

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^{*1,9}, 山田 洋平^{*2}, 柳瀬 亘^{*13}, 小玉 知央^{*2}, 原 政之^{*1,10}, 安永 数明^{*4,11}, 清木 達也^{*1}, 吉崎 正憲^{*1,12}, 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^{*13}, 池田 美紀子^{*1,5}, Ying-Wen Chen^{*6}, Roh Woosub^{*6}, 福富 慶樹^{*14}, 藤田 実季子^{*1}, 大野 知紀^{*3}, 章 若潮^{*5}, 菊地 一佳^{*15}, 澁谷 亮輔^{*2}

*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 大気海洋相互作用分野, *5 海洋研究開発機構 地球情報基盤センター, *6 東京大学 大気海洋研究所, *7 理化学研究所 計算科学研究機構, *8 東京大学 理学部, *9 神戸高専 一般科 (理科), *10 埼玉県環境科学国際センター, *11 富山大学 理学部, *12 立正大学 地球環境科学部, *13 気象庁 気象研究所, *14 名古屋大学 宇宙地球環境研究所, *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 [MJO]、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。2017年度は、集中観測 CINDY2011 や Pre-PMC (2015年) 期間を対象とする予測計算データを用いて高波数変動（積乱雲など）が周囲の場や季節内振動に及ぼす効果の定量化を行い、水蒸気の鉛直輸送効果（上層の湿潤化・下層の乾燥化）が、特に季節内振動の活発期に顕著に見られることを示した。また、PMC スマトラ集中観測（11 - 1月）及び「みらい」北極航海（9月）期間を対象とする準実時間予測計算（全球7～14 km 格子、4日～1か月予測）を行い、予測情報をWEB上で公開した。北極航海の短期予測計算では、低気圧の通過に伴う降水イベントや風速・気圧変化等が詳細に捉えられた。極域を含む、重点研究対象域の拡張に向け、今後の課題を検討した。

キーワード：全球非静力学モデル, 熱帯集中観測, 海大陸研究強化年, 季節内振動, 北極海

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・変動現象の発生・発達のメカニズムおよびこれらの現象間の相互関係を明らかにすることを目的とする。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する全球非静力学大気モデル、Nonhydrostatic Icosahedral Atmospheric Model (NICAM; Satoh et al. 2014[1]) を用いて、JAMSTEC による集中観測を主対象とした高解像度数値計算を行うことにより、この目的に取り組む。NICAM は JAMSTEC および連携研究機関において共同開発されており、地球シミュレータ等を用いた計算による、本課題に関連する多数の研究実績を積んでいる (Satoh et al. (2014)[1] 参照)。H29 には、これまでの集中観測を対象とする予測計算データを用いて、直接観測の困難な、高周波変動成分（積乱雲等）による水蒸気輸送の効果の定量化を行うとともに (Nasuno et al. 2017[2])、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](http://www.jamstec.go.jp/ymc/IOP_YMC-Sumatra_2017.html)

http://www.jamstec.go.jp/ymc/IOP_YMC-Sumatra_2017.html) や JAMSTEC 海洋地球研究船「みらい」北極航海 (MR17-05C) において、NICAM を用いた準実時間予測システムを実利用し、予測情報を発信した (Ikeda and Nasuno 2018[3])。地球環境変動において共に重要なスポットである海大陸や北極海を対象とする観測プロジェクトとの連携は、今後の展開の軸となる。

2. 季節内振動における積乱雲による水蒸気輸送効果の定量化

熱帯の季節内振動は、巨大な雲群を伴う熱帯の変動現象である (Madden and Julian 1971[4])。台風発生や豪雨・豪雪イベント他、世界各地の天候に広範な影響を及ぼすことから、延長予測の分野において近年重要視されている。季節内振動の巨大な雲群は、積乱雲（約 10 km, 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。しかし、巨大な雲群の全域において、

個々の積乱雲の効果を実験的に直接計測することは難しい。そこで本研究では、NICAMを用いた高解像度計算データを用いて、積乱雲による水蒸気輸送の効果を算出した (Nasuno et al. 2017[2])。CINDY2011 集中観測期間 (2011年10月 - 2012年1月) の予測計算では、インド洋域で水平格子間隔約 14km の領域集中格子を用い、Pre-YMC 観測期間 (2015年11 - 12月) の予測計算では、全球一様 7km 格子を用いて、National Centers for Environmental Prediction (NCEP) final analysis を内挿して初期値とし、1日1回の頻度で7日積分を行った。

図 1a, b に、それぞれ 2011年と 2015年の計算出力を用いて算出した、積乱雲内の鉛直方向による水蒸気輸送量の高度分布 (期間平均値) を示す。季節内振動の主成分を成す低周波変動 (7日平均値、破線) は、海面付近の豊富な水蒸気を持ち上げ、対流圏下層の湿潤化に寄与する。低周波成分の上昇流は潜熱加熱を通して強化され、継続的な水蒸気供給によって季節内振動の巨大な雲群を支える。

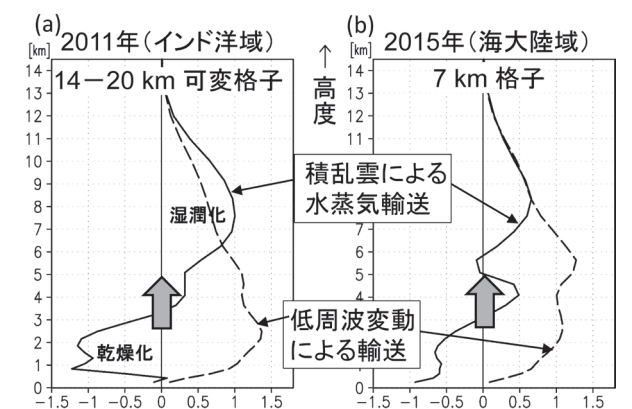


図1 予測計算データを用いた (a) インド洋上域 (60-90E, 10S-10N) (b) 海大陸 (120-150E, 12S-8N) における水蒸気鉛直輸送量の高度分布 (期間平均値)。実線: 低周波成分 (7日平均値) による輸送、破線: 高周波成分 (平均からの偏差) による輸送。(参考文献: Nasuno et al. 2017)。

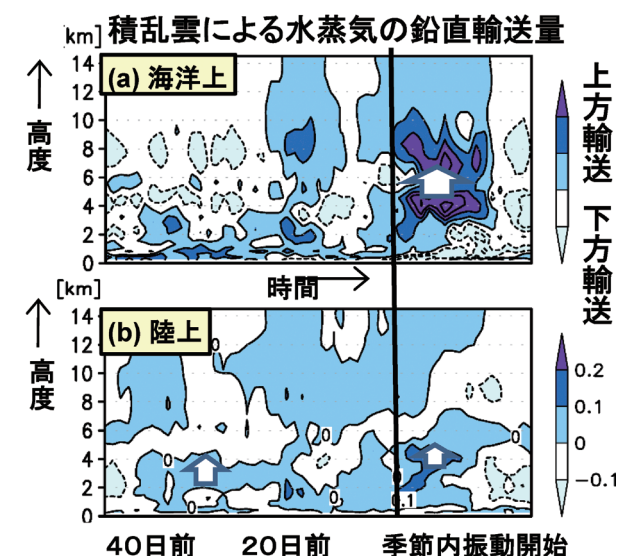


図2 予測計算データを用いた、海大陸 (90-120E, 12S-8N) における高周波変動による鉛直水蒸気輸送量の時間 - 高度図 (期間平均からの偏差)。(a) 海上 (b) 陸上)。

一方、積乱雲の主成分となる高周波変動 (7日平均からの偏差、実線) は、対流圏中層の強い上昇流によって水蒸気を上方に輸送し、短期間の強い潜熱加熱 (降水現象) と下層の乾燥化をもたらす。これは、巨大な雲群の形成・維持をむしろ妨げる傾向を意味する。

対流活動の活発な「海大陸」(インドネシア周辺の多島海域) では、海陸風や複雑な海陸分布、急峻な地形などの影響を受けた、短周期の降水現象が卓越する。これらの局所的な現象の影響は、特に陸上や沿岸部で大きく、季節内振動を変調させることが知られている。そこで、高周波変動の効果について、海大陸の海上と陸上での違いを調べた。図 2 に、2015年の計算データを用いた高周波変動成分による鉛直水蒸気輸送量の鉛直分布の時間変化 (期間平均からの偏差) を示す。海上では (図 2a) 季節内振動の発達に同期して水蒸気輸送が増大し、季節内振動に伴う対流の深まりを助長すると同時に、下層の湿潤化を抑制する傾向が見てとれる。一方陸上では (図 2b) 海上ほどの差異は見られない。この結果は、海上と陸上では局所的な対流活動と季節内振動の相互作用の強さが異なることを示唆する。今後、解析を拡充し、更に知見を深める必要がある。

3. 集中観測を対象とする準実時間予測計算

3.1 YMC-Sumatra 2017

2017年11月 - 2018年1月に実施された YMC-Sumatra 集中観測では、2015年度に構築した NICAM による実時間予測システムを用いて、全球 7km 格子の2週間予測計算 (1回/1日) および全球 14km 格子の1か月予測計算 (1回/1週間) を行った。公開用の WEB を立ち上げ、観測拠点周辺の降水・地上気象の6時間間隔情報、熱帯インド洋から西太平洋上にかけての概況の週間情報、季節内振動やコールドサージ現象等の予測情報を配信した (<http://nicamfcst.jamstec.go.jp/>)。2017年の観測では、海面水温が2015年とはほぼ反転した東西勾配をもつ環境場の中で、季節内振動や局所的な対流活動に2015年とは大きく異なる特徴が多くみられた。現在、予測計算データの評価および現象理解のための解析・感度計算等による仮説検証などを進めている。

3.2 「みらい」北極航海 (MR17-05C)

北極域は近年、急速に変化している (Mori et al. 2014[5])。本課題の発展的な取組みとして、北極域観測期間を対象とする予測計算および計算結果の検証を初めて行った。北極域では4-5日程度の時間スケールで総観規模場が変動し、高低気圧の発達に伴う降水イベント等が発生する。機動的観測との連携を想定し、処理速度を最優先して、14km 格子を用いた4日積分の予測計算を1日4回の頻度で実施した。第0近似として、海面水温は日平均の気候値に初期場の偏差を加えた値に固定し、海水については月平均の気候値から時間内挿して与えた。大気の初期値は NCEP final analysis から内挿した。予備調査の結果、積分時間と共に誤差が拡大するが (現業予報の約3

倍の速度)、大気初期場に現実の海洋・海水の影響が反映されているため、2-3日内の予測であれば、実利用に耐えるケースもあり、現業予報よりもシャープな降水分布が予測されるケースも見られた(図略)。

観測期間中(8月下旬-9月20日)、「みらい」周辺では数回の低気圧の発達が見られた。9月13日前後には、低気圧が発達しながら北上し、「みらい」上空を通過した。図3に「みらい」において観測された気圧と降水の時系列を示す。9月13日0000 UTC頃に気圧の低下と共に風速が増大し、追って数時間後に風速の極大と降水の強まりが見られる。図4、5に予測計算による広域分布と「みらい」付近での時系列を示す。予測計算は、低気圧とその北側での降水の発達および北西進を再現し(図4)、これに伴う地表風の強化(青)・気圧の低下(黒)・降水の増加(緑)の時間変化をよく捉えている(図5b)。鉛直積算した水蒸気量(赤)や海面フラックスなど(図略)も出力し、客観解析データとの比較を行った(図5a)。風速の極大に少し遅れて水蒸気量の極大が見られることから、

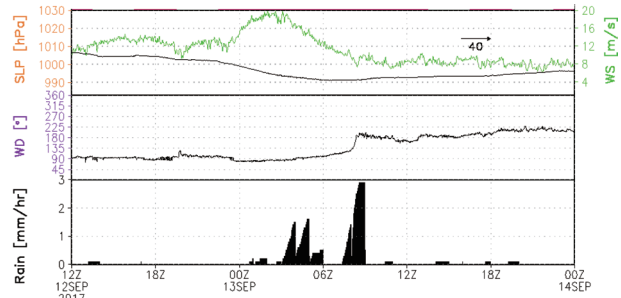


図3 みらいにより観測された海面高度気圧(赤)、海上風速(緑)風向(紫)、降水(黒)の時系列。佐藤和敏氏提供。

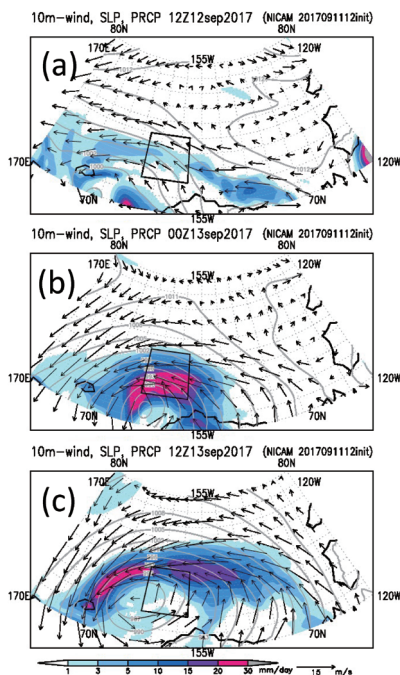


図4 NICAMにより予測された降水、10m高度風ベクトル、海面高度気圧(等値線)。(a)2017/9/12 120 UTC (b)9/13 0000 UTC (c)9/13 1200 UTC。(参考文献: Ikeda and Nasuno 2018)。

低気圧中心の北側の気圧傾度の極大域で下層風が強化され、中心側に水蒸気収束をもたらして降水域が形成されたことや、鉛直方向の傾きが比較的小さい構造であったことが示唆される。今後、低気圧の傾圧性や水蒸気の起源について詳しく調べ、北極域の降水現象の理解に繋げると共に、海面水温や海水の設定をより現実的にする必要がある。

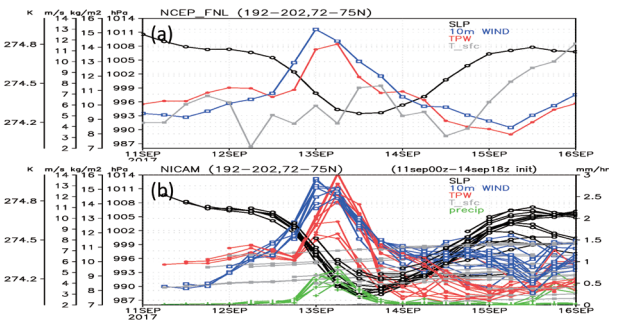


図5 (a) NCEP final analysis (b) NICAM 予測計算(9月11-14日初期値計算)における、観測域近傍(図4囲み域)の海面高度気圧(黒)、海上風速(青)、鉛直積算水蒸気量(赤)、2m高度気温(灰色)、降水(緑、NICAM)の時系列。

4. 今後に向けて

高解像度数値計算データの重要な用途の1つとして、直接計測の困難な個々の積乱雲による輸送効果の定量化に取り組んだ。今後、他のケースも加えて更に解析を進め、季節内振動だけでなく気候・気象モデルにおける積乱雲の効果の扱い(積雲パラメタリゼーション)の検証と改善に繋げたい。

現行の予測計算システムでは、スマトラ島で観測された降水の日周期変動(Yokoi et al. 2017[6])など個々の気象現象の再現性にはまだ課題点も多い(Nasuno et al 2016[7])。極域の降水現象の予測においては、雲物理過程等において特有の課題が想定される。様々な観測結果との比較検証を通して、多様な環境での雲・降水の生成過程の違いを適切に表現できるよう、モデルの改善を継続的に行っていく必要がある。世界気象組織(WMO)は、YMCと同期して「極域予測年」(The year of Polar Prediction, YOPP)を実施している。今後、極域研究への貢献も視野に入れ、局所現象等に固有のプロセスと遠隔作用等の相互バランスの両面に留意しつつ、現象理解・モデルの改善に取り組みたい。

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。北極航海の予測計算の実施に当たり、地球情報基盤センター情報システム部から、ジョブスケジューリング等においてご支援を受けた。「みらい」北極航海に関する研究は、猪上淳教授(国立極地研究所)、佐藤和敏特任助教(北見工業大学)との連携研究として行った。

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, 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., K. Kikuchi, M. Nakano, Y. Yamada, M. Ikeda, 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.
- [3] Ikeda, M., Nasuno, T., “Construction of near real-time forecast system using global nonhydrostatic model and actual uses at JAMSTEC intensive observations,” JAMSTEC Research and Development, Report, 2018. (in japanese) (in press)
- [4] Madden, R. and P. Julian, “Detection of a 40–50 day oscillation in the zonal wind in the tropical Pacific,” *Journal of the Atmospheric Sciences*, 28, 702–708, 1971.
- [5] Mori, M., M. Watanabe, H. Shiogama, J. Inoue, and M. Kimoto, “Robust Arctic sea-ice influence on the frequent Eurasian cold winters in the past decades ” *Nature Geoscience*, 7, 869-873, 2014.
- [6] 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,” *Monthly Weather Review*, 145, 3745-3761, 2017.
- [7] 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.

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^{*4,11}, Tatsuya Seiki^{*1}, Masanori Yoshizaki^{*1,12}, Masuo Nakano^{*1}, Tomoki Miyakawa^{*6}, Hisashi Yashiro^{*7}, Tsuyoshi Yamaura^{*7}, Hiroyasu Kubokawa^{*6}, Masahiro Sawada^{*13}, Mikiko Ikeda^{*1,5}, Ying-Wen Chen^{*6}, Roh Woosub^{*6}, Yoshiki Fukutomi^{*14}, Mikiko Fujita^{*1}, Tomoki Ohno^{*3}, Ruochao Zhang^{*5}, Kazuyoshi Kikuchi^{*15} and 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 Department of Ocean-Atmosphere Interaction Research, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, *5 Center for Earth Information Science and Technology, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, *6 Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo, *7 Advanced Institute 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, Risho University, *13 Meteorological Research Institute, *14 Institute for Space-Earth Environmental Research, Nagoya University, *15 International Pacific Research Center

The objective of this project is 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). Our major target is the phenomena observed during the JAMSTEC field campaigns. In FY2017, using the forecast dataset for the CINDY2011 and Pre-YMC field campaigns, we diagnosed the effects of high-frequency variability (e.g., cumulus convection) on the ISO and environment, and found significant upward transport of moisture by high-frequency variability, especially in the active period of the ISO. We also conducted near real-time forecasts using NICAM on the Earth Simulator during the YMC-Sumatra campaign (November 2017-January 2018) and “Mirai” Arctic Ocean Cruise (September 2017) with 7-14 km horizontal mesh sizes. In the short range forecasts for the Arctic Ocean Cruise, precipitation events associated with the development of low-pressure system was fairly simulated.

Keywords: global nonhydrostatic model, tropical intensive observation, Years of the Maritime Continent, intraseasonal oscillation, Arctic Ocean

1. Introduction

This project aims for better understanding of the mechanisms of meteorological disturbances of various spatio-temporal scales (e.g., diurnal to seasonal) and interactions among them. To achieve this goal, we use Nonhydrostatic Icosahedral Atmospheric Model (NICAM; Satoh et al. [1]), which represents cloud and precipitation processes over the globe in a unified framework. In the FY2017, our major mission was to conduct near real-time forecasts during the Years of the Maritime Continent (YMC) Sumatra campaign, led by JAMSTEC (http://www.jamstec.go.jp/ymc/IOP_YMC-Sumatra_2017.html) as the first field operation of the project. We performed 7-km (14-km)

mesh 14-day (month)-long forecasts using the NICAM forecast system and provided the forecast charts via web page (<http://nicamfest.jamstec.go.jp/>). Validation of the forecast results and the analysis to understand the observed phenomena are underway. In the following, we briefly report other two topics.

2. Quantification of moisture transport by cumulus convection in the ISO

Tropical Intraseasonal Oscillation (ISO) or the Madden-Julian Oscillation (MJO; Madden and Julian 1971[4]) is a large-scale convective disturbance (~10,000 km, 30-60 days), which consists of cumulonimbus (~10 km, 1 hour). The ISO is

currently a major target of extended-range forecasts because of its broad impacts on the world weather and climate. Latent heat release and moisture transport by the convection play an essential role in the development and maintenance of the ISO. However, the effects of individual cumulonimbus (e.g., vertical transport) are difficult to directly measure by observations. High-resolution simulation data is useful to quantify their effects. We explicitly calculated the moisture and heat budget by using the NICAM forecast dataset for CINDY2011 and Pre-YMC (November–December 2015) field campaigns. We run 7-day long forecasts once per day with the regionally stretched grid (14–20 km mesh size in the equatorial Indian Ocean) and global 7-km mesh size for CINDY2011 and Pre-YMC, respectively. Initial data was interpolated from National Centers for Environmental Prediction (NCEP) final analysis at 0000 UTC.

Figure 1a, b shows the period-mean vertical profile of the moisture transport by vertical transport of moisture for

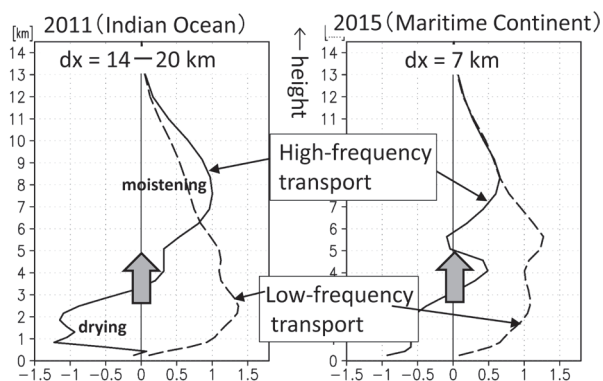


Fig. 1 Period mean vertical profiles of the vertical moisture advection associated with low-frequency (7-day-mean) variability (broken line) and the high-frequency variability (solid lines) in (a) CINDY2011 over the equatorial Indian Ocean domain and in (b) Pre-YMC (2015) over the Maritime Continent.

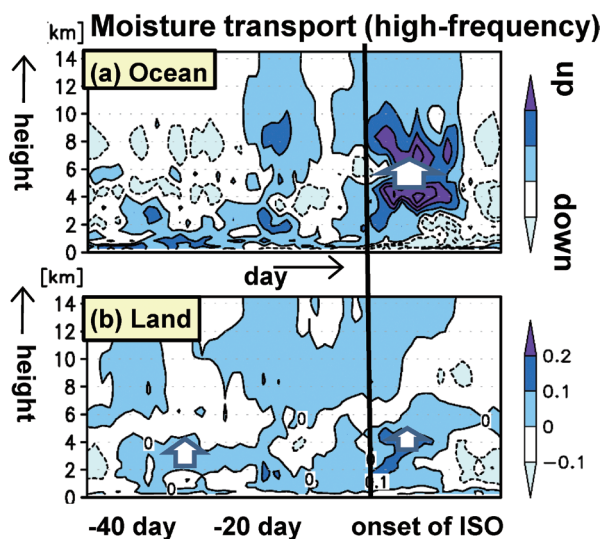


Fig. 2 Time-height section of anomalous vertical moisture advection (a) by the high-frequency variability over (a) ocean and (b) land in the Pre-YMC simulations over the Maritime Continent. The anomalies from the period mean values are plotted.

CINDY2011 and Pre-YMC, respectively. The low-frequency variability (i.e., 7-day-mean values, broken lines), which mainly accounts for the ISO, uplifts the rich moisture from surface to the lower troposphere. The low-frequency upward motion was reinforced by latent heat release, and it supported the large-scale organized convection through continuous moisture supply. In contrast, the high-frequency variability (deviations from the 7-day-mean, solid lines), which mainly accounts for the individual cumulonimbus, transported moisture upward by middle tropospheric strong updrafts within a short time, causing large latent heat release and intense precipitation, and dried the lower troposphere. This effect rather prevented the large-scale organization of convection.

In the Maritime Continent, where local forcing such as complicated land-sea distribution, steep orography, and land-sea breeze, causes pronounced convective activity with clear diurnal variation. These local effects are more significant along coast region over land, and often modulate the ISO behavior. We investigated the high-frequency transport of moisture over land and over ocean in the Maritime Continent using the Pre-YMC simulation data (Fig. 2). Over ocean, moisture transport was enhanced with ISO event development and aided the deepening of ISO convection, while it suppressed the moistening in the lower troposphere (Fig. 2a). Over land, such synchronization with ISO was not evident (Fig. 2b). This results suggests that interactions between local convection and the ISO are different over land and over ocean. Further investigation on this aspect is planned with various ISO cases.

3. Near real-time forecasts for “MIRAI” Arctic cruise (MR17-05C)

The Arctic region shows rapid change in recent years (Mori et al. 2014[5]). As an extension of our project, we conducted forecasts targeted for the Arctic region for the first time, and evaluated the results in comparison with the observation and analysis. Considering optimization of the targeted observation in the presence of the synoptic-scale disturbances with 4–5 day time scale in the Arctic region, we performed 4-day long forecasts four times per day with 14-km horizontal mesh. As a zeroth order approximation, sea surface temperature (SST) was fixed to daily climatology plus initial anomaly, and the sea ice was temporally interpolated from monthly mean climatology. Atmospheric initial condition was interpolated from NCEP final analysis. Because the initial atmospheric state includes responses to the real SST and sea ice, preliminary investigations found that the forecasts were useful for the 2–3 day lead time, although the error grew at around three times faster than operational forecasts. In some cases, precipitation distribution was more sharply simulated than in operational forecasts.

During the observation period (late August–20 September, 2017), low-pressure systems developed around “MIRAI” several times. Figure 3 shows a time series of sea level pressure (SLP),

surface wind speed, and precipitation observed on “MIRAI” around 13 September. Decrease of SLP occurred after 0000 UTC on 13 September, with rapid increase in wind speed, and followed by intense precipitation. The synoptic-scale fields in the NICAM forecast (initialized at 1200 UTC on 11 September; Fig. 4) reproduced development of the low-pressure system

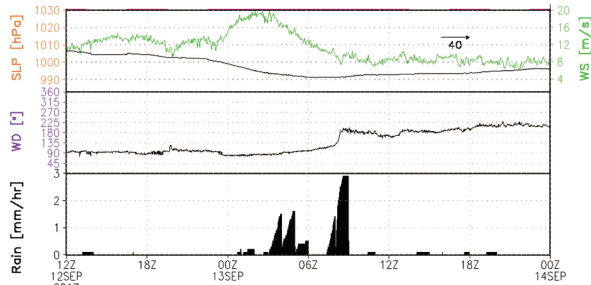


Fig. 3 Time-series of sea level pressure (SLP) (black, upper panel), wind speed (green, upper panel), wind direction (middle panel), and precipitation (bottom panel) observed by “MIRAI”.

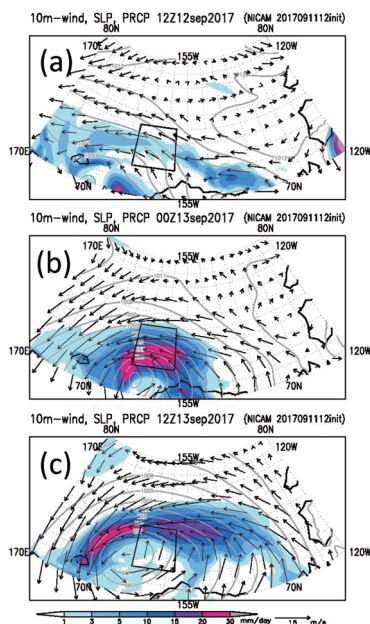


Fig. 4 Precipitation (color), SLP (gray lines), and wind vectors at (a) 1200 UTC, 12 September (b) 0000 UTC 13 September, and (c) 0600 UTC 13 September in the NICAM forecast initialized on 1200 UTC 11 September, 2017.

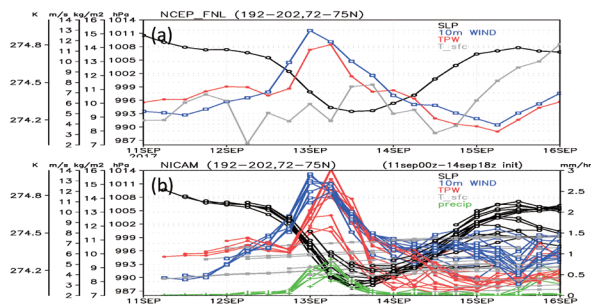


Fig. 5 Time-series of the SLP (black), 10-m wind speed (blue), precipitable water (red), and surface air temperature (gray) (averages in the square domain in Fig. 4) in (a) NCEP final analysis and in (b) the NICAM forecasts initialized on 11-14 September 2017, with precipitation (green).

and associated precipitation, as well as their northwestward movement. The predicted time series of the SLP, surface wind speed, and precipitation (Fig. 5b) well match those in “MIRAI” observations (Fig. 3) and analysis (Fig. 5a). Their time lag suggests that low-level convergence was formed on the center side of the steep SLP gradient region of the low pressure system, leading to moisture accumulation and precipitation there, and relatively small vertical tilt of the precipitation structure. In forthcoming studies, we plan to investigate baroclinicity of the low-pressure system and origin of the moisture in various cases, as well as updating the experimental setup to be more realistic.

4. Future study

In the FY2017, we made new attempts in the usage of the high-resolution global simulation dataset and in the study of the polar region. In the forthcoming studies, we plan to extend the analysis of the effects of high-frequency variability (e.g., cumulus convection) to improve their representation in general circulation models. Improvement of model processes to appropriately represent local and large-scale phenomena in a comprehensive framework will be also pursued.

Acknowledgement

All the simulations were conducted on the Earth Simulator. We acknowledge support from the Information Systems Department, CEIST, JAMSTEC with the job scheduling on the execution of the near real-time forecasts for the “MIRAI” Arctic cruise. The study on the “MIRAI” Arctic cruise was conducted in collaboration with Prof. Jun Inoue at National Institute of Polar Research and Prof. Kazutoshi Sato at Kitami Institute of Technology.

References

- [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, 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., K. Kikuchi, M. Nakano, Y. Yamada, M. Ikeda, 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.
- [3] Ikeda, M., Nasuno, T., “Construction of near real-time forecast system using global nonhydrostatic model and actual uses at JAMSTEC intensive observations,” JAMSTEC Research and Development, Report, 2018. (in Japanese) (in press)

- [4] Madden, R. and P. Julian, "Detection of a 40–50 day oscillation in the zonal wind in the tropical Pacific," *Journal of the Atmospheric Sciences*, 28, 702–708, 1971.
- [5] Mori, M., M. Watanabe, H. Shiogama, J. Inoue, and M. Kimoto, "Robust Arctic sea-ice influence on the frequent Eurasian cold winters in the past decades," *Nature Geoscience*, 7, 869-873, 2014.
- [6] 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," *Monthly Weather Review*, 145, 3745-3761, 2017.
- [7] 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.