

全球非静力学モデルを用いた高解像度計算による気象擾乱の発生・発達メカニズムとその予測可能性に関する研究

課題責任者

那須野 智江 海洋研究開発機構 地球環境部門 環境変動予測研究センター

那須野 智江^{*1}、山田 洋平^{*1}、野田 暁^{*1}、中野 満寿男^{*1}、小玉 知央^{*1}、清木 達也^{*1}、大野 知紀^{*1}、渡辺 真吾^{*1}、佐藤 正樹^{*1,4}、三浦 裕亮^{*1,5}、谷口 博^{*1,6}、藤田 実季子^{*2}、服部 美紀^{*3}、宮川 知己^{*4}、Roh Woosub^{*4}、澁谷 亮輔^{*4}、末松 環^{*4}、久保川 陽呂鎮^{*4}、Ying-Wen Chen^{*4}、八代 尚^{*7}、池田 美紀子^{*8}、山浦 剛^{*9}、原 政之^{*10}、福富 慶樹^{*11}、安永 数明^{*12}、菊地 一佳^{*13}、江口 菜緒^{*14}

^{*1}海洋研究開発機構 地球環境部門 環境変動予測研究センター、^{*2}海洋研究開発機構 地球環境部門 大気海洋相互作用研究プログラム、^{*3} 海洋研究開発機構 地球環境部門 海洋観測研究センター、^{*4}東京大学 大気海洋研究所、^{*5}東京大学 大学院理学系研究科、^{*6}神戸市立工業高等専門学校、^{*7}国立環境研究所 地球環境研究センター、^{*8}文部科学省、^{*9}理化学研究所 計算科学研究センター、^{*10}埼玉県環境科学国際センター、^{*11}名古屋大学 宇宙地球環境研究所、^{*12}富山大学 大学院理工学研究部、^{*13}国際太平洋研究センター、^{*14}九州大学 応用力学研究所

本課題の目的は、JAMSTECにおける集中観測を主な対象として、全球非静力学モデル NICAM を用いた高解像度数値実験を行うことにより、アジア域に災害をもたらす日内から季節程度の気象擾乱（台風、熱帯波動、季節内振動・マッデン・ジュリアン振動、モンスーンなど）のメカニズムや相互関係を明らかにし、予測改善への指針を得ることである。2019年度は、季節内振動の予測が難しい海大陸域（インドネシア周辺域）に注目し、集中観測 YMC-Sumatra 2017 期間を対象とする全球 7 km 格子予測計算データを用いた解析を行った。全球モデルの利点や高解像度化の必要性を理解するため、英国気象局の領域モデルによる予測計算データとも比較した。解析の結果、全球モデルでは季節内振動に伴う大規模な対流域の伝播や海大陸域での活発・不活発期の再現性に利点があり、高解像度領域モデル（4.4 km 格子）では、海大陸域の陸上での降水日周期の位相などが観測とほぼ一致すること、同時に陸上（海上）で降水過多（過少）となる傾向があることが分かった。後者は、過去の研究とも整合的である。2つの予測計算結果の違いには、物理過程のモデリングや地形の表現の違いも関係する。NICAMにおいて雲微物理過程や地形の解像度を変えた感度実験も行い、海大陸域の陸上降水の日周期変動が、雲微物理過程の設定に感度をもつことを確認した。

キーワード： 全球非静力学モデル、海大陸研究強化年（YMC）、季節内振動、日周期変動、モデル比較

1. はじめに

本課題では、アジア域に災害をもたらす日内から季節程度の気象擾乱・変動現象について、全球非静力学大気モデル Nonhydrostatic Icosahedral Atmospheric Model (NICAM; Satoh et al. 2014[1]; JAMSTEC および連携研究機関において共同開発) を用いた数値計算を行うことにより、発生・発達のメカニズムおよび現象間の相互関係を明らかにすることを目的とする。NICAM の特色は、雲・降水に関する物理プロセスを詳細に計算する点である。NICAM は、地球シミュレータ等の先端的な計算機において運用され、全球規模の雲・降水に関する多くの研究に用いられている (Satoh et al. 2014[1]参照)。

本課題のもう 1 つの特色は、JAMSTEC が主導する集中観測期間に発生した事例や直近の顕著事例を主な対象とする点である。2019 年度には、国際プロジェクト「海大陸研究強化年」(Years of the Maritime Continent, YMC, <http://www.jamstec.go.jp/ymc>; Yoneyama and Zhang 2020[2]) の一環として JAMSTEC が主導した集中観測 YMC-Sumatra2017 に同期して行った予測計算データ (Nasuno

et al. 2018[3]) を用いた海大陸域（インドネシア周辺域）を対象とする解析を行った。

海大陸域では、複雑な海陸分布や急峻な地形に起因する、局所的なメカニズムが卓越し、これによる対流活動の日周期変動が顕著に見られる (Mori et al. 2004[4]; Yokoi et al. 2019[5])。特に陸上の活発な対流活動は、季節内振動の伝播を阻害することが分かっており、季節内振動の予測において、それらの相互関係を理解し正しく再現することが重要である。

そこで、季節内振動と海大陸域での対流活動の日周期変動について、予測計算における再現性を調べた。NICAM の特徴である、局所的な雲・降水過程と大規模な場の相互作用を統一的に扱う全球モデルの利点や、高解像度化の必要性を明らかにするため、英国気象局の領域モデル (UM) による予測計算データとの比較も行った。

2. 実験設定・データ

計算の対象期間は、YMC-Sumatra 2017 の実施された 2017 年 11 月 15 日 - 2018 年 1 月 15 日である。NICAM の計

算では、全球で7 km 格子を用い、初期値はNCEP final analysis から内挿し、1日1回の14日積分を行った(実験設定の詳細はNasuno 2019[6]参照)。UMの計算では、海大陸周辺域(91-153E, 17S-29N)において4.4 km 格子を用い、初期値・境界値を英国気象局の現業解析値・予報値(10 km 格子)から内挿して与え、5日間の積分を行った(実験設定はShort and Petch 2018[7]とほぼ同様)。2つのモデルは主な物理過程を共有しておらず、特に雲・降水過程については、NICAMでは雲微物理スキームを用いて陽に計算し、積雲パラメタリゼーション(格子スケール以下の対流の効果を表現)を用いないが、UMでは浅い雲のパラメタリゼーションを併用している。また、NICAMの計算では、季節内振動の予測に適した雲微物理モデルの設定(Miyakawa et al. 2014[8], Miura et al. 2015[9]と同様)を用いたが、気候計算に適した最新の設定(Kodama et al. 2020[10])を用いた感度実験も実施した。モデルにおける季節内スケールの変動の再現性を調べるため、7(5)日目までのデータについて、(計算初期日の異なる)同一予測時刻の出力を合成して時系列データを作成した(Nasuno et al. 2017[11])。降水の再現性評価の参照データとして、衛星による降水観測プロダクト(Global Satellite Mapping of Precipitation, GSMaP)を用いた。

3. 結果と議論

対象期間全体の赤道域の対流活動について、降水の経度-時間断面を図1に示す。季節内振動事例に対応する、大規模な降水域のインド洋(80E付近)から西太平洋への東進が11月後半と1月上旬に見られる(図1a)。NICAMの計算では、同様の大規模な変動が確認される(図1b)。その一部を対象領域とするUMの計算では、比較的短い時間スケールの変動はよく再現されているものの、季節内振動の活発・不活発期の差異が不明瞭で、特定の地域(例えば105-120E, 145-155E)で降水が不自然に持続する傾向が見られる(図1c)。このことから、領域モデルでは、大規模場の変動を外境界から与えていても、内部の対流の変動スケールが対象領域の範囲に制約されがちであることが分かる。

11月後半の季節内振動事例に対応する期間の、海大陸域における降水分布を図2に示す。季節内振動に伴う降水の活発化が120E以西、特にスマトラ島沖やジャワ島周辺海域で顕著にみられる(図2a)。NICAMの計算では、季節内振動に伴う降水の東西コントラストがよく捉えられている(図2b)。一方で、陸上(島嶼)の降水に過少傾向がある。逆にUMの計算では、計算領域の境界付近に強い降水が形成されるほか、陸上の降水に過剰傾向があり、これらにより季節内振動に対応する東西コントラストが減じている(図2c)。

降水の日周期変動の指標として、降水の日較差と日内ピーク時刻について比較した(図3)。NICAMの計算では、特に陸上で日内変動の振幅が小さく、ピーク時刻が観測より遅い傾向が見られる(図3b)。UMの計算では、陸上(海上)の降水の日内変動に過剰(過少)傾向があり、降

水ピーク時刻は観測とよく一致する(図3c)。これらのことから、陸上降水の誤差傾向(NICAMにおける過少傾向やUMにおける過剰傾向)は、日周期変動の表現に深く関わるものと解釈される。

海大陸域の降水の日周期変動について、これまで多くの研究により、モデルの解像度や地形の解像度、物理過程(雲・降水過程、陸面過程、乱流過程等)を適切に設定することの重要性が指摘されている(Argüeso et al. 2020[12])。理解を深めるステップとして、NICAMの計算において、雲微物理過程の設定を変更した計算を行った(図2d)。気候計算用の設定を用いた結果では、季節内振動予測用の設定を用いた場合に比べ、陸上の降水が強化されるとともに、東西のコントラストがやや弱まる傾向が見られる。更に、地形の解像度を上げた感度実験も行い(図1e)、雲微物理過程によるインパクトがより大きいことを確認した。

4. まとめと今後の課題

季節内振動の予測が難しい海大陸域に注目し、集中観測YMC-Sumatra 2017期間を対象とする全球7 km 格子予測計算データを用いた解析を行った。全球モデルの利点や高解像度化の必要性を理解するため、英国気象局の領域モデルによる予測計算データとも比較した。全球モデルでは季節内振動に伴う惑星規模の対流域の伝播や海大陸域での活発・不活発期の再現性に利点があり、高解像度領域モデル(4.4 km 格子)では、海大陸域の陸上での降水日周期の位相などが観測とほぼ一致すること、同時に陸上(海上)で降水過多(過少)となる傾向があることが分かった。後者は、過去の研究とも整合的である(Argüeso et al. 2020[12])。

2つの予測計算結果の違いには、物理過程のモデリングや地形の表現の違いも関係する。海大陸域の降水の日周期変動やその季節内振動との関係を理解し、正しく予測するためには、関連する多くの物理過程のインパクトを丁寧に調べ、1つ1つ改善していく必要がある。将来的には、モデル間での物理過程モデルの交換等も有用であろう。ここでは、まずNICAMにおいて雲微物理過程や地形の解像度を変えた実験を行ってインパクトを調べ、海大陸域の陸上降水の日周期変動が、雲微物理過程の設定に感度をもつことを確認した。さらに、雲微物理過程の設定の違いがどのような大気場の変化を通して陸上降水の違いをもたらしたのか、調査を継続している。今後のモデル開発の方向性として、季節内程度の予測計算と、気候計算(数十年スケール)の両方における雲降水現象の再現性の向上を追求していく必要があるだろう。

謝辞

本研究は、地球シミュレータ所内課題として採択され、地球シミュレータを用いて実施された。UMの計算結果は、Christopher Short氏(UK Met Office)から提供頂いた。GSMaPは宇宙航空研究開発機構(JAXA)から提供された。

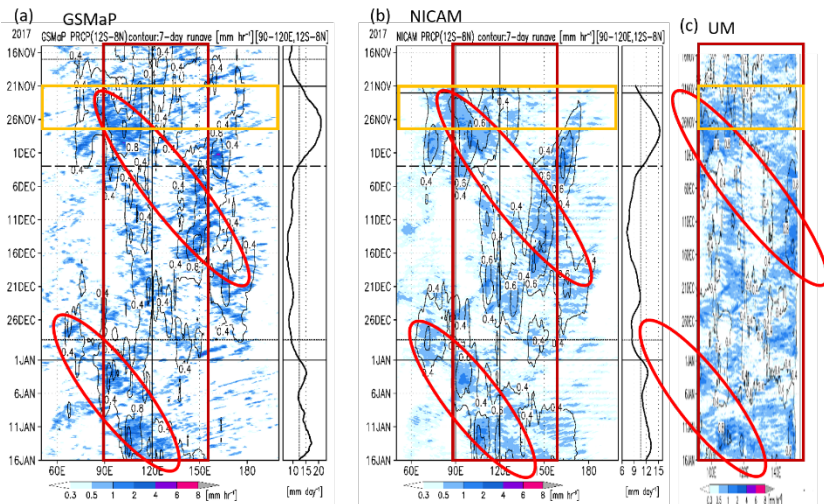


図1 降水の経度-時間断面図 (12S-8N 平均) (a) GSMaP (b) NICAM (c) UM。黄色枠は図2, 赤色枠は図3の描画範囲、赤色楕円は季節内振動に伴う降水域を示す。図1 (a) (b) はNasuno (2019, SOLA) Fig. 1 (b) (d) を引用 (上記表示を加筆)。

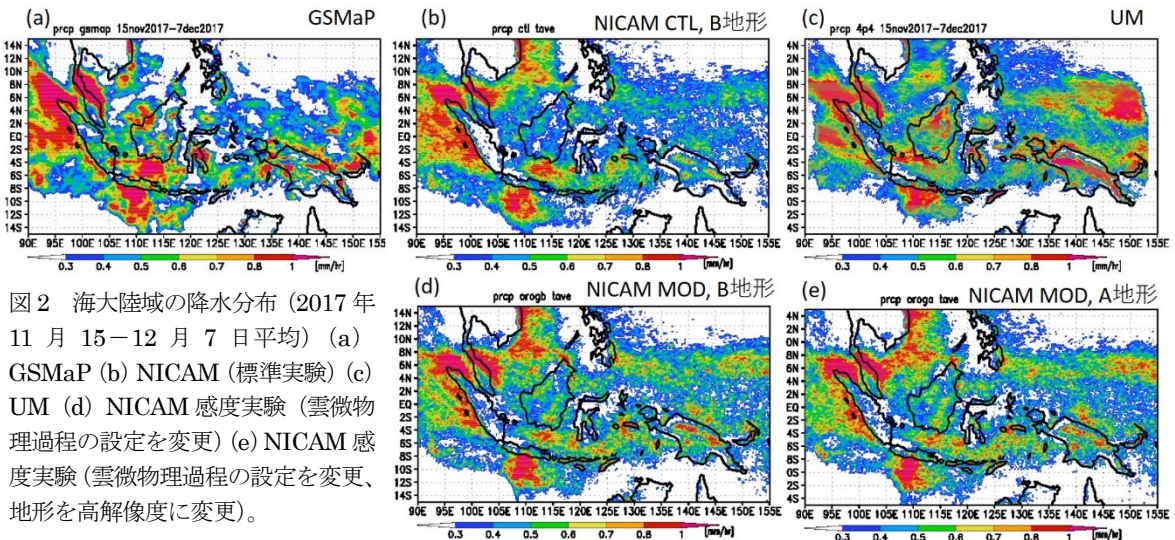


図2 海大陸域の降水分布 (2017年11月15-12月7日平均) (a) GSMaP (b) NICAM (標準実験) (c) UM (d) NICAM 感度実験 (雲微物理過程の設定を変更) (e) NICAM 感度実験 (雲微物理過程の設定を変更、地形を高解像度に変更)。

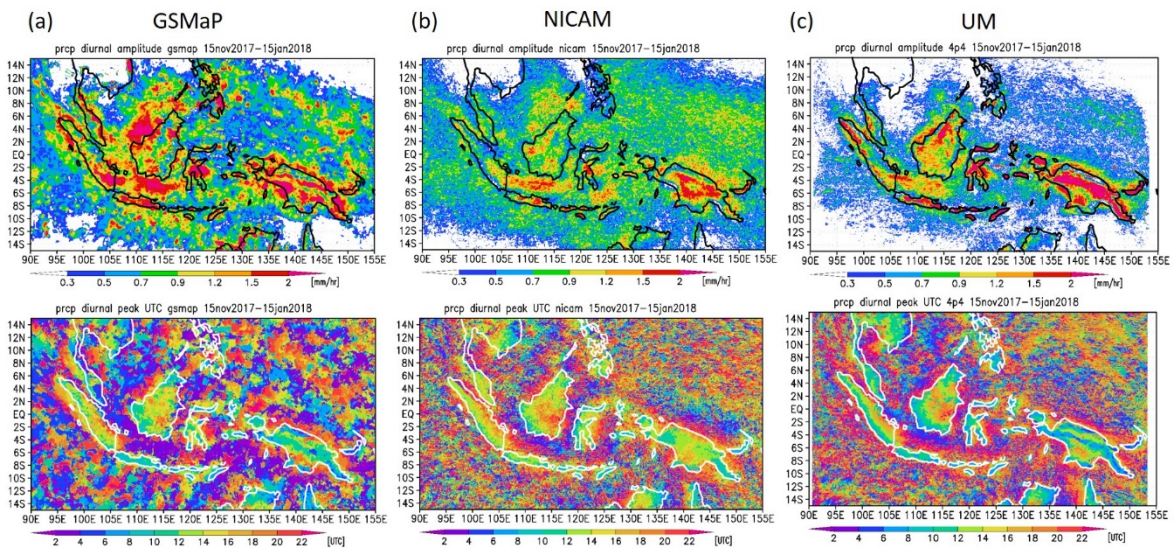


図3 海大陸域の降水の日周期変動 (上) 降水日較差 (下) 降水ピーク時刻 (2017年11月15日-2018年1月15日) (a) GSMaP (b) NICAM (c) UM。

文献

- [1] Satoh, M., Tomita, H., Yashiro, H., Miura, H., Kodama, C., Seiki, T., Noda, A. T., Yamada, Y., Goto, D., Sawada, M., Miyoshi, T., Niwa, Y., Hara, M., Ohno, Y., Iga, S., Arakawa, T., Inoue, and T., Kubokawa, H., “The Non-hydrostatic Icosahedral Atmospheric Model: Description and Development”, *Progress in Earth and Planetary Science*, 1, 18. doi:10.1186/s40645-014-0018-1, (2014).
- [2] Yoneyama, K., and C. Zhang, “Years of the Maritime Continent”, *Geophys. Res. Lett.*, 47, e2020GL087182, (2020).
- [3] Nasuno, T., M. Satoh, H. Tomita, A. T. Noda, S. Iga, H. Miura, H. Taniguchi, Y. Yamada, W. Yanase, C. Kodama, M. Hara, K. Yasunaga, T. Seiki, M. Yoshizaki, M. Nakano, T. Miyakawa, H. Yashiro, T. Yamaura, H. Kubokawa, M. Sawada, M. Ikeda, Y.-W. Chen, R. Woosub, Y. Fukutomi, M. Fujita and T. Ohno, R. Zhang, K. Kikuchi, and R. Shibuya, “Study of Cloud and Precipitation Processes Using a Global Cloud Resolving Model”, *Annual Report of the Earth Simulator*, April 2017–March 2018, 229–236, (2018).
- [4] Mori, S., J.-I. Hamada, Y. I. Tauhid, and M. D. Yamanaka, “Diurnal land-sea rainfall peak migration over Sumatera Island, Indonesian Maritime Continent observed by TRMM satellite and intensive rawinsonde soundings”, *Mon. Wea. Rev.*, 132, 2021–2039, (2004).
- [5] Yokoi, S., S. Mori, M. Katsumata, B. Geng, K. Yasunaga, F. Syamsudin, Nurhayati, and K. Yoneyama, “Diurnal cycle of precipitation observed in the western coastal area of Sumatra Island: Offshore preconditioning by gravity waves”, *Mon. Wea. Rev.*, 145, 3745–3761, (2019).
- [6] Nasuno, T., “Moisture transport over the western Maritime Continent during the 2015 and 2017 YMC Sumatra campaigns in global cloud-system-resolving simulations”, *SOLA*, 15, 99–106, (2019).
- [7] Short C. J. and J. Petch, “How well can the Met Office Unified Model forecast tropical cyclones in the western North Pacific?”, *Weather and Forecasting*, 33, 185–201, (2018).
- [8] Miyakawa, T., Satoh, M., Miura, H., Tomita, H., Yashiro, H., Noda, A. T., Yamada, Y., Kodama, C., Kimoto, M., and Yoneyama, K., “Madden-Julian Oscillation prediction skill of a new-generation global model”, *Nature Commun.*, 5, 3769, (2014).
- [9] Miura, H., T. Suematsu, and T. Nasuno, “An ensemble hindcast of the Madden-Julian Oscillation during the CINDY2011/DYNAMO field campaign and influence of seasonal variation of sea surface temperature”, *J. Meteor. Soc. Japan*, 93A, 115–137, (2015).
- [10] Kodama, C., T. Ohno, T. Seiki, H. Yashiro, A. T. Noda, M. Nakano, Y. Yamada, W. Roh, M. Satoh, T. Nitta, D. Goto, H. Miura, T. Nasuno, T. Miyakawa, Y.-W. Chen, and M. Sugi, “The non-hydrostatic global atmospheric model for CMIP6 HighResMIP simulations (NICAM16-S): Experimental design, model description, and sensitivity experiments”, *Geosci. Model Dev. Discuss.*, <https://doi.org/10.5194/gmd-2019-369>, (2020).
- [11] Nasuno, T., K. Kikuchi, M. Nakano, Y. Yamada, M. Ikeda, and H. Taniguchi, “Evaluation of the Near real-time Forecasts Using a Global Nonhydrostatic Model during the CINDY2011/DYNAMO,” *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 95, 345–368, doi:10.2151/jmsj.2017-022, (2017).
- [12] Argüeso, D., R. Romero, and V. Homar, Precipitation features of the Maritime Continent in parameterized and explicit convection models. *J. Climate*, 33, 2449–2466, (2020).

Study of Cloud and Precipitation Processes Using a Global Cloud Resolving Model

Project Representative

Tomoe Nasuno Research Center for Environmental Modeling and Application, Research Institute for Global Change, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

Authors

Tomoe Nasuno^{*1}, Yohei Yamada^{*1}, Akira T. Noda^{*1}, Masuo Nakano^{*1}, Chihiro Kodama^{*1}, Tatsuya Seiki^{*1}, Tomoki Ohno^{*1}, Shingo Watanabe^{*1}, Masaki Satoh^{*1,4}, Hiroaki Miura^{*1,5}, Hiroshi Taniguchi^{*1,6}, Mikiko Fujita^{*2}, Miki Hattori^{*3}, Tomoki Miyakawa^{*4}, Roh Woosub^{*4}, Ryosuke Shibuya^{*4}, Tamaki Suematsu^{*4}, Hiroyasu Kubokawa^{*4}, Ying-Wen Chen^{*4}, Hisashi Yashiro^{*7}, Mikiko Ikeda^{*8}, Tsuyoshi Yamaura^{*9}, Masayuki Hara^{*10}, Yoshiki Fukutomi^{*11}, Kazuaki Yasunaga^{*12}, Kazuyoshi Kikuchi^{*13}, Nawo Eguchi^{*14}

^{*1}Research Center for Environmental Modeling and Application, Research Institute for Global Change, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, ^{*2}Dynamic Coupling of Ocean-Atmosphere-Land Research Program, Research Institute for Global Change, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, ^{*3}Global Ocean Observation Research Center, Research Institute for Global Change, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, ^{*4}Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo, ^{*5}School of Science, The University of Tokyo, ^{*6}Department of Science, Kobe City College of Technology, ^{*7}Center for Global Environmental Research, Environmental Research Institute, ^{*8}Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology, ^{*9}Center for Computational Science, RIKEN, ^{*10}Center for Environmental Science in Saitama, ^{*11}Institute for Space-Earth Environmental Research, Nagoya University, ^{*12}Department of Civil Design and Engineering, University of Toyama, ^{*13}International Pacific Research Center, ^{*14}Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University

This project aims to deepen our understanding of diurnal to seasonal atmospheric variabilities [e.g., tropical cyclones, tropical waves, Intraseasonal Oscillation (ISO)/Madden-Julian Oscillation (MJO), monsoons] and to improve the forecast skill of these phenomena by high-resolution global simulations using Nonhydrostatic Icosahedral Atmospheric Model (NICAM). In the FY2019, we examined the representation of the ISO and diurnal convection over the Maritime Continent (MC) in 7-km global simulation dataset for YMC-Sumatra 2017 in comparison with observations and the simulation data using a 4.4-km mesh regional operational model. It was found that the global model has an advantage in the representation of the propagation and active/inactive contrast of the ISO convection. The higher resolution model better simulated the diurnal phase on the land area, but it tended to produce excessive (insufficient) amount of land (ocean) precipitation. The sensitivity experiments using NICAM shows impacts of the cloud microphysics settings on the of these convective variabilities.

Keywords : global nonhydrostatic model, Years of the Maritime Continent (YMC), intraseasonal oscillation, diurnal variation, model intercomparison

1. Introduction

The goal of this project is to better understand the mechanisms of meteorological disturbances, ranging from diurnal to seasonal, and local and global, and interactions among them. To achieve this goal, we use Nonhydrostatic Icosahedral Atmospheric Model (NICAM; Satoh et al. 2014[1]), which can represent cloud and precipitation processes over the globe in a seamless framework. In the FY2019, we analyzed the simulation data for the Years of the Maritime Continent (YMC) (Yoneyama and Zhang 2020[2]; <http://www.jamstec.go.jp/ymc>) field campaign “YMC-Sumatra 2017” to understand the merit and deficiencies of the model in representing the Intraseasonal Oscillation (ISO) and diurnal convection over the Maritime Continent (MC), in comparison with regional higher resolution simulation dataset

using the UK Met Office Unified model (UM).

2. Experimental design and data

The details of the setups of the global 7-km mesh NICAM simulations are given in Nasuno (2019[3]). The near real-time 14-day long forecasts were conducted on the daily basis with the Earth Simulator during 15 November 2017–15 January 2018 (Nasuno et al. 2018[4]). The domain of the UM simulations is [91-153E, 17S-29N], where a horizontal mesh size of 4.4 km was applied. The outer boundary and initial values were interpolated from the 10-km mesh UK Met Office global model (Short and Petch 2018[5]), and 5-day long simulations were conducted. In the NICAM sensitivity experiments, the cloud microphysics settings for the ISO simulations (Miyakawa et al. 2014[6]; Miura

et al. [7]) were replaced by those for climate simulations (Kodama et al. 2020[8]). The simulation outputs were combined to make time series for the entire target period in the same manner as Nasuno et al. (2017[9]) for the analysis of the ISO. The Global Satellite Mapping of Precipitation (GSMaP) was used for the validation of precipitation.

3. Results

Figure 1 shows the longitude-time section of precipitation during the campaign period. Eastward propagation of large-scale precipitation associated with the ISO events occurred in late November and early January (Fig. 1a), which was fairly simulated in NICAM (Fig. 1b). In UM, disturbances with shorter time scales (e.g., several days) were well reproduced, while contrast between the active and inactive period corresponding to the ISO was unclear, and continuous precipitation tended to appear in some areas (e.g., 105-120E, 145-155E).

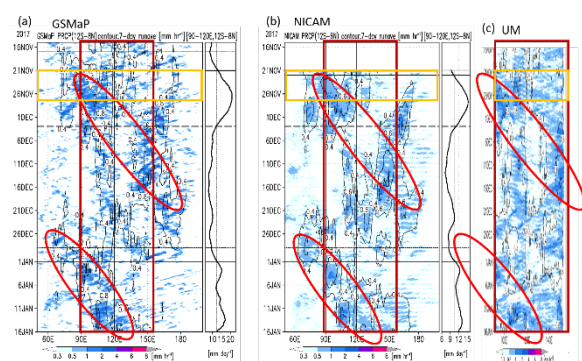


Fig. 1 Longitude-time section of precipitation (12S-8N average) in (a) GSMaP, (b) NICAM, and (c) UM. Boxes indicate the areas shown in Fig. 2 (yellow) and Fig. 3 (red), and the ellipses indicate ISO signals. Fig. 1a and 1b are reproduced from Fig. 1b and 1d of Nasuno (2019, SOLA), respectively, by adding the marks described above.

Figure 2 shows time averaged precipitation for the first ISO event over the MC. Intense precipitation corresponding to the ISO convection is seen over the surrounding ocean of Sumatra and Java island, to the west of 120E (Fig. 2a). Such large-scale zonal contrast of precipitation associated with the ISO was fairly reproduced in NICAM, but with underprediction of land precipitation (Fig. 2b). In UM, concentration of precipitation near the lateral boundaries and over land (islands) weakened the zonal contrast associated with the ISO (Fig. 2c). Analysis of diurnal variation indicated that UM (NICAM) tended to produce stronger (weaker) amplitude and correct (delayed) phase of diurnal precipitation (Fig. 3 in Japanese text), suggesting that these are closely related to the biases in the mean fields and the ISO representation (Figs. 1 and 2).

4. Summary and future work

An advantage of the global cloud-system-resolving model in

the representation of the propagation and active/inactive contrast of the ISO convection and deficiencies in reproducing diurnal convection over land area of MC were confirmed by comparison with high-resolution regional model simulations. Toward improvement of the model, sensitivity experiments on related physical processes (e.g., cloud microphysics, Fig. 2d) and detailed analysis is underway.

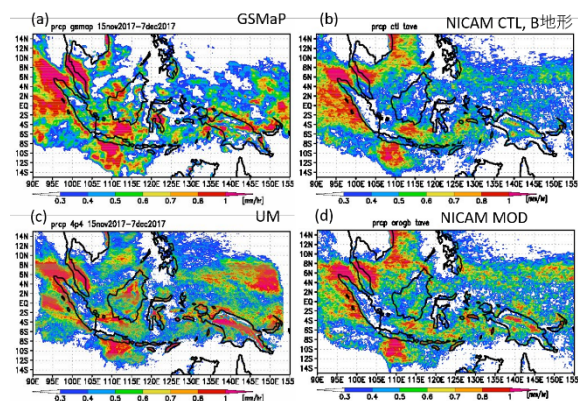


Fig. 2 Precipitation averaged between 15 November and 7 December 2017 in (a) GSMaP, (b) NICAM, (c) UM, and (d) NICAM with modified cloud microphysics settings.

Acknowledgement

The NICAM simulations were run on the Earth Simulator. The UM simulation data was provided by Dr. Christopher Short at UK Met Office. The GSMaP data was provided by Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA).

References

- [1] Satoh, M., et al., "The Non-hydrostatic Icosahedral Atmospheric Model: Description and Development," *Progress in Earth and Planetary Science*, 1, 18, doi:10.1186/s40645-014-0018-1, (2014).
- [2] Yoneyama, K., and C. Zhang, "Years of the Maritime Continent", *Geophys. Res. Lett.*, 47, e2020GL087182, (2020).
- [3] Nasuno, T., "Moisture transport over the western Maritime Continent during the 2015 and 2017 YMC Sumatra campaigns in global cloud-system-resolving simulations" *SOLA*, 15, 99-106, (2019).
- [4] Nasuno, T., et al., "Study of Cloud and Precipitation Processes Using a Global Cloud Resolving Model," *Annual Report of the Earth Simulator*, April 2017-March 2018, 229-236, (2018).
- [5] Short C. J. and J. Petch, "How well can the Met Office Unified Model forecast tropical cyclones in the western North Pacific?", *Weather and Forecasting*, 33, 185-201, (2018).
- [6] Miyakawa, T., et al., "Madden-Julian Oscillation prediction skill of a new-generation global model", *Nature Commun.*, 5, 3769, (2014).
- [7] Miura, H., T. Suematsu, and T. Nasuno, "An ensemble hindcast of the Madden-Julian Oscillation during the

CINDY2011/DYNAMO field campaign and influence of seasonal variation of sea surface temperature” , J. Meteor. Soc. Japan, 93A.,115-137, (2015).

[8] Kodama, C., et al., “The non-hydrostatic global atmospheric model for CMIP6 HighResMIP simulations (NICAM16-S): Experimental design, model description, and sensitivity experiments”, Geosci. Model Dev. Discuss., <https://doi.org/10.5194/gmd-2019-369>, (2020).

[9] Nasuno, T., et al., “Evaluation of the Near real-time Forecasts Using a Global Nonhydrostatic Model during the CINDY2011/DYNAMO,” Journal of the Meteorological Society of Japan, 95, 345-368, (2017).