

# 日本域における気候変動の実態把握に向けた領域再解析実験

課題責任者

福井 真 東北大学大学院理学研究科

著者

福井 真\*<sup>1</sup>, 曾我大輝\*<sup>1</sup>, 小原涼太\*<sup>1</sup>, 臼井健\*<sup>1</sup>, 瀧口海人\*<sup>1</sup>, 小野佳祐\*<sup>1</sup>, 廣瀬大河\*<sup>1</sup>, 松島沙苗\*<sup>1</sup>, 白川栄一\*<sup>1</sup>, 伊藤純至\*<sup>1</sup>, 岩崎俊樹\*<sup>1</sup>, 山崎剛\*<sup>1</sup>, 斉藤和雄\*<sup>2,3,4</sup>, 瀬古弘\*<sup>3</sup>

\*<sup>1</sup> 東北大学大学院理学研究科, \*<sup>2</sup> 気象業務支援センター, \*<sup>3</sup> 気象庁気象研究所, \*<sup>4</sup> 東京大学大気海洋研究所

日本域におけるこれまでの気候変動の実態把握を可能とするような気象データセット作成を目指し、日本域を対象とした水平格子間隔 5km の領域大気再解析実験を行い、1980 年代と 2010 年代の 7 月の再解析結果を比較した。品質管理で除外されずに実際に同化された観測数や気象庁 55 年長期再解析(JRA-55)に対する海面更正気圧の違いは 1980 年代も 2010 年代と同程度で推移しており、本領域再解析の長期間にわたる一貫性を示唆する結果が得られた。また、7 月の月積算降水量の 1980 年代から 2010 年代の分布の変化についても、観測と整合的な結果であることが確認できた。これらの結果は、本領域再解析が日本域におけるこれまでの気候変動の把握に有効である可能性を支持する。今後は、長期変化を調査することが可能な期間の領域再解析が揃い始めたので、様々な要素について長期変動の再現性を検証する必要がある。また、観測とは異なり領域再解析では格子点データとして物理的に整合した種々の量が得られることを活かし、再現された変動の要因について調査することも今後の課題である。

キーワード：領域再解析, 地域気候, 気候変動

## 1. はじめに

我々は、日本域を対象とした気象場を、長期間にわたり一貫した品質を持ちながら高解像度、且つ精度良く再現する長期領域再解析に取り組んでいる。本長期領域再解析を通じて、日本域における地域気候やその変動の実態把握、さらに、過去のメソスケール極端気象の分析、防災や農業、エネルギー、水資源管理などでの気象/気候情報の高度利用に向けた基礎資料の提供、数値気象予報/気候予測システムの改良に資する知見の獲得などを旨とする。

地上観測に加えラジゾンデ高層観測網が全球的に整備されてから 60 年以上が経過した。その間に、数値気象予報モデルやデータ同化手法が、計算機資源の発展を背景に着実に高度化してきた[1]。こうした背景の下で、蓄積された観測と高度化された数値予報技術を組み合わせ、観測では分布や測定する変数に偏りがあるため把握するのが難しい全球の大気の状態を、長期にわたって尤もらしい推定を行う全球長期再解析が、世界の主要気象機関によって実施されるようになった。こうした全球再解析は、更新される度に解像度が高くなってきてはいるが、ERA5[2]をはじめとした最新ののものであっても、水平解像度が 30-40km 格子相当である。そのため、複雑な地形の影響やメソスケールの気象現象を十分解像できない。こうした全球再解析の限界に対応するために、これまで高解像度の領域気候モデルを用いた力学的ダウンスケールが広く実施されてきた。しかし、力学的ダウンスケールにおいて、積分時間が短い場合は、降水が過小評価されるなどスピンアップの問題が生じてしまう。また、積分時間が長い場合は、スピンアップの問題は回避できるが、モデル内部の場が境界値として与えた場から総観スケールで見ても乖離してしまう問題が生じてしまう。そこで、スピンアップの問題を回避しつつモデル内部と境界値の乖離を

抑えるために、モデルによる時間積分だけではなく領域内部の観測の同化も行う領域再解析を行う。

ここで、どのような観測を同化すべきかが問題となる。解析期間を通して固定した設定の数値モデルとデータ同化手法を用いても、同化する観測が変化すれば、その影響で再解析の品質が大きく変わってしまうことがある。衛星や地上レーダなどリモートセンシングによる観測の出現など地球大気の観測システムは時代と共に大きく変遷している。それらを全て同化すれば、再解析における個々の大気場の再現性は向上しても、気候変動シグナルが同化する観測の変遷の影響に埋もれてしまう恐れがある。そのため、気候変動や長期変動などを対象とした再解析では、数値モデルやデータ同化手法に加え同化する観測も一貫させることが重要である[3]。

そこで、我々は日本域を対象とした水平格子間隔 5km の従来型観測を同化する長期領域再解析のためのシステムを構築し、領域モデルのみによる力学的ダウンスケールや全球再解析に対する有効性を示してきた[4]。最近の計算機の性能の向上によって、これまで困難であった地域の気候変動を調査するために必要な長期間（数十年以上）の領域再解析を実行可能な環境が整ってきている。本報告では、構築してきた長期領域再解析システムを概観し、1980 年代と 2010 年代の 7 月の再解析の結果の比較を通じて本領域再解析の品質の長期一貫性について調査した初期的結果を報告する。

## 2. 領域再解析システム

本領域再解析システムは、全球再解析の一つである気象庁 55 年長期再解析(JRA-55)[5]を境界値に与えながら気象庁非静力学モデル(NHM)[6]によって時間積分を行い、局所アンサンブル変換カルマンフィルタ(LETKF) [7]によ

って観測データを同化する解析予報サイクルを実行する。水平格子間隔は、このNHM-LETKFを一方方向ネストさせ、25kmで東アジア域を、5kmで日本域を覆うように設定した(図1)。同化する観測は、長期間入手可能な観測(地上気圧観測、及びラジオゾンデ高層観測に加え、海上での気象庁ベストトラックの台風中心位置)に限定し、衛星や地上レーダなどの近年になって整備された観測は除外した。一方、実際の外力の変化は、可能な限り反映させた。土地利用の変化は、気象庁のJRA-55領域ダウンスケーリング[8]に倣い、国土地理院の土地利用細分メッシュデータを時代に応じて与えた。また、温室効果ガスについてもJRA-55と同様に変化させた。

本システムにおいて、NHMによる時間発展の計算では1本の標準ランと30本の摂動ランを実行し、LETKFによる解析では標準ランの結果を第一推定値として用いてその誤差共分散を摂動ランから評価するようにした。一般にLETKFにおける第一推定値として摂動ランのアンサンブル平均を用いるが、本システムでは解析場が現実の変動に対して平滑化される(例えば、)のを回避するためである。実行は、6時間を1サイクルとして、開始時刻を25km格子のNHM-LETKFは6月20日12UTC、5km格子のNHM-LETKFは6月29日12UTCからとした。6月中はスピンアップ期間とみなし、7月の再解析結果を用いて評価した。

### 3. 結果

まず、実際に同化された観測数について1980年代と2010年代の再解析で比較した。同化された観測の数は、観測システムが大きく変わったり、観測値の信頼性が変わり品質管理において除外される確率が変化したりすれば影響を受ける。そのため、再解析の品質の長期的な一貫性のためには、同化された観測数も長期間安定していることが望ましい。本実験において、実際に同化された観測数は、1980年代の7月は平均2158に対して2010年代の7月は平均1915となった。1980年代も2010年代も高層観測が12時間おきに行われたため00, 12 UTCと06, 18UTCでは同化される数が大きく異なるが、長期的には概ね同程度の数の観測が安定的に同化されていたことが確認できた。

次に、再解析の再現性に関する一貫性を測るため、海面更正気圧に着目する。図2は、海面更正気圧の領域再解析のJRA-55に対する根平均二乗差(RMSD)について、1980年代および2010年代の各年の7月の平均と標準偏差の推移を示したものである。2010年代はRMSDが平均で0.63 hPaであったのに対して、1980年代は0.67 hPaとなった。また、RMSDの標準偏差も2010年代が0.12 hPaに対して、1980年代は0.13 Paと同程度となった。再現性も長期間の一貫性を示唆する結果となった。

図3は、1980年代の7月の積算降水量に対する2010年代の7月の積算降水量の比を示す。気象庁の地上気象観測所における観測では、2010年代は1980年代に対して、北海道西部および南西諸島で顕著に増加しており、九州

南部、淡路島周辺、伊豆諸島でも増えていた。一方、九州北部から山陰及び北陸地方にかけて降水量が減少となる地点が多くなっていった。領域再解析においても、この観測に見られる1980年代と2010年代の降水量の分布の違いを概ね再現できていた。

### 4. まとめ

日本域におけるこれまでの気候変動の実態把握を可能とするような気象データセット作成を目指し、日本域を対象とした水平格子間隔5kmの領域大気再解析実験を行い、1980年代と2010年代の7月の再解析結果を比較した。同化された観測数や海面更正気圧のJRA-55との差は、1980年代も2010年代も同程度で推移しており、領域再解析の長期間にわたる一貫性について確認できた。また、7月の月積算降水量について1980年代から2010年代の分布の変化も概ね再現できていた。長期変化を調査することが可能な期間の領域再解析が揃い始めたので、更に様々な要素について長期変化の再現性の検証を進める必要がある。また、観測とは異なり領域再解析において格子点データとして物理的に整合的な種々の量が得られることを活かし、変動をもたらした要因について調査することも今後の課題である。

### 謝辞

本研究は、海洋研究開発機構の地球シミュレータ及び東北大学サイバーサイエンスセンターのスーパーコンピュータを利用することで実現することができた。本研究は、東北大学と気象庁気象研究所の共同研究の一環として行った。また、東北大学(指定国立大学)における災害科学世界トップレベル研究拠点の支援を受けた。

### 文献

- [1] Bauer, P., A. Thorpe, and G. Brunet, "The quiet revolution of numerical weather prediction," *Nature*, 525, 47–55, 2015.
- [2] Hersbach, H., B. Bell, P. Berrisford, S. Hirahara, A. Horányi, J. Muñoz-Sabater, J. Nicolas, C. Peubey, R. Radu, D. Schepers, A. Simmons, C. Soci, S. Abdalla, X. Abellan, G. Balsamo, P. Bechtold, G. Biavati, J. Bidlot, M. Bonavita, G. De Chiara, P. Dahlgren, D. Dee, M. Diamantakis, R. Dragani, J. Flemming, R. Forbes, M. Fuentes, A. Geer, L. Haimberger, S. Healy, R. J. Hogan, E. Hólm, M. Janisková, S. Keeley, P. Laloyaux, P. Lopez, C. Lupu, G. Radnoti, P. de Rosnay, I. Rozum, F. Vamborg, S. Villaume, and J.-N. Thépaut, "The ERA5 global reanalysis," *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 146, 1999–2049, 2020.
- [3] Kobayashi, C., H. Endo, Y. Ota, S. Kobayashi, H. Onoda, Y. Harada, K. Onogi, and H. Kamahori, "Preliminary results of the JRA-55C, an atmospheric reanalysis assimilating conventional observations only," *SOLA*, 10, 78-82, 2014.
- [4] Fukui, S., T. Iwasaki, K. Saito, H. Seko, and M. Kunii, "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, 2018.

[5] Kobayashi, S., Y. Ota, Y. Harada, A. Ebata, M. Moriya, H. Onoda, K. Onogi, H. Kamahori, C. Kobayashi, H. Endo, K. Miyaoka, and K. Takahashi, “The JRA-55 Reanalysis: General specifications and basic characteristics,” J. Meteor. Soc. Japan, 93, 5–48, 2015.

[6] Saito, K., J. Ishida, K. Aranami, T. Hara, T. Segawa, M. Narita, and Y. Honda, “Nonhydrostatic atmospheric models and operational development at JMA,” J. Meteor. Soc. Japan, 85B, 271–304, 2007.

[7] Hunt, B. R., E. J. Kostelich, and I. Szunyogh, “Efficient data assimilation for spatiotemporal chaos: A local ensemble transform Kalman filter,” Physica D, 230, 112–126, 2007.

[8] Kayaba, N, T. Yamada, S. Hayashi, K. Onogi, S. Kobayashi, K. Yoshimoto, K. Kamiguchi, K. Yamashita, “Dynamical regional downscaling using the JRA-55 reanalysis (DSJRA-55),” SOLA, 12, 1–5, 2016.

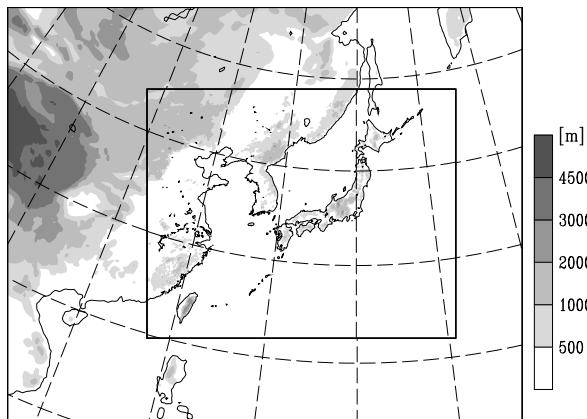


図1 領域再解析の対象領域。図示した全領域が格子間隔25kmのNHM-LETKF、内枠の内側領域が格子間隔5kmのNHM-LETKF。

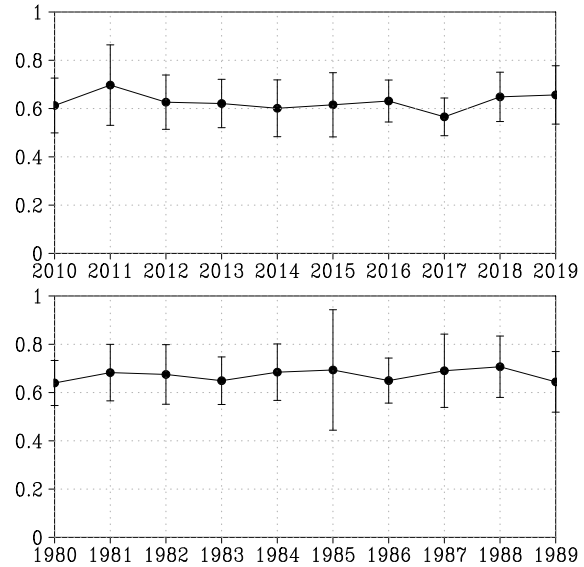


図2 領域再解析とJRA-55の海面更正気圧の根平均二乗差(RMSD)の7月における平均(線)と標準偏差(エラーバー)推移。下図が1980年代、上図が2010年代。

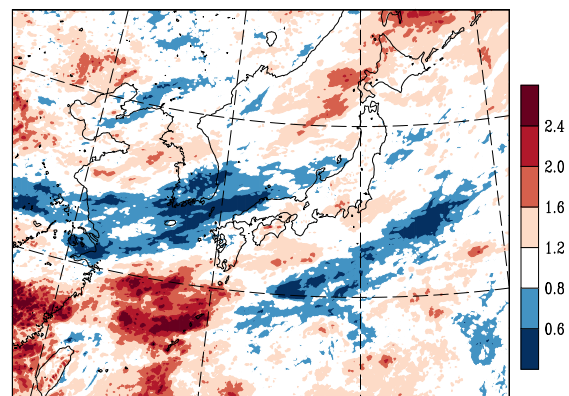
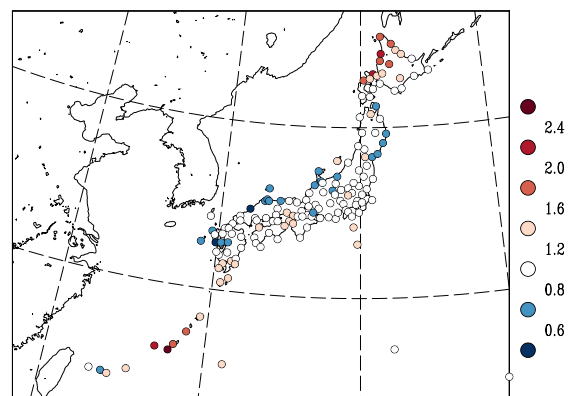


図3 7月における2010年代の月積算降水量の1980年代の月積算降水量に対する比。上図が気象庁の地上気象観測所での観測、下図が領域再解析。

# A Regional Reanalysis Experiment towards Evaluating Climate Change in Japan

## Project Representative

Shin Fukui      Graduate School of Science, Tohoku University

## Authors

Shin Fukui<sup>\*1</sup>, Daiki Soga<sup>\*1</sup>, Ryota Ohara<sup>\*1</sup>, Ken Usui<sup>\*1</sup>, Kaito Takiguchi<sup>\*1</sup>, Keisuke Ono<sup>\*1</sup>, Taiga Hirose<sup>\*1</sup>, Sanae Matsushima<sup>\*1</sup>, Eiichi Shirakawa<sup>\*1</sup>, Junshi Ito<sup>\*1</sup>, Toshiki Iwasaki<sup>\*1</sup>, Takeshi Yamazaki<sup>\*1</sup>, Kazuo Saito<sup>\*2,3,4</sup>, Hiromu Seko<sup>\*3</sup>

<sup>\*1</sup> Graduate School of Science, Tohoku University, <sup>\*2</sup> Japan Meteorological Support Center, <sup>\*3</sup> Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency, <sup>\*4</sup> Atmosphere and Ocean Research Institute, the University of Tokyo

We conducted a 5-km grid regional reanalysis (RRA) for Japan to evaluate the past climate variations. Comparisons of the reanalysis results for July in 1980s and 2010s suggest that the RRA has long-term consistency necessary to evaluate the regional climate change. The numbers of the assimilated observations and the differences of the mean sea level pressure fields between the RRA and JRA-55 are stable from the viewpoint of long term. The RRA is also confirmed to reproduce the observed distribution of the ratio of July accumulated precipitation in 2010s to that in 1980s. Further evaluations of the reanalysis are needed to confirm its long-term consistency and reproducibility of long-term variabilities. It is also a future work to reveal the causes of the long-term variations in the reanalysis, utilizing the reanalysis that provides various atmospheric variables at a uniform grid unlike observations.

**Keywords :** regional reanalysis, regional climate, climate change

## 1. Introduction

We are conducting a high-resolution long-term regional reanalysis (RRA) that is consistent throughout its reanalysis period and has high-reproducibility. The RRA is expected to contribute to evaluating climate change in Japan, investigating past extreme mesoscale events, developing applications of weather and climate information, and improving numerical systems for weather prediction and climate projection.

More than 60 years have passed since the aerological observation network started to cover the globe in addition to surface in-situ observation network. Meanwhile, numerical weather prediction models and data assimilation techniques are steadily developed supported by computational advances [1]. Major weather prediction centers have started to conduct global reanalyses, making use of the stored observations and the advanced numerical weather prediction systems. However, even the resolutions of the latest global reanalyses, which are equivalent to grid spacing of 30-40 km at least, are insufficient to resolve effects of complex terrains and mesoscale meteorological phenomena. To overcome the resolution problem, the dynamical downscaling is widely applied, but still has some problems. Whilst short-term time integrations induce spin-up issue, long-term time integrations often make the internal fields depart from the boundary conditions even in synoptic scale. To obtain the high-resolution fields without departing from the actual, the RRA, using a high-resolution regional model with assimilating observations, is needed.

What observations should be assimilated is important in reanalysis. Available observations have dramatically increased during the recent 60 years, which is primarily attributed to the

advent and development of remote sensing observations, such as satellites and surface radars. Even when you use a fixed set of numerical model and data assimilation scheme, assimilating all available observations can change the reanalysis quality. Actual climate change signals are lost in the record of observing system update. Therefore, it is important to limit to observations with systems operated throughout the reanalysis period in addition to using numerical model and data assimilation scheme [3].

We have developed a 5-km long-term RRA system for Japan assimilating the conventional observations only and studied its feasibility [4]. Recent upgrade of computational resources enables us to conduct the long-term RRA in reasonable time. In this report, we describe the overview of the RRA system and compare the reanalysis results in July 1980s and 2010s in terms of the long-term consistency.

## 2. The regional reanalysis system

The RRA system used in this study is composed of time-integration with the Nonhydrostatic Model (NHM) [5], developed by Japan Meteorological Agency (JMA), forced with the Japanese 55-year Reanalysis (JRA-55) [6] and analysis with a local ensemble transform Kalman filter (LETKF) [7]. The NHM-LETKF system covers Far East with a 25 km grid spacing and Japan with a 5 km grid spacing, applying the one-way nesting approach. The assimilated data are limited to in-situ surface pressure observations, radiosonde upper observations and tropical cyclone center positions over sea from JMA's best track data. The land-use change over Japan is given from the National Land Numerical Information data of the Geospatial Information Authority of Japan as in JMA's dynamical

downscaling of JRA-55 [8]. The concentrations of greenhouse gases vary with time as in JRA-55. In this NHM-LETKF system, one NHM run initialized at analysis center is used to obtain a first guess and 30 perturbed NHM runs are used to estimate background error covariances. The modification from the original LETKF algorithm, in which the first guess is given from ensemble mean of the perturbed runs [7], avoids excessively smooth analysis fields.

In the execution, the RRA was split into streams. In each stream, 25- and 5-km grid NHM-LETKFs were initialized at 12 UTC 20 June and 12 UTC 29 June in each year, respectively, and the results until the end of June, assumed as spin-up period, are excluded for our analysis.

### 3. Results

We compared the numbers of assimilated observations for RRA in 1980s and 2010s. In both periods, since most of the upper observations are assimilated every 12 hours due to the observation interval, the numbers at 00 and 12 UTC are largely different from those at 06 and 18 UTC. However, the numbers of assimilated observations averaged over July in 1980s and 2010s were almost equivalent (2158 and 1915, respectively) and their variances were also similar. The RRA is confirmed to assimilate stable number of observations from the viewpoint of long term.

We also compared the reanalysis results in 1980s and 2010s to check the consistency in reproducibility of the synoptic-scale fields. Fig. 1 shows the time series of root mean square differences (RMSDs) between the mean sea level pressure fields of the RRA and JRA-55. The averaged RMSDs and standard deviations were 0.67 and 0.13 hPa in 1980s and 0.63 and 0.12 hPa in 2010s. The result suggests that the RRA has long-term consistency throughout the period in terms of the reproducibility.

Fig. 2 shows the ratio of July precipitation in 1980s to that in 2010s. The RRA reproduced the observed distribution of the precipitation change, specifically increase around Nansei Islands and western Hokkaido and decrease along the Japan sea side of western Japan.

### 4. Summary

We conducted a RRA covering Japan with a 5 km grid spacing to evaluate the past climate variations and compared the reanalysis results for July in 1980s and 2010s. The comparisons suggest that the RRA has long-term consistency that is favorable for evaluating the regional climate change. The numbers of the assimilated observations, not excluded in quality control processes, and the differences between the RRA and JRA-55 are stable from the viewpoint of long term. The RRA is also confirmed to reproduce the observed spatial distribution of the ratio of July accumulated precipitation in 2010s to that in 1980s.

Further evaluations of the reanalysis are necessary in terms of long-term consistency and reproducibility of long-term variabilities. It is also a future work to reveal the causes of the

long-term variations in the reanalysis, utilizing the reanalysis that provides various variables at a uniform grid unlike observations.

### Acknowledgement

The experimental results were obtained using Earth Simulator (ES4) in Japan Agency for Marine Earth Science and Technology and the supercomputing resources at Cyberscience Center, Tohoku University. This study was done as a part of joint research project between Tohoku University and Meteorological Research Institute, and was supported by activity of the Core Research Cluster of Disaster Science in Tohoku University (a Designated National University).

### References

- [1] Bauer, P., et al., "The quiet revolution of numerical weather prediction," *Nature*, 525, 47–55, 2015.
- [2] Hersbach, H., et al., "The ERA5 global reanalysis," *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 146, 1999–2049, 2020.
- [3] Kobayashi, C., et al., "Preliminary results of the JRA-55C, an atmospheric reanalysis assimilating conventional observations only," *SOLA*, 10, 78–82, 2014.
- [4] 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, 2018.
- [5] Saito, K., et al., "Nonhydrostatic atmospheric models and operational development at JMA," *J. Meteor. Soc. Japan*, 85B, 271–304, 2007.
- [6] Kobayashi, S., et al., "The JRA-55 Reanalysis: General specifications and basic characteristics," *J. Meteor. Soc. Japan*, 93, 5–48, 2015.
- [7] Hunt, B. R., et al., "Efficient data assimilation for spatiotemporal chaos: A local ensemble transform Kalman filter," *Physica D*, 230, 112–126, 2007.
- [8] Kayaba, N, et al., "Dynamical regional downscaling using the JRA-55 reanalysis (DSJRA-55)," *SOLA*, 12, 1–5, 2016.

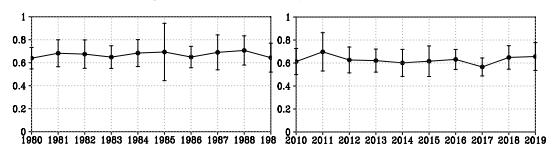


Fig. 1 RMSDs between the mean sea level pressure fields of the regional reanalysis and JRA-55. The lines show averaged RMSDs in July in each year and the error bars are their standard deviations. The left and right are for 1980s and 2010s.

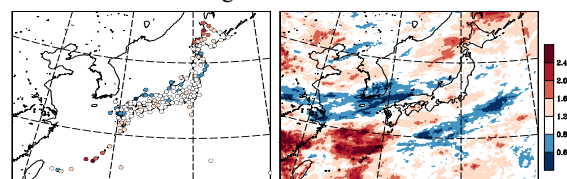


Fig. 2 The ratio of July precipitation in 1980s to that in 2010s. The left is from JMA's surface in-situ observations and the right is from the regional reanalysis.