

令和4年度季節予報

研修テキスト

第一号

新しい季節アンサンブル予報システム

(気候情報課)

令和4年12月

December 2022

気象庁 大気海洋部

新しい季節アンサンブル予報システム

目次

1	はじめに	1
2	季節アンサンブル予報システムの更新と季節予報プロダクトの改良	
2.1	概要	3
2.2	季節アンサンブル予報システムの更新	4
2.3	3か月予報及び暖・寒候期予報のためのガイダンスの更新	9

1 はじめに¹

気象庁では、2010年から大気海洋結合モデルを採用する季節アンサンブル予報システム(JMA/MRI-CPS; Japan Meteorological Agency / Meteorological Research Institute-Coupled Prediction System)を基にエルニーニョ監視速報、3か月予報、暖・寒候期予報の発表を行っている。今年(2022年)2月、JMA/MRI-CPSの更新が行われ、大気モデル、海洋モデルともに高解像度化され、積乱雲の発生・発達等の物理過程が精緻化された。同時に、モデルの予測結果を天候に翻訳するガイダンスの手法を改善し、JMA/MRI-CPSの実行頻度を毎日とする変更も行った。これらにより、エルニーニョ現象をはじめとする大気と海洋の相互作用に関連する変動や数か月以上先の日本の天候に関する予測の精度が向上し、3か月予報や暖・寒候期予報をこれまでよりも高い信頼度で発表できるようになった。これらについては本テキストの第一号で述べている。なお、予報の現場では、引き続きモデルの得意な現象、不得意な現象を理解したうえでモデル結果を解釈する必要があるが、予測精度は着実に向上しており、予測精度の向上した現象をしっかり把握することが重要である。またモデルの計算が毎日実行されることで利便性は大きく向上しており、社会経済活動への長期予報の活用が進むことを期待したい。

今後刊行予定である第二号では、気象庁第3次長期再解析(JRA-3Q; Japanese Reanalysis for Three Quarters of a Century)と季節予報の展望について述べる。

長期再解析は、季節予報、地球温暖化の監視予測、異常気象の分析等において、過去と現在の気候の比較や予測モデルの評価に必要な、長期間にわたる高品質かつ均質な解析データセットであり、気象庁の各種業務に必要な不可欠なプロダクトとなっている。この計算には、長期間にわたる観測データと、数値予報モデルやデータ同化などの数値解析予報システムが用いられる。気象庁ではこれまでに、気象庁25年長期再解析(JRA-25; Japanese 25-year Reanalysis)、気象庁55年長期再解析(JRA-55; Japanese 55-year

Reanalysis)を実施してきたが、JRA-3Qにおいては、観測データを増強し、新しい数値解析予報システムを用いることにより、解析期間の延長と品質向上を図った。JRA-3Qは、2022年より一部データの公開が開始され、季節予報や気候系監視等の各種業務への利用が順次進められている。

第二号の後半では、1か月予報、3か月予報、暖・寒候期予報及び関連する予報・情報の今後の展望や数値予報システムで目指すべき方向性について述べる。2018年8月20日交通政策審議会気象分科会は、近年の自然環境や社会環境の変化、先端技術の展望を踏まえ、気象庁に対して「2030年の科学技術を見据えた気象業務のあり方」の提言をまとめた。その中で、目標のひとつに「気候リスク軽減、生産性向上に資する数ヶ月先までの予測精度向上」を掲げ、取り組みの具体的な内容として高温や低温、暴風、大雪などの顕著現象の予測を挙げている。これを受けて気象庁は今後の季節予報を展望し、現行の予報精度を向上させるだけでなく、顕著現象を対象とした新しい情報を目指していく。

¹ 竹川 元章

2 アンサンブル予報システムの更新と季節予報プロダクトの改良

2.1 概要¹

季節予報は、アンサンブル予報システム(Ensemble Prediction System、以下、EPSと略す)による予測結果を基にしている。向こう3か月間といった長期間の日本の天候は、日本周辺の大気の変動のみならず、それを支配する中高緯度や熱帯の大気の変動、さらには海洋の変動にも強く左右される。このことから、長期間の見通しの根拠とする季節EPS(以下、Japan Meteorological Agency/ Meteorological Research Institute-Coupled Prediction Systemの略称CPSを用いる)には大気と海洋を一体的に扱う大気海洋結合モデルが採用されている。

季節予報の検討・作成では、対象とする期間が長いことから、日々の天気を支配する総観規模の高・低気圧の寿命よりも長く空間規模もより大きい大気や海洋の現象とそれに影響を受ける天気の変化傾向に着目する(気象庁、2013)。これは予測可能性が現象により異なるという数値予報の不確実性に基づくものであり、こうした現象毎の予測限界や予測の精度は現業運用時と同じ仕様のEPSを用いた過去の予報実験(再予報と呼ぶ; 高谷、2012)により事前に評価できる。実際の予報作業では、決められた時間内にこうした着目点や事前の評価に合わせて大量のEPSの結果を迅速に解釈する必要があるため、再予報と最新のEPSの結果を応用した資料(プロダクト)を利用する。プロダクトは主に次の2種類がある。ひとつは、大気の変動等を捉えやすいよう工夫した可視化図(天気図や時系列図等)である。もうひとつは、EPSの結果から導き出す各種予測値(ガイダンス)であり、過去の実況と再予報との統計関係式を定めた上で、それをリアルタイムのEPSの結果に適用して得られる資料である。

気候情報課は、季節予報の改善や利活用の拡大のため、プロダクトの利便性向上に必要なEPSの応用技術も培ってきた。現在の応用技術の基盤は再予報

であり、再予報及びプロダクトの評価は発表予報の成績に直結する重要な作業となっている。実況や予想の可視化図からなる季節予報資料にはEPSの結果の偏差を実況の平年偏差に対応するものとして掲載するが、この偏差の基準値は連続する30年間の再予報から求めたモデル平年値(モデル予測に関する長期平均の値)としている²。実際のEPSの結果には季節、地域、予測期間に依存する系統的な誤差が含まれており、モデル平年値からの偏差を用いることで、こうした誤差が軽減することを狙っている。

またガイダンスの要である統計関係式の導出には、再予報による過去の予報事例を積極的に用いる。事例の数は多いほど確からしいモデル平年値や関係式の導出につながるが、計算機資源等の制約を受ける³。そこで、関係式の導出においては、推定精度を上げるため、再予報に一定の仮定を行った上で過去の予報事例を増やすなどの工夫(例えば第2.3.3項(4))をしている。こうした手法も取り入れることで、ガイダンスとして系統的な誤差の小さい予測値を提供できるほか、EPSで直接予測しない気象の要素、さらに利用者の意思決定に使いやすい信頼度の高い確率分布も提供できている。

このように、季節予報は数値予報技術及びプロダクトの作成に必要な応用技術が基となっており、予報の作業効率や精度、利便性の向上にはEPSの更新と大規模な再予報、EPSの精度と特性に見合うプロダクトの開発と更新、予報の発表形態に合わせた見直しという一連の作業が肝要となる。ガイダンスに用いる関係式の係数はEPSの更新のたびに最適化を必ず行い、タイミングを合わせて更新している。そして、こうした連結した作業工程ではEPSの開発部門(以前は予測対象によって部署が分かれるなどしていたが、現在は分野横断的な開発体制がとられている; 数値予報開発センター、2022)との連携が欠かせず、日頃から情報交換に努めている。

¹ 経田 正幸

² 季節予報は対象期間が長いゆえに現象の変動を平年からの偏り(予報としては価値のない季節変動分を除く形)で表現しており、季節予報プロダクトの多くも偏差を示す。

³ 季節EPSの再予報の期間は過去30年間(1991~2020年)、サンプリングは毎月2初期値(月中頃と月末頃)分と約15日間隔である。

現在、季節予報の基としている EPS は CPS と全球 EPS であり、CPS は令和4年(2022年)2月、全球 EPS は同年3月(気象庁, 2022)に更新された。この CPS の更新は、新しい大気海洋結合モデルの導入のほか、実行の頻度と一回当たりのメンバー数について5日おき13メンバーから毎日5メンバーとする仕様の変更も行う大規模なものであった。そして、これにより1か月より先の最新プロダクトの作成日は5日おきという制約はなくなった。このことを活かして、3か月予報及び暖・寒候期予報の発表日を毎月25日以前の最初の火曜日(ただし、休日の場合は前日の月曜日)とする⁴見直し(令和4年4月以降)も行った。また、プロダクトに用いた実況は気象庁第2次長期再解析(JRA-55)から気象庁第3次長期再解析(JRA-3Q; 第3章参照)を用いるように変更した。これは、CPS と全球 EPS の再予報に用いる解析値とも整合させたことになる。

第2.1-1表に、季節予報資料として公開している可視化図(天気図画像ファイル)のデータソースを示す。CPS に基づく予想は時間ずらし平均(Lagged Average Forecast; LAF)法を用いた多数メンバーのアンサンブルに基づいているが、このアンサンブルのメンバー数は CPS 更新前後で変わらず51のままであり、その構成も最新と最古の初期時刻間の長さ⁵は極力変わらないよう連続する17回分の毎回3メンバーのLAFとした。この長さを変更することの効果は以前の5日おきよりも高頻度(現行の毎日相当)なCPSの結果があつて調査が可能であり、それに基づくアンサンブル構成の変更は今後の課題としている。

ここまで、季節予報の基となる EPS の更新とそのプロダクトの改良の概要を述べながら、令和4年の2,3月のEPSの更新時に行った応用面での改良点も取り上げた。第2.2節では3か月予報や暖・寒候期予報、エルニーニョ監視速報の基であり、令和4年2月に大幅な更新をしたCPSに焦点を当て、その詳細を述べ

る。第2.3節ではそのCPSの運用開始と合わせて現業化した新しい季節予報ガイダンスについて述べる。今後のEPS改良による季節予報の改善の見通しは、本書第2号の第4章を参照されたい。

第2.1-1表 季節予報資料(可視化図)一覧。

資料名の詳細な仕様はインターネット上(アクセス先は脚注の通り)の資料参照。また、資料中の指数時系列図に用いるユーラシアパターンと500hPa高度主成分の空間パターンはJRA-55に基づくものであり、令和5年春にJRA-3Qに基づくものへと更新する予定。気象庁長期再解析JRA及びMGDSSTをはじめとする海面水温解析の詳細は第3章参照。

資料名	データソース
2週間気温予報資料 ⁶ 1か月予報資料 ⁷	大気実況:JRA-3Q 海面水温実況:MGDSST 予想:全球EPS
3か月予報資料及び暖・寒候期予報資料 ⁸	大気実況:JRA-3Q 海面水温実況:MGDSST 予想:CPS

参考文献

- 気象庁, 2013: 季節予報作業指針～基礎から実践まで～. 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.
- 気象庁, 2022: 全球アンサンブル予報システムの予測精度向上について. 配信資料に関する技術情報 No.578, 気象庁情報基盤部.
- 気象庁, 2022: 数値予報センターの概要. 数値予報開発センター年報(令和3年), 数値予報開発センター, 1-2.
- 高谷祐平, 2012: 再予報・ハインドキャスト, 天気, **59**, 493-495.

⁴ これは、現行のCPSが大気海洋の現象をより良く表現し、また毎日実行となったことにより、今回の更新前のCPSの実行頻度である5日おきという制約の中で決めていた発表日(25日頃)と比べて、同じかそれよりも早く、発表曜日を固定化したことを意味する。

⁵ 現行は16日間。今回のCPS更新前の構成は5日おき4回分(毎回13メンバー)であり、その長さは15日間。ガイ

ダンスの関係式の導出での構成は再予報の月2回分の10メンバーと今回のCPS更新前後で変わらず、その長さは約15日間。

⁶ <https://www.data.jma.go.jp/suishin/shiyou/pdf/no20110>

⁷ <https://www.data.jma.go.jp/suishin/shiyou/pdf/no20111>

⁸ <https://www.data.jma.go.jp/suishin/shiyou/pdf/no20112>

2.2 季節アンサンブル予報システムの更新¹

これまで、本季節予報研修テキストでは全球アンサンブル予報システム(以降、全球 EPS)及び季節アンサンブル予報システム(Coupled Prediction System; 以降、CPS)の改善等について取り上げてきたが、令和2年度の気象庁組織再編に伴い、気候情報課のモデル開発業務は数値予報課に移管されたため、モデルに係る詳細な解説は数値予報開発センター年報²及び数値予報解説資料集³を参照されたい。本節では、2022年2月より運用を開始した季節アンサンブル予報システム(以降、CPS3)に関して数値予報開発センター年報(気象庁, 2021; 気象庁, 2022)で報告された内容を元に簡単に紹介する。

2.2.1 CPSについて

CPSは、気象庁の発表する3か月予報、暖・寒候期予報、エルニーニョ監視速報等の基盤となる数値予報システムである。これらの予報の予測可能性は大気、海洋、陸面の時間スケールの長い相互作用に基づいているため、数値予報システムにおいてもそれらを高精度に表現することが必要となる。よってCPSは、大気モデルのみならず海洋や海氷、陸面モデルを結合した数値予報システムとなっている。第2.2-1図に、CPS3における処理の概念図を示す。

CPSで用いられる大気・陸面のモデルは、短期予報や週間天気予報等に使われている気象庁全球大気モデル(以降、GSM)を基本バージョンとして採用してきた。また、海洋・海氷のモデル及びデータ同化シ

ステムは、気象研究所共用海洋モデル(以降、MRI.COM)及び気象研究所開発の海洋データ同化システム(以降、MOVE)を基本バージョンとして利用してきた。これは海面水温・海流1か月予報や海氷予報に使われるモデルでもある。その他、大気初期値や解析値等に関しても様々な予報・プロダクトに使われるモデルやシステム、データを利用してきた。

2.2.2 CPS3での改良点について

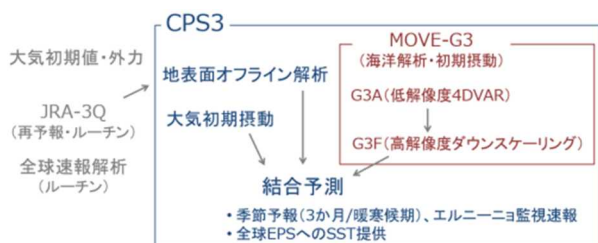
気象庁(2021)には、2015年6月から運用していた旧CPS(以降、CPS2)の課題とCPS3の開発概要(2021年時点)がまとめられ、気象庁(2022)にはCPS3の仕様、予測精度等が記載されている。第2.2-1表でCPS2とCPS3の仕様を比較する。

(1) 大気・陸面モデル

CPS3では、大気・陸面モデルの基本バージョンに2020年3月に現業化されたGSM(以降、GSM2003)を基本バージョンとして採用した。水平解像度はTL319(約55km)、鉛直層数は100層に設定し、CPS2と比べいずれも高解像度化した。また、物理過程の改善、外力の更新を行い、季節予報やエルニーニョ予測の精度の向上を図った。

(2) 海洋・海氷モデル

海洋・海氷モデルには、CPS3開発時のMRI.COMの最新バージョンを利用し、CPS3においては、水平座標にはCPS2同様に全球三極座標を採用しつつその解像度を0.25°に上げ、鉛直座標にはz*座標を採用した。これにより、SSTの微細構造の再現性が高まることが確認できた。



第2.2-1図 CPS3概要
気象庁(2022)より引用

¹ 原口 慶子

² https://www.jma.go.jp/jma/kishou/books/npdc/npdc_annual_report.html

³ <https://www.jma.go.jp/jma/kishou/books/nwpkaisetu/nwpkaisetu.html>

(3) 初期値

ア 大気・地表面初期値

大気初期値は、現業運用時には全球速報解析(以降、GA)を、再予報時には気象庁第3次長期再解析(以降、JRA-3Q)を用いる。

地表面初期値は、CPS3 に用いるものと同じ仕様のオフライン地表面モデルを、大気解析値(遅延解析はJRA-3Q、速報解析はGA)で駆動して作成する。

イ 海洋・海氷初期値

海洋・海氷初期値は、MRI.COM と MOVE を利用した第3世代の全球海洋データ同化システムである MOVE/MRI.COM-G3(以降、MOVE-G3)を構築し、これを用いて計算する。第2.2-2表で、2015年6月から運用していた旧全球海洋データ同化システム(MOVE/MRI.COM-G2; 以降、MOVE-G2)とMOVE-G3の仕様を比較する。

MOVE-G3 は、海洋・海氷モデルの高解像度化及びより高度な解析手法に対応し、また計算機負荷や計算不安定等を軽減するため G3A、G3F と呼ばれる計2回の計算ステップで構成される(第2.2-2表 MOVE-G3 列参照)。G3A ではより低解像度で4次元変分法(以降 4D-Var)の解析を行い、その水温・塩分場を Incremental Analysis Updates(以降、IAU)と呼ばれる手法で、より高解像度の G3F へと与える。また、G3A では、4D-Var の導入に加え、初期値に同化される面的海面水温(以降 SST)プロダクトとしては COBE-SST⁴から MGDSST⁵に変更し、SST や南大洋の100m 深水温で顕著な誤差の改善が見られた。

MOVE-G3 は海氷密度の同化も導入し、衛星観測の海氷場に関する情報を解析値に反映できるようになった。これにより海氷域面積の年々変動や季節変動がより良く表現できるようになった。

第2.2-1表 新旧システムの仕様比較
気象庁(2022)より引用し、一部加工。

	JMA/MRI-CPS2(2015年6月-)	JMA/MRI-CPS3(2022年2月-)
大気モデル	GSM1011C* 解像度:TL159L60(約110km) モデルトップ:0.1hPa	GSM2003C* 解像度:TL319L100(約55km) モデルトップ:0.01hPa
海洋モデル	MRI.COMv3.2 1.0°(経度)×0.3~0.5°(緯度)×(L52+海底境界層)(鉛直)	MRI.COMv4.6 0.25°(経度)×0.25°(緯度)×L60(鉛直)
初期条件	大気:気象庁第2次長期再解析(以降、JRA-55) 陸面:JRA-55 陸面解析値 海洋:MOVE/MRI.COM-G2 海氷:同化無し	大気:JRA-3Q(再予報)、 全球速報解析(現業運用時) 陸面:オフライン地表面解析値 海洋:MOVE/MRI.COM-G3 海氷:3次元変分法(以降 3D-Var)
初期摂動	大気:熱帯・北半球 BGM 海洋:大気 BGM 駆動 3D-Var	大気:熱帯・北半球・南半球 BGM 海洋:海洋解析誤差摂動
モデル摂動	確率的物理過程強制法(大気のみ)	
アンサンブルメンバー数	13メンバー/5日	5メンバー/日

*GSM1011C および GSM2003C はそれぞれ GSM1011 および GSM2003 に対して季節予報用の改良・調整を加えたものを表す。

⁴ Centennial in situ Observation-Based Estimates Sea Surface Temperature. 現場観測データのみによる気象庁の全球海面水温解析(値)

⁵ Merged satellite and in situ data Global Daily Sea Surface Temperature. 気象庁の全球日別海面水温解析(値)。

第 2.2-2 表 全球海洋データ同化システムの仕様
 気象庁(2022)より引用し、一部加工。

システム名	MOVE-G2	MOVE-G3	
		G3A (低解像度 4D-Var)	G3F (高解像度ダウンスケーリング)
運用開始	2015 年 6 月	2022 年 2 月	
支配方程式	自由表面のプリミティブ方程式を有限差分法で解く		
水平解像度	1°(経度)×0.3~0.5°(緯度)	1°(経度)×0.3~0.5°(緯度)	0.25°(経度)×0.25°(緯度)
鉛直解像度	52 層+海底境界層	60 層+海底境界層	60 層
観測データ	水温(海面及び海中)、 塩分、海面高度	水温(海面及び海中)、 塩分、海面高度、 海氷密接度	海氷密接度
同化される 面的 SST プロダクト	COBE-SST	MGDSST	-
解析手法	3D-Var/FGAT と IAU	4D-Var と IAU	G3A の水温・塩分に IAU
海氷同化	-	密接度 3D-Var と IAU	
大気強制力	JRA-55	JRA-3Q と全球速報解析	
解析ウインドウ	10 日	10 日 (IAU 期間 5 日 + 同 化期間 5 日)	5 日
初期値作成 頻度	5 日毎に 5 メンバー (2 ストリーム)	毎日 5 メンバー (5 ストリーム)	
初期値摂動 作成手法	大気強制力に成長モード 育成による摂動を与える	4D-Var の探索履歴から 解析誤差共分散を近似	摂動を含む G3A の 水温・塩分に IAU
実行形態	速報解析と遅延解析 それぞれ約 2 日と約 33 日 の観測データカットオフ	速報解析と遅延解析 それぞれ約 6 時間と約 4 日の観測データカットオフ	

(4) 初期摂動

ア 大気モデルの初期摂動の作成手法

大気モデルの初期摂動は、BGM 法 (Breeding of Growing Mode 法) に基づき、北半球 (20~90°N) 及び南半球 (20~90°S) の 500hPa 高度、熱帯 (20°S~20°N) の 200hPa 速度ポテンシャルにおける上位 2 つの成長モードを育成し、それらを組み合わせて初期摂動パターンを作成する。簡素化のため初期スプレッドの規格化の割合は再予報から現業予報まで一定とする

(500hPa 高度は気候学的変動の 14.5%、200hPa 速度ポテンシャルは 20%)。

イ 海洋モデルの初期摂動の作成手法

海洋モデルでは、解析誤差共分散行列を近似する摂動を初期値に加える。G3A の 4D-Var で利用する準ニュートン法では、制御変数の値をずらし、その時の評価関数の勾配を求める反復計算を繰り返す。その際に得られる制御変数のずれと勾配のずれを表すベクトルから解析誤差共分散行列の上位固有値・固有ベクトルの組の近似値を求めることが出来る。CPS3 では、インパクト実験の結果を踏まえて摂動の大きさが

解析インクリメントの 0.5 倍となるようにスケーリングした固有ベクトルを組み合わせ、初期摂動を作成する。

(5) 現業運用スケジュール

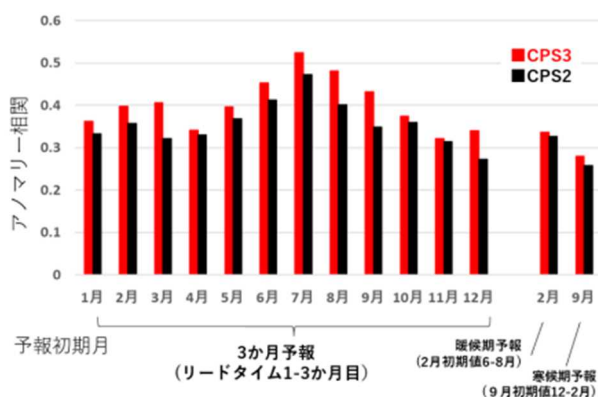
CPS3 では現業運用スケジュールを CPS2 から大きく見直し、毎日 00UTC から始まる 5 メンバーの予測計算を当日のうちに完了させる。全球 EPS では、2020 年 3 月より CPS で予測された SST を下部境界条件として利用しているが、この運用スケジュールの見直しによって SST がより高頻度で更新できるようになった。

2.2.3 CPS3 の精度評価

1991~2020 年を対象とする再予報に基づき CPS2 と CPS3 の予測精度を比較した。検証データには MGDSST、米国大気海洋庁の外向き長波放射、全球降水気候計画 v2.3、JRA-3Q を用いた。

第 2.2-2 図は、JRA-3Q と CPS2 及び CPS3 の北半球域で平均した 2m 気温のアノマリー相関係数（以降、ACC）を比較する。リードタイムは現業季節予報の発表形態に合わせ、3か月予報に相当する 1~3 か月目、暖候期予報に相当する 2 月初期値の 4~6 か月目（6~8 月）、寒候期予報に相当する 9 月初期値の 3~5 か月目（12~2 月）とする。全ての初期月について精度は同等~改善が見られ、特に夏（6~8 月）から秋（9~11 月）の予報については一貫した改善がみられる。

季節内変動の予測では、マッデン・ジュリアン振動（以降、MJO）の改善が顕著に確認できた。CPS2 では予報初期の頃にインド洋中部~東部の対流活発位相



第 2.2-2 図 北半球域 (20°~90°N) で平均した CPS3 (赤) および CPS2 (黒) と JRA-3Q との 2m 気温 ACC 気象庁 (2022) より引用

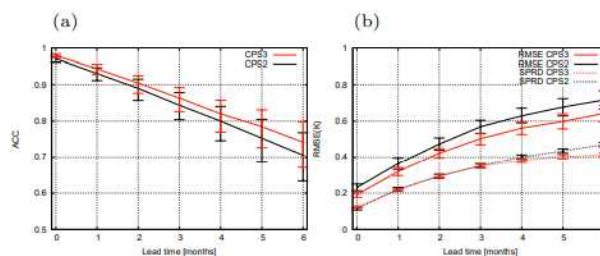
が同じ経度帯で持続しやすいバイアスがあり、これにより MJO の東進も不明瞭な傾向があったが、CPS3 では対流活発域やそれに引き続く不活発域の東進が良く見られるようになった。全季節・全位相で合算した MJO 指数の相関係数によると、CPS2 は 0.5 以上のスコアはリードタイム 21 日目までだったのに対し、CPS3 は 27 日目まで延びた (図略)。

ブロッキング現象の出現頻度バイアスにも改善が見られ、CPS2 と比較すると、特にヨーロッパのブロッキングの頻度過少バイアスが大きく軽減された。

エルニーニョ/ラニーニャ現象 (以降、ENSO) に関しては、その監視や予測に用いている NINO.3 領域 (150°~90°W, 5°S~5°N) 平均した SST を、MGDSST を用いて検証すると、CPS2 においては直近数か月の変化傾向を外挿したような大外しの事例がよく見られたが、CPS3 における同事例では大外しが軽減されたことが確認できた。また、CPS3 では 1997 年や 2015 年のような大振幅のエルニーニョも適切に予測できたことから、多様な ENSO を表現できるようになったと推察される。MGDSST と、CPS2 及び CPS3 の NINO.3 の ACC を比較すると有意では無いものの CPS3 で改善傾向が見られ、また、二乗平均平方根誤差は全てのリードタイムで CPS3 が有意に改善した (第 2.2-3 図)。

また、ENSO 発生時の典型的な大気海洋変動パターンについても、再現性の向上が確認できた (図略)。

2.2.4 まとめ



第 2.2-3 図 (a) CPS3 (赤) および CPS2 (黒) と MGDSST との NINO.3 SST のアノマリー相関係数、(b) 二乗平均平方根誤差 (実線) およびスプレッド (破線)。再予報 (1991-2020 年の各月初期日から計 360 事例を抽出) に基づく。実線は 1000 回のブートラップ試行の平均値を、エラーバーは 95% 信頼区間を示す。気象庁 (2022) より引用

CPS3 では、最新の長期大気再解析 JRA-3Q の利用に加えて、海洋データ同化に 4D-Var を導入し、海氷データの同化も導入したことなどにより予報初期値の品質が向上した。モデルの高解像度化や物理過程の精緻化もあり、MJO やブロッキング高気圧などの季節内変動から、ENSO などの季節規模の現象に至るまで、幅広い時間スケールの変動の表現が改善した。また、現業運用スケジュールを見直したことにより、これまでより予測情報を利用しやすくなった。

参考文献

- 気象庁, 2021: 結合モデルの改良. 数値予報開発センター年報(令和 2 年), 気象庁数値予報開発センター, 111-114.
- 気象庁, 2022: 季節予報アンサンブル予報システムの改良. 数値予報開発センター年報(令和 3 年), 気象庁数値予報開発センター, 122-132.

2.3 3 か月予報及び暖・寒候期予報のためのガイダ ンスの更新¹

2.3.1 はじめに

気象庁では、3 か月予報及び暖・寒候期予報の作成に、季節アンサンブル予報システム(以下、CPS)の予測結果を用いている。これらの予報は、CPS のモデル出力値のみならず、それを入力とするガイダ
ンスに基づき発表される。CPS は令和 4 年 2 月に、JMA/MRI-CPS2(以下、CPS2)から JMA/MRI-CPS3(以下、CPS3)に更新された。これに併せて、ガイダ
ンスの仕様の変更を行なった。CPS 更新及びガイダ
ンスの更新に伴いガイダ
ンス予測の特性が変わることが想定され、その変化を事前に把握しておく必要がある。そのため、3 か月予報及び暖・寒候期予報に用いるガイダ
ンスについて評価を行った。

本節では、第 2.3.2 項で 3 か月予報及び暖・寒候期予報に用いるガイダ
ンスの概要について説明し、第 2.3.3 項でガイダ
ンス更新に伴う変更点について述べる。さらに、第 2.3.4 項及び第 2.3.5 項で、それぞれ更新後のガイダ
ンスの評価結果と事例解析の結果について報告する。そして最後に第 2.3.6 項でまとめる。

なお、以降では、CPS2 に対して用いられていたガイダ
ンスを「旧ガイダ
ンス」と、CPS3 に対して用いるガイダ
ンスを「新ガイダ
ンス」と呼ぶ。

2.3.2 ガイダ ンスの概要

前述の通り、3 か月予報及び暖・寒候期予報は CPS のモデル出力値に基づき発表されている。モデル出力値は、数値予報モデルの不完全性など²により常に誤差を含むため、予報作業に用いるためには、補正が必要となる。また、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モデル出力値を確率予測に翻訳する必要がある。これらの補正や翻訳を行うために、ガイダ
ンスが用いられている。

3 か月予報及び暖・寒候期予報に用いるガイダ
ンスは、Model Output Statistics (MOS; Glahn and Lowry 1972) 方式に基づく一括学習型ガイダ
ンスを採用し

ている。この手法は、ガイダ
ンスで予測する要素の実況データと再予報³データの統計的関係を事前に推定し、予測式を作成する。そして、その予測式を実際のモデル出力値に適用する。そのため、CPS が更新されると、モデル出力値と実況データの統計的関係が変わるため、ガイダ
ンスの予測式の更新が必要となる。

2.3.3 ガイダ ンス作成手法の変更点

今回の CPS 更新に伴い、予測式の更新に加え、ガイダ
ンスの作成手法についても更新を行った。具体的には以下の 4 点である。

- ・ モデル出力値の水平解像度
- ・ 説明変数
- ・ 係数の推定に用いるデータのサンプル数
- ・ 降水量・降雪量ガイダ
ンスの正規化⁴処理の必要性

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、(遠藤と竹川 2015)を参照されたい。

(1) 使用データ

新ガイダ
ンスの作成に使用した再予報データは、年間 24 初期値(各月 15 日間隔で 2 初期値)、各初期値 5 メンバーからなる CPS3 再予報データである。ガイダ
ンス作成時には、各月 2 初期値の LAF (Lagged Average Forecast)をとり合計 10 メンバーのアンサンブル平均を用いた。初期月は 1990 年 1 月から 2020 年 12 月までのデータを使用した。実況値は、再予報データに対応する期間を用いた。

(2) モデル出力値の水平解像度

旧ガイダ
ンスでは、モデル出力値として CPS2 の水平解像度 2.5 度のデータを用いていたが、CPS3 ではより高解像度のデータとして水平解像度 1.25 度と 0.5625 度のデータも出力されている(0.5625 度のモデ

¹ 山田 賢

² 数値予報モデルが完全でないこと以外にも、観測誤差の存在などによっても、誤差を生じる。

³ 現業運用と同じ仕様の数値予報モデルを用いた過去の予測実験。

⁴ 予測誤差の分布を正規分布に近づけるため、目的変数である実況値を N 乗根する処理。

ル出力は日本域のみ)。そのため、新ガイダンスでは、高解像度のモデル出力値の使用を検討した。旧ガイダンスと同じ水平解像度のデータ及びより高解像度のデータを用いたガイダンスの精度を比較したところ、大きな精度の差は確認できなかったが、地形特性をより再現できている水平解像度 0.5625 度のデータを採用した。

(3) 説明変数

旧ガイダンスでは、2 または 3 つのモデル要素を説明変数、各地域の実況値を目的変数とした、線形重回帰を採用していた。線形重回帰を用いる場合、伊藤ほか(2020)でも説明されている通りいくつかの課題が存在する。まず、多重共線性⁵を排除するため、使用する説明変数間の相関を小さくする必要がある。そのため、目的変数と相関の小さい説明変数が選択されている場合もあり、モデル出力値からガイダンス予測の結果を容易に解釈できない場合があった。また、旧ガイダンスは予報対象地域⁶・期間ごとに、旧平年値データで AICc (赤池情報量基準: AIC with a correction for finite sample size, Sugiura 1978) が最小となるように説明変数を自動選択していた。そのため、選択された説明変数によっては隣接する地域や期間でガイダンスの予測結果に連続性がなく、解釈しづらい場合もあった。

上記を踏まえ新ガイダンスでは、解釈しやすいガイダンス予測を意識し、線形単回帰を検討した。単回帰式の説明変数には、予測要素と関係が強いものとして第 2.3-1 表に示した説明変数を選択した。旧ガイダンスと同じ説明変数を用いた重回帰式によるガイダンスと単回帰式によるガイダンスの精度を比較した結果、ほぼ同等もしくは改善の傾向が確認できたため、新ガイダンスでは単回帰式を用いることとした。

⁵ 変数間に複数の完全または近似的な線形関係が成立していること。多重共線性がある場合、用いる説明変数の加除により回帰式の係数が大きく変化したり、通常考えられる符号と異なる結果が得られたりするなど、回帰式の信頼性が低下する。

⁶ 予報対象地域は気象庁 HP (https://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/kisetsu_riyou/division/index.html) を参照。

第 2.3-1 表 新ガイダンスで使用する説明変数

予測要素(目的変数)	説明変数
気温 (沖縄・奄美、冬～春)	地上気温平年差
気温(上記以外)	300hPa 高度平年差
降水量	降水量平年比
日照時間	全雲量平年差
降雪量	500hPa 高度平年差

なお、予測式は旧ガイダンスと同様、予報対象地域・期間ごとに作成し、説明変数に使用するモデル出力値は、予報対象地域に対応するモデル格子点⁷値としている。

(4) 係数の推定に用いるデータのサンプル数

旧ガイダンスでは、予測対象期間ごとに、全てのリードタイムを用いて予測式を作成している。これはサンプル数を確保し、係数の推定精度を高めるためである。新ガイダンスでは、より多くのサンプル数を確保するため、予報対象期間の前後 1 か月のデータも使用した。例えば、2~4 月における 3 か月平均の予測式を作成する場合、2~4 月を予報対象期間とする、全リードタイムのデータに加えて、1~3 及び 3~5 月を予報対象期間とする、全リードタイムのデータも使用する。

なお、降雪量は全ての予報対象期間のデータを使用して予測式を作成した。これは、降雪量の予報対象期間が、第 2.3-2 表の通り、限定されているためである。

第 2.3-2 表 降雪量の予報対象地域と予報対象期間

各予報対象地域における、予報対象期間に○をつけている。北日本(日)は北日本日本海側、東日本(日)は東日本日本海側、西日本(日)は西日本日本海側を示す。

地域	11~1 月	12~2 月	1~3 月	2~4 月
北日本(日)	○	○	○	○
東日本(日)		○	○	
西日本(日)		○	○	

⁷ 1 か月予報ガイダンス(全球 EPS、水平解像度 0.5625 度)で使用している格子点と同じ地点を選出した。

第 2.3-3 表 新旧ガイダンスの変更点

	旧ガイダンス	新ガイダンス
モデル出力値の水平解像度	全球 2.5 度	日本域 0.5625 度
説明変数	重回帰式	単回帰式
係数の推定に用いるデータ	全リードタイムのデータ	全リードタイムのデータ、予報対象期間の前後 1 か月を含むデータ
降水量・降雪量ガイダンスの正規化処理	有	無

この変更により、ほぼ全ての要素・リードタイムにおいてガイダンスの精度改善を確認できた。予報対象期間別に係数を確認すると、変更後はその季節変化が滑らかになり、精度改善の結果も踏まえると、サンプル数を増やしたことで係数の推定誤差がより小さくなったと推測される。

(5) 降水量・降雪量ガイダンスの正規化処理の必要性

旧ガイダンスでは、降水量と降雪量を予測する場合、予測誤差の分布を正規分布に近づけるため、実況値を正規化してから予測式を作成している。しかしながら、一般的に統計モデルを作成する上では、強引な変数変換を実施しない方が望ましいとされている(久保 2012)。そのため、新ガイダンスの作成にあたって、改めて地域ごとに誤差分布について確認したところ、多くの地域や季節で誤差分布が左右対称の正規分布に近い形状であることが確認できた。また、正規化を行わずに作成したガイダンスと、正規化を行い作成したガイダンスの精度を比較したところ、両者で大きな精度の差は確認できなかった。そのため、新ガイダンスでは正規化処理は実施しないこととした。

以上をまとめると、新旧ガイダンスの変更点は第 2.3-3 表の通りである。

2.3.4 新ガイダンスの検証結果

本項では、上記手法により作成した新ガイダンスの検証結果について述べる。検証は予報対象期間の初月が 1991 年 1 月から 2020 年 12 月の期間について、

交差検証(クロスバリデーション)⁸に基づき行った。評価指標は、Brier Skill Score (BSS)⁹やアノマリー相関係数(ACC)などの指標(中三川 2013)を用いたが、本項では BSS の結果を中心に示す。なお、3 か月予報の対象は 1~3 か月目であるが、暖候期及び寒候期予報の対象はそれぞれ 4~6 か月目及び 3~5 か月目であることに加え、リードタイム依存性について確認するため、4~6 か月目までの特性も併せて記載する。

第 2.3-1 図には、全地域¹⁰、通年で集計した 3 か月平均気温・降水量・日照時間・降雪量の BSS を、旧ガイダンス及び旧ガイダンスと同じ手法を CPS3 に適用したガイダンス(以下、単純更新ガイダンス)と併せて示す。単純な比較は難しいが、旧ガイダンスと単純更新ガイダンスの精度の違いはモデル更新による影響、単純更新ガイダンスと新ガイダンスの精度の違いは今回ガイダンス手法を更新したことによる影響と解釈できる。ほぼ全ての要素・リードタイムにおいて、旧ガイダンス及び単純更新ガイダンスより、新ガイダンスは精度が良いことが確認できる。特に平均気温はリードタイム後半まで精度を確保できている。降雪量は 1~3 か

⁸ 精度検証において系統誤差等を補正する際、補正値の算出に検証事例を用いない方法。

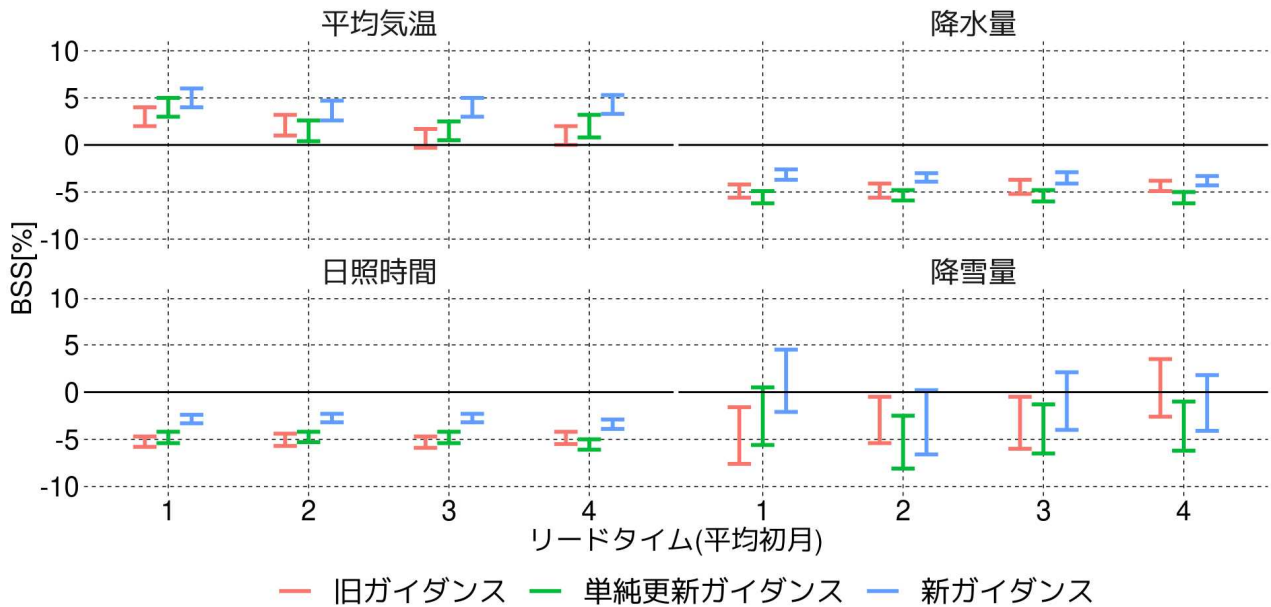
⁹ 確率予報の精度指標。0 より大きい場合は気候値予報より精度があることを示し、完全予報のとき最大値 1 となる。

¹⁰ 各要素について、それぞれ以下の地域を平均して算出した。

気温: 北海道地方、東北地方、関東甲信地方、北陸地方、東海地方、近畿地方、中国地方、四国地方、九州北部地方、九州南部、奄美地方、沖縄地方

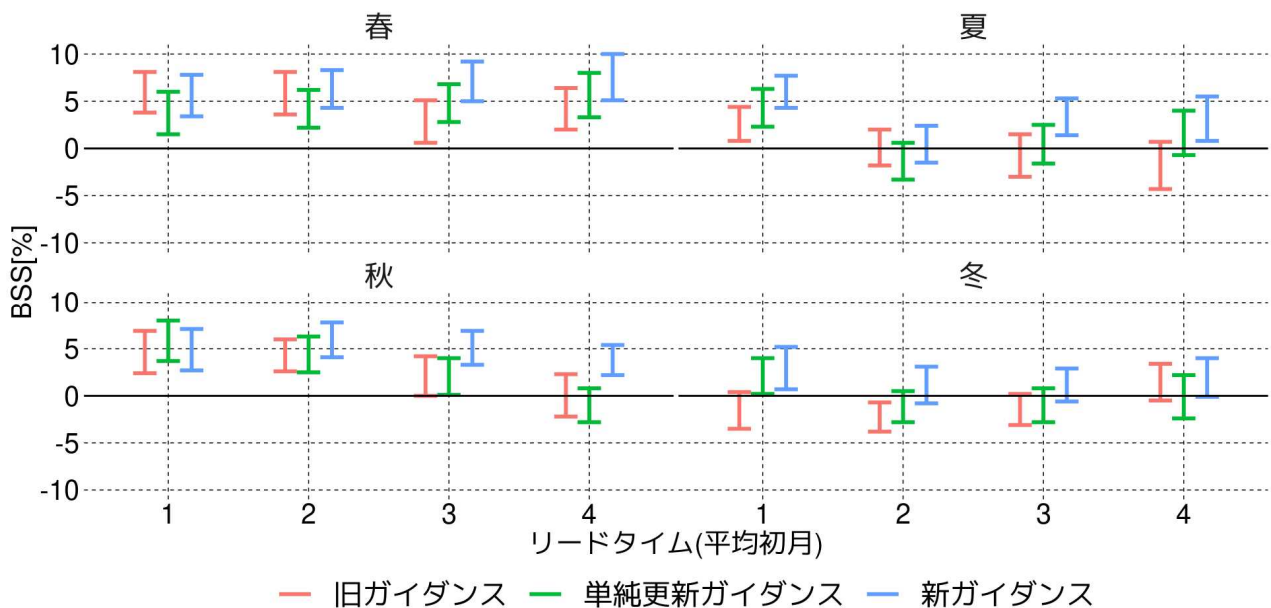
降水量・日照時間: 北海道日本海側、北海道オホーツク海側、北海道太平洋側、東北日本海側、東北太平洋側、関東甲信地方、北陸地方、東海地方、近畿日本海側、近畿太平洋側、山陰、山陽、四国地方、九州北部地方、九州南部、奄美地方、沖縄地方

降雪量: 北海道日本海側、東北日本海側、北陸地方、近畿日本海側、山陰



第 2.3-1 図 全地域、通年で集計した 3 か月平均気温・降水量・日照時間・降雪量の新旧ガイダンスの精度比較

3 階級の結果で集計した 3 か月平均気温・降水量・日照時間・降雪量の BSS [単位は%]。ブートストラップ法で見積もった 90%信頼区間を誤差棒で表記している。横軸はリードタイム(LT)で、平均初月を表記している(例えば、横軸が 1 は 1~3 か月目の 3 か月平均を意味する)。赤線は旧ガイダンス、緑線は旧ガイダンスと同じ手法を CPS3 に適用したガイダンス(単純更新ガイダンス)、青線は新ガイダンスの精度を示す。説明変数に用いたデータは、旧ガイダンスは CPS2 再予報データ、単純更新ガイダンスと新ガイダンスは CPS3 再予報データ。

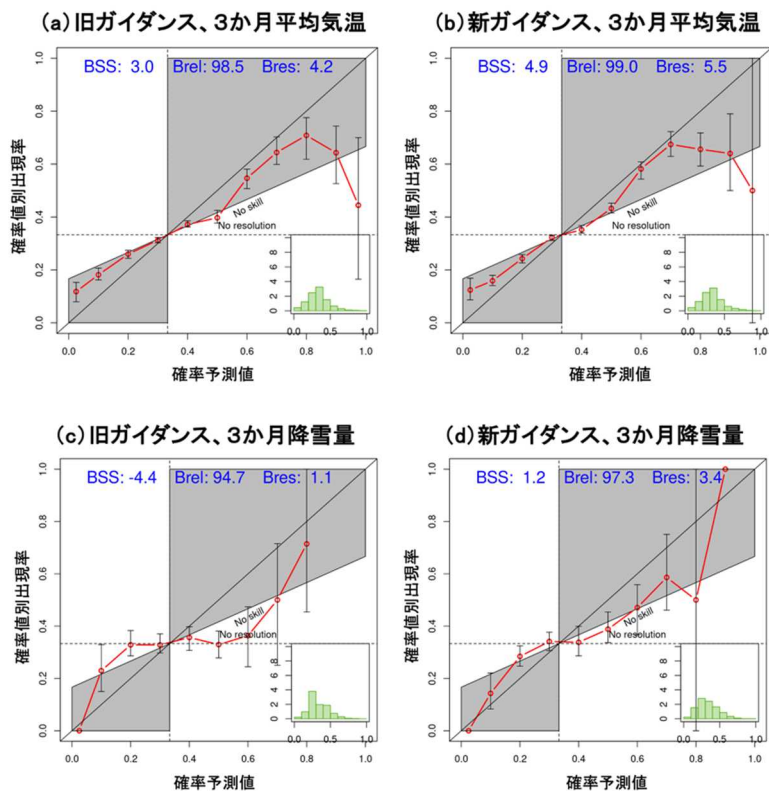


第 2.3-2 図 全地域、各季節で集計した 3 か月平均気温の新旧ガイダンスの精度比較

第 2.3-1 図と同じ。

月目の予測は辛うじて精度があるが、その後は精度が乏しい。降水量と日照時間は、全リードタイムで精度が乏しい。第 2.3-2 図には、全地域、各季節で集計

した 3 か月平均気温の BSS を示す。旧ガイダンス及び単純更新ガイダンスと比較して新ガイダンスの BSS は、全季節で同程度もしくは改善傾向となっている。



第 2.3-3 図 3 か月平均気温・降雪量の新旧ガイダンスの信頼度曲線

全地域、通年において、3 階級の結果で集計した 1~3 か月目の 3 か月平均気温(a, b)と 3 か月降雪量(c, d)。(a)及び(c)は旧ガイダンス、(b)及び(d)は新ガイダンスの結果を示す(説明変数に用いたデータは、旧ガイダンスは CPS2 再予報データ、単純更新ガイダンスと新ガイダンスは CPS3 再予報データ)。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。ブートストラップ法で見積もった 95%信頼区間をエラーバーで表記している。また、図中に示した BSS は Brier Skill Score、BreI は信頼度、Bres は分離度で、いずれも単位は%である。

次に、全地域、通年において 3 階級の結果で集計した 1~3 か月目の 3 か月平均気温及び 3 か月降雪量の信頼度¹¹曲線を第 2.3-3 図に示す。両要素ともに、

旧ガイダンスに比べ新ガイダンスの方が、信頼度曲線が対角線に近づき、信頼度が改善していることがわか

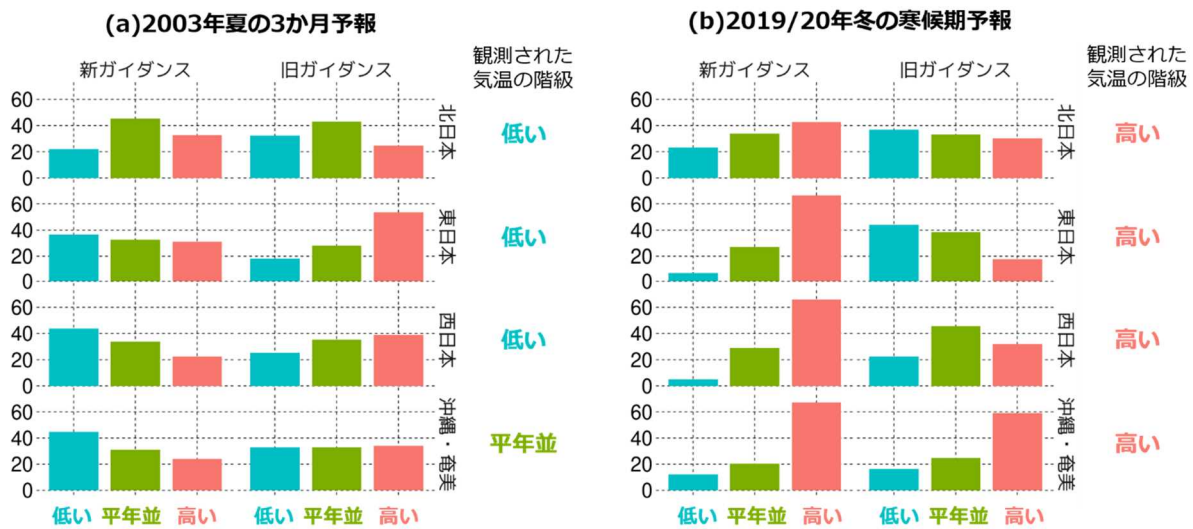
る。また、高い信頼度の下、分離度も改善しており、利用価値がより高い確率予測を提供できていると考えられる。

2.3.5 再予報データによる事例解析

本項では新ガイダンスの特性を確認するために、検証データ内の事例を 2 つ示す。第 2.3-4 図(a)に、5 月発表の夏の 3 か月予報の例として、2003 年夏の事例を示す。2003 年夏は北日本から西日本にかけて冷夏となり、日本の夏平均気温は 2000 年以降で最も低かった。旧ガイダンスに比べ新ガイダンスの方が、東・西日本の低温確率をより大きく予測しており、冷夏の傾向を捉えることができています。

第 2.3-4 図(b)に、9 月発表の寒候期予報の例として、2019/20 年の冬の事例を示す。2019/20 年の冬は、全国的に顕著な暖冬で、日本の冬平均気温は統計史

¹¹ 信頼度、分離度等の検証スコアに関しては、例えば中三川(2013)が詳しい。



第 2.3-4 図 再予報データによる 3 か月平均気温の新旧ガイダンスの予測事例

北・東・西日本及び沖縄・奄美における、3 か月平均気温の新旧ガイダンスによる予測。(a)は 2003 年 5 月発表の 3 か月予報を想定した 2003 年夏(6~8 月)の 3 か月平均気温予測、(b)は 2019 年 9 月発表の寒候期予報を想定した 2019/20 年冬(12~2 月)の 3 か月平均気温予測の例。いずれも、新ガイダンス、旧ガイダンスの予測結果を比較して示す(説明変数に用いたデータは、旧ガイダンスは CPS2 再予報データ、単純更新ガイダンスと新ガイダンスは CPS3 再予報データ)。棒グラフは気温が「低い/平年並/高い」のいずれの階級になるか予測される確率を示し、縦軸の単位は%。グラフの右側に、実際に観測された気温の階級を示す。

上 1 位の高温となった。全ての地域において、旧ガイダンスと比べ新ガイダンスの方が、高温確率をより大きく予測しており、暖冬の傾向をより捉えることができている。

2.3.6 まとめ

本節では、CPS 更新に伴い実施した 3 か月予報及び暖・寒候期予報に用いるガイダンスの更新について述べた。ガイダンスに用いるモデル出力値の水平解像度、説明変数、係数の推定に用いるデータのサンプル数、降水量・降雪量ガイダンスの正規化処理の必要性について検討を行い、新ガイダンスの手法を決定した。確率予測の評価指標の 1 つである BSS を確認すると、新ガイダンスでは、3 か月平均気温は全リードタイム・全季節で精度があることが示された。3 か月降雪量は 1~3 か月目では精度があるが、リードタイム後半は精度が乏しい。また、3 か月降水量・日照時間は全リードタイム・全季節で精度が乏しい。ただ、精度が乏しい要素・リードタイム・季節においても、新ガ

イドナンスは旧ガイダンスに比べ精度の改善が確認できた。また、1~3 か月目の平均気温と降雪量では、信頼度の改善に加え、分離度も改善していることが確認できた。

なお、単純更新ガイダンスと新ガイダンスは 4~6 か月目までの特性も併せて確認したが、3 か月平均気温は季節を通して、ほぼ全てのリードタイムで精度を確保できていた。地域別の精度については、北海道で BSS が負となる場合があるが、概ね全国的に精度を確保できている(図略)。このことは、3 か月目より先の予報が、季節を通して実現可能であることを示唆している。将来の展望も見据えつつ、今後も予測精度向上に向けガイダンス開発を行なっていく予定である。

参考文献

伊藤晋悟, 住友雅司, 伊藤明, 2020: 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。令和 2 年度季節予報研修テキスト, 気象庁地球環境・海洋部, 22-34.

- 遠藤新, 竹川元章, 2015: 3か月予報および暖・寒候期予報のためのガイドンスの更新. 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, 99-109.
- 久保拓弥, 2012: データ解析のための統計モデリング入門-一般化線形モデル・階層ベイズモデル・MCMC, 267pp.
- 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.
- Glahn, H. R. and D. A. Lowry, 1972: The Use of Model Output Statistics (MOS) in Objective Weather Forecasting. *J. Appl. Meteor.*, 11, 1203-1211.
- Sugiura, N., 1978: Further analysts of the data by akaike's information criterion and the finite corrections. *Communications in Statistics - Theory and Methods*, 13-26.