同化での利用を再開した。本変更により、全球解析において利用中の183GHz付近のチャンネルは、すべて全天同化により利用されることとなった。図3.8.1に、マイクロ波水蒸気サウンダのカバレッジマップを示す。全天同化への移行、新規センサーの利用(MWHS-2)、品質管理の変更により、利用できるデータが増加した。

これらのセンサーの観測データを全天同化するために適用した、主な品質管理の変更を以下に示す。

(1) 観測誤差調整の変更

輝度温度の観測値(O)と第一推定値からの計算値(B)の差(O-B)の統計から得られた標準偏差を、品質管理においては外れ値除去の閾値等の基準として、また解析本体においては同化の際の観測誤差の基準として用いている。解析本体での観測誤差はこの標準偏差を

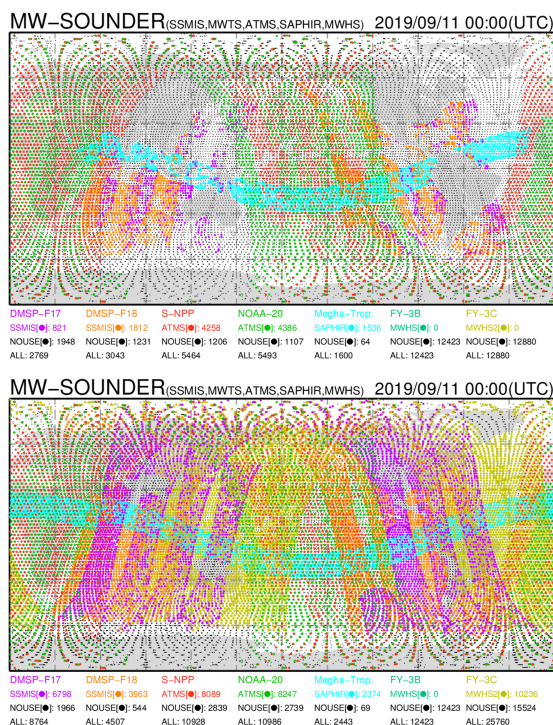


図 3.8.1 マイクロ波水蒸気サウンダのカバレッジマップの変化。上:変更前、下:変更後。2019年9月11日00UTCの全球サイクル解析における分布。なお、品質管理により利用されなかったデータや、同化せずにモニターのみ実施していたデータは、どの衛星も黒色のプロットで表示される。

そのまま用いるのではなく、観測誤差調整として定数倍して用いている。これは、観測値が解析値に過剰に影響を与えることや、他の観測データとのバランスを考慮して設定されたものである。マイクロ波水蒸気サウンダの観測誤差調整は、輝度温度直接同化の導入時に設定された4.5倍という値がそのまま用いられてきた(岡本 2007)。しかし、その後の他の利用データの増加やシステムの更新に伴い、解析値への影響や他の観測データとのバランスも変化していると考えられることから、見直しが必要な値であった。本開発において、Desroziers et al. (2005)による観測誤差の診断結果や、LETKFによる共分散膨張係数の値などを考慮した結果、観測誤差調整の値をこれまでより小さく設定することが適切であると判断した。

本稿では、マイクロ波水蒸気サウンダの観測誤差調整を4.5倍から4倍へと引き下げた結果を示す。なお現業化の際にはさらに検討を行った結果を反映し、マイクロ波水蒸気サウンダは3倍に引き下げ、マイクロ波イメージャについても4倍から3倍へと引き下げた¹。これにより、マイクロ波水蒸気サウンダやマイクロ波

¹ この引き下げを適用した結果には、マイクロ波水蒸気サウンダおよびマイクロ波イメージャの両方の効果が見られる。本稿ではマイクロ波水蒸気サウンダの効果を示すことを目的としているため、マイクロ波水蒸気サウンダのみの観測誤差調整の結果を示した。

イメージャの観測情報が解析値により大きく反映されるようになった。

(2) SSMIS と MHS との衛星重なり間引きの廃止

品質管理においては、複数の同センサーが近い場所をほぼ同時刻に観測した場合には、ひとつの衛星のデータを残して他の衛星のデータは利用しないという間引き処理（以下、「重なり間引き」と称する）が組み込まれている（岡本 2007）。これは、複数の衛星に搭載された同センサーが、特に極軌道衛星のデータが集中する高緯度を中心に、過度に解析結果に影響を与えることを避けるためである。これまで別センサーである SSMIS（183GHz チャンネル）と MHS との間にも重なり間引きを適用していたが、複数の同センサーに適用するという扱いに一貫性を持たせるため、廃止することとした。その際、データが増えることにより過度に解析結果に影響を与えるといった問題は見られなかった。

(3) 海上における可降水量を用いた品質管理の廃止

可降水量の少ない観測地点においては、マイクロ波水蒸気サウンダは大気の透過率が高く、観測値は地表温度や射出率といった地表面の状態に大きく左右される。そのため輝度温度の計算精度が低く、これまで観測データを利用しない設定となっていた。本変更においても、射出率の推定精度が低い海水上や陸上においては、可降水量が少ない場合には引き続き利用しない設定としている。しかし、海上については海面水温や射出率の推定精度が陸上よりも高いことから、輝度温度の計算精度に実用上の問題がないことを確認し、利用することとした。

(4) SAPHIR、SSMIS の陸上での利用

SAPHIR の利用開始（計盛 2015）および SSMIS の 183GHz チャンネルの利用開始（村上 2017）の際、これらのセンサーでは、他のマイクロ波水蒸気サウンダには搭載されている 90GHz 帯および 150GHz 帯のチャンネルが利用できず、これらのチャンネルを用いた地表面の温度や射出率の精度評価が十分に行えないとして、海上のデータのみを同化していた。

これらのセンサーの陸上での利用を検討したところ、標高が低い場合や可降水量が多い場合などに、地表面への感度が小さく問題なく利用できることが確認できた。そこで、各チャンネルの感度高度と標高に応じた判定を行い、利用することとした。

3.8.3 観測誤差の設定

気象庁（2021a）で示した通り、全天同化においては、雲・降水量を表すパラメータと、O-B の標準偏差との関係に基づき観測誤差を設定している。本変更で利用を開始したそれぞれのセンサーについては、利用できるチャンネルを用いて以下のように雲・降水量を表すパラメータを導出する。

(1) Suomi-NPP, NOAA-20/ATMS、FY-3C/MWHS-2

Suomi-NPP および NOAA-20 に搭載の ATMS、ならびに FY-3C に搭載の MWHS-2 については、90GHz 帯および 150GHz 帯のチャンネルが搭載されている。これらのチャンネルを用いて、気象庁（2021a）の (2.2.5) 式²により散乱インデックスを算出し、雲・降水量を表すパラメータとして用いる。

(2) DMSP-F17, F18/SSMIS

DMSP-F17 に搭載の SSMIS については、90GHz 帯や 150GHz 帯のチャンネルが搭載されていることから、気象庁（2021a）の (2.2.5) 式により散乱インデックスを算出し、雲・降水量を表すパラメータとして用いる。

DMSP-F18 に搭載の SSMIS においては、150GHz 帯のチャンネルが故障のため利用できない。一方で、37GHz の垂直、水平偏波のチャンネルが利用できる³ことから、気象庁（2021a）の (2.2.3) 式⁴により、雲・降水量の影響を表すパラメータとして C_{37} を算出し用いる。ただし、陸上では C_{37} を利用できないため、DMSP-F18 は海上のデータのみ利用する。

(3) Megha-Tropiques/SAPHIR

Megha-Tropiques に搭載の SAPHIR には、183GHz 帯に感度高度の異なる 6 チャンネルが搭載されているが、他の水蒸気サウンダに搭載されている 90GHz 帯や 150GHz 帯のチャンネルはなく、これらを利用した散乱インデックスを算出することができない。そこで、6 つのチャンネルのうち、最も透過率が高く下層に感度のあるチャンネル 6（ 183 ± 11 GHz）を利用する（Chambon and Geer 2017）。このチャンネルは透過率が最も高いことから、雲・降水の有無による輝度温度への影響は最も大きい。そのため、このチャンネルの観測値や雲・降水の影響を考慮した計算値を、晴天と仮定した場合の計算値と比較することで、雲・降水の影響の程度を見積もることができる。観測における雲・降水の有無の影響を SI_o 、モデルにおける雲・降水の有無の影響を SI_b とし、両方を偏りなく考慮するため、雲・降水量を表すパラメータとして両者を平均した SI_s を以下のように算出する。

$$SI_o = TB_{ch6}^{clr} - TB_{ch6}^o \quad (3.8.1)$$

$$SI_b = TB_{ch6}^{clr} - TB_{ch6}^b \quad (3.8.2)$$

$$SI_s = (SI_o + SI_b)/2 \quad (3.8.3)$$

² 90GHz より 150GHz で雲・降水粒子による散乱の効果が大いことを利用した指標。両チャンネルの輝度温度の差から、水蒸気の吸収の効果を差し引いた値。

³ SSMIS はチャンネルによって観測位置が異なるが、24 チャンネル全ての観測位置合わせ処理がされている UPP データを使用している（村上 2017）。

⁴ 海面からのマイクロ波放射が偏光しているのに対し、雲・降水からのマイクロ波放射は非偏光であることを利用し、37GHz の垂直偏波と水平偏波の輝度温度の差から雲・降水の影響の程度を表した指標。

ここで、 TB_{ch6}^{clr} は晴天を仮定して計算した輝度温度、 TB_{ch6}^o は観測輝度温度、 TB_{ch6}^b は雲・降水を考慮した全天計算輝度温度をそれぞれ表す。

(4) Metop-A/MHS

Metop に搭載の MHS には、90GHz 帯および 150GHz 帯のチャンネルが搭載されていることから、これらを用いた散乱インデックスが雲・降水の量を表すパラメータとして用いられている。しかし、Metop-A については 150GHz 帯のチャンネルが故障したため、散乱インデックスが算出できず、同化する 183GHz 帯のチャンネルには故障がないにもかかわらず利用できなくなっていた。そこで、前述の SAPHIR と同手法を適用する。MHS には 183GHz 帯に 3 つのチャンネルが搭載されているが、そのうち最も透過率が高く感度高度の低いチャンネル 5 (190.311 GHz) を用い、同様に散乱インデックスを算出することとした。

この手法で作成された散乱インデックスを、150GHz 帯のチャンネルが故障する前の期間のデータを用い、従来の手法 (90GHz 帯および 150GHz 帯のチャンネルを利用) と比較したところ、概ね分布が一致することが確認できた。

3.8.4 性能評価試験

本変更の効果を確認するため、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、これに全天同化センサー拡充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) 解析値・第一推定値の変化

平均解析場には、本変更による顕著な変化はみられなかった。若干の変化として、850hPa においては熱帯域を中心とした比湿の増減や全球的な気温の上昇が確認された。この変化については、複数の海外数値予報センターの解析値を用いて確認したところ、概ね CNTL における他センターとの差異が減少する方向の変化であることが確認された。ECMWF などでは既に多くのセンサーが全天同化で利用されているため、その解析値に近づく変化は妥当であると考えられる。

解析に用いられた各種観測データについて、O-B の標準偏差や利用データ数の CNTL に対する TEST の変化を確認した (図 3.8.2)。ここで示すデータはいずれも、今回の変更において直接利用方法に変更を加えていない観測データである。(a) に示した静止衛星晴天放射輝度温度 (CSR) は、マイクロ波水蒸気サウンダと同様に対流圏中上層の水蒸気量に感度のあるデータである。O-B の標準偏差が減少した上で利用データが増加するなど、第一推定値と観測値の整合性が向上した特徴がみられ、マイクロ波水蒸気サウンダの持つ

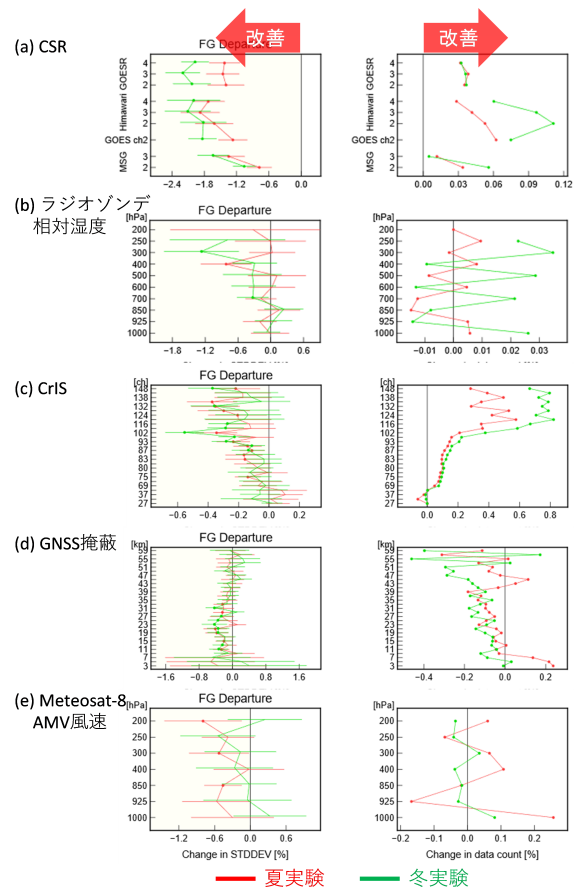


図 3.8.2 TEST の CNTL に対する、様々な観測と第一推定値との差 (O-B) の標準偏差の変化率 (各観測データの左列) および利用データ数変化率 (右列) [%]。(a) 静止衛星晴天輝度温度、(b) ラジオゾンデ相対湿度、(c) ハイパースペクトル赤外サウンダ CrIS、(d) GNSS 掩蔽、(e) Meteosat 大気追跡風。赤線が夏実験、緑線が冬実験を示す。エラーバーと丸印はそれぞれ、95%信頼区間と、それによる変化率の正負が統計的に有意であることを示す。縦軸は (a)(c) についてはチャンネル番号、(b)(e) については気圧 (hPa)、(d) については高度 (km) を示す。

情報を取り込んだ直接的な効果として、第一推定値の精度が向上したと考えられる。(b) で示したラジオゾンデ相対湿度においても、統計的な有意性は低いものの 500hPa より上層を中心に改善の傾向がみられ、(a) の結果とも整合的である。また、気温に関する観測 ((c) ハイパースペクトル赤外サウンダ CrIS、(d) GNSS 掩蔽) や風 ((e) Meteosat-8 大気追跡風) に関する観測との整合性も向上していた。背景誤差相関やデータ同化サイクルを通じて改善効果が伝搬し、水蒸気だけでなく気温や風についても第一推定値の精度が向上したと考えている。

(2) 予測値の変化

自分解析値およびラジオゾンデ観測値を参照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関し、概ね精度は中立であった。ただし、本変更は解析値を変化させる変更であることから、

予測検証の参照値として自分解析値は最適ではない可能性がある。また、衛星観測による効果はラジオゾンデ観測の少ない海洋上で顕著であると考えられる。そこで、本変更に対し独立で、分布に偏りのない参照値として、複数の海外数値予報センター（ECMWF、UKMO、NCEP）の解析値や ECMWF の再解析（ERA5）を用いた検証を行った。ここでは、ERA5 を参照値とした検証結果を示す（図 3.8.3）。本変更の効果として、マイクロ波水蒸気サウンダが感度を持つ対流圏中上層の水蒸気量（比湿）の予測が、参照値に近づく変化が確認できた。また、気温や風速、高度場についても同様の変化が見られた。これらの特徴は、ERA5 だけではなく複数の海外数値予報センターの解析値を参照値とした場合にも同様に見られた。複数の参照値に近づく変化が整合的に見られたことから、この変化は予測の改善を示すものと考えられる。この改善傾向は、予測初期を中心に概ね 2 日先まで確認された。

3.8.5 まとめ

全球数値予報システムにおいて、複数のマイクロ波水蒸気サウンダの利用に関し、全天同化への移行や新規利用センサーの追加、品質管理の変更を行った。この変更の効果を性能評価試験により確認した結果、第一推定値や予測値の精度向上が確認できた。このことから、2021 年 6 月 29 日に、全球解析において本変更の現業システムへの適用を開始した。

参考文献

- Chambon, Philippe and Alan J. Geer, 2017: All-sky assimilation of Megha-Tropiques/SAPHIR radiances in ECMWF numerical weather prediction system. *ECMWF Tech. Memo.*, **802**.
- 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.
- 計盛正博, 2015: マイクロ波水蒸気サウンダ SAPHIR 輝度温度データの利用開始. 数値予報課報告・別冊第 61 号, 気象庁予報部, 54–59.
- 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, 58–70.
- 村上康隆, 2017: 全球解析における DMSF-F17, F18/SSMIS 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, 74–77.
- 気象庁, 2021a: マイクロ波輝度温度全天同化とアウトグループの全球解析への導入. 数値予報開発センター年報（令和 2 年）, 気象庁 数値予報開発センター, 23–28.
- 気象庁, 2021b: 全球解析におけるマイクロ波水蒸気サウンダの全天同化センサーの拡充. 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

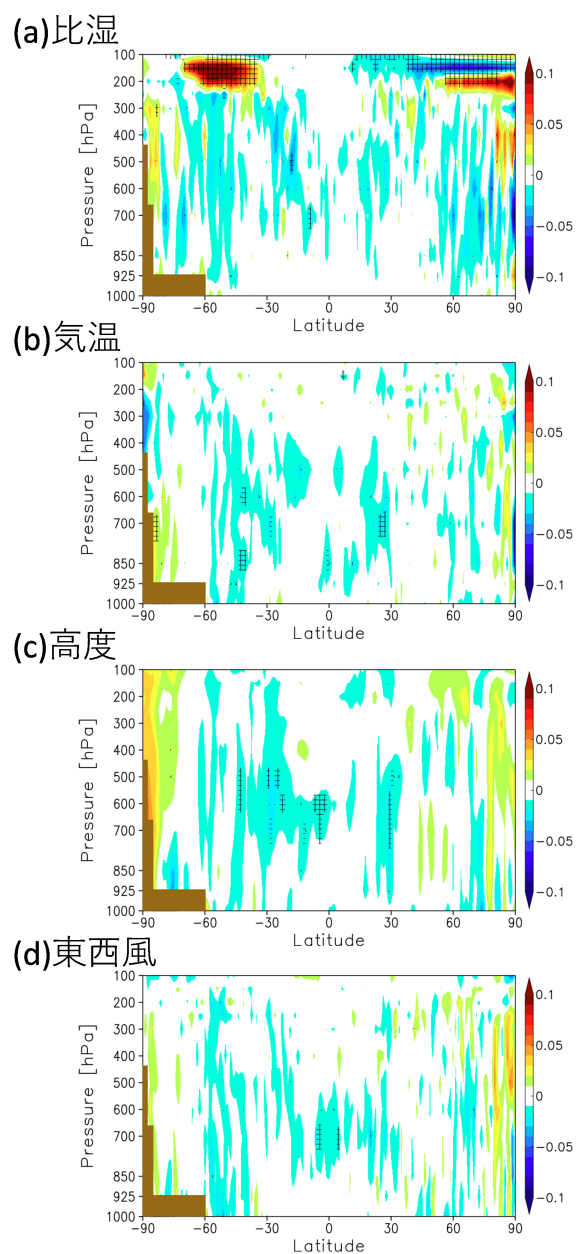


図 3.8.3 ERA5 を参照値とした予報精度検証。上から (a) 比湿、(b) 気温、(c) 高度、(d) 東西風の 1 日後予測の帯状平均の RMSE 改善率 [%] を示す。寒色は予報精度の改善、暖色は改悪を示す。網掛けは信頼区間 95% で有意であることを示す。統計期間は 2019 年 8 月 1 日～8 月 31 日。

ター, 104–105.