

1 全球アンサンブル予報システムの更新～2 段階 SST 法の導入～

1.1 はじめに¹

全球アンサンブル予報システム(全球 EPS)は、気象庁の台風情報、週間天気予報、2 週間気温予報及び 1 か月予報などに用いられており、数日から 1 か月程度までのスケールの現象を対象としている。本章では、2020 年 3 月に更新した全球 EPS に関して、主に 2 週間から 1 か月予報の観点から、改善点や評価結果などについて述べる。今回の更新は、2017 年 3 月のシステム構築(新保 2017)以来初めての予報モデルの変更を含んでおり、その間の物理過程を含む決定論全球モデル(GSM)の開発成果を取り込んだ。

また、今回の変更には季節アンサンブル予報システム(季節 EPS)で予測された海面水温(SST)を利用する 2 段階 SST 法の新規導入もあり、これにより 1 か月予報に重要なマッデンジュリアン振動(以下、MJO)の予測精度向上に大きく貢献した。季節 EPS の予測結果利用による全球 EPS の予測精度向上は、今後の全球 EPS への大気海洋結合モデルの導入に向けて第 1 歩となる開発成果であり、また、全球 EPS と季節 EPS の予測結果が整合的になることで、季節予報担当者にとって予測プロダクトの使い勝手が向上するという点でも重要と考えられる。

第 1.2 節では、全球 EPS に新規導入した 2 段階 SST 法の仕組みを導入事例とともに紹介する。第 1.3 節では、これまで不確実性の大きかった再予報の評価について、アンサンブルメンバー数を増強する仕様に変えた効果について解説する。第 1.4 節では、2020 年 3 月に更新した全球 EPS 全体としての予測精度評価の結果を紹介する。さらに、第 1.5 節では、2 段階 SST 法といった下部境界値の改善を含め、今後の開発と方向性について述べる。最後にガイダンスの更新について、再予報アンサンブルメンバー数の増強を踏まえて改良した手法の解説とともに述べる(第 1.6 節)。

数値予報モデルやガイダンスの開発は地道な日々の努力の積み上げであり、予測技術と予測精度は一步ずつではあるが着実に向上している。特に今回の更新では、数値予報モデルだけでなく、ガイダンス手法の改良に資するような再予報実験の仕様をガイダンス担当者と共に検討を重ねた努力も実を結んだ。本章の中で、高品質な情報の提供に向けた、数値モデル開発者、ガイダンス開発担当者、現業季節予報担当者の連携・取り組みを少しでも感じていただけると幸いである。

参考文献

新保明彦, 2017: 全球アンサンブル予報システムの概要. 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, 1-8.

¹ 小森 拓也

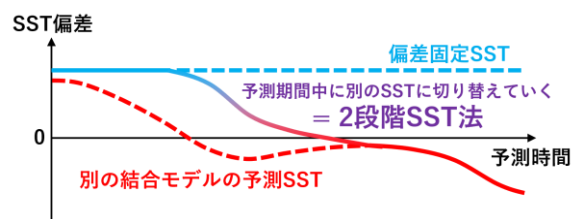
1.2 2段階 SST 法の詳細と導入事例紹介¹

1.2.1 はじめに

気象庁が運用している全球アンサンブル予報システム(全球 EPS)は、気象庁の台風情報、週間天気予報、2週間気温予報及び1か月予報などに用いられており、数日から1か月程度までのスケールの現象を対象とした予測を行っている。一般に、予測の対象とする現象の時間スケールが長くなるほど、初期値の持つ情報による予測可能性(第1種予測可能性)の寄与は急激に減少し、境界値や外力の持つ情報による予測可能性(第2種予測可能性)の寄与が相対的に大きくなる。したがって、大気モデルの下部境界値である海面水温(SST)は、予測時間が長くなるほど予測可能性の源として重要となる。

大気モデルにおける SST を含む海洋の変動の扱いは、その目的や対象とする時間スケールに応じて変えることが多く、海洋内部の変動過程の計算の有無により2種類に大別できる。陽に計算しない場合によく利用される偏差固定 SST は、初期時刻の対気候値偏差を予測期間において固定し、気候値変動のみを時間変化として扱う。SST を算出するための計算機資源をほぼ使わないため、SST の水平分解能が比較的高解像度であっても利用しやすいという特徴がある。しかし SST の精度は予測時間の経過と共に大きく低下するので、比較的短期の予測を行う現業モデル(気象庁の全球モデル(GSM)や全球 EPS など)で多く採用されている手法である。一方、海洋モデルと結合して海洋内部の変動過程を陽に計算する手法(大気海洋結合化)では、予測時間に伴う SST の精度の低下は小さいが、海洋モデル本体に加えて海洋初期値作成システムなど相応の計算機資源が要求される。この手法は、第2種予測可能性がより重要となる比較的長期の時間スケールを扱う現業モデル(気象庁の季節アンサンブル予報システム(CPS2)など)で多く採用される。

海外気象機関の動向に目を向けると、全球 EPS が対象とする季節内～季節スケールの現象を予測するモデルの多くは大気海洋結合モデルとして運用され



第 1.2-1 図 2段階 SST 法のイメージ図

偏差固定 SST(青破線)から別の結合モデルの予測 SST(赤破線)に予測期間中に切り替えた場合の SST(実線)について示している。

ている。近年ではカナダ気象局や欧州中期予報センターが高解像度の決定論全球モデルに対しても大気海洋結合化を行っており、より短期の時間スケールをターゲットとした現業モデルの大気海洋結合化に向けて、他の気象機関も開発を進めている。一方で、気象庁では全球 EPS に対して偏差固定 SST を採用し続けており、特に予測期間後半における大気の前測誤差の一因になっていると考えられる。

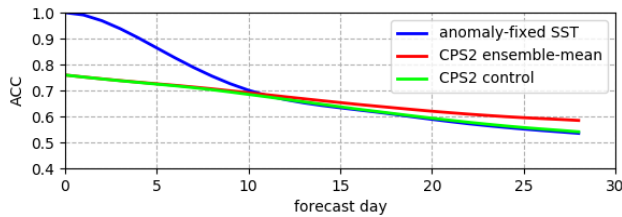
このような背景から、気象庁では全球 EPS に与える SST の高度化に取り組み、2020年3月に全球 EPS に2段階 SST 法を導入した。本節では、この2段階 SST 法の概要、全球 EPS への導入及び導入事例について述べる。

1.2.2 2段階 SST 法

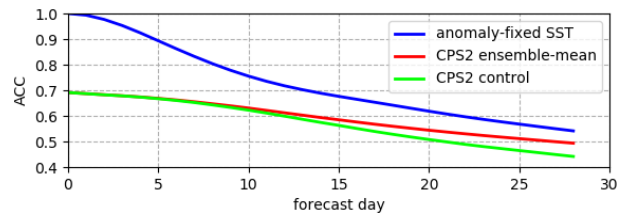
海洋内部の変動過程を陽に計算するか否かでそれぞれ一長一短があることを述べたが、2段階 SST 法と呼ばれる両者の中間的な手法も存在する。これは、海洋内部の変動過程の計算は行わないが、事前に別のモデル等で計算された SST 予測値に予測途中から切り替えていく手法であり、気象庁の現業季節アンサンブル予報システムでも2003年3月から2010年2月まで採用されていた(新保ほか, 2009)。例えば、第 1.2-1 図のように、予測初期は偏差固定 SST とし、予測途中から事前に計算された別の大気海洋結合モデルの予測 SST に切り替えていくことにより、追加の計算資源をほぼ必要とせず、精度の良い SST をリードタイムに応じて選択的に利用できる。あくまで別のモデルの予測 SST を利用するので、大気海洋結合化ほどのインパクトは期待できないが、偏差固定 SST を

¹ 高倉 寿成, 小森 拓也

(a) ACC (熱帯・亜熱帯)



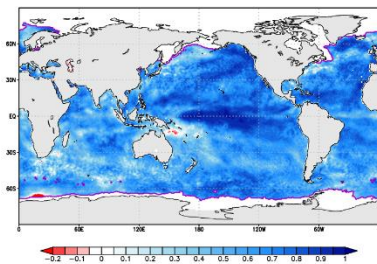
(b) ACC (中・高緯度)



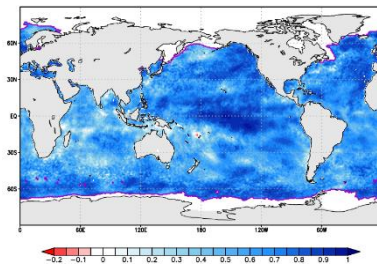
第 1.2-2 図 各 SST の ACC 時系列

(a)は 30°S~30°N の領域、(b)は 30°S~60°S 及び 30°N~60°N の領域を対象とし、CPS2 再予報の全 24 初期日で平均している。青線は偏差固定 SST、赤線は CPS2 の 5 メンバーアンサンブル平均の SST 予測値、緑線は CPS2 のコントロールメンバーの SST 予測値を示している。横軸は予測日数。

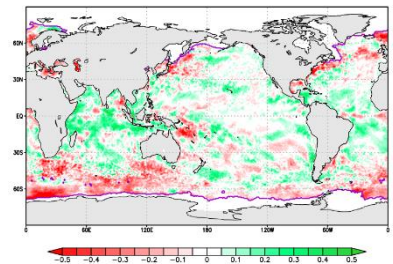
(a) CPS2 アンサンブル平均



(b) 偏差固定 SST



(c) (a) - (b)



第 1.2-3 図 1 月 31 日初期日の予測 21 日目の (a)CPS2 予測 SST、(b)偏差固定 SST による ACC と (c)その差分 MGDSST の海氷密度の気候値が 0 (紫線)より大きい領域はマスクしている。

単独で利用するよりも精度の良い SST を与えることができれば、大気モデルの予測精度向上が期待できる。実際に、米国環境予報センターにおいて全球アンサンブル予報システムに 2 段階 SST 法を適用すると、偏差固定 SST の場合と比べて 1 か月予報に重要な Madden・Julian 振動 (MJO) の予測スキルが向上したことが報告されている (Zhu et al., 2018)。気象庁の全球 EPS に対しても大気海洋結合モデルである CPS2 の予測 SST を用いて 2 段階 SST 法を適用すれば予測精度の向上が期待できる。

1.2.3 全球 EPS への導入

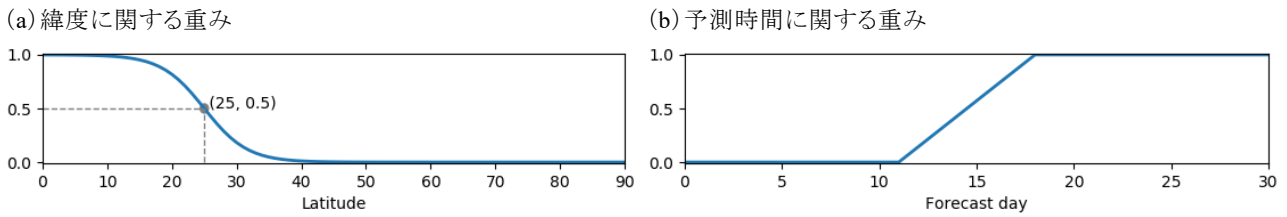
(1) 利用する SST データの精度比較

まず、2 段階 SST 法で利用する CPS2 の予測 SST と偏差固定 SST の精度を比較する。使用データは、偏差固定 SST については MGDSST (栗原ほか, 2006) の再解析値を用いる。CPS2 の予測 SST については CPS2 再予報データを用いるが、CPS2 は COBE-SST (Ishii et al., 2005) を用いて海洋初期値を作成しており、全球 EPS で用いる SST データに合わせるために COBE-SST ではなく MGDSST に対する系統誤差の補正を施した。CPS2 の再予報の仕様については、高

谷と石川 (2015) を参照されたい。この検証は全球 EPS への導入のための調査であるため、真値は全球 EPS で利用する SST データである MGDSST の再解析値とした。したがって、COBE-SST を利用している CPS2 よりも MGDSST から作成される偏差固定 SST の方が有利であると考えられるが、敢えてそのような仕様としている。各データの水平解像度は TL319 (全球 EPS で 18 日からの予測を行う際の水平解像度で約 55 km 相当) に変換しており、検証は 1981 年~2010 年の CPS2 再予報の初期日 (全 24 初期日) に揃えて行った。

熱帯・亜熱帯と中・高緯度におけるアノマリー相関係数 (ACC) について第 1.2-2 図に示す。熱帯・亜熱帯を見ると、予測 10 日あたりで CPS2 のアンサンブル平均の精度が偏差固定 SST よりも良くなっている。CPS2 のコントロールメンバーの精度はアンサンブル平均よりも低く、偏差固定 SST を明瞭に上回ることはない。また、中・高緯度では偏差固定 SST の方が CPS2 を上回っていることが分かる。

第 1.2-3 図に 1 月 31 日初期日の予測 21 日目の ACC の空間分布を示す。偏差固定 SST の ACC は、偏差固定 SST の予測精度の指標となるだけでなく、



第 1.2-4 図 2 段階 SST 法で利用する際の CPS2 の予測 SST に対する重み

(a)の横軸は緯度の絶対値であり、赤道について対称な重みとなる。(b)の横軸は予測日数。ある緯度・予測時間で用いられる CPS2 の予測 SST の割合は(a)と(b)の積となる。

SST 偏差の持続性も表しており、ACC が大きい領域ほど偏差の持続性が高い。熱帯に関しては、偏差固定 SST の ACC が低い(つまり、偏差の持続性が低い)インド洋、南シナ海、西部太平洋などで、CPS2 の方が高精度の領域が多く、偏差固定 SST の ACC が高い(偏差の持続性が高い)東部太平洋などでは両者の差は大きくない。中・高緯度に関しては、北半球の黒潮周辺及びメキシコ湾流周辺や南半球の多くの場所で、CPS2 の予測精度は不十分であるように見える。この理由のとしては、前述したように真値が MGDSST であることの他にも、CPS2 では解像度が MGDSST に比べて粗いこと、アンサンブル平均を施していること及び衛星観測を利用しない COBE-SST を用いて海洋初期値を作成していることにより、中高緯度の強い海流付近の細かい渦などの構造が上手く表現できていない可能性があることが挙げられる。

(2) 導入した 2 段階 SST 法の仕様

(1)の SST 精度比較などの基礎調査をもとに、2 段階 SST 法の仕様を以下のように決定した。

(ア) 使用する CPS2 データ

第 1.2-2 図からも分かるように、コントロールメンバーよりもアンサンブル平均値の方が高精度であるため、CPS2 のアンサンブル平均値を使用する。また、CPS2 では COBE-SST を観測値として海洋同化に用いているが、予測前半に用いる偏差固定 SST に合わせるために、COBE-SST ではなく MGDSST に対する系統誤差の補正を行った。

² 詳細についてはここでは省略するが、過去のランダムな初期日の偏差固定 SST の対解析誤差を相殺するような摂動を各メンバーに与えている。

(イ) 適用領域

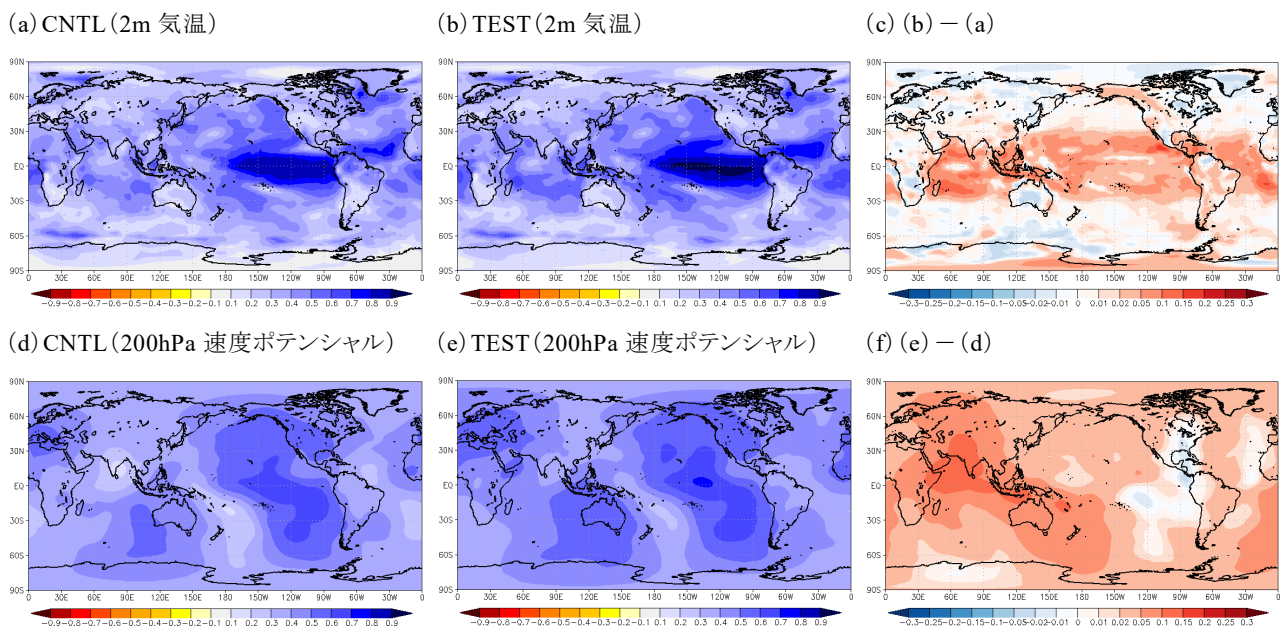
CPS2 の SST 予測精度は、熱帯・亜熱帯では偏差固定 SST を上回るが、中・高緯度では不十分であったため、熱帯・亜熱帯のみで 2 段階 SST 法が適用されるようにした。第 1.2-4 図(a)のような緯度に依存する tanh 関数で重みづけを行っている。

(ウ) 適用期間

第 1.2-2 図(a)のように、熱帯・亜熱帯の領域平均の ACC において CPS2 のアンサンブル平均値が偏差固定 SST を上回るのは予測 10 日程度以降であった。しかしながら、現業 CPS2 の予測の実行は 5 日おきであり、現業スケジュールの仕様により初期日の 2 日後に予測が実行される。したがって、現業全球 EPS での利用を考えた場合は、数日前の初期日の CPS2 データしか利用できない。このことも考慮し、CPS2 の予測 SST への緩和は、CPS2 の予測 SST の精度が偏差固定 SST の精度を上回っている予測時間から緩やかに行うこととした(具体的には第 1.2-4 図(b)のように予測 11 日から 18 日にかけて行う)。

(エ) SST 摂動

全球 EPS には偏差固定 SST の不確実性を捕捉するために、SST 摂動²が導入されている(太田と堀田, 2016; Hotta and Ota, 2019)。2 段階 SST の導入に際し、SST 摂動作成手法は変更せず、摂動の振幅調整のみ行った。具体的には、CPS2 の予測 SST の平方根平均二乗誤差(RMSE)が偏差固定 SST の RMSE から変化しただけ調整を行い、0.85 倍とした。また、



第 1.2-5 図 予測 3~4 週目の(a)(d)CNTL 実験、(b)(e)TEST 実験の ACC と(c)(f)その差分
(a)(b)(c)は 2m 気温、(d)(e)(f)は 200hPa 速度ポテンシャル。系統誤差補正を施したアンサンブル平均値に対して ACC を計算し、全初期日で平均している。

偏差固定 SST のみが使われている領域・予測時間では 1 倍、CPS2 の予測 SST のみが使われている領域・予測時間では 0.85 倍になるように、第 1.2-4 図と同様な重みをかけた。

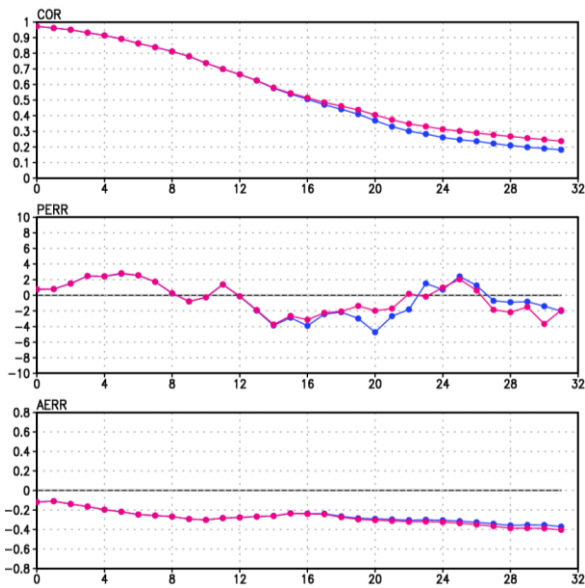
(3) 全球 EPS における予測精度の変化

2 段階 SST 法の導入による全球 EPS の予測精度の変化を調べるため、再予報実験で統計的な評価を行った。実験仕様は越智と関口 (2019) と基本的には同じであるが、メンバー数は 13 とし、再予報実行日は各月の月末初期日のみとしている。モデルの下部境界条件として偏差固定 SST を与えた実験 (CNTL 実験) と (2) の仕様で 2 段階 SST 法を適用した実験 (TEST 実験) の 2 種類を実施し、JRA-55 (古林ほか, 2015) を解析値として検証を行った。

第 1.2-5 図は予測 3~4 週目の各実験の全初期日で平均した ACC とその差を示している。2m 気温については、2 段階 SST 法を適用した熱帯・亜熱帯の海洋で全体的に改善しており、その中でも特にインド洋や南シナ海、西部太平洋の改善が相対的に大きい。これは、SST の ACC の改善が大きかった領域と概ね対応している。200hPa 速度ポテンシャルについても、インド洋付近を中心に改善が見られ、熱帯の対流活

動の予測が向上している。

さらに、MJO の予測特性に関する変化についても確認する。第 1.2-6 図は MJO 指数の予測精度を示しており、算出には Matsueda and Endo (2011) で定義されている式を用いた。COR は相関係数、PERR は位相誤差、AERR は振幅誤差を示す。PERR>0 (<0) は解析値に比べて予測の位相速度が速い (遅い) ことを表し、AERR>0 (<0) は解析値に比べて予測の振幅が大きい (小さい) ことを表す。この図から、予測後半において MJO 指数の相関係数が改善しているのが分かる。位相誤差は 0 に近づいている期間が多く、概ね改善傾向であるが、振幅が減少して振幅誤差としてはわずかに拡大している。振幅の減少については、CPS2 の SST の解像度が MGDSSST よりも粗いことやアンサンブル平均した CPS2 の予測 SST を利用したことで、SST の変動の大きさが減少しているためと考えられる (図略)。水平解像度の問題に関しては、今後の季節アンサンブル予報システム更新に伴う水平高解像度化の効果が期待される。また、MJO の対流発位相が、予測 3~4 週目にかけて精度の向上が大きかったインド洋付近に到達するような事例を対象とした 200hPa 速度ポテンシャル偏差のホフメラー図を第 1.2-7 図に示す。CNTL 実験では予測 3~4 週目に



第 1.2-6 図 MJO 指数の予測精度

赤線が TEST 実験、青線が CNTL 実験。上から相関係数 (COR)、位相誤差 (PERR)、振幅誤差 (AERR)。冬期間 (10~3 月初期日) の検証結果。横軸は予測日数。PERR の単位は度。

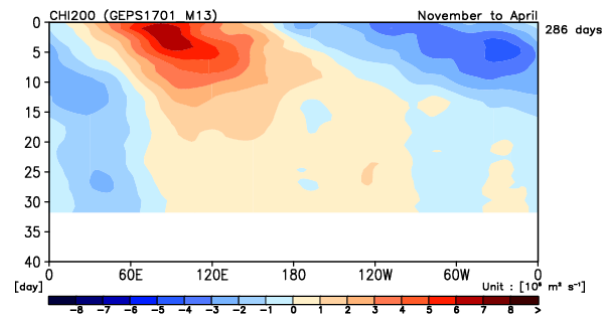
40°E 付近に停滞していた対流活発位相が、TEST 実験では東進する傾向が強まったことで解析値の位相に近づいており、位相誤差の軽減を例示している。

1.2.4 導入事例

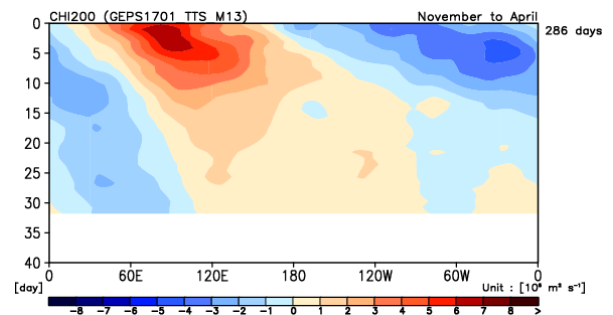
本項では 2020 年 1 月 1 日初期日の事例を 2 段階 SST 法の導入事例として紹介する。実験にはその当時に現業運用されていたバージョンの全球 EPS を利用し、偏差固定 SST を与えた CNTL 実験と 2 段階 SST 法を適用した TEST 実験を行った。解析値としては、JRA-55 および MGSST 速報解析値を利用した。

第 1.2-8 図は、予測 2、3 及び 4 週目の各モデルと解析値の SST、200hPa 速度ポテンシャル及び 200hPa 流線関数の偏差である。比較のために TEST 実験の 2 段階 SST 法に利用された 2019 年 12 月 27 日初期日の CPS2 の予測結果も示している。この事例では、インド洋と海洋大陸付近を中心に予測の違いが顕著であったため、それらの領域に着目する。まず、予測初期の SST として初期偏差固定である CNTL 実験の SST を見ると、インド洋は概ね高温偏差となっているが、海洋大陸付近ではさらに顕著な高温偏差となっている。SST 解析値の変化を見ると、予測 2 週目の期間では予測初期と一転して海洋大陸付近が低

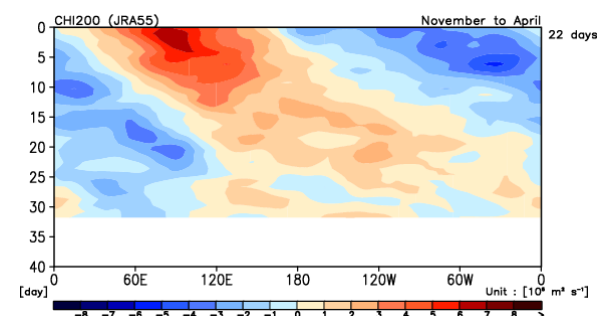
(a) CNTL



(b) TEST



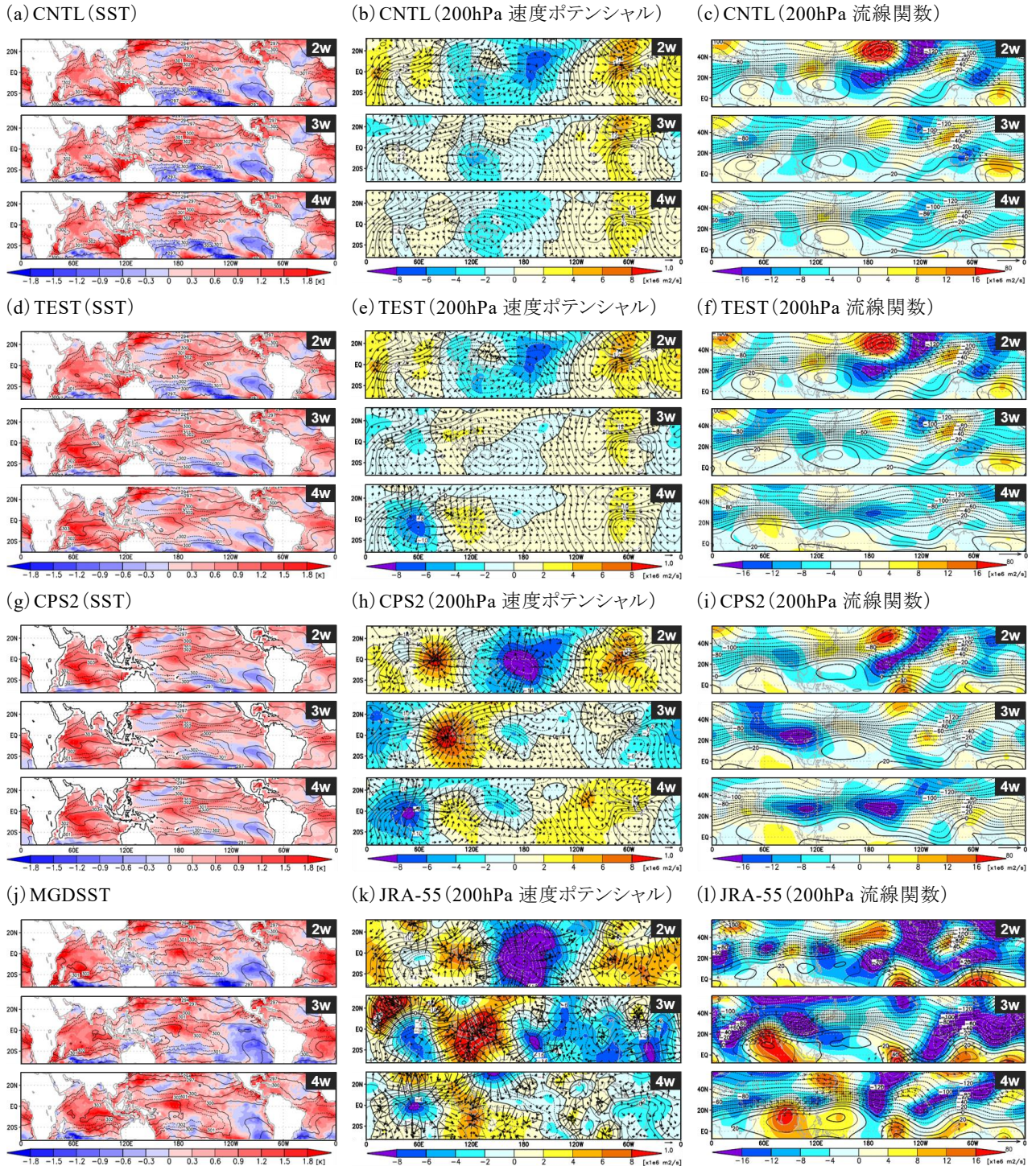
(c) JRA-55



第 1.2-7 図 MJO の初期位相が 7 (西部太平洋)、かつ振幅が 1 より大きい事例について、赤道域 (15°S~15°N) で緯度平均した 200hPa 速度ポテンシャル偏差の経度時間断面合成図 (10⁶ m²/s)

(a) CNTL 実験、(b) TEST 実験、(c) JRA-55。冬期間 (10~3 月初期日) の検証結果。縦軸は対象となる事例を 0 とした時の日 (予報の場合は予測日数)。右側の値は該当事例の日数。

温偏差となっており、その後も海洋大陸付近よりもインド洋の SST 偏差の方が高い状態が続いている。つまり、インド洋と海洋大陸付近の SST 偏差の大小関係は予測期間中に逆転した。ここで、海洋大陸付近の SST が大きく低下した理由は、予測初期から予測 1 週目の期間にかけて海洋大陸付近が対流活発偏差に覆われており (図略)、海面に入射する日射の減少や強風偏差による蒸発の促進が水温低下に寄与したと考えられる。その後は、第 1.2-8 図 (k) に示すように、対流活発偏差は東進し、海洋大陸付近は対流不活



第 1.2-8 図 予測 2、3、4 週目の (a) (d) (g) (j) SST(K)、(b) (e) (h) (k) 200hPa 速度ポテンシャル ($10^6 \text{ m}^2/\text{s}$)、(c) (f) (i) (l) 200hPa 流線関数 ($10^6 \text{ m}^2/\text{s}$) の偏差

(a) (b) (c) は 2020 年 1 月 1 日初期日の CNTL 実験、(d) (e) (f) は 2020 年 1 月 1 日初期日の TEST 実験、(g) (h) (i) は TEST 実験の 2 段階 SST 法に利用された 2019 年 12 月 27 日初期日の CPS2、(j) (k) (l) は解析値。各図は上から予測 2、3、4 週目であり、解析の場合はその予測時間に該当する期間である。陰影が偏差、等値線が生値。(b) (e) (h) (k) の矢印は発散風を表し、(c) (f) (i) (l) の矢印は Takaya and Nakamura (2001) の波活動度フラックスを表す。各図は 7 日移動平均場を施し、モデルについてはアンサンブル平均を示しているが、(a) (d) はコントロールメンバーに与えた SST 偏差を示している。

発となった。一方、相対的に SST 偏差が高くなったインド洋では、対流活発偏差が現れ始めた。モデルの対流活動の予測を見ると、CNTL 実験では SST が初期偏差固定であるため、SST 偏差が高いままの海洋大陸付近で予測 4 週目まで対流活発偏差が停滞している(第 1.2-8 図(b))。TEST 実験では予測 3 週目から海洋大陸付近で対流不活発偏差、インド洋で対流活発偏差を予測しており(第 1.2-8 図(e))、CNTL 実験と比べてより解析値に近い予測となっている。これは、CPS2 では大気海洋相互作用を介したこの領域の一連の現象をよく予測できていたので、TEST 実験では CNTL 実験より妥当な SST を下部境界値として与えられたことが要因と考えられる。特に予測 4 週目では、TEST 実験の対流活動の予測は大気海洋結合モデルである CPS2 とよく似た分布を予測している。

また、熱帯の予測が良くなったことで中・高緯度の予測にも影響がある可能性があるため、200hPa 流線関数にも着目する。解析値では、ユーラシア大陸南部で波束伝播が明瞭であり、日本付近もその波束伝播の影響を受けていると考えられる。特に予測 3、4 週目の期間のインド付近の高気圧性循環偏差や中国付近の低気圧性循環偏差の形成・維持には、上流からの波束伝播に加えてインド洋や海洋大陸付近の対流活動も寄与している可能性がある。この予測 3、4 週目のインド付近から日本付近までの波束伝播について、CNTL 実験では特に予測 4 週目の偏差の位相が解析値と比べてずれているが、TEST 実験ではより近い位相を予測できている。2 段階 SST 法が熱帯と亜熱帯にのみ適用されたことを考慮すると、この結果は熱帯の対流活動の予測が解析値に近づいたことに起因していると考えられ、CPS2 の予測も CNTL 実験よりも解析値に近いことが確認できる。なお、CPS2 よりも TEST 実験の方が解析値に近い位相を予測しているが、これは CPS2 の初期日が数日古いことやモデルの解像度が相対的に低いことが影響している可能性がある。

1.2.5 まとめ

本節では、2020 年 3 月に全球 EPS に導入された 2 段階 SST 法の詳細と導入事例について述べた。全球

EPS に 2 段階 SST 法を導入することで、熱帯を中心として予測精度が改善することが確認できた。さらに、全球 EPS の予測後半の SST として CPS2 の予測 SST が利用されることで、1 か月予報とその先の季節予報がこれまでよりシームレスにつながるようになることが期待される。

参考文献

- 太田洋一郎, 堀田大介, 2016: 海面水温振動の開発。数値予報課報告・別冊第 62 号, 気象庁予報部, 77-84.
- 越智健太, 関口亮平, 2019: 再予報型の実験。数値予報課報告・別冊第 65 号, 気象庁予報部, 121-126.
- 栗原幸雄, 桜井敏之, 倉賀野連, 2006: 衛星マイクロ波放射計, 衛星赤外放射計及び現場観測データを用いた全球日別海面水温解析。測候時報, 73, S1-18.
- 古林慎哉, 太田行哉, 原田やよい, 海老田綾貴, 守谷昌巳, 小野田浩克, 大野木和敏, 釜堀弘隆, 小林ちあき, 遠藤洋和, 宮岡健吾, 高橋清利, 2015: 気象庁 55 年長期再解析(JRA-55)の概要。平成 26 年度季節予報研修テキスト, 気象庁地球環境・海洋部, 66-115.
- 新保明彦, 平井雅之, 森浩俊, 足立典之, 出原幸志郎, 2009: 大気海洋結合モデルによる季節アンサンブル予報システムの概要と予測精度。平成 21 年度季節予報研修テキスト, 気象庁地球環境・海洋部, 93-100.
- 高谷祐平, 石川一郎, 2015: 再予報による新システムの評価。平成 27 年度季節予報研修テキスト, 気象庁地球環境・海洋部, 42-95.
- Hotta, D., and Y. Ota, 2019: Statistical generation of SST perturbations with spatio-temporally coherent growing patterns. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **145**, 1660-1673. <https://doi.org/10.1002/qj.3518>
- Ishii, M., A. Shouji, S. Sugimoto and T. Matsumoto, 2005: Objective Analyses of Sea-Surface Temperature and Marine Meteorological Variables for the 20th Century using ICOADS and the Kobe Collection. *Int. J. Climatol.*, **25**, 865-879
- Matsueda, M., and H. Endo, 2011: Verification of medium-range MJO forecasts with TIGGE. *Geophys. Res. Lett.*, **38**, L11801.
- Takaya, K., and H. Nakamura, 2001: A formulation of a phase-independent wave-activity flux for stationary and migratory quasigeostrophic eddies on a zonally varying basic flow. *J. Atmos. Sci.*, **58**, 608-627.
- Zhu, Y., X. Zhou, W. Li, D. Hou, C. Melhauser, E. Sinsky, M. Peña, B. Fu, H. Guan, W. Kolczynski, R. Wobus and V. Tallapragada, 2018: Toward the improvement of subseasonal prediction in the National Centers for Environmental Prediction Global Ensemble Forecast System. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **123**. <https://doi.org/10.1029/2018JD028506>

1.3 再予報のアンサンブルメンバー数増強¹

1.3.1 はじめに

再予報とは過去の多数の事例を対象に同一のモデルを用いて行う数値予報である(Hamill et al. 2006; 高谷 2012)。全球アンサンブル予報システム(全球 EPS)の更新を検討する際には平年値期間の 30 年を対象とした再予報を行い、2 週間気温予報、1 か月予報に関わる北半球・熱帯域の循環場の年々変動や日本域の気温などの予測精度を評価している。また、再予報の結果は系統誤差の推定やガイダンスの予測式の作成に利用している(田中ほか 2017)。再予報から事前に計算された統計値を現業システムの予測の補正に用いることで、より予測精度の高い予報資料を作成している。

第 1.3-1 表は全球 EPS における現業システムと再予報の仕様を示している。前述の利用用途を考慮すると、再予報の仕様は可能な限り現業システムと同じ構成であることが望ましい。しかし、いくつかの項目については、計算機資源や再予報に必要な所要時間の制約により現業システムとは異なる仕様となっている。特にアンサンブルメンバー数は、現業システムでは 1 初期時刻あたり 13 メンバー²であるが、従来の再予報では 5 メンバーと現業システムの半分以下となっていた。アンサンブル予報では、メンバー数が多いほどアンサンブル平均の予測精度や確率予測精度が高い(高野 2002)。また、メンバー数を増やすことによる予測精度の改善幅は、元のメンバー数が少ないほど(特に 15 メンバー以下の場合に)大きいことが実験的にも示されている(Ma et al. 2012)。これらのことから、再予報のメンバー数を現業システムに近い数へと増強することで、より現業システムに近い特性の予測に対する精度評価を行うことができると考えられる。また、メンバー数が少ないと予測精度の評価指標(アノマリー相関係数(ACC)など)のサンプリングエラーが特に予測 2 週目以降で大きくなるが、メンバー数を増強することで評価の不確実性の軽減も期待できる。

これらを踏まえて、今回の更新から再予報における 1 初期時刻あたりのメンバー数を 13 メンバーに変更した。初期日は、月 3 初期日(10 日、20 日、月末)から月 2 初期日(15 日、月末)に変更した³。本節では、メンバー数を増強したことによる再予報の予測精度の変化について、統計検証や事例検証の結果を示す。また、メンバー数を増強したことによって、予測精度の評価の不確実性が軽減した例も示す。今回の仕様変更に伴うガイダンスの確率分布の表現の改良については第 1.6 節を参照いただきたい。

1.3.2 統計検証

まずは、現システムについて、5 メンバーと 13 メンバーの再予報の統計検証結果を比較する⁴。統計検証には、現在の平年値期間である 1981~2010 年を対象とした 15 日、月末初期日(計 24 初期日)の予測を用いた。検証に用いた解析値は気象庁 55 年長期再解析(JRA-55; 古林ほか, 2015)である。

第 1.3-1 図に 500hPa 高度の平均誤差とモデル平年値を示す。5 メンバー、13 メンバーの図を比べると概ね同様の分布となっている。多数事例で平均して見ると、メンバー数の増強では平均誤差はほぼ変わらないことが分かる。この傾向は他の検証要素についても同様である(図略)。

次に、予測 1 か月(予測 3~30 日目の 28 日平均場)のアンサンブル平均に対する ACC の空間分布を第 1.3-2 図に示す(検証要素は 500hPa 高度、850hPa 気温)。どちらの要素も中高緯度を中心に全球のほとんどの地域で 13 メンバーの方が ACC が高いことが分かる。その変化幅は内部変動の小さい熱帯域よりも中・高緯度域の方が大きい。第 1.3-3 図には北半球域の ACC の予測時間による変化を示す。どちらの要素も予測期間を通じて 13 メンバーの方が ACC は高いが、特に 3, 4 週目でその差が大きいことが分かる。なお、確率予測精度の評価指標(ブライアスキルスコア)についても、概ね同様の傾向が見られた(図略)。

¹ 越智 健太

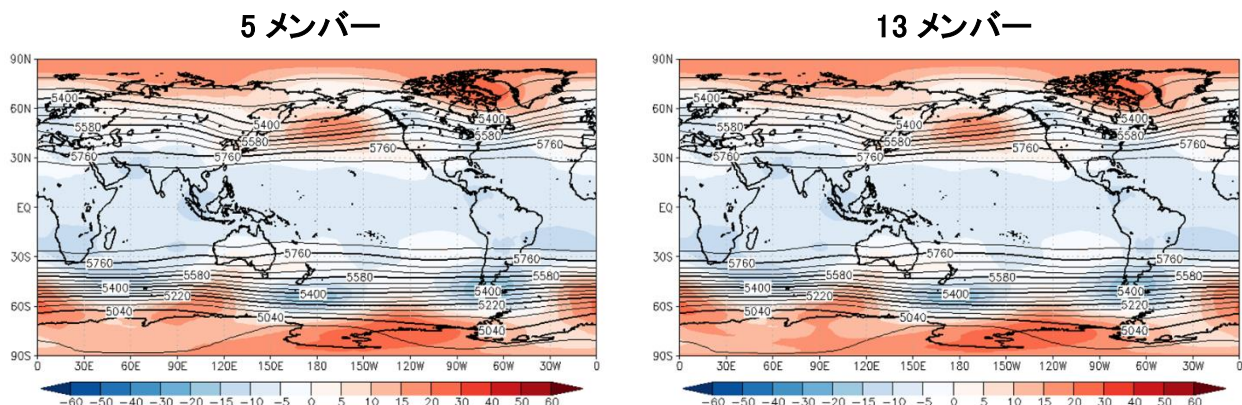
² 2 週間気温予報では 13×2 初期時刻(計 26 メンバー)、1 か月予報では 13×4 初期時刻-2(計 50 メンバー)を組み合わせて利用している。

³ 必要な計算機資源量は約 1.73 倍になるが、実験システムや検証プログラムの高速化・効率化によって、必要な計算機資源の増加量を抑えながら従来と同等以下の時間で再予報やその評価を実施できている。

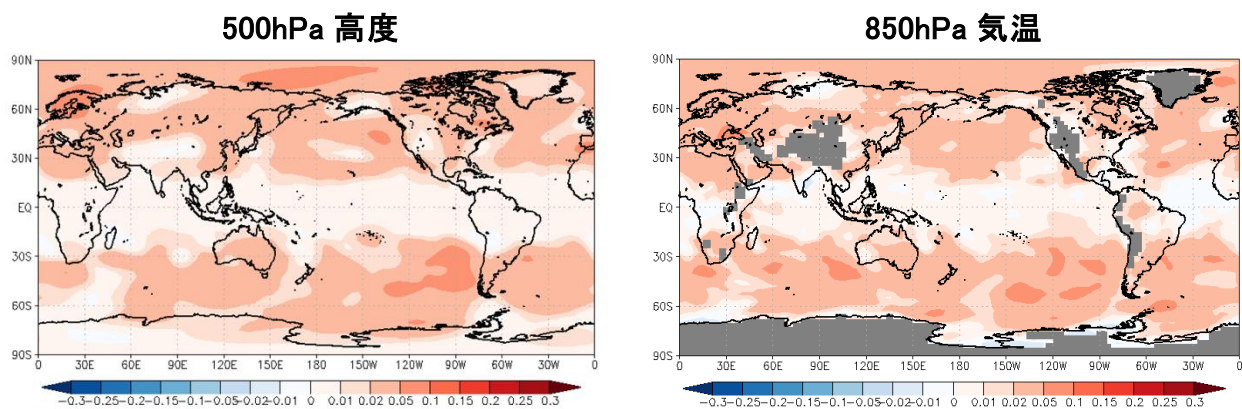
⁴ 5 メンバーは 13 メンバーの再予報の一部である。

第 1.3-1 表 全球 EPS の現業システム及び再予報の仕様
赤字は今回の更新から変更した仕様であり、山括弧内が変更前を示す。

		現業システム	再予報
予報モデル	水平解像度	TL479 (約 40 km) (～18 日)、TL319 (約 55 km) (18 日～)	
	鉛直層数	100 層 (最上層 0.01hPa)	
初期値	大気	全球速報解析値	JRA-55 再解析値
	陸面	全球速報解析値	オフライン陸面解析値
下部境界値	海面水温	MGDSST 初期偏差持続 (摂動あり) +2 段階 SST 法	
	海氷	MGDSST に利用した海氷データ (予測期間中は統計的推定)	
アンサンブル手法	大気初期摂動	SV 法(initial SV) + LETKF	SV 法(Initial SV + Evolved SV)
	モデル摂動	確率的物理過程強制法	
	境界摂動	SST 摂動	
予報時間		34 日	40 日
アンサンブルメンバー数		27 (～11 日)、13 (11 日～)	13 (5)
対象期間			1981～2010 年
初期日			15 日、月末 (10 日、20 日、月末)

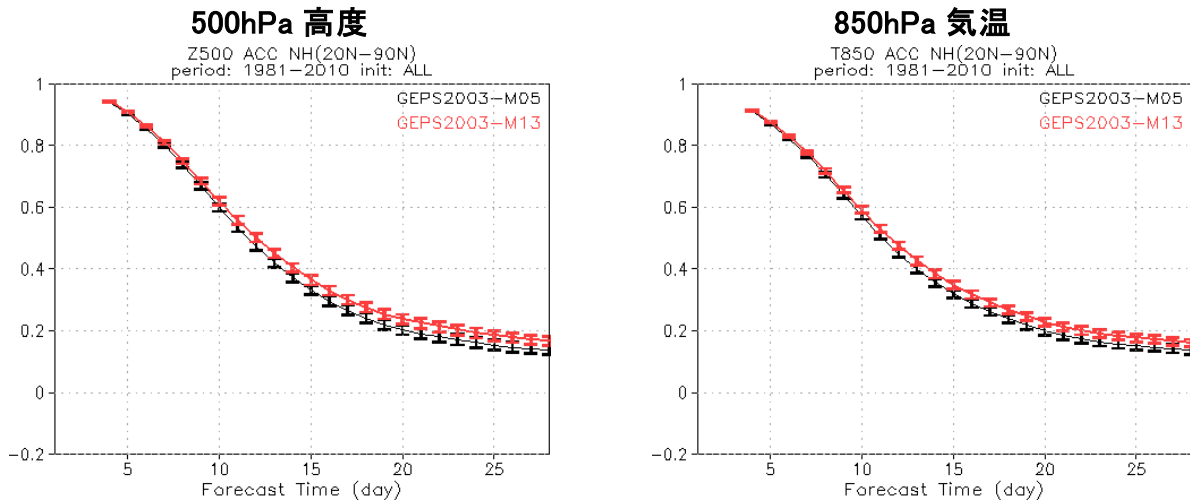


第 1.3-1 図 500hPa 高度(単位:m)の平均誤差(陰影)とモデル平年値(等値線) (予測 3～30 日目の 28 日平均場)
左:5 メンバー平均、右:13 メンバー平均の結果を示す。



第 1.3-2 図 予測 1 か月(予測 3～30 日目の 28 日平均場)のアンサンブル平均に対するアノマリー相関係数の差分(13 メンバーの値から 5 メンバーの値を引いたもの)。

左:500hPa 高度(単位:m)、右:850hPa 気温(単位:K)に対する検証結果。検証値には JRA-55 を使用。暖色(寒色)系は 13 メンバーの方がアノマリー相関係数が高い(低い)ことを示す。



第 1.3-3 図 7 日平均したアンサンブル平均の予測に対するアノマリー相関係数の時系列

黒線:5 メンバー平均、赤線:13 メンバー平均。左:500hPa 高度(単位:m)、右:850hPa 気温(単位:K)。検証値には JRA-55 を使用。ブートストラップ法で見積もった 95%信頼区間を誤差棒で表記している。

1.3.3 事例検証

現システムの 2005 年 11 月 30 日初期日(平成 18 年豪雪⁵の事例)の予測について、予測 3、4 週目におけるアンサンブル平均の予測結果を第 1.3-4 図に示す。500hPa 高度に着目すると、5 メンバー平均よりも 13 メンバー平均の方が日本周辺からベーリング海にかけて広がる負偏差を良く表現していることが分かる。また、850hPa 気温を見ると日本周辺の低温偏差の表現は解析値により近づいている。次に、第 1.3-5 図に東日本周辺域における 850hPa 気温の平年偏差の時系列を示す(青線:各メンバーの予測値、黒線:アンサンブル平均の予測値、赤線:解析値)。4 週目(12 月 21 日以降)の予測に着目すると、5 メンバーの予測ではアンサンブル平均は低温偏差を予測しているものの、各メンバーの予測は高温偏差から低温偏差までばらついている。一方、13 メンバーの予測では、予測 4 週目まで低温が持続する確率がより高く表現されている。5 メンバーの予測では、メンバー数が少ないことによってサンプルの偏りが生じていたと考えられる。

この事例は、メンバー数を増強することで予測の不確実性をより適切に表現できるようになることを示す一例であると言えるだろう。

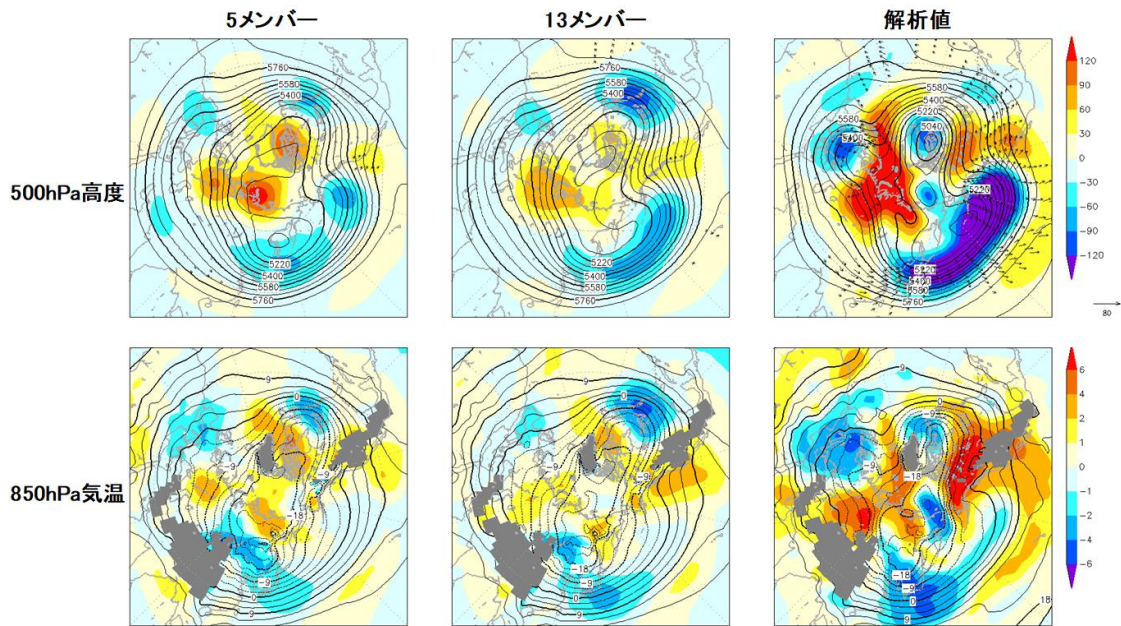
1.3.4 予測精度の評価の不確実性について

本項では、5 メンバー、13 メンバーのそれぞれの場合に対して、現システムの開発途中に見られた予測精度の変化を示す。第 1.3-6 図に 3 月 31 日、4 月 30 日、5 月 31 日初期日(春初期日)の予測 2 週目での 850hPa 気温のアンサンブル平均に対する ACC のモデル間の差分を示す。5 メンバーの検証結果を見ると、日本周辺では ACC の低下域が広がっており、特に北海道周辺では 0.1 程度の大幅な低下傾向が見られる。一方、13 メンバーでは、日本周辺の ACC の差の分布が異なっていることが分かる。大幅な低下となっていた北海道周辺では、0.01 程度の小さな差となっている。更にメンバー数を増やした再予報⁶を用いて評価すると、5 メンバーの検証結果で見られた低下幅は有意な変化とは言えないことが確認できた(図略)。

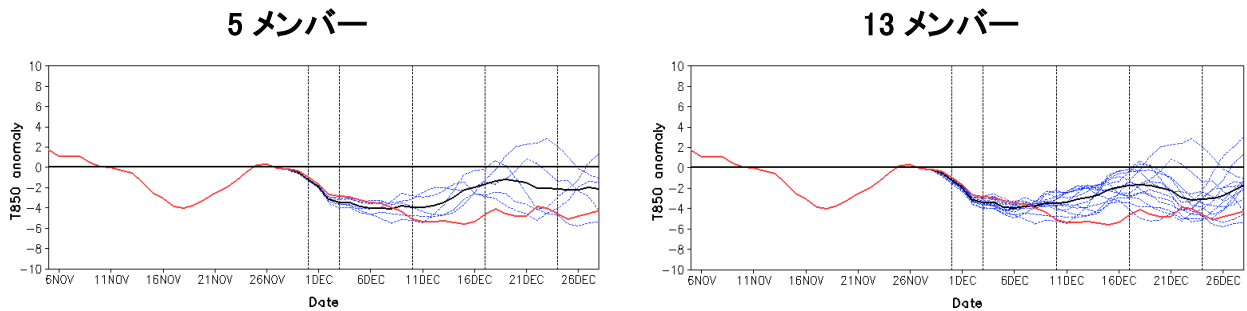
これらのことは、少ないメンバー数の再予報の結果から評価を行うと、サンプリングエラーに伴う評価の不確実性が大きい場合があることを示唆している。つまり、少数メンバーによる評価ではモデル変更の効果を適切に評価できないおそれがあるが、今回のメンバー数の増強によって、その可能性は軽減したと考えられる。

⁵ 平成 17 年 12 月から平成 18 年 1 月上旬にかけて非常に強い寒気が日本付近に南下し、強い冬型の気圧配置が断続的に現れたため、日本海側では記録的な大雪となった(高橋 2006)。

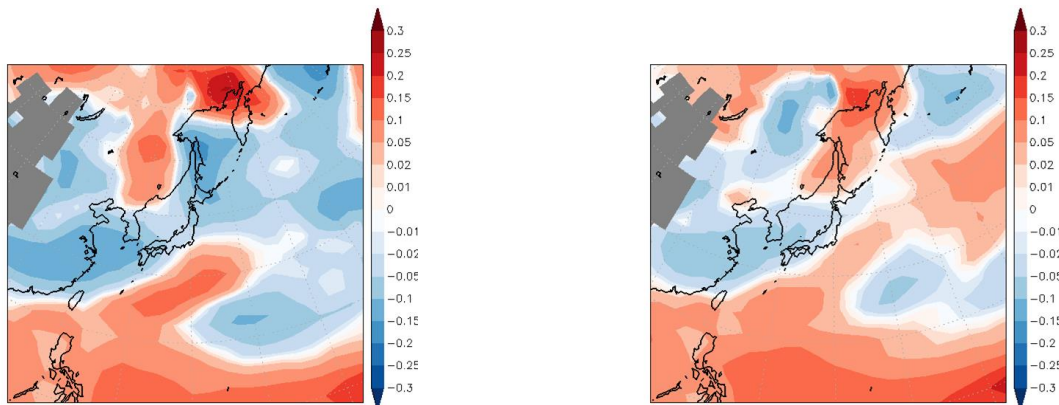
⁶ 現在の全球 EPS の摂動作成手法で実行可能な最大数である 51 メンバーとした。



第 1.3-4 図 2005 年 11 月 30 日初期日における予測 3, 4 週目(予測 17~30 日目の 14 日平均場)のアンサンブル平均の予測値と解析値
 左から順に、5 メンバー平均の予測値、13 メンバー平均の予測値、解析値(JRA-55)を示す。上段:500hPa 高度(単位:m)、下段:850hPa 気温(単位:K)。陰影は平年偏差を示す。



第 1.3-5 図 東日本周辺域(東経 35~37.5 度、北緯 135~140 度)における 7 日平均した 850hPa 気温の平年偏差の時系列(単位:K)
 青線:各メンバーの予測値、黒線:アンサンブル平均の予測値、赤線:解析値(JRA-55)。左は 5 メンバーの結果、右は 13 メンバーの結果を示す。初期日は 2005 年 11 月 30 日。



第 1.3-6 図 予測 2 週目(予測 10~16 日目の 7 日平均場)の 850hPa 気温のアンサンブル平均に対するアノマリー相関係数の差分(開発途中のシステム-旧システム)
 左:5 メンバーのアンサンブル平均、右:13 メンバーのアンサンブル平均に対する検証結果。初期日は春初期日。検証値には JRA-55 を使用。暖色系は改善、寒色系は改善を示す。

1.3.5 まとめ

本節では、再予報のメンバー数増強による予測特性の変化や評価の不確実性が軽減した例について述べた。メンバー数を増強することによって、再予報の平均誤差はほぼ変わらない。一方、予測精度は高くなり、現業システムの予測精度に近づいたと考えられる。個別の事例を見ても、予測の不確実性をより適切に表現できることが確認できた。再予報の仕様は現業システムと異なる点があるため、必ずしも現業システムと同等の予測精度が表現できるわけではないものの、これまで以上に現業システムに近い予測精度を表現できるようになったと言える。また、評価の不確実性が軽減して、モデル変更による予測精度の変化をより適切に評価することができるようになったと考えられる。

今回の変更では、メンバー数の増強による改良点を重視して、初期日の数は月 3 初期日から月 2 初期日に変更した。今後、初期日の数を増やすことで、初期日の間隔の縮小や統計値の作成に用いる事例数の増加によって、系統誤差の推定精度の向上やガイダンスの改良も期待できる。利用可能な計算機資源や再予報に必要な所要時間を勘案しながら、モデル変更の評価だけでなくガイダンスの改良にも適した再予報の仕様の検討を進めていきたい。

これまで、再予報の結果は全球 EPS の更新を検討する際の評価だけでなく、過去の事例に対する予測精度変化の把握や現業システムの予測の補正など、様々な用途で利用されてきた。再予報の仕様が変わっても、引き続きこれらの用途で利用することは可能である。また、今回の仕様変更によって、従来の仕様では十分に表現できなかった確率的な予測をより適切に表現できるようになった。今後は、これまで以上に再予報の確率予測の表現を活かした利用が可能になると考えられる。

参考文献

古林慎哉, 太田行哉, 原田やよい, 海老田綾貴, 守谷昌巳, 小野田浩克, 大野木和敏, 釜堀弘隆, 小林ちあき, 遠藤洋和, 宮岡健吾, 高橋清利, 2015: 気象庁 55 年長期再解析(JRA-55)の概要. 平成 26 年度季節予報研修テキスト, 気象庁地球環境・海洋部, 66-115.

- 高野清治, 2002: アンサンブル予報の利用技術. 気象研究ノート, 201, 73-103.
- 高橋俊二, 2006: 平成 18 年豪雪. 平成 18 年度季節予報研修テキスト, 気象庁地球環境・海洋部, 70-73.
- 高谷祐平, 2012: 再予報・ハインドキャスト. 天気, 59(6), 493-495.
- 田中基裕, 伊藤晋悟, 平井雅之, 2017: 1 か月予報及び異常天候早期警戒情報のためのガイダンスの改善. 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, 48-64.
- Hamill, T. M., J. S. Whitaker, and S. L. Mullen, 2006: Reforecasts: An important dataset for improving weather predictions. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **87**, 33-46.
- Ma, J., Y. Zhu, R. Wobus, and P. Wang, 2012: An effective configuration of ensemble size and horizontal resolution for the NCEP GEFS. *Advances in Atmospheric Sciences*, **29**, 782-794.

1.4 再予報による予測精度評価の結果¹

1.4.1 はじめに

本節では、1981~2010 年を対象とした再予報の検証結果に基づく現システムの予測精度について、旧システム(気象庁地球環境・海洋部, 2017)と比較した結果を示す。なお、本節で示す予測精度の変化は、第 1.2 節で述べた 2 段階 SST 法の導入に加えて予報モデル更新による寄与を含む総合的な結果であることに注意されたい。

再予報は現システム、旧システムともに第 1.3 節で述べた変更後の仕様に基づいて実施²し、検証値には気象庁 55 年長期再解析(JRA-55; 古林ほか, 2015)(降水量以外の要素)及び GPCP³月別値(version 2.2; Adler et al. 2003)(降水量)を利用した。また、本節では 12~2 月、3~5 月、6~8 月、9~11 月を初期日とする 1 か月予測をそれぞれ「冬期間」、「春期間」、「夏期間」、「秋期間」の予測と呼ぶ。

1.4.2 平均誤差の変化

最初に、熱帯を中心とした循環場の平均誤差について述べる。第 1.4-1 図に、夏期間における予測 1~4 週目の降水量及び 200hPa 速度ポテンシャルの平均誤差とモデル平年値を示す。アジアモンスーン領域では、陸上・海上ともに降水量が減少する変化が見られた。旧システムにおける陸上での降水が過剰な傾向が改善された一方、海上では検証値と比べてやや過少な傾向となった(第 1.4-1 図(a))。降水量の変化に対応して、同領域では旧システムと比べて上層発散が弱まる変化が見られた。これにより、インドネシア~オーストラリア付近の上層発散が強い誤差が軽減した一方、フィリピン付近での上層発散が弱い誤差は拡大した(第 1.4-1 図(b))。一方、旧システムでは熱帯東部太平洋で降水量の予測が検証値と比べて過少な傾向が見られていたが、現システムでは降水量が増加し、予測の過少傾向が改善された(第 1.4-1 図(a))。これに対応して、同領域で上層収束が強い傾向も改善された(第 1.4-1 図(b))。冬期間(第 1.4-2 図)について

は、インドネシア・アマゾン・アフリカ大陸の南半球側など、熱帯陸上で降水量が減少し、旧システムで見られた予測の過大傾向が改善された(第 1.4-2 図(a))。また、旧システムではアマゾンで局所的に上層発散が強い誤差傾向が見られていたが、降水量の変化に対応してこの誤差も軽減した(第 1.4-2 図(b))。

次に、日本付近の平均誤差について述べる。第 1.4-3 図に、夏期間における予測 1~4 週目の 850hPa 気温の平均誤差とモデル平年値を示す。旧システムでは、夏期間においてシベリアから北米にかけて下層気温を高く予測する誤差傾向があり(関口 2017)、この影響で北日本を中心に高温の平均誤差が存在していた(第 1.4-3 図(b))。現システムでもこの傾向は引き続き見られるが、日本付近での誤差の大きさは旧システムからやや縮小した(第 1.4-3 図(a))。他の季節では、平均誤差の分布に大きな変化は見られなかった(図略)。冬期間における予測 6~12 日目の 500hPa 高度の平均誤差とモデル平年値(第 1.4-4 図)を見ると、現システムは旧システムと比べて日本の北を中心に正の平均誤差が縮小したことが分かる。全球アンサンブル予報システムで使われている全球モデル(GSM)には冬季における日本付近のトラフの前面が浅く予測される誤差特性(米原ほか 2019)があったが、予報モデルの地形性抵抗過程の改良によりこの傾向は軽減された(Yonehara et al. 2020)。同様の改善が、短期予報だけでなく 2 週間気温予報を対象にした時間スケールの検証でも確認できた。冬期間の 500hPa 高度については、日本付近だけではなく北半球中高緯度で全般的に平均誤差が縮小する傾向が見られた(図略)。

1.4.3 予測精度と予測特性の変化

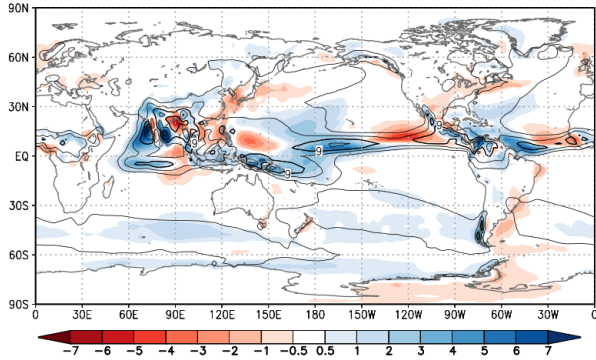
夏期間及び冬期間における、全球を対象とした 200hPa 速度ポテンシャルと 500hPa 高度のアノマリー相関係数の予報時間による変化を第 1.4-5 図に示す。予測期間の前半から改善傾向が見られ、後半にかけ

¹ 関口 亮平

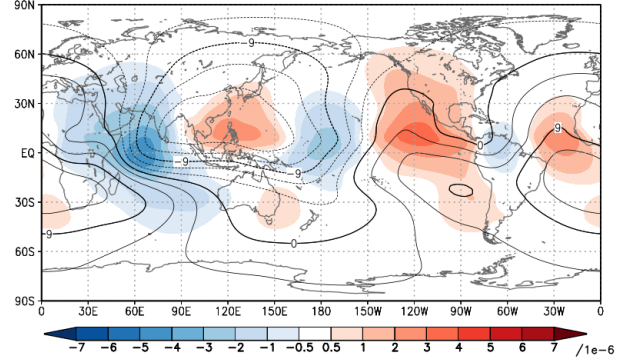
² メンバー数についても、現システム・旧システムともに 13 としている。

³ Global Precipitation Climatology Project

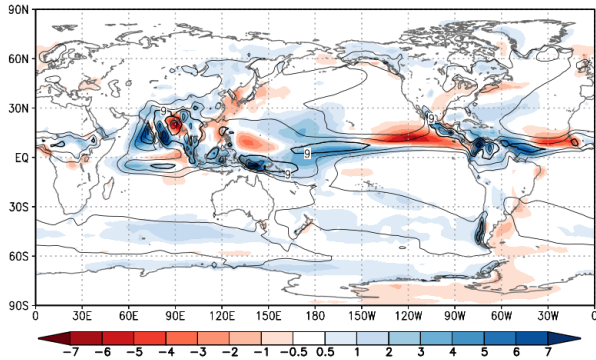
(a) 降水量(現システム)



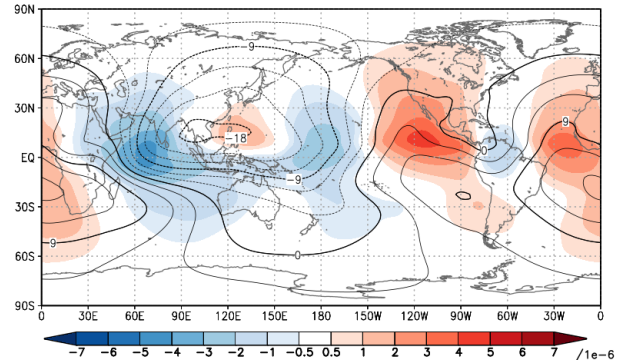
(b) 200hPa 速度ポテンシャル(現システム)



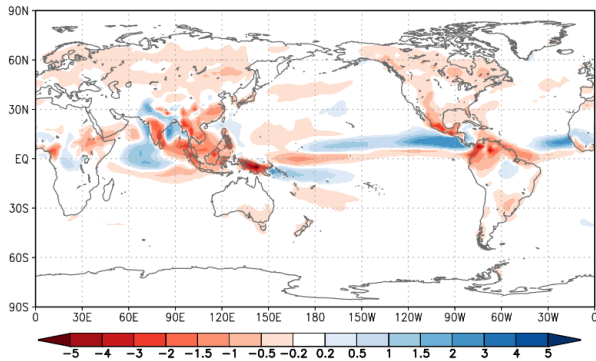
(c) 降水量(旧システム)



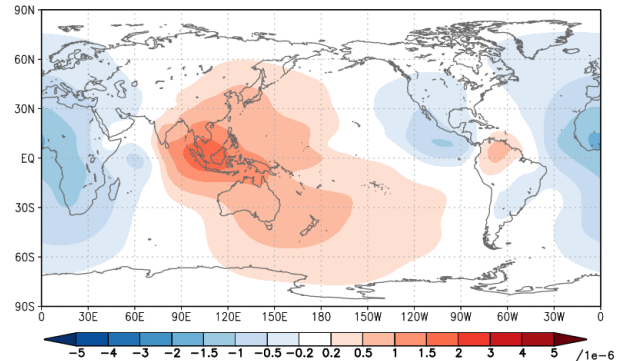
(d) 200hPa 速度ポテンシャル(旧システム)



(e) 降水量(現システム-旧システム)



(f) 200hPa 速度ポテンシャル(現システム-旧システム)



第 1.4-1 図 夏期間における、降水量[単位:mm/day] 及び 200hPa 速度ポテンシャル[単位: $10^6\text{m}^2/\text{s}$]の平均誤差(陰影)とモデル平年値(等値線)(予測 3~30 日目の 28 日平均)

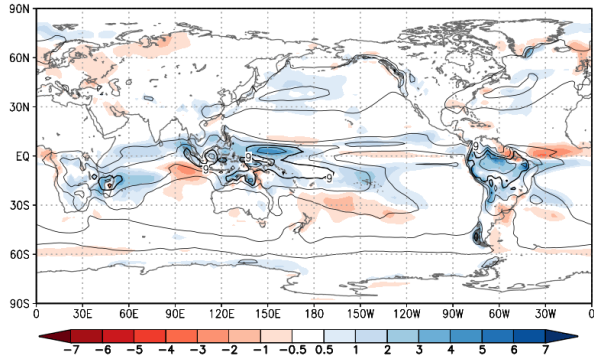
(a) (c) の等値線間隔は 3mm/day 、(b) (d) の等値線間隔は $3 \times 10^6\text{m}^2/\text{s}$ 。

ては明瞭な改善となった。領域別に見ると熱帯での改善が顕著で、200hPa 速度ポテンシャルに加えて対流圏上・下層の東西風や対流圏下層気温など、多くの要素で予測精度が向上した(図略)。これらの改善は予報モデルの更新による寄与に加えて、予測後半の改善は 2 段階 SST 法の導入(第 1.2 節)による効果も大きいと考えられる。一方、日本を含む北西太平洋領域では、多くの要素で予測精度に有意な変化は見られなかった(第 1.4-6 図)。熱帯季節内振動の予測特性については、第 1.4-7 図に示す MJO の初期位相が海洋大陸付近にある場合の予測について、対流活発

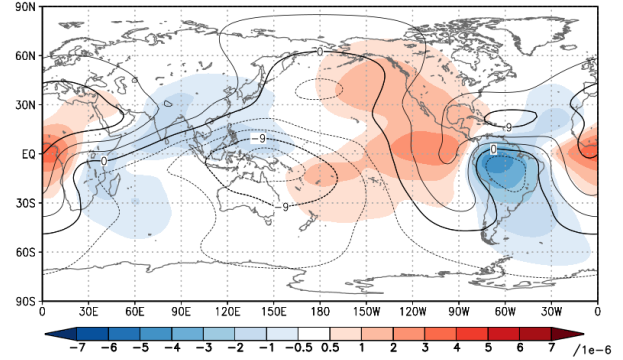
域の東進が解析に近づく傾向が見られた。MJO 指数の予測精度については、第 1.2 節で述べた 2 段階 SST 法の導入における実験結果と同様に、予測期間の後半を中心に改善傾向が見られた(図略)。

第 1.4-8 図に、 $5^{\circ}\text{S}\sim 5^{\circ}\text{N}$ の領域で平均した 30hPa 帯状平均東西風について、現システム、旧システムによる予測と JRA-55 との比較を示す。旧システムでは西風位相の初期値からの予測において、東風に変わるタイミングが JRA-55 と比べて早い傾向が見られていたが、現システムでは予報モデルの改良によりこの誤差傾向が軽減された。

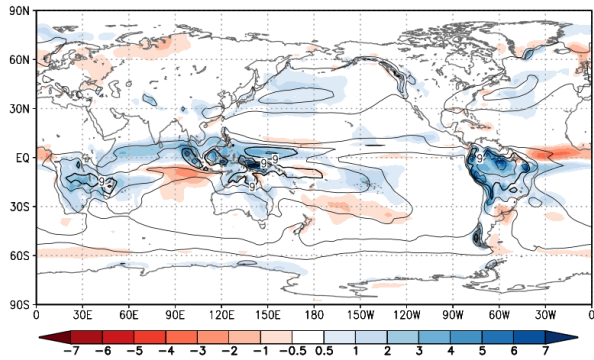
(a) 降水量 (現システム)



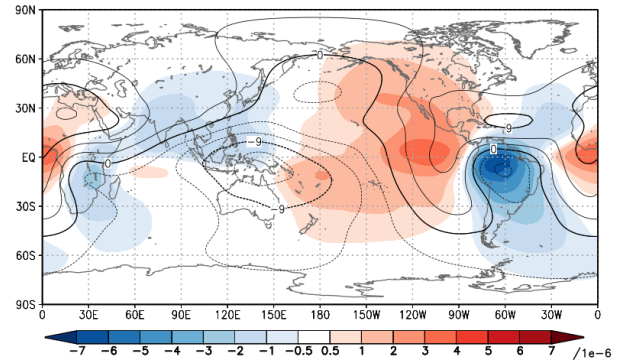
(b) 200hPa 速度ポテンシャル (現システム)



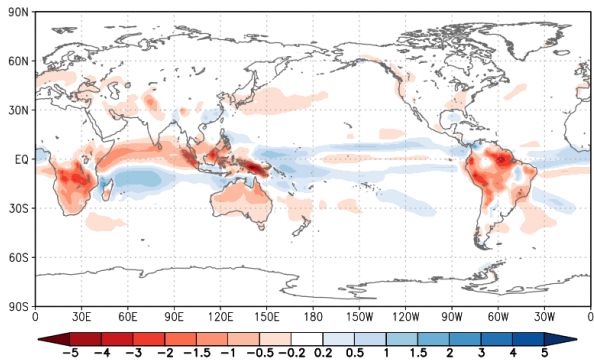
(c) 降水量 (旧システム)



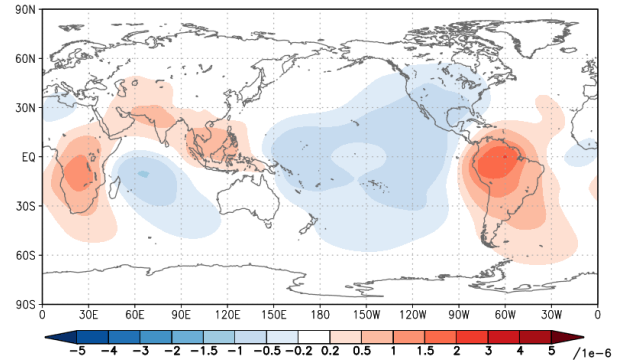
(d) 200hPa 速度ポテンシャル (旧システム)



(e) 降水量 (現システム-旧システム)

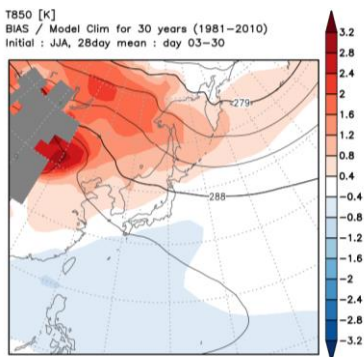


(f) 200hPa 速度ポテンシャル (現システム-旧システム)

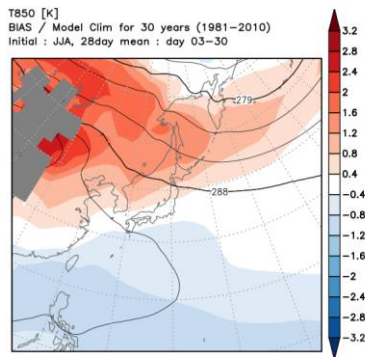


第 1.4-2 図 第 1.4-1 図と同じ。ただし、季節は冬期間。

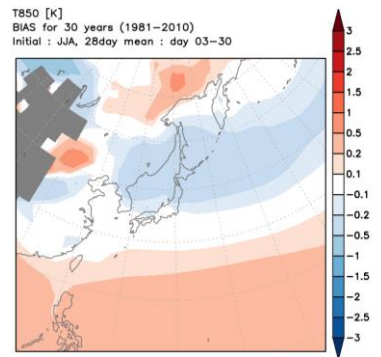
(a) 現システム



(b) 旧システム



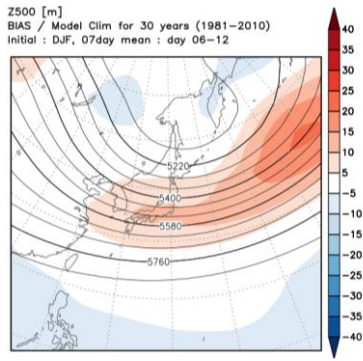
(c) 現システム-旧システム



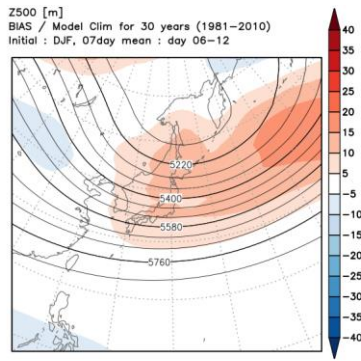
第 1.4-3 図 夏期間における、850hPa 気温[単位:K]の平均誤差(陰影)とモデル平年値(等値線)(予測 3~30 日目の 28 日平均場)

(a) (b) の等値線間隔は 3K。また、標高 1500m 以上の領域に灰色のマスキングをかけている。

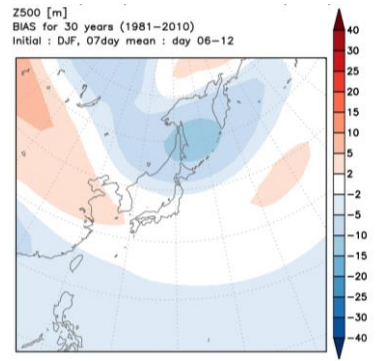
(a) 現システム



(b) 旧システム



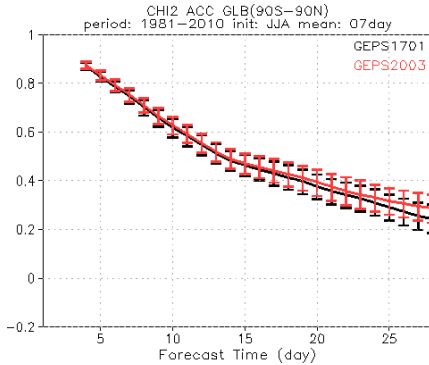
(c) 現システム-旧システム



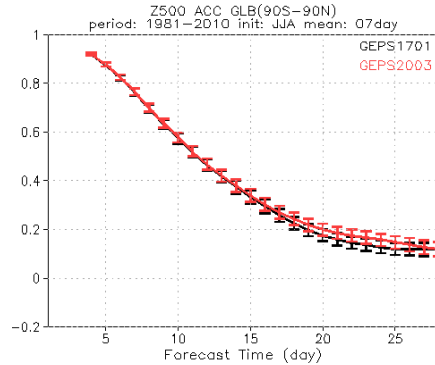
第 1.4-4 図 冬期間における、500hPa 高度[単位:m]の平均誤差(陰影)とモデル平年値(等値線)(予測 6~12 日目の 7 日平均場)

(a) (b) の等値線間隔は 60m。

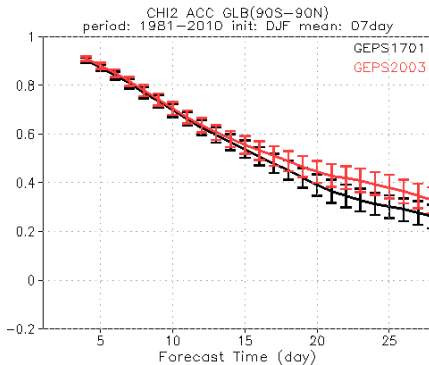
(a) 200hPa 速度ポテンシャル(夏期間)



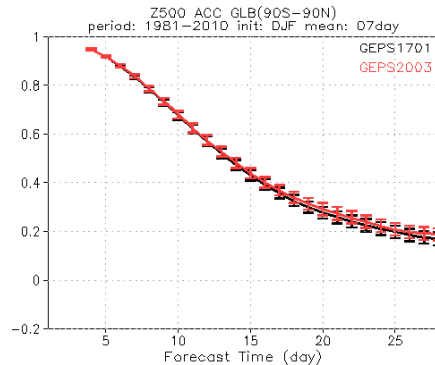
(b) 500hPa 高度(夏期間)



(c) 200hPa 速度ポテンシャル(冬期間)



(d) 500hPa 高度(冬期間)



第 1.4-5 図 全球(90°S~90°N)を対象とした、(a)(c)200hPa 速度ポテンシャル及び(b)(d)500hPa 高度のアノマリー相関係数の予報時間における変化(7 日平均場)

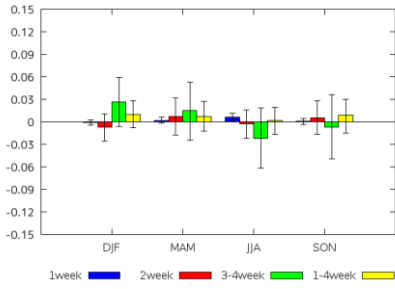
黒線は旧システム、赤線は現システムの系統誤差補正後のアノマリー相関係数で、ブートストラップ法で見積もった 95%信頼区間を誤差棒で表記している。横軸は予報時間[day]で、7 日平均の中心日を示す。

1.4.4 まとめ

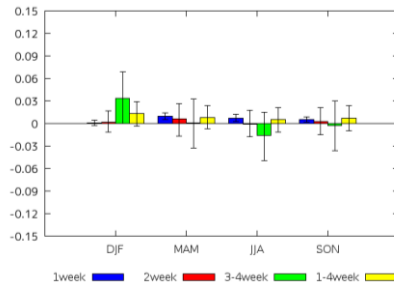
本節では、再予報の検証結果に基づく現システムの平均誤差特性や予測精度・予測特性について、旧システムと比較した結果を述べた。現システムでは、予報モデルの更新と 2 段階 SST 法の導入により、旧システムで課題となっていた平均誤差特性の一部に改善

が見られるとともに、熱帯を中心として予測精度が改善した。しかしながら、夏期間においてフィリピンを中心とした大規模上層発散が弱い傾向や、ユーラシア大陸を中心とした対流圏下層の高温傾向は引き続き見られた。日本を含む北西太平洋領域では、多くの要素で予測精度に有意な変化は見られなかった。

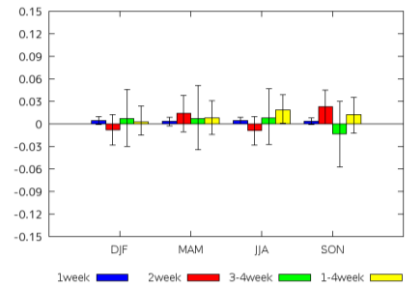
(a) 500hPa 高度



(b) 850hPa 気温



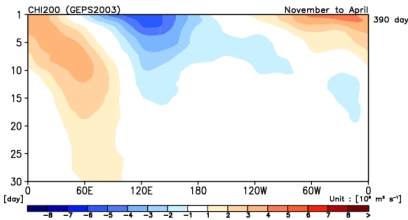
(c) 海面更正気圧



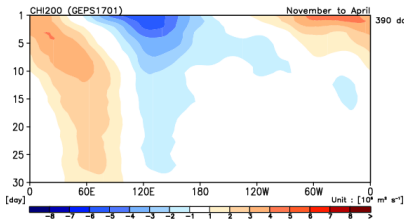
第 1.4-6 図 北西太平洋域(100°E~180°E,0°~60°N)を対象とした、季節別のアンノリー相関係数の差(現システム-旧システム)

グラフの青線は予測 1 週目、赤線は予測 2 週目、緑線は予測 3~4 週目、黄線は予測 1~4 週目における系統誤差補正後のアンノリー相関係数の差(現システム-旧システム)で、正の値は精度が改善していることを意味する。あわせて、ブートストラップ法で見積もった 95%信頼区間を誤差棒で示している。横軸は検証対象の季節(DJF:冬期間、MAM:春期間、JJA:夏期間、SON:秋期間)を示している。

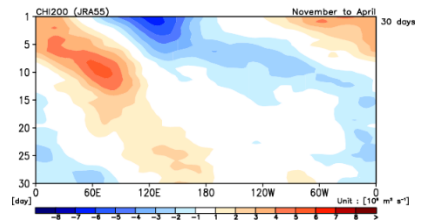
(a) 現システム



(b) 旧システム



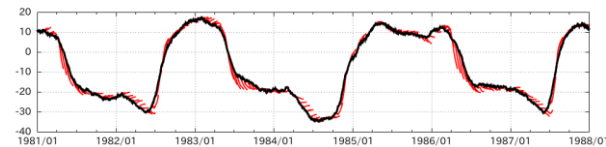
(c) JRA-55



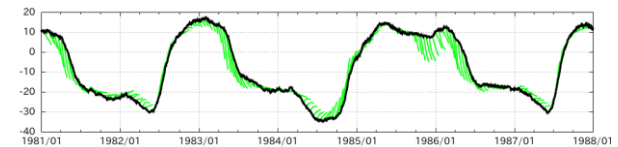
第 1.4-7 図 MJO の初期位相が 4(海洋大陸付近)かつ振幅が 1 よりも大きい事例について、15°S~15°N の領域で緯度平均した 200hPa 速度ポテンシャル偏差[単位:10⁶m²/s]の経度-時間断面図

(a) (b)は 12 初期日(10/31~4/15)の予測を対象としている。

(a) 現システム



(b) 旧システム



第 1.4-8 図 5°S~5°N の領域で平均した 30hPa 帯状平均東西風[単位:m/s]の時系列(1981 年 1 月~1987 年 12 月)

黒線は JRA-55、(a)の赤線は現システムの各初期日からの予測(アンサンブル平均)、(b)の緑線は旧システムの各初期日からの予測(アンサンブル平均)をそれぞれ示す。

参考文献

気象庁地球環境・海洋部, 2017: 1 か月予報システムの更新 ~ 全球アンサンブル予報システムの運用開始 ~. 平成 28 年度季節予報研修テキスト, 81pp.

古林慎哉, 太田行哉, 原田やよい, 海老田綾貴, 守谷昌巳, 小野田浩克, 大野木和敏, 釜堀弘隆, 小林ちあき, 遠藤洋和, 宮岡健吾, 高橋清利, 2015: 気象庁 55 年長期再解析(JRA-55)の概要. 平成 26 年度季節予報研修テキスト, 気象庁地球環境・海洋部, 66-115.

関口亮平, 2017: モデル平年値と平均誤差. 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, 12-17.

米原仁, 佐藤均, 下河邊明, 2019: 性能評価試験. 数値予報課報告・別冊第 65 号, 気象庁予報部, 114-120.

Adler, R. F., G. J. Huffman, A. Chang, R. Ferraro, P. P. Xie, J. Janowiak, B. Rudolf, U. Schneider, S. Curtis, D. Bolvin, A. Gruber, J. Susskind, P. Arkin, and E. Nelkin, 2003: The Version-2 Global Precipitation Climatology Project (GPCP) monthly precipitation analysis (1979-present). *J. Hydrometeorol.*, **4**, 1147-1167.

Yonohara, H., C. Matsukawa, T. Nabetani, T. Kanehama, T. Tokuhira, K. Yamada, R. Nagasawa, Y. Adachi, and R. Sekiguchi, 2020: Upgrade of JMA's Operational Global Model. *CAS/JSC WGNE Res. Activ. Atmos. Oceanic Modell.*, 6.19-6.20

1.5 今後の開発と方向性¹

1.5.1 はじめに

第 1.2 節から第 1.4 節では、2020 年 3 月に更新された全球 EPS の改良のうち、2 段階 SST 法を中心に解説し、また再予報で用いるアンサンブルメンバー数増強の効果とその再予報による全球 EPS 全体としての予測精度の評価結果を紹介した。

2 段階 SST 法に対しては、米国環境予報センター (NCEP) において延長予報の改善を目的としたアンサンブル予報システムへの適用が報告されており (Zhu et al. 2018)、また、現時点の計算機資源でもすぐに取り組めるメリットがあった。しかし、更なる予測精度の向上のためには、海洋内部の変動をより現実的に表現できる大気海洋結合化が必要となる。実際、外国気象機関の動向に目を向けると、全球 EPS の予測対象である季節内～季節スケールを予測するモデルは、その多くが大気海洋結合モデルとして運用されている。

最近ではカナダ気象局 (ECCC: Smith et al. 2018) や欧州中期予報センター (ECMWF) が現業の高解像度決定論全球モデルに対する大気海洋結合化を行った。また、英国気象局 (UKMO) でも 2016 年に策定した 5 年開発計画に従い、大気海洋結合化した高解像度決定論モデルを早期に現業利用すべく開発を進めている。季節内から季節スケールを対象とする S2S (Subseasonal to Seasonal) プロジェクト (Vitart et al. 2017) でも海洋モデルのデータ提供と国際比較が新たに始まった。

本節では、今回の 2 段階 SST 法の導入を踏まえた全球 EPS の大気海洋結合化ステップや今後の開発と方向性について述べる。なお、全球 EPS としての将来展望については、小森と足立 (2019) も参照いただきたい。

1.5.2 全球 EPS の大気海洋結合化ステップ

2 段階 SST 法は、それ自体で全球 EPS の予測後半の精度が向上することを MJO などの事例と共に第 1.2 節で紹介した。一方で、全球 EPS の下部境界値改善の試みとして、小森と足立 (2019) では低分解能版の GSM

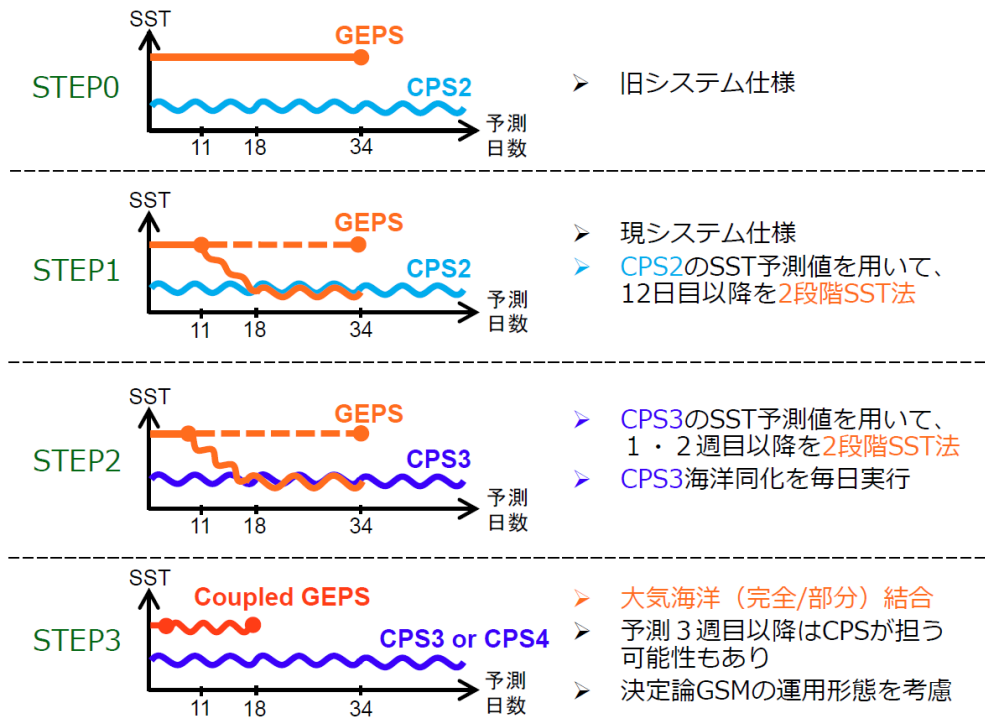
を大気海洋結合化したシステムで数日から 1 か月程度までのスケールにおける大気海洋結合化のインパクトを調査している。その結果、大気単体モデルと比較して熱帯では多くの時間スケール・要素で改善が確認されたものの、中・高緯度では中立～改悪となった。中・高緯度で改悪となった原因としては、海洋モデルの解像度不足やモデルの大気初期値を作成するデータ同化の過程で大気と海洋が結合されていないことに起因した初期ショックが挙げられている。また、この初期ショックについては予測期間において偏差固定 SST から海洋モデルで計算した SST に徐々に近づける部分結合 (Partial Coupling: Mongensen et al. 2018) という手法を用いれば緩和できることも示された。

しかしながら、海洋モデルと結合して海洋内部の変動過程を陽に計算する大気海洋結合化では、予測モデル本体の計算機資源に加えて海洋初期値作成システムなど相応のリソースが要求される。このような検討を踏まえて、全球 EPS の大気海洋結合化は、段階的にステップを踏んで予測システムの構成を変えていく開発計画を作成した (第 1.5-1 図)。この計画の中で、2020 年の 3 月に現業化された 2 段階 SST 法は STEP1 として位置付けている。

次に、次期季節アンサンブル予測システム (CPS3) で予測した SST を利用する 2 段階 SST 法を大気海洋結合化の STEP2 と位置付けた。CPS3 ではモデル本体の改良だけでなく、海洋同化を数メンバーずつ毎日実行して現業運用する計画であるため、現システムよりも新しい初期値を用いることとなり、精度向上が期待される。このため、全球 EPS において、より短い予測時間から結合モデルによる予測 SST へ緩和できる可能性がある。

さらに、計算機が更新され、現業運用の資源が増強されれば、精度評価の結果を踏まえて大気海洋結合化の実現に取り組む計画である。この時、初期ショックが問題となった場合には、部分結合の併用も検討することになり (詳細は小森と足立 (2019) を参照)、大気海洋結合化の STEP3 と位置付けた。現在、CPS3 の開発と並

¹ 小森 拓也



第 1.5-1 図 全球 EPS の大気海洋結合化に向けた開発ステップの模式図

各 STEP の横軸は予測日数、縦軸は SST の値を表す。旧システム(STEP0)では、全球 EPS の SST は偏差固定(橙直線)、CPS2 の SST は予測値である(水色波線)。2 段階 SST 法を CPS2(STEP1)と CPS3(STEP2)を用いて適用した後、次期計算機で資源を確保できる場合には、必要に応じて初期ショックを部分結合によって緩和しながら全球 EPS を大気海洋結合化させ、3~4 週目の予測については、予測精度に依存して CPS3 または CPS4 で担う可能性や GSM の運用形態を考慮する。

行して、予測 3 週目以降の精度や GSM の運用形態(限られた時間内にプロダクト提供するために必要な計算機資源)なども考慮しながら、様々なフィージビリティスタディを進めている。

1.5.3 今後の方向性

全球 EPS が対象とする S2S 時間スケールでのシームレスな予測は、不確実性を捉えながら短期予報や防災情報に繋がる情報として、社会からの要請が益々高まっている(Robertson et al. 2020)。さらに天気予報と季節予報の架け橋の役割を担いながら、季節内予測(SubX: Pegion et al. 2019)や季節内から 10 年規模予測(S2D: Merryfield et al. 2020)などの研究プロジェクトも国際的に進められている。

このような要請に応えるべく、2020 年度末には全球 EPS のアンサンブルメンバー数を倍増し、より新しい初期時刻でのメンバー構成も考慮する計画である。特に、12UTC 初期値に関しては、18 日先まで(2 週間予報)の

アンサンブルメンバー構成が 11 日まで(週間予報)と同じになるため、これまでのようにアンサンブルメンバー構成の違いが予測結果に影響を与えることは無くなる。また鉛直層数を(モデルトップは 0.01hPa のまま)100 層から 128 層へと増強する予定である。さらに、2021 年度末には水平解像度を 18 日先までは約 27km に、それ以降は約 40km に高解像度化する計画である(第 1.5-1 表)。

2020 年 10 月には組織改編が予定されているが(「付録」参照)、全球 EPS において、その大気モデルは GSM との整合性をとりながら開発を進め、一方で海洋の下部境界条件は来年度更新予定の CPS3 と連動させ(全球 EPS を介した GSM と季節 EPS のシームレス化)、更に大気海洋(完全/部分)結合化することで、モデル開発に対する限られた人的・計算機資源を有効に使いながら、より高精度できめ細やかな情報を提供できるように取り組んでいく。

参考文献

- 小森拓也, 足立恭将, 2019: 全球 EPS の将来的な開発の方向性と展望. 平成 30 年度季節予報研修テキスト, 気象庁地球環境・海洋部, 105-109.
- Merryfield, W. J., J. Baehr, L. Batté, E. J. Becker, A. H. Butler, C. A. S. Coelho, G. Danabasoglu, P. A. Dirmeyer, F. J. Doblas-Reyes, D. I. V. Domeisen, L. Ferranti, T. Ilynia, A. Kumar, W. A. Müller, M. Rixen, A. W. Robertson, D. M. Smith, Y. Takaya, M. Tuma, F. Vitart, C. J. White, M. S. Alvarez, C. Ardilouze, H. Attard, C. Baggett, M. A. Balmaseda, A. F. Beraki, P. S. Bhattacharjee, R. Bilbao, F. M. de Andrade, M. J. DeFlorio, L. B. Diaz, M. A. Ehsan, G. Fragkoulidis, S. Grainger, B. W. Green, M. C. Hell, J. M. Infanti, K. Isensee, T. Kataoka, B. P. Kirtman, N. P. Klingaman, J.-Y. Lee, K. Mayer, R. McKay, J. V. Mecking, D. E. Miller, N. Neddermann, C. H. J. Ng, A. Ossó, K. Pankatz, S. Peatman, K. Pegion, J. Perlwitz, G. C. Recalde-Coronel, A. Reintges, C. Renkl, B. Solaraju-Murali, A. Spring, C. Stan, Y. Q. Sun, C. R. Tozer, N. Vigaud, S. Woolnough and S. Yeager, 2020: Current and Emerging Developments in Subseasonal to Decadal Prediction. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **101**, E869–E896.
- Mogensen, K., P. Browne and S. Keeley, 2018: NWP gaps and needs. *Presentation at the workshop on observations and analysis of sea surface temperature and sea ice for NWP and climate applications*, available online: <https://www.ecmwf.int/sites/default/files/elibrary/2018/17978-nwp-needs-and-gaps.pdf>
- Pegion, K., B. P. Kirtman, E. Becker, D. C. Collins, E. LaJoie, R. Burgman, R. Bell, T. DelSole, D. Min, Y. Zhu, W. Li, E. Sinsky, H. Guan, J. Gottschalck, E. J. Metzger, N. P. Barton, D. Achuthavarier, J. Marshak, R. D. Koster, H. Lin, N. Gagnon, M. Bell, M. K. Tippett, A. W. Robertson, S. Sun, S. G. Benjamin, B. W. Green, R. Bleck and H. Kim, 2019: The Subseasonal Experiment (SubX): A Multimodel Subseasonal Prediction Experiment. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **100**, 2043–2060.
- Robertson, A. W., F. Vitart and S. J. Camargo, 2020: Subseasonal to seasonal prediction of weather to climate with application to tropical cyclones. *J. Geophys. Res.*, **125**, e2018JD029375.
- Smith, G. C., J.-M. Bélanger, F. Roy, P. Pellerin, H. Ritchie, K. Onu, M. Roch, A. Zadra, D. S. Colan, B. Winter, J.-S. Fontecilla and D. Deacu, 2018: Impact of Coupling with an Ice–Ocean Model on Global Medium-Range NWP Forecast Skill. *Mon. Wea. Rev.*, **146**, 1157–1180.
- Vitart, F., C. Ardilouze, A. Bonet, A. Brookshaw, M. Chen, C. Codorean, M. Deque, L. Ferranti, E. Fucile, M. Fuentes, H. Hendon, J. Hodgson, H.S. Kang, A. Kumar, H. Lin, G. Liu, X. Liu, P. Malguzzi, I. Mallas, M. Manoussakis, D. Mastrangelo, C. MacLachlan, P. McLean, A. Minami, R. Mladek, T. Nakazawa, S. Najm, Y. Nie, M. Rixen, A. W. Robertson, P. Ruti, C. Sun, Y. Takaya, M. Tolstykh, F. Venuti, D. Waliser, S. Woolnough, T. Wu, D.-J. Won, H. Xiao, R. Zaripov, and L. Zhang, 2017: The Sub-seasonal to Seasonal Prediction (S2S) Project Database. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **98**, 163-176.
- Zhu, Y., X. Zhou, W. Li, D. Hou, C. Melhauser, E. Sinsky, M. Peña, B. Fu, H. Guan, W. Kolczynski, R. Wobus and V. Tallapragada, 2018: Toward the improvement of subseasonal prediction in the National Centers for Environmental Prediction Global Ensemble Forecast System. *J. Geophys. Res.*, **123**, 2018JD028506.

		現システム	2020年度末	2021年度末
11日先 まで	解像度	水平約40km 鉛直100層	水平約40km 鉛直128層	水平約27km 鉛直128層
	メンバー数 /初期時刻	27 /00,06,12,18	51 /00,06,12,18	51 /00,06,12,18
18日先 まで	解像度	水平約40km 鉛直100層	水平約40km 鉛直128層	水平約27km 鉛直128層
	メンバー数 /初期時刻	13 /00,12	51 /12	51 /12
	LAFメンバー数	26	—	—
1か月先 まで	解像度	水平約55km 鉛直100層	水平約55km 鉛直128層	水平約40km 鉛直128層
	メンバー数 /初期時刻	13 /00,12	25 /12	25 /12
	LAFメンバー数	52 (うち2は予備)	50	50

第 1.5-1 表 全球 EPS の解像度とアンサンブルメンバー数の増強計画

2020 年度末にはアンサンブルメンバー数を倍増し、なるべく新しい初期値でのメンバー構成にする。また鉛直層数をモデルトップは 0.01hPa のまま 100 層から 128 層へと増強する予定である。さらに、2021 年度末には水平解像度を 18 日先までは約 27km に、それ以降は約 40km に高解像度化する計画である。

1.6 2週間気温予報、早期天候情報及び1か月予報のためのガイダンスの更新¹

1.6.1 はじめに

ガイダンスとは、数値予報モデルの出力結果に含まれる誤差を軽減し、数値予報モデルの出力にはない要素へと翻訳するなどして、予報作業を支援するものである。たとえば、季節予報では確率予報を提供するため、アンサンブル予報の各メンバーを利用して、ガイダンスで予測確率に翻訳している。このような翻訳を行うため、ガイダンスでは過去のデータを用いて学習を行い、予測に必要なパラメータを学習している。

このパラメータの学習方法について、ガイダンスには大きく分けて2つの型がある。ひとつはパラメータを随時更新するもの(逐次学習型と呼ばれる)、もうひとつはパラメータを固定するもの(一括学習型)である。短期・週間天気予報のための多くのガイダンスは逐次学習が採用されている一方で、季節予報のためのガイダンスには再予報と観測データの統計的関係から事前に予測式を一括で求める一括学習型を採用している。これは、季節予報のためのガイダンスは予報期間が長く、逐次学習による最適化のタイミングが遅れてしまうためである。今回、全球 EPS が更新されたことに合わせて、全球 EPS を入力とする一括学習型の季節予報ガイダンス(2週間気温予報、早期天候情報及び1か月予報のためのガイダンス)のパラメータ更新を行った。合わせて、使いやすさを重視したガイダンスの仕様等の変更も行った。本節ではこれらのガイダンスの更新について説明する。

以下、第 1.6.2 項では、ガイダンスの作成手法について、今回の更新で手法を変更した部分を中心に述べる。第 1.6.3 項では、各ガイダンスの精度について説明する。最後に第 1.6.4 項でまとめる。

なお、本節では、特に断りのない限り旧システムのガイダンスを「旧ガイダンス」、現システムのガイダンスを「現ガイダンス」と呼ぶことにする。

1.6.2 ガイダンス作成手法の変更点

季節予報ガイダンスは、再予報データと実況データを用いて学習した予測式を用いる。2週間気温予報ガイダンスと1か月予報ガイダンス(以下、1か月予報等ガイダンス)については線形重回帰(田中ほか, 2017)、大雪早期天候情報ガイダンスはロジスティック回帰(住友ほか, 2020)が使われている(第 1.6-1 表)。各ガイダンスでは予報対象地域(第 1.6-2 表)ごとに予測が計算されるほか、1か月予報及び2週間気温予報ガイダンスにおいては地点(田中ほか, 2017; 平井と伊藤, 2019)についての予測が計算される。

本項では、今回の更新で変更したガイダンス作成手法について解説する。ここで記述していないことについては、1か月予報等ガイダンスについては田中ほか(2017)や平井と伊藤(2019)を、大雪早期天候情報ガイダンスは住友ほか(2020)を参照いただきたい。

(1) 説明変数

ガイダンスの学習のために再予報データを用いるが、現システムから再予報の仕様変更となった。旧システムでは各月 3 初期値(各月 10 日、20 日、月末)、1年で 36 初期値であったが、現システムからは各月 2 初期値(各月 15 日、月末)、1年で 24 初期値と初期値の数が減った代わりにメンバー数が 5 メンバーから 13 メンバーに増強されている(第 1.6-3 表)。その他、再予報仕様の詳細については第 1.3 節を参照いただきたい。なお、この仕様変更に伴い、ガイダンス作成時には、アンサンブル平均の精度向上による回帰係

第 1.6-1 表 各ガイダンスの予報要素と平均期間

種類	回帰手法	平均期間	目的変数
2週間気温予報	線形回帰	5日間	平均・最高・最低気温(※)
1か月予報	線形回帰	7・14・28日間	平均気温、降水量、日照時間、降雪量
大雪早期天候情報	ロジスティック回帰	5日間	降雪量が「かなり多い」となるか否か

※最高・最低気温は、日最高気温、日最低気温を5日間平均したもの

¹ 伊藤 晋悟, 住友 雅司, 伊藤 明

第 1.6-2 表 予報対象地域

全般予報区	地方予報区(細分子報区)
北日本	北海道地方(北海道日本海側、北海道太平洋側、北海道オホーツク海側)
北日本日本海側	東北地方(東北日本海側、東北太平洋側、東北北部、東北南部)
北日本太平洋側	
東日本	関東甲信地方、長野県北部・群馬県北部(※)
東日本日本海側	北陸地方
東日本太平洋側	東海地方、岐阜県山間部(※)
西日本	近畿地方(近畿日本海側、近畿太平洋側)
西日本日本海側	中国地方(山陰、山陽)
西日本太平洋側	四国地方
	九州北部地方
	九州南部・奄美地方(九州南部、奄美地方)
沖縄・奄美	沖縄地方

※長野県北部・群馬県北部と岐阜県山間部は大雪に関する早期天候情報のみ

第 1.6-3 表 現・旧システムでの再予報の仕様の違い

種類	1年あたりの初期値	メンバー数
旧システム	36 初期値	5 メンバー
現システム	24 初期値	13 メンバー

期値を用いたほうが予測精度が高いことが確認されたため、現ガイダンスでも前後 2 初期値を用いることとした。ただし、1 か月予報の降雪量に関しては、前後 1 初期値のほうが精度が高かったため、前後 1 初期値を用いることとした。

数の誤差軽減に加えて、各メンバーの予報値を考慮した手法の検討を行うことが可能となった。

(2) 2 週間気温予報と 1 か月気温予報ガイダンス

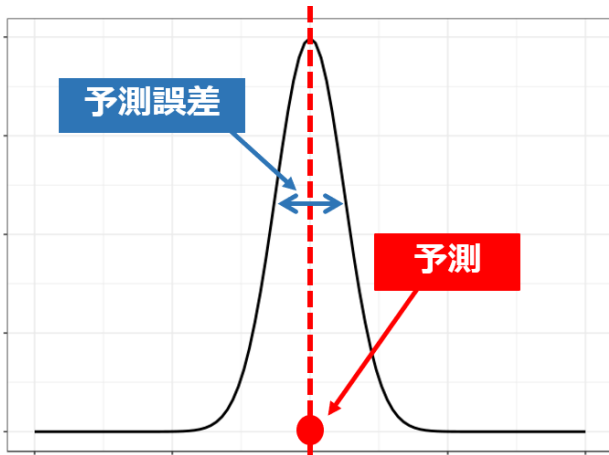
ア サンプリング期間の検討

1 か月予報等ガイダンスでは線形重回帰で係数を推定し、説明変数として再予報の予測値を、目的変数として各地域の観測値を用いる。また、対象地域(または地点)、リードタイム、再予報の初期値ごとに予測式を作成している。ただ、それぞれのデータのみで学習すると、30 サンプルとかなり少ないため、係数の推定誤差が大きくなってしまふ。そこで、係数の推定精度を高めるため、旧ガイダンスにおいて、学習時は前後 2 初期値における同じリードタイムのデータを用いて(5 初期値×30 年の 150 サンプル) 予測式の作成を行っていた(田中ほか 2017)。現ガイダンスでは再予報の仕様が変わり、初期値の間隔が 10 日間程度から 15 日間程度へと広がった。そこで、最適なサンプリング期間を検討するため、前後 1 初期値と前後 2 初期値で比較を行ったところ、多くのガイダンスで前後 2 初

イ 確率密度分布の作成

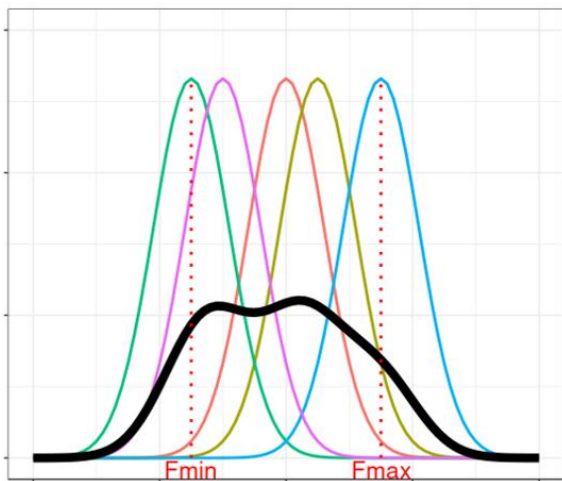
2 週間気温予報や 1 か月予報は確率で予報を行っているため、ガイダンスも確率値で表現する必要がある。ここでは、現ガイダンスにおける確率密度分布の作成手法について説明する。なお、簡単のため、ここでは 1 か月予報ガイダンスの作成方法についてのみ述べる。2 週間気温予報ガイダンスについては、用いるメンバー数を 50 メンバーから 26 メンバーに読み替えていただきたい。

ガイダンスの確率分布は、複数の正規分布を仮定し、それらの正規分布を重ね合わせて作成する。正規分布の平均値は予測式によって得られた予測値、標準偏差は平均的な予測誤差とする(第 1.6-1 図)。旧ガイダンスでは、50 メンバーから 5 メンバーの組を 10 組取り出し、それぞれのアンサンプル平均に予測式を適用して正規分布を求め、その 10 組の正規分布を重ね合わせて確率分布を作成してきた。現ガイダンスでは、メンバーそれぞれの表現をより抽出できるよう、メンバーごとに正規分布を適用する EKDMOS(Ensemble



第 1.6-1 図 メンバーごとの正規分布

現ガイダンスではメンバーごとに正規分布を仮定する。正規分布のパラメータは、平均値は予測式で補正した予測値、標準偏差は予測誤差を用いる。

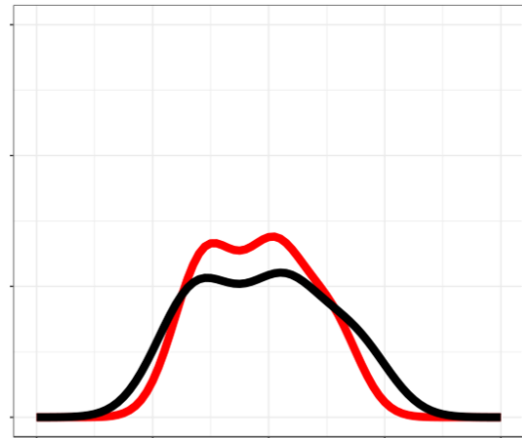


第 1.6-2 図 正規分布の重ね合わせ

メンバーごとに推定した正規分布（各色）を重ね合わせて、ガイダンスの確率分布（黒線）を作成する概念図。また、予測値の最小値が F_{min} 、最大値が F_{max} となる。なお、ここでは見やすさのため 5 メンバーの例を示したが、実際は 50 メンバー（2 週間気温予報では 26 メンバー）の重ね合わせとなる。

Kernel Density Model Output Statistics, Glahn et al., (2009)を採用した。

EKDMOS では、学習時、旧ガイダンスと同様にアンサンブル平均を用いて予測式の推定を行うが、この予測式をメンバーごとに適用し、正規分布をメンバー数だけ推定する（第 1.6-2 図）。ひとまず、このメンバーの



第 1.6-3 図 確率分布の補正

正規分布の重ね合わせで作成した確率密度分布（黒線）を分布の中心方向に $1-x$ 近づけた確率分布（赤線）を算出する。言い換えると、分布の中心からの距離に x をかけて、分布を縮める、ということ。

数だけできた正規分布を重ね合わせて確率密度分布を作成する。

このようにして作成した確率密度分布は分散が過剰となるため、補正が必要である（Glahn et al., 2009）。分布の補正は、以下の式で計算される x を分布の中央からの距離にかけて、分布を縮めることで行われる（第 1.6-3 図）。

$$x = \frac{3(\sigma_{min} + \sigma_{max}) + sf(F_{max} - F_{min})}{3(\sigma_{min} + \sigma_{max}) + (F_{max} - F_{min})}$$

ここで、 $\sigma_{max}, \sigma_{min}$ は予測される分散の最大値、最小値²、 F_{max}, F_{min} は予測式で補正された各メンバーの予測値 μ の最大値、最小値（第 1.6-2 図）、 sf はハイパーパラメータである。Glahn et al. (2009) は、 sf は 0.4 または 0.5 が良いとしており、今回は精度を確認し、地域平均ガイダンスでは 0.5、分布の広がりやすい地点ガイダンスでは 0.4 を採用した。

ウ 説明変数の検討

旧ガイダンスでは、線形重回帰式の説明変数として 2 または 3 つのデータを使用してきた。一般に、線形重回帰を用いる場合、各説明変数と目的変数の相関は大きく、説明変数間の相関は小さいことが望ましい。しかし、たとえば気温を予測する場合、説明変数の一

² 1 か月予報等ガイダンスでは、簡単のため、 $\sigma_{max} = \sigma_{min}$ としている。

第 1.6-4 表 現ガイドンスでの説明変数

使用する説明変数に○をつけている。表中の略称は、Ts:地上気温、T925:925hPa 気温、Tmax:日最高気温、Tmin:日最低気温、CLA:全雲量、Rain:降水量、NE700:700hPa 北東風、NW700:700hPa 北西風、RH700:700hPa 相対湿度、 ω 700:700hPa 上昇流、T5-T9:500hPa 気温と 925hPa 気温の差、T7-T9:700hPa 気温と 925hPa 気温の差、北:北日本、北日:北日本日本海側、東日:東日本日本海側、東太:東日本太平洋側、西日:西日本日本海側、沖奄:沖縄・奄美、北海道日:北海道日本海側、東北日:東北日本海側、群北・長北:群馬県北部・長野県北部、岐阜山:岐阜県山間部、近畿日:近畿日本海側。Rain は 5 日間積算、その他は 5 日間平均したもの。説明変数は、Rain は平年比、その他の要素は平年差を用いた。

気温	Ts	T925	Z500	日照時間	CLA	NE700	NW700
沖奄(春)		○		全地域(春～秋)	○		
沖奄(夏)	○		○	北・東日(冬)	○	○	
上記以外	○(※)			上記以外(冬)	○		○

※最高・最低気温は Tmax、Tmin を使用

降水量	Rain	降雪量	Ts	T700	RH700	ω 700	T5-T9	T7-T9
全地域・全期間	○	北日 (北海道日を除く)	○		○			
		北海道日		○		○		
		東日	○			○	○	
		東太 (群北・長北、 岐阜山)		○		○		
		西日	○			○		○

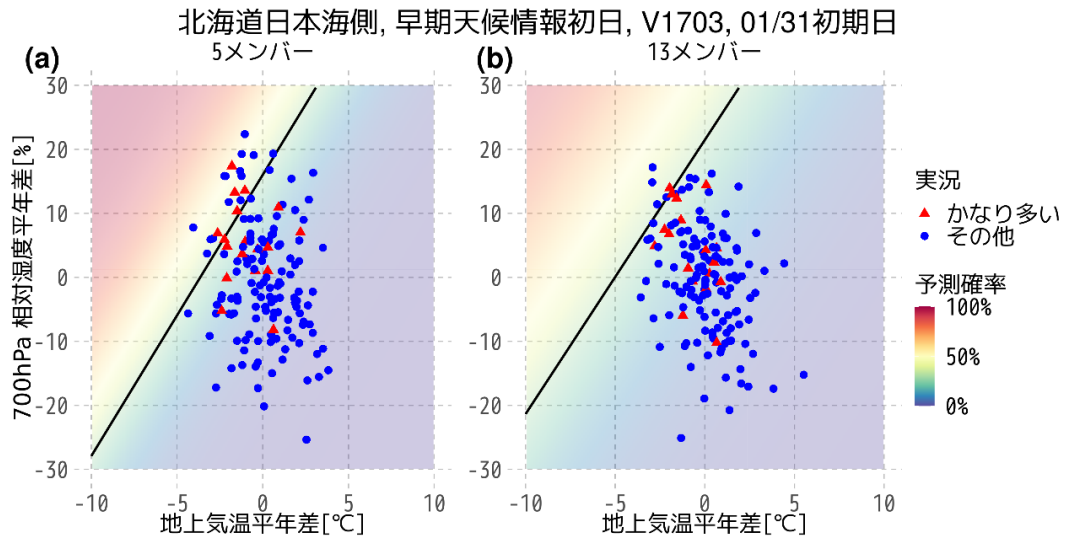
つとしてモデルの地上気温(以下、Ts)を用いると、他の説明変数の検討時には、目的変数である気温と相関が大きい、Ts とは相関が小さいものを探すという、一見矛盾した命題をクリアしなければならない。この命題のクリアは難しく、実際、旧ガイドンスでは、目的変数と相関の小さい説明変数が選択されている予測式もあった。その相関の小さい説明変数の係数は値が小さいものの、モデルの値が十分に大きくなったときには予測に対する寄与が大きくなる。たとえば、気温の予測式で最も相関の高い説明変数 Ts が弱い負偏差でも、別の説明変数の値が極端に大きいと気温の予測値は正偏差になりえる。その結果、モデルの結果からはガイドンスの結果が容易に解釈できず、使いづらいガイドンスとなってしまう。そこで、現ガイドンスでは使いやすさを重視し、モデルに目的変数と同じ、または似た要素がある気温、降水量、日照時間は出来る限り単回帰を目指した。重回帰と単回帰で精度

比較したところ、多くの地域で重回帰と単回帰は同程度の精度であることが確認できた。ただし、一部の地域では精度の低下がみられたため、そのような地域では現状と同じく重回帰を採用している。一方、降雪量についてはモデルの要素に直接対応するものがないため、従来通り、2 または 3 つの説明変数を使った重回帰を採用した。現ガイドンスで採用した説明変数を第 1.6-4 表に示す。

(3) 大雪早期天候情報ガイドンス

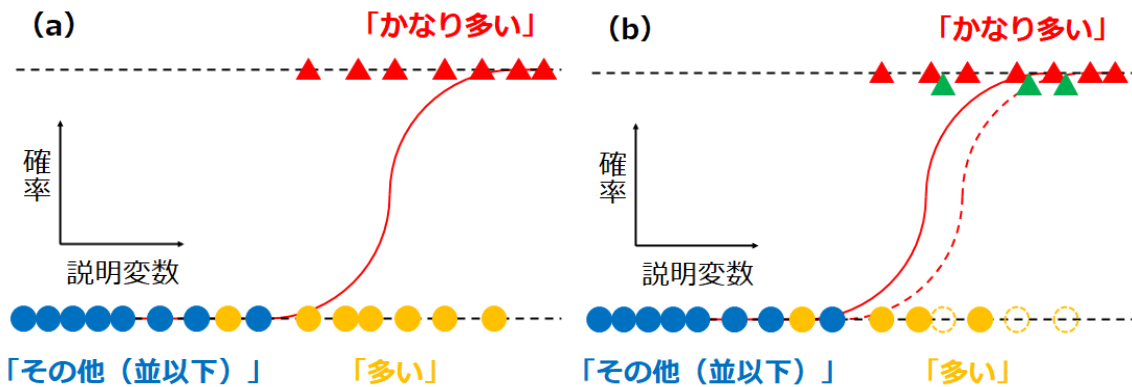
第 1.6-1 表で示した通り、大雪早期天候情報ガイドンスは他の季節予報ガイドンスに用いられている線形回帰ではなく、ロジスティック回帰を採用している(住友ほか, 2020)。これにより、降雪量が「かなり多い」確率を予測するのに特化したガイドンスを作成でき、旧ガイドンスでは線形回帰より適合率・捕捉率³が改善した。しかし、この手法をそのまま新システムに適用する

³ 適合率・捕捉率については、1.6.3 項を参照。



第 1.6-4 図 再予報仕様の違いによる予測確率と実況の散布図

北海道日本海側における、早期天候情報初日の説明変数と降雪量の階級(赤:かなり多い、青:その他)。モデルは全球 EPS1703、初期値は 1 月 31 日で、(a)が 5 メンバー、(b)が 13 メンバー。陰影はロジスティック回帰による予測確率(黒実線は発表基準の 30%)。



第 1.6-5 図 ロジスティック回帰の模式図

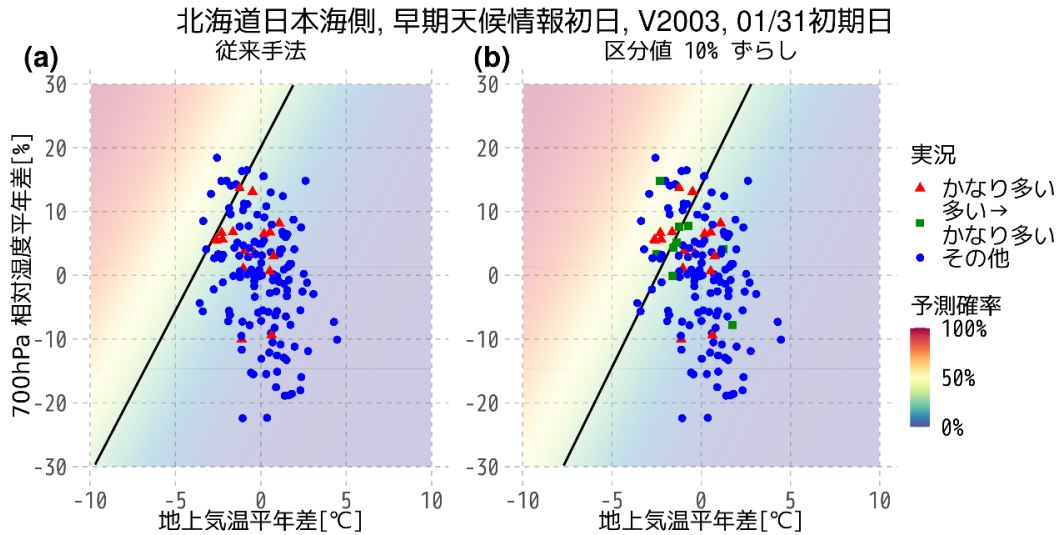
(a)が従来手法、(b)が「かなり多い」区分値から 10%以内の「多い」事例を「かなり多い」として学習した手法を示す。赤点が「かなり多い」事例、黄点が「多い」事例、緑点が「かなり多い」区分値から 10%以内の「多い」事例、青点が「その他(並以下)」事例を示す。

と、北海道日本海側で精度が低下した。これは、再予報の仕様変更に伴い、学習に使うサンプルが変わったことが一つの要因と考えられる。

このことを確認するため、旧システムを用いて再予報仕様の違いによる比較を行った。それぞれの仕様における、1 月 31 日初期値における早期天候情報初日の説明変数と降雪量階級の散布図を第 1.6-4 図に示す。旧仕様(第 1.6-4 図(a))では、低温・多湿になるに従い「かなり多い」事例が多くなっていることが確認できる。一方、新仕様(第 1.6-4 図(b))では、その傾向が弱く、確率(第 1.6-4 図陰影)の変化が旧仕様に比べ緩やかであることが確認できる。ロジスティック回

帰で予測を行う場合、「かなり多い」とそれ以外を直線(たとえば、第 1.6-4 図の黒線)で分離が必要であるが、サンプルが変わったことにより、新仕様の再予報データでは、直線で分離することが難しくなったことが示唆される。

次に、この状況を改善するためにとった対策について述べる。第 1.6-5 図にロジスティック回帰の模式図を示す。ロジスティック回帰は、降雪量を「かなり多い」と「その他(多い以下)」の 2 階級に変換して回帰をとる。そのため、「かなり多い」に至らない「多い」データも「その他」として回帰をとる(第 1.6-5(a)図)。これは「かなり多い」の予測に特化できる一方、「多い」が持つ情報



第 1.6-6 図 従来手法と区分値をずらした手法の予測確率と実況の散布図の比較

(a)が従来手法、(b)が「かなり多い」区分値から 10%以内の「多い」事例を「かなり多い」として学習した場合を示す。図の見方は第 1.6-4 図と同様。赤点が「かなり多い」事例、緑点が「かなり多い」区分値から 10%以内の「多い」事例、青点が「その他」の事例を示す。

が埋もれてしまう。第 1.6-4 (b) 図を見ると、「かなり多い」の周囲に「その他」が存在するが、この中には降雪量が数%多いと「かなり多い」になる「多い」データも存在する。そこで、「かなり多い」区分値⁴近傍の「多い」データを活かすため、「かなり多い」区分値から 10%以内の「多い」サンプルを「かなり多い」サンプルとして回帰をとることを検討した(第 1.6-5 (b) 図)。新システムを用いて、従来手法と検討手法を比較した結果を第 1.6-6 図に示す。区分値を 10%ずらすことで、第 1.6-6 (b) 図の緑四角点が新たに「かなり多い」として学習された。その結果、大雪に関する早期天候情報発表基準の 30%等値線(第 1.6-6 図黒線)が従来手法に比べ右下に移動し、大雪事例を捕捉できるようになったことが確認できる。ただし、本手法を適用すると、捕捉率は上がるが適合率が下がる。そのため、本手法を適用するか否かについて、各地域の精度を見て確認を行った。その結果、本手法の適用は、捕捉率の低下が大きい北海道日本海側のみとした。

1.6.3 精度評価

⁴ 本節では、降雪量の階級で「多い」と「かなり多い」を分ける階級区分値(気象庁, 2018)を「かなり多い」区分値と呼ぶ。

本項では前項で述べた手法によって作成した現ガイドランスと旧ガイドランスの精度比較を示す。検証は、検証対象年のみを除く交差検証(クロスバリデーション)に基づいて行った。一方、第 1.6-3 表のとおり、現ガイドランスと旧ガイドランスでは再予報データの仕様が異なるため、モデル更新前後の比較が難しい。そこで、以下では、現システムの仕様に合わせて作成した旧システムの再予報データを用いて検証を行い、比較する。

精度検証では Brier Skill Score (以下、BSS) や anomalies 相関係数 (ACC) などの指標(中三川, 2013; 大脇, 2019)のほか、カテゴリー検証においては適合率 (precision)、捕捉率 (recall)、F1 score の指標を用いた。第 1.6-5 表の分割表を用いると、これらのスコアは以下の通り定義される。

$$\text{precision} = \frac{TP}{TP+FP}$$

$$\text{recall} = \frac{TP}{TP+FN}$$

第 1.6-5 表 カテゴリー検証で用いる分割表

		実況	
		あり	なし
予測	あり	TP	FP
	なし	FN	TN

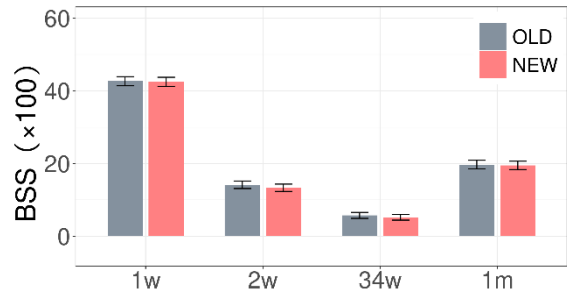
$$F1\ score = \frac{2}{\frac{1}{precision} + \frac{1}{recall}}$$

(1) 1か月予報ガイダンス

1か月予報では気温、降水量、日照時間、降雪量の要素を提供している。はじめに気温の精度について確認する。現・旧ガイダンスそれぞれにおける全季節、全地域で集計した予報対象期間ごとの気温のBSSを第1.6-7図に示す。現・旧ガイダンスを比較すると、BSSの差はほとんどなく、ほぼ同程度の精度であることがわかる。次に、季節別に比較したものを第1.6-8図に示す。現・旧ガイダンスの差について、季節による大きな違いは見られず、概ね全期間集計の結果(第1.6-7図)と同様の傾向であるが、春や冬の2週目など、現ガイダンスの精度がやや低い期間があることがわかる。このBSSの変化の原因を確認するため、春の2週目の信頼度曲線を第1.6-9図に示す。第1.6-9図によると、BSSは0.01程度低いが、これは分離度(Bres)の低下が主要因であることが確認できる。一方、信頼度曲線はほぼ対角線に沿っており、信頼度(Brel)もほぼ同程度と確率値そのものの誤差に大きな違いがないことがわかる。

次に、降水量、日照時間、降雪量についての精度を確認する。第1.6-10図に降水量、日照時間、降雪量のBSS及びACCを示す。第1.6-10図から、これらの要素では、概ね同程度～やや改善の傾向が確認できる。また、降水量、日照時間の1か月のBSSは0.05程度と確率予報としての予測精度は乏しいが、相関係数でみると+0.4程度の相関があり、「多い」「少ない」の傾向予測として用いることができる。

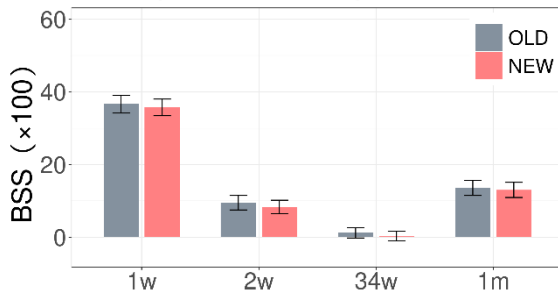
BSS (平均気温、全季節)



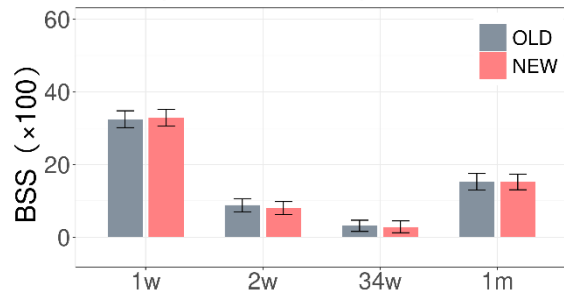
第1.6-7図 全季節全地域で集計した気温のBSS × 100の新旧精度比較

横軸は予報対象期間、1w:1週目、2w:2週目、34w:3~4週目、1m:1か月を意味する。灰色棒グラフが旧ガイダンス(OLD)、橙色棒グラフが現ガイダンス(NEW)を示す。また、ブートストラップ法で見積もった95%信頼区間を誤差棒で表記している。

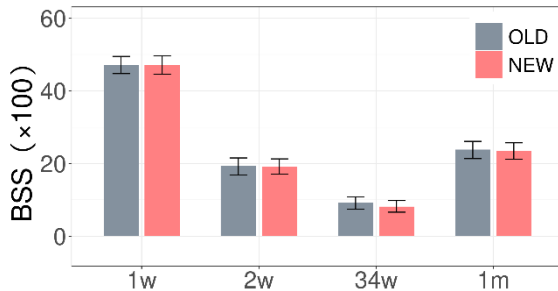
(a) BSS (平均気温、春)



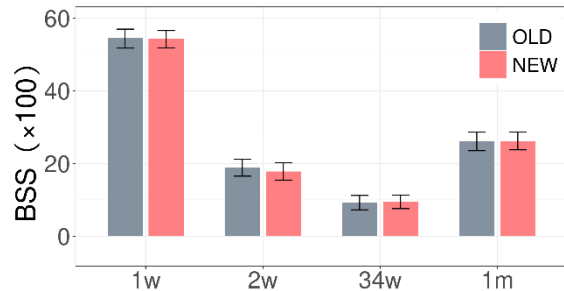
(b) BSS (平均気温、夏)



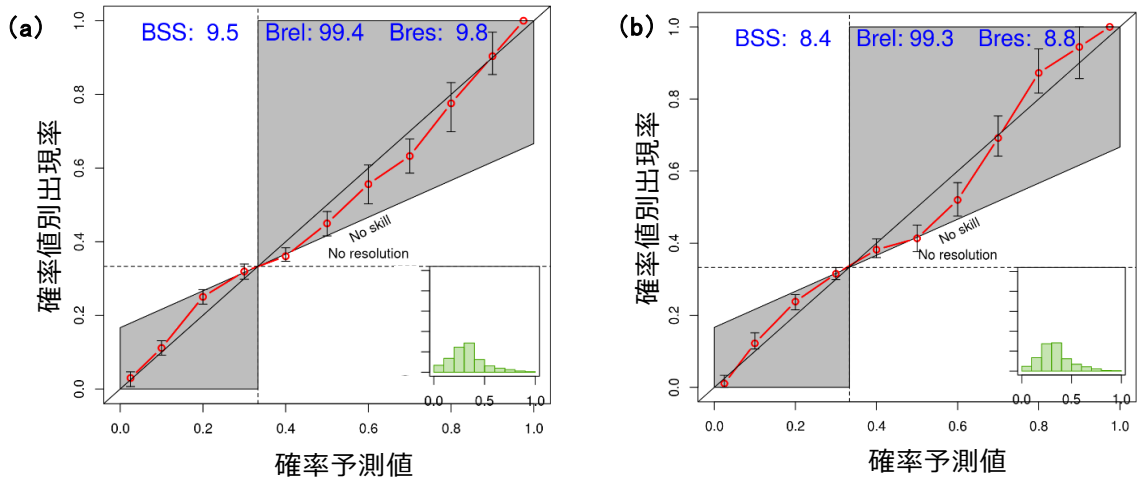
(c) BSS (平均気温、秋)



(d) BSS (平均気温、冬)

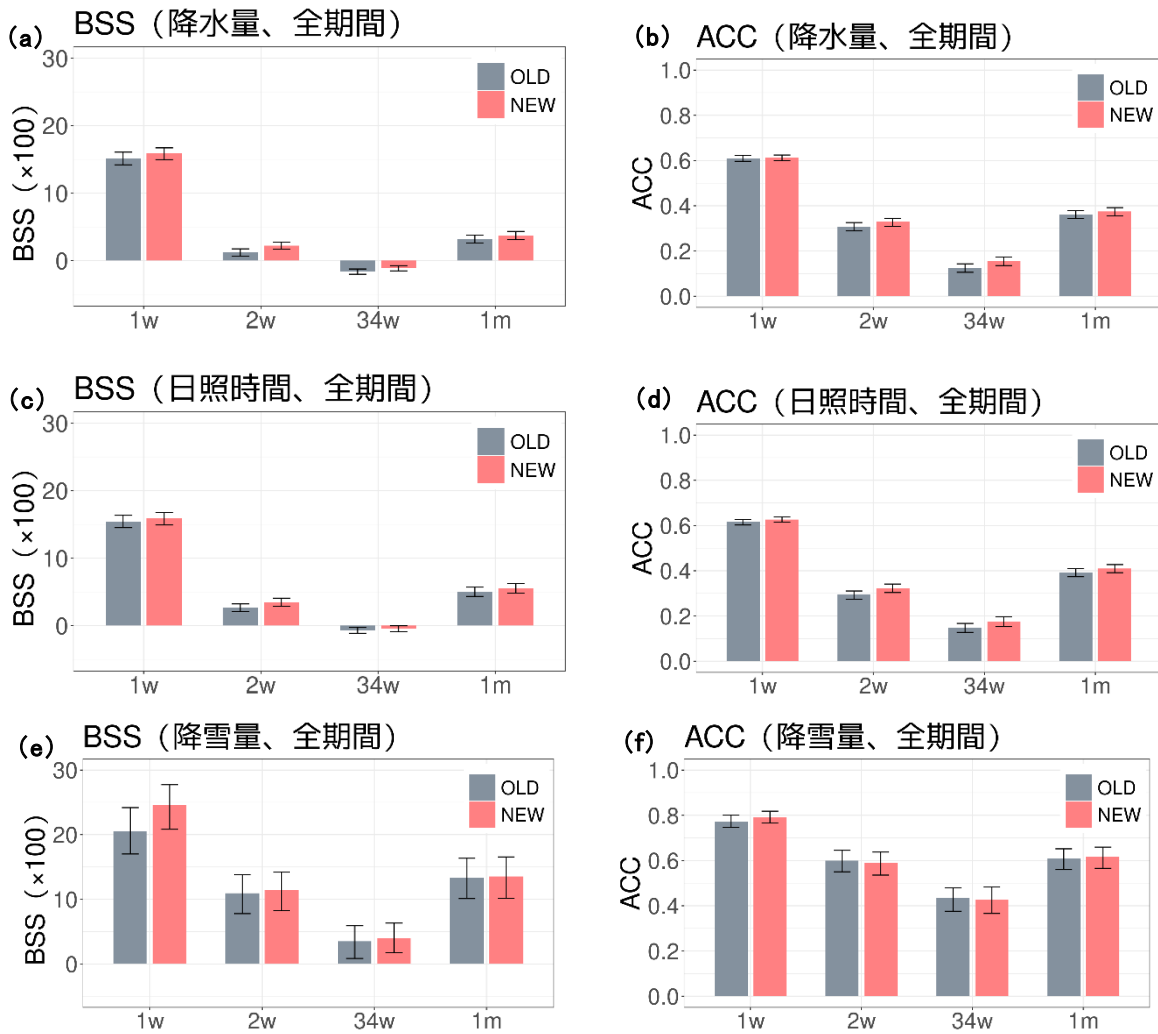


第1.6-8図 全地域季節別に集計した気温のBSS × 100の新旧精度比較
図の見方は第1.6-7図と同様。ただし、(a):春、(b):夏、(c):秋、(d):冬。



第 1.6-9 図 全季節全地域で集計した気温の信頼度曲線

(a)旧ガイドンス、(b)現ガイドンス。赤線が信頼度曲線、黒点線が気候値予報、図中右下の緑の棒グラフが予測頻度を示す。灰色領域は BSS に正の寄与を持つ。BSS は Brier Skill Score、Brel は信頼度、Bres は分離度で、それぞれのスコアの 100 倍値を示す。



第 1.6-10 図 全地域季節別に集計した降水量、日照時間、降雪量のスコアの新旧精度比較

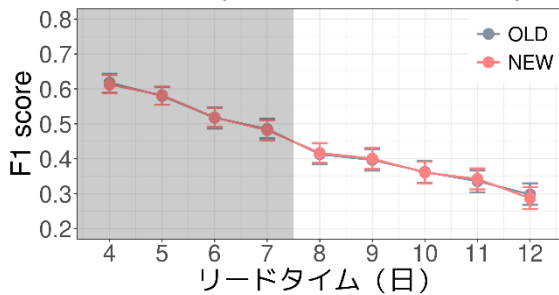
図の見方は第 1.6-7 図と同様。ただし、(a)、(c)、(e)が BSS の 100 倍値、(b)、(d)、(f)がアンノミー相関係数で、(a)、(b):降水量、(c)、(d):日照時間、(e)、(f):降雪量。

(2) 2週間気温予報ガイダンス

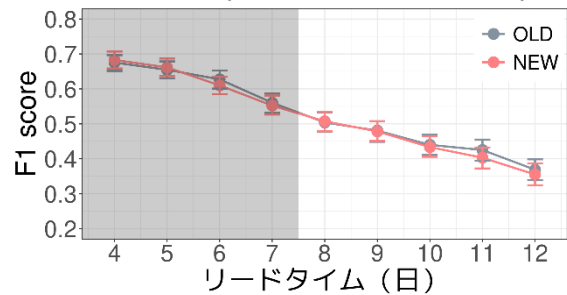
2週間気温予報では、地域平均気温に加えて、地点別気温についても提供を行っている。地域平均気温については、5日間平均値の階級(かなり高い、高い、平年並、低い、かなり低い)を予測する。一方、地点別気温については、最高気温、最低気温の5日間平均の階級に加えて、それぞれの値自体も予測する。ここでは、地域平均気温ガイダンスと地点別ガイダンスについて、それぞれ検証を行う。

まず、地域平均気温ガイダンスについて検証を行う。高温または低温の早期天候情報発表基準である「かなり高い」または「かなり低い」階級の予測確率が30%以上になった場合を「予測あり」としたF1 scoreを第1.6-11図に示す。F1 scoreを見る限り、新旧ガイダンスで大きな精度の変化がないことが確認できる。次に、ガイダンスの特徴を確認するため、適合率と捕捉率を第1.6-12図に示す。こちらも概ね同程度の精度ではあるものの、2週間気温予報対象初日(第1.6-12図の

(a) F1 score (かなり高い、全期間)



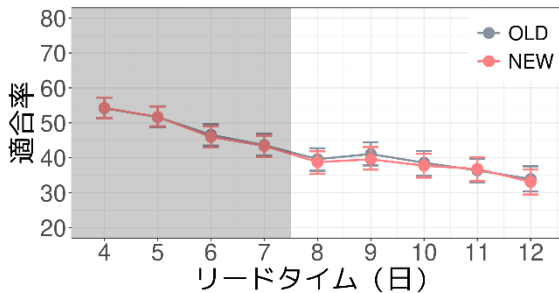
(b) F1 score (かなり低い、全期間)



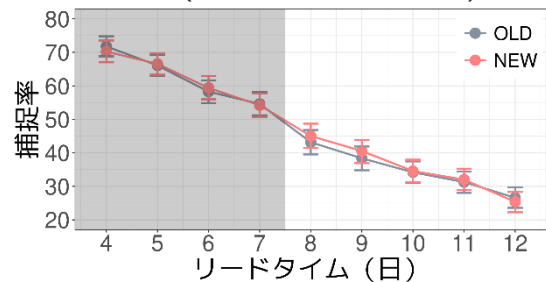
第 1.6-11 図 全地域全季節で集計した F1 score の新旧精度比較

かなり高いまたはかなり低い確率30%以上を発表としたときのF1 score。リードタイムは発表日を0日とした5日間平均の中日。陰影は2週間気温予報対象期間外。(a)かなり高い、(b)かなり低い。また、ブートストラップ法で見積もった95%信頼区間を誤差棒で表記している。

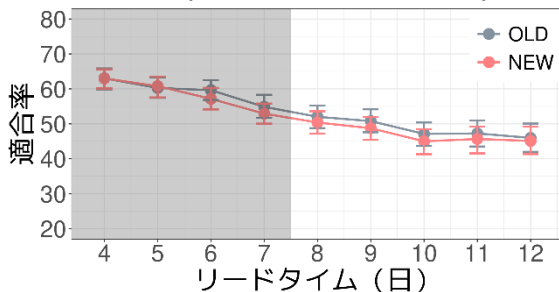
(a) 適合率 (かなり高い、全期間)



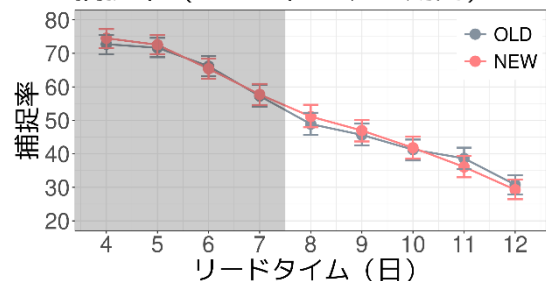
(b) 捕捉率 (かなり高い、全期間)



(c) 適合率 (かなり低い、全期間)



(d) 捕捉率 (かなり低い、全期間)



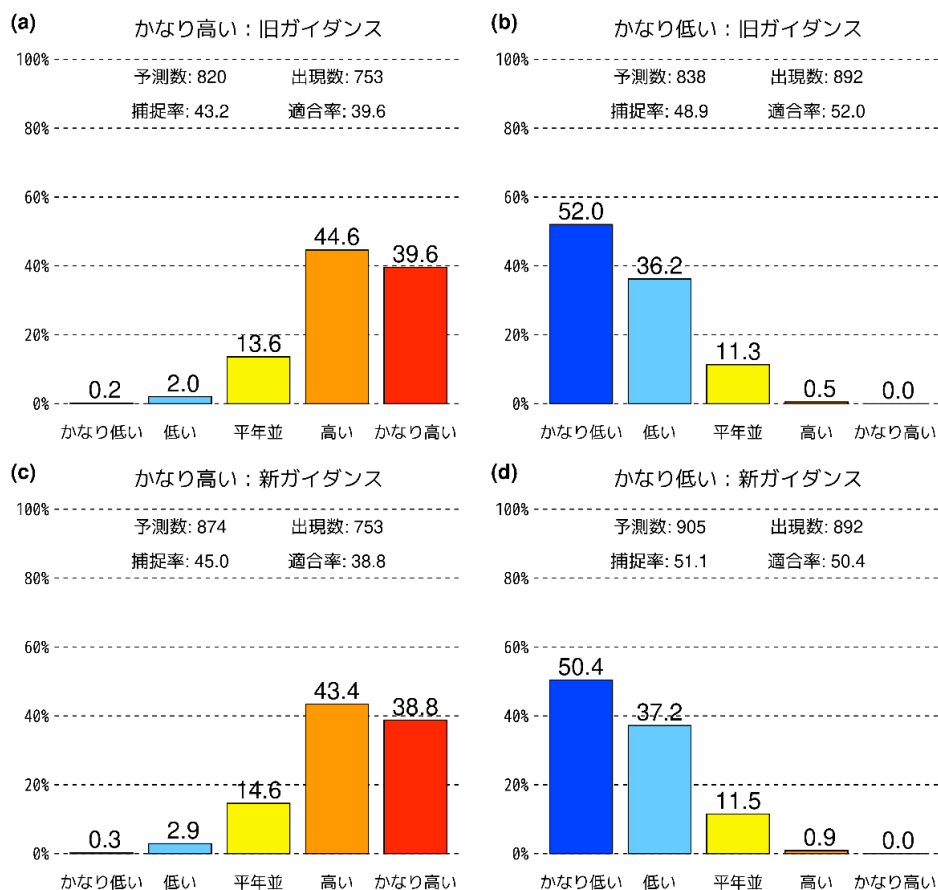
第 1.6-12 図 全地域全季節で集計した適合率、捕捉率の新旧精度比較

図の見方は第1.6-11図と同様。ただし、(a)、(b):かなり高い、(c)、(d):かなり低い、(a)、(c):適合率、(b)、(d):捕捉率。

リードタイム 8 日)において、「かなり高い」、「かなり低い」ともに適合率がやや低下する一方で、捕捉率はやや向上していることが確認できる。2 週間気温予報において、「かなり高い」または「かなり低い」確率が 30% 以上の予測を提供しているのは「早期の注意喚起」を目的としており、捕捉率の向上はこれに資するものである。2 週間気温予報対象初日の精度について詳しく見るために、2 週間気温予報対象初日の早期天候情報発表基準(「かなり高い」または「かなり低い」確率が 30%以上)を超過した事例のうち、実況がどの階級となったのか、その出現率を集計したものを第 1.6-13 図に示す。この図によると、現・旧ガイダンスを比較すると適合率は若干下がっているものの、現ガイダンスで高温(低温)早期天候情報発表基準を超過した場合に「高い」(低い)基準以上となる確率は、82.2%(87.6%)と高く、また逆の階級となる確率はかなり小さいことが確認できる。これらの特徴においても、現・旧ガイダンス

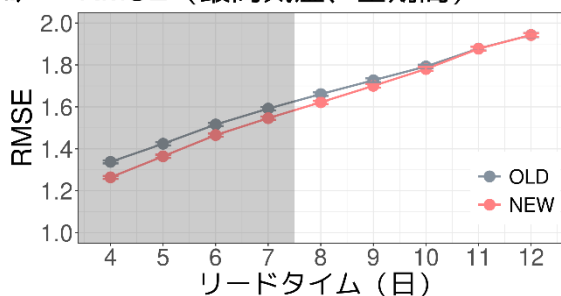
の差をみても大きな違いは認められず、両者はほぼ同程度の精度と言ってよいだろう。

次に、地点別ガイダンスについて検証を行う。2 週間気温予報において地点別ガイダンスは階級別の予測に加えて値自体の予測も提供している。そこで、地点別ガイダンスにおいては RMSE(Root Mean Square Error)の結果を示す(第 1.6-14 図)。結果を見ると、最低気温についてはほぼ同程度であるが、最高気温においてはリードタイム前半の改善が明瞭である。旧ガイダンスでは最高気温、最低気温の説明変数としてモデルの地上気温の日平均の 5 日間平均値を用いていたが、現ガイダンスではそれぞれの要素に対して、モデルの日最高気温、日最低気温の 5 日間平均値を用いることにした。このことが改善に寄与していると考えられる。

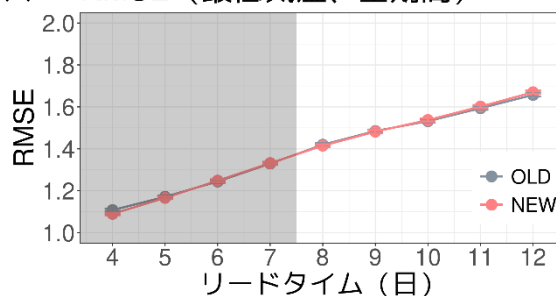


第 1.6-13 図 全地域全季節で集計したガイダンスが早期天候情報発表基準を超過したときの実際の階級別出現率 2 週間気温予報初日における集計結果。図中棒グラフ上部の数値はそれぞれの階級の出現率(%)を示す。(a)、(b)が旧ガイダンス、(c)、(d)が現ガイダンスで、(a)、(c)がかなり高い、(b)、(d)がかなり低い階級となる予測確率が 30%以上となったときの出現率を示す。

(a) RMSE (最高気温、全期間)



(b) RMSE (最低気温、全期間)

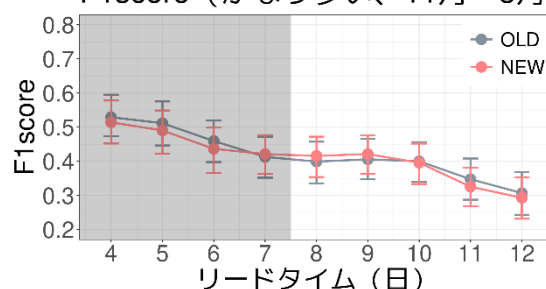


第 1.6-14 図 全地域全季節で集計した 5 日間平均地点別ガイダンスの RMSE (°C) の新旧精度比較
図の見方は第 1.6-11 図と同様。ただし、左:最高気温、右:最低気温。

(3) 大雪に関する早期天候情報ガイダンス

大雪に関する早期天候情報は、11 月から 3 月にかけての日本海側の 5 日間降雪量を対象として、「かなり多い」となる予測確率が 30%以上となった場合に発表される。第 1.6-15 図に大雪に関する早期天候情報対象期間において全地域で集計した F1 score を示す⁵。リードタイムによって傾向に違いはあるものの、概ね同程度の精度であることが確認できる。次に、ガイダンスの特徴を確認するため、第 1.6-16 図に適合率及び捕捉率を示す。この図から適合率はやや低下しているが、捕捉率は向上していることが確認できる。前項の 2 週間気温予報ガイダンス同様、捕捉率の向上は大雪に関する早期天候情報の目的である「早期の注意喚起」に資するものである。最後に、第 1.6-17 図に、早期天候情報初日の「かなり多い」確率が 30%以上となった事例のうち、実況値の階級別出現率を示す。この図から、早期天候情報発表基準を超過した場合に「多い」以上となる割合は、旧ガイダンスの 84.0%から現ガイダンスでは 78.9%と低下、適合率も約 2%低下しているが、捕捉率は 5%以上改善しており、これまで注意喚起できていなかった現象においても捕捉できるようになったことがわかる。

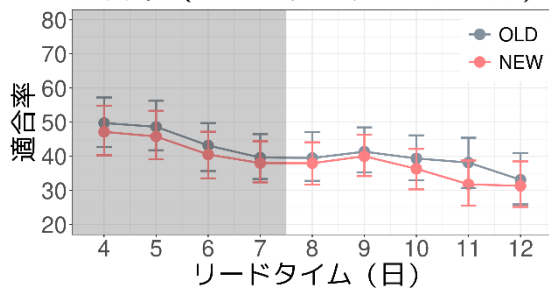
F1score (かなり多い、11月~3月)



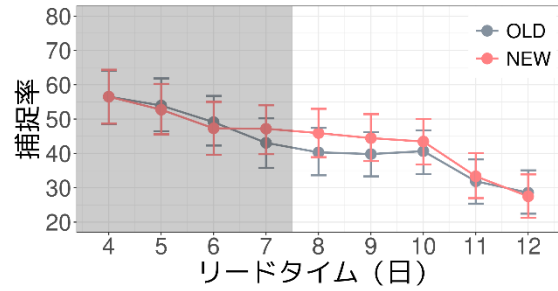
第 1.6-15 図 大雪早期天候情報対象の全地域全期間で集計した F1 score の新旧精度比較
かなり多い確率 30%以上を発表としたときの F1 score。図の見方は第 1.6-11 図と同様。

⁵ 検証期間は 11 月から 3 月 (大雪の早期天候情報発表期間に相当) の全球 EPS の再予報。ただし近畿日本海側と山陰は 11 月末から 3 月。

(a) 適合率 (かなり多い、11月~3月)

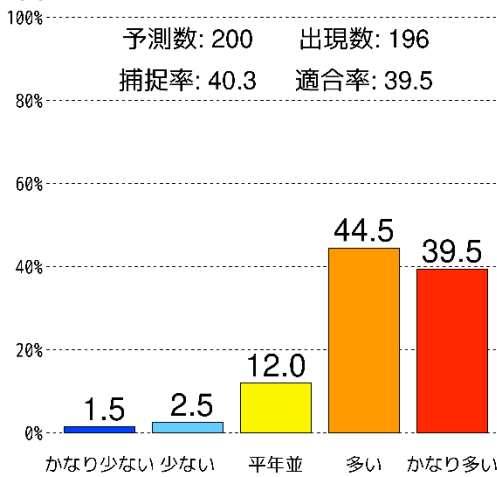


(b) 捕捉率 (かなり多い、11月~3月)

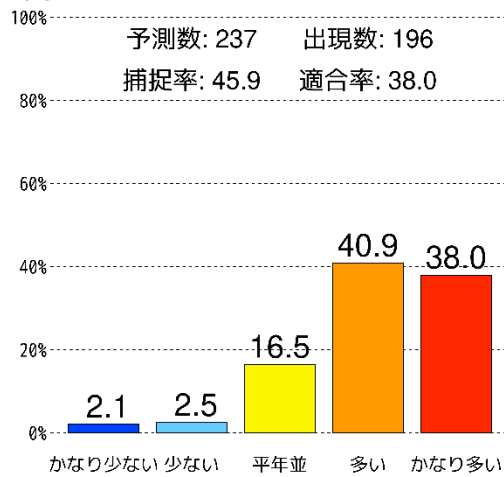


第 1.6-16 図 大雪早期天候情報対象の全地域全期間で集計した適合率、捕捉率の新旧精度比較
かなり多い確率 30%以上を公表としたときの適合率と捕捉率。図の見方は第 1.6-11 図と同様。(a)は適合率、(b)は捕捉率を示す。

(a) 旧ガイダンス



(b) 新ガイダンス



第 1.6-17 図 全地域全初期値で集計したガイダンスが早期天候情報発表基準を超過したときの実際の階級別出現率
図の見方は第 1.6-13 図と同様。大雪早期天候情報対象期間初日の集計結果。(a)は旧ガイダンス、(b)は現ガイダンスを示す。

1.6.4 まとめ

全球 EPS の旧システムから現システムへの更新に合わせて、2 週間気温予報、1 か月予報、大雪に関する早期天候情報ガイダンスの更新を行い、以下の手法の見直しを行った。

今回の全球 EPS の更新に合わせて、再予報の仕様に変更があった。旧ガイダンスでは、学習の推定精度の確保のため、前後 2 初期値を用いて学習を行ってきたが、この仕様変更のため、初期値の間隔が広がったため、ガイダンスに用いる最適なサンプリング期間についての検討を行った。その結果、1 か月予報ガイダンスの降雪量については前後 1 初期値を、それ以外のガイダンスは前後 2 初期値を用いることとした。

次に、ガイダンスに用いる説明変数の検討を行った。これまでのガイダンスは、稀にモデルと傾向の異なる予測をして使いづらいことがあった。そこで、現ガイダンスでは、モデルと傾向が同じとなるよう、出来る限り単回帰でのガイダンスを目指した。重回帰と単回帰の精度の違いを比較したところ、多くの地域で両者の精度に違いがないことが確認出来たため、そのような地域では単回帰を採用した。

さらに、確率密度分布の作成について、EKDMOS (Ensemble Kernel Density Model Output Statistics, Glahn et al., 2009)を採用した。EKDMOS では、メンバーごとに正規分布を仮定し、メンバー数分の正規分布を重ね合わせて確率密度分布を作成する。このように

作成された確率密度分布は広がりすぎている傾向にあるため、Glahn et al. (2009) の手法により、分布を縮めた。

また、大雪早期天候情報ガイダンスにおいては、学習に用いるサンプルの変更に伴い、精度の低下がみられた北海道日本海側において、「多い」階級のデータの一部を「かなり多い」階級と見立てて学習することで捕捉率の確保につなげた。

現ガイダンスの精度については、旧ガイダンスと比べて同程度～やや改善の傾向がみられた。気温については一部でやや改悪の傾向がみられたが、信頼度曲線を確認すると、信頼度は高く、予測確率の誤差は旧ガイダンスと同程度であることが確認できた。また、高温・低温・大雪のそれぞれの早期天候情報ガイダンスにおいては、F1 score は旧ガイダンスと同程度であることが確認できた。一方、適合率はやや下がったが、捕捉率が上がる傾向にあることが確認できた。早期天候情報は「早期の注意喚起」を目的としていることから、捕捉率向上はこの目的に資するものである。

現ガイダンスでは、信頼度は維持・改善の傾向にあるものの、分離度が改悪となった地域・予報対象期間があった。ガイダンス開発は、信頼度を維持しつつ、分離度を高める必要がある (Gneiting and Raftery, 2007)。今後、分離度を高めるようにガイダンス改善の検討を行う必要がある。

参考文献

- 大脇良夫, 2019: 付録 D 数値予報研修テキストで用いた表記と統計的検証に用いる代表的な指標. 令和元年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 147-153.
- 気象庁, 2018: 平年値, 気象観測統計指針 第 5 章, 112-126.
- 住友雅司, 伊藤晋悟, 伊藤明, 2020: 降雪量に関する早期天候情報ガイダンス. 令和元年度季節予報研修テキスト, 気象庁地球環境・海洋部, 42-53.
- 田中基裕, 伊藤晋悟, 平井雅之, 2017: 1 か月予報及び異常天候早期警戒情報のためのガイダンスの改善. 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, 48-64.
- 中三川浩, 2013: 季節予報の評価手法. 平成 24 年度研修テキスト, 気象庁地球環境・海洋部, 271-281.
- 平井雅之, 伊藤晋悟, 2019: 2 週間気温予報と早期天候情報. 平成 30 年度季節予報研修テキスト, 気象庁地球環境・海洋部, 10-42.
- Glahn, B., M. Peroutka, J. Wiedenfeld, J. Wagner, G. Zylstra, B. Schuknecht, B. Jackson, 2009. MOS Uncertainty Estimates in an Ensemble Framework. Monthly Weather Review - MON WEATHER REV. 137. 246-268.
- Gneiting, T., A. E. Raftery, 2007: Strictly Proper Scoring Rules, Prediction, and Estimation. Journal of the American Statistical Association. 102. 359-378.