

次期季節アンサンブル予報システム JMA/MRI-CPS3

平原翔二、久保勇太郎、吉田拓馬、小森拓也、千葉丈太郎、関口亮平、越智健太、高倉寿成、金浜貴史

(気象庁 数値予報開発センター)

杉本裕之

(気象庁 大気海洋部)

足立恭将、石川一郎、藤井陽介

(気象研究所)

概要

季節予報の精度向上のため、現業季節予測システム JMA/MRI-CPS3 (Japan Meteorological Agency / Meteorological Research Institute-Coupled Prediction System version 3) を開発した。本システムは、旧システム JMA/MRI-CPS2 (Japan Meteorological Agency / Meteorological Research Institute-Coupled Prediction System version 2) に対して予測初期値・初期摂動および予報モデルをそれぞれ改良して精度を向上させるとともに、現業運用時の計算実行スケジュールを見直して季節内予報にも利用しやすいものになっている。本稿では、旧システムからの変更点や再予報に基づく精度評価結果について報告する。

1 はじめに

気象庁は季節予報の基礎資料を作成するため、季節アンサンブル予報システムを運用している。本稿は 2022 年 2 月から運用を開始した新しいシステム JMA/MRI-CPS3 (以降 CPS3) の概要と予測精度について報告する。

2 システム概要

CPS3 は予測モデルに大気ー陸面ー海洋ー海水結合モデルを用いたアンサンブル予報システムである。表 1 に、2015 年 6 月から運用していた旧システム JMA-MRI-CPS2 (Takaya et al. 2018; 以降 CPS2) と仕様の詳細を比較したものを示す。

システムの処理内容は、予測モデルの初期化と予測計算の 2 つに分けることができる。初期化部分では、事前に作成された大気解析値—気象庁長期再解析 (JRA-3Q) および全球速報解析 (GA)—を利用して、大気以外の初期条件 (大気初期摂動、地表面初期値および海洋の初期値・初期摂動) を作成する。予測計算には、季節予報に適するよう改良・調整を加えた気象庁全球大気モデル (GSM; JMA 2019) および気

象研究所共用海洋モデル (MRI.COM; Tsujino et al. 2017) を利用する。2 つのモデルは、結合ライブラリー (SCUP; Yoshimura and Yukimoto 2008) を用いて 1 時間毎に 1 回、海面・海水面の物理量を交換しながら予測計算を進める。

CPS2 と比較すると、大気・海洋モデルの高解像度化やモデル更新に伴う物理過程の精緻化等により系統誤差が改善している。再予報の大気初期値や大気強制力には最新の長期再解析データセット JRA-3Q (Kobayashi et al. 2021) を使用し、海洋初期値作成に用いる全球海洋データ同化システムには現業機関としては世界に先駆けて 4 次元変分法を導入した。また、利用者が予測結果をより利用しやすいようにアンサンブル予報計算の実行スケジュールを「5 日毎 13 メンバー」から「毎日 5 メンバー」へと変更している。より詳細な変更点については気象庁 (2022) を参照されたい。

3 精度評価

ここでは、CPS2 と CPS3 の予測性能を 1991-2020 年を対象とする再予報に基づいて比較する。

この再予報では、CPS2 と仕様を揃えて各月の月末半旬初日とその 15 日前の 00UTC から各 5 メンバー予報を行っている (Takaya et al. 2018)。季節内予測の検証 (3.1 節) には各初期日の 5 メンバーによる日別予報値を用い、季節予測の検証 (3.2 節) には各月 2 初期日を合わせて合計 10 メンバーの LAF (Lagged Average Forecast; Hoffman and Kalnay 1983) アンサンブル月平均値を用いる。以降、「1 月初期値の予報」と表現した場合のリードタイム 0 か月目は 12 月 12 日と 12 月 27 日の 10 メンバーによる 1 月の月平均値となるようにリードタイムを定義する。検証データには、JRA-3Q、気象庁全球日別海面水温解析 MGSST、NOAA OLR (Liebmann and Smith 1997) および GPCP v2.3 (Adler et al. 2018) を利用する。

表 1 新旧システムの仕様比較

	JMA/MRI-CPS2 (2015 年 6 月-)	JMA/MRI-CPS3 (2022 年 2 月-)
大気モデル	GSM1011C* 解像度: TL159L60 (～110km) モデルトップ: 0.1hPa	GSM2003C* 解像度: TL319L100 (～55km) モデルトップ: 0.01hPa
海洋モデル	MRI.COM v3.2 1.0°(東西) × 0.3-0.5°(南北) L52+ 海底境界層	MRI.COM v4.6 0.25°(東西) × 0.25°(南北) L60
初期条件	大気: 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: 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

3.1 季節内予測

季節内変動の予測を見ると、特にマッデン・ジュリアン振動 (MJO) の改善が顕著である (図 1)。CPS2 では、予測初期に見られるインド洋中部～東部の対流活発位相が同じ経度帯で持続しやすいバイアスがあった。これにより MJO の東進も不明瞭になる傾向があったが、CPS3 では対流活発域やそれに引き続く不活発域の東進を良く表現できるようになっている。全季節・全位相で合算した MJO 指数の相関係数 (図略) によると、CPS2 は 0.5 以上のスコアをリードタイム 21 日目まで維持していたのに対し、CPS3 はこれを 27 日目まで延長している。そのほか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る (図 2)。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ており、大気モデルの水平・鉛直高解像度化がバイアス改善に効果があるとする先行研究と整合的である (Anstey et al. 2013; Schiemann et al. 2017; Berckmans et al. 2013)。ただし、それらの研究で指摘されている高解像度化による高周波擾乱や大規模山脈の地形効果の表現向上以外にも、CPS3 については地形性重力波抵抗スキームの刷新をはじめとする物理過程の精緻化も改善に寄与した可能性がある。

3.2 季節予測

図 3 は、5 月初期値の NINO.3 領域 (150°-90°W, 5°S-5°N) に対する予測海面水温 (SST) 偏差を解析と比較したものである。CPS2 では初期値に与えられたエルニーニョ・南方振動 (ENSO) 初期シグナルを過度に発達させて大外しに至る事例が多いことが課題となっていた。図示された事例のうち例えば 2010 年代に着目すると、CPS2 には直近数か月の変化傾向を外挿したような大外しがよく見られるが、CPS3 は同じ事例を対象とする予報で大外しを軽減できていることが分かる。その一方、1997 年や 2015 年のような大振幅のエルニーニョは適切に予測できていることから推察されるように、CPS3 はこれまでより多様な ENSO を表現できるようになっており、不完全ながら事例に応じた予測スプレッドの変動も表現できるようになっている。

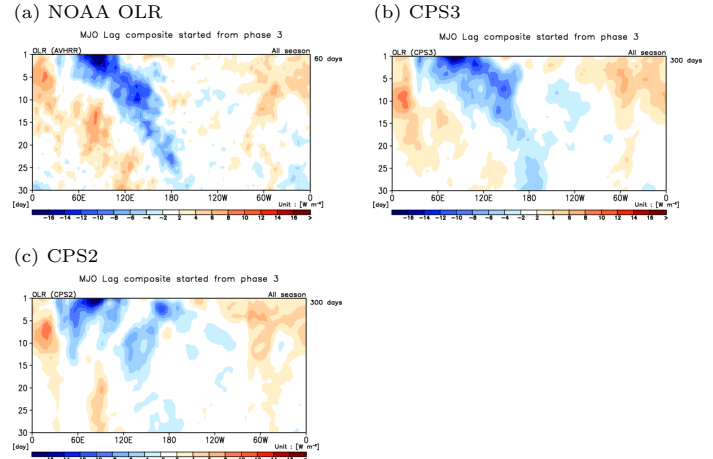


図 1 インド洋域 (Phase-3) に MJO の対流活発域の初期位相があるときの大気上端外向き長波放射量 (OLR) ラグ時間合成図 (全季節)。横軸は経度、縦軸は予報時間 [日]。位相の定義は Wheeler and Hendon (2004) に従う。

ENSO の単調な発達を避け、多様な予測結果を表現できるようになった要因として、海洋初期値の改善や、モデルの性能改善が複合的に寄与していると考えられる。図 1 で確認したように、MJO については対流活発域が特定の経度帯にとどまる誤差が軽減し、ENSO に対してより多様な海上風強制をもたらすことができるようになっている。また、ENSO に対する負のフィードバックとして寄与するプロセスに着目すると、海洋モデル高解像度化による熱帯不安定波動 (TIW) の表現改善や、浅い積雲や層積雲スキームの変更等による負の短波放射フィードバック (Chiba and Kawai 2021) の改善も ENSO 過発達の抑制に寄与していると考えられる。NINO.3 予測 SST と MGD SST とのアノマリー相関係数 (図 4) について見てみると、有意では無いものの改善傾向となっており、二乗平均平方根誤差 (RMSE) については全てのリードタイムで有意に改善している。予測のスプレッドには CPS2 に引き続き過少傾向は見られるが、スプレッドの変化幅に対して RMSE の縮小幅の方が大きいことから、アンサンブル予報システムとしての性能の目安であるスプレッドスキル比は改善している。特にリードタ

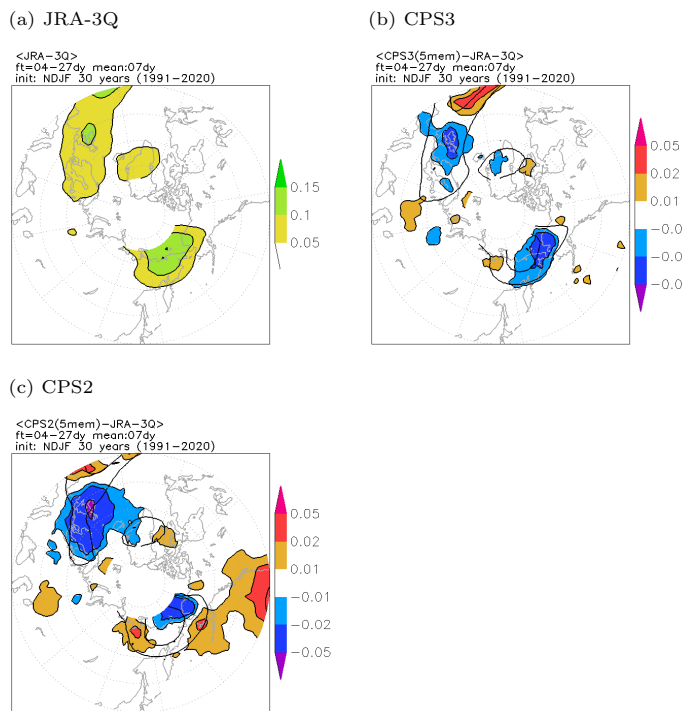


図2 (a)JRA-3Q のブロッキング高気圧の出現頻度気候値、(b)CPS3 および (c)CPS2 の JRA-3Q との差。ブロッキングの定義は Scherrer et al. (2006) の方法を用いる（詳細は新保 (2017) を参照）。1991-2020 年の 11-2 月、リードタイム 4-27 日目（7 日平均の中心日）を対象としている。出現頻度気候値を示す等値線（黒線）の間隔は 0.05 で、0.05 以上を描画。本手法では 75°N 以北の値は定義しない。

イム 0 か月目については、RMSE の縮小とスプレッドの拡大がともに有意であり、海洋初期値の精度向上や CPS3 で新たに導入した海洋摂動が寄与していると考えられる（気象庁 2022）。なお、別途行った 3D-Var および 4D-Var 海洋解析値による予報精度比較実験では、特にリードタイム 1 か月目程度まで 4D-Var 化による RMSE 縮小が有意に見られている。

ENSO 発生時の典型的な大気海洋変動パターンを確認するため、図 5 に NINO 3.4(170°-120°W, 5°S-5°N) 領域平均 SST に回帰した SST、降水量および海面気圧の分布を示す。解析の SST を見ると、再予報の対象となった 1991-2020 年では ENSO が中部太平洋を中心に変動する傾向があることが分かる。その一方で、CPS2 には東部太平洋に変動の中心が偏り、また降水偏差を伴って大きく変動するバイアスが見られるが、CPS3 は不十分ながらこのバイアスを改善している。またフィリピン付近の低 SST 偏差と高気圧偏差の対についてもより明瞭に表現できるようになり、解析に近づいている。

図 6 は、季節予報の主要予測指標の一つである 2m 気温のアノマリー相関係数を新旧システムで比較している。ここ

では、現業季節予報の発表形態に合わせて、3 か月予報（各月初期値のリードタイム 1-3 か月目）、暖候期予報（2 月初期値のリードタイム 4-6 か月目（6-8 月））および寒候期予報（9 月初期値のリードタイム 3-5 か月目（12-2 月））に相当するリードタイムの結果を示している。対象とする季節によって傾向に差があるものの、どの初期月についても同等～改善傾向を示しており、特に北半球の夏（6-8 月）から秋（9-11 月）にかけての予報については一貫したスコア改善が見られる。

4 まとめと今後の課題

本稿では CPS3 の仕様と再予報に基づく精度評価結果について報告した。最新の長期大気再解析 JRA-3Q の利用に加えて、海洋データ同化には 4 次元変分法を導入し、海水データ同化を新規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加わり、MJO やブロッキング高気圧などの季節内変動から、エルニーニョ現象に至る季節規模の現象まで、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点は精度に陽に表れない改善である。

今後、CPS3 を季節内規模の予測にも対応できるシステムとするには、1 実行あたりのアンサンブルメンバー数の増強の他、大気と海洋が相互作用せずに解析されていることやモデル仕様の違いに起因する予報初期ショックを軽減していく必要がある。また、季節規模の予測のさらなる改善には、CPS3 では固定されているオゾン濃度分布の変動を考慮するなど、新たな予測可能性を抽出し、実現可能なものからシステムに組み込んでいくことが必要である。今後も引き続きこうした開発課題への取り組みを進めることによって予測精度の向上を図るとともに、より利活用しやすいシステムとなるよう改善を積み重ねる予定である。

参考文献

- Adler, R., M. Sapiiano, G. Huffman, J.-J. Wang, G. Gu, D. Bolvin, L. Chiu, U. Schneider, A. Becker, E. Nelkin, P. Xie, R. Ferraro, and D.-B. Shin, 2018: The Global Precipitation Climatology Project (GPCP) monthly analysis (new version 2.3) and a review of 2017 global precipitation. *Atmosphere*, **9**, 138.
- Anstey, J. A., P. Davini, L. J. Gray, T. J. Woollings, N. Butchart, C. Cagnazzo, B. Christiansen, S. C. Hardiman, S. M. Osprey, and S. Yang, 2013: Multi-model analysis of Northern Hemisphere winter blocking: Model biases and the role of resolution. *JGR: At-*

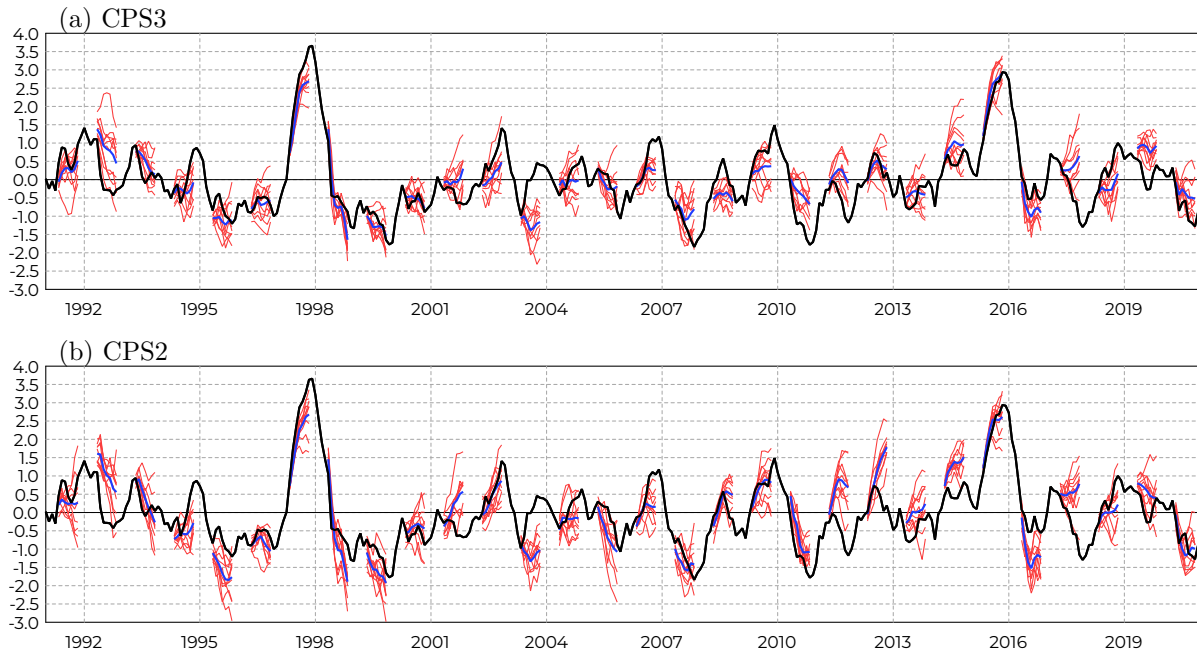


図3 NINO.3 領域平均 SST 偏差時系列。(a)CPS3 および (b)CPS2 による、各年の 5 月初期値 (4 月 11 日および 26 日を初期値とする 10 メンバー LAF) のリードタイム 0-6 か月目 (5-11 月) の予測。黒線は MGDSST、赤細線は各メンバー、青線はアンサンブル平均。

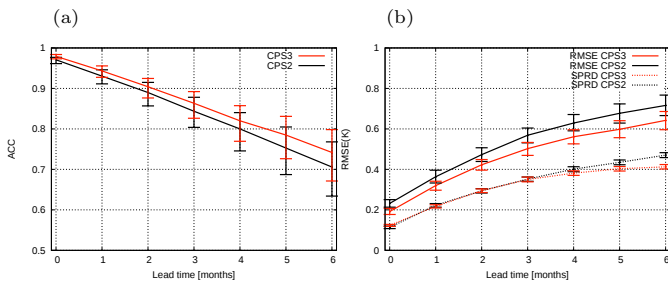


図4 (a)CPS3 (赤) および CPS2 (黒) と MGDSST との NINO.3 SST のアノマリー相関係数, (b) 二乗平均平方根誤差 (実線) およびスプレッド (破線)。再予報 (1991-2020 年の各月初期日から計 360 事例を抽出) に基づく。実線は 1000 回のブートラップ試行の平均値を、エラーバーは 95% 信頼区間を示す。

mospheres, **118**, 3956–3971.

Berckmans, J., T. Woollings, M.-E. Demory, P.-L. Vidale, and M. Roberts, 2013: Atmospheric blocking in a high resolution climate model: influences of mean state, orography and eddy forcing. *Atmospheric Sci. Lett.*, **14**, 34–40.

Chiba, J. and H. Kawai, 2021: Improved SSTshortwave radiation feedback using an updated stratocumulus parameterization. *CAS/JSC WGNE Res. Activ. Atmos. Oceanic Modell.*, 7–03.

Hoffman, R. N. and E. Kalnay, 1983: Lagged average forecasting, an alternative to Monte Carlo forecasting.

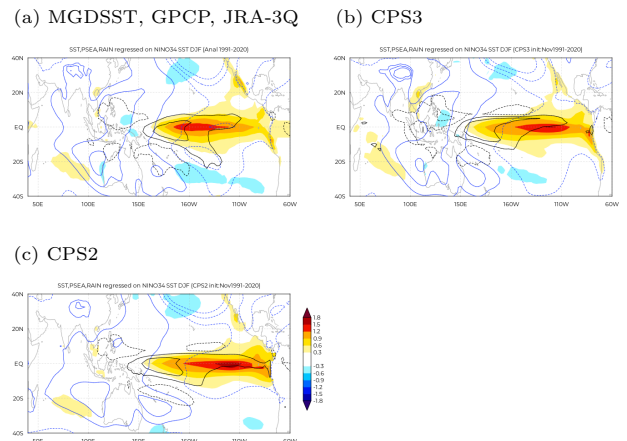


図5 北半球冬季 (12-2 月) の (a)NINO 3.4 SST と SST (陰影; K)、降水量 (黒線)、海面気圧 (青線) の回帰係数。1991-2020 年 11 月初期値の再予報の統計に基づく。等値線は、降水量は-5, -3, -1, 1, 3, 5[mm/day] に、海面気圧-1.2, -0.8, -0.4, 0.4, 0.8, 1.2[hpa] に描画 (負の値は破線)。

Tellus A, **35A**, 100–118.

JMA, 2019: Outline of the operational numerical weather prediction at the Japan Meteorological Agency. *Appendix to WMO Technical Progress Report on the Global Data-processing and Forecasting System and Numerical Weather Prediction, Tokyo, Japan.*

気象庁, 2022: 季節アンサンブル予報システムの改良. 令和 3 年度数値予報開発センター年報, 4.10, 投稿中.

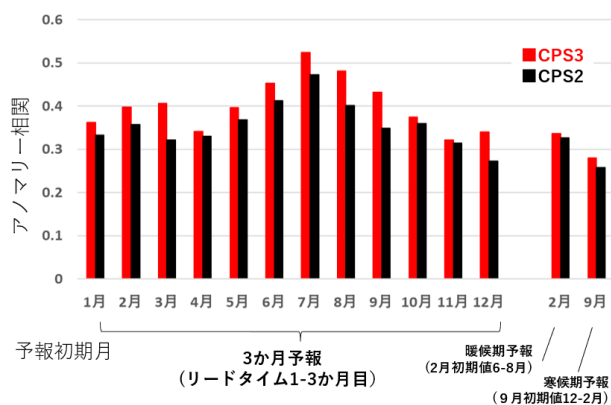


図 6 北半球域 (20°-90°N) で平均した CPS3 (赤) および CPS2 (黒) と JRA-3Q との 2m 気温アノマリー相関係数

Kobayashi, S., Y. Kosaka, J. Chiba, T. Tokuhira, Y. Harada, C. Kobayashi, and H. Naoe, 2021: JRA-3Q: Japanese reanalysis for three quarters of a century. *WCRP-WWRP Symposium on Data Assimilation and Reanalysis/ECMWF annual seminar 2021*, WMO/WCRP, O4-2, <https://symp-bonn2021.sciencesconf.org/data/355900.pdf>.

Liebmann, B. and C. A. Smith, 1997: Description of a complete (interpolated) outgoing longwave radiation dataset. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **77**, 1275–1277.

Scherrer, S. C., M. Croci-Maspoli, C. Schwierz, and C. Appenzeller, 2006: Two-dimensional indices of atmospheric blocking and their statistical relationship with winter climate patterns in the Euro-Atlantic region. *Int. J. Climatol.*, **26**, 233–249.

Schiemann, R., M.-E. Demory, L. C. Shaffrey, J. Strachan, P. L. Vidale, M. S. Mizieliński, M. J. Roberts, M. Matsueda, M. F. Wehner, and T. Jung, 2017: The resolution sensitivity of Northern Hemisphere blocking in four 25-km atmospheric global circulation models. *J. Climate*, **30**, 337–358.

新保明彦, 2017: ブロッキング高気圧. 平成 28 年度季節予報研修テキスト「1 か月予報システムの更新」, 38–41.

Takaya, Y., S. Hirahara, T. Yasuda, S. Matsueda, T. Toyoda, Y. Fujii, H. Sugimoto, C. Matsukawa, I. Ishikawa, H. Mori, R. Nagasawa, Y. Kubo, N. Adachi, G. Yamanaka, T. Kuragano, A. Shimpo, S. Maeda, and T. Ose, 2018: Japan Meteorological Agency/Meteorological Research Institute-Coupled Prediction System version 2 (JMA/MRI-CPS2): atmosphere–land–ocean–sea ice coupled prediction system

for operational seasonal forecasting. *Clim. Dyn.*, **50**, 751–765.

Tsujino, H., H. Nakano, K. Sakamoto, S. Urakawa, M. Hirabara, H. Ishizaki, and G. Yamanaka, 2017: Reference manual for the Meteorological Research Institute Community Ocean Model version 4 (MRI.COMv4). *Tech. Rep. MRI*, **80**.

Wheeler, M. C. and H. H. Hendon, 2004: An all-season real-time multivariate MJO index: Development of an index for monitoring and prediction. *Mon. Wea. Rev.*, **132**, 1917–1932.

Yoshimura, H. and S. Yukimoto, 2008: Development of a Simple Coupler (Scup) for earth system modeling. *Pap. Meteor. Geophys.*, **59**, 19–29.