

4.2 全球解析システムの改良

4.2.1 はじめに

数値予報開発センターでは、大気モデルの大部分を共有している全球に関する数値予報システム（全球モデル (GSM)、全球解析 (GA)、全球アンサンブル予報システム (GEPS)）の改良を同時に現業化できるよう開発を進めている。

地表面関連の初期値は、大気下層の気象要素や大気の循環場の予測に影響を与える。その初期値改良のために、令和2年度末に現業化したGSM2103（第3.2節）では、積雪深解析を高度化するとともに土壌水分解析を導入した。これらのうち積雪深解析の高度化により、それまでのGSMが抱えていた課題のうち(1)局所的なSYNOG積雪深観測の周囲で広く積雪が解析される問題、(2)第一推定値として作成時期の古く品質の低い気候値を使っており日々のモデル予測値や衛星データによる積雪域情報を解析に利用できない、といった課題に対処した。しかし、積雪深解析の実行頻度は以前と同様に1日1回であり、観測データの反映の遅れや解析値の変化傾向が鈍化するという課題が残され、また、新たに利用を開始した衛星観測データから算出した衛星積雪域には誤判定（見逃し）事例も多いことがわかってきた。令和3年度末の導入を目指してきたGSM22XX（第4.1節）に向けては、これらの課題に対処するための開発を進めてきた。

また、大気解析においては、4次元変分法に対して日々の気象場に応じて変化する第一推定値の不確実性情報を与えるために、局所アンサンブル変換カルマンフィルタ (LETKF, Hunt et al. (2007)) を用いている。気象庁のLETKFでは限られたメンバー数に起因するサンプリング誤差の影響を軽減するために観測空間局所化と呼ばれる手法を用いているが、その設定が複雑化しているためGSM22XXでは今後の維持管理を考慮して設定を整理することとした。

これらの開発状況について紹介する。

4.2.2 変更概要

(1) 積雪深解析

解析の1日4回化

現在の積雪深解析は1日1回行われ、日平均値を解析している。このため、観測データの反映が遅れるという課題に加え、解析値の変化傾向が鈍化するという課題もある（図4.2.1）。積雪深解析の実行頻度を増やすことにより、これらの課題に対処する。

第一推定値作成処理の変更

積雪深解析のための第一推定値は、GSMによる積雪深予測値を、衛星観測データから算出した衛星積雪域を用いて修正することで作成している。現在、衛星積雪域が雪無しの場合（かつ積雪被覆確率気候値が80%以下の場合）、GSMによる積雪深予測値がどんなに

大きくても第一推定値は0 cmとしているが、衛星積雪域の誤判定（見逃し）事例も多い（図4.2.2）。このため、前述の条件に該当する場合に第一推定値を即0 cmとするのではなく、積雪深予測値の大小に応じて次第に第一推定値を0 cmに近づける処理へ変更することで、この課題に対処する。具体的には、積雪深予測値が5 cm以下の場合は0 cmとするが、それ以上の場合は予測値を $e^{-0.1}$ 倍したものを第一推定値とする。これらの閾値は積雪分布の変化を観測と比べながら試行錯誤で設定した。

その他

積雪深解析の結果は、日本域についてアメダス観測値を空間内挿した値で置き換えたのち（以後、日本域修正と呼ぶ）、GSMの初期値として利用される。積雪深解析の1日4回化によってサハリン南部に不自然な雪無し領域が広がる問題が顕在化し（図4.2.3）、その対処として積雪深解析では日本のSYNOGを利用しないこととした。日本域修正は変更しないため、GSMの初期値として利用される日本域の積雪深は変わらない。なお、4回化で問題が顕在化した理由は脚注¹のように考えている。GSM2103における積雪深解析高度化では、2次元最適内挿法における背景誤差の水平相関関数を相関距離が短くなるように変更した。一方、観測データの探索範囲を変更していなかったため、相関距離と整合するよう修正する。また、GSM2103では2次元最適内挿法で使用する観測誤差と背景誤差の比を意図通りに出来ていないことが判明したため、意図していた値へと変更（約0.696を0.75へ）する。

(2) LETKF

LETKFで用いる観測空間局所化においては鉛直方向について、観測種別に依存する形で複数の関数を用いている。GSM2103時点における鉛直方向の局所化関数は、従来型観測に対しては0.6スケールハイトを局所化スケール²とするガウス関数とし、地上気圧と地上GNSS天頂大気遅延量については例外として2倍の局所化スケールを与えている。一方、衛星観測輝度温度データに対しては、荷重関数の2乗と $0.6\sqrt{2}$ スケールハイトのガウス関数のうち、大きい値で構成される関数を用いている。荷重関数とガウス関数の組み合わせはOta et al. (2019)で導入されたもので、輝度温度

¹ 稚内 (SYNOG) の積雪深は少なく、距離に近い沼川 (アメダス) は積雪深が多い傾向にあるため、日本域修正では加重平均により稚内に対応する格子の積雪深は増える。その結果を初期値とするGSMの予測値は稚内で観測より積雪深が多くなり、積雪深解析では積雪深を減らすインクリメントが入る。サハリンの積雪深観測が得られるのは通常00UTCのみであり、1日4回化することで06,12,18UTCでは積雪深を減らすインクリメントが背景誤差相関を通じて一方的かつ高頻度に入ることになる。こうした状況が継続するといずれ00UTCの観測も第一推定値との差が大きくなって品質管理でリジェクトされてしまうようになる。

² 値が $e^{-0.5}$ となる距離。

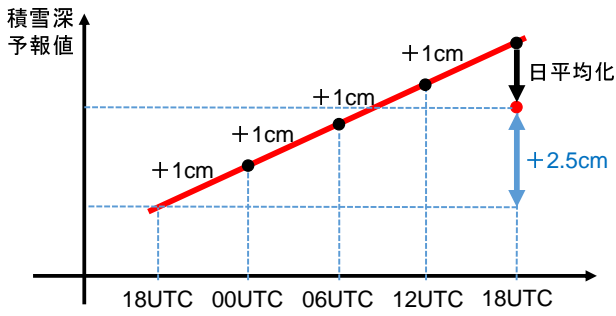


図 4.2.1 日平均を解析することにより積雪深増加時に変化傾向が鈍化することの模式図。観測による修正がない場合、6 時間に 1 cm ずつ積雪深が増えると 1 日で 4 cm 積もるが、日平均の解析では 2.5 cm の増加にとどまる。

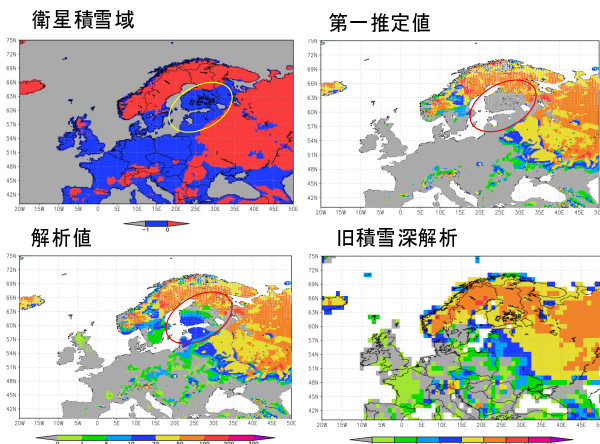


図 4.2.2 衛星積雪域の誤判定（見逃し）が疑われる事例。左上は衛星積雪域で赤が積雪有りと判定された領域。右上は積雪深の第一推定値で、図中に丸で囲った領域は左上で積雪無しと判定され、且つ、積雪被覆率気候値が小さいため 0 cm とされた。左下は GSM2103 による解析値で、特に丸で囲った領域では SYNOP により第一推定値に比べて積雪域が大きく広がっているものの、北東側の 50 cm を超える積雪域との間に積雪無し領域が残るなど不自然な分布となっている。右下は GSM2103 導入前まで運用してきた積雪深解析による結果。

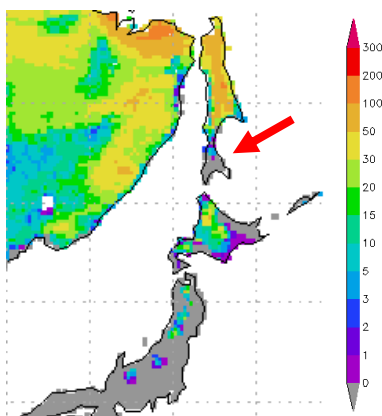


図 4.2.3 積雪深解析の 1 日 4 回化によってサハリン南部に不自然な雪無し領域が広がる例。2019 年 12 月 14 日 12UTC の積雪深解析の結果。赤矢印の部分、サハリン付近に不自然な積雪なし領域が広がる。

データの局所化関数に対して局所化スケールを用いた調整機能を導入すること、荷重関数の形状によらず一定程度の鉛直方向の広がりを与えることが目的である。

輝度温度データは、ある特定高度のみの大気状態の情報ではなく、鉛直方向に広がりをもった大気状態の情報をもつものであるため、従来型観測より大きな局所化スケールを与えているのだが、地上気圧や地上 GNSS 天頂大気遅延量と異なる局所化スケールを与えることに科学的な理由はなく、局所化スケールとして 3 種類を使い分けていることによる維持管理上の混乱も生じるようになってきた。このため、使用する局所化スケールを通常用いる 0.6 スケールハイト、広めにしたい場合の 1.2 スケールハイトの 2 種類に整理することとした。具体的には衛星観測輝度温度データに対して用いるガウス関数のスケールを地上気圧等と同じ 1.2 スケールハイトへ変更する³。

4.2.3 積雪深解析改良の性能評価

(1) オフライン積雪深解析による評価

陸面モデルの開発、特に開発の初期段階においては、大気や降水の観測値や解析値を外部強制にして陸面過程のみを単体実行するオフライン陸面モデルを使用することも多い。このオフライン陸面モデルを用いて積雪深解析（と日本域の修正処理）を行う仕組みを、ここではオフライン積雪深解析と呼ぶことにする。実験を長期間実施して季節変化や挙動を確認したい場合、あるいは多数の試行錯誤を行うことで設定を詰めたいような場合、このような軽量化した実験システムが便利である。ここでは、2018 年 11 月 10 日～2020 年 3 月 31 日、2019 年 11 月 10 日～2021 年 1 月 31 日を対象としたオフライン積雪深解析による解析予報サイクル実験の結果をいくつか紹介する。CNTL は GSM2103 相当の積雪深解析を用いたもの、TEST は CNTL に対して前述の変更を加えたものである。TEST において解析の 1 日 4 回化により最新の積雪深予測値や観測値が反映され、CNTL よりも早く積雪域を表現できるようになった例として、2020 年 2 月 6 日 06UTC の事例を図 4.2.4 に示す。TEST では黒海の北側の積雪域（図中の矢印のあたり）を表現できているが、CNTL では解析が行われる 18UTC まで表現されていなかった。また、解析値の変化傾向の鈍化が改善する等により、チベットなど山岳域で積雪深が大きくなった。図 4.2.5 に例を示す。TEST ではチベット高原やヒンドウクシュ山脈の積雪域が広がり、積雪深も大きくなっている。1 日 4 回解析化による応答速度の改善の他、それにより積雪域が広がることで低温化したことも要因として考えられる。IMS⁴との対応も TEST の方が良い場合が

³ これに付随して、解析に使用する値の下限値（値未満の観測は使わない）を 0.0025 から 0.05 に引き上げる変更も含まれる。

⁴ NOAA/NESDIS による積雪域プロダクト

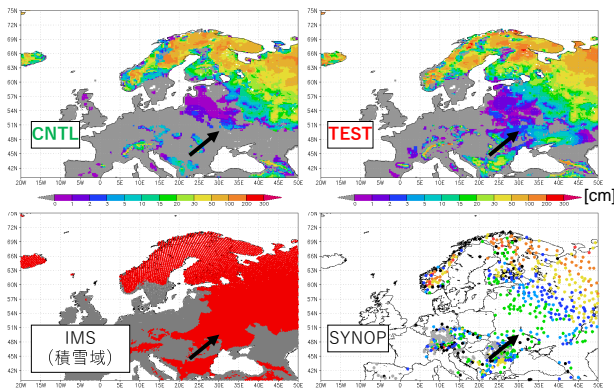


図 4.2.4 2020 年 2 月 6 日 06UTC の積雪深解析値。左上が CNTL、右上が TEST、左下は NOAA/NESDIS による IMS 積雪域プロダクト、右下は SYNOP。

多い。第一推定値作成処理の変更により、第一推定値と観測値の差が大きいという理由でリジェクトされるデータが減少した。図 4.2.6 に例を示す。CNTL では、2019 年 12 月 29 日 18UTC (図中矢印) に第一推定値が即 0 cm に修正された一方、観測値はその後大きな積雪深を維持しており、品質管理によって以降の観測が使用されなくなっている。一方 TEST では第一推定値の変化が穏やかであり、継続して観測が使用されている。また、同じく第一推定値作成処理の変更により、CNTL で表現される不自然な積雪分布が改善する事例が見られた。図 4.2.7 に例を示す。TEST と CNTL とで融雪の季節進行に大きな違いは見られないものの、CNTL では北米大陸の五大湖より東側の領域で不連続な積雪分布が見られる。CNTL では衛星積雪域によって第一推定値が 0 cm に修正され、その後 SYNOP により部分的に積雪域が再形成されていた。積雪域の大きな季節変化については、TEST と CNTL とで大きな違いはない (図略)。

(2) 大気解析を含めた評価

大気解析や予報へのインパクトを評価するため、大気解析を含めた解析予報サイクル実験を実施した。GSM2103 に準じた仕様による実験を CNTL、CNTL に対して第 4.2.2 項 (1) の変更全てを適用した仕様による実験を TEST とする。解析実施期間と評価期間 (括弧) は以下のとおり。

- 冬実験 1 : 2018 年 11 月 10 日 - 2019 年 03 月 11 日 (2018 年 12 月 - 2019 年 2 月)
- 冬実験 2 : 2019 年 11 月 10 日 - 2020 年 03 月 11 日 (2019 年 12 月 - 2020 年 2 月)
- 夏実験 : 2019 年 06 月 10 日 - 2019 年 10 月 11 日 (2019 年 7 月 - 9 月)
- 春実験 : 冬実験 2 を 2020 年 6 月 11 日まで延長 (2020 年 3 月 - 5 月)

積雪深解析は主に冬半球の陸上で機能するものであることから、陸地の多い北半球の冬を対象とした実験を

2 つの年を対象として実施した。また、春実験は通常の開発においてあまり行われることはないが、融雪期の精度を確認する目的で実施した。以下では、冬実験 2 を中心に概観する。上向き短波放射フラックスの対 CERES⁵ 検証 (図 4.2.8) によると、TEST は CNTL に比べて地上ではチベット高原や北米で増加傾向である。積雪域の増加に伴うアルベドの変化に対応しているとみられ、バイアスが軽減するところが多い一方、ヒマラヤ山脈などバイアスが增大するところもある。大気上端についても地上と同じ変化傾向であるが、こちらは概ねバイアスが軽減する傾向である。上向き長波放射フラックスについても概ねバイアスが軽減するところが多い一方、地上ではヒマラヤ山脈などバイアスが增大するところもみられた (図略)。平均解析場 (図 4.2.9) は TEST では CNTL に比べてチベット高原周辺や北米などで海面気圧は高く、地上気温は低く変化しており、積雪深の増加と対応している。解析値の対 SYNOP 検証 (図 4.2.10) においては、TEST では CNTL に比べて気温の低下がみられ、北米中央部では正バイアスが軽減している一方、ロッキー山脈やヒマラヤ山脈周辺では負バイアスが拡大している。地上観測の少ない山岳地帯の一部では、第一推定値作成処理の変更によって、積雪深解析値がやや過大になっている可能性もあると考えられる。第一推定値と観測値の整合性については、北半球のラジオゾンデ気温観測に対して改善改善の明瞭な傾向は見られなかった (図略)。

図 4.2.11 から、TEST では対解析で日本周辺の 500 hPa 高度場と 200 hPa 東西風のバイアスが軽減し、二乗平均平方根誤差 (RMSE) も改善している。チベット高原の積雪域が増えて気温が低下することで対流圏中上層の南北温度傾度が強化され、ジェット弱風バイアスが軽減したものと考えられる。図 4.2.12 から、対解析・対ラジオゾンデ観測の RMSE では主要な要素について全般的に改善傾向であり、特に北半球域・日本周辺域で改善幅が大きい。冬実験 1 でも改善幅は小さいものの同傾向であり、夏実験では中立、春実験では変化幅は小さいものの北半球や日本周辺域で改善傾向であった (図略)。

4.2.4 LETKF 変更の性能評価

(1) LETKF 単独実験による性能評価

第 4.2.2 項 (2) で述べた変更の影響を評価するため、4 次元変分法を行わず LETKF によるアンサンブル平均解析値を解析値とし、その解析値を初期値とする低解像度のモデル (TL319) による決定論予報を行う解析予報サイクル実験による評価をまず最初に行った。このような仕様による実験を簡便のため LETKF 単独実験と呼ぶ。

GSM2103 に準じた仕様による実験を CNTL、それ

⁵ 全球放射収支計によるプロダクト (<https://ceres.larc.nasa.gov/>)。

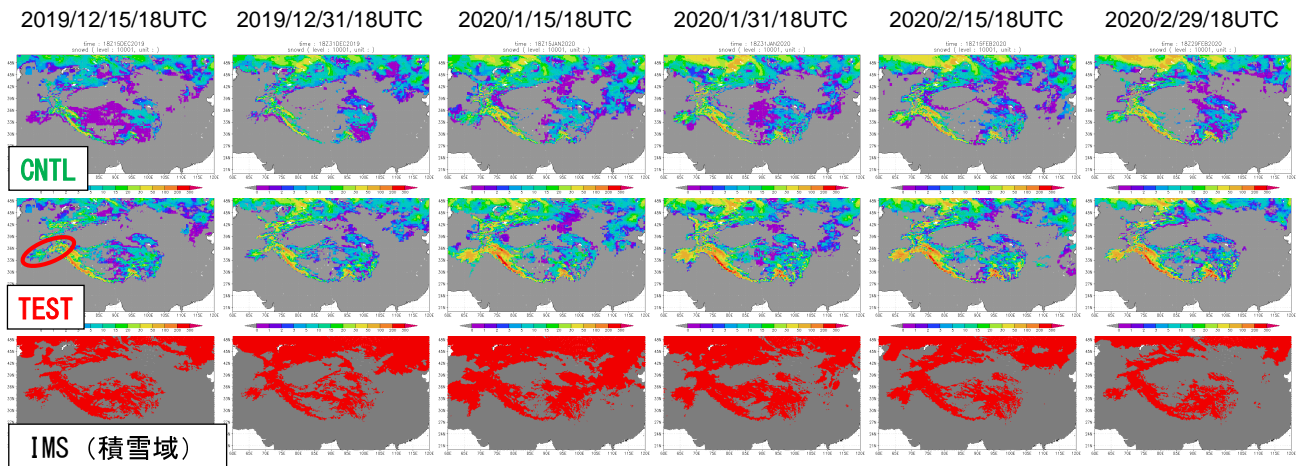


図 4.2.5 チベット高原の積雪深解析値の変化。上から順に CNTL,TEST,IMS (積雪域)。TEST の左端の図中に赤丸でヒンドークシュ山脈のおよその位置を示す。

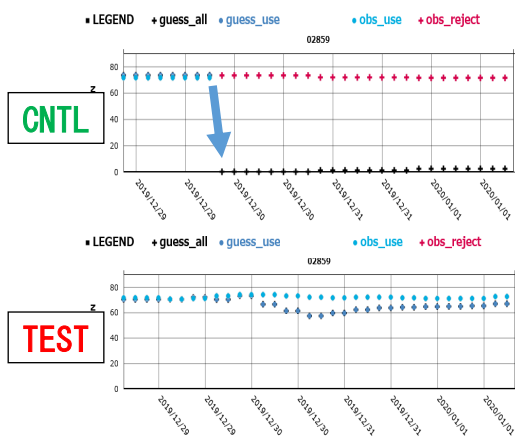


図 4.2.6 観測データの利用状況が改善した例。Paljakka (フィンランドの観測点) における積雪深の第一推定値と観測値、品質管理の結果を示したものの。凡例の obs_use は使用された観測値、obs_reject は品質管理によって使用されなかった観測値を示し、guess_all と guess_use は共に第一推定値を示す (観測が使用された場合は両方、観測が使用されなかった場合は前者のみをプロットしている)。

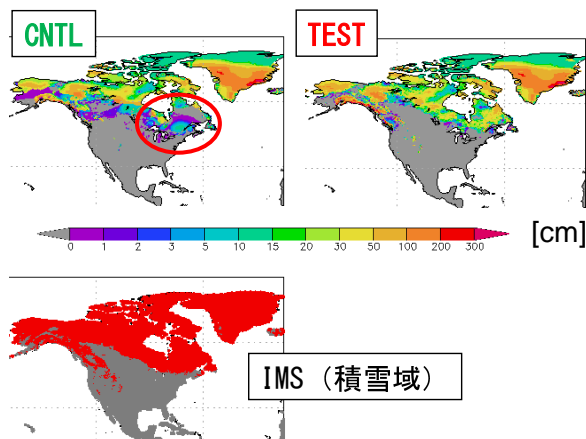


図 4.2.7 2020 年 5 月 1 日 18UTC の積雪深解析値 (融雪期)。左上は CNTL、右上が TEST、左下は IMS (積雪域)。CNTL の図に赤丸で不自然な積雪分布が見られる領域を示す。

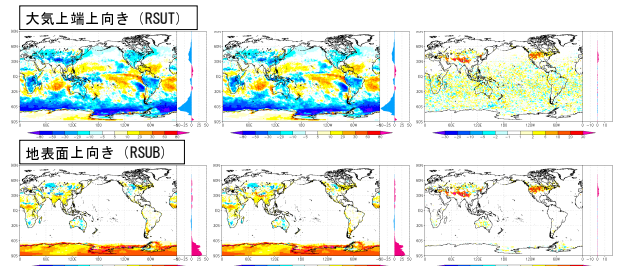


図 4.2.8 短波放射フラックスの対 CERES 平均誤差 (冬実験 2, FT=6)。上段は大気上端上向き放射フラックス、下段は地表面上向き放射フラックス。左から順に、CNTL,TEST,TEST-CNTL。

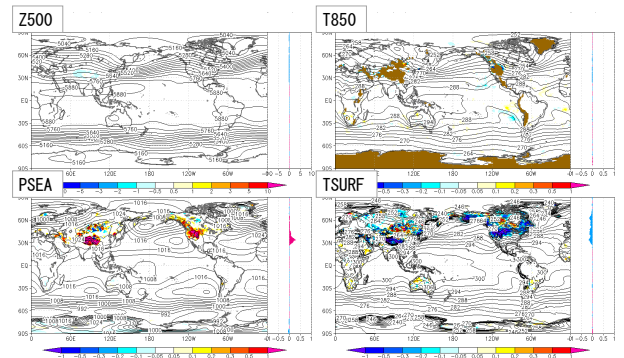


図 4.2.9 平均解析場の変化 (冬実験 2, TEST-CNTL)。左上は 500 hPa 高度、右上は 850 hPa 気温、左下は海面気圧、右下は地上気温。

に第 4.2.2 項 (2) で述べた変更を加えた実験を TEST とする。解析実施期間と評価期間 (括弧) は以下のとおり。

- 夏期間: 2018 年 7 月 10 日 - 2018 年 9 月 11 日 (2018 年 8 月)
- 冬期間: 2018 年 12 月 10 日 - 2019 年 2 月 11 日 (2019 年 1 月)

図 4.2.13 にマイクロ波サウンダの O-B の標準偏差

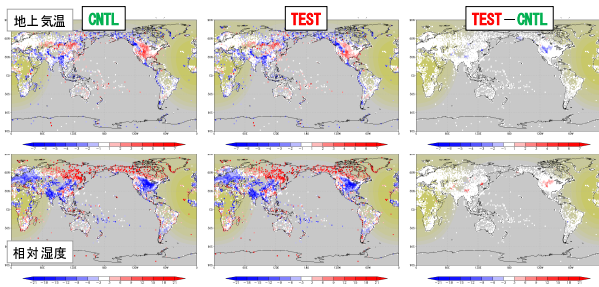


図 4.2.10 解析値の対 SYNOP 平均誤差 (12UTC)。上段は気温、下段は相対湿度。左から順に CNTL, TEST, TEST-CNTL。

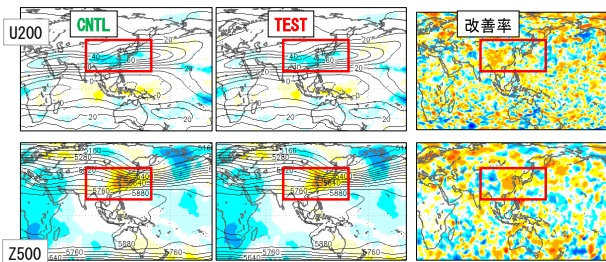


図 4.2.11 対解析のバイアスと RMSE 改善率 $((\text{TEST}-\text{CNTL})/\text{CNTL})(\text{FT}=72)$ 。上は 200 hPa 東西風、下は 500 hPa 高度。左から CNTL のバイアス, TEST のバイアス, RMSE 改善率。

変化率、QC を通過して同化に使用された観測数の変化率を示す。AMSU-A の上層に感度のあるチャンネルを中心に O-B の標準偏差は減少しており、同化に使用されるチャンネル数も増えている。ATMS の気温に感度のあるチャンネルも同様であったが、その他の衛星輝度温度観測に対しては概ね中立であった (図略)。図 4.2.14 に夏期間のラジオゾンデ気温観測についての結果を同様に示す。O-B の標準偏差は対流圏では中立から改善傾向であるものの、成層圏では熱帯を中心に改悪傾向であった。冬期間についても熱帯の成層圏では改悪傾向であった (図略)。図 4.2.15 に夏期間について、対解析の RMSE の改善率を示す。対流圏では中高緯度を中心に中立から改善傾向であるものの、成層圏では高度を除いて改悪が目立つ。こうした傾向は対 ERA5 についても同様に見られた。冬期間についても同様の傾向であった (図略)。一方、台風進路予測誤差については改善傾向であった (図 4.2.16)。共分散膨張係数は全般的に増加傾向であり、スプレッドは対流圏の熱帯や下部成層圏で増加傾向であった (図略)。

この実験結果において懸念すべきは成層圏の改悪ということになるが、AMSU-A において上層に感度のあるチャンネルほど O-B の標準偏差の変化率が減少していること、ラジオゾンデ気温観測では成層圏 (特に熱帯) において逆に O-B の標準偏差の変化率が増加傾向であることから、AMSU-A の上層に感度のあるチャンネルに対しては観測に解析を寄せすぎている可能性がある。別調査において最適な鉛直局所化スケールは

対流圏よりも成層圏の方が小さいという統計結果も得ており (未公表)、鉛直局所化スケールを鉛直方向に変化させることも今後は必要になるかもしれない。ただし、観測種別ごとに関数形を最適化するのは維持管理の複雑化をもたらすため、それを必要としない局所化手法⁶への移行を考えるのが先と考えている。

(2) ハイブリッド実験による性能評価

現在のグローバル解析における LETKF の役割は、4次元変分法に対して第一推定値の不確実性情報を与えることであるが、そこでは主に対流圏の情報を使用している。LETKF の成層圏における精度悪化はグローバル解析にはあまり悪影響をもたらさない可能性があるため、4次元変分法も行うハイブリッド同化実験による性能評価も実施した。GSM2103 に準じた仕様による実験を CNTL、第 4.2.2 項 (2) で述べた変更を加えた実験を TEST とする。解析実施期間と評価期間 (括弧) は以下のとおり。

- 夏期間：2019 年 7 月 10 日 - 2019 年 9 月 11 日 (2019 年 8 月)
- 冬期間：2019 年 12 月 10 日 - 2020 年 2 月 11 日 (2020 年 1 月)

図 4.2.17 にマイクロ波サウンダの O-B の標準偏差変化率、QC を通過して同化に使用された観測数の変化率を示す。全体的に中立であり、LETKF 単独実験で見られたような気温に感度のあるチャンネルにおける O-B の標準偏差の減少は見られなかった。図 4.2.18 に夏期間のラジオゾンデ気温観測についての結果を同様に示す。こちらも全体的に中立であり、LETKF 単独実験で見られたような成層圏 (特に熱帯) における O-B の標準偏差の増加は見られなかった。冬期間についても同様であった (図略)。図 4.2.19 に夏期間について、対解析の RMSE の改善率を示す。LETKF 単独実験で見られたような成層圏での改悪傾向は見られないが、対流圏の南半球で若干の改悪傾向が見られる。冬期間についても同傾向であった (図略)。台風進路予測誤差については中立であり、LETKF 単独実験で見られたような改善傾向は見られなかった (図 4.2.20)。共分散膨張係数は LETKF 単独実験と同様に全般的に増加傾向であるが、スプレッドについては夏期間の対流圏で熱帯より南氷洋で増加が目立つなど LETKF 単独実験とは異なる特徴も見られた (図略)。

4.2.5 まとめ

GSM2103 で改良した全球積雪深解析に対して解析の 1 日 4 回化等の改良を検討し、オフライン積雪深解析や解析予報サイクル実験による評価を行った。積雪域の表現が改善することや、冬・春実験を中心に北半球域・日本周辺域の予測精度の改善傾向が見られることを確認した。今後、GSM22XX に向けた他の改良予定項目と組み合わせた評価を行うなど、現業化に向け

⁶ 背景誤差共分散行列を直接局所化する手法など。

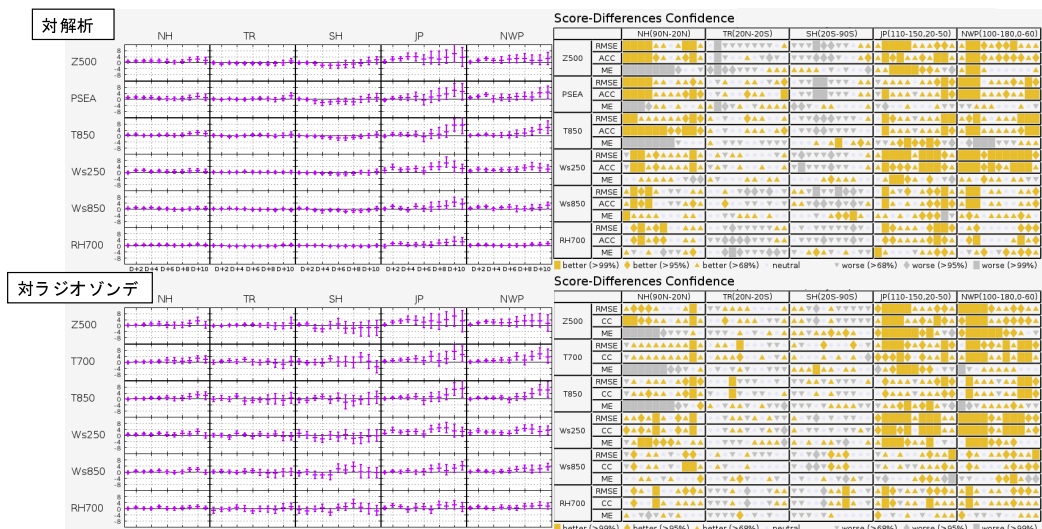


図 4.2.12 冬実験 2 の対流圏主要要素の RMSE の改善率 [%] (左図) と TEST と CNTL のスコア差の有意性判定 (右図: スコアカード)。上段が対解析値、下段が対ラジオゾンデの結果。検証領域は左から北半球 (20°N - 90°N)、熱帯 (20°S - 20°N)、南半球 (20°S - 90°S)、日本周辺 (110°E - 150°E, 20°N - 50°N)、北西太平洋領域 (100°E - 180°E, 0°N - 60°N)。要素は上から 500 hPa 高度、海面更正気圧 (対ラジオゾンデは 700 hPa 気温)、850 hPa 気温、250 hPa 風速、850 hPa 風速、700 hPa 相対湿度。スコアカードはそれぞれ上から RMSE、アノマリー相関係数 (ACC) (対ラジオゾンデは相関 (CC))、バイアスで、黄色、灰色がそれぞれ統計的に有意に改善、悪化していることを示す (塗りつぶし面積が広いほど統計的有意性が大きい)。

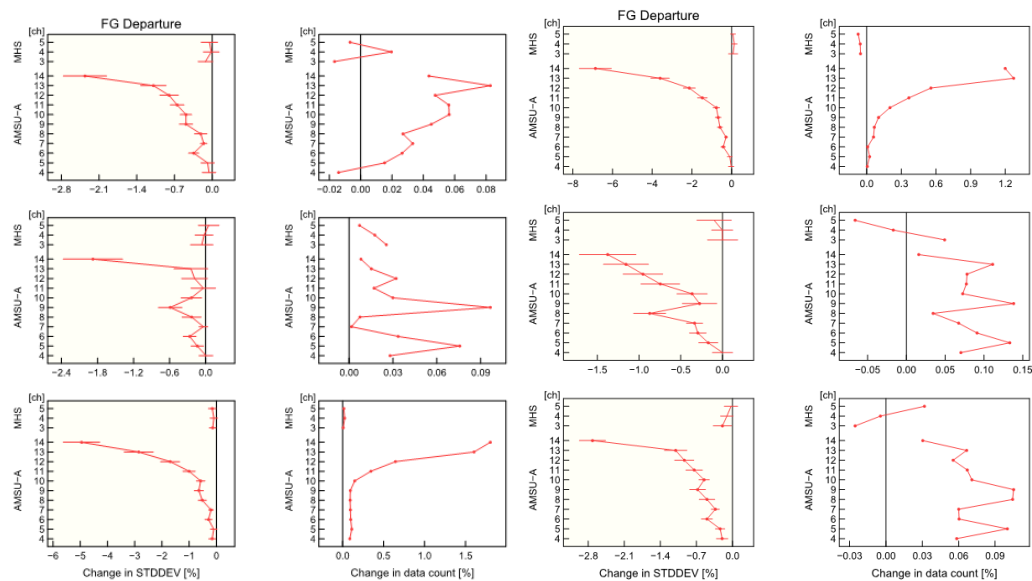


図 4.2.13 AMSU-A 及び MHS の O-B の標準偏差の変化率と観測使用数の変化率。左が夏期間、右が冬期間のもので、それぞれ左側に O-B の標準偏差の変化率、右側に観測使用数の変化率 (%)。上から北半球、熱帯、南半球。

た作業を進めていく。

また、4 次元変分法に対して日々の気象場に応じて変化する第一推定値の不確実性情報を与えるための LETKF について、今後の維持管理を考慮して観測空間局所化で用いるガウス関数に与える局所化スケールを設定を 3 つから 2 つに整理することとした。影響を評価するため、LETKF 単独実験及び通常のハイブリッド同化による解析予報サイクル実験を実施した。LETKF 単独実験では対流圏の中高緯度の改善傾向、台風進路

予測の改善傾向が確認された一方、成層圏における改悪が確認された。原因の一つとして、成層圏において AMSU-A の観測値に解析を寄せすぎている可能性が考えられるものの、設定を複雑化せずに調整・最適化するためには、局所化手法の変更を含めた開発が必要である。ハイブリッド同化実験においては成層圏における改悪は見られなかったが、現在のハイブリッド同化の設定では LETKF による成層圏の情報をあまり使用していないことが理由の一つと考えられる。一方で、

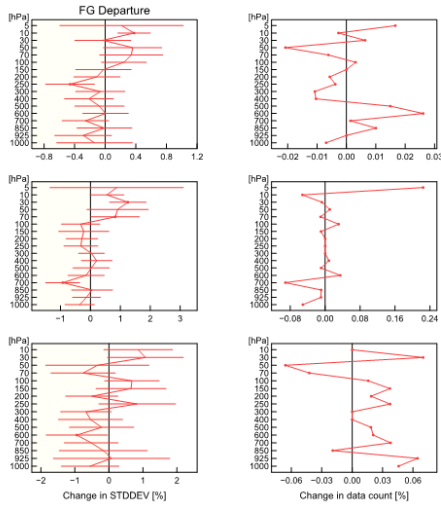


図 4.2.14 図 4.2.13 と同じ。ただし、夏期間のラジオゾンデ気温観測についてのもの。

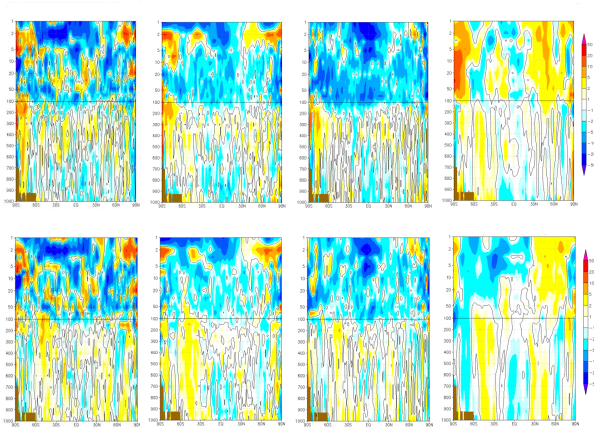


図 4.2.15 夏期間の対解析の RMSE 改善率（東西平均）。左から順に比湿、気温、東西風、高度。上段は FT=24[h]、下段は FT=72[h]。

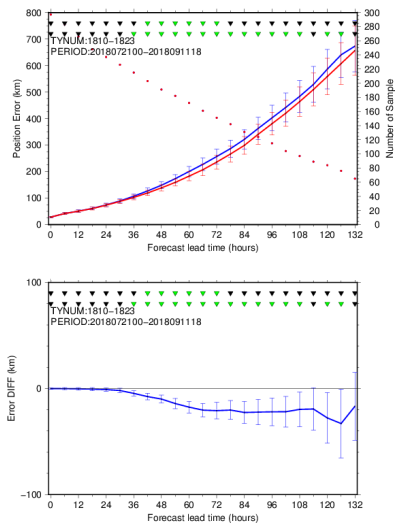


図 4.2.16 夏期間における台風進路予測誤差（上、青が CNTL、赤が TEST）、とその差（下、TEST-CNTL）。JMA ベストトラックを真としたもの。

対流圏の中高緯度の改善傾向や台風進路予測の改善傾向も見られなくなり、また、対流圏の南半球では若干の改悪傾向が見られた。これらの変化と変更内容の関係があまり明確ではないこと、北半球では改悪傾向ではないこと、今後の開発・維持管理の上で設定の複雑さを軽減することは重要であることなどから、こちらについても今後、GSM22XX に向けた他の改良予定項目と組み合わせた評価、他の期間での実験を行うなど、現業化に向けた作業を進めていく。

なお、GSM22XX の現業への導入時期については年度当初の計画を変更して令和 4 年度後半へと延期することとなった。

参考文献

Hunt, B. R., E. J. Kostelich, and I. Szunyogh, 2007: Efficient data assimilation for spatiotemporal chaos: a local ensemble transform Kalman filter. *Physica. D.*, **230**, 112–126.

Ota, Y., M. Ikegami, and H. Yamaguchi, 2019: Upgrade of initial perturbations made using the Local Ensemble Transform Kalman Filter in JMA 's Global EPS. *CAS/JSC WGNE Res. Activ. Atmos. Oceanic Modell.*, **49**, 6.11–6.12.

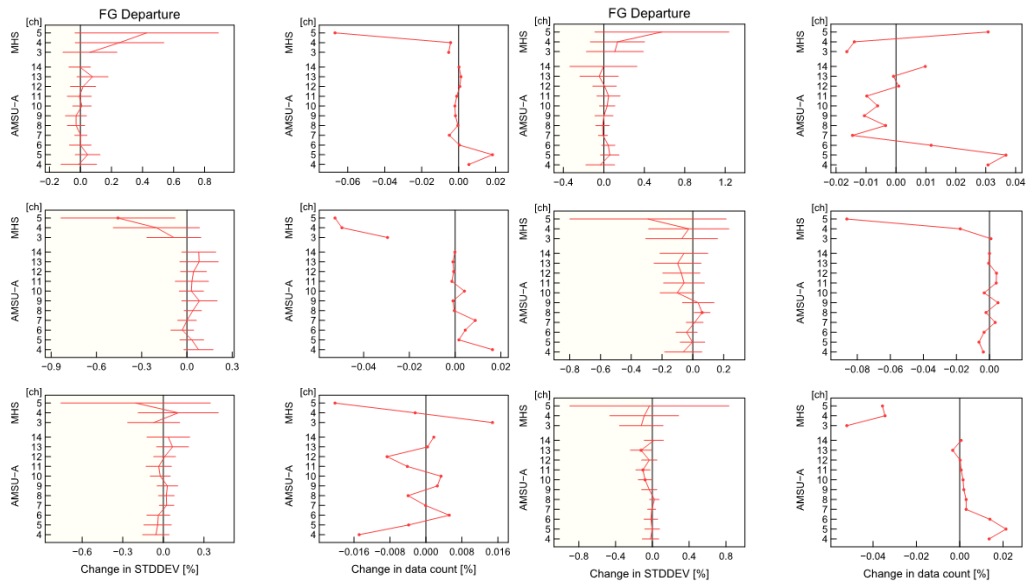


図 4.2.17 図 4.2.13 と同じ。ただし、ハイブリッド実験についてのもの。

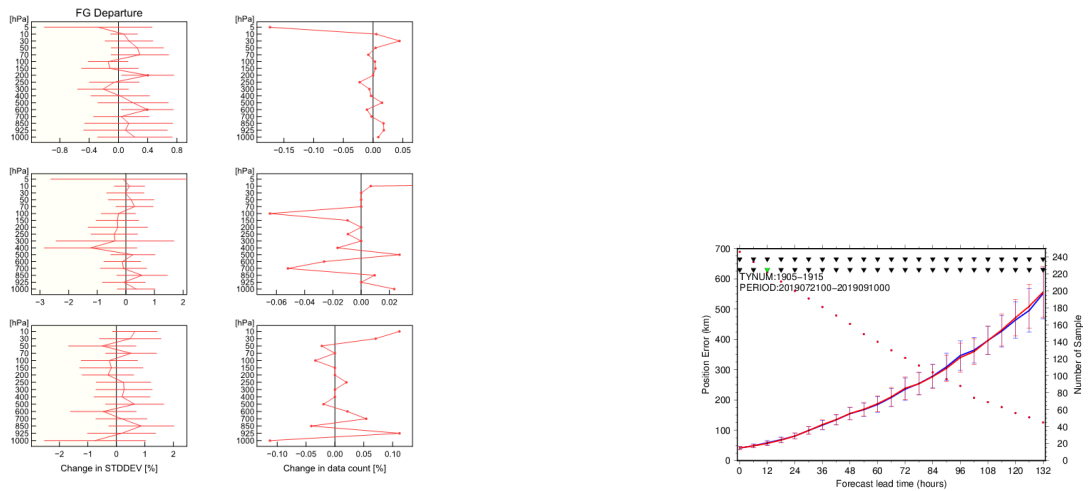


図 4.2.18 図 4.2.14 と同じ。ただし、ハイブリッド実験についてのもの。

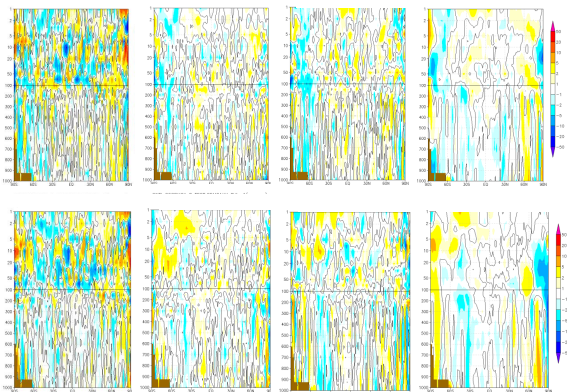


図 4.2.19 図 4.2.15 と同じ。ただし、ハイブリッド実験についてのもの。

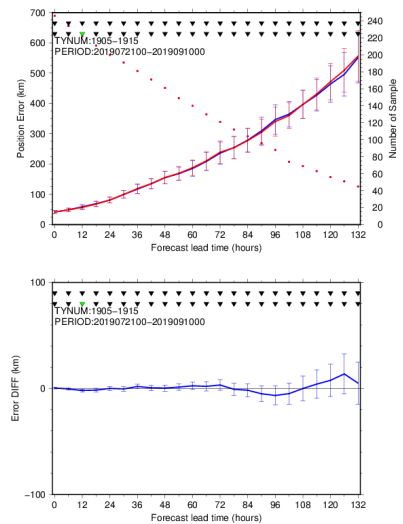


図 4.2.20 図 4.2.16 と同じ。ただし、ハイブリッド実験についてのもの。

4.3 全球アンサンブル予報システムの改良

4.3.1 はじめに

数値予報開発センターでは、大気モデルの大部分を共有している全球に関する数値予報システム（全球モデル (GSM)、全球解析 (GA)、全球アンサンブル予報システム (GEPS)) の改良を同時に現業化できるよう開発を進めている。GSM の水平高解像度化などの GSM・GA の改良（第 4.1 節、以下では両者まとめて GSM22XX と呼ぶ）とタイミングを合わせ、GEPS における現象表現能力の向上等による全般的な精度向上を目的とし、予報モデル更新、水平高解像度化、2 段階 SST（海面水温）法（高倉・小森 2020）の改良などを令和 3 年度末に導入する計画で開発を進めてきた¹。

今回、次項で述べる GEPS の各改良予定項目について性能を評価するための実験を行い、アンサンブル平均予測の精度向上や確率予測情報の精度向上など想定した効果が得られていることを確認した。本稿では、改良予定項目の概要と実験結果について述べる。

4.3.2 改良予定項目の概要

GSM22XX では、水平解像度を約 20 km から約 13 km へと高解像度化するとともに、モデルの物理過程等の改良も計画している。このため、GEPS についても使用する予報モデルの水平解像度を、18 日先までの予測については約 40 km から約 27 km に、34 日先までの予測については約 55 km から約 40 km にそれぞれ高解像度化するとともに、GEPS で使用する予報モデルを GSM22XX で導入予定のものに更新する。水平高解像度化による GEPS の現象表現能力の向上とモデル更新により予測精度向上が期待され、また、GSM と GEPS で使用するモデルが整合することにより、引き続き GSM による予測に関する確率予測情報を適切に作成できることが期待される。ただし本稿で示す実験結果には、水平高解像度化及びそれに関連する力学過程の変更を除き、予報モデル更新に伴う影響評価は含まれない。以降の用語の使い方として、水平高解像度化には関連する力学過程の変更も含むものとし、予報モデル更新には力学過程の変更は含まないものとする。

また、スプレッドとスキルの関係を適切に保つため、SV（特異ベクトル）による初期摂動の振幅調整を行う。具体的には、北半球と南半球の SV による摂動の振幅について、これまで 500 hPa 付近の気温の平均的な大きさが 0.23 K となるように設定していたものを、0.21 K へと変更する。これらの値は、アンサンブル平均予報の二乗平均平方根誤差 (RMSE) とスプレッドが同程度の値となるよう実験で試行錯誤して調整するもので、今回の変更でアンサンブル平均予報の誤差が減少傾向

となったことを反映し、より小さな値へと調整した。

さらに、GEPS の下部境界条件としての SST をより高精度のものとするを目的とし、2 段階 SST 法で外力として使用する季節アンサンブル予報システム (CPS) の SST 予測値について、CPS2（第 2.9 節）の予測結果から、令和 4 年 2 月の発表情報から運用される CPS3（第 4.11 節）の予測結果に変更する。この変更により予測 SST の精度が向上することから、偏差固定 SST から SST 予測値への緩和期間を 11–18 日から 6–11 日へと変更する。

4.3.3 性能評価試験

(1) 水平高解像度化

GEPS2103（第 3.3.1 項）の現業化の判断のために実施した実験を CNTL とする。CNTL に対し、GEPS で使用する予報モデルを水平高解像度化した実験を TEST とする。TEST に入力する初期値については、CNTL 用の初期値を作成する GA（観測データの入電打ち切り時間の短い速報解析ではなく、なるべく多くの観測データを同化したサイクル解析を使用）に対し、使用する GSM を GSM22XX と同じ解像度へ水平高解像度化したもので作成した。実験期間は 2019/7/21–2019/9/11 初期値（以降、2019 夏と呼ぶ）と、2019/12/21–2020/2/11 初期値（以降、2019/20 冬と呼ぶ）とし、12UTC 初期値のみ、アンサンブルメンバー数を 13 とした結果同士で比較した。11 日先までの予測を対象とした。

図 4.3.1 に海陸分布の比較を示す。CNTL では識別できていない琵琶湖や一部の島が TEST では識別可能となった。海陸表現だけでなく地形表現も細かくなり、山岳の表現は急峻となる（図略）。

北半球 500 hPa 高度場と 850 hPa 気温場のアンサンブル平均予測について、対解析の RMSE は改善傾向であった（図 4.3.2）。対解析雨量の検証では、1mm/24h 及び 5mm/24h の閾値でブライアスキルスコアは概ね中立～改善であった（図 4.3.3）。なお、冬の 5mm/24h の予報後半は若干改悪に見えるが、統計的に有意な差ではない。

図 4.3.4 に予報時間ごとの台風進路予測誤差と台風接近確率（ここでは FT=0–120 h の間に 120km 以内に台風中心が位置する確率）の予測の検証結果を示す。検証は気象庁ベストトラックに対して行っている。コントロールラン（摂動を加えないアンサンブルメンバー）とアンサンブル平均の台風進路予測誤差は中立から改善傾向であった。台風接近確率の信頼度曲線に大きな変化はなく、ブライアスキルスコアは改善傾向であった。台風中心気圧の予測は CNTL より改善される傾向であるが、実況と比べてかなり浅い点は変わらない（図 4.3.5）。この改善には、GEPS で使用する予報モデルの水平高解像度化と、GSM の水平高解像度化により GA で台風が深く表現されることの両方が効いている。

また、年々変動の寄与を含めて評価するため、再予報

¹ 第 4.3.4 項に記したとおり、GSM への導入は令和 4 年度後半へと延期され、GEPS への導入はモデルの更新を含め計画どおり

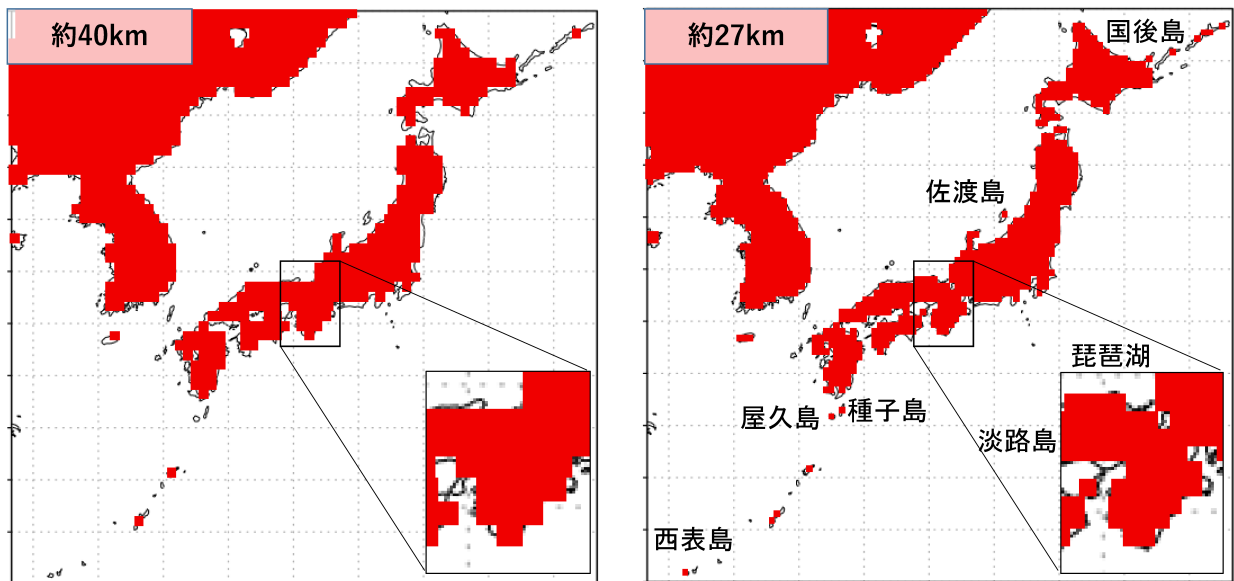


図 4.3.1 水平高解像度化前（左）後（右）の海陸分布の表現。赤は陸の格子、白は海・湖の格子。

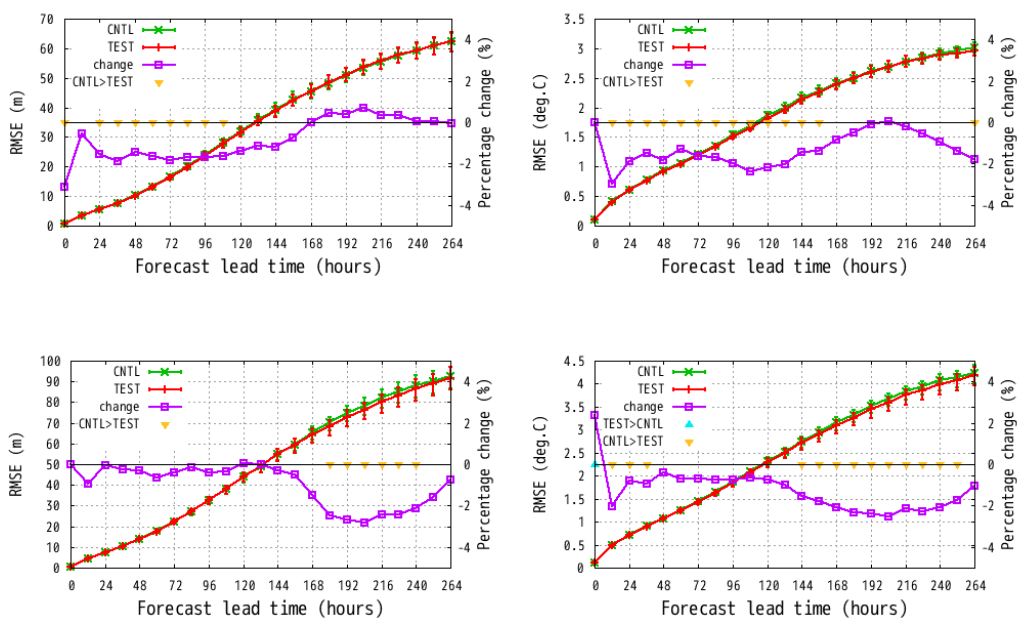


図 4.3.2 アンサンブル平均の対解析 RMSE。領域は北半球 (20°N - 90°N)。上段は 2019 夏、下段は 2019/20 冬。左列は 500 hPa 高度場 [m]、右列は 850 hPa 気温場 [K]。CNTL は緑線、TEST は赤線で、紫線は変化率 $((\text{TEST}-\text{CNTL})/\text{CNTL}[\%])$ 、右縦軸。5% の有意水準で差が有意である場合に $\nabla(\text{CNTL}>\text{TEST})$ ないし $\triangle(\text{TEST}>\text{CNTL})$ をプロットしている。

型の実験も実施した。GEPS2103 の現実化の判断のために実施した実験を CNTL、CNTL に対して GEPS で使用する予報モデルを水平高解像度化したものを TEST とする。再予報型実験については越智・関口 (2019) に詳しいが、ここでは実験期間は 1990-2010 年とし、月末 12UTC 初期日のみを対象とする 13 メンバーによる結果同士で比較した。

TEST は CNTL に対し、北半球域では中立の要素が多いものの、850 hPa 気温場や 850 hPa 流線関数では概ね改善傾向であり (図 4.3.6)、熱帯域では多くの要

素で改善傾向であった (図 4.3.7)。また、平均誤差の空間分布は TEST と CNTL で概ね同様の傾向であり、変化幅も小さかった (図略)。

(2) SV による初期摂動の振幅調整

GEPS で使用する予報モデルに対して予報モデル更新及び水平高解像度化したものを CNTL とする。CNTL へ入力する初期値は、GSM22XX の改良予定項目を全て組み合わせた解析予報サイクル実験で作成したもの (サイクル解析) を用いた。CNTL に対して SV による

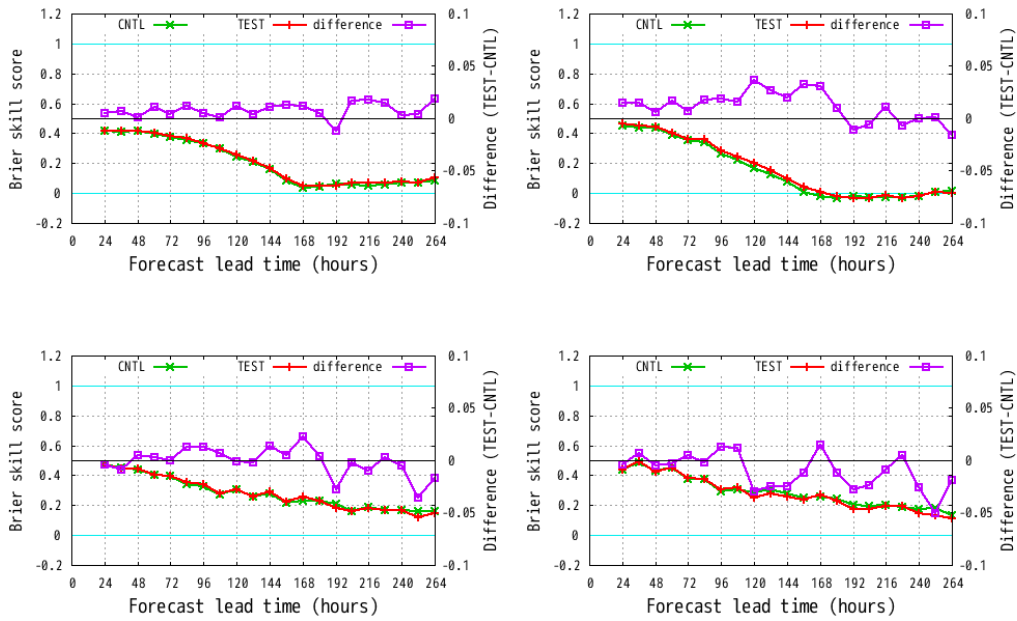


図 4.3.3 対解析雨量による降水の確率的予測のブライアスキルスコア。上段は 2019 夏、下段は 2019/20 冬。左列は閾値 1mm/24h、右列は閾値 5mm/24h の降水事例に対するもの。CNTL は緑線、TEST は赤線。紫線は差 (TEST-CNTL、右縦軸)。

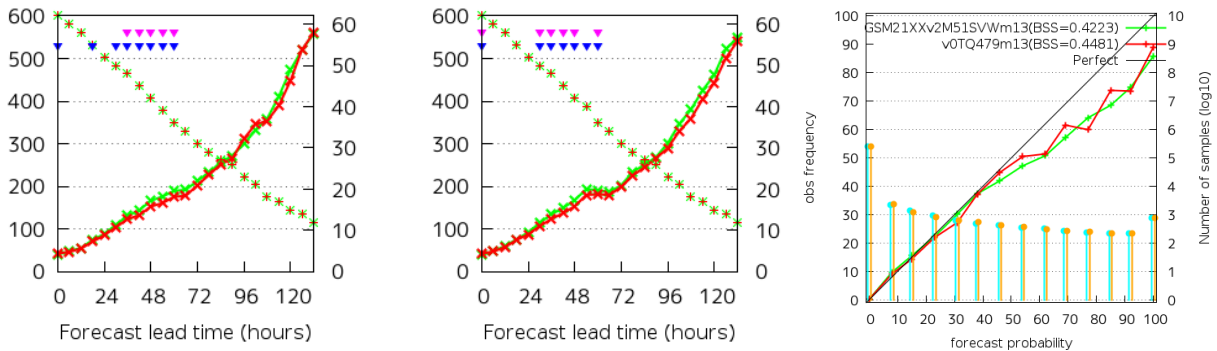


図 4.3.4 コントロールラン (左) 及びアンサンブル平均 (中) の台風進路予測平均誤差と、台風接近確率の信頼度曲線とブライアスキルスコア (右)。CNTL は緑、TEST は赤。左図と中図は × と実線が平均誤差 [km] (左縦軸) で + がサンプル数 (右縦軸) を示しており、ピンクの三角と青の三角はそれぞれサンプル間の相関を考慮する場合としない場合に 5% の有意水準で差が有意であることを示す。右図は実線が信頼度曲線 (左縦軸)、水色とオレンジの棒グラフで CNTL と TEST の予報頻度 (右縦軸) を示す。また、ブライアスキルスコアを凡例中の「BSS=」以降に示す。

初期摂動の振幅調整を行ったものを TEST とする。実験期間は 2019/6/20-2019/10/11 初期値 (以降、2019 夏と呼ぶ) と、2019/11/20-2020/03/11 初期値 (以降、2019/20 冬と呼ぶ) とし、12UTC 初期値のみ、アンサンブルメンバー数を 13 とした結果同士で比較した。11 日先までの予測を対象とした。

TEST は CNTL に対し、中高緯度の 500 hPa 高度場に代表される予報初期 (目安として FT=48-72h 周辺) においてスプレッドが過剰な要素について、過剰傾向が緩和されるとともに予測精度に若干の改善が見られた (図 4.3.8)。本改良については再予報で注目する予報時間への影響は小さいと考えられるため、再予報

型の実験は実施していない。

(3) 2 段階 SST 法の改良

まず、全球日別海面水温解析 (MGDSST, 栗原ほか (2006)) 遅延解析の偏差固定 SST (ルーチン仕様と異なり、CPS に対して有利な設定) と、CPS2 及び CPS3 による SST 予測値を検証した。CPS の実行スケジュールによる遅れは無いと仮定した。すなわち、毎日運用の CPS3 に対して、5 日毎運用のため本来なら遅れが生じる CPS2 に有利な設定で検証したところ (真値は MGDSST 遅延解析)、以下のような特徴がみられた (図 4.3.9)。

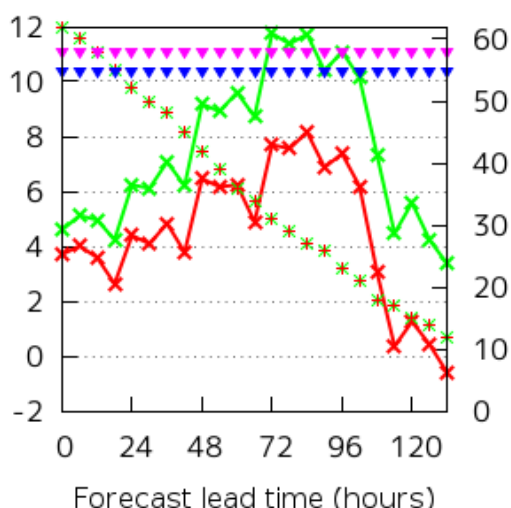


図 4.3.5 2019 夏におけるコントロールランの台風中心気圧の平均予報誤差。CNTL は緑、TEST は赤。× と実線が平均誤差 [hPa] (左縦軸) で + がサンプル数 (右縦軸) を示しており、ピンクの三角と青の三角はそれぞれサンプル間の相関を考慮する場合としない場合に 5% の有意水準で差が有意であることを示す。

- CPS3 による SST 予測値は CPS2 による予測値よりも精度が良い。
- 熱帯・亜熱帯 (30°S-30°N) では、予測時間が経過すると初期偏差固定 SST の精度を上回るようになり、その境目の予測時間が CPS3 では CPS2 よりも短くなる。
- CPS による SST 予測値の活動度は初期偏差固定 SST よりも小さいが、CPS3 は CPS2 よりも活動度が大きい。

次に、ルーチン仕様と同様に MGDSST 速報解析を用いた初期偏差固定 SST を CPS3 の SST 予測値と比較検証したところ、以下のような特徴が見られた (図 4.3.10)。

- 熱帯・亜熱帯では、予測 2 日目から CPS3 の SST 予測値の方が初期偏差固定 SST よりも精度が良い。
- CPS3 の SST 予測値の精度が初期偏差固定 SST の精度を上回る傾向は、熱帯・亜熱帯でも中・高緯度 (30°N-60°N、30°S-60°S) でも、夏よりも冬の方が顕著である。
- 予測 6 日目のアノマリー相関係数の差の空間分布から、海洋の変動が大きい黒潮、メキシコ湾流、南極周極流に対して、特に海洋の渦のスケールが小さくなる冬半球で CPS3 の SST 予測値の精度が初期偏差固定 SST よりも悪化していることが確認できた。これは、CPS3 では小さいスケールの変動の表現が不十分であることを示唆しており、予め想定された結果であった。

以上の結果、ルーチン仕様では熱帯・亜熱帯においては予測 2 日目から CPS3 の SST 予測値の精度が初期偏差固定 SST よりも良いものの、台風 5 日予報への影

響調査が十分でないことを考慮して、偏差固定 SST から SST 予測値への緩和期間を 11-18 日から 6-11 日に前倒しすることにした (図 4.3.11)。

次に 11 日先までの予測を対象とした実験を実施した。GEPS2103 業務化試験を CNTL とし、CNTL に対して CPS3 による SST 予測値の利用と緩和期間の 6-11 日への前倒しを適用したものを TEST とする。実験期間は 2019/6/20~2019/10/21 初期値 (以降、2019 夏と呼ぶ) と、2019/11/20-2020/03/11 初期値 (以降、2019/20 冬と呼ぶ) とし、12UTC 初期値のみ、アンサンブルメンバー数を 13 とした結果同士で比較した。

TEST は CNTL に対し、熱帯における 6 日以降の予測でアノマリー相関係数の改善が見られた (図 4.3.12)。特に海面気圧や 1000hPa 気温場で改善が大きい。2 段階 SST 法の適用領域外である中・高緯度ではほぼ変化は見られなかった (図略)。海面気圧などの一部の要素では 6 日以降の予測で活動度の低下がみられたが (図略)、初期偏差固定 SST に比べ CPS3 による SST 予測値の活動度が小さいことから、緩和期間の前倒しに対する自然な応答と見られる。活動度が低下した要素についても、ブライアスキルスコアは中立であった (図略)。

次に再予報型の実験を実施した。GEPS で使用する予報モデルに対して予報モデル更新及び水平高解像度化したものを CNTL、それに対して CPS3 による SST 予測値の利用と緩和期間の 6-11 日への前倒しを適用したものを TEST とする。なお、実験期間は 1991-2020 年の 12-2 月及び 6-8 月とし、月末 12UTC 初期日のみを対象とする 13 メンバーによる結果同士で比較した。

TEST は CNTL に対して、予測後半を中心に中立~改善傾向であった (図 4.3.13)。平面図で確認すると西部太平洋~インド洋で改善は明瞭であった (図略)。活動度については、予測 1.5 週目 (6~12 日目) では熱帯の平均で減少傾向、予測 3-4 週目では増加傾向であり、先に述べた各 SST の活動度の違いによる自然な応答と見られる (図略)。また、MJO (マッデン・ジュリアン振動) 指数の予測精度 (計算手法は久保 (2017) に基づく) は改善傾向であった (図 4.3.14)。

4.3.4 まとめと今後の予定

令和 3 年度末に計画されている GEPS の改良予定項目について性能を評価するための実験を行い、アンサンブル平均の精度向上や確率予測情報の精度向上など想定した効果が得られていることを確認した。今後は全ての改良予定項目を組み合わせて現業に相当する構成での評価を行い、現業へ導入すべきかを判断することとなる。なお、GSM22XX の現業への導入時期については年度当初の計画を変更して令和 4 年度後半へと延期することとなったが、GEPS については計画どおり (使用する予報モデルの GSM22XX への更新を含め)、令和 3 年度末に導入する方向で準備を進めている。

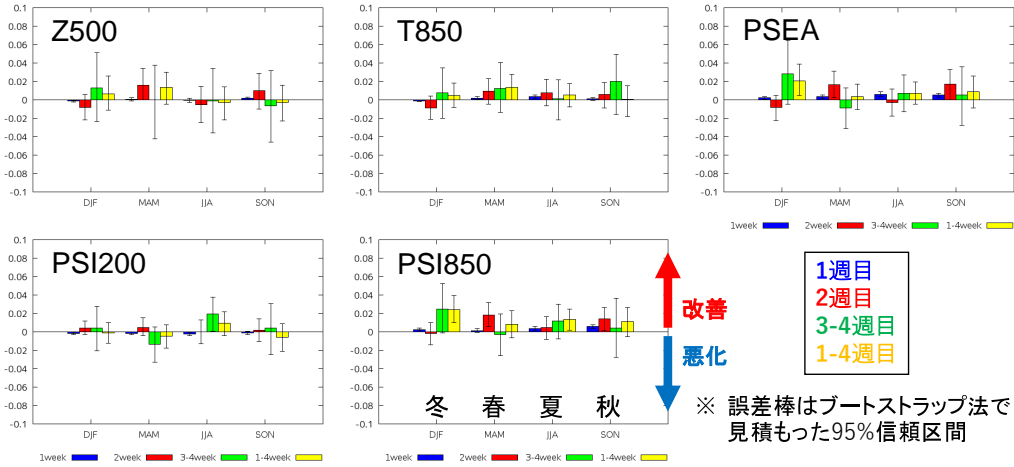


図 4.3.6 再予報 (1990-2010 年) による 13 メンバーアンサンブル平均のアノマリー相関係数の差。バイアス補正なしの北半球の検証結果で、上段は左から 500 hPa 高度場、850 hPa 気温場、海面気圧、下段は 200 hPa と 850 hPa の流線関数。それぞれの図は左から順に冬 (DJF) 春 (MAM) 夏 (JJA) 秋 (SON) の並びとなっており、青は 1 週目、赤は 2 週目、緑は 3-4 週目、黄は 1-4 週目を表す。

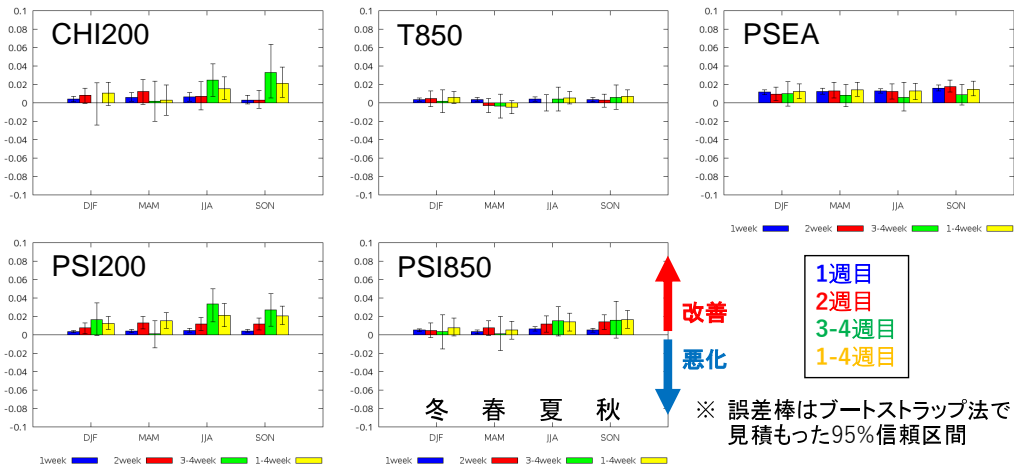


図 4.3.7 図 4.3.6 と同じ。ただし、熱帯 (20°S - 20°N) についての結果。

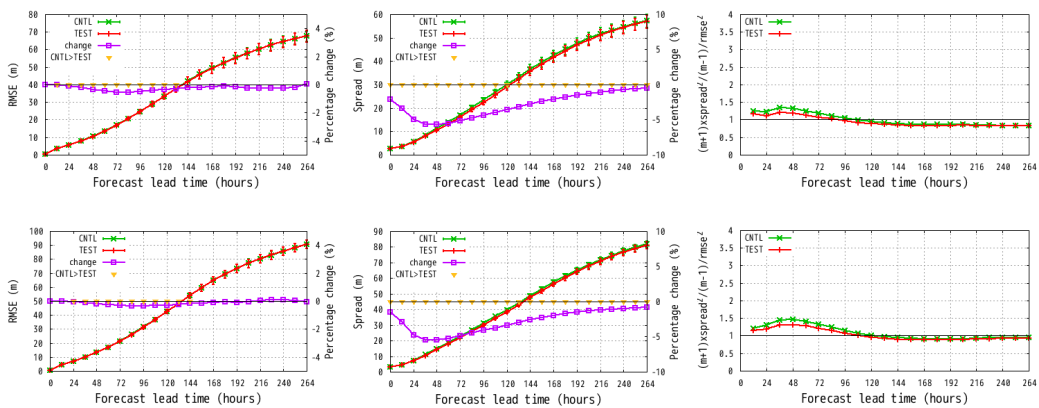


図 4.3.8 アンサンブル平均の 500 hPa 高度場の北半球の検証結果。上段は 2019 夏、下段は 2019/20 冬。左列は予報時間ごとの RMSE[m]。中列は予報時間ごとのスプレッド [m]、右列はスプレッドスキル (1 を超えるとスプレッドが予報誤差に対して過剰)。CNTL は緑線、TEST は赤線。RMSE とスプレッドでは、紫線は変化率 $((\text{TEST}-\text{CNTL})/\text{CNTL}[\%])$ 、右縦軸)。左列と中列については差に統計的な有意性がある場合に $\nabla(\text{CNTL}>\text{TEST})$ ないし $\Delta(\text{TEST}>\text{CNTL})$ をプロットしている。

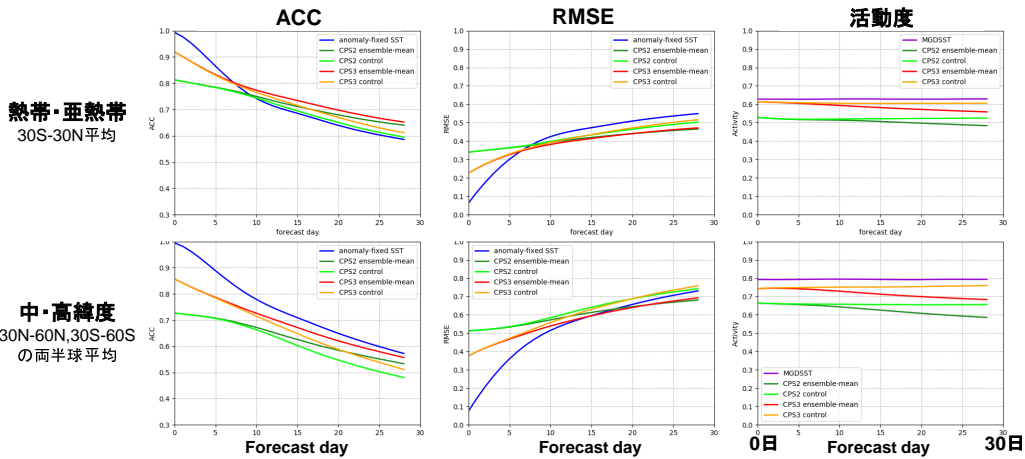


図 4.3.9 MGDSST 遅延解析を真値とした場合の CPS2 と CPS3 の SST 予測値の検証結果 (1991-2019 年の平均)。上段が熱帯・亜熱帯、下段は中・高緯度。左列はアノマリー相関係数、中列は RMSE、右列は活動度。青線は初期偏差固定 SST (初期偏差計算には MGDSST 遅延解析を使用)、深緑線は CPS2 のアンサンブル平均、赤線は CPS3 のアンサンブル平均 (他に、緑線は CPS2 の、橙線は CPS3 のコントロールラン)、紫線は MGDSST 遅延解析 (活動度のみ)。CPS の SST 予測値はバイアス補正済み。なお、CPS の実行スケジュールによる遅れがないという仮定で検証している。

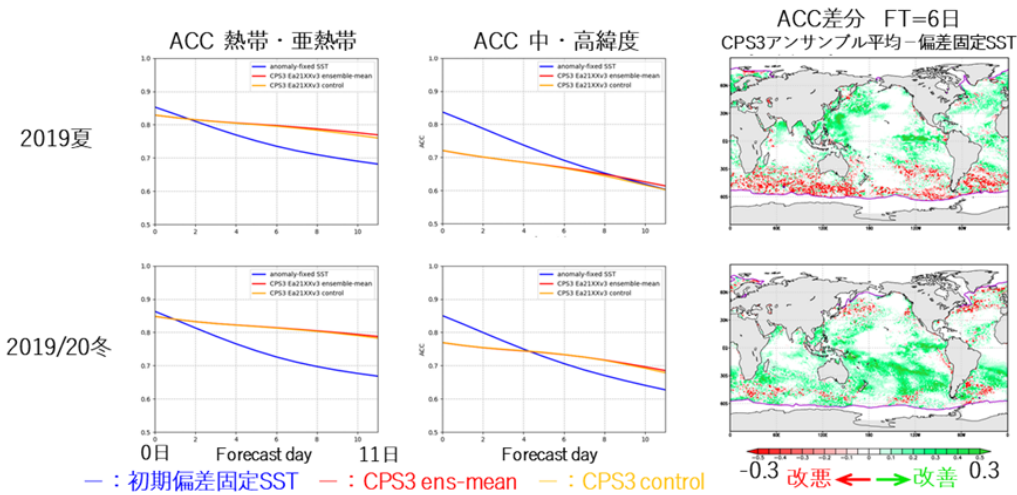


図 4.3.10 ルーチン仕様と同様に MGDSST 速報解析を用いて評価した場合の CPS3 の SST 予測値と初期偏差固定 SST の比較結果。左列が熱帯・亜熱帯、中列は中・高緯度、右列は予測 6 日のアノマリー相関係数の差分。上段は 2019 年夏、下段は 2019/20 冬の期間の結果を示す。青線は初期偏差固定 SST (初期偏差計算には MGDSST 速報解析を使用)、赤線は CPS3 のアンサンブル平均、橙線は CPS3 のコントロールメンバー (真値は MGDSST 遅延解析)。CPS の SST 予測値はバイアス補正済み。

さらに先の改良予定項目としては、引き続き GEPS で使用する予報モデルの最新 GSM への更新や、2 段階 SST 法の適用領域の拡大などを令和 4 年度末に導入する計画で検討を進めているところである。

参考文献

久保勇太郎, 2017: MJO. 平成 28 年度季節予報研修テキスト, 気象庁地球環境・海洋部, 33-37.
 栗原幸雄, 桜井敏之, 倉賀野連, 2006: 衛星マイクロ波

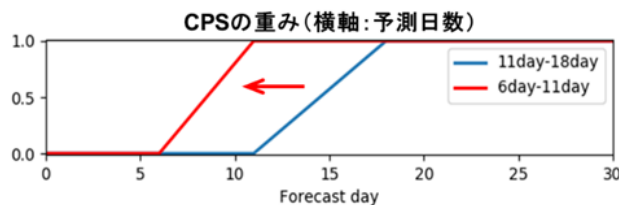


図 4.3.11 2 段階 SST 法で適用する CPS の SST 予測値の重み (縦軸は重み、横軸は予測日数)。CNTL は青線、TEST は赤線。

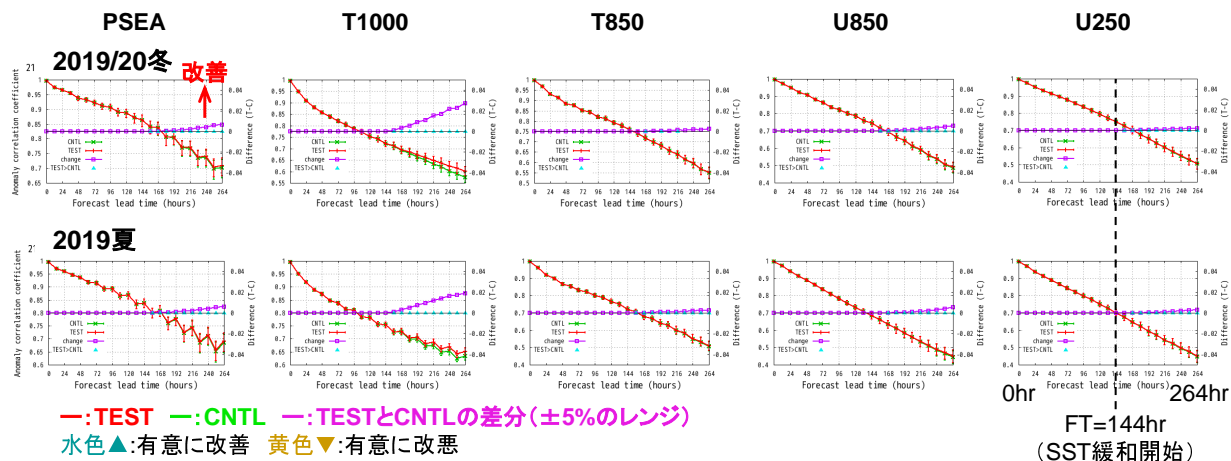


図 4.3.12 熱帯におけるアンサンブル平均のアノマリー相関係数。上段は 2019/20 冬、下段は 2019 夏。左から順に海面気圧、1000 hPa 気温、850 hPa 気温、850hPa 東西風、250 hPa 東西風。CNTL は緑線、TEST は赤線、紫線は差 (TEST-CNTL、右縦軸)。

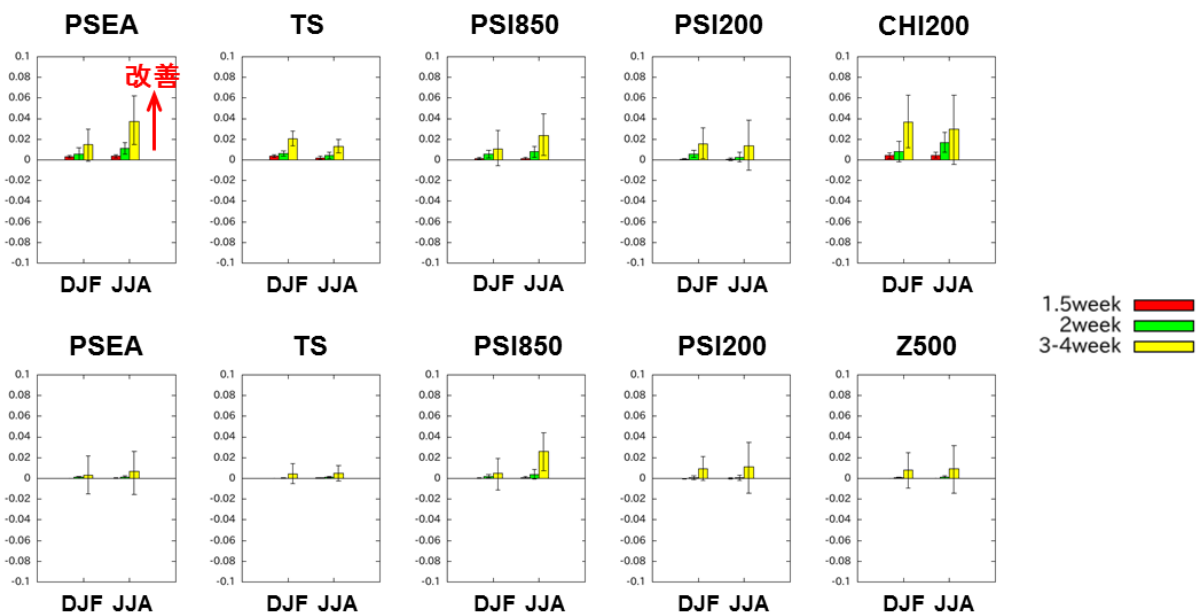


図 4.3.13 再予報 (1991-2020 年) によるアンサンブル平均のアノマリー相関係数の差。上段が熱帯、下段が北半球のバイアス補正なしの検証結果。上段は左から海面気圧、地上気温、850 hPa 流線関数、200 hPa 流線関数、200 hPa 速度ポテンシャルであり、下段は上段と同じ、ただし 200hPa 速度ポテンシャルの代わりに 500hPa 高度としている。それぞれの図の左側が冬 (DJF) で右が夏 (JJA) の並びとなっており、赤が 1.5 週目、緑は 2 週目、緑は 3-4 週目を表す。

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.

越智健太, 関口亮平, 2019: 再予報型の予測実験。数値予報課報告・別冊第 65 号, 気象庁予報部, 121-126.

高倉寿成, 小森拓也, 2020: 2 段階 SST 法の詳細と導入事例紹介。令和 2 年度季節予報研修テキスト, 気象庁地球環境・海洋部, 2-8.

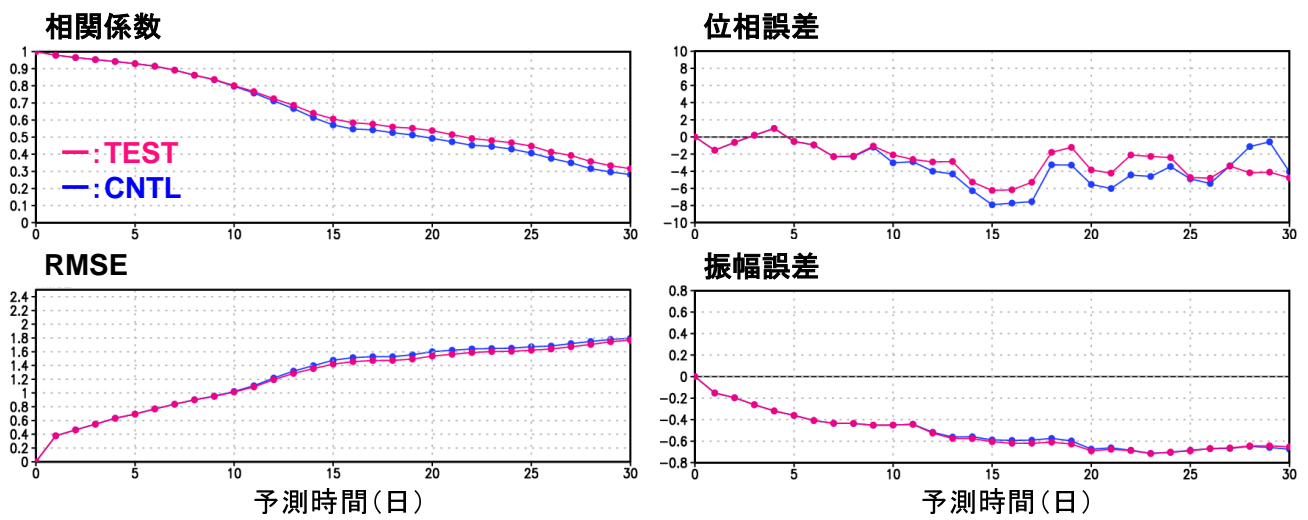


図 4.3.14 再予報（1991–2020 年）による MJO 指数の予測精度。夏冬期間で初期値の振幅が 1 以上の事例を対象としたもの。左上は相関係数、右上は位相誤差、左下は RMSE、右下は振幅誤差。赤線が TEST で青線が CNTL