

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 シームレス環境予測研究分野

著者

那須野 智江^{*1}、佐藤 正樹^{*3,6}、富田 浩文^{*1,7}、野田 暁^{*3}、三浦 裕亮^{*1,8}、谷口 博^{*1,12}、山田 洋平^{*2}、柳瀬 亘^{*14}、小玉 知央^{*2}、原 政之^{*1,11}、安永 数明^{*5,13}、清木 達也^{*1}、吉崎 正憲^{*1,10}、中野 満寿男^{*1}、宮川 知己^{*6}、八代 尚^{*7}、山浦 剛^{*7}、久保 川 陽呂鎮^{*6}、沢田 雅洋^{*14}、池田 美紀子^{*4}、Ying-Wen Chen^{*6}、Roh Woosub^{*6}、福富 慶樹^{*9}、藤田 実季子^{*1}、大野 知紀^{*3}、章 若潮^{*4}、菊地 一佳^{*15}、澁谷 亮輔^{*2}、渡辺 真吾^{*1}

^{*1}海洋研究開発機構 シームレス環境予測研究分野, ^{*2}海洋研究開発機構 ビッグデータ活用プロジェクトチーム, ^{*3}海洋研究開発機構 気候モデル高度化研究プロジェクトチーム, ^{*4}海洋研究開発機構 地球情報基盤センター, ^{*5}海洋研究開発機構 大気海洋相互作用分野, ^{*6}東京大学大気海洋研究所, ^{*7}理化学研究所 計算科学研究センター, ^{*8}東京大学大学院理学系研究科, ^{*9}名古屋大学 宇宙地球環境研究所, ^{*10}立正大学 地球環境科学部, ^{*11}埼玉県環境科学国際センター, ^{*12}神戸市立工業高等専門学校, ^{*13}富山大学 理学部, ^{*14}気象研究所, ^{*15}国際太平洋研究センター

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域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。2018 年度は、集中観測 Pre-YMC 2015 および YMC-Sumatra 2017 期間を対象とする予測計算データを総合的に用いた解析を行った。対流活動に密接に関わる物理量として水蒸気輸送に注目し、積乱雲など高周波の変動が、季節内振動や周囲の場にもたらす効果について詳しく調べた。その結果、高周波変動の基本的な役割についてはインド洋上の事例解析と同様であるが、海大陸域（インドネシア周辺海域）の特徴として、陸上と海上で異なった傾向があり、特に陸上においては、年による違いがより顕著に現れることが分かった。年による違いについては、ENSO 等に伴う背景場の影響が示唆される。

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、水蒸気輸送

1. はじめに

本課題では、アジア域に災害をもたらす日域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]) 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。主な対象として、JAMSTEC が主導する集中観測期間等に発生した事例を取り上げる。NICAM は、雲・降水に関する物理プロセスを詳細に計算する点を特色とし、JAMSTEC および連携研究機関において共同開発されている。開発当初以来、地球シミュレータ等の先端的な計算機において、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)。

2018 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>) の一環として行った予測計算データを総合的に用い、直接観測の困難な、高周波変動成分（積乱雲等）が、季節内振動や環境場に及ぼす効果について詳しい解析を行った (Nasuno 2019[2])。本稿では、その結果得られた知見を報告する。

2. 熱帯の季節内振動・海大陸強化年(YMC)

熱帯の季節内振動は、台風の発生や中緯度の天候などに大きな影響を及ぼすことから、1週間より先の気象予測において有力な情報源として注目されている。季節内振動のメカニズムの理解や予測精度の向上を目指して、世界気象機関 (World Meteorological Organization, WMO) 等による国際的な活動が展開されており、JAMSTEC では熱帯集中観測と全球高解像度数値モデルの両面から研究を推進してきた (Yoneyama et al. 2008[3], 2013[4]; Miura et al. 2007[5]; Miyakawa et al. 2014[6]; Nasuno et al. 2017[7])。YMC プロジェクトの主な目的の一つとして、季節内振動の予測が困難とされている海大陸（インドネシア周辺海域）における雲・降水メカニズムの理解と予測の向上が掲げられている。海大陸では、入り組んだ島嶼・急峻な地形に起因する局所的なメカニズムによる日周期変動が卓越し、季節内振動や環境場に大きな影響を及ぼす。これらを理解する上で、NICAM には局所的な雲・降水過程と大規模な場の相互作用を統一的な枠組みで扱うという利点がある。

本課題では、Pre-YMC 2015 (2015 年 11-12 月) および YMC-Sumatra 2017 (2017 年 11 月 16 日—2018 年 1 月

15日)において、地球シミュレータを用いてNICAMによる準実時間予測計算を行い、予測結果を観測現場へ配信した(Nasuno et al. 2016[8], 2018[9])。2つの集中観測は、同一の拠点(スマトラ島南西岸)において同シーズンに実施された。予想外の結果として、現場で観測された雲・降水現象(例えば降水の日周期変動)には大きな違いが見られた(Yokoi et al. 2019[10])。両年の共通点および相違点を明らかにすることは現象の基本理解の重要なステップとなる。

3. 海大陸におけるスケール間相互作用の多様性

季節内振動に伴う巨大な雲群は、積乱雲(約10km, 1時間程度)の集合体により構成され、積乱雲による水蒸気輸送や潜熱放出は、季節内振動の発達・維持において本質的な役割を果たす。本課題では、インド洋の集中観測を対象とする先行研究(Nasuno et al. 2017[7])で用いた解析手法を、Pre-YMC 2015 および YMC-Sumatra 2017 対象計算データ(水平格子間隔7km)に適用し、観測拠点を含む海大陸西部(90-120E, 12S-8N)における水蒸気収支を定量的に調べた。まず各変数を季節内振動などの低周波成分(7日平均値)と積乱雲等の高周波成分(7日平均値からの偏差)に分離し、次にそれぞれの成分による輸送項を算出した。すべての日毎の計算データから算出された値を繋ぐことで、期間全体の時系列が得られる(計算設定および解析手法の詳細はNasuno et al. 2017[7]; Nasuno 2019[2]を参照)。

図1a, bに、Pre-YMC 2015とYMC-Sumatra 2017の計算出力から算出した、鉛直水蒸気輸送量について、対象領域の陸域と海域それぞれにおける平均高度分布を示す(期間平均値)。2015年には陸上での輸送量が大きく、特に低周波成分による下層に集中した湿潤化が顕著で

ある(図1a)。一方、2017年には低周波成分・高周波成分ともに海上での輸送量が大きく、対流圏全体に及ぶ深い湿潤化が見られる(図1b)。このような海陸間での差異の主要因として、2015年は強いエル・ニーニョの最盛期にあり、海大陸は大規模な東西—鉛直循環の下降域とともに海上での輸送量が大きく、対流圏全体に及ぶ深であったが、2017年はラ・ニーニャ期にあり、海大陸では大規模な上昇流が強化されたことが挙げられる(図2)。また、エル・ニーニョ期には、海大陸全体では上昇流が抑制されるが、陸上では地形性の局所循環(強制上昇流)が強化される傾向があり、これが下層に集中した湿潤化の一因と考えられる。高周波変動による効果として、対流圏中層の強い上昇流による上層湿潤化・下層乾燥化が共通して見られ、これはインド洋上の事例の結果とも整合的である。

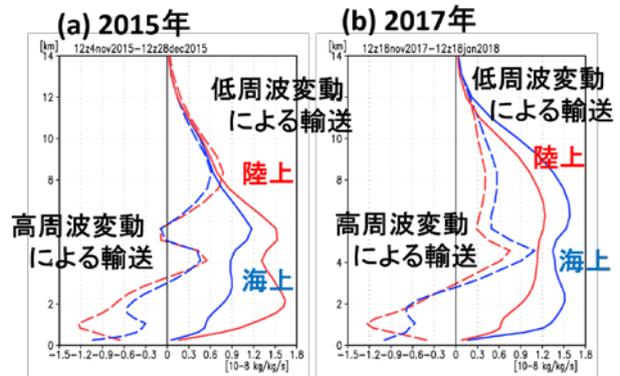


図1 予測計データを用いた(a) 2015年 (b) 2017年の観測期間平均の陸上(赤)および海上(青)の水蒸気輸送量(鉛直成分)の鉛直分布。実線: 低周波変動による輸送量, 破線: 高周波変動による輸送量。

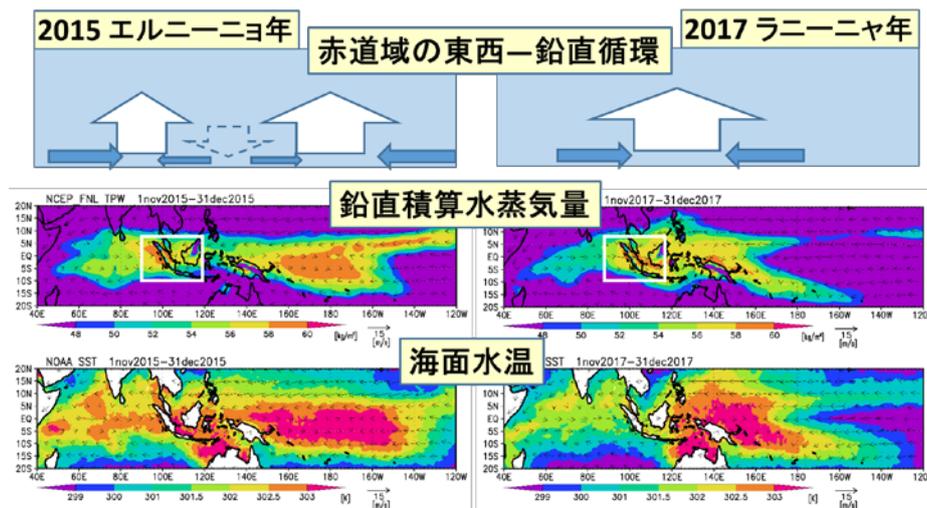


図2 (左) 2015年(エルニーニョ年)と(右)2017年(ラニーニャ年)の11-12月平均場。(上) 鉛直循環模式図(中) 鉛直積算水蒸気量(下) 海面水温偏差。海大陸西部(白枠)では2015(2017)年は陸(海)上で湿潤傾向がみられる。

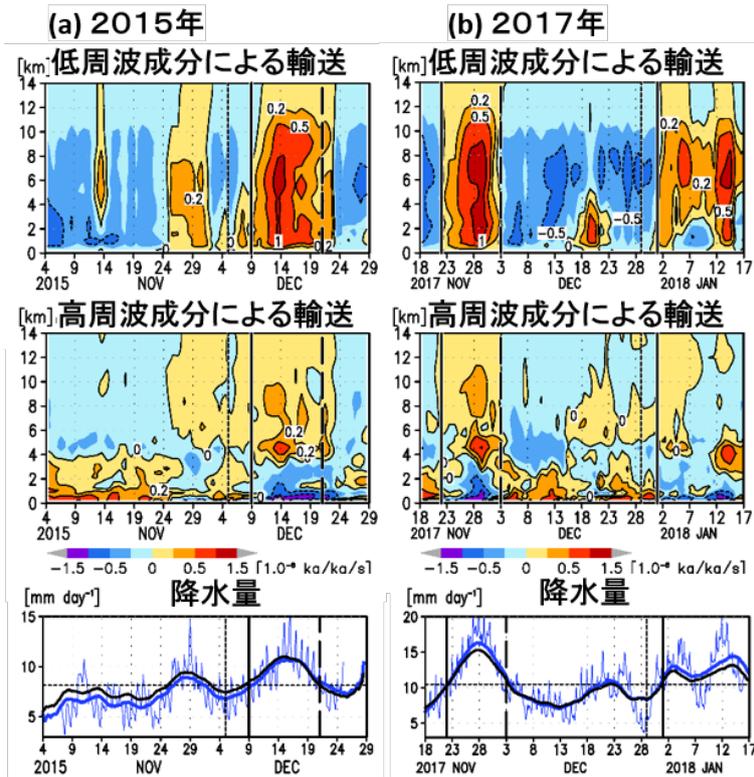


図3 予測計算データを用いた、海大陸西部 (90-120E, 12S-8N) の海上における (a) 2015 年、(b) 2017 年の (上) 低周波成分および (中) 高周波成分による水蒸気輸送量の時間—高度図。(下) 降水量の時系列 (赤細線)。太線は低周波成分。(黒：全域平均、青：海域平均)。(Nasuno 2019[2], Figs. 4, 5 より引用。)

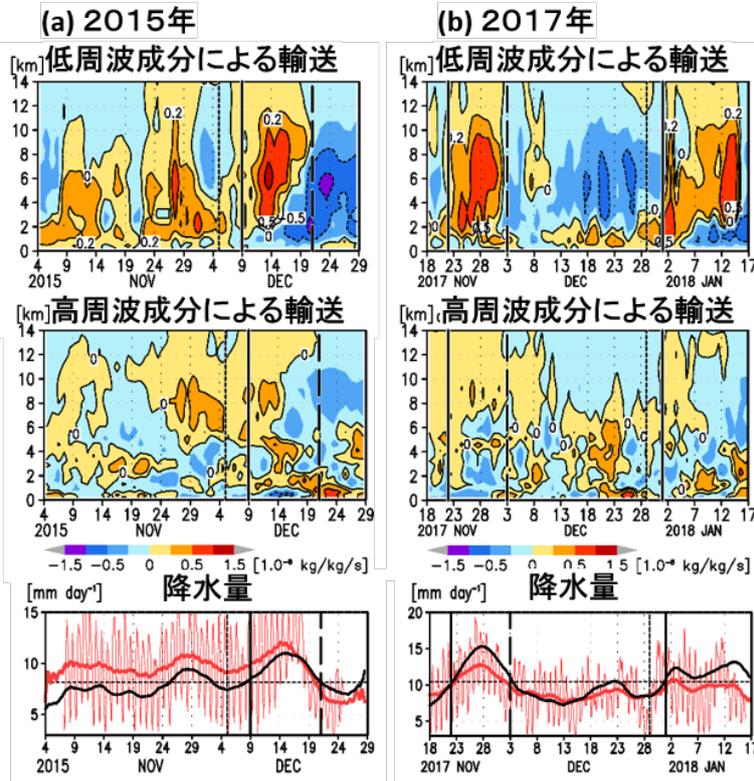


図4 図3に同じ。但し陸上。(Nasuno 2019[2] Figs. 4, 5 より引用。)

2015年には12月後半、2017年には11月後半と1月前半に季節内振動事例が発生した。季節内振動内に係るスケール間相互作用を理解するため、低周波成分と高周波成分の関係の時間変化を調べた。海上と陸上での水蒸気輸送の鉛直分布の時系列(期間平均からの偏差)を図2、図3に示す(観測点付近での季節内振動の開始日を太線で示す:2015年12月9日頃、2017年11月20日頃と12月31日頃)。海上では、両年とも同様に、季節内振動の対流活発期(低周波成分による湿潤化)に同期した高周波成分による上層湿潤化(下層乾燥化)の強化が確認できる(図2)。これに対し、陸上では、年による格差が顕著である(図3)。2015年には高周波成分が低周波成分と比較的よく一致しており、季節内振動の発達を局所的な対流活動が助長することが分かる(図3a)、2017年には、両成分の関係は不明瞭である(図3b)。この結果は、陸上での降水現象と季節内振動の関係には多様性があり、海上よりも複雑であることを示唆する。高周波成分の主な構成要素を明らかにすることは、この多様性を理解する上で重要な手がかりとなる。

降水の時系列(図2、3下段)から、陸上では日周期変動が低周波成分の振幅を上回り、特に2015年に大きいことが見てとれる(観測事実:Yokoi et al. 2019[10]と整合的)。また、2017年には、特に季節内振動の不活発期(12月中旬頃)に4-5日周期の変動がみられ、熱帯波動擾乱の影響(Takasuka et al. 2019[11])が示唆される。今後の研究において、日周期変動や熱帯波動擾乱の役割をより詳しく調べることは有意義である。

4. 今後の課題

季節内振動やその予測において重要な地域である海大陸域における雲・降水の発生・発達機構について、これまでのプロダクトを総合的に用いることで、積乱雲等の役割の多様性が明らかになった。今後、マルチスケール相互作用の実体を担う気象擾乱や、その背景場となる海面水温偏差の影響について、大規模なアンサンブル計算やより系統的な調査を行い、気候変動との関連も視野に入れつつ、予測の確実性を高めることに貢献したい。

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。

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] 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.

- [3] Yoneyama, K., and co-authors, MISMO field experiment in the equatorial Indian Ocean. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 89, 1889-1903, doi:10.1175/2008BAMS2519.1, 2008.
- [4] Yoneyama, K., C. Zhang, and C. N. Long, "Tracking pulses of the Madden-Julian Oscillation," *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 94, 1871-1891, 2013.
- [5] Miura, H., M. Satoh, T. Nasuno, A. T. Noda, and K. Oouchi, "A Madden-Julian Oscillation event realistically simulated by a global cloud-resolving model," *Science*, 318, 1763-1765, 2007.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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, "Study of Cloud and Precipitation Processes Using a Global Cloud Resolving Model," *Annual Report of the Earth Simulator*, April 2015-March 2016, 175-181, 2016.
- [9] 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.
- [10] Yokoi, S., S. Mori, F. Syamsudin, U. Haryoko, and B. Geng, "Diurnal cycle of precipitation observed in the western coastal area of Sumatra Island: Offshore preconditioning by gravity waves," *Monthly Weather Review*, 147, 3391-3407, 2019.
- [11] Takasuka, D., Satoh, M., and Yokoi, S., "Observational evidence of mixed Rossby-gravity waves as a driving force for the MJO convective initiation and propagation," *Geophysical Research Letters*, 46, 5546-5555, 2019.

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

Project Representative

Tomoe Nasuno Department of Seamless Environmental Prediction Research, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

Authors

Tomoe Nasuno^{*1}, Masaki Satoh^{*3,6}, Hirofumi Tomita^{*1,7}, Akira T. Noda^{*3}, Hiroaki Miura^{*1,8}, Hiroshi Taniguchi^{*1,9}, Yohei Yamada^{*2}, Wataru Yanase^{*13}, Chihiro Kodama^{*2}, Masayuki Hara^{*1,10}, Kazuaki Yasunaga^{*5,11}, Tatsuya Seiki^{*1}, Masanori Yoshizaki^{*1,12}, Masuo Nakano^{*1}, Tomoki Miyakawa^{*6}, Hisashi Yashiro^{*7}, Tsuyoshi Yamaura^{*7}, Hiroyasu Kubokawa^{*6}, Mikiko Ikeda^{*4}, Masahiro Sawada^{*13}, Ying-Wen Chen^{*7}, Roh Woosub^{*7}, Yoshiki Fukutomi^{*14}, Mikiko Fujita^{*1}, Tomoki Ohno^{*3}, Ruochao Zhang^{*4}, Kazuyoshi Kikuchi^{*15}, Ryosuke Shibuya^{*2}

^{*1}Department of Seamless Environmental Prediction Research, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology,

^{*2}Project Team for HPC Advanced Predictions utilizing Big Data, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology,

^{*3}Project Team for Advanced Climate Modeling, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, ^{*4}Center for Earth Information Science and Technology, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, ^{*5}Department of

Ocean-Atmosphere Interaction Research, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, ^{*6}Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo, ^{*7}Center for Computational Science, RIKEN, ^{*8}School of Science, The University of Tokyo, ^{*9}Department of Science, Kobe City College of Technology, ^{*10}Center for Environmental Science in

Saitama, ^{*11}Department of Earth Science, University of Toyama, ^{*12}Faculty of Geo-environmental Science, Ritssho University, ^{*13}Meteorological Research Institute, ^{*14}Institute for Space-Earth Environmental Research, Nagoya University,

^{*15}International Pacific Research Center

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 FY2018, we made comprehensive analysis the effects of high-frequency variability (e.g., cumulus convection) on the ISO and the large-scale fields by taking advantage of the high-resolution simulation dataset for the Pre-YMC 2015 and the YMC-Sumatra 2017 field campaigns. Over the land regions of the western Maritime Continent (MC), diversity of the role of the high-frequency effects in moisture transport was detected between the two campaign periods, suggesting more complicated multiscale interactions over land than over ocean.

Keywords : global nonhydrostatic model, Years of the Maritime Continent (YMC), intraseasonal oscillation, moisture transport

1. Introduction

The goal of this project is to better understand the mechanisms of meteorological disturbances of various spatio-temporal scales (e.g., diurnal to seasonal, local and global) and interactions among them. To achieve this, we use Nonhydrostatic Icosahedral Atmospheric Model (NICAM; Satoh et al. 2014[1]), which represents cloud and precipitation processes over the globe in a unified framework. In the FY2018, we made comprehensive analysis of the simulation datasets for the JAMSTEC field campaigns in the Years of the Maritime Continent (YMC) (<http://www.jamstec.go.jp/ymc>).

2. Tropical ISO and the Years of the Maritime Continent (YMC)

Tropical intraseasonal oscillation (ISO) has broad impacts

on world weather and climate, such as tropical cyclogenesis and severe weather events, and regarded as a promising source of predictability. The Maritime Continent (MC; Indonesia, Philippines and surrounding oceans) is a key region for the ISO prediction, where complicated multi-scale interactions significantly modulate the ISO behavior. The YMC aims for the understanding and better prediction of the multi-scale interaction over the MC by observations and modeling. We were in charge of the near real-time forecasts using NICAM for the JAMSTEC field campaigns, Pre-YMC 2015 (November-December 2015) and YMC-Sumatra 2017 (November 2017-January 2018) on the Earth Simulator (Nasuno et al. 2016[2], 2018[3]). In order to understand the roles of the high-frequency local variability in the ISO and large-scale fields, we examined moisture budgets, which is a

key quantity for the ISO dynamics, by taking an advantage of the high resolution (7-km mesh) simulation data. The details of the simulation setup and analysis method are given in Nasuno (2019)[4] and Nasuno (2017)[5].

3. Diversity of scale interactions in the western MC

Figure 1 shows vertical profiles of the simulated vertical moisture advection in the western MC (90°-120°E, 12°S-8°N) in 2015 and 2017 over land (red) and over ocean (blue) regions. In 2015, vertical advection of moisture was pronounced over land than over ocean, with a bottom-heavy profile by the low-frequency components (Fig. 1a). In 2017, by contrast, advection over ocean prevailed that over land, with deep moistening by the low-frequency components (Fig. 1b). Such difference in the land-ocean contrast between the two years is attributable to the environmental conditions; under a peak El Niño condition with large-scale subsidence anomalies over the western MC in 2015, and under a moderate La Niña condition with enhanced large-scale upward motion over the western MC in 2017.

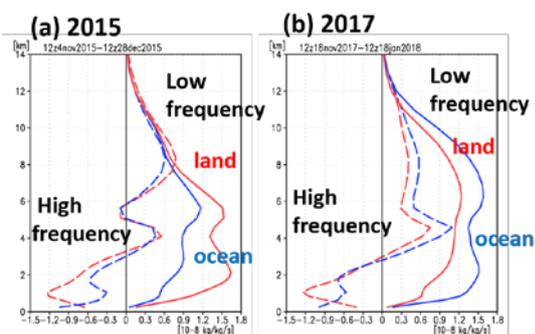


Fig.1 Vertical profiles of period-mean vertical advection of moisture over the western Maritime Continent (90°-120°E, 12°S-8°N) during (a) the Pre-YMC 2015 and (b) the YMC-Sumatra 2017 campaigns. Advection by the low-frequency (7-day mean) variability (solid lines) and that by the high-frequency (deviations from the 7-day mean) variability (dashed lines) averaged over the land (red) and ocean (blue) regions are plotted.

In order to understand the scale interactions within the ISO, we examined time series of the relationship between the low-frequency and high-frequency advection. Over ocean, upper tropospheric moistening (lower tropospheric drying) by the high-frequency variability was enhanced during active period of ISO in both years (not shown), whereas the relationship over land diverged between the two years (Fig. 2). In 2015, the moistening associated with the high-frequency variability was synchronized with the low-frequency counterparts, implying a supportive role of local convection in the evolution of the ISO (Fig. 2a), while such relationship was not confirmed in 2017 (Fig. 2b). These suggest more complicated interactions between the local convection and the

ISO over land than over ocean. Further investigation of the major constituents of the high-frequency variability will provide a clue to understand such diversity. The time series of the surface precipitation during the 2015 and 2017 period (Fig. 2, bottom panels) indicates that the diurnal variation was dominant, especially in 2015. It is useful to examine the role of diurnal variation in the ISO in the forthcoming studies.

Acknowledgement

All the simulations were conducted on the Earth Simulator.

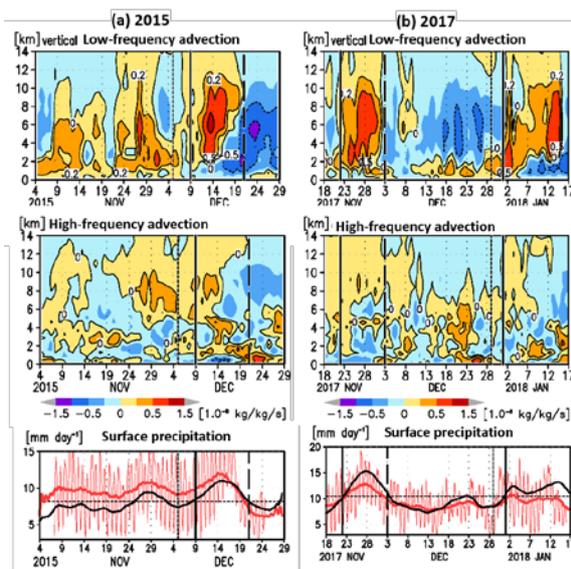


Fig 2 Time-height section of the simulated anomalous moisture advection in the land area of the western Maritime Continent (90°-120°E, 12°S-8°N) during (a) the Pre-YMC 2015 and (b) the YMC-Sumatra 2017 campaigns. (top) Vertical advection by the low-frequency (7-day mean) variability and (middle) advection by the high-frequency (deviations from the 7-day mean) variability. Anomalies from the period-mean profiles are shown. Surface precipitation are also drawn in the bottom panels. The dotted, solid, and dashed vertical lines indicate the beginning of the preconditioning, active, and inactive periods of the ISO, respectively. (Reproduced from Figs. 4 and 5 of Nasuno 2019[8].)

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] Nasuno, T., et al. "Study of Cloud and Precipitation Processes Using a Global Cloud Resolving Model," Annual Report of the Earth Simulator, April 2015-March 2016, 175-181, 2016.
- [3] 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.

[4] 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.

[5] 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, doi:10.2151/jmsj.2017-022, 2017.