

令和 2 年 度 季 節 予 報

研 修 テ キ ス ト

**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～/
近年の気候情報の活用と
創出に向けた取り組み**

(気 候 情 報 課)

令和 2 年 9 月

September 2020

気象庁 地球環境・海洋部

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～/ 近年の気候情報の活用と創出に向けた取り組み

目次

はじめに

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
1.1	はじめに	1
1.2	2段階SST法の詳細と導入事例紹介	2
1.3	再予報のアンサンブルメンバー数増強	9
1.4	再予報による予測精度評価の結果	14
1.5	今後の開発と方向性	19
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	22
2	近年の気候情報の活用と創出に向けた取り組み	35
2.1	はじめに	35
2.2	文献や調査報告レビュー	36
2.3	気候情報活用促進に向けた最新の取組現状	41
2.4	気温予測データの活用のためのコンテンツ	47
付録	季節予報システムの開発：これまでと今後	54

はじめに¹

気象庁の季節予報業務の歴史は、前身の中央気象台時代の 1942 年まで遡る(気象庁本庁による公式の発表)。それからおよそ 50 年間は、観測や解析値に基づく統計的手法により行われていた。その後、スーパーコンピュータの発展と数値予報技術の進歩を背景に、1996 年から 1 か月予報に全球数値予報モデル(GSM)が導入され、第一種予測可能性を主なターゲットとした力学的手法による季節予報の歴史が始まった。これは季節予報における産業革命とも呼べる変化であり、その導入直後に見事に負の北極振動(AO)を予報した 1 か月予報結果は、気候系監視報告の表紙を飾った(下図、今から言えば俗に言う“奇跡の 1 枚”だったのかもしれない)。

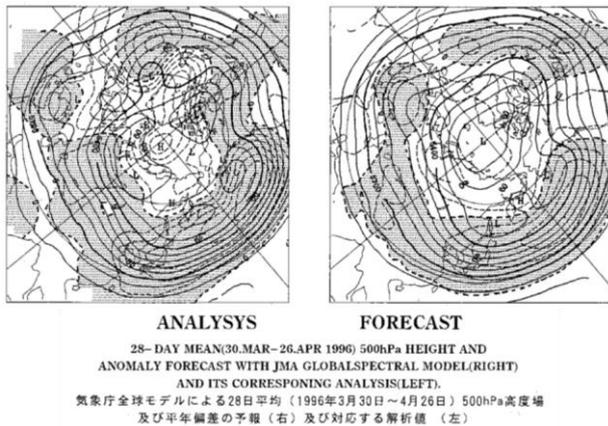


図 1996 年 5 月発行の気候系監視報告の表紙

その後、付録に綴られているように、解像度を上げ、物理過程を改善することによってモデル単体の性能を向上させるとともに、アンサンブル手法を導入することにより確率的な予報を導入してきた(全球アンサンブル予報システム(GEPS))。

そのような進歩のなかで、予報官を悩ませていたのは、海面水温偏差固定による影響である。GSM は、海面水温を敏感に感じすぎる特性をもっているため、夏季の熱帯～亜熱帯では、初期値の持つ情報が薄れてくる 2 週目後半以降になると、海面水温の高い(正偏差の大きな)海域で対流活動が活発な状態が

維持され、それに強制された大気循環場が形成されることがしばしばみられた。特に PJ パターンと関係の深い北西太平洋モンスーン域は、実際には対流活動の活発さと海面水温には負の相関がみられる海域であるため、日本付近の大気循環の予測には影響が大きかった。

一方、第二種予測可能性から情報を抽出するために 3 か月、暖・寒候期予報には、2010 年から大気海洋結合モデル(CPS)が導入されており、2015 年からは第二世代の CPS2 が運用されている。

さて、GEPS における前述の問題を解決するには、CPS 同様に大気海洋結合モデルを導入することが理想であるが、第 1 章に詳細に記述されているように、現実にはその実現にはまだまだ高いハードルがある。このため、現時点において最もコストパフォーマンスが高い手法として、2020 年 3 月に CPS2 の海面水温予測結果を、GEPS に取り込む「2 段階 SST 法」を導入した。第 1.4 節では、熱帯季節内変動(MJO)の表現が良くなるなどの成果が表れていることが報告されている。なお、今後のさらなる展望については第 1.5 節や付録で紹介されているので、ぜひご覧いただきたい。

さて、ここまでは、数値予報モデルについて触れてきたが、発信された季節予報プロダクトをユーザーにどのように活用していただくかも季節予報の重要な任務である。気候情報課では、季節予報利活用の普及啓発としてこれまで様々な取り組みを行ってきた。過去の詳細については、平成 25 年度と平成 30 年度の季節予報研修テキストを参照されたい。本テキストでは、気候情報における利活用についてのレビューや最新の動向について、成功事例を織り交ぜて紹介し、我々が現在持っている知見の総集編という形で第 2.1 節から第 2.3 節にまとめた。また、気象庁 HP には、季節予報プロダクトを手軽にダウンロードするとともに、ユーザーが持っているデータとの相関について簡易的に分析することができる機能も搭載されている。第 2.4 節では、この機能を解説しているので、ぜひ、利活用推進の営業ツールとして、役立てていただきたい。

¹ 藤川 典久

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

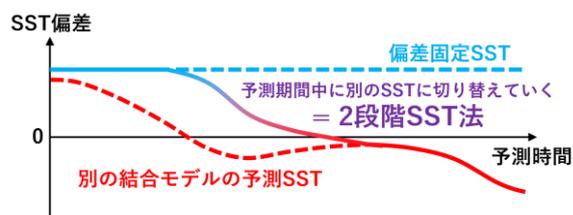
1.2 2段階 SST 法の詳細と導入事例紹介¹

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。

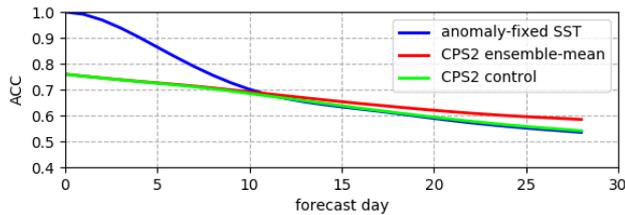
このような背景から、気象庁では全球 EPS に与える SST の高度化に取り組み、2020年3月に全球 EPS に2段階 SST 法を導入した。本節では、この2段階 SST 法の概要、全球 EPS への導入及び導入事例について述べる。

1.2.2 2段階 SST 法

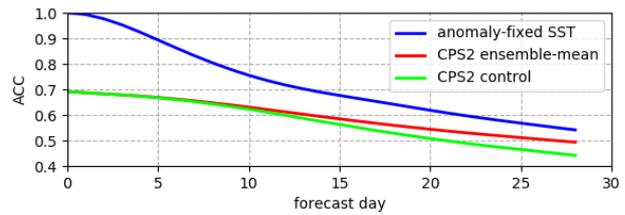
海洋内部の変動過程を陽に計算するか否かでそれぞれ一長一短があることを述べたが、2段階 SST 法と呼ばれる両者の中間的な手法も存在する。これは、海洋内部の変動過程の計算は行わないが、事前に別のモデル等で計算された SST 予測値に予測途中から切り替えていく手法であり、気象庁の現業季節アンサンブル予報システムでも2003年3月から2010年2月まで採用されていた(新保ほか, 2009)。例えば、第1.2-1図のように、予測初期は偏差固定 SST とし、予測途中から事前に計算された別の大気海洋結合モデルの予測 SST に切り替えていくことにより、追加の計算資源をほぼ必要とせず、精度の良い SST 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



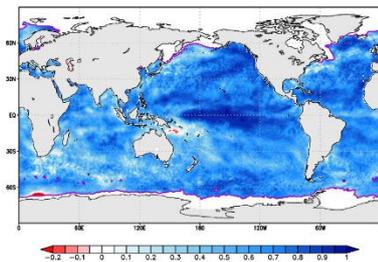
(b) ACC (中・高緯度)



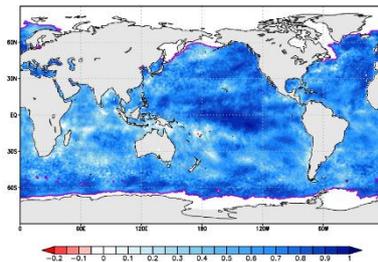
第 1.2-2 図 各 SST の ACC 時系列

(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。

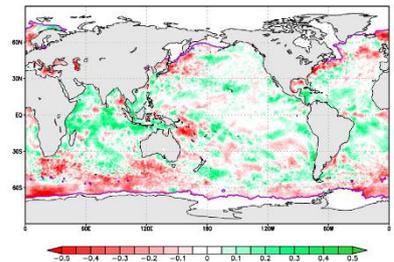
(a) CPS2 アンサンブル平均



(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

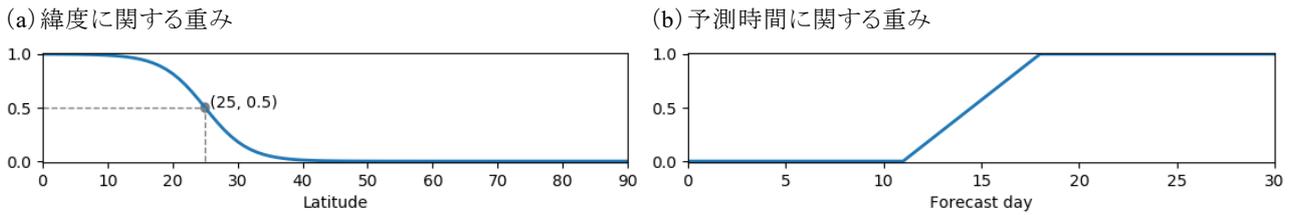
(1) 利用する SST データの精度比較

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

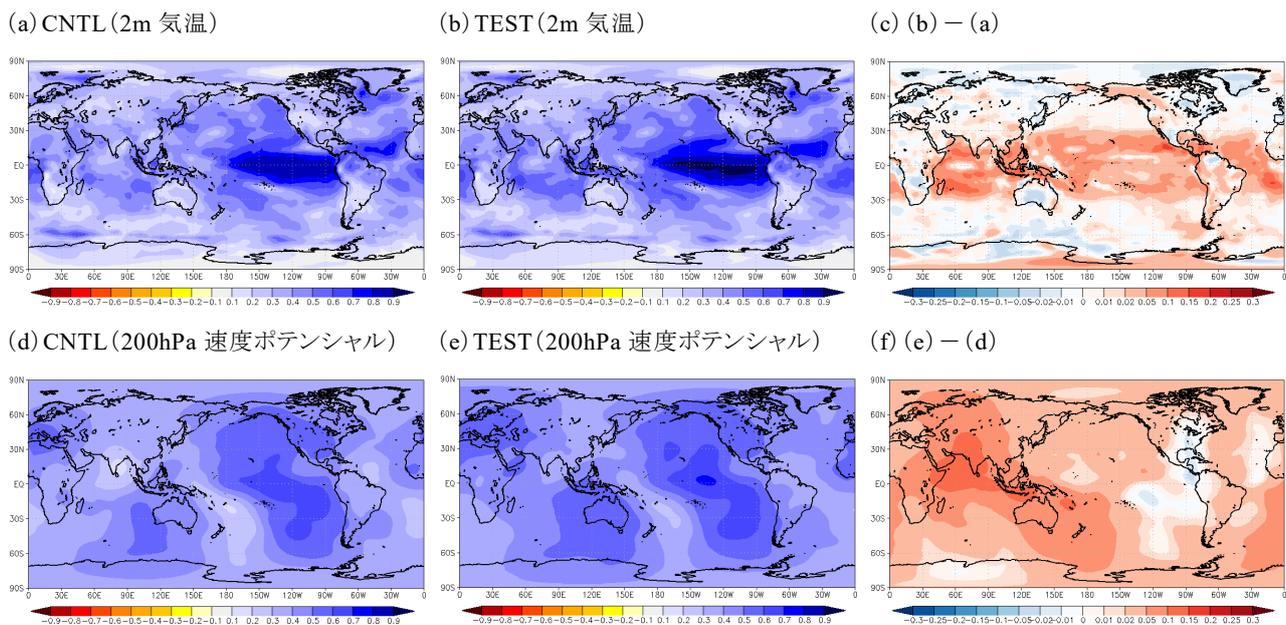
CPS2 の SST 予測精度は、熱帯・亜熱帯では偏差固定 SST を上回るが、中・高緯度では不十分であったため、熱帯・亜熱帯のみで 2 段階 SST 法が適用されるようにした。第 1.2-4 図(a)のような緯度に依存する tanh 関数で重みづけを行っている。

(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。

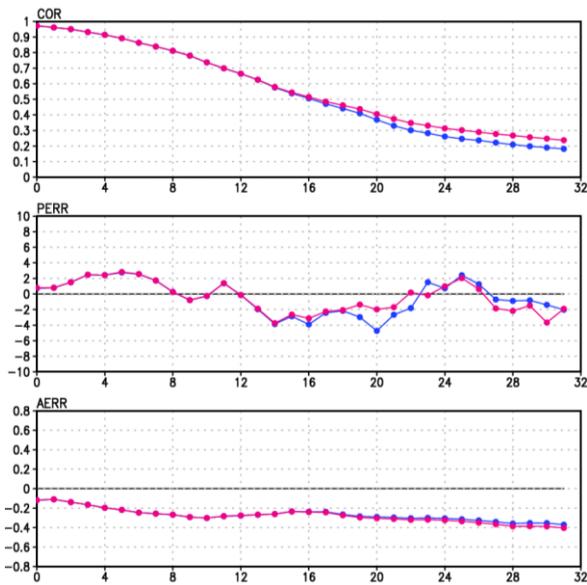
(3) 全球 EPS における予測精度の変化

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。

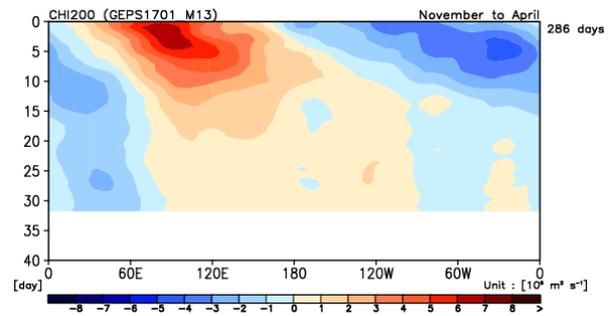
40°E 付近に停滞していた対流活発位相が、TEST 実験では東進する傾向が強まったことで解析値の位相に近づいており、位相誤差の軽減を例示している。

1.2.4 導入事例

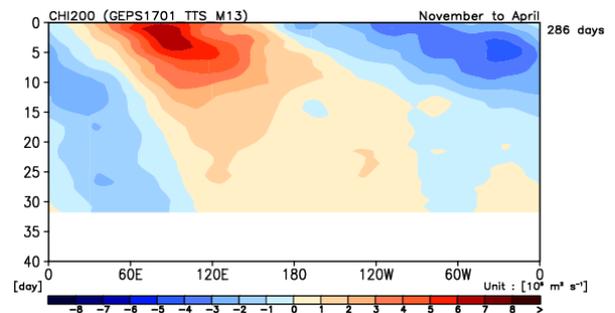
本項では 2020 年 1 月 1 日初期日の事例を 2 段階 SST 法の導入事例として紹介する。実験にはその当時に現業運用されていたバージョンの全球 EPS を利用し、偏差固定 SST を与えた CNTL 実験と 2 段階 SST 法を適用した TEST 実験を行った。解析値としては、JRA-55 および MGSST 速報解析値を利用した。

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

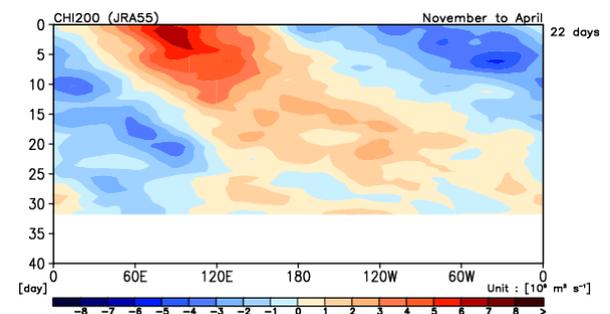
(a) CNTL



(b) TEST



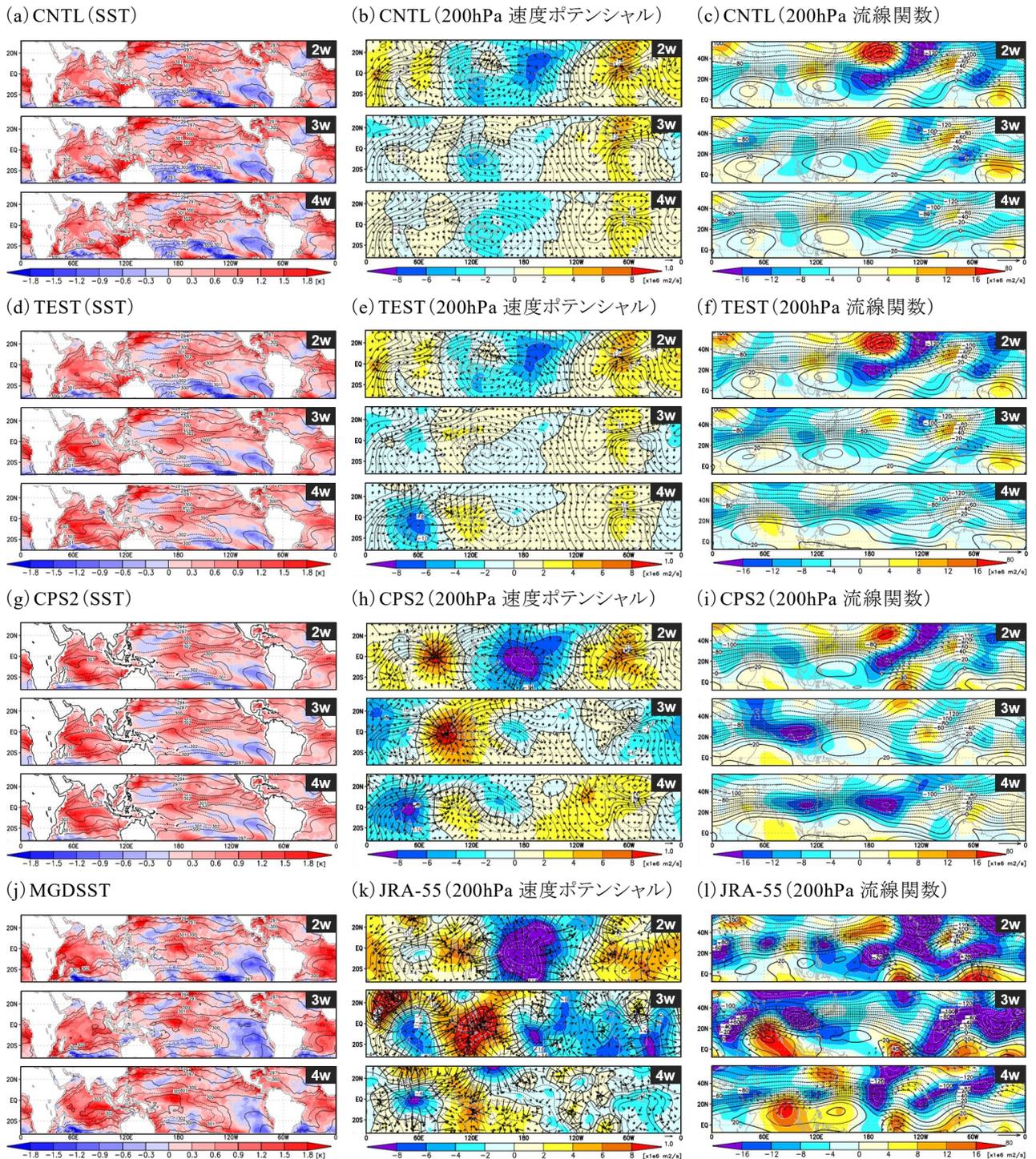
(c) JRA-55



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: 海面水温摂動の開発。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。

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。

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)。

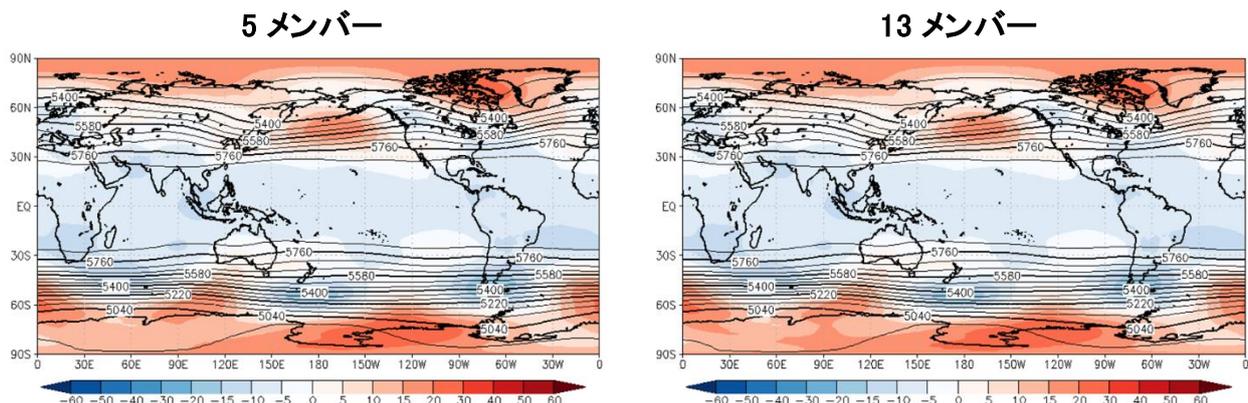
次に、予測 1 か月(予測 3~30 日目の 28 日平均場)のアンサンブル平均に対する ACC の空間分布を第 1.3-2 図に示す(検証要素は 500hPa 高度、850hPa 気温)。どちらの要素も中高緯度を中心に全球のほとんどの地域で 13 メンバーの方が ACC が高いことが分かる。その変化幅は内部変動の小さい熱帯域よりも中・高緯度域の方が大きい。第 1.3-3 図には北半球域の ACC の予測時間による変化を示す。どちらの要素も予測期間を通じて 13 メンバーの方が ACC は高いが、特に 3, 4 週目でその差が大きいことが分かる。なお、確率予測精度の評価指標(ブライアスキルスコ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

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。

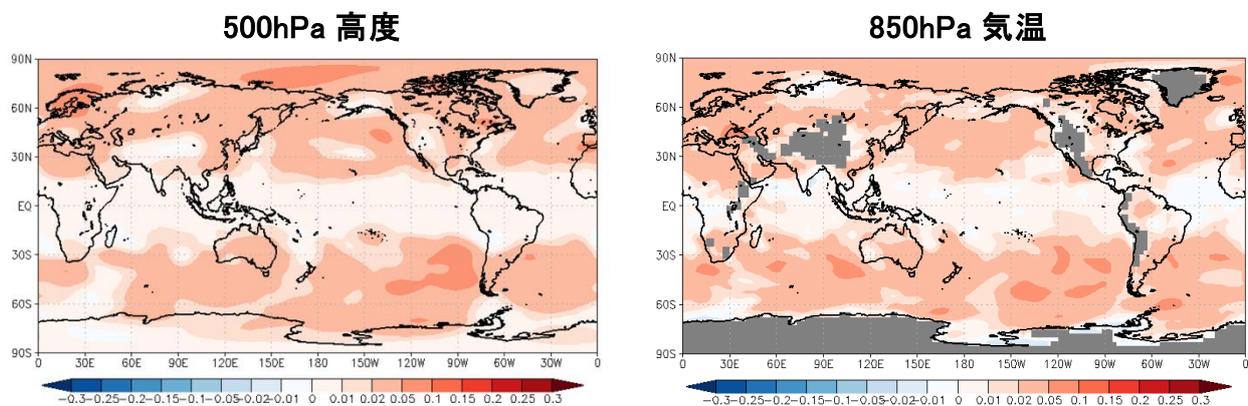
⁴ 5 メンバーは 13 メンバーの再予報の一部である。

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)

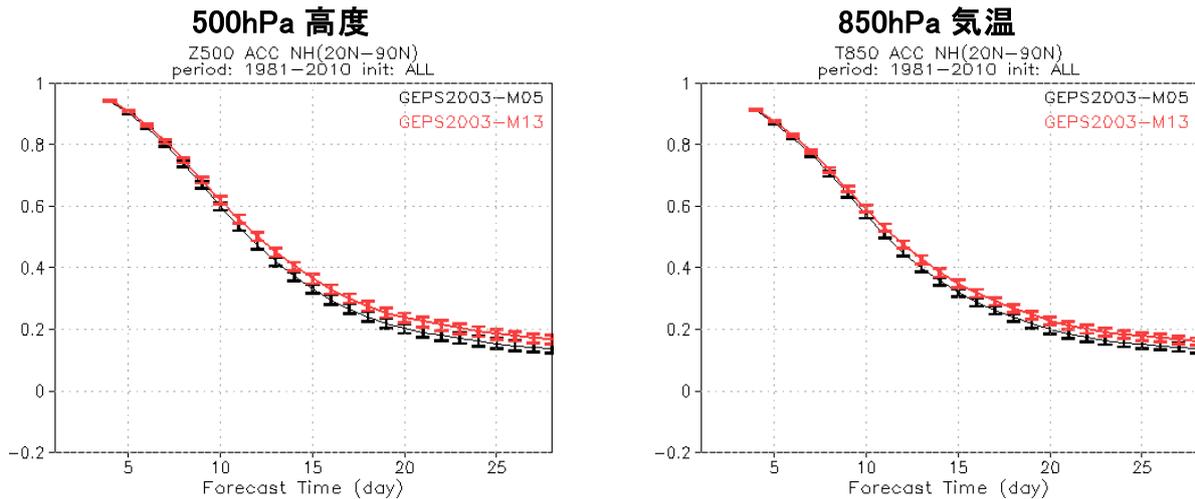


第 1.3-1 図 500hPa 高度(単位:m)の平均誤差(陰影)とモデル平年値(等値線)(予測 3～30 日目の 28 日平均場)
左:5 メンバー平均、右:13 メンバー平均の結果を示す。



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。

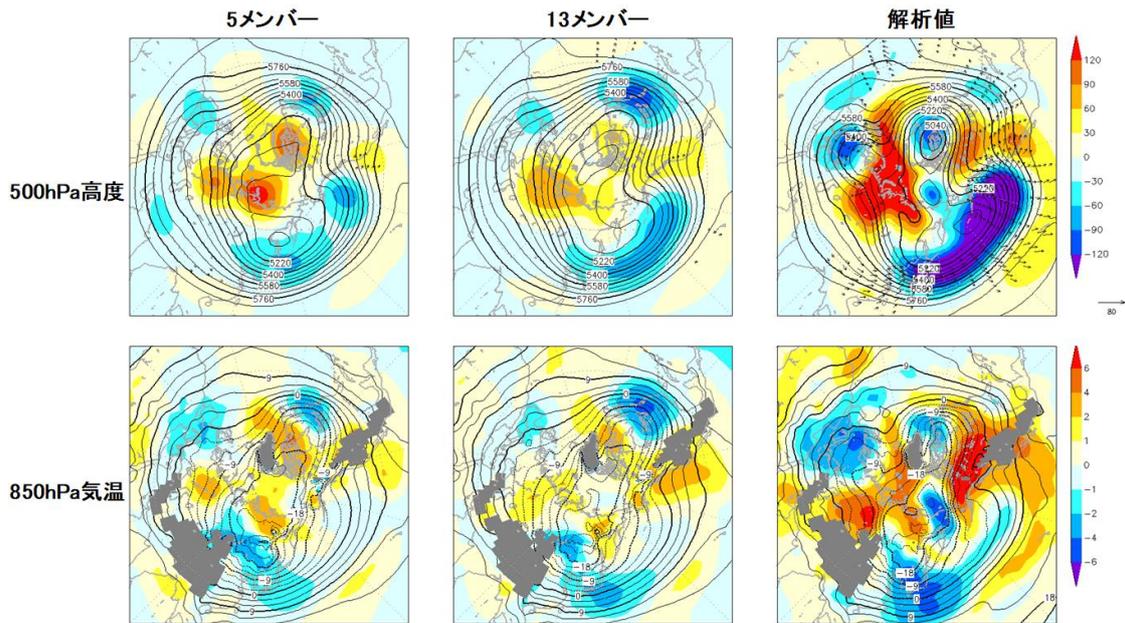
⁵ 平成 17 年 12 月から平成 18 年 1 月上旬にかけて非常に強い寒気が日本付近に南下し、強い冬型の気圧配置が断続的に現れたため、日本海側では記録的な大雪となった(高橋 2006)。

1.3.4 予測精度の評価の不確実性について

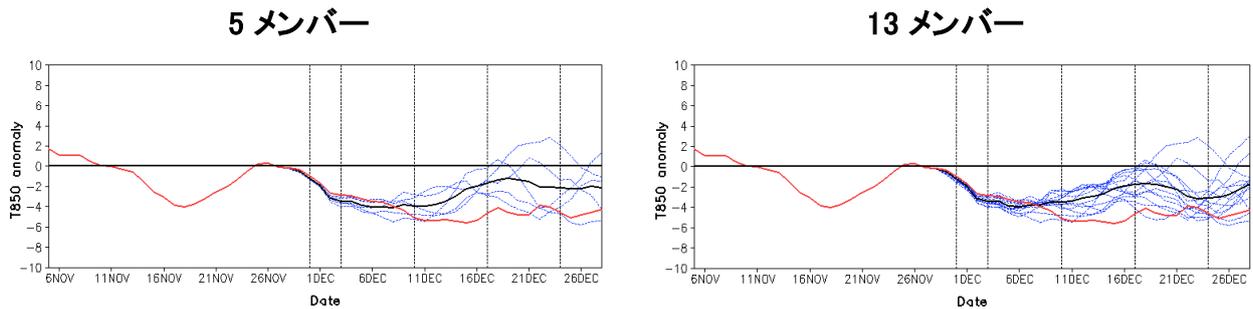
本項では、5 メンバー、13 メンバーのそれぞれの場合に対して、現システムの開発途中に見られた予測精度の変化を示す。第 1.3-6 図に 3 月 31 日、4 月 30 日、5 月 31 日初期日(春初期日)の予測 2 週目での 850hPa 気温のアンサンブル平均に対する ACC のモデル間の差分を示す。5 メンバーの検証結果を見ると、日本周辺では ACC の低下域が広がっており、特に北海道周辺では 0.1 程度の大幅な低下傾向が見られる。一方、13 メンバーでは、日本周辺の ACC の差の分布が異なっていることが分かる。大幅な低下となっていた北海道周辺では、0.01 程度の小さな差となって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

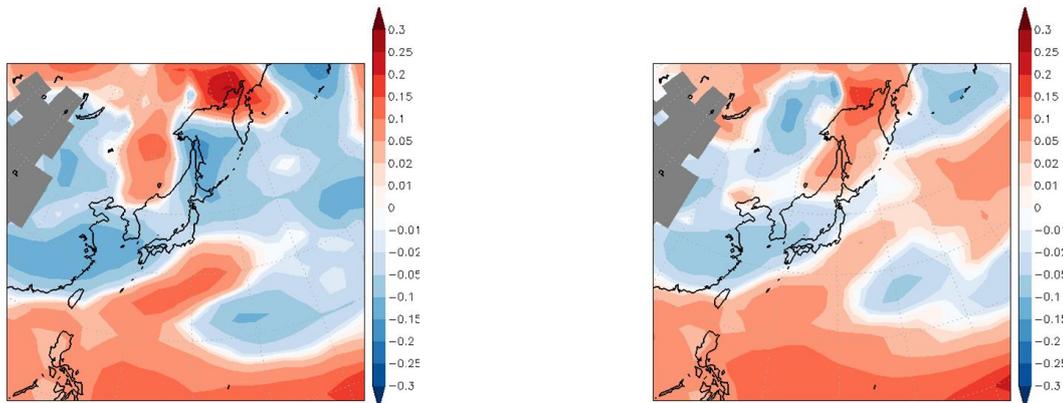
⁶ 現在の全球 EPS の摂動作成手法で実行可能な最大数である 51 メンバーとした。



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、寒色系は改悪を示す。

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

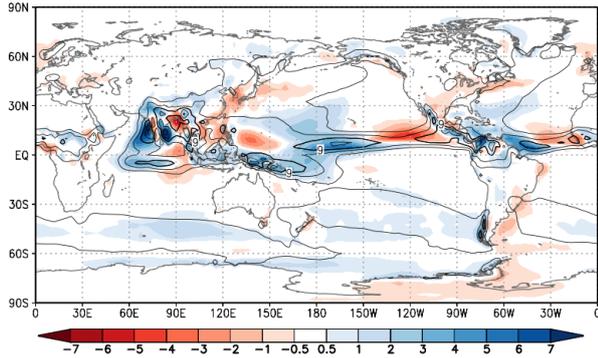
夏期間及び冬期間における、全球を対象とした 200hPa 速度ポテンシャルと 500hPa 高度のアノマリー相関係数の予報時間による変化を第 1.4-5 図に示す。予測期間の前半から改善傾向が見られ、後半にかけ

¹ 関口 亮平

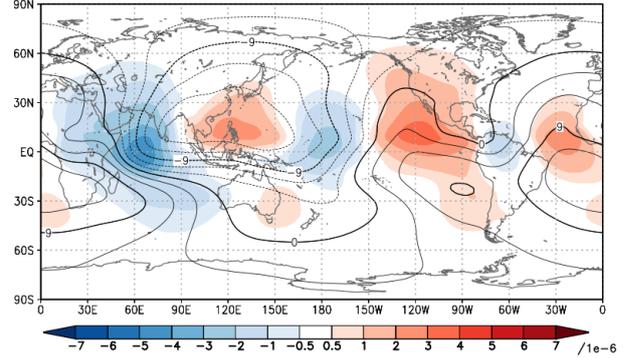
² メンバー数についても、現システム・旧システムともに 13 としている。

³ Global Precipitation Climatology Project

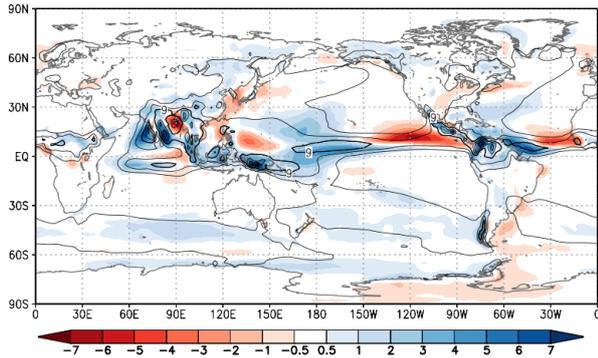
(a) 降水量(現システム)



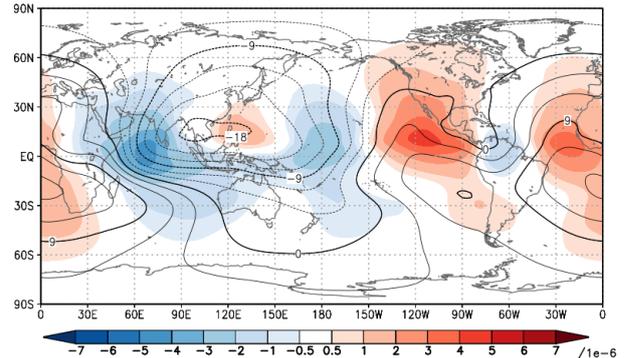
(b) 200hPa 速度ポテンシャル(現システム)



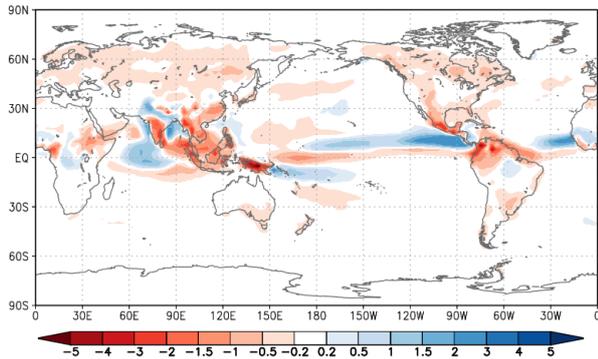
(c) 降水量(旧システム)



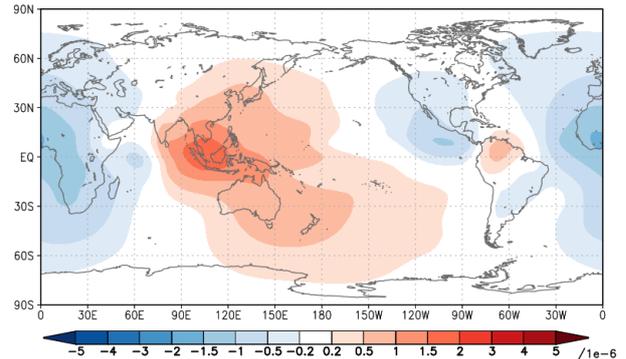
(d) 200hPa 速度ポテンシャル(旧システム)



(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)

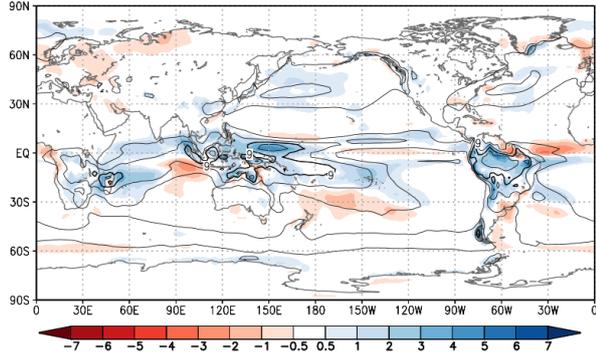
(a) (c) の等値線間隔は 3mm/day、(b) (d) の等値線間隔は $3 \times 10^6\text{m}^2/\text{s}$ 。

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

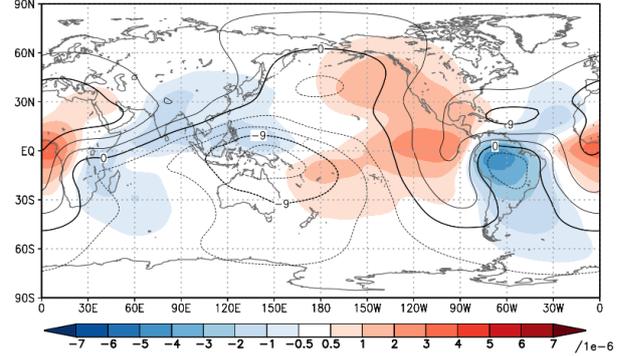
域の東進が解析に近づく傾向が見られた。MJO 指数の予測精度については、第 1.2 節で述べた 2 段階 SST 法の導入における実験結果と同様に、予測期間の後半を中心に改善傾向が見られた(図略)。

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。

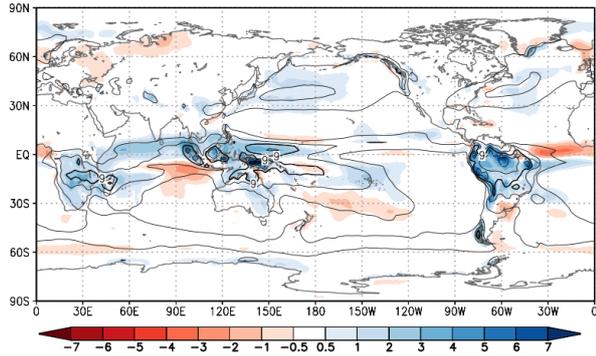
(a) 降水量 (現システム)



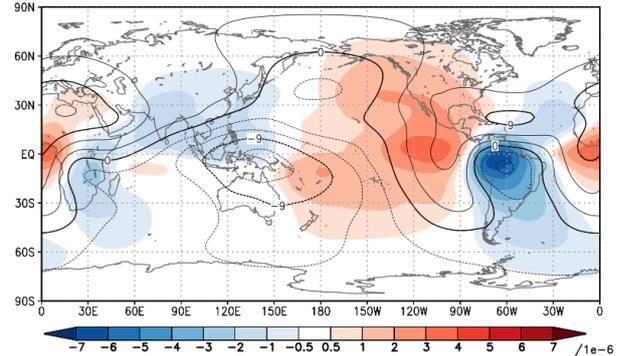
(b) 200hPa 速度ポテンシャル (現システム)



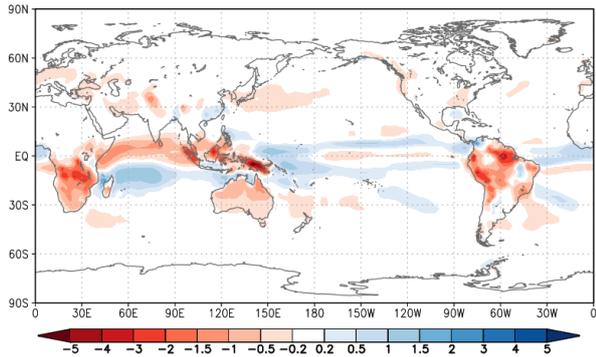
(c) 降水量 (旧システム)



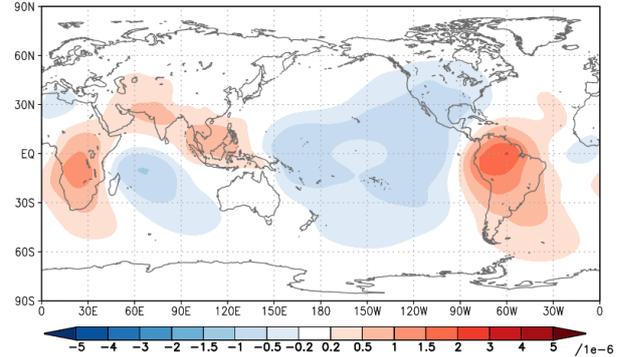
(d) 200hPa 速度ポテンシャル (旧システム)



(e) 降水量 (現システム-旧システム)

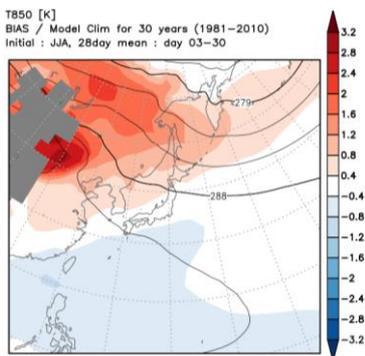


(f) 200hPa 速度ポテンシャル (現システム-旧システム)

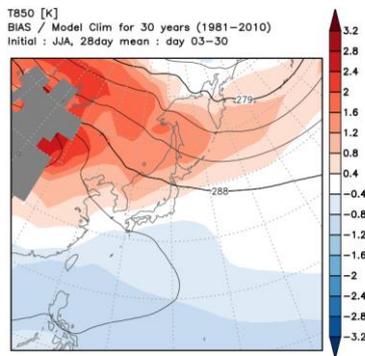


第 1.4-2 図 第 1.4-1 図と同じ。ただし、季節は冬期間。

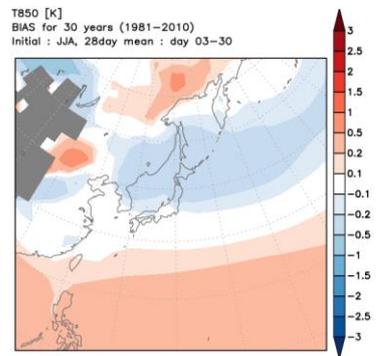
(a) 現システム



(b) 旧システム



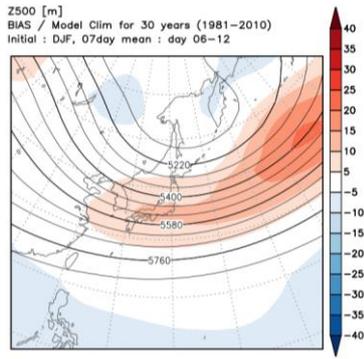
(c) 現システム-旧システム



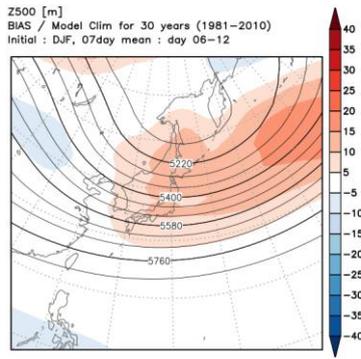
第 1.4-3 図 夏期間における、850hPa 気温[単位:K]の平均誤差(陰影)とモデル平年値(等値線)(予測 3~30 日目の 28 日平均場)

(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。

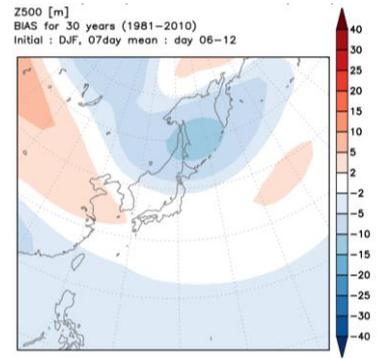
(a) 現システム



(b) 旧システム



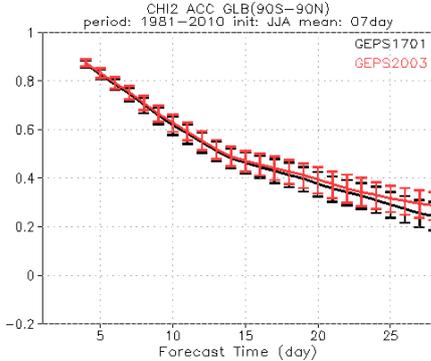
(c) 現システム-旧システム



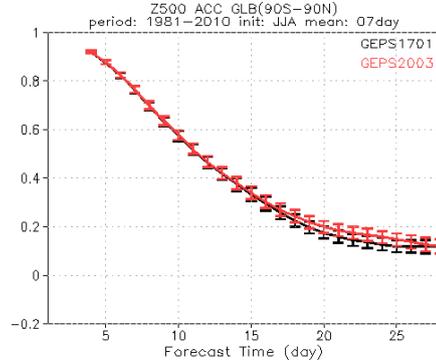
第 1.4-4 図 冬期間における、500hPa 高度[単位:m]の平均誤差(陰影)とモデル平年値(等値線)(予測 6~12 日目の 7 日平均場)

(a) (b) の等値線間隔は 60m。

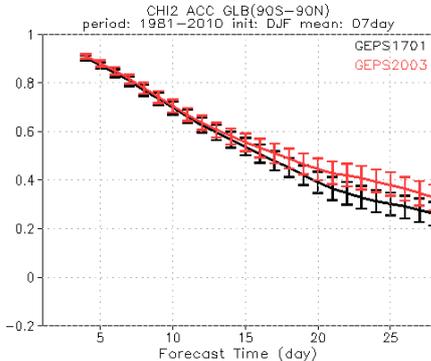
(a) 200hPa 速度ポテンシャル(夏期間)



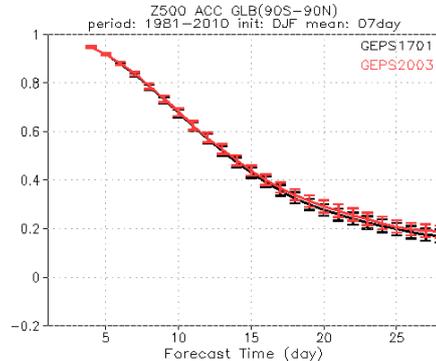
(b) 500hPa 高度(夏期間)



(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)

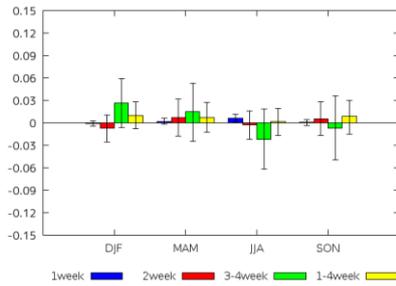
黒線は旧システム、赤線は現システムの系統誤差補正後のアノマリー相関係数で、ブートストラップ法で見積もった 95%信頼区間を誤差棒で表記している。横軸は予報時間[day]で、7 日平均の中心日を示す。

1.4.4 まとめ

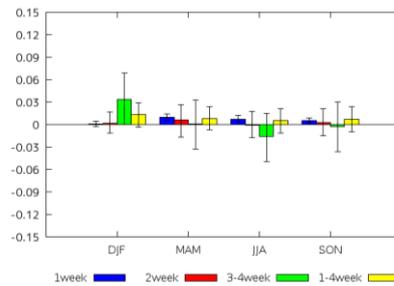
本節では、再予報の検証結果に基づく現システムの平均誤差特性や予測精度・予測特性について、旧システムと比較した結果を述べた。現システムでは、予報モデルの更新と 2 段階 SST 法の導入により、旧システムで課題となっていた平均誤差特性の一部に改善

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。

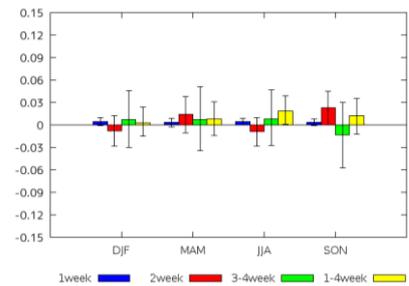
(a) 500hPa 高度



(b) 850hPa 気温



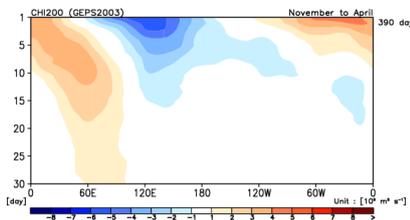
(c) 海面更正気圧



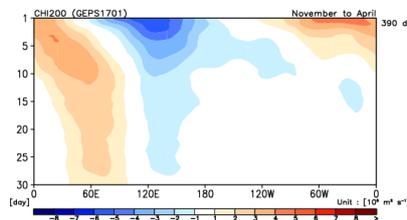
第 1.4-6 図 北西太平洋域(100°E~180°E,0°~60°N)を対象とした、季節別のアンノリー相関係数の差(現システム-旧システム)

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。

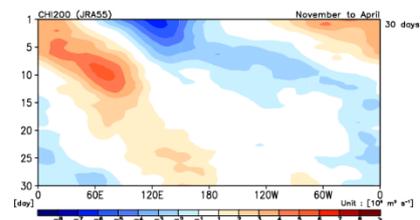
(a) 現システム



(b) 旧システム



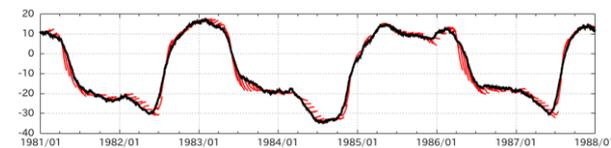
(c) JRA-55



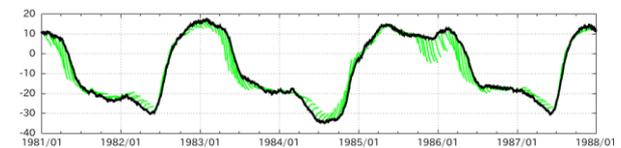
第 1.4-7 図 MJO の初期位相が 4(海洋大陸付近)かつ振幅が 1 よりも大きい事例について、15°S~15°N の領域で緯度平均した 200hPa 速度ポテンシャル偏差[単位:10⁶m²/s]の経度-時間断面図

(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

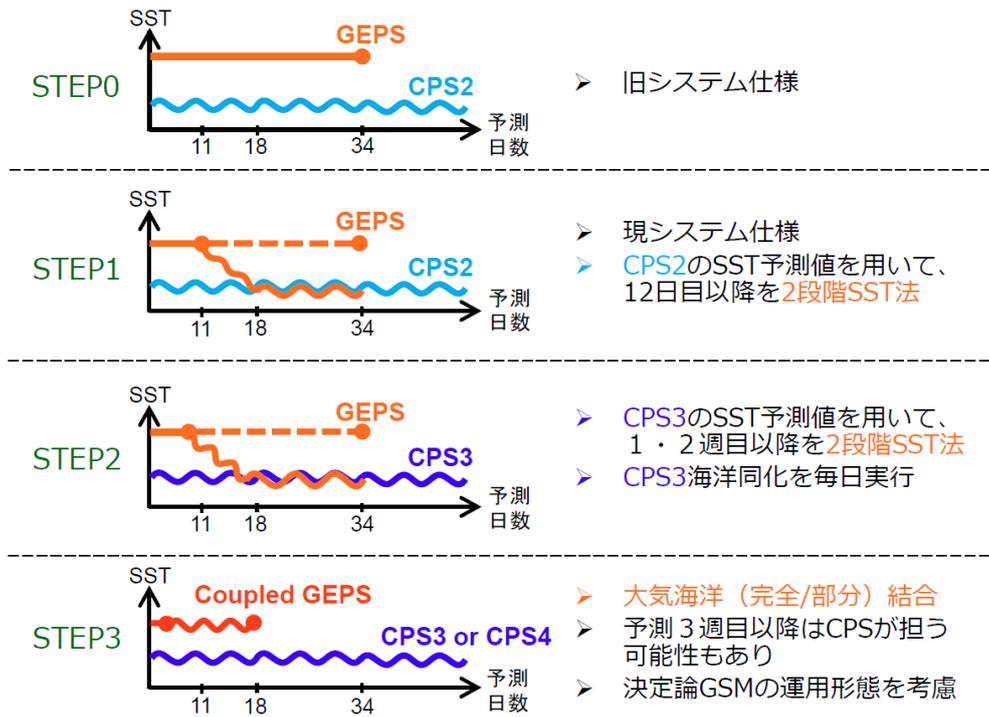
を大気海洋結合化したシステムで数日から 1 か月程度までのスケールにおける大気海洋結合化のインパクトを調査している。その結果、大気単体モデルと比較して熱帯では多くの時間スケール・要素で改善が確認されたものの、中・高緯度では中立～改悪となった。中・高緯度で改悪となった原因としては、海洋モデルの解像度不足やモデルの大気初期値を作成するデータ同化の過程で大気と海洋が結合されていないことに起因した初期ショックが挙げられている。また、この初期ショックについては予測期間において偏差固定 SST から海洋モデルで計算した SST に徐々に近づける部分結合 (Partial Coupling: Mongensen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

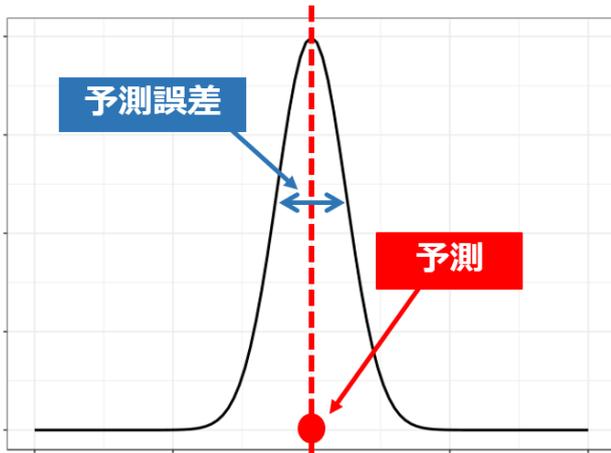
ア サンプリング期間の検討

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う。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

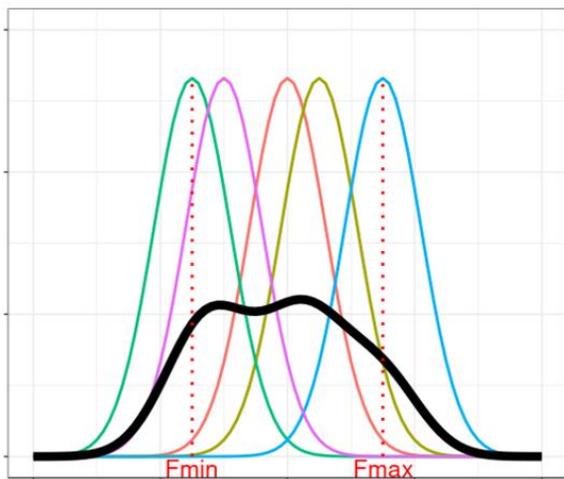
2 週間気温予報や 1 か月予報は確率で予報を行っているため、ガイダンスも確率値で表現する必要がある。ここでは、現ガイダンスにおける確率密度分布の作成手法について説明する。なお、簡単のため、ここでは 1 か月予報ガイダンスの作成方法についてのみ述べる。2 週間気温予報ガイダンスについては、用いるメンバー数を 50 メンバーから 26 メンバーに読み替えていただきたい。

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。

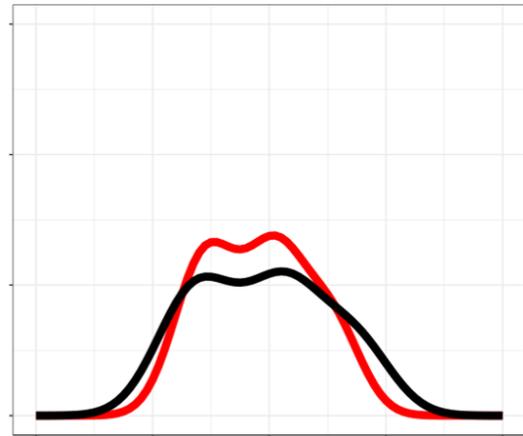


第 1.6-2 図 正規分布の重ね合わせ

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	○			○		○

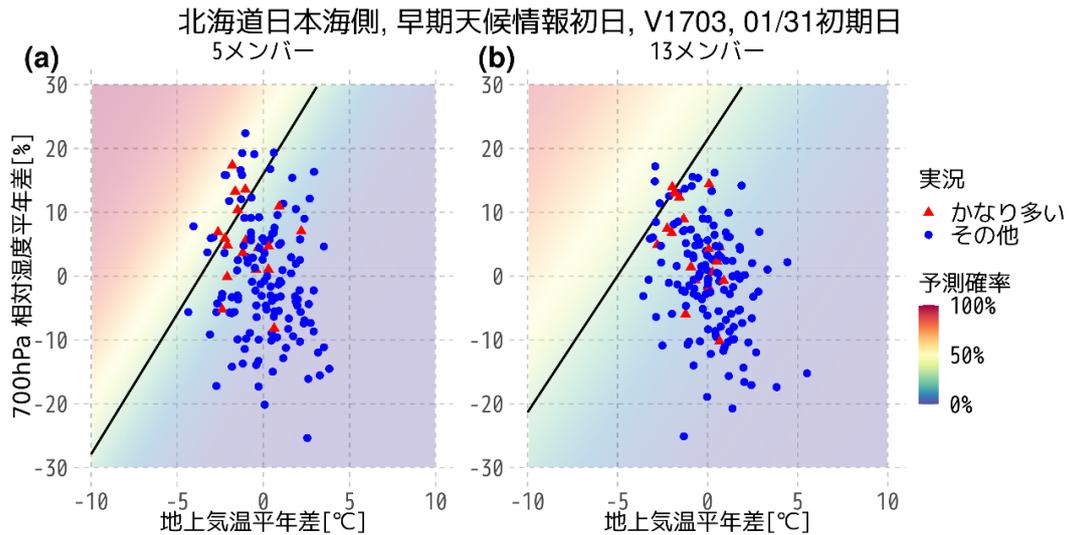
つとしてモデルの地上気温(以下、Ts)を用いると、他の説明変数の検討時には、目的変数である気温と相関が大きい、Ts とは相関が小さいものを探すという、一見矛盾した命題をクリアしなければならなくなる。この命題のクリアは難しく、実際、旧ガイドンスでは、目的変数と相関の小さい説明変数が選択されている予測式もあった。その相関の小さい説明変数の係数は値が小さいものの、モデルの値が十分に大きくなったときには予測に対する寄与が大きくなる。たとえば、気温の予測式で最も相関の高い説明変数 Ts が弱い負偏差でも、別の説明変数の値が極端に大きいと気温の予測値は正偏差になりえる。その結果、モデルの結果からはガイドン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

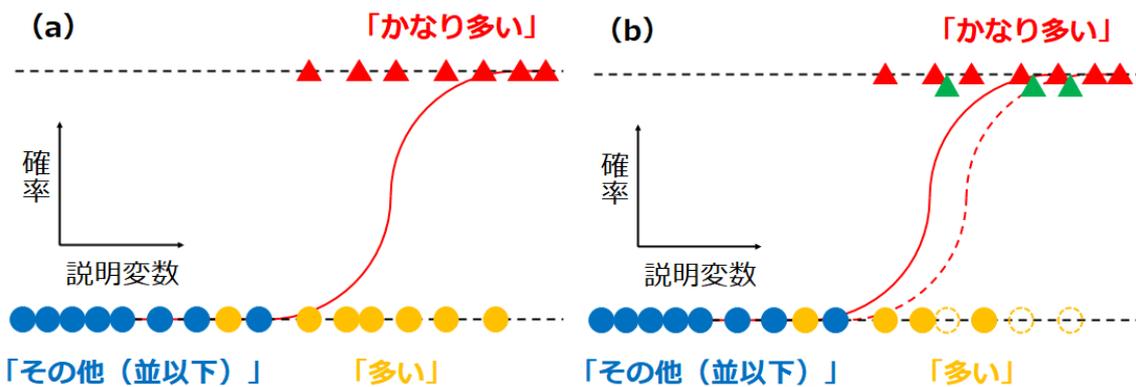
第 1.6-1 表で示した通り、大雪早期天候情報ガイドンスは他の季節予報ガイドンスに用いられている線形回帰ではなく、ロジスティック回帰を採用している(住友ほか, 2020)。これにより、降雪量が「かなり多い」確率を予測するのに特化したガイドンスを作成でき、旧ガイドンスでは線形回帰より適合率・捕捉率³が改善した。しかし、この手法をそのまま新システムに適用する

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

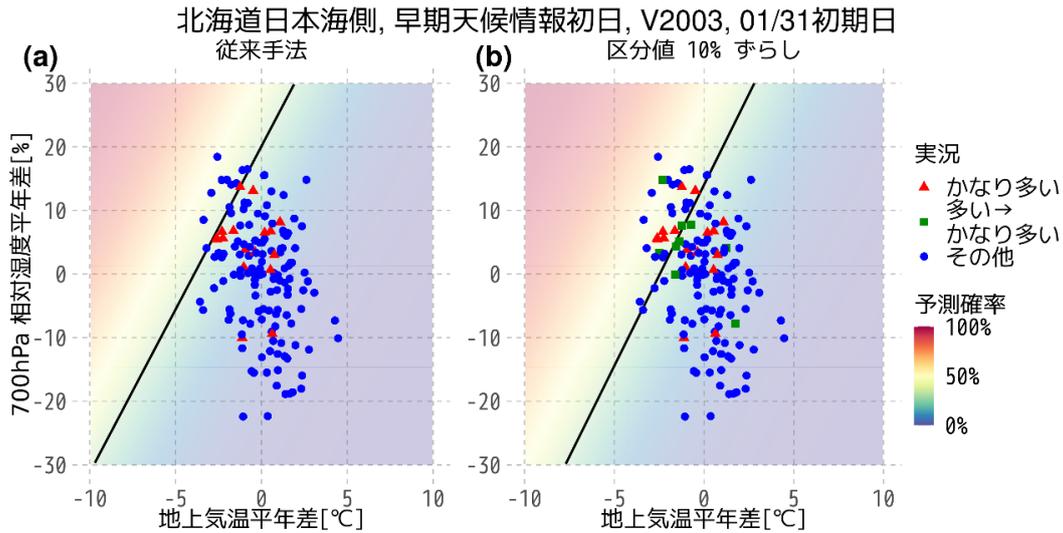
(a)が従来手法、(b)が「かなり多い」区分値から 10%以内の「多い」事例を「かなり多い」として学習した手法を示す。赤点が「かなり多い」事例、黄点が「多い」事例、緑点が「かなり多い」区分値から 10%以内の「多い」事例、青点が「その他(並以下)」事例を示す。

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)の変化が旧仕様と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)で分離できることが必要であるが、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

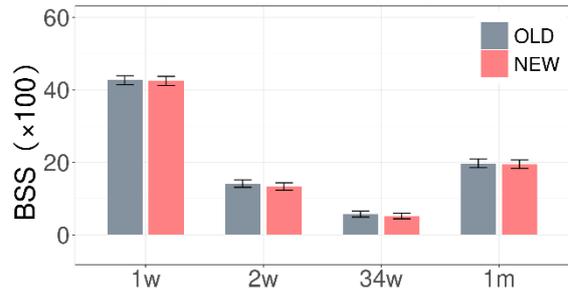
$$F1\ score = \frac{2}{\frac{1}{precision} + \frac{1}{recall}}$$

(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。

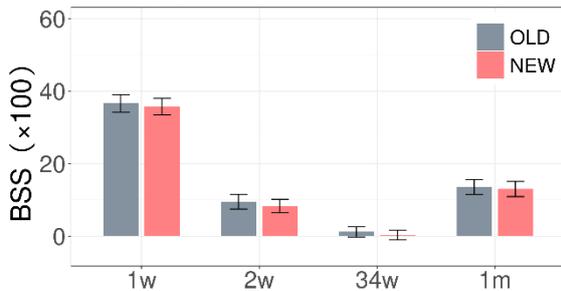
BSS (平均気温、全季節)



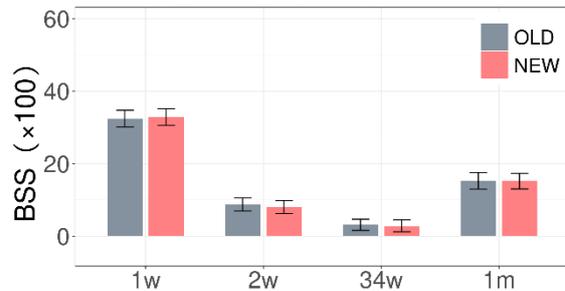
第1.6-7図 全季節全地域で集計した気温のBSS×100の新旧精度比較

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。

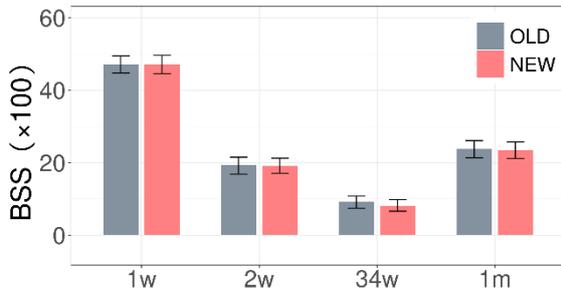
(a) BSS (平均気温、春)



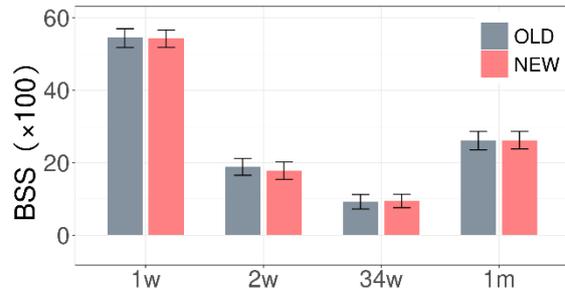
(b) BSS (平均気温、夏)



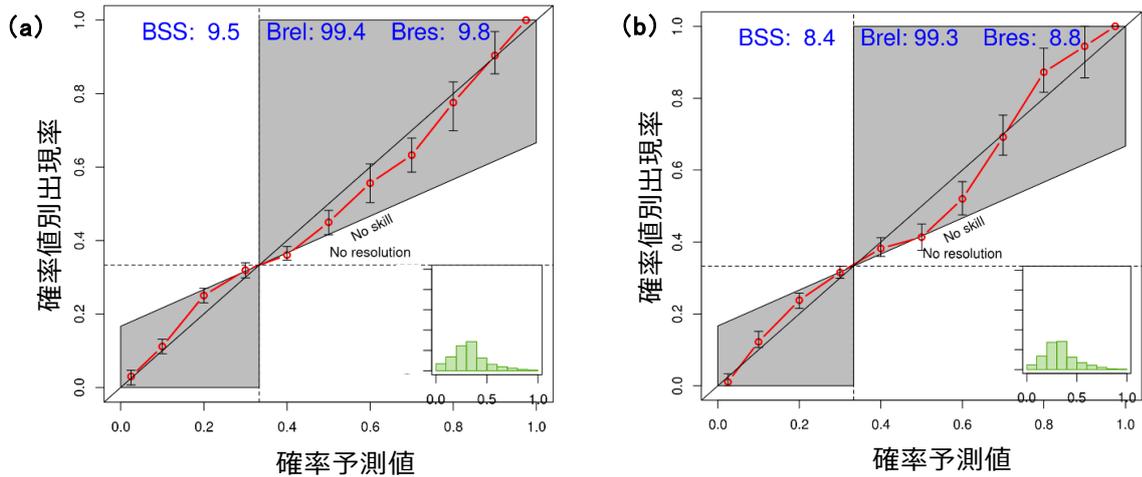
(c) BSS (平均気温、秋)



(d) BSS (平均気温、冬)

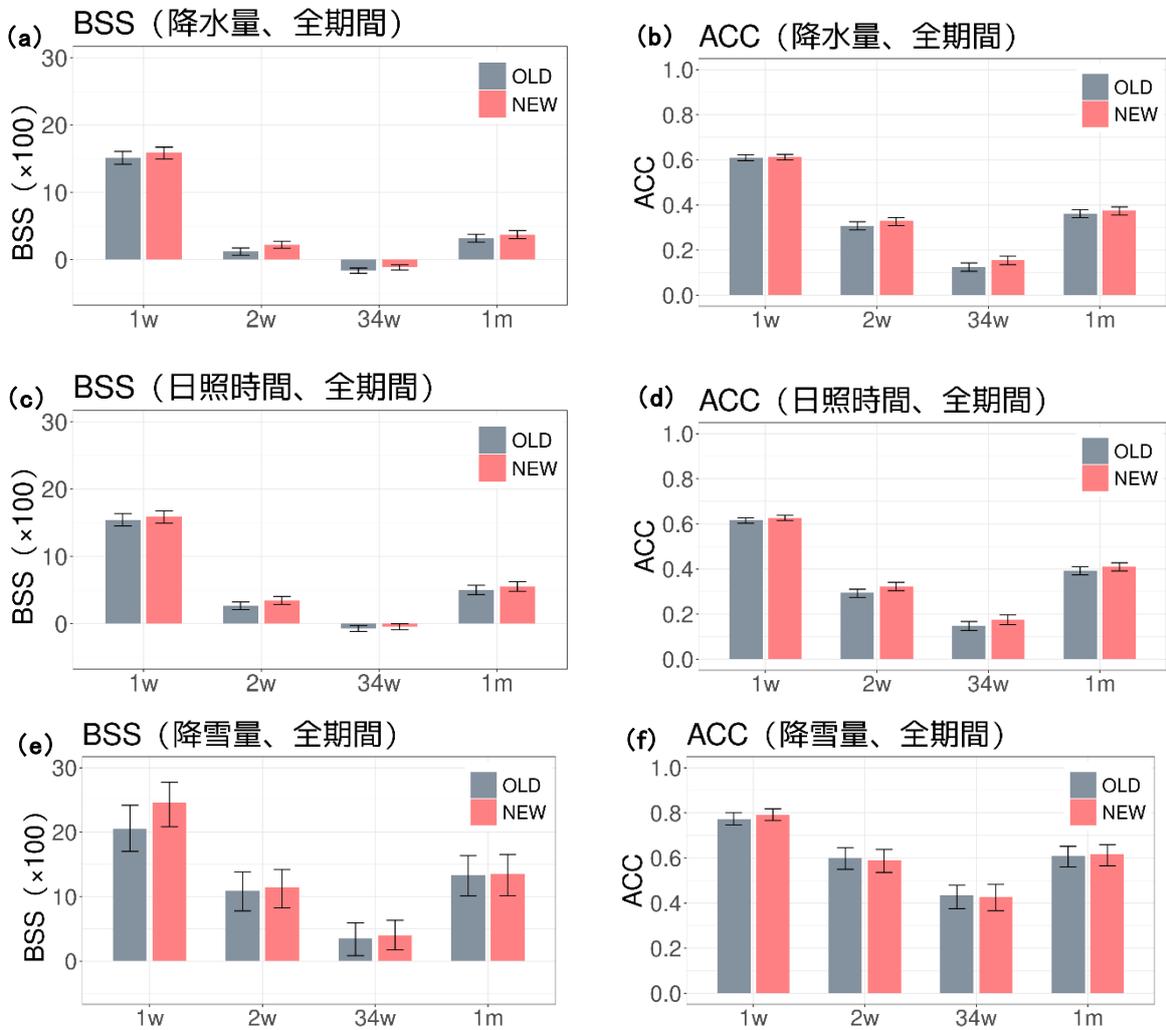


第1.6-8図 全地域季節別に集計した気温のBSS×100の新旧精度比較
図の見方は第1.6-7図と同様。ただし、(a):春、(b):夏、(c):秋、(d):冬。



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

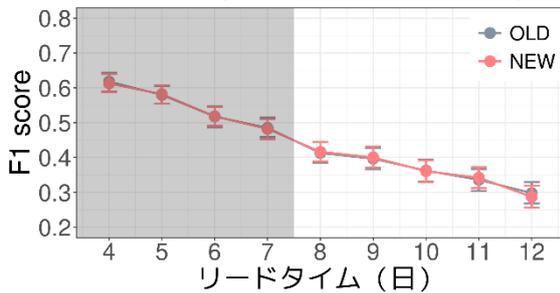
図の見方は第 1.6-7 図と同様。ただし、(a)、(c)、(e)が BSS の 100 倍値、(b)、(d)、(f)がアンノミー相関係数で、(a)、(b):降水量、(c)、(d):日照時間、(e)、(f):降雪量。

(2) 2週間気温予報ガイダンス

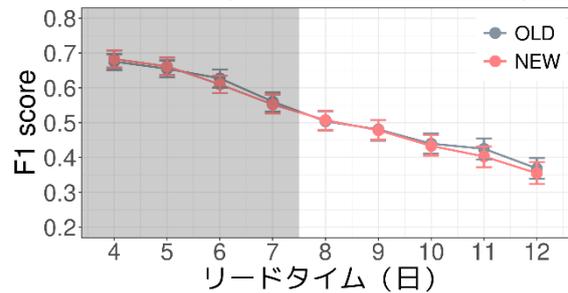
2週間気温予報では、地域平均気温に加えて、地点別気温についても提供を行っている。地域平均気温については、5日間平均値の階級(かなり高い、高い、平年並、低い、かなり低い)を予測する。一方、地点別気温については、最高気温、最低気温の5日間平均の階級に加えて、それぞれの値自体も予測する。ここでは、地域平均気温ガイダンスと地点別ガイダンスについて、それぞれ検証を行う。

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)



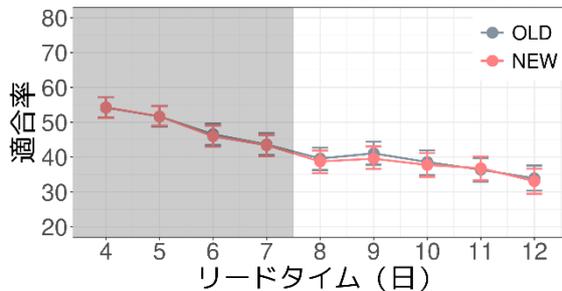
(b) F1 score (かなり低い、全期間)



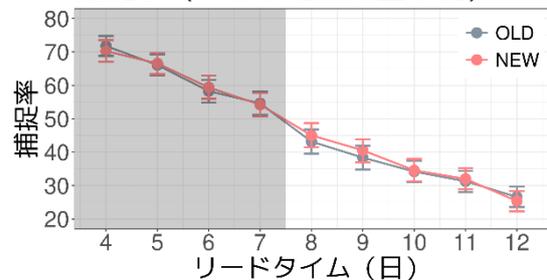
第 1.6-11 図 全地域全季節で集計した F1 score の新旧精度比較

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。

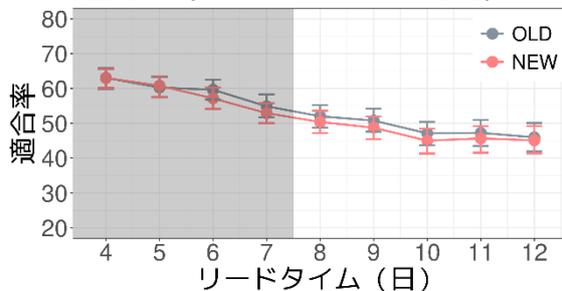
(a) 適合率 (かなり高い、全期間)



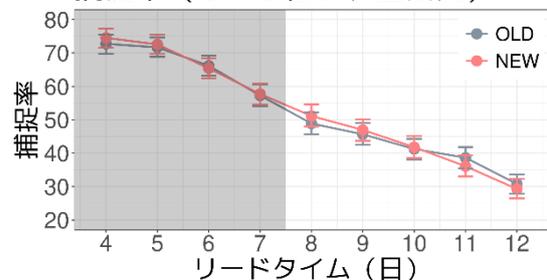
(b) 捕捉率 (かなり高い、全期間)



(c) 適合率 (かなり低い、全期間)



(d) 捕捉率 (かなり低い、全期間)



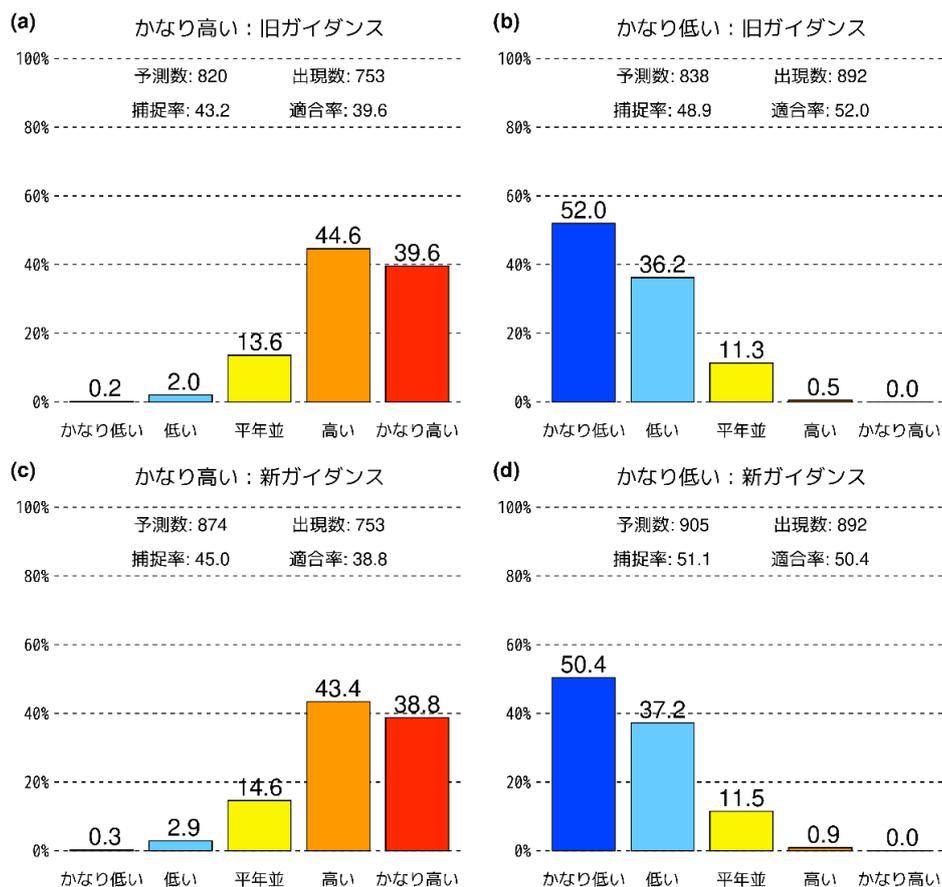
第 1.6-12 図 全地域全季節で集計した適合率、捕捉率の新旧精度比較

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

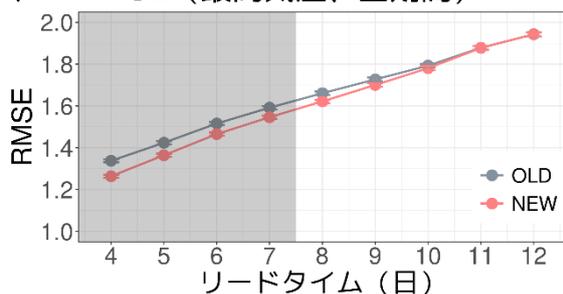
の差をみても大きな違いは認められず、両者はほぼ同程度の精度と言ってよいだろう。

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。

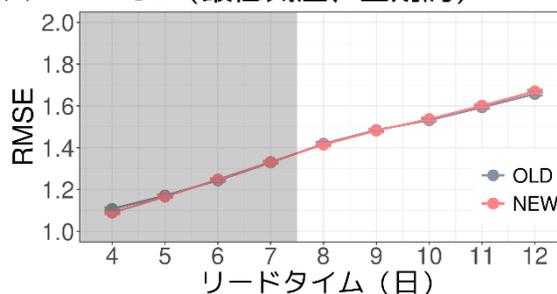


第 1.6-13 図 全地域全季節で集計したガイダンスが早期天候情報発表基準を超過したときの実際の階級別出現率 2 週間気温予報初日における集計結果。図中棒グラフ上部の数値はそれぞれの階級の出現率(%)を示す。(a)、(b)が旧ガイダンス、(c)、(d)が現ガイダンスで、(a)、(c)がかなり高い、(b)、(d)がかなり低い階級となる予測確率が 30%以上となったときの出現率を示す。

(a) RMSE (最高気温、全期間)



(b) RMSE (最低気温、全期間)

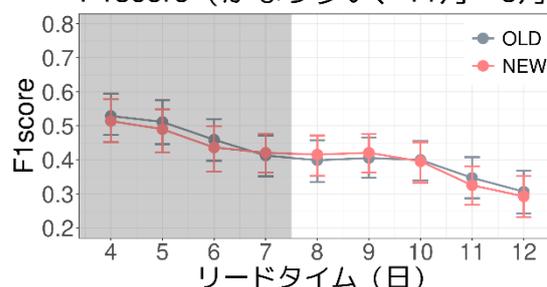


第 1.6-14 図 全地域全季節で集計した 5 日間平均地点別ガイダンスの RMSE (°C) の新旧精度比較
図の見方は第 1.6-11 図と同様。ただし、左:最高気温、右:最低気温。

(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。

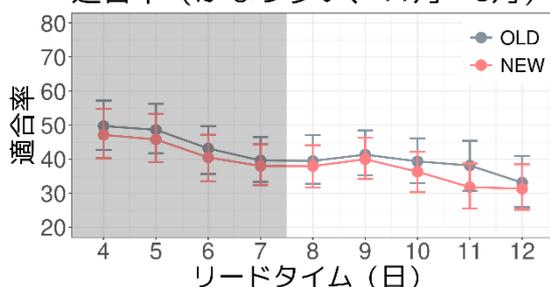
F1score (かなり多い、11月~3月)



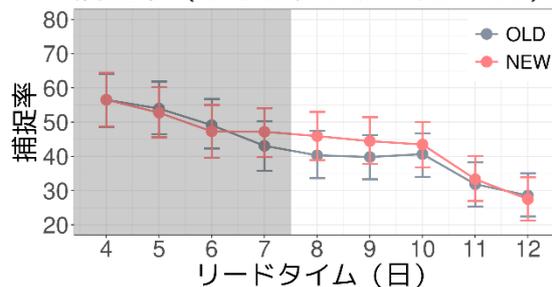
第 1.6-15 図 大雪早期天候情報対象の全地域全期間で集計した F1 score の新旧精度比較
かなり多い確率 30%以上を発表としたときの F1 score。図の見方は第 1.6-11 図と同様。

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)

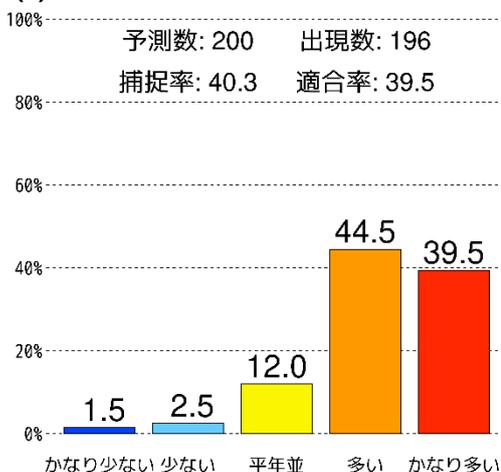


(b) 捕捉率 (かなり多い、11月~3月)

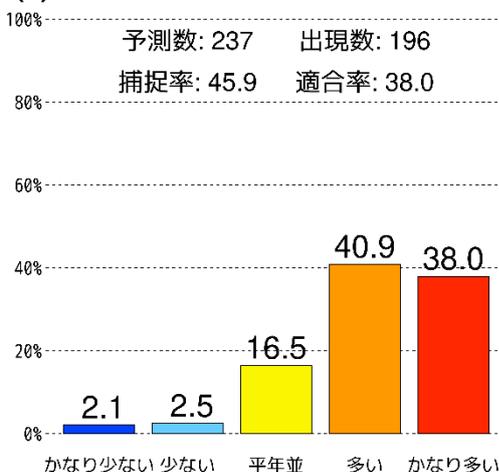


第 1.6-16 図 大雪早期天候情報対象の全地域全期間で集計した適合率、捕捉率の新旧精度比較
かなり多い確率 30%以上を公表としたときの適合率と捕捉率。図の見方は第 1.6-11 図と同様。(a)は適合率、(b)は捕捉率を示す。

(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.

2 近年の気候情報の活用と創出に向けた取り組み

2.1 はじめに¹

気候とは、ある程度長い期間にわたって平均した気温や降水量などの大気の状態のことで、異常天候のような平年との隔たりが大きい現象が持続する場合にはその影響は特に大きくなる。この具体的な例として、農業被害額が 500 億円以上の冷害・長雨・干害など災害をもたらした 2003 年や 1993 年の冷夏(長期緩慢災害)²などが挙げられる。近年では、地球温暖化を背景として、2010 年夏の猛暑のような極端な高温が多く発生するなど異常天候のリスクが増大している。猛暑の影響は、熱中症患者数の増加やコメの品質の低下の一方、エアコンなどの家電や飲料、氷菓、観光の売り上げが伸び、産業活動が活発になる。リスクという言葉は悪い影響の連想を与えるが、好影響も含めて気候リスクという。気候リスクは、社会生活に影響を与える異常天候が発生する可能性と、その影響の大きさの掛け算であらわされるので、極端な天候の可能性が小さくても、その影響が大きければリスクは大きい。

好影響の活用と悪影響の回避には、気候情報を利用した事前対策や備えが有効である。過去の統計値を利用して気候による影響を定量的に把握し、季節予報などの情報を用いて対応することを気候リスク管理という。気象予報には、毎日の天気予報から 6 か月先までを対象とした情報があるが、その基となる数値予報技術の向上によって、その利用可能性は増大している。

本章では、最近の気候情報の活用例と創出に向けた取り組みを紹介する。第 2.2 節では、気候情報の利活用に関する知見を整理することを目的として、過去の文献や調査をレビューする。第 2.3 節では、家電流通分野や清涼飲料分野など、近年取り組んだ気候リスク管理技術の創出や、関係機関へのアンケートなどで得られた 2 週先の気温予測情報の活用の現状から、農業指導現場での活用の広がりについて紹介する。

第 2.4 節では、気候情報の利便性向上を目指した新たなコンテンツを紹介する。

¹ 萱場 互起

² https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/data/bosai/report/index_other.html

2.2 文献や調査報告レビュー¹

2.2.1 季節予報研修テキストと関連文献

季節予報研修テキスト²では、これまで気候情報の活用に関する内容を掲載している(第2.2-1表)。中三川(2013)は、気候リスク管理技術の有効性の高まりを鑑みて、国際的な動向を背景にした国内での取り組みを紹介している。例えば、農業関係機関(当時の独立行政法人農業・食品産業技術総合研究機構で、以下、農研機構)やアパレル・ファッション分野(一般社団法人日本アパレル・ファッション産業協会)などの様々な産業分野と連携した、2週先の気温の予測情報(以下、確率予測資料)を活用した気候リスク管理技術の創出の取り組みがある。また、気候情報の利便性の向上のための取り組みも紹介している。例えば、2週間気温予報と1か月予報において、過去に遡って予報をした結果(以下、再予報)を、情報利用促進を目的に気象庁ホームページ³で公開するなどの取り組みがある。萱場(2018)では、この確率予測資料が都道府県で作成する農業技術情報での活用が広が

ってきていることを示した。

なお、予測を活用する際に重要となる不確実性の評価手法については、中三川(1999, 2013)や渡辺(2008)を参照いただきたい。これらの文献では、例えば、世界気象機関(WMO)の基礎システム委員会(CBS)が提案している標準検証システム⁴を紹介している。これは、世界各地の気象センターから提供される長期予報の精度を共通の基準で評価するためのシステムで、MSSS⁵やROC⁶といった評価・検証手法がある。その他、平均誤差⁷、2乗平均平方根誤差⁸、アノマリー相関係数⁹、確率値別出現率、ブライアスコア¹⁰やRPスコア¹¹などの評価指標の詳細を紹介している。予測の相互評価のためには共通した指標を用いなければならないが、利用目的に応じて適切な指標で評価することも必要である。

第2.2-1表 季節予報研修テキストと関連文献(気象庁研究時報)

文献	題目	筆者など
平成11年度季節予報研修テキスト 季節予報の確率表現の普及に向けて(1999)	・季節予報の評価(第5章) ・確率予報の利用法(第6章)	中三川浩 (1999)
平成11年度全国季節予報技術検討会報告3か月・ 暖候期・寒候期予報の充実及び季節予報の確率表 現の普及に向けて(気象庁研究時報 vol 53 (2))	季節予報の確率表現の普及に向けて (第3章)	木村吉弘 和田高秀 (2001)
平成16年度季節予報研修テキスト 気候の変動と季節予報	確率予報の利用(第6章)	杉正人 (2004)
平成20年度季節予報研修テキスト 異常天候早期警戒情報とその利用	・季節予報の利用をめぐる世界の動向 (第3.3章) ・確率情報の評価手法(巻末付録)	渡辺典昭 (2008)
平成24年度季節予報研修テキスト 季節予報作業指針	季節予報の評価手法(第4.4章)	中三川浩 (2013)
平成25年度季節予報研修テキスト 大雪に関する異常天候早期警戒情報・気候リスク 管理技術の普及への取り組み	気候リスク管理技術の普及に向けた取り組み (第2章)	中三川浩 (2013)
平成30年度季節予報研修テキスト 2週間気温予報とその活用	・異常天候早期警戒情報のレビュー活用事例 (第1.2章) ・2週間気温予報(5日間平均気温)の活用	萱場互起 (2018)

¹ 萱場 互起

² 平成24年度版以降は気象庁ホームページから取得可能
<https://www.jma.go.jp/jma/kishou/books/kisetutext/kisetutext.html>

³ <https://www.data.jma.go.jp/gmd/risk/index.html>

⁴ Standardized Verification System; SVS

⁵ Mean Square Skill Score

⁶ Relative Operating Characteristic

⁷ Mean Error; ME

⁸ Root Mean Square Error; RMSE

⁹ Anomaly Correlation Coefficient; ACC

¹⁰ Brier Score; BS

¹¹ Ranked Probability Score; RPS

2.2.2 気候リスク管理関連の過去の調査報告

多くの産業分野は、天候変動の影響を受ける。気象現象が影響を与える度合いや要因、影響の現われ方は、食品分野やアパレル・ファッション分野など業種によって様々である。例えば、レジャー分野は、入場者数が雨の影響を大きく受ける。このようなことを踏まえて、気象庁ほか(2001)では、企業での天候リスクマネジメントにおける気象予報の活用可能性を調査している。当日から1週間後までの販売計画、人員配置などの判断には、気象観測データ(実況)や明後日までの天気予報、週間天気予報が活用できる。経営・財務戦略といった1か月から半年後までの中長期的な見直しには、1か月、3か月予報といった季節予報が活用できる。本調査では、企業収益に係る気象要素(例えば気温など)の出現確率の分布をアンサンブル手法¹²による数値予報結果から求めている。更に、その結果を企業の売上や経常利益の確率分布に変換することで確率的な情報の利用方法を検討している。企業が、経常利益に関する確率分布を基に、経営・財務戦略における事前対応が必要と判断すれば、天候デリバティブ¹³(土方, 2000)などを採用した収益の平準化(リスクヘッジ)を図ることができる。みずほ第一ファイナンシャルテクノロジー(株)(2003)では、アンサンブル予報から得られる確率情報を天候リスクマネジメントに活用するための方法として、市場リスク分析に用いられる金融技術(Earnings at Risk)を提案している。これは市場価格の変動リスクなどを対象に行われる分析手法だが、本調査では販売量の変動に適用している。

朝倉(1990)や朝倉ほか(1992)では、様々な産業分野における製造から販売の各工程で活用できる気象情報を紹介している。これらを参考に、各産業分野

が活用できる気象予報と用途を第2.1-2表に整理した。販売計画や製品の市場動向調査は、約半年から進められるため、暖・寒候期予報が利用できる。生産計画の決定や需要予測、販売のための宣伝計画には、1か月予報や3か月予報も活用できる。生産調整には、週間天気予報から3か月予報も利用できる。出荷計画・イベント設定・仕入れでは週間天気予報と1か月予報が利用できる。販売時期の輸送計画・レイアウト・販売促進・在庫調整では、週間天気予報が意思決定に利用される。これらの気象情報をシームレスに活用するためには、それぞれの気象予測がもつ不確実性を十分に考慮し、更に最新の情報に逐次更新できるシステムが必要となる。

気象情報を具体的に活用する手法として、ウェザーマーチャндаイジング¹⁴がある。これは、商品の販売量を「曜日、気温、降水量、降雪量、風、月給日、行事」の関数形で示し、これにそれぞれの気象予測値を入力して得るという方法である。販売店では、出力した結果と競合店の不定休日などの要因も踏まえて、翌日の仕入れ量を最終判断する。販売量は、来店客数に大きく影響され、大きな決定因子となるため、販売店の立地条件(駅からの距離、駐車場の有無、周辺域での宅地開発の有無、リゾート地)に左右される。このため、販売店ごとの販売量予測式(関数)が必要になる。

立平(1999)は、コンビニエンスストアのように商品発注などの経営判断に気象情報を取り込んでいる企業もあると紹介している。各店舗では、販売量予測を基に適切な発注することで、欠品(販売機会ロス)を防ぎ、過大な在庫を抱えないように適切な在庫調整ができる。また、顧客にとっては、希望の商品が品切れとなることが少なく、購買意欲に従った買い物ができる。この実用化には、各店舗における販売量予測式の他、監視システムといったアプリケーションが重要な役割を担う。

¹² 季節予報では、スーパーコンピュータを用いて物理学に基づき気温や風などの時間的な変化を計算し、将来の大気の状態を予測している(これを数値予報という)。週間天気予報及び1か月予報等では、数値予報に基づくアンサンブル予報を導入している。アンサンブル予報とは、初期値にわずかのバラツキを与えた複数例の数値予報の結果を統計的に処理するものである。

¹³ 気温・降水量・積雪深など、あらかじめ定める気象に関する指標の観測結果に基づき、補償金の額を決定する損害保険分野における金融商品のことである。

¹⁴ 気象と商品の関係を要因分析して、気象情報を商品価値に転化する商法のことである。

第 2.2-2 表 各産業分野が活用できる気象予報と用途

分野・商品	各気象予報と活用
農業	<ul style="list-style-type: none"> ・ 3～6 か月予報：作付け品種の決定、農作業のスケジュールの決定 ・ 1 か月予報：水管理・病虫害予防 ・ 週間天気予報：日々の農作業
青果	<ul style="list-style-type: none"> ・ 6 か月予報（作物の生育期間をカバー）：仕入れ、販売 ・ 1 か月予報：食味・品質の把握 <p>野菜、果物。生産地の気象状況を入力し、生産量、品質を予測する。</p>
家電	<ul style="list-style-type: none"> ・ 1 年くらい先の予測：製品開発 ・ 3 か月以上先の予測：部品手配 ・ 1 か月予報：販売
繊維	<ul style="list-style-type: none"> ・ 6 か月予報から 1 年：生産計画 ・ 3～6 か月予報：計画の見直しに有効、販売計画の作成 ・ 1 か月予報：販売計画の修正、 ・ 週間天気予報：仕入れ、在庫調整
観光・レジャー	<ul style="list-style-type: none"> ・ 週間から 3 か月予報
電力	<ul style="list-style-type: none"> ・ 冬の積雪予報
水産	<ul style="list-style-type: none"> ・ ホタテの養殖、ノリの作柄、カツオ、サンマなどの季節魚の漁獲高予想 ・ エルニーニョと魚粉価格、水温予測などに気象情報が有効
季節商品	<ul style="list-style-type: none"> ・ 6 か月予報：仕入れ計画 ・ 3 か月予報：仕入商品の選別、仕入量の決定 ・ 1 か月予報：商品の仕入、販売時期決定、重点販売商品の選定 ・ 週間天気予報：広告、特売などのイベント計画、在庫管理、週間の発注 ・ 72 時間先までの予報：発注量の最終決定、計画販売、店内ディスプレイの決定、来店客数の予想確定

2.2.3 国外における気候情報の活用の取り組み

世界中で発生する異常天候や気候変動による社会経済への大きな影響を軽減するための対策が求められている。大野(2019)では、外国気象機関が提供する最近の気候予測に関するアプリケーションを紹介している。渡辺(2008)では、アプリケーションのみならず、ワークショップなど気候予測を用いて対策を検討する取り組みも紹介している。米国では、地域の大学が自治体や企業、米国海洋大気庁(NOAA¹⁵)の地域センターと連携したアプリケーションの開発が進んでおり、例えば、フロリダ大学が米国農務省(USDA¹⁶)とも連携して運営する南東部気候コンソーシアム¹⁷にて開発した農作物生産や畜産向けのコンテンツ(AgroClimate¹⁸)がある。このコンテンツでは、エルニーニョに関する予測情報や季節予報、48 時間後までの降水に関する予測情報の他、選択した地点における病虫害発生リスクに関する指標や、柑橘などの農作

物の発育予測診断、積算温度を計算する機能も提供している。NOAA の中西部地域センター¹⁹においても、同様な農業に役立つ意思決定支援サービス²⁰を提供しており、農作物の凍霜害の監視のための指数も掲載している。ネブラスカ大学リンカーン校の国際干ばつ緩和センター(NDMC²¹)では、NOAA の気候データセンター²²と USDA と連携して、全米を対象とした長期間の少雨(干ばつ)の対策を目的とした監視用モニター²³の開発と運営を行っている。2 週先やより長期間を対象として、干ばつの発生リスクの高まりを指標(パーセンタイル)に基づいて警戒を促す。現在も、関係機関(気候情報の作成者と利用者)が連携してアプリケーションの改善を進めている。

最近では、NOAA の気候予測センター(CPC²⁴)が、8 日から 14 日までの予測期間における極端現象を監

¹⁵ National Oceanic and Atmospheric Administration

¹⁶ United States Department of Agriculture

¹⁷ Southeast Climate Consortium

¹⁸ <http://agroclimate.org/>

¹⁹ Midwestern Regional Climate Center

²⁰ The Vegetation Impact Program

²¹ <https://www.climate.gov/maps-data>

²² National Climate Data Center

²³ <https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/Drought/>

²⁴ Climate Prediction Center

視するためのモニター²⁵を開発している(Melissa Ou, 2014, 2016)。提供する予測要素は、日最高気温、日最低気温、降水量(3日合計降水量)で、気候学的な出現頻度を表すパーセンタイル値とともに示し、過去と比較しやすい仕組みになっている。利用者は、極端な状態(何年に1度程度など)の発生リスクの高まりと対象地域が早期に認識でき、事前対策に利用できる。現在は、風速に関する情報の追加も進められている。

米国以外の様々な国においても、気象関係機関による産業分野と連携した気候情報の利活用促進の取り組みが進められている。Expert Team on User Interface for Climate Services(2018)では、ウェブサイトを活用した気候情報提供の例、相互対話による気候情報の提供例、特定ユーザーに特化した気候情報提供の例に分けて気候情報の活用促進の例を紹介している。ウェブサイトを活用した気候情報提供の例では、香港やオーストラリアの気候情報サービスがあり、将来気候も含めたデータのダウンロードも可能であるのが特徴である。相互対話による気候情報の提供例では、西アフリカの農業向けに実施されているセミナーが実施されており、気象・気候に対する普及啓発を担っている。特定ユーザーに特化した気候情報提供の例については、オーストラリアにおける砂糖産業のための監視システムやベトナムにおけるコーヒー豆の生産量予測、流通計画のためのサービスがある。オーストラリアでは、ラニーニャ現象が発生していた2010年から2011年にかけての豪雨により砂糖産業に大きな影響があった。このため、気象関係機関が砂糖輸出会社と連携して、1~4か月程度先の降水量や最高気温、最低気温、日射量の予測システムの開発を進めている。高度な気候予測情報に基づく生産計画(砂糖収穫期のずれによる対応)、流通に関する経営判断を行うことで、サプライチェーンを効率化し利益を得ることを目的としている。

2.2.4 まとめ

本節では、産業分野における気候情報の活用について、国内における過去の文献や国外の取り組みを

紹介した。例えば、家電分野においては、市場調査や長期の傾向とともに気候(平年値など)も含めて総合的に需要予測を判断し、その後の工程では、3か月予報などや市場動向を基に需要予測の調整を行う。販売までの時期に近づくと、1か月予報や週間天気予報に基づく最終的な需要予測を行い、生産計画を微調整する。

企業活動における各工程で気候リスク管理をするには、各予報がもつ不確実性を十分に考慮し、コストとロスも念頭に意思決定することが求められる。予報対象期間が長期になるほど不確実性が高まるため、アンサンブル予報から得られる確率情報を逐次最新の情報に更新できるシステムが必要となる。コンビニエンスストアなど多くの販売店を抱えるチェーン店では、ウェザーマーチャンダイジングの実用化に、各販売店における販売予測式の他、監視システム(アプリケーション)が重要な役割を担う。2.2.3項では、米国における地域産業に気候リスク管理技術を実装するためのアプリケーションの開発の取り組みを紹介した。気候情報の作成者と利用者が、ニーズとシーズについて相互理解を深めながら、異常天候の予測とその影響を監視するアプリケーションの開発と改善に取り組み、気候リスク管理技術の実用化と高度化が進められている。第2.3節では、当庁における最新の2週先の気温予測の様々な産業分野での気候リスク管理技術の創出に向けた取り組みと具体的な活用事例について紹介する。

参考文献

- 朝倉正, 1990: 産業と気象のABC. 成山堂書店, 240pp.
- 朝倉正, 赤津邦夫, 奥山和彦, 1992: 経済活動と気象. 朝倉書店, 167pp.
- 土方薫, 2000: 天候デリバティブ. シグマベイズキャピタル, 181pp.
- 萱場互起, 2018: 2週間気温予報とその活用. 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, 4-9.
- 萱場互起, 2018: 活用事例. 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, 100-102.
- 気象庁, 経済産業省, 2001: 企業の天候リスクと中長期気象予報の活用に関する調査報告書. 気象庁委託調査. 平成13年度気象庁委託調査

²⁵ Week-2 Probabilistic Forecasts of Hazards and Extremes

- 木村吉弘, 和田高秀, 2001: 3 か月・暖候期・寒候期予報の充実及び季節予報の確率表現の普及に向けて. 平成 11 年度気象庁研究時報 vol 53 (2), 37-50.
- みずほ第一ファイナンシャルテクノロジー(株), 2003: 天候リスクマネジメントへのアンサンブル予報の活用に関する調査報告書. 平成 14 年度気象庁委託調査
- 中三川浩, 1999: 季節予報の評価、確率予報の利用法. 平成 11 年度季節予報研修テキスト, 気象庁気候・海洋気象部, 30-52.
- 中三川浩, 2013: 季節予報の評価手法. 平成 24 年度季節予報研修テキスト, 気象庁地球環境・海洋部, 271-281.
- 中三川浩, 宮脇祥一郎, 前田修平, 野津原昭, 伊藤明, 荒井宏明, 2013: 気候リスク管理技術の普及に向けた取り組み. 平成 25 年度季節予報研修テキスト, 気象庁地球環境・海洋部, 17-62.
- 大野浩史, 2019: 外国気象機関の状況. 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, 103-104.
- 杉正人, 2004: 確率予報の利用. 平成 16 年度季節予報研修テキスト, 気象庁地球環境・海洋部, 44-52.
- 立平良三, 1999: 気象予報による意思決定—不確実情報の経済価値. 東京堂出版, 142pp.
- 渡辺典昭, 2008: 季節予報の利用をめぐる世界の動向. 平成 20 年度季節予報研修テキスト, 気象庁地球環境・海洋部, 46-48.
- 渡辺典昭, 2008: 確率情報の評価手法. 平成 20 年度季節予報研修テキスト, 気象庁地球環境・海洋部, 76-84.
- Expert Team on User Interface for Climate Services, 2018: Guidance on Good Practices for Climate Services User Engagement. CCL/WMO, 35pp.
- Ou, MH., K. Pelman, M. Charles, and J. Gottschalck, 2014: CPC's New Week-2 Probabilistic Hazards Forecast and Extremes Tool. NOAA's National Weather Service 39th NOAA Annual Climate Diagnostics and Prediction Workshop Science and Technology Infusion Climate Bulletin.
- Ou, MH., M. Charles, and D. Collins, 2016: Sensitivity of Calibrated Week-2 Probabilistic Forecast Skill to Reforecast Sampling of the NCEP Global Ensemble Forecast System. Weather and forecasting 31, 1093-1107.

2.3 気候情報活用促進に向けた最新の取組現状¹

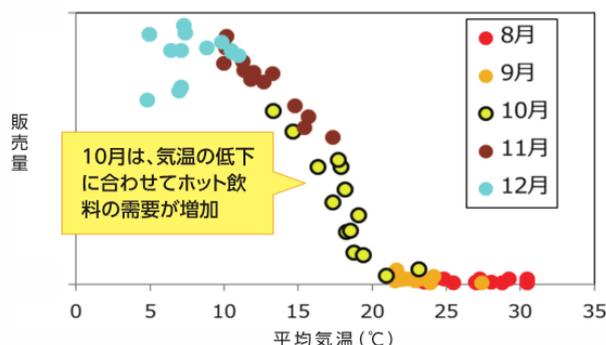
2.3.1 各産業団体と連携した気候リスク管理技術の創出に向けた調査

気象庁では、2008年以降、2週先の気温予測情報（異常天候早期警戒情報²とともにその基となる確率予測情報）を提供し、農業分野（気象庁、2016）やアパレル・ファッション分野（気象庁、2014）など様々な産業分野での利活用促進に組んでいる（第 2.3-1 表）。最近では、大手家電流通協会と一般社団法人清涼飲料連合会から協力を得て 2 週先の気温予測情報の活用について検討した（気象庁、2018a, 2018b）。清涼飲料分野では、自動販売機の販売量と気温の関係に注目した。屋外の自動販売機において、販売数

第 2.3-1 表 各産業分野を対象とした気候リスク管理技術の創出の取り組み

実施年度（年）	産業分野
2011～2015	農業（農研機構）
2012～2013	アパレル・ファッション産業分野
2014	ドラッグストア産業分野
2016～2017	家電流通分野 清涼飲料分野

コーヒー飲料等（ホット）の販売数と気温の関係



第 2.3-1 図 東京の平均気温と都内の屋外自販機でのコーヒー飲料など（ホット）販売数の散布図

横軸は 7 日平均気温（°C）、縦軸は 7 日間合計の販売数を示す（期間は 2014 年～2016 年）。※「コーヒー飲料など」は、清涼飲料生産量統計資料による分類。

と気温に高い相関がある商品があり、相関係数が 0.9 を超える商品もあることがわかった。時期について注目した結果、例えば、東京では、10 月頃の気温の低下に合わせて、ホットコーヒーが売れ始めることがわかった（第 2.3-1 図）。自動販売機の在庫を管理する部署では、自動販売機におけるホットとコールドの販売時期の切り替えに関するよりの確な指示が可能になる。

コーヒー飲料等の販売数と気温の推移（2017年10月）



第 2.3-2 図 東京の気温の推移と都内の屋外自販機でのコーヒー飲料などの販売数（2017 年の例）

左図は 10 月 17 日までにコールド飲料からホット飲料に切り替えた 15 台の平均、右図は 10 月 18 日以降に切り替えた 16 台平均。棒グラフ（左縦軸）は自販機 1 台あたりの 7 日間合計販売数（本）、折れ線グラフ（右縦軸）は 7 日間平均気温（°C）、横軸は日付を示す。棒グラフのうち青はコールド飲料、赤はホット飲料を示す。

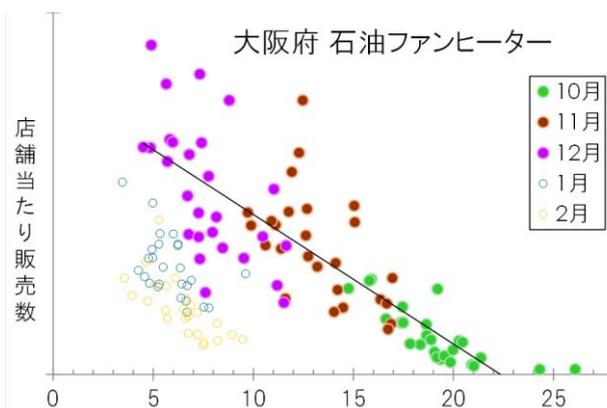
¹ 萱場 互起

² 2 週先の異常天候に関するアラーム情報で、現在は早期天候情報として発表している

そこで、東京都内において屋外自販機のホットコーヒー販売を対象として、2週先の気温予測を活用した場合のメリットを検討した。前週に比べて急激に気温が低くなった2017年10月17日までに、2週先気温予測も参考にコールドからホットに切り替えた自動販売機15台の平均販売量は、10月18日以降に切り替えた16台の平均と比べて多いことが示された(第2.3-2図)。2週先の気温予測を利用することで販売機会を捉えることができた。自動販売機の在庫管理の適正化は、販売機会ロスや商品廃棄ロスの削減につながり、大きな経済効果をもたらす。更に長期の予報を活用することで、生産調整や物流、マーケティングなど一貫した事業活動も可能になると期待できる。

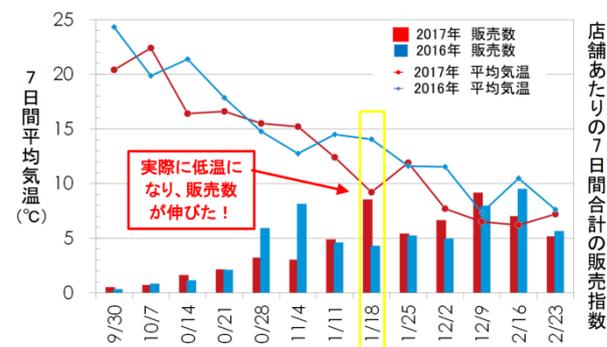
家電流通分野では、エアコンと暖房器具などの季節商品に注目して、販売管理における気候情報の活用可能性を検討した。例えば、大阪府内での石油ファンヒーターの販売数と気温の関係(第2.3-3図)を把握した。その結果を基に、2週先の気温予測を基として販売時期と販売量を予測した結果を検証した。2017年11月18日からの1週間では、その前週に比べて気温が急激に低くなり、石油ファンヒーターの販売数が前年、前週を大きく上回った(第2.3-4図)。このタイミングに対して、量販店で可能な2週間からの作業は、在庫管理や広告媒体(現場判断で行うポップ掲示)の工夫といった販売促進、店頭演出や人員配置などがある。従来から実施している前年、前週の売上を参考とする手法ではなく、気候予測を活用することで、低温による販売機会をより正確に、より事前に捉えることができる。更にその先の長期を対象とした予報を活用することで、サプライチェーン全体での効率化が可能となり、流通サービス産業の生産性向上に寄与できる。

家電流通分野や清涼飲料分野では、商品販売が気候の影響を大きく受けることを認識しており、エルニーニョ現象などに対する注目度は高い。しかし、気候情報を用いた具体的な対応は途上である。他の産業分野においても、勘と経験をもととした生産や販売計画が多くあると考える。引き続き、他の産業分野とも連携して、1か月予報や3か月予報も含めた気候情報の利活用事例の創出と事例展開を進めることが今後



第2.3-3図 大阪の平均気温と石油ファンヒーターの店舗当たりの販売数の散布図

横軸は7日間平均気温(°C)、縦軸は7日間合計の販売数を示す(期間は2014年~2016年)。黒線は10~12月のデータを基とした回帰直線を示す。



第2.3-4図 2017年の大阪の平均気温と府内の石油ファンヒーターの販売数の推移

左縦軸は7日間平均気温、右縦軸は店舗あたりの7日間合計の販売数、横軸は日付で、7日間の初日を示す。折れ線は7日間平均気温、棒グラフは販売数を表す。

の課題である。短期から長期における様々な気象情報を組み合わせて活用することで、販売予測の誤差によるミスマッチや製品廃棄や返品などのムダを減らし、持続可能な社会の実現に貢献できることを期待する。

2.3.2 アンケートでの予測情報の活用現状の把握

気象庁では、気象情報の改善や利便性向上に役立てることを目的に、農業(全国都道府県の農政部局や普及センターなどの農業関係機関)、水産業、健康、電気(電力会社など)、ガス、水道、報道、自治体(都道府県の防災部局、道路管理事務所といった防災機関の他、教育分野など)などの各分野を対象に、気象情報の活用の現状やニーズの調査を実施している。

第 2.3-2 表 異常天候早期警戒情報の活用例

農業	<ul style="list-style-type: none"> ・農林水産省や都道府県が作成する農業技術情報、病虫害発生予察情報 ・農業技術指導や気象災害対策マニュアル（果樹）への反映 ・対策会議の設置のトリガー ・農業者への巡回時に注意喚起 ・家畜の暑熱及び防寒の事前対策伝達 ・遅霜を回避した播種時期の調整 ・水稲育苗時の温度管理 ・ハウス管理（低温の際には強風で破損しやすい） ・除草などの作業計画（高温時の散布は玉ねぎに薬害が出るため）
電力	需要予想、大雪時の事前の体制確認
道路管理	除雪準備対策の体制確保
観光	ホテル内室温などの環境対策、食品の衛生管理

2015 年に実施した異常天候早期警戒情報の利用実態と要望に関するアンケート(対象は合計約 350 で、うち 260 が農業関係機関)の結果では、異常天候早期警戒情報を利用しているのは約 70%で、とくに農業関係機関では約 80%と高いことを示した。農林水産省では、高・低温対策に関する臨時情報(農業技術情報)を作成する意思決定に異常天候早期警戒情報を利用している。普及センターでは、営農支援情報の作成のトリガーの他、巡回、講習などでの技術指導にも、異常天候早期警戒情報を利用しており、被害軽減に役立っている(第 2.3-2 表)。

2 週間気温予報と早期天候情報の運用開始(2019 年 6 月)後に実施したアンケート(対象は合計約 300 で、うち約 190 が農業関係機関)の結果では、2 週間気温予報は、すでに 50%強の機関に利用されており、様々な活用方法が示された(第 2.3-3 表)。早期天候情報³は、60%以上の機関で利用されており、従来の異常天候早期警戒情報に引き続いて利用されている。2 週間気温予報は、毎日配信されるため、より迅速に早期警戒に関わる情報伝達が可能になったとの意見

³ 2 週先までに著しい高温や低温、降雪量が予想される場合に、地域ごとに発表される。異常天候早期警戒情報の後継である。

第 2.3-3 表 2 週間気温予報と早期天候情報の活用例

農業 高温 予測時	<ul style="list-style-type: none"> ・ニンジン栽培で、週間天気予報と組み合わせてトンネル開孔の作業適日を決定 ・アスパラガスの収穫作業を遅らせて品質低下を回避 ・一番茶の収穫時期を早めたことで、相場が高いうちに出荷でき利益を上げた。 ・花き（ストック）の出荷時期調整 ・牛体温度を下げ、授精の機会を増やした。
農業 低温 予測時	<ul style="list-style-type: none"> ・水稲の深水管理の徹底 ・桃の花粉の定着悪化を防ぐための人工授粉作業徹底を指導。 ・生育が遅れていたキャベツの収穫決定(収穫を延ばしても生育が期待できないため) ・春だいこんなどの栽培で、トンネルの換気(穴あけ)時期調整(遅らせる)で抽台防止 ・春ブロッコリーなどの定植時期調整(遅らせる)、不織布で被覆することで凍霜害防止
農業 大雪 予測時	<ul style="list-style-type: none"> ・雪害対策を発信し、ハウスの倒壊など防止などの被害軽減 ・積雪などによる果樹の枝折れや、ビニールハウスの倒壊などを軽減・防止するための事前対策、周知
水道局	水道管の凍結・破裂を予測
除雪	除雪準備対策の体制確保

も得られている。また、週間天気予報と 2 週間気温予報を組み合わせることで、2 週先までの作業計画(高温・低温対策や収穫、病虫害防除などの農作業日の意思決定)が可能となったとの意見もあった。農業以外では、2 週先の気温予測は、電力の需要予測、除雪準備対策の体制確保といった道路管理、観光分野における食品の衛生管理にも活用されている。

2.3.3 農作物発育や害虫発生予測での気候情報の活用促進と広がり

都道府県が作成する営農支援情報では、2週先の気温予測(従来は異常天候早期警戒情報で、現在は2週間気温予報)や1か月予報の基となる気温予報情報(以下、確率予測資料)の活用が進んでいる。これまでは、確率予測情報は、低温による水稲の深水管理や果樹の凍霜害への対策(農業資材の調達など)といった農作物の発育に危険な気温(閾値)に対する早期の備えのために利用されてきた。最近では、農作物発育予測モデルを活用した水稲の収穫適期予測を基とした刈り取り作業計画や、果樹の開花予測における受粉作業などでの人員配置、害虫発生予測を基とした防除計画など様々な場面において、確率予測資料の活用⁵が広がっている。これらの具体的な活用事例は、気候リスク管理ポータルの向こう2週間・1か月の気温予測データの活用事例集ページ⁶で紹介している。これらの事例も参考に、確率予測資料を活用した営農支援情報や発生予察⁷が増えている。例えば、栃木県農業環境指導センターが提供するヒメトビウンカの防除適期(植物防疫ニュース 速報 No3、2020年6月5日⁸)では、発表日までの実況値とそれ以降は1か月予報の確率予測資料を用いて算出した防除適期を示している。同様に、岩手県病害虫防除所では、斑点米カメムシであるアカスジカスミカメの発生予測(防除速報 No10 2018年7月13日⁹)に確率予測情

⁴ https://www.data.jma.go.jp/gmd/risk/pdf/riyou_catalog.pdf

⁵ 従来は、気象の実況値と平年値が農作物発育予測や害虫発生予測のモデル式の入力データとして用いられていたが、予測期間に用いる平年値を確率予測資料に置きかえた活用

⁶ https://www.data.jma.go.jp/gmd/risk/riyou_catalog.html

⁷ 主要病害虫の「発生時期と量」を予測し、防除の適期や農薬散布の要否を示した情報。農作物の生育にあわせて病害虫の発生状況を把握する定期調査に加えて気象予報などの蓄積されたデータをもとに毎月発出する定期予報と、臨時情報(警報、注意報、特殊報、技術情報)からなる。これらの情報の根拠として、過去の試験研究によって得られた病害虫の発生量と気象との関係に関する知見や積算温度を利用した病害虫の発生時期の予測モデルを用いており、この際に気候予測を利用している。

⁸ <http://www.jpjn.ne.jp/tochigi/file/yosatu/2020/sokuhou/2020sokuhou3.pdf>
(2020年6月閲覧)

⁹ <https://i-agri.net/Index/gate003/005/13423>

H30 モモの開花予想 第4報(H30/3/20現在)			
表 発育速度モデルによるモモ「白鳳」の開花予想			
今後の気温推移	予想開花始め	昨年の開花始め	平年値(H13~H29)
平年並	4月2日(平年より1日早い)	4月8日	4月3日
平年より2.6℃高い*	3月30日(平年より5日早い)		

予想地点は山梨市江曾原(標高440m)、品種は「白鳳」
* モデル予測値: 気象庁における確率予測資料(3/24~3/30、関東甲信地方、初期値3/18)

○ 留意点
今後の気温推移により、予測日は変化します。
3月末まで毎週1回予想を更新し、果樹試験場HPに掲載する予定です。
(http://www.pref.yamanashi.jp/kajushiken/103_001.html)

第 2.3-5 図 モモの開花日予想 2018年3月20日(山梨県果樹試験場)

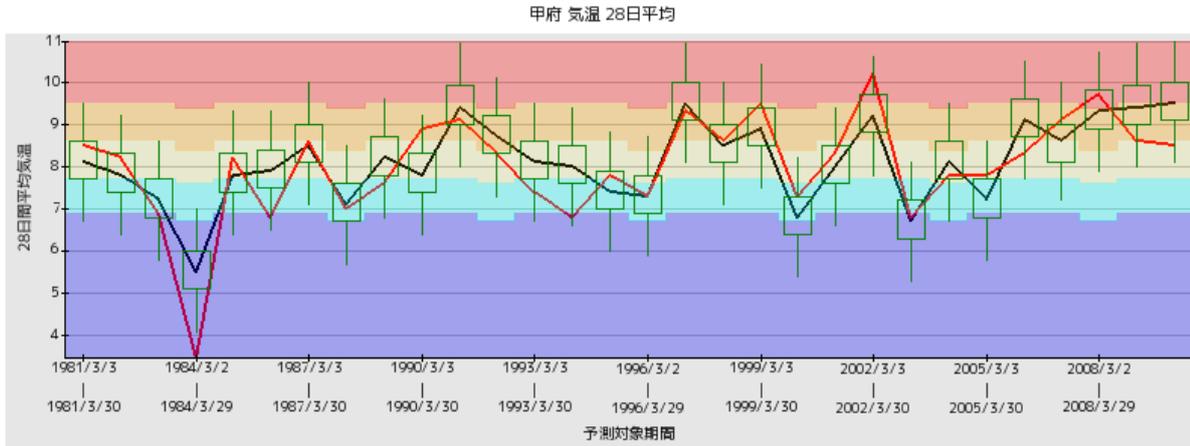
本活用は気象庁ホームページでも紹介している⁴

報を利用している。萱場ほか(2019)では、サトウキビの害虫であるカンショコバネナガカメムシの防除適期を対象に確率予測情報の活用メリットを評価している。1981年まで遡った再予報¹⁰の確率予測資料を用いてシミュレーションした結果、極端な高温年(1998年)では、平年値を用いた場合に比べて約3日程度精度が良くなることを示した。

山梨県果樹試験場では、2018年3月5日に発表された高温による異常天候早期警戒情報を根拠に、その基となる確率予測資料をモモの開花日予想に活用して、開花期の早まりの定量評価を行い(第 2.3-5 図)、作業・人員配置の徹底を呼び掛けた。萩原(2019)では、この事例を参考に、過去の高温年についても再予報の確率予測資料も用いてモモの開花日予測のシミュレーションを実施し、確率予測情報の活用メリットを評価している。また、甲府の3月を対象とした確率予測情報(1か月予報)について、1981年から2010年までの実況値との相関係数が0.82であることと、最近の極端な高温年において平年値に比べて良く再現できていると評価した(第 2.3-6 図)。同様に、通年で調査した結果、秋から冬にかけての相関係数が高い一方、夏期間で低いことを示し(第 2.3-7 図)、確率予測資料の季節特性を把握している。

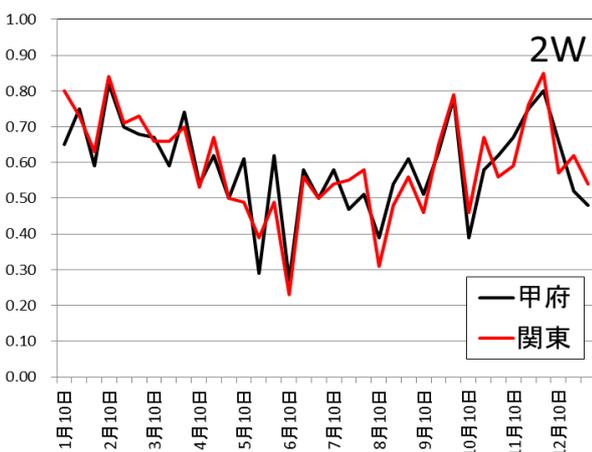
(2020年6月閲覧)

¹⁰ 現在の技術で過去の予測を再度行ったもので、予測の有効性の調査等に利用できる。



第 2.3-6 図 甲府における各年の 3 月(モモが開花に向かう生育ステージ)を対象とした 4 週間の気温の確率予測資料の予測精度(1981~2010 年)

赤線は実況、緑は確率予測で黒線はアンサンブル平均を示す。赤色は、気温が「かなり高い」、薄い黄色は「平年並」、青色は「かなり低い」を示す。2002 年や 2008 年のかなり高温な年では、予測でシグナルがあることが示されている。相関係数は 0.82。



第 2.3-7 図 通年における各初期値を対象とした甲府と関東地域での 2 週先の気温の確率予測資料と実測値の相関係数(1981~2010 年)

2.3.4 熱中症警戒での 2 週間気温予報の活用

福岡市環境局のイベント主催者向けの熱中症対策の手引き¹¹によると、2 週先の予測も活用して、開催時間(朝・夕の活用)・場所(屋外から屋内への変更)の再検討、医療体制・規模の再検討、十分な飲料の確保、プログラムや場所の変更・中止の検討、関係者の体調の確認、イベントの変更・中止の検討などの事前

¹¹ http://heatstroke.city.fukuoka.lg.jp/wp-content/uploads/heatstroke_a4_B.pdf
(2020 年 6 月閲覧)

対策を実施することを促している。日々変わる社会情勢や新型コロナ対策としてのマスク着用による熱中症リスクの高まりにより、イベント主催者には、よりの確かな判断(イベント参加人数の制限など)が求められる。医療や防疫などの防護服の着用が必要となる現場においても、休憩時間を設けるなどの対策とその計画の徹底が求められる。2019 年の高温が持続的に予測された際には、臨時の救急体制を延長した消防局もある。今後も、日々更新される 2 週間気温予報などの気象情報の有効活用が進むと考える。

2.3.5 まとめ

地球温暖化などを背景にした高温によるリスクの増大が懸念される中、災害を防ぐためのインフラ整備を進めるなどの取り組みは勿論、気象注意報や警報、天気予報など様々な気象情報を踏まえて個々の人の適切な対応に結びつけようとする、ソフト面での対応も重要である(高槻, 2020)。農業においては、農作物の発育や病害虫の発生時期や量の大幅な変動が懸念され、生産現場ではこれまでに経験したことのない極端な天候による様々な影響に対して的確に対応していくことが求められている。昨今の極端な高温は、農作物の収穫適期、開花期、防除適期の変化といった影響をもたらし、今後も懸念される。平年値を利用し

た年々における農作業計画が困難になりつつある中で、より長期間の気候予測値を用いることで、農業関係機関や生産者が実施するより効果的な事前のリスク管理の選択肢を増やし、被害軽減と生産性向上に寄与できる。都道府県が作成する営農支援情報の伝達手段には、ホームページや農業指導員による巡回や営農現場での講習などの他、最近では電子メールなど SNS を活用した情報提供の手段が広がっている。情報伝達技術と気象予測の高度化が連携し、より早い段階にて、より迅速に生産者に営農支援情報を提供できれば、その伝達範囲を広げることができ、技術指導の徹底も図られる。また、農業技術情報や普及指導員による説明内容においては、科学的手法である気候予測情報を根拠に含めることで、その情報の信頼性や説得性を高めることができる。農業以外の産業においても早期天候情報(アラート情報)を基としたオペレーションによる対応の充実と適切な在庫調整によって販売機会損失や食品ロスの軽減が期待できる。各産業界との連携した調査などで確認できた1~2週先からの対策を第2.3-4表に示した。

予測の活用で重要なことは、その改良によって、着実に予測精度の向上が図れることである。今後の予報システムの技術開発により、気候予測の精度は確実に向上し、さらにニーズに見合った予測精度に到達できれば、地域の産業振興を支援する重要なツールとして期待できる。

2019年6月からは、2週間気温予報とともに5日間平均の平均・最高・最低気温の確率予測資料を入手できるページを公開してその利便性の向上にも取り組んでいる(第2.4節)。確率予測資料(データ)だけではなく、グラフの描画が容易にできるサンプルワークシート(エクセルファイル)も提供を開始している。

第2.3-4表 各産業界との連携した調査などで確認できた1~2週先からの対策(気候リスク管理技術)

産業分野	1~2週先からの事前対策
家電	<ul style="list-style-type: none"> ・本社でのWEBチラシなどSNSで販売促進 ・店頭での販売促進、人員配置の調整 ・販売店舗での在庫調整
飲料	<ul style="list-style-type: none"> ・売上予測向上 ・自動販売機の補充
ドラッグストア・医療品	<ul style="list-style-type: none"> ・店舗における商品展開や在庫管理
アパレル・ファッション	<ul style="list-style-type: none"> ・在庫管理、倉庫からの商品配送量調整 ・売り場面積比調整など販売促進
農業	<ul style="list-style-type: none"> ・深水対策、早期摘み取り ・水稻、麦の出穂、収穫適期予測 ・果樹開花期予測 ・病虫害発生予察

参考文献

- 萱場互起, 永山敦士, 田村弘人, 真武信一, 2019: 気象予測値を用いた病虫害防除適期予測の精度向上~カンシャコバナネガカメムシにおける精度検証~. 植物防疫 73, 106-113s.
- 気象庁, 2014: 気候情報を活用した気候リスク管理技術に関する調査報告書~アパレル・ファッション産業分野~(平成25年度). 気象庁委託調査, 121pp.
- 気象庁, 国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構, 2016: 気候予測情報を活用した農業技術情報の高度化に関する研究. 共同研究報告書(平成23~27年度), 31pp.
- 気象庁, 2018a: 気候情報を活用した気候リスク管理技術に関する調査報告書~清涼飲料分野~(平成29年度). 気象庁委託調査, 124pp.
- 気象庁, 2018b: 気候情報を活用した気候リスク管理技術に関する調査報告書~家電流通分野~(平成29年度). 気象庁委託調査, 131pp.
- 高槻靖, 2020: 近年の異常気象の実態と予測されている変化. 植物防疫 74, 301-306.
- 萩原栄喜, 2019: 気象データを活用した山梨県におけるもの生育予測 グリーンレポート, 596, 2-5.

2.4 気温予測データの活用のためのコンテンツ¹

気象庁気候情報課では週間天気予報より先の予報においても比較的精度が高く実用性が期待できる気象要素である気温について、データ利用の促進のため、確率予測資料をウェブサイトより公開している。確率予測資料とは予報の基礎資料となるガイダンス(第1.6節参照)データのことである。本節では、向こう2週間および1か月の気温予測データと、データ活用のためのポータルサイト等のコンテンツについて紹介する。なお、本節で示す内容は2020年7月現在のものである。

2.4.1 2週間気温予報データ

(1) 背景

2週間気温予報の基礎資料となるデータ(以下「2週間データ」と呼ぶ)は「確率予測資料(2週間気温予報)提供ページ」よりCSV²形式にて取得できる(第2.4-1図)。

2週間データのウェブサイトからの提供は異常天候早期警戒情報(以下「早警」と省略する)が運用されていた時代に遡り(野津原2008)、当時の利用の用途は主に以下の2つであった。

- ① 定量的な情報の利用
- ② 予測データ(CSV)の数値的な利用³

まず、①について、早警は定性的なアラート情報であり、定量的な利用は難しかったため、これを補完する気温の具体的な値が分かる定量的な参考情報として2週間データ(確率予測資料)が提供されてきた。その後、令和元年6月に2週間気温予報が開始され、グラフや数値で定量的な情報がウェブサイトから閲覧できるようになった(第2.4-2図)。このため、2週間データの提供用ウェブサイトは②のようなデータの数値的な利用をするユーザーを主なターゲットとして、これに特化した構成へと更新した。以下では新しい2週間データとウェブサイトの特徴等について、具体的に紹

¹ 宮脇 祥一郎

² カンマ区切りのテキストファイル形式

³ 農作物の生育予測や、病害虫の発生予察、商品の売り上げ予測等への数値的なインプット用データとしての使い方が想定される。

介する。

(2) 2週間データの概要

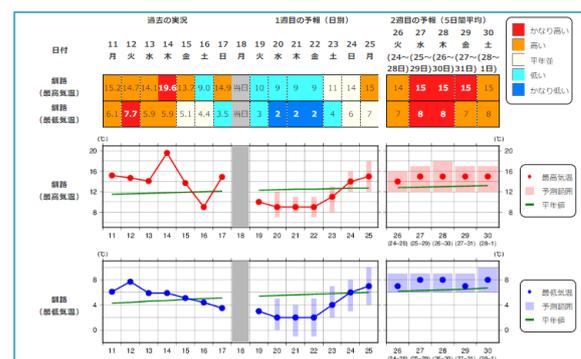
2週間データは、2週間気温予報と比較して、以下のような特徴がある。

- 0.1℃単位の気温情報
- 詳細な確率情報(累積分布関数⁴)
- 最高・最低気温に加え平均気温の要素がある
- 毎朝9時30分頃⁵までに更新される



第 2.4-1 図 確率予測資料(2週間気温予報)提供ページ(2020年7月現在)

https://www.data.jma.go.jp/gmd/risk/probability/guidance/csv_k2w.php



第 2.4-2 図 2週間気温予報の例(2020年7月現在)

気温の予報や予測幅(不確実性)が数値やグラフで時系列的に閲覧できる。

<https://www.data.jma.go.jp/gmd/cpd/twoweek/>

⁴ 注目する気温以下となる確率値のこと。

⁵ 2週間気温予報の発表は毎日14時30分(日本時間)

2 週間データは 2 週間気温予報よりも数値的に詳細なデータが必要な場合や、データの機械的な処理をする場合の利用が想定される。

(3) CSV ファイルの概要

ウェブサイトから取得できる CSV 形式ファイルの主な内容は以下となる。

- ・ 予測の初期値日、予測の対象日
- ・ (予測値)アンサンブル平均値⁶
- ・ (予測値)累積分布関数
- ・ (参考値)昨年の実況値
- ・ (参考値)過去 10 年平均の値
- ・ (参考値)平年値

要素については、従来の(早警運用時の)日平均気温に加え、日最高・最低気温(いずれも 5 日移動平均値)となる。

CSV ファイルのフォーマットは従来の CSV ファイルを踏襲しており、対象地点・地域についても全国 151 地点、24 地域の予測データが取得可能である⁷。ただし、2 週間データは従来のデータと比較して、以下の理由から 10 倍強のファイルサイズ⁸となっている。

- ・ 7 日移動平均から 5 日移動平均への変更による予測レコード数の増加
- ・ 要素の増加(日最高・最低気温)
- ・ 累積分布関数の目盛りの増加(精緻化)

また、最新の CSV ファイルは指定 URL によるデータ取得⁹ができ、プログラム等で指定してデータの自動

⁶ 多数の予測シナリオを平均して得られる値。個別の予測シナリオより、統計的に見て予測精度が高くなる。

⁷ CSV ファイルのフォーマットや対象の地点・地域についてはウェブサイトには詳細があるので、ご利用の際はそちらを参照されたい。

⁸ ファイルサイズは、早警運用時のファイルが約 2kB、現在の新しいファイルは約 25kB となっている。

⁹ 対象 URL

・2 週間データ

https://www.data.jma.go.jp/gmd/risk/probability/guidance/download2w.php?2week_t_{地点 or 地域番号}.csv

・1 か月データ(後述)

https://www.data.jma.go.jp/gmd/risk/probability/guidance/download.php?month1_t_{地点 or 地域番号}.csv

地点・地域番号の詳細はウェブサイトを参照されたい

取得を行うなど、API としての利用も可能である。

(4) サンプルファイル(表計算ソフト用)

CSV ファイルの内容を可視化するビューワとして、また、これからデータ利用を始めるユーザーへの導入時の参考資料として、CSV ファイルを読み込み可視化するサンプルファイル(Excel 等の表計算ソフト用のワークブック)をウェブサイトより提供している。

サンプルファイル(第 2.4-3 図)では、アンサンブル平均予測の時系列グラフ、特定の気温超過/以下となる確率グラフ、累積分布関数グラフが、日平均・最高・最低気温それぞれにおいて閲覧可能である。

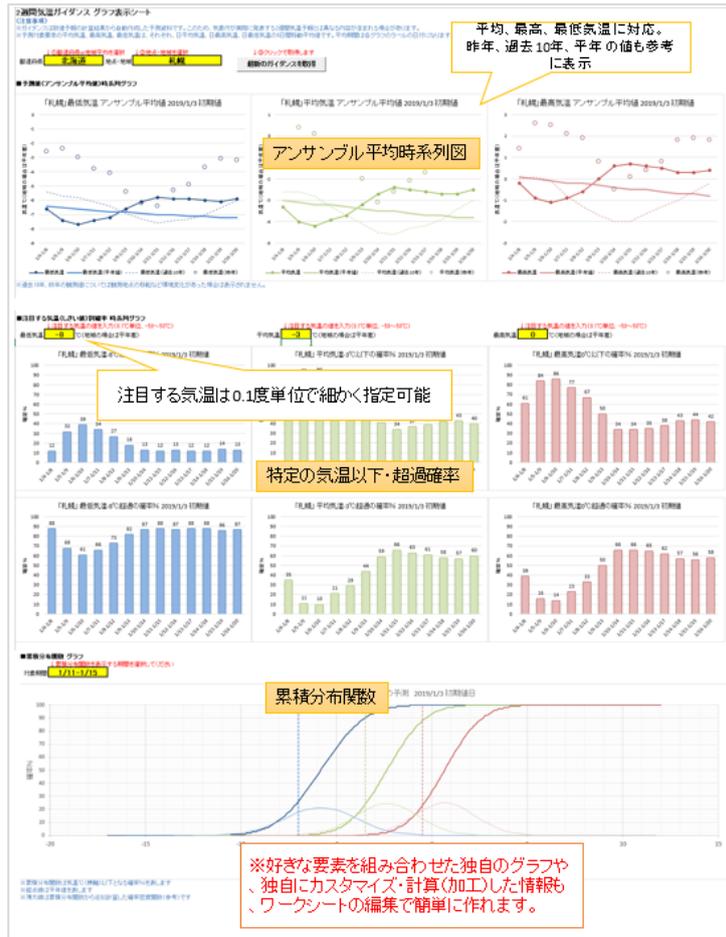
ファイルには地点(あるいは地域)を選択して「最新のガイダンスを取得」するためのボタンを設けた。このボタンをクリックすることで、ブラウザを使うことなく、ウェブサイトから CSV データを取得してグラフを更新できる。

なお、サンプルファイル内の「解説」シートに利用方法や各シートについての解説があるため、ご利用の際には、まずこちらを参照されたい。

各シートの概略を第 2.4-1 表に示す。

第 2.4-1 表 サンプルファイルの各シート

シート	機能
解説	概要や利用法 (はじめに読む)
グラフ	グラフ用 (データは“calc”シートにある)
csv	確率予測資料の CSV データをダウンロードして展開するシート
calc	“csv”シートの値をもとにグラフ用のデータを成型するシート
table	処理に用いる地点番号等の表 (固定)



第 2.4-3 図 サンプルファイル(2 週間データ用) 確率予測資料 CSV の内容をグラフで表示できる。



第 2.4-4 図 サンプルファイルのカスタマイズの模式図
 数式やグラフを追加して独自の予測ツールを作成できる。
 コーヒー飲料等の予測式は気象庁(2018)を参考とした。

サンプルファイルは、編集して機能を追加することも可能である。例えば、予測対象と気温の関係性(予測式)が分かっている場合、“csv”シートや“calc”シート

内の気温の値をもとに、表計算ソフト上で対象の予測式やグラフを付加して、独自にカスタマイズするといった利用法が考えられる。参考に、第 2.4-4 図に自動販

売機におけるコーヒー飲料 (HOT) の売り上げ予測を例として、簡単なカスタマイズの模式図を示した。

上記のように、サンプルファイルを活用することで、高度なデータ解析やプログラミングの知識がない場合でも、独自の予測ツールを作成できる。これにより、気温と関連する予測式があれば、容易に販売量等の推移が可視化でき、データの具体的な活用が期待される。

(5) 再予報データ

再予報とは最新の数値予報システムで過去事例を予報することである。気象予測の基となる数値予報システムは、新たな開発により年々精度が改善されている。現在、2週間気温予報や1か月予報に利用している全球アンサンブル予報システムでは、予測性能の評価や特性の把握のため、過去30年分以上の事例の再予報を行っている¹⁰。

再予報に基づく2週間データについても、データ利用時の調査・検証等の促進のため、ウェブサイトより提供している(第2.4-1図の「再予報データ」の項目)。

予測データを活用する際は、事前に過去の予測データを用いて予測の有効性を調査・検証することで、予測を利用するメリットを定量的に把握できる。ウェブサイトからは実際に運用された過去の予測データも取得でき、まずはこれを活用することもできるが、このデータは比較的最近のものに限られている¹¹。そこで、より長期間の過去に遡って調査・検証をしたい場合に再予報データが有用となる。

例えば、農業における営農対策など、1年に1度しか検証対象がないような場合は、数十年分の検証ができるため、事前の再予報による検証が予報の実際の対策への有効性を見積もるのに有用である。ここでは、例として、東北地方の冷夏の事例を取り上げる。東北地方の夏は、やませの影響などにより低温となる

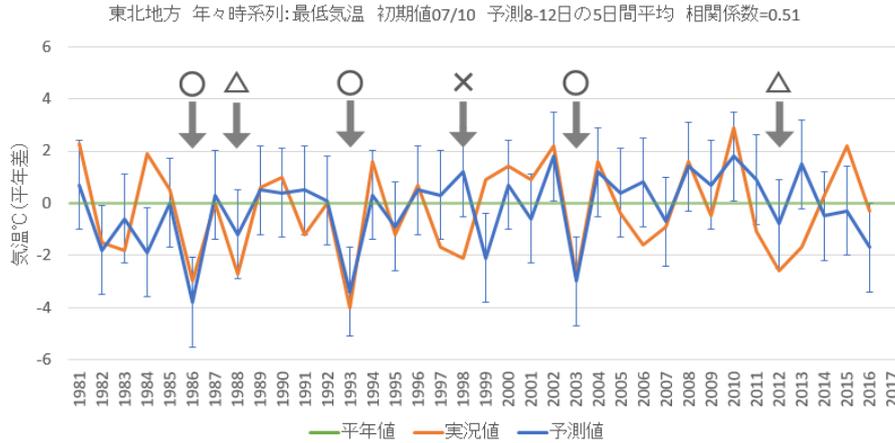
年に水稻の冷害が発生し、大きな問題となってきた。例年、7月下旬に低温となると、冷害となる危険性が大きくなる。この時期の低温を2週間前から予測できたかどうかをグラフに示した(第2.4-5図)。図では、実況値が平年値より2°C以上低温となった年に注目した(図中矢印)。“○”印の年(1986年、1993年、2003年)では、予測が低温を良く表現しており、“△”印の年(1988年、2012年)は、アンサンブル平均値では実況ほどの低温は予測されていないが、平年より低温になる傾向は予測されている。また、予測範囲(80%)のバーの範囲では概ね捉えている。しかし、“×”印の年(1998年)では、平年より高温傾向の予測となっている。これらから、2週間先の顕著な低温予測も、大まかに半分以上は捉えられるといった感覚を持って、予測を利用することができる。

第2.4-6図は、2週間先の予測(東北地方、最低気温、アンサンブル平均値)の再予報による統計的な予測精度(RMSE、相関係数)を示したものである。年間を通じて大まかに、RMSEは1~1.5°C程度、相関係数は0.5~0.7程度となっている。青点線は平年値を予測値として用いた場合(気候値予報という)、青実線は予測データを用いた場合のRMSEを表す。青実線のほうが小さめのRMSEであることから、統計的に見て平年値より予測データを用いたほうが有用であることが伺える。また、4~6月初期値の予測は、他の時期と比較して精度が相対的に低めとなっており、“この時期の予報はほかの時期と比べて精度に注意しよう”などと事前に把握した上で、計画的な利用ができる。

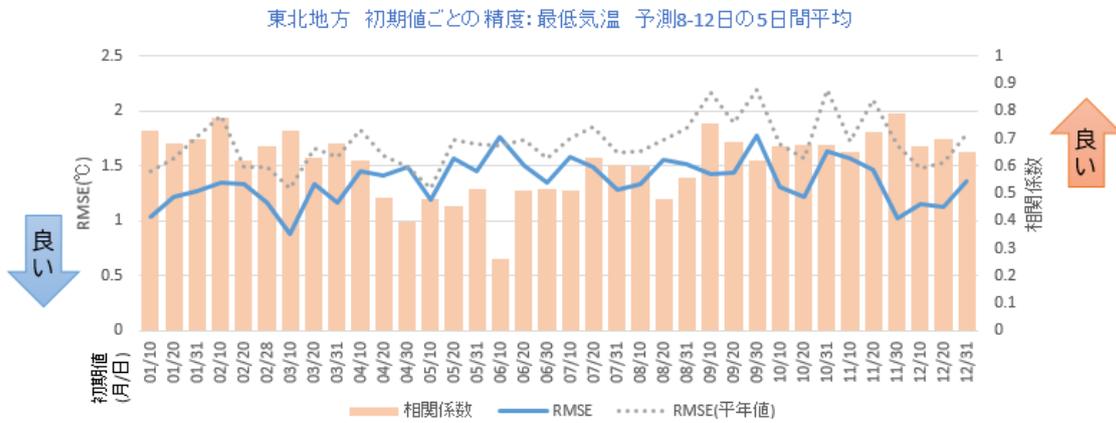
再予報データを含む、過去の予測データの活用法について、ここで紹介した以外の事例や、参考となる文献等をウェブサイト(第2.4-7図)でも紹介しているので、データをご利用の際は、適宜参照されたい。

¹⁰ 数値予報システムの再予報は計算機資源の制約から、予測頻度やアンサンブルメンバー数(予測のシナリオの数)は実際に運用される予報からは縮小されて行われている。(第1.3節参照)

¹¹ 実際に運用された過去の予測データは、基本的に前回の数値予報システムが更新されてからの分を参照することが望ましい。これは、システムの更新により予測の特性が変化するためである。



第 2.4-5 図 7 月 10 日初期値の 2 週間先の予測(東北地方、最低気温)
2019 年 9 月時点の再予報データに基づく。予測はアンサンブル平均値、バーは予測範囲(80%)。



第 2.4-6 図 2 週間先の予測(東北地方、最低気温、アンサンブル平均値)の RMSE、相関係数
2019 年 9 月時点の再予報データ(1981 年 1 月～2017 年 3 月分)に基づく。

過去の予測データの利用例の紹介

種別予測資料(2週間気温予報や1か月予報の基礎資料)のような予測データを利用する場合、予測精度(予報が現実と比べてどの程度異なるか)を事前に把握することで、気候リスク管理を円滑に行うことができます。本ページでは、過去の予測データを用いた検証の具体例を紹介し、過去の予測データ(種別予測資料)については、以下のリンクから取得可能です。

- ▶ 種別予測資料(2週間気温予報) 提供ページ
- ▶ 種別予測資料(1か月予報気温) 提供ページ

(注)本ページで紹介するデータや内容は、2019年9月現在のものです。

その1：個々の事例を検証する

ここでは、東北地方を題材に検証事例を紹介し、過去の予測データは2週間気温予報の再予報データ(現在の技術で再度過去の事例を予測したものの、ハインドキャストともいう。)を使用し、2週間先の気温の予測について検証していきます。

冷夏時の2週目の気温の予測

東北地方の夏は、やませの影響などにより低温となる年に氷霜の発生が起きてきました。ここでは、過去に顕著な冷夏となった1993年と2003年の予測データを見ていきます。例年、7月下旬に低温となると冷害となる危険性が大きくなります。現在の技術では、この時期の気温を2週間前から予測できていたでしょうか？再予報データで見てみましょう。

「東北地方」最低気温 1993/7/10 初期値

「東北地方」最低気温 2003/7/10 初期値

第 2.4-7 図 ウェブサイト「過去の予測データの利用例の紹介」(2020 年 7 月現在)
https://www.data.jma.go.jp/gmd/risk/probability/info/kakodata_kensho.html

2.4.2 1か月気温予報データ

ここまでは、2週間データについて紹介してきたが、1か月予報の基礎資料となる予測データのうち、比較的精度の高い向こう28日平均気温の予測データ(以下「1か月データ」という)についてもウェブサイトより公開している。1か月データの対象は向こう28日間の平均気温であるため、日々の気温の変動の把握には利用できないが、長期的な気温の傾向を予測する場合は有用なデータとなり得る。例えば、有効積算温度による農作物の生育予測等、温度によって変化の程度が予測できる事例での利用が想定される。

1か月データのウェブサイト(第2.4-8図)の構成は2週間データのウェブサイトと同様に、最新のデータ、再予報データ、サンプルファイルや解説等、ワンストップで提供している。データ利用のためのサンプルファイル(第2.4-9図)もウェブサイト内から取得できる。データフォーマットやサンプルファイル等の利用についての具体的なところは、上述の2週間データのウェブサイトとほぼ同様であり、ウェブサイト内にも詳細があるため、ここでの紹介は割愛する。

2.4.3 気候リスク管理ポータルサイト

将来の気候の見通しを立て、気候の悪い影響を軽減し、良い影響を利用することを、気候リスク管理¹²という。これまで紹介した2週間データ、1か月データは、まさに将来の気候の見通しを立てるのに有用であり、気候リスク管理のためのデータであるとも言える。

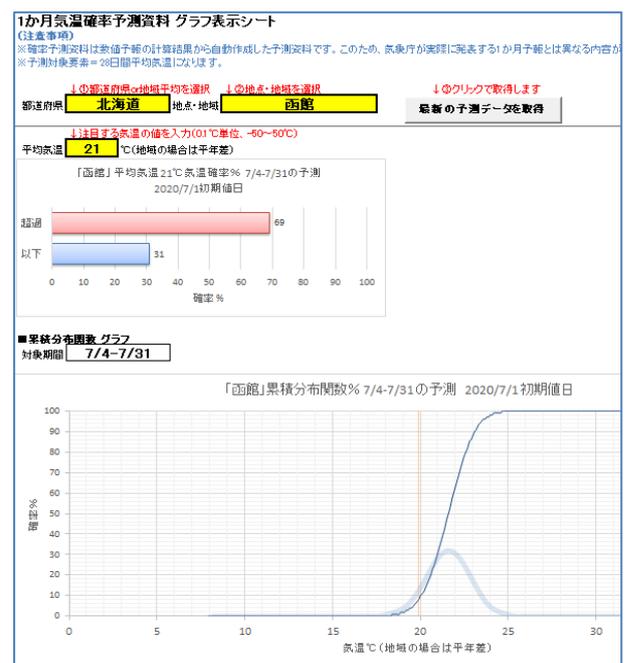
気候リスク管理に関して紹介するウェブサイトとして気候リスク管理ポータルサイト(第2.4-10図)を公開している。ポータルサイトには、上述の2週間・1か月データの具体的な活用事例(第2.3節でも紹介)、気候リスク管理の考え方・ノウハウ等の解説、各種産業での気候リスク管理に関する調査報告書などのコンテンツがまとめられている。各コンテンツは気候リスク管理の普及・啓発や、気象情報やデータの活用に取り組む際の参考資料としての活用が期待される。

¹² 気候リスク管理については、第2.2節や中三川ほか(2013)に詳細がある。



第 2.4-8 図 確率予測資料(1か月予報気温)提供ページ(2020年7月現在)

https://www.data.jma.go.jp/gmd/risk/probability/guidance/csv_k1.php



第 2.4-9 図 サンプルファイル(1か月データ用)確率予測資料 CSV の内容をグラフで表示できる。



第 2.4-10 図 気候リスク管理ポータルサイト「気象情報を利用して気候の影響を軽減してみませんか？」(2020年7月現在)

<https://www.data.jma.go.jp/gmd/risk/>

2.4.4 終わりに

本節で紹介した内容は、2020年7月現在のものであり、データの仕様やコンテンツの詳細は、今後も予測技術の向上や時代のニーズ等とともに変化することが想定される。最新の情報は適宜ウェブサイトを参照されたい。

本節で紹介したデータやコンテンツについて、気候の影響を受ける各種産業での業務向上や、各種調査・研究などで、ぜひ活用いただければと思う。また、今後の改善のため、ご質問がある場合や、データの活用方法・活用事例等を共有いただける場合、脚注のメールアドレス¹³よりご連絡いただけると幸いです。

¹³ お問い合わせ用メールアドレス
climate-risk(アットマーク)met.kishou.go.jp
(アットマークを@に変えて利用願います)

参考文献

野津原昭二, 2008: 気象庁ホームページによる情報提供. 平成 20 年度季節予報研修テキスト, 気象庁地球環境・海洋部, 35-39.

気象庁, 2018: 気象庁委託調査「気候情報を活用した気候リスク管理技術に関する調査報告書～清涼飲料分野～」. https://www.data.jma.go.jp/gmd/risk/H29_drink_chousa.html (2020年7月閲覧)

中三川浩, 宮脇祥一郎, 前田修平, 野津原昭二, 伊藤明, 荒井宏明, 2013: 気候リスク管理技術の普及に向けた取り組み. 平成 25 年度季節予報研修テキスト, 気象庁地球環境・海洋部, 17-62.

付録1 季節予報システムの開発:これまでと今後

はじめに

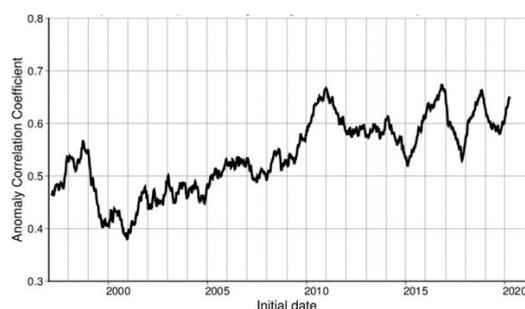
気象庁の季節予報については、1942年1か月予報が発表されて以来80年近い歴史がある。1か月予報の予測技術については、発表開始当初から利用されてきた統計的手法に代わって、1996年に気象庁の全球モデル(GSM)を利用した力学的手法が導入された。3か月・暖寒候期予報についても、2003年にGSMを利用した力学的予測手法を、2010年にエルニーニョ予測に利用されていた大気海洋結合予測手法を導入し、大きな技術的進歩を遂げた。このように季節予報システムの開発を担ってきた気候情報課の数値予報モデル開発部門は、海洋気象情報室及び環境気象管理官付の同開発部門とともに、2020年10月(予定)に数値予報課と統合する形で出発することとなった。ここでは、気候情報課の同開発部門が移管されることを受けて、これまでの季節予報システムの開発について簡単にまとめた。また、移管後の開発の方向性にも少し触れておく。なお、季節予報システムの更新履歴の詳細については、第1、2表を参照されたい。

これまでの開発

1996年、気候情報課(当時長期予報課)では、数値予報課の協力のもと、格子間隔約180km、鉛直層数30のGSMを使って1か月アンサンブル予報システム(EPS)の運用を開始した。その後、1998年の気候モデル開発推進官の新設や2001年の気候モデル係の設置など季節予報システムの開発・運用体制の強化により、2000年代以降は常時10人程度の職員が開発・運用に携わることとなった。このような体制強化を背景に、1か月EPSに加え、2003年には3か月・暖寒候期予報の基盤となる季節EPS(格子間隔約180km、鉛直層数40のGSM)の運用も開始した。なお、季節EPSは、大気海洋結合予測手法を導入する2010年まで、エルニーニョ予測モデルの結果をもとに

統計的に推定した海面の情報を与えてGSMを実行する「2段階法」を採用していくこととなった。

1か月・季節EPSの運用開始後、気候情報課では、主に短期予報の観点で開発されたGSMをベースとして季節予報でも精度が確保できるよう開発に取り組み、数年に1回程度の頻度でモデル更新を行った。また、アンサンブル予報に必要な初期摂動の作成手法の開発も行った。特に、京都大学防災研究所とのブリーディング法の赤道季節内振動(MJO)予測最適化に関する共同研究の成果は、2007年に1か月EPS初期値改良に結びついた。このような開発体制の強化やシステムへの最新GSMと新技術の導入、共同研究の実施に加え、計算機的能力向上にもより、季節予報システムの予測精度は着実に改善されていった(第1図)。



第1図 現業1か月予測精度の変遷

縦軸は北半球500hPa高度のアノマリー相関(28日平均)。横軸は初期日。

2010年には、海洋の変動と大気の変動の一体的な予測が可能となる大気海洋結合モデルを季節EPS(JMA/MRI-CPS1)に導入し、エルニーニョ予測システムとの統合を行った。その後、大気海洋結合モデルや海洋同化システムの改良を行い、気象庁第2次長期再解析(JRA-55)を利用して、2代目となる季節EPS(JMA/MRI-CPS2; 現行と同仕様)の運用を2015年から開始した。このJMA/MRI-CPS2は、欧州中期予報センター(ECMWF)が主導するマルチモデルアンサンブル(MME)システム「EUROSIP」²へ2016年に参加することになった。EUROSIPへの加入には季節予報

¹ 徳広 貴之

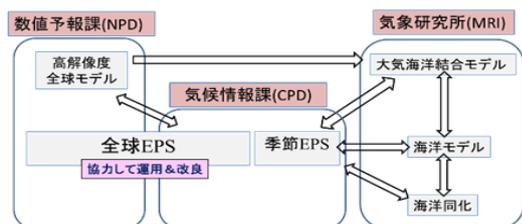
² EUROSIPは2019年に終了し、欧州委員会(EC)が主導する地球観測計画であるコペルニクス計画の計画要素の

一つで、気候モニタリングや季節予報などのサービスを実施する「コペルニクス気候変動サービス(C3S)」のMMEシステムに引き継がれた。

システムが世界最高水準の厳しい性能要件を満たす必要があり、当庁が高性能の季節予報システムを運用していることが世界的に認知されることになった。なお、高性能の季節予報システム運用には、再予報や現業システムでの大気・海洋の初期値として利用する、当庁の大気・海洋の長期再解析も大きく貢献している。

2017年には、数値予報課と共同で進めてきた1か月 EPS、週間 EPS 及び台風 EPS の統合作業が完了し、週間予報から 1 か月予報までを一体的に支援する「全球 EPS」の運用を開始した。

季節予報システムの開発は、ECMWF 等への海外派遣や能力開発等によって気候情報課の開発力向上を図りつつ、数値予報課や気象研究所と協力して行ってきた(第 2 図)。特に、大気海洋結合モデルの開発では、短期予報向けの開発成果が反映された GSM に対して、その気候の再現性の向上を図りつつ、気象研究所の海洋モデルと結合化する作業を気象研究所と共同で行ってきた。



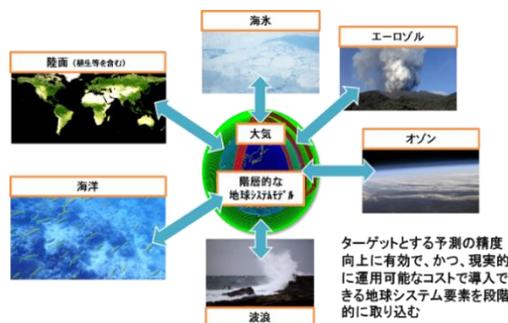
第 2 図 全球 EPS・季節 EPS 開発における開発協力 (2020 年 10 月予定の数値予報課との統合前)

今後の開発の方向性

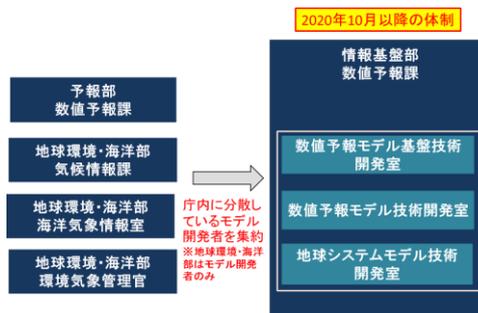
季節予報システムについては、社会経済活動における気候によるリスクの軽減に資する、冷夏、暖冬等の社会的に影響の大きい現象に関する予測情報を確度高く提供するため、先進的な数値予報技術である階層的な地球システムモデル(第 3 図)を導入することが交通政策審議会気象分科会の提言「2030 年の科学技術を見据えた気象業務のあり方」³(2018 年 8 月)で求められている。また、同提言を受けて策定された「2030 年に向けた数値予報技術開発重点計画」⁴(2018 年 10 月)では、大気のみならず、海洋、オゾン、エアロゾルなど季節予測を行う上で重要となり得る

様々な地球システム要素について、それらの相互作用に着目しつつ開発する、いわゆる地球システムモデリングアプローチを重視した開発の推進が示されている。

上述の階層的な地球システムモデル導入を含む数値予報技術の飛躍的向上にむけて、気象庁では数値予報モデルを分野横断的に開発する体制を整備することを決めた。具体的には、気候情報課、海洋気象情報室及び環境気象管理官付の数値予報モデル開発部門は数値予報課と統合することとなった(2020 年 10 月予定)。気候情報課の数値予報モデル開発者の大部分は、海洋気象情報室や環境気象管理官付の同開発者とともに、数値予報課の下に置かれる 3 室の一つである「地球システムモデル技術開発室」に移る(第 4 図)。これにより、同開発室では、季節予報モデルだけでなく、海洋・波浪・高潮モデルや化学輸送モデル(オゾン・エアロゾル・二酸化炭素)に関する開発・運用も担当することとなる。同開発室は今後も引き続き、庁内外の関係部署と連携して開発に取り組んでいく。



第 3 図 階層的な地球システムモデルのイメージ



第 4 図 数値予報モデルを分野横断的に開発する体制整備(2020 年 10 月予定)

³ https://www.jma.go.jp/jma/press/1808/20a/bunkakai_teigen.pdf

⁴ https://www.jma.go.jp/jma/press/1810/04b/nwp_strategic_plan_towards_2030_2body.pdf

第 1 表 1 か月アンサンブル予報システム(1996 年 3 月～2017 年 3 月)及び全球アンサンブル予報システム(2017 年 3 月～)の更新履歴(2020 年 10 月現在) 新保(2017)の表 1.1-2 を変更

運用開始年/月	大気モデル		アンサンブル			備考	
	水平分解能・鉛直層数(最上層)	バージョン ¹	メンバー数		手法		
			1初期時刻	1か月予報プロダクト ²			
＜1か月アンサンブル予報システム(1か月EPS)＞							
1996/3	T63L30(10hPa)	GSM9603	5	10(24時間ごと、2初期時刻の組み合わせ)	SV法	(気象庁予報部, 1996) ・力学的予報開始	
1997/1	T63L30(1hPa)					(気象庁予報部、気候・海洋気象部, 1997)	
2001/3	T106L40(0.4hPa)	GSM0103(松村, 2000)	13	26(24時間ごと、2初期時刻の組み合わせ)	BGM法(北) ³	(萬納寺と前田, 2001) 週間アンサンブル予報システムからの延長として運用	
2002/2						BGM法(北・熱) ⁴	・熱帯への初期摂動の導入(経田, 2002)
2002/4							・陸面解析開始(徳広, 2002)
2003/4		・マイクロ波放射計SSM/Iによる積雪解析の利用開始 (新保ほか, 2003)					
2003/6		GSM0305(中川, 2004)			(気象庁気候・海洋気象部, 2005)		
2005/3		GSM0407			(気象庁地球環境・海洋部, 2006) ・週間アンサンブル予報システムと分離し独立したシステムとして運用 ・統一モデルの導入 ・セミラグランジュ法の導入 ・境界値としてCOBE-SST利用開始		
2006/3	TL159L40(0.4hPa)	GSM0603C(北川, 2006)	25	50(24時間ごと、2初期時刻の組み合わせ)	BGM法(北・熱) ⁴	(気象庁地球環境・海洋部, 2006) ・週間アンサンブル予報システムと分離し独立したシステムとして運用 ・統一モデルの導入 ・セミラグランジュ法の導入 ・境界値としてCOBE-SST利用開始	
2007/3		GSM0711C(北川, 2007)				・熱帯初期摂動の改良(Chikamoto et al., 2007) ・異常天候早期警戒情報試行開始	
2008/3	TL159L60(0.1hPa)	GSM0801C(気象庁予報部, 2007)	25	50(24時間ごと、2初期時刻の組み合わせ)	BGM法(北・熱) ⁴	・異常天候早期警戒情報本運用開始	
2011/3		GSM1011C(岩村, 2008)				・適合ガウス格子の導入 ・エーロゾル気候値の更新	
2014/3	TL319L60(0.1hPa)	GSM1304	25	50(24時間ごと、2初期時刻の組み合わせ)	BGM法(北・熱) ⁴ +確物 ⁵	(平井ほか, 2015; 佐藤ほか, 2015) ・確率的物理過程強制法(米原, 2010)の導入 ・境界値としてMGDSST利用開始 ・海氷推定手法の改良	
＜全球アンサンブル予報システム(全球EPS)＞							
2017/3 ⁶	TL479L100[～18日] TL319L100[18日～]	GSM1603E ⁷	27[～11日]	50(12時間ごと、4初期時刻の組み合わせ)	SV法(北・南・低) ⁸ +LETKF ⁹ +確物+SST摂動	・台風、週間及び1か月EPSの統合 ・初期摂動の改良(SV法+LETKFの組み合わせ) ・SST摂動の導入	
2020/3	(0.01hPa)		GSM2003			13[11日～]	2段階SST法の導入(12日目以降の熱帯を中心に季節EPSの予測SSTを利用)

¹ 全球モデル(GSM)の各バージョンを、改良を導入した西暦の下二桁と月を組み合わせた四桁の数字を GSM の後ろにつけて呼称する。1 か月 EPS の予報モデルについて、物理過程等の一部が GSM のバージョンと異なる場合、末尾に添え字 C を付けて表記する。全球 EPS の予報モデルについて、物理過程等の一部が GSM のバージョンと異なる場合、末尾に添え字 E を付けて表記する。

² 2007 年 3 月の異常天候早期警戒情報試行開始から、異常天候早期警戒情報プロダクトも含む。

³ 北半球域(北緯 20 度以北)。 ⁴ 北半球域(北緯 20 度以北)+熱帯域(南緯 20 度～北緯 20 度)。

⁵ 確率的物理過程強制法。

⁶ 2017 年 1 月に週間 EPS 及び台風 EPS を統合した全球 EPS(予報 11 日目まで)の運用開始。その後、2017 年 3 月に全球 EPS を 1 か月先まで延長して 1 か月 EPS を統合。

⁷ GSM1603(米原, 2016)に、「短波放射過程における陸上の水雲粒の有効半径の診断手法の導入」、「初期値に用いる土壌水分気候値の見直し」、「海氷完全結氷処理の廃止」を適用。

⁸ 北半球中高緯度帯(北緯 30 度以北)+南半球中高緯度帯(南緯 30 度以南)+低緯度帯(南緯 30 度～北緯 30 度)。

⁹ 局所アンサンブル変換カルマンフィルタ。

第2表 季節アンサンブル予報システムの更新履歴(2020年10月現在) 高谷(2015)の表1.1.1を変更

運用開始年/月	モデル・システムのバージョン*/解像度	システム概要	現業アンサンブルメンバー数(同再予報)	備考
2003/3	GSM0103 大気：T63 L40	2段階法 (大気モデル+予測海面水温)(新保ほか 2009)	31 (5)	気象庁(2003) 力学的予報開始
2006/3	GSM0502 大気：TL95 L40	同上	31 (5)	気象庁(2006) COBE-SST利用開始
2007/9	GSM0703C 大気：TL95 L40	同上	51 (11)	気象庁(2007) 予測海面水温に不確実性を考慮
2010/2	JMA/MRI-CPS1・ JMA/MRI-CGCM1 大気：TL95 L40 海洋：1°×0.3~1° L50	1段階法 (大気海洋結合モデル)	51 (10)	気象庁(2010) 大気海洋結合モデルの導入 エルニーニョ予測システムと統合 フラックス修正あり
2015/6	JMA/MRI-CPS2・ JMA/MRI-CGCM2 大気：TL159 L60 海洋：1°×0.3~0.5° L52 (+海底境界層)	同上	51 (10)	気象庁(2014) 海氷モデルの導入 フラックス修正の廃止

*大気モデルのバージョンとして、季節アンサンブル予報システムの基となる全球モデル(GSM)が現業運用された年月を4桁の数字として示す。2007年9月以降は、物理過程の一部がGSMと異なる。モデル解像度のT、TLの後ろの数字は全球スペクトルモデルの切断波数を、Lの後ろの数字は鉛直層数を表す。

参考文献

- 岩村公太, 2008: 高解像度全球モデルの改良. 平成 20 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 1-6.
- 気象庁気候・海洋気象部, 2003: 3か月予報資料の解説. 配信資料に関する技術情報(気象編)第 124 号.
- 気象庁気候・海洋気象部, 2005: 1 か月予報モデルの変更. 配信資料に関する技術情報(気象編)第 187 号.
- 気象庁地球環境・海洋部, 2006: 1 か月及び 3 か月・暖寒候期アンサンブル予報システムの変更について. 配信資料に関する技術情報(気象編)第 219 号.
- 気象庁地球環境・海洋部, 2007: 3か月・暖寒候期アンサンブル予報システムの変更. 配信資料に関する技術情報(気象編)関連お知らせ.
- 気象庁地球環境・海洋部, 2010: 季節予報(3か月、暖・寒候期予報)の改善について. 配信資料に関する技術情報(気象編)第 301 号関連お知らせ.
- 気象庁地球環境・海洋部, 2014: 平成 27 年6月の3か月、暖・寒候期予報関連の配信資料変更について. 配信資料に関する技術情報(気象編)第 408 号.
- 気象庁予報部, 1996: 一ヶ月予報に向けた全球モデルの開発ーバイアスの小さな予報モデルを目指してー. 数値予報課報告・別冊第 42 号, 93pp.
- 気象庁予報部, 2007: 全球数値予報モデル(GSM)の積雲対流スキームの改良. 配信資料に関する技術情報(気象編)第 275 号.
- 気象庁予報部, 気候・海洋気象部, 1997: 季節予報(1 か月予報)で利用する 1 か月数値予報モデルの変更について. 配信資料に関する技術情報(気象編)第 12 号.
- 北川裕人, 2006: モデルの概要. 平成 18 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 7-10.
- 北川裕人, 2007: 変更の概要. 平成 19 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 1-4.
- 経田正幸, 2002: 2002 年 2 月に行った EPS の変更. 平成 14 年度数値予報研修テキスト. 気象庁予報部, 30-31.
- 佐藤均, 宮岡健吾, 長澤亮二, 新保明彦, 高谷祐平, 松枝聡子, 杉本裕之, 2015: ハインドキャストによる検証. 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, 22-45.
- 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, 1-8.
- 新保明彦, 佐藤均, 古林絵里子, 2003: 1 か月予報モデルの変更とその影響. 平成 15 年度季節予報研修テキスト, 気象庁気候・海洋気象部, 1-9.
- 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, 2015: 概論. 平成 27 年度季節予報研修テキスト, 気象庁, 1-4.
- 徳広貴之, 2002: 陸面解析の現業化. 平成 14 年度季節予報研修テキスト, 気象庁, 76-77.
- 中川雅之, 2004: 全球モデルの改良. 数値予報課報告・別冊第 50 号, 気象庁予報部, 43-50.
- 平井雅之, 宮岡健吾, 佐藤均, 杉本裕之, 南敦, 松川知紘, 高谷祐平, 新保明彦, 2015: 1 か月予報システムの変更の概要. 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, 1-5.
- 松村崇行, 2000: 全球モデル. 平成 12 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 17-22.
- 萬納寺信崇, 前田修平, 2001: 1 か月予報のための数値予報モデル. 平成 13 年度季節予報研修テキスト, 気象庁気候・海洋気象部, 35-47.
- 米原仁, 2010: 週間アンサンブル予報へのモデルアンサンブル手法の導入. 平成 22 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 62-65.
- 米原仁, 2016: 全球数値予報システムの物理過程改良の概要. 平成 28 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 1-3.
- Chikamoto, Y., H. Mukougawa, T. Kubota, H. Sato, A. Ito, and S. Maeda, 2007: Evidence of growing bred vector associated with the tropical intraseasonal oscillation. *Geophys. Res. Lett.*, 34, L04806, doi: 10.1029/2006GL 028450.