

数値天気予報における予測可能性変動メカニズムの解明

課題責任者

榎本 剛 京都大学防災研究所

著者

山崎 哲*¹, 福井 真*², 榎本 剛*^{3,1}

*¹ 海洋研究開発機構付加価値情報創生部門アプリケーションラボ, *² 東北大学大学院理学研究科, *³ 京都大学防災研究所

地球シミュレータ用に最適化された大気大循環モデル AFES を用いて、様々な時間スケールでの数値実験を行った。(1) 1週間の日替わり予報実験、(2) 季節予測実験、(3) 数十年に及ぶ気候予測実験の3つである。(1)と(2)では、AFES-LETKF experimental ensemble reanalysis (ALERA2)アンサンブル解析値を初期値とした様々なメンバー数でのアンサンブル予報を行い、(3)では単一初期値からの20年程度に及ぶ気候再現実験を行った。これらの実験を通じて、AFESを使って、様々な時間スケールを対象とした、様々な水平・鉛直解像度での実験を行うプラットフォームの作成を進めた。さらに、ALERA2とNHM-LETKF領域再解析システムの結合に向けた準備を進めている。

キーワード：アンサンブル予報、AFES、予測可能性実験

1. AFESを使った全球大気予報・再現実験

我々の課題では、地球シミュレータ上で大気大循環モデルAFES [1]やNICAM [2]などの複数の予報モデルと、アンサンブル大気再解析 AFES-LETKF experimental ensemble reanalysis (ALERA2)データ [3],[4]や全球の現業解析、長期再解析データ(例えば[5],[6])などを用いて、初期値を交換した「たすき掛け」予報実験を行っている。たすき掛け実験では、予報モデルと初期値に用いる解析データの組み合わせを交換(たすき掛け)して予報実験を行い、その予報結果を比較することで、予測可能性変動に対するモデルと初期値の相対寄与を見積もる。地球シミュレータでAFESやNICAMをモデルとするたすき掛け実験を行い、京都大学のスーパーコンピュータシステムを用いてECMWFの地球システムモデルIFS [7]や気象庁の全球モデルGSM [8]を用いた実験を進めている。

今年度は、本研究課題のたすき掛け実験にとって重要となる

- 初期値・境界値とモデルの解像度の変更
- 様々な時間スケールを対象とした予報

を行うために、そのプラットフォームの開発やバイアスの性質の理解に注力した。ESを用いて、(1)週間アンサンブル予報実験、(2)1季節(1~3ヶ月)アンサンブル予報実験、(3)複数のパラメータ値を使った気候再現実験を行ったので詳細を以下に示す。

1.1. 週間予報実験

所内課題「アンサンブル同化手法を用いた観測システムの最適化に関する研究」[9]で開発が進められている、ALERA2データセット、あるいはJRA-55 [6]などの他の再解析データを使って過去の特定の時期のアンサンブル予測実験を行っている。日々の予測可能性の変動を明らかにするために、初期値を1日毎に交換する日替わり予測実験での研究を進めている。2010年夏季のブロッキング

予測実験[10]、2015/16年の冬季についての予測実験、2014年2月の関東に大雪をもたらした寒波についての予測実験[11]など、様々な対象について予測可能性を行った。それぞれ、出力結果についてのデータ分析を進めている。

1.2. 季節予報実験

季節予測実験の手法については、[12]に詳しい。さらに現在、1.3節で示されるパラメータの変更などを行って再現性の向上を目指している。

1.3. 気候再現実験

AFESの持つバイアスを低減するために、積雲対流スキームのパラメータ値を様々な値に変化させた予報実験を行った。最近の実験において、モデルトップを約3hPa(48層)から約0.1hPa(56層)に変更すると、熱帯域での対流圏中層の低温バイアスが目立つことがわかった。この傾向はトップが約3hPaの時には見られなかったことから、モデルトップを上げることによって生じたと考えられる。このバイアスは、AFESで再現される気候値だけでなく、より短期の予測や同化システムでのバイアスや根二乗平均誤差の要因となり得ることもわかった。一方で、モデルトップを約0.1hPaまで高めることは、成層圏を解像するために必須で、週間予報を超えるような長期予報を行う上で重要なモデルの開発となる(例えば、[13])。

このバイアスを低減するために、熱帯の気温に感度が高い積雲対流スキームのモデルパラメータを変更する。AFESに組み込まれたEmanuel型の積雲対流スキーム[14],[15],[16]のパラメータスイープ実験を行った。積雲対流スキームでスイープしたパラメータ値は、cloud-base upward mass flux M_b を予報する[15]の(2)式

$$\frac{\partial M_b}{\partial t} = \frac{\alpha}{\Delta t} (T_{\rho p} - T_{\rho} + \Delta T_k)_{LCL} - \frac{D}{\Delta t} M_b$$

中の α (以下、ALPHA)と D (以下、DAMP)で、これらの値の

中で対流圏中層の気温バイアスが最も小さくなるものを探索した。バイアスは、短期予報でも傾向が現れることから、1982年3月1日 OOUTC を初期値として、時間変化する現実的な海面水温値 [17] を与えて1年間の積分を行い、夏(6~8月)と冬(12月~2月)での気温のバイアスを調べた。初期値には JRA-55 を用い、バイアスは JRA-55 からの差で評価を行った。水平解像度は T119 (水平解像度約 100 km) で実験を行ったが、倍にした T239 での実験でもバイアスの特徴は大きく変わらないことがわかった。

図 1a は夏についての、図 1b は冬についての帯状平均気温の緯度高度断面を示している。図から、パラメータを大きくスweepしても、低温バイアスを定性的に除くことはできないことがわかった。また、この事実は夏・冬ともに同様で、冬にバイアスがより大きいことがわかった。さらに、ALPHA や DAMP は大きすぎても小さすぎても熱帯対流圏の低温バイアスが大きくなることがわかった。この図では示していないが、DAMP=0.15 を試すと、低温バイアスがやや高高度にずれるが、バイアスの振幅はあまり変わらなかった。実験の結果、夏・冬ともに ALPHA が 0.3、DAMP が 0.1 の設定でもっともバイアスが目立たなくなることがわかった。

この実験設定を基準として、T119 および T239 での長期積分を行っている。積雲対流パラメータについてこの設定をベースにして、その他のチューニングパラメータも値を同じに固定したマルチ水平解像度の数値実験を AFES で行い、週間予報から気候実験までを様々な水平解像度依存性についての調査を行う準備を整えることができた。最終的には T479 (水平解像度 25 km) までを含む解像度での実験を行う予定である。この実験のアイデアは大気現象の再現性における水平解像度のインパクトを調査するもので、ヨーロッパの大型プロジェクトでも同様なコンセプトでの実験がなされている ([18])。

2. 地球シミュレータへの領域再解析システムの移植にむけて

日本域を 5 km で解像する NHM-LETKF 領域再解析システム [19] を地球シミュレータに移植するための作業を進めている。このシステムは東北大学の大型計算機で運用されており、2020年3月現在で数年にわたる長期の積分に成功している。同システムを移植するために、コードの解読や ES を使ったコンパイルなどの作業を進めている。最終的には ES での NHM-LETKF の実行と、領域再解析システムの境界値を JRA-55 から ALERA2 に置き換える、AFES-NHM-LETKF の親子解析を目指している。

謝辞

AFES のパラメータスweep実験での DAMP や ALPHA についての値の決定には、吉田聡准教授・馬場雄也博士・田口文明准教授の助言を得た。

文献

[1] Enomoto T., A. Kuwano-Yoshida, N. Komori, W. Ohfuchi,

“Description of AFES2: Improvements for high-resolution and coupled simulations,” In *High Resolution Numerical Modelling of the Atmosphere and Ocean*, K. Hamilton and W. Ohfuchi (ed.), chap. 5, pp. 77–97, 2008.

[2] Satoh, M., et al., “The Non-hydrostatic Icosahedral Atmospheric Model: description and development,” *Prog. Earth Planetary Sci.*, 32 pp., December 2014.

[3] Enomoto, T., T. Miyoshi, Q. Moteki, J. Inoue, M. Hattori, A. Kuwano-Yoshida, N. Komori, and S. Yamane, “Observing-system research and ensemble data assimilation at JAMSTEC,” In *Data Assimilation for Atmospheric, Oceanic and Hydrological Applications (Vol. II)*, S. K. Park and L. Xu (ed.), chap. 21, pp. 509–526, Springer, 2013.

[4] Yamazaki, A., T. Enomoto, T. Miyoshi, A. Kuwano-Yoshida, and N. Komori, “Using observations near the poles in the AFES-LETKF data assimilation system,” *SOLA*, 13, 41–46, March 2017.

[5] Dee, D. P., et al., “The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system,” *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 137, 553–597, April 2011.

[6] Kobayashi, S., et al., “The JRA-55 reanalysis: General specifications and basic characteristics,” *J. Meteor. Soc. Japan*, 93, 5–48, March 2015.

[7] ECMWF, “IFS documentation,” <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/documentation-and-support/changes-ecmwf-model/ifs-documentation>.

[8] Japan Meteorological Agency, “JMA’s Global Spectral Model,” <https://www.wis-jma.go.jp/ddb/>.

[9] 小守信正, 佐藤和敏, 猪上淳, 山崎哲, 「アンサンブル同化手法を用いた観測システムの最適化に関する研究」, *Annual Report of the Earth Simulator April 2018–March 2019*, II-11, 5 ページ, 2020年6月。

[10] 山崎哲, ほか, 「台風とブロッキング事例における予測可能性に対するアンサンブルメンバー数増加の影響」, *Annual Report of the Earth Simulator April 2017–March 2018*, 19–24 ページ, 2018年10月。

[11] 山崎哲, 本田明治, 吉田聡, 「北西太平洋ブロッキングと関東・北日本太平洋側の降水」, 気象研究ノート「南岸低気圧による大雪」, 240号, 135–153 ページ, 2019年12月。

[12] 山崎哲, ほか, 「255 アンサンブルメンバーでの大気ブロッキング事例の季節予測実験」, *Annual Report of the Earth Simulator*, I-2, 5 ページ, 2020年6月。

[13] Kuroda, Y., “Role of the stratosphere on the predictability of medium-range weather forecast: A case study of winter 2003–2004,” *Geophys. Res. Lett.*, 35, L19701, October 2008.

[14] Emanuel, K. A., “A scheme for representing cumulus convection in large-scale models,” *J. Atmos. Sci.*, 48, 2313–2335, November 1991.

[15] Emanuel K. A., M. Zivkovic-Rothman, “Development and evaluation of a convection scheme for use in climate models,” *J. Atmos. Sci.*, 56, 1766–1782, June 1999.

- [16] Kuwano-Yoshida, A., T. Enomoto, and W. Ohfuchi, “An improved PDF cloud scheme for climate simulations,” *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 136, 1583–1597, July 2010.
- [17] Reynolds, R. W., Smith, T. M., Liu, C., Chelton, D. B., Casey, K. S., and Schlax, M. G., “Daily high-resolution-blended analyses for sea surface temperature,” *J. Climate*, 20, 5473–5496, November 2007.
- [18] Vannière, B., et al., “Multi-model evaluation of the sensitivity of the global energy budget and hydrological cycle to resolution,” *Climate Dynamics*, 52, 6817–6846, June 2019.
- [19] Fukui, S., et al., “A Feasibility Study on the High-Resolution Regional Reanalysis over Japan Assimilating Only Conventional Observations as an Alternative to the Dynamical Downscaling,” *J. Meteor. Soc. Japan*, 96, 565–585, September 2018.

(a) JJA

$\alpha \rightarrow$

$\downarrow \mathcal{D}$

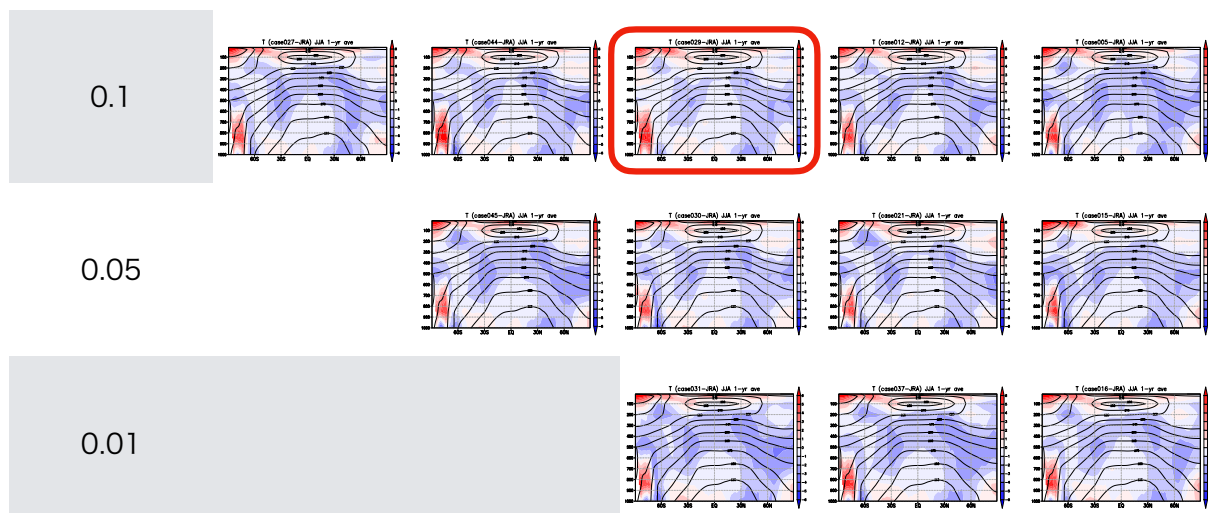
0.5

0.4

0.3

0.2

0.1



(b) DJF

$\alpha \rightarrow$

$\downarrow \mathcal{D}$

0.5

0.4

0.3

0.2

0.1

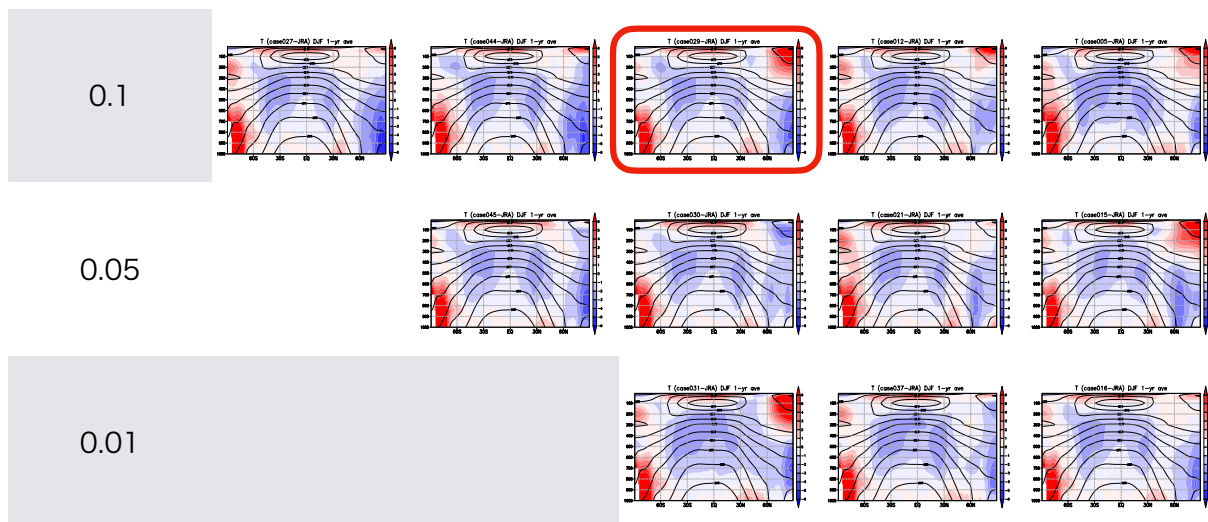


図 1: AFES のパラメータスイープ実験で得られた, JRA-55 に対する(a)夏 (6~8月) と(b)冬 (12月~2月) の気温の気温バイアス (陰影, 青は負値で 1 K 間隔). バイアスは AFES-JRA-55 の値で, コンターは AFES の値を示す. 帯状平均気温の緯度・高度断面を示しており, 各パネルの左から右へ南緯 90 度~北緯 90 度, 下から上へ 1000 hPa~10 hPa を示している. パラメータ値は左列から右列に向かって ALPHA = 0.5~0.1 (0.1 間隔) となっており, 上行から下行に向かって DAMP = 0.1, 0.05, 0.01 となっている. 赤枠は, バイアスが最も小さくなった ALPHA = 0.3, DAMP = 0.1 のパネルを示している.

Predictability Variation in Numerical Weather Prediction

Project Representative

Takeshi Enomoto

Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

Authors

Akira Yamazaki*¹, Shin Fukui*², Takeshi Enomoto*^{3, 1}

*¹ Application Laboratory, Research Institute for Value-Added-Information Generation, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, *² Graduate School of Science, Tohoku University, *³ Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

Using the Atmospheric General Circulation Model (AGCM) for the Earth Simulator (AFES), multiple timescale forecast experiments were conducted: (1) weekly forecast, (2) seasonal forecast, and (3) climate simulation experiments. Through the experiments, we have developed the platforms to perform global forecast experiments with various horizontal/vertical resolutions. We have started to develop the NHM-LETKF regional reanalysis system to nest in ALERA2.

Keywords : ensemble forecast, ensemble analysis, AGCM, predictability, atmospheric blocking

1. Forecast experiments using AFES for multiple timescales

We have conducted weather forecasting experiments using multiple global models and multiple initial atmospheric conditions prepared from operational centers, reanalysis datasets, and our data assimilation system. Each model is run from different initial conditions: we call this approach the “multi-model multi-analysis experiment”. In this project, forecast experiments using two general circulation models, i.e., the Atmospheric General Circulation Model (GCM) for the Earth Simulator (AFES [1]) and Non-hydrostatic Icosahedral Atmospheric Model (NICAM [2]) from an ensemble analysis that is ALERA2 (AFES–LETKF experimental ensemble reanalysis version 2 [3], [4], where the LETKF stands for the local ensemble transform Kalman filter [5]) have been conducted in order to clarify mechanisms of predictability variations in high-impact weather events found in global numerical weather prediction.

This year, using AFES, we have developed model platforms to change model and initial-value resolutions within various ranges, and have conducted forecast experiments within multiple forecast ranges; the experiments of (1) weekly (ensemble) forecasts, (2) seasonal ensemble forecasts, and (3) climate simulations with various tuning parameters.

1.1 Weekly forecast experiments

Weekly forecast experiments were conducted that target the Northern Hemisphere winter of 2015/16, the north Pacific blocking event during February 2014, and the blocking event occurred in summer 2010 over western Russia (Euro-Russian blocking) [9]. For the experiments, initial values of ALERA2 or JRA-55 [6] were used. The forecasts were initialized every day during those periods. Conducting those experiments, we have studied predictability variations of the various weather

events.

1.2 Seasonal forecast experiments

Continuing the last year’s project, we have conducted seasonal ensemble forecast experiments for the case of Euro-Russian blocking initialized at 1 month ahead. Details are in [10]. This year experiments with different tuning parameters were examined to improve the blocking forecast. We are now analyzing data in detail.

1.3 Climate simulations with various model tuning parameters

For the multi-model multi-analysis experiments with various horizontal and vertical resolutions, we have modified the model top from ~3 hPa (totally 48 vertical levels, hereafter the L48 model) to ~0.1 hPa (56 vertical levels, hereafter the L56 model). Through the modification, we found that the cold temperature bias over the tropical troposphere appears in the L56 model. Because the bias did not appear in the L48 model, we attribute the bias to increase the model top. It was found that the cold bias also becomes a main factor of the bias in short-range forecasts and to increase the root mean square errors in the AFES-LETKF data assimilation system.

Therefore, to reduce the bias we tried multiple model tuning parameters of the Emanuel convection schemes [11], [12] implemented in AFES [13]. In the convection schemes, we swept two tuning parameters, α (ALPHA) and \mathcal{D} (DAMP) in the prognostic equation of the cloud-base upward mass flux M_b ,

$$\frac{\partial M_b}{\partial t} = \frac{\alpha}{\Delta t} (T_{pp} - T_\rho + \Delta T_k)_{LCL} - \frac{\mathcal{D}}{\Delta t} M_b,$$

which is Eq. (2) in [12]. We have tried multiple parameter sets for 1-year climate simulations with ALPHA = 0.1–0.5 and DAMP = 0.01–0.15, and have sought a set of these

parameters to reproduce the minimum cold biases during summer and winter. Finally, we selected the set of the parameters ALPHA = 0.3 and DAMP = 0.1. With these parameters, the cold biases during summer and winter were reduced within about 1 K and about 2 K, respectively.

We have started more than 20-yr integrations with the selected parameter set, in which the horizontal resolutions are set to T119 (about 100-km mesh) and T239 (about 50-km mesh). We are also preparing the long-term integrations with the T439 (about 25-km mesh) horizontal resolution. The strategy may be similar with the concept of a European model intercomparison project [14]. Those experiments will enable us to clarify the sensitivity of reproducing/forecasting several weather disturbances to horizontal resolutions.

2. Toward porting the NHM-LETKF Japanese regional reanalysis system to the Earth Simulator

A regional reanalysis system comprised of the Japan Meteorological Agency's nonhydrostatic model (NHM) and the LETKF has been developed in Tohoku University [15]. The system covers Japan and its surrounding area with a 5-km grid spacing, and its boundary condition is based on JRA-55. The system is now operated at the supercomputer of Tohoku University. We are now working to port the reanalysis system to the Earth Simulator. Our purpose is to connect an ensemble global reanalysis system (ALERA2) and the regional reanalysis system in the future.

Acknowledgement

We thank to Drs. Akira Kuwano-Yoshida, Yuya Baba, and Bunmei Taguchi for discussion on AFES tuning parameters.

References

- [1] Enomoto T., A. Kuwano-Yoshida, N. Komori, W. Ohfuchi, "Description of AFES2: Improvements for high-resolution and coupled simulations," *In High Resolution Numerical Modelling of the Atmosphere and Ocean*, K. Hamilton and W. Ohfuchi (ed.), chap. 5, pp. 77–97, 2008.
- [2] Satoh, M., et al., "The Non-hydrostatic Icosahedral Atmospheric Model: description and development," *Prog. Earth Planetary Sci.*, 32 pp., December 2014.
- [3] Enomoto, T., T. Miyoshi, Q. Moteki, J. Inoue, M. Hattori, A. Kuwano-Yoshida, N. Komori, and S. Yamane, "Observing-system research and ensemble data assimilation at JAMSTEC," *In Data Assimilation for Atmospheric, Oceanic and Hydro-logical Applications (Vol. II)*, S. K. Park and L. Xu (ed.), chap. 21, pp. 509–526, Springer, 2013.
- [4] Yamazaki, A., T. Enomoto, T. Miyoshi, A. Kuwano-Yoshida, and N. Komori, "Using observations near the poles in the AFES-LETKF data assimilation system," *SOLA*, 13, 41–46, March 2017.
- [5] Miyoshi, T., and S. Yamane, 2007: Local ensemble transform Kalman filtering with an AGCM at a T159/L48 resolution, *Mon. Wea. Rev.*, 135, 3841–3861, November 2007.
- [6] Kobayashi, S., et al., "The JRA-55 reanalysis: General specifications and basic characteristics," *J. Meteor. Soc. Japan*, 93, 5–48, March 2015.
- [7] ECMWF, "IFS documentation," <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/documentation-and-support/changes-ecmwf-model/ifs-documentation>.
- [8] Japan Meteorological Agency, "JMA's Global Spectral Model," <https://www.wis-jma.go.jp/ddb/>.
- [9] Yamazaki, A., et al., "Predictability Studies for a Typhoon and Atmospheric Blocking: Effects of Increasing Ensemble Members in Initial Values," *Annual Report of the Earth Simulator April 2017–March 2018*, 19–24, October 2018.
- [10] Yamazaki, A., et al., "Seasonal Forecast Experiments with 255 Ensemble Members for a Case of Euro-Russian Blocking in Summer 2010," *Annual Report of the Earth Simulator*, I-2, 5 pp., June 2020.
- [11] Emanuel, KA, "A scheme for representing cumulus convection in large-scale models," *J. Atmos. Sci.*, 48, 2313–2335, November 1991.
- [12] Emanuel KA, M. Zivkovic-Rothman, "Development and evaluation of a convection scheme for use in climate models," *J. Atmos. Sci.*, 56, 1766–1782, June 1999.
- [13] Kuwano-Yoshida, A., T. Enomoto, and W. Ohfuchi, "An improved PDF cloud scheme for climate simulations," *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 136, 1583–1597, July 2010.
- [14] Vannière, B., et al., "Multi-model evaluation of the sensitivity of the global energy budget and hydrological cycle to resolution," *Climate Dynamics*, 52, 6817–6846, June 2019.
- [15] Fukui, S., et al., "A Feasibility Study on the High-Resolution Regional Reanalysis over Japan Assimilating Only Conventional Observations as an Alternative to the Dynamical Downscaling," *J. Meteor. Soc. Japan*, 96, 565–585, September 2018.