

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

著者

那須野 智江^{*1}、小玉 知央^{*1}、野田 暁^{*1}、中野 満寿男^{*1}、清木 達也^{*1}、山田 洋平^{*1}、大野 知紀^{*1}、井上 忠雄^{*1}、高野 雄紀^{*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}、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}、小林 健太^{*15}、杉 正人^{*16}、坂井 彩織^{*5}、山上 遥航^{*4}

^{*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 一般化、^{*7}国立環境研究所 地球環境研究センター、^{*8}海洋研究開発機構 研究推進部、^{*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、^{*15}九州大学大学院 総合理工学府、^{*16}気象庁気象研究所 気候研究部

本課題の目的は、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、世界各地に災害をもたらす日域から季節程度の気象変動現象（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）のメカニズムやそれらの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。2020 年度は、JAMSTEC による海大陸（インドネシア・フィリピン周辺域）集中観測（Pre-YMC および YMC-Sumatra 2017）期間に発生した事例を対象に、季節内振動の発達や東進の再現性に深く関わる物理過程（海面フラックス、雲微物理過程）に注目した感度調査を行った。主な結果として（1）海面フラックスの定式化において、低風速域での潜熱供給の過少傾向を補正することが、季節内振動の海大陸での発達や東進の再現性の改善に有効であること、（2）雲微物理過程の設定の変更により海大陸の陸域での日周期変動が活発化すると、季節内振動に伴う対流は全体に抑制されるが、季節内振動の開始期には水蒸気輸送を介して対流活動の発達が促進されることが分かった。

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、海面フラックス、雲微物理過程

1. はじめに

本課題では、世界各地に災害をもたらす日域から季節程度の気象変動現象について、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)を用いた数値実験を行うことで、発生・発達のメカニズムや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。これまでに、地球シミュレータ等の大型計算機を活用した大規模な数値実験により、全球規模の雲・降水に関する多くの研究実績を積んでいる (Satoh et al. 2014[1]参照)。2020 年度には、the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6, High Resolution Model Intercomparison Project (HighResMIP) に提出した気候実験に関する研究も進展し、モデルの物理過程の精緻化が大幅に進んだ (Kodama et al. 2021[2])。

また、JAMSTEC が主導する集中観測期間を対象とする研究も継続的に行っている (2015-2019 年度地球シミュレータ Annual Report)。2020 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, Yoneyama and Zhang 2020[3]) の一環として実施された Pre-YMC および YMC-Sumatra2017 期間に発生した季節内振動事例を対象に、物理過程に関する感度実験を行い、現象の再現性に対する効果を検証した (Matsugishi et al. 2020[4]; Nasuno 2021[5])。その結果を以下に報告する (詳細は文献を参照されたい)。

2. Pre-YMC 事例 (海面フラックスの効果)

海大陸 (インドネシア・フィリピン周辺域) は、世界有数の対流活発域である。インド洋で発生した季節内振動が巨大な対流活動を伴って東進する際、その 75% が海大陸域での局所的な対流活動によって変調を受けることが指摘されており (Zhang and Ling 2017[6])、このことが季節内振動の予測を困難にしている。

季節内振動の発生発達において、水蒸気の変動が本質的な役割を果たすことから、Matsugishi et al. (2020) [4] では Pre-YMC 集中観測期間中に海大陸上を通過した季節内振動事例を対象に、海面からの水蒸気 (潜熱) フラックスに注目し、観測データによるモデルの検証、お

よび検証結果に基づく定式化の改良の効果を示した。数値実験では、全球14km格子を用い、2015年12月1,2,3日を初期値とした1か月積分を行った(3メンバーアンサンブル)。図1に研究船みらいで取得された観測データに基づく海面フラックスとNICAMの実験でLouis(1979)[7]の定式化を用いて与えた値の比較を示す。

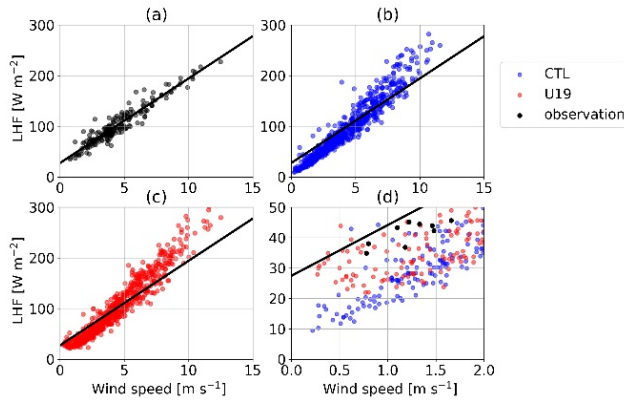


図1 海面からの潜熱フラックスと海上風速の散布図。
(a) 観測 (b) CTL 実験 (c) U19 実験 (d) $< 2 \text{ m s}^{-1}$ の拡大。
Matsugishi et al. (2020, SOLA), Fig. 3を引用。

モデルの標準的な実験設定 (CTL) では、海上風が強い(弱い)場合に観測に比べ海面フラックスが過剰(過少)となる傾向がある(図1b)。観測では無風域でも乱流等による有意な水蒸気供給がみられる(図1a)この効果を疑似的にモデルに取り込むため、海面フラックスの定式で用いる海上風速に下限値 (1.9 m s^{-1}) を設定し、感度実験を行った (U19)。この変更により弱風域 ($< 2 \text{ m s}^{-1}$) での海面フラックス誤差の改善が確認された(図1c, d)。図2にCTL, U19における可降水量の季節内振動に伴う推移を示す。CTLでは海大陸における可降水量の増加量が少なく、客観解析にみられる、季節内振動に伴う可降水量ピーク域の

入れ替わり(インド洋から海大陸さらに西太平洋へ)が再現されていない。即ち、季節内振動が海大陸上で停滞・弱化している。一方U19では、海大陸での可降水量の増加が促進され、タイミングは遅れるものの、季節内振動の発達や東進が定性的に再現されている。水蒸気収支を確認すると、海面フラックスの増加により海大陸での対流活動の活発化(降水量増加)・循環場の強化することで、季節内振動の振る舞いの違いがもたらされたことが分かる(図2d)。

3. YMC-Sumatra22017 (雲微物理過程の影響)

海大陸の活発な対流活動は、複雑な海陸分布に起因する局所的なメカニズムにより駆動されている。季節内振動のモデルによる再現・予測において、海大陸域での局所的な対流活動との相互関係を正確に表現することは極めて重要である。しかし、関連するプロセスが多岐にわたりモデル解像度に対する依存性も大きいことから、全球モデルにおける問題点は未だ収束を見ない。Nasuno (2021)[5]では、モデルにおける対流活動の表現に直接的に関わる、雲の微物理過程に注目し、YMC-Sumatra 2017 集中観測期間に発生した季節内振動事例を対象とする感度実験を行い、海大陸における対流活動やその季節内振動との関係に及ぼす影響について調査した。雲微物理過程として、水物質に関する6種類の変数の質量を予報するバルク方式(Tomita 2008[8])を基本とする、代表的な2つの設定を取り上げ、それぞれの設定の特色を明らかにした。いずれの実験も、全球7km格子を用いて対象期間(2017年11月9日-12月9日)の各日を初期値として行い、5日目までの出力を合成して時系列データを作成し、解析に用いた。

標準実験(CTL)では、季節内振動の予測性能を重視し、降水物質の落下速度を遅くした設定(Miyamkawa et al. 2014[9], Miura et al. 2015[10]と同様)を用い、感度実験(MOD)では、全球の雲の気候場の再現性を重視し、観

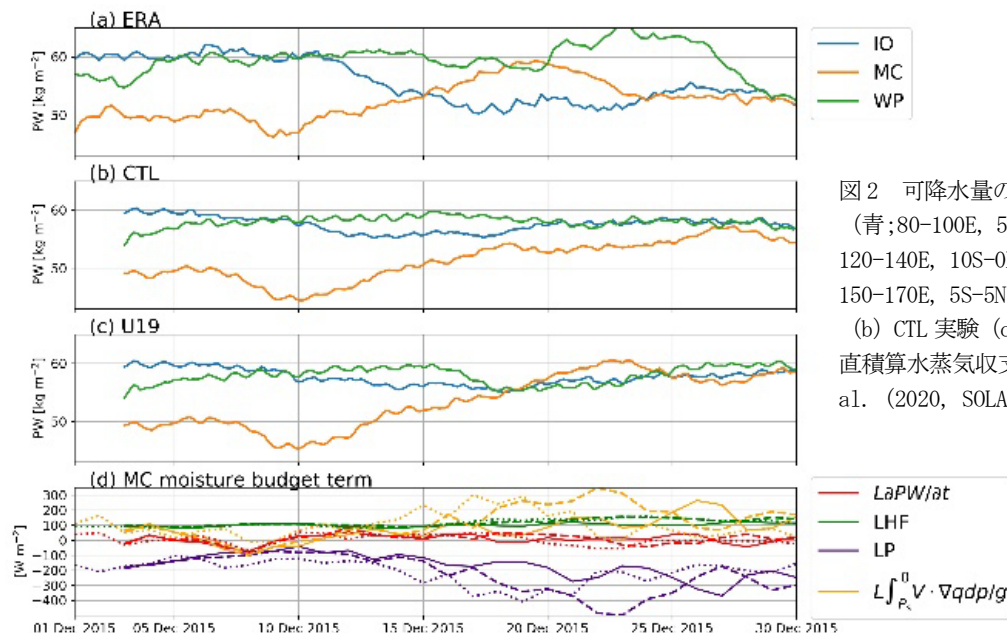


図2 可降水量の時系列。インド洋(青;80-100E, 5S-5N)、海大陸(橙;120-140E, 10S-0N)、西太平洋(緑;150-170E, 5S-5N)。(a) ERA-Interim (b) CTL 実験 (c) U19 実験 (d) 鉛直積算水蒸気収支。Matsugishi et al. (2020, SOLA), Fig. 6を引用。

の過剰形成を抑制するとともに上層の雲氷の生成維持を助長して過少傾向を補正する設定 (Kodama et al. 2020[2]; Roh and Satoh 2014[11]) を用いた。それぞれの数値実験における熱帯域の期間平均の雲微物理変数の鉛直分布はそれぞれの設定の特徴をよく反映している (Nasuno 2021[4], Fig. 1)。

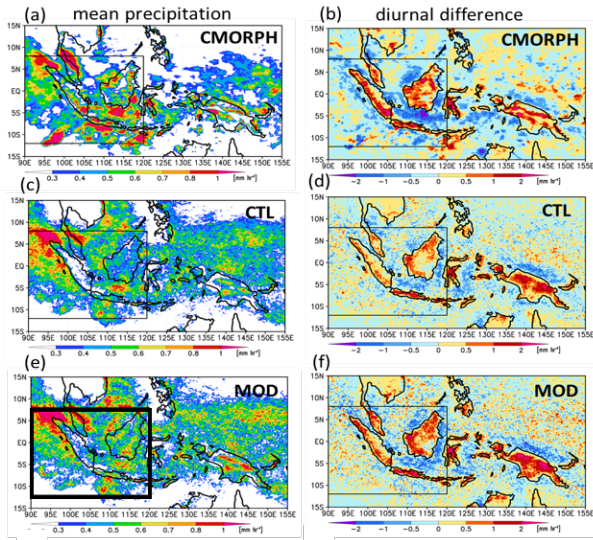


図3 期間平均の降水量 (右列) と日内較差 (1200 UTC - 0000 UTC) (a) (b) CMORPH (c) (d) CTL 実験 (e) (f) MOD 実験。囲み域は図4, 5の解析対象範囲。Nasuno (2021, SOLA) Fig. 2a-f を引用。

図3に海大陸域の期間平均降水分布の比較を示す。季節内振動の通過に伴い、海大陸西部の島嶼 (陸域) および周辺海域に降水の集中がみられる (図3a)。その多くは顕著な日周期変動 (海陸で逆位相) を伴うものである (図3右列)。モデルはこれらの特徴を概ね表現しているが、特に陸域での降水および日周期に伴う変動に過少傾向がみられる。これらの誤差傾向は、MODではCTLより緩和されている。上記の違いは、MODではCTLに比べ降水の落下中の蒸発率が低いことで、孤立した強い上昇流の発生割合が高くなることに起因する。これらの対流活動と季節内振動の関係を理解するため、海大陸西部の陸域と海域のそれぞれについて水蒸気収支の時間変化を調べた。図4にMODとCTLの差の水蒸気移流項の時間-高度図 (期間平均値からの偏差) を示す。陸域では海域に比べ、短周期の変動が卓越し、特に季節内振動の活化化に先行する抑制期にMODでは対流に伴う湿潤化傾向が助長される。これと対照的に、海域では、この期間MODでは対流の抑制傾向が顕著であり、陸域での対流活動による補償下降流の影響を示唆する。季節内振動の開始期には、陸域・海域ともにMODでは湿潤化傾向が強化され、対流活発期後半には、むしろ湿潤化が早く弱化している。これは、対流活動の時空間的な連続性の低下に関係する。期間平均では、MODではCTLに比べ陸域 (海域) で湿潤化 (乾燥化) 傾向となるが (図5a, b)、季節内振動の対流活化化開始時には陸域だけでなく、海域でも日周期変動に伴う湿潤化が増加することで、季節内振動の発達を助長することが分かる (図5c, d)。

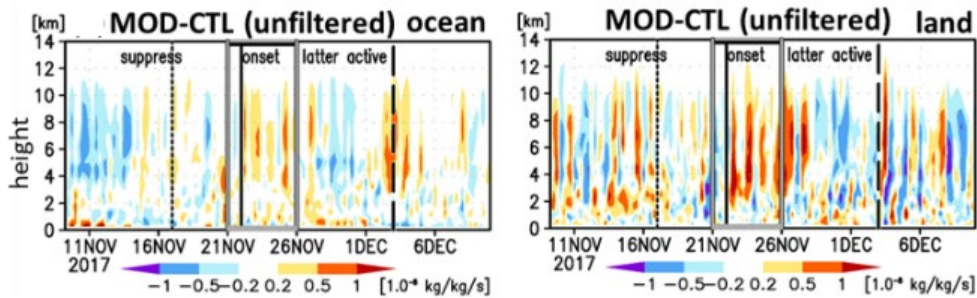


図4 水蒸気移流項の差 (MOD-CTL) の時間-高度図。図3囲み域の海域 (左)・陸域 (右) 平均。時間平均値からの偏差。Nasuno (2021, SOLA) Fig. 4e, f を引用。

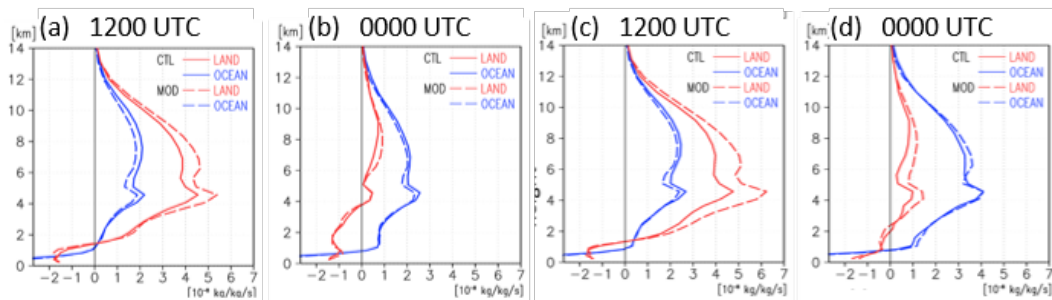


図5 水蒸気移流項の鉛直分布。(a) (b) 対象期間平均、(c) (d) 対流活化化開始期。CTL (実線)、MOD (破線)、陸域 (赤)、海域 (青)。(a) (c) 1200 UTC、(b) (d) 0000 UTC。Nasuno (2021, SOLA) Fig. 5b, c, f, g を引用。

4. まとめと今後の課題

季節内振動の再現や予測に深く関わる物理過程について、その影響を明らかにするため、観測との比較や従来の研究から得られた知見、直近のモデル開発に関する知見をもとに、感度実験による検証を行った。

Louis (1979) [7] の定式化では考慮されていない、弱風域での海面からの潜熱供給の効果を取り入れることで、海大陸域での水蒸気の過少誤差が修正され、季節内振動の海大陸域での発達や東進の再現性が改善された。然しながら、強風域での海面からの潜熱の供給の過剰誤差については未修正であり、その影響は停滞性の対流域の発達を介して季節内振動や基本場の再現性に現れている。今後、より精緻な定式化の導入や海洋結合モデルの開発と合せて改善を試みる必要がある。

雲の微物理過程に関しては、これまでに多くの研究で用いられてきた2つの設定、即ち、季節内振動事例の再現性を重視した設定と気候場の再現性を重視した設定について比較実験を行い、その基本的な性質を把握するため、短期積分における結果を合成した解析を行った。個々の雲に伴う鉛直流と潜熱放出の関係が雲微物理過程の設定によって異なることで、海大陸における陸域での日周期変動に伴う対流活動に系統的な違いが現れ、陸域での対流活動が強化すると、その補償下降域となる海域では対流活動が抑制され、季節内振動を弱める効果があるが(既往研究の主張と整合的)、季節内振動の対流活発期の開始時には、陸域だけでなく海域でも日周期変動が活発化することで季節内振動の発達を助長する傾向をもつことが分かった。現象の再現性の観点では、最適解は2つの設定の間にあると思われる。

気候場の再現性の確保と変動現象の再現性の確保の両立は今後の重要な課題である。今後より長期間の数値実験による系統的な調査を重ね、平均場と変動現象の相互関係について知見を深める必要がある。

謝辞

海面からの潜熱フラックスの検証には、みらい航海(MR15-04)で取得された観測データを用いた。可降水量の検証にヨーロッパ中期予報センター(ECMWF)から提供された再解析データ(ERA Interim)、降水の検証に米国国立環境予測センター(NCEP CPC)から提供された衛星データプロダクト(CMORPH)を用いた。

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] 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.*, 14, 794-820, (2021).

[3] Yoneyama, K., and C. Zhang, “Years of the Maritime Continent”, *Geophys. Res. Lett.*, 47, e2020GL087182, (2020).

[4] Matsugishi, S., H. Miura, Nasuno, T., and M. Satoh, “Impact of latent heat flux modifications on the reproduction of a Madden-Julian Oscillation event during the 2015 Pre-YMC campaign using a global cloud-system-resolving model”, *SOLA*, 16A, 12-18, (2020).

[5] Nasuno, T., “Impacts of cloud microphysics modifications on diurnal convection and the ISO over the Maritime Continent: A case study of YMC-Sumatra 2017”, *SOLA*, 17, 16-23, (2021).

[6] Zhang, C. and J. Ling, “Barrier effect of the Indo-Pacific Maritime Continent on the MJO: Perspectives from tracking MJO precipitation”, *Journal of Climate*, 30, 3439-3459, (2017).

[7] Louis, J. F., “A parametric model of vertical eddy fluxes in the atmosphere”, *Bound.-Layer Meteor.*, 17, 187-202, (1979).

[8] Tomita, H., “New microphysical schemes with five and six categories by diagnostic generation of cloud ice”, *J. Meteor. Soc. Japan*, 86A, 121-142, (2008).

[9] 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).

[10] 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] Roh, W. and M. Satoh, “Evaluation of precipitating hydrometeor parameterizations in a single-moment bulk microphysics scheme for deep convective systems over the tropical open ocean”, *J. Atmos. Sci.*, 71, 2654-2673, (2014).

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}, Chihiro Kodama^{*1}, Akira T. Noda^{*1}, Masuo Nakano^{*1}, Tatsuya Seiki^{*1}, Yohei Yamada^{*1}, Tomoki Ohno^{*1}, Tadao Inoue^{*1}, Yuki Takano^{*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}, 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}, Kenta Kobayashi^{*15}, Masato Sugi^{*16}, Saori Sakai^{*5}, Yoko Yamagami^{*4}

^{*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}Research Support Department, Japan Agency for Marine-Earth 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, ^{*15}Interdisciplinary Graduate School of Engineering Sciences, Kyushu University, ^{*16}Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency

The goal of this project is to improve our understanding of atmospheric variabilities at diurnal to seasonal time scales [e.g., tropical cyclones, tropical waves, Intraseasonal Oscillation (ISO)/Madden-Julian Oscillation (MJO), monsoons] and forecast skill of these phenomena by high-resolution global simulations using Nonhydrostatic Icosahedral Atmospheric Model (NICAM). In the FY2020, we investigated the impacts of physical processes which are relevant to the ISO dynamics by sensitivity experiments for the Years of the Maritime Continent (YMC) field campaign cases: (1) in the Pre-YMC case, correction of the weak bias of latent heat flux (LHF) led to successful simulation of ISO development and propagation over the Maritime Continent (MC), (2) in the YMC-Sumatra2017 case, modification in cloud microphysics settings caused difference in the local convective properties especially over the land area of the MC. The enhancement of diurnal convection over land generally suppressed the surrounding oceans and the ISO. Exception is the onset period of the ISO convection, when the diurnal convection is also enhanced over oceans to facilitate the ISO development.

Keywords : global nonhydrostatic model, Years of the Maritime Continent (YMC), intraseasonal oscillation, latent heat flux, cloud microphysics

1. Introduction

In order to deepen our understanding of atmospheric variabilities at diurnal to seasonal time scales over the globe, and to gain insight into the better prediction of them, we develop and apply Nonhydrostatic Icosahedral Atmospheric Model (NICAM; Satoh et al. 2014[1]) in this project. The uniqueness of NICAM lies in the explicit treatment of cloud and precipitation processes globally. In the FY2020, Kodama et al. (2021)[2] demonstrated the recent updates of model physics for the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6, High Resolution Model Intercomparison Project (HighResMIP) and their impacts on the

reproducibility of the global climatology. In view of the Intraseasonal Oscillation (ISO) prediction, we also performed series of sensitivity experiments to investigate the impacts of the physical processes which are closely relevant to the dynamics of the ISO; surface latent heat flux and cloud microphysics by the case studies of the Years of the Maritime Continent (YMC) (Yoneyama and Zhang 2020[3]) field campaigns (Matsugishi et al. 2020[4]; Nasuno 2021[5]).

2. Impacts of latent heat flux modifications: the Pre-YMC (2015) ISO case

It is well known that the active local convection over the Maritime Continent (MC) often disrupted smooth eastward migration of the ISO, which tends to be exaggerated in numerical simulations. On the basis of the importance of moisture variability to the ISO dynamics, Matsugishi et al. (2020)[4] evaluated surface latent heat flux (LHF) (i.e., moisture source) in NICAM with observations by R/V MIRAI for Pre-YMC 2015 campaign at the southwest coast of Sumatra, during which a significant ISO event occurred. They found underestimation (overestimation) of LHF in the model under weak (strong) surface wind in the model. As a proxy of the effects of boundary layer-scale eddies, they modified the surface flux formulation by setting a lower threshold value of surface wind speed (set as 1.9 m s^{-1}). Figure 1 shows time series of precipitable water (column integrated moisture) in the control experiments (CTL) and modified experiments (U19). The replacement of the peak area of precipitable water indicating the eastward propagation of the convective (moist) phase of the ISO in ERA Interim (Fig. 1a) was marginally simulated in U19 (Fig. 1c), while moistening was insufficient over the MC and the ISO collapsed in CTL (Fig. 1b). The moisture budget analysis (Fig. 1d) indicates that such distinct differences was not only by the increase in the LHF over the MC but also through the enhancement of the convective activity and large-scale circulation associated with the ISO.

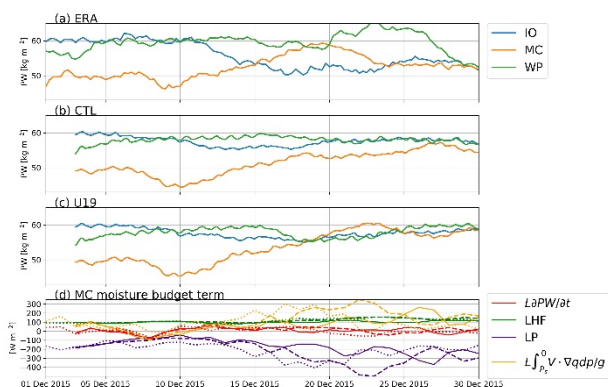


Fig. 1 Time series of the area averaged precipitable water in (a) ERA Interim, (b) CTL, and (c) U19. IO (80-100E, 5S-5N), MC (120-140E, 10S-0N), WP (150-170E, 5S-5N). (d) moisture tendency terms in the MC area. Reproduced from Fig. 6 of Matsugishi et al. (2020, SOLA).

3. Impacts of cloud microphysics modifications: the YMC-Sumatra2017 ISO case

How the local convection over the MC interact with the ISO is a key question for understanding and prediction of the ISO. Nasuno (2021)[5] investigated impacts of cloud microphysics settings on the MC convection and its relationship with the ISO by sensitivity experiments. The target case was an ISO event that occurred during the YMC-Sumatra2017 campaign. Two typical cloud microphysics settings were examined; (1) aimed for ISO simulations with reduced terminal velocity of condensates

(Miyakawa et al. 2014[6]; Miura et al. 2015[7]) (CTL), and (2) aimed for climate simulations with slowed (enhanced) production of graupel (ice) to reduce known model biases (Kodama et al. 2021[2]) (MOD). It was found that MOD had more frequent occurrences of intense sporadic convection than in CTL due to fast removal of condensates without evaporation and greater acceleration of upward motion by condensation. This led to more enhanced diurnal convection (moistening tendency) especially over land in MOD than in CTL and resultant suppression of convection (drying tendency) over the surrounding oceans on average (Fig. 2a, b), indicating negative impacts on convective activity associated with the ISO. Such impacts were more evident for the inactive period of the ISO preceding the convective onset. An exception is the onset period of the ISO convection, for which diurnal convection was also enhanced over the surrounding oceans to facilitate development of deep moistening associated with the ISO (Fig. 2c, d).

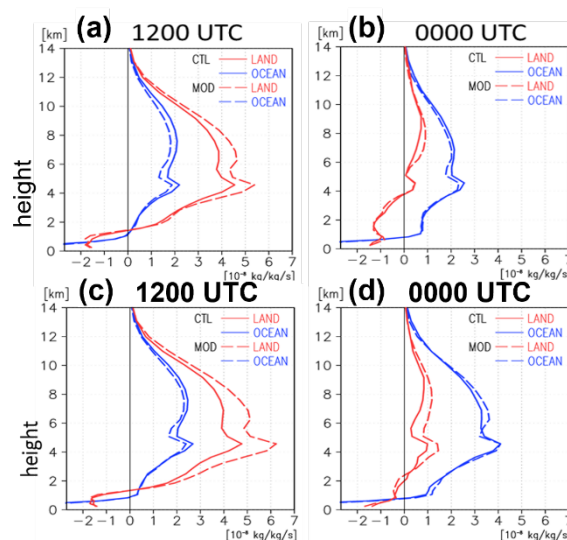


Fig. 2 Vertical profile of moisture advection over the western MC (90-120E, 12S-8N) averaged for (a) (b) the entire target period and for (c) (d) the onset period of the ISO onset at (a) (c) 1200 UTC and (b) (d) 0000 UTC. Reproduced from Fig. 5b,c,d,f of Nasuno (2021, SOLA).

4. Summary and future work

Series of sensitivity experiments highlight the importance of surface LHF and cloud microphysics modeling to correctly reproduce the ISO and associated scale interactions. These processes should be further sophisticated by implementation of newly developed method, ocean-atmosphere coupling, and evaluations based on observations. Better representation of the meteorological disturbances and the background climatology is our ultimate goal. These are pursued in forthcoming studies.

Acknowledgement

The NICAM simulations were run on the Earth Simulator. Data obtained in the MIRAI cruise (MR15-04) was used to

evaluate latent heat flux. We acknowledge European Center for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) for providing ECMWF Reanalysis (ERA) Interim and National Centers for Environmental Prediction (NCEP) Climate Prediction Center (CPC) for providing CPC MORPHing technique (CMORPH).

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] 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.*, 14, 795-820, (2020).
- [3] Yoneyama, K., and C. Zhang, “Years of the Maritime Continent”, *Geophys. Res. Lett.*, 47, e2020GL087182, (2020).
- [4] Matsugishi, S., H. Miura, Nasuno, T., and M. Satoh, “Impact of latent heat flux modifications on the reproduction of a Madden-Julian Oscillation event during the 2015 Pre-YMC campaign using a global cloud-system-resolving model”, *SOLA*, 16A, 12-18, (2020).
- [5] Nasuno, T., “Impacts of cloud microphysics modifications on diurnal convection and the ISO over the Maritime Continent: A case study of YMC-Sumatra 2017”, *SOLA*, 17, 16-23, (2021).
- [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).