

# 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<sup>\*1</sup>, 佐藤 正樹<sup>\*2,4</sup>, 富田 浩文<sup>\*1,5</sup>, 野田 暁<sup>\*2</sup>, 伊賀 晋一<sup>\*5</sup>, 三浦 裕亮<sup>\*1,6</sup>, 谷口 博<sup>\*7</sup>, 山田 洋平<sup>\*1</sup>, 柳瀬 亘<sup>\*4</sup>, 小玉 知央<sup>\*1</sup>, 原 政之<sup>\*1</sup>, 安永 数明<sup>\*3,8</sup>, 清木 達也<sup>\*2</sup>, 吉崎 正憲<sup>\*1,9</sup>, 中野満寿男<sup>\*1</sup>, 宮川 知己<sup>\*4</sup>, 八代 尚<sup>\*5</sup>, 山浦 剛<sup>\*5</sup>, 久保川陽呂鎮<sup>\*4</sup>, 沢田 雅洋<sup>\*10</sup>, 池田美紀子<sup>\*1</sup>, Ying-Wen Chen<sup>\*2</sup>, Roh Woosub<sup>\*4</sup>, 福富 慶樹<sup>\*1</sup>, 藤田実季子<sup>\*1</sup>, 大野 知紀<sup>\*4</sup>

\*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 気候変動リスク情報創生プロジェクトチーム

\*3 海洋研究開発機構 大気海洋相互作用分野

\*4 東京大学 大気海洋研究所

\*5 理化学研究所 計算科学研究機構

\*6 東京大学 理学部

\*7 神戸高専 一般科 (理科)

\*8 富山大学 理学部

\*9 立正大学 地球環境科学部

\*10 気象庁 気象研究所

本課題では、アジア域および世界各地に災害をもたらす日内から季節程度の気象現象（台風、熱帯波動、マッデン・ジュリアン振動、モンスーンなど）について、全球非静力学モデル（NICAM）を用いた高解像度数値計算を行うことにより理解を深めることを目的とする。特に、海洋変動（海面水温分布やエルニーニョ現象等）の環境場としての影響を重点的に調べる。課題の特色として、JAMSTEC の携わる集中観測を主な対象とし、観測・計算データを総合的に活用して現象の理解やモデルの検証を行う。H27年度は、地球シミュレータ上にNICAMを用いた全球高解像度の予測システムを構築し、11 - 12月に実施された海大陸域集中観測「Pre-YMC」において実利用を行った。観測期間中に見られた主な現象に関する予測計算の結果やその評価について概要を報告する。また、2011年に実施された国際集中観測「CINDY2011」期間に発生したマッデン・ジュリアン振動事例の発生・発達および東進機構に関する海面水温変化の季節進行の影響に関してNICAMを用いたアンサンブル計算により得られた新たな見解を提示する。

キーワード：全球非静力学モデル, 熱帯気象予測, 熱帯集中観測, マッデン・ジュリアン振動, 海大陸

## 1. 研究目的

本課題では、アジア域および世界各地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（台風、熱帯波動、マッデン・ジュリアン振動 [MJO]、モンスーンなど）について、全球非静力学モデル（NICAM; Satoh et al. 2014[1]）を用いた高解像度数値計算を行い、発生・発達のメカニズムや相互関係を明らかにすることを目的とする。NICAMは雲・降水に関する物理プロセスを詳細に計算する全球モデルであり、上記のような様々な時空間スケールの雲・降水を伴う激しい擾乱の内部構造や相互作用の調査に適している。JAMSTEC および連携研究機関において開発が進められ、これまでに地球シミュレータを用いた計算により世界的な研究実績を積んでいる。本課

題では、特に気象擾乱の環境場となる海洋変動（海面水温分布など）の影響を重点的に調べる。JAMSTEC の観測計画を対象とする計算を行い、観測・モデルデータを総合的に用いた現象理解およびモデルの検証を行うことにより、中期計画の達成を推進する。

## 2. 本年度の成果

### 2.1 夏季アジア域の季節内予測計算

夏季アジア域では、モンスーンの開始や活動の変調、夏季季節内擾乱（BSISO）、熱帯波動擾乱などが相互に影響を及ぼし合い、それらを背景として台風や集中豪雨等の激しい現象が発生する。特に、BSISOはその周期性や影響範囲の広さから気象予測において重要視されてい

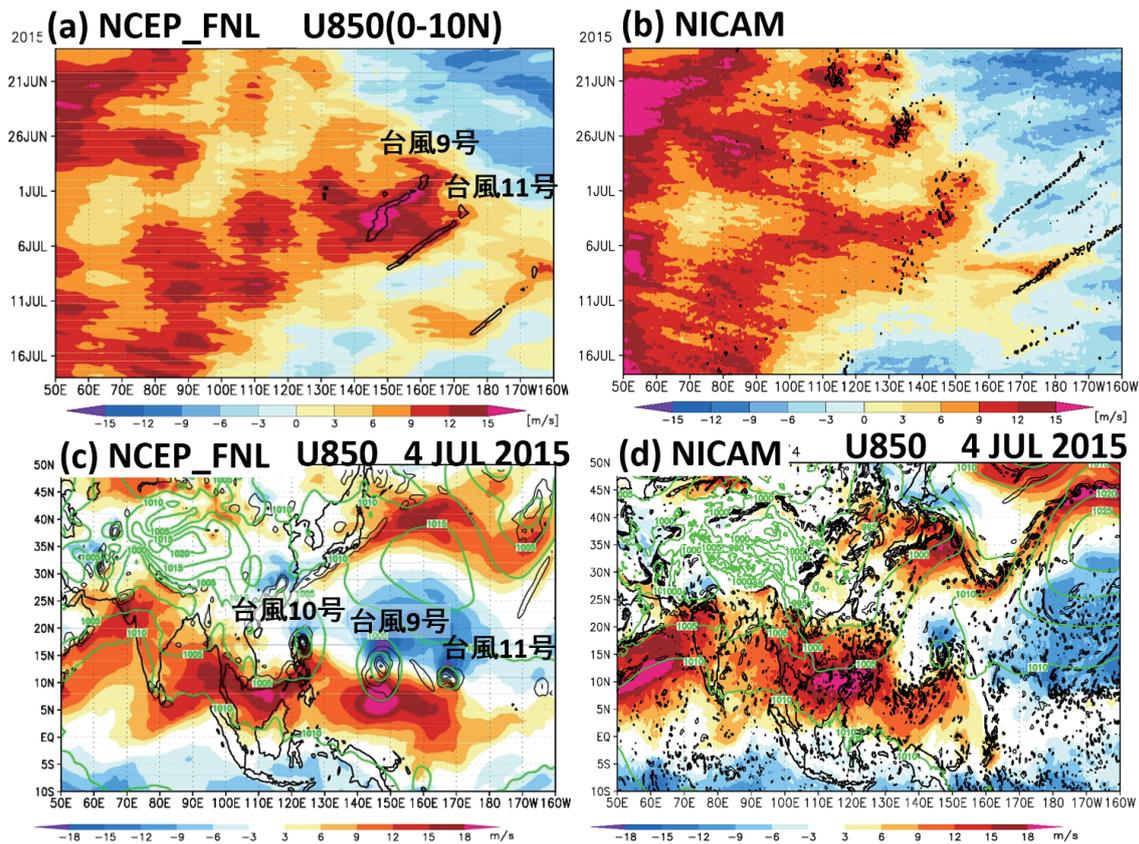


図1 (a, c) NCEP Final analysis および (b, d) NICAM を用いた再現計算(6月18日初期日)における850hPa東西風速の(a, b)時系列(0-10N 平均値)(b, d)7月4日の水平分布(日平均値)。等値線は渦度。

る。BSISO や台風の発生予測に関する知見を深めるため、NICAM を用いた予測計算システムを構築し(2.2において運用)、2015年夏季を対象とする1か月計算を行った。

2015年の6月後半には非常に強いBSISO現象があり、その対流活発期に台風9-11号が連続発生した。図1に下層東西風の時間変化および7月4日の水平分布を示す(等値線は渦度)。BSISOに伴う西風の強化と東進、その西風域での渦擾乱の発達を確認できる(図1a, c)。全球14km格子のNICAMによる6月18日を初期値とした再現計算ではBSISOに伴う西風の強化やその東端での渦擾乱の発生が概ね再現されており(図1b)、計算初期日から16日目における複数の台風の発生が捉えられている(図1d)。この結果は全球高解像度数値計算により2-3週間までの台風発生の予測可能性が期待される(Miura et al. 2007[2]; Nakano et al. 2015[3])という主張に新たな論拠を加える。問題点として、渦擾乱の発達が特に積分初期に過剰となる傾向(図1b)や西風の軸の北偏バイアス(図1d)も確認された。

## 2.2 集中観測 Pre-YMC 予測計算

海大陸は地球上で最も対流活動が活発な地域の1つであり、その気象・気候への影響はアジアをはじめ地球規模に及ぶ。そこで、数多くの研究が行われてきたが、未解決の課題が多い。その主たる原因として、急峻な地形や局所循環の影響を受けた日周期変動から、エル・ニーニョ現象やインド洋ダイポール現象など数年周期の大気海洋変動まで、異なる時空間スケールの現象が複雑に重なり合い、モデルによる再現や予測が難しいことが挙げられる。また、観測データの稀少性も大きな問題である。海大陸の多重スケール・多重プロセスの現象理解を目標に、H27年11-12月にスマトラ南西においてJAMSTEC中期計画の一環として「Pre-YMC」集中観測が実施された。Pre-YMCモデル班の活動として、全球7km格子を用いた1週間予測および14km格子を用いた1か月予測をES上で毎日行い、計算結果をインターネット([http://www.jamstec.go.jp/ymc/jpn/campaigns\\_files/nicam/nicam\\_g110\\_20151114.html](http://www.jamstec.go.jp/ymc/jpn/campaigns_files/nicam/nicam_g110_20151114.html))や電子メールを介して観測現場に配信した。また、週1回開催されるテレビ会議において概

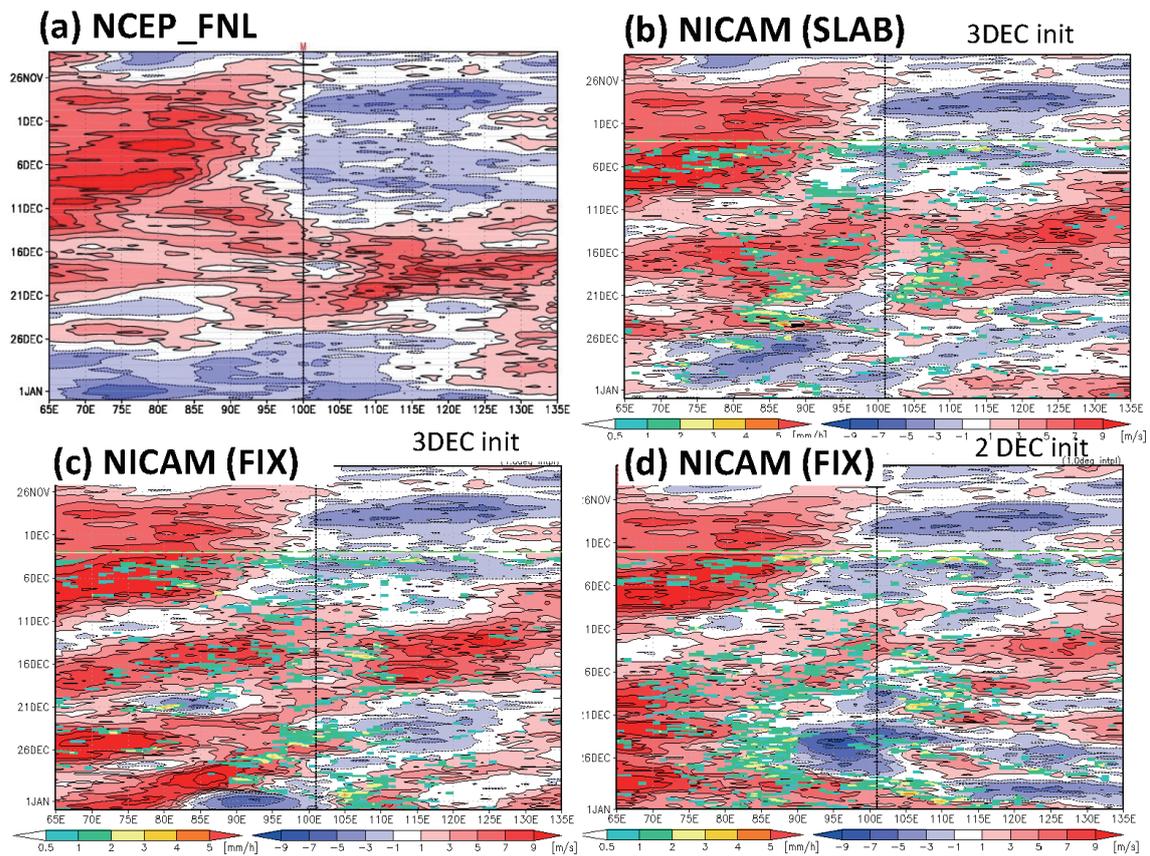


図2 850hPa 東西風速の時間—経度図 (5S-5N 平均値) (a) NCEP Final analysis, NICAMを用いた1か月予測計算 (b)12月3日初期日 (SST 予測) (c)12月3日初期日 (SST 推定値) (d) (c)に同じ、ただし12月2日初期日。計算開始10日前からの40日を表示。

況と予測結果に関する報告を行った。NICAMを用いた予測計算を行うことにより、熱帯インド洋から西太平洋にわたる広域における、季節～季節内スケールの変動を踏まえて現場の実況を把握し、情報共有することができた。海洋変動の気象擾乱へのインパクトを把握することを念頭に、海面水温 (SST) の設定について7km格子計算では2メンバー、14km格子では3メンバーのアンサンブルとした。図2に11月下旬から12月にかけての下層東西風の時間変化を示す。1か月予測では、11月までインド洋上に停滞していた西風域の12月半ばの急速な東進が、約2週間前から捉えられていた。アンサンブル計算の比較から、2～3週間前から予測結果の分散が大きくなりアンサンブルの重要性が高まることが分かった。また、SSTの違いの影響は (図2b, c)、初期日の違いによるばらつき (図2c, d) に比して有意でないことが示唆される。海大陸において卓越する日周期変動に関しては、7km格子モデルの計算では、スマトラ域の地形や局地循環を反映した日変化の特徴が大よそ再現されるものの、位相が3～6時間遅れることが分かった (図略)。中期計画において

2017 - 2018年に計画されているYMC国際観測プロジェクトに向けた課題として、高解像度化や地形の表現の改善などが挙げられる。

### 2.3 CINDY2011/DYNAMO アンサンブル再現計算

インド洋におけるMJO現象の発生や力学に関する理解を深めるために2011秋から冬にかけて、国際集中観測 the Cooperative Indian Ocean experiment on intraseasonal variability in the year 2011 (CINDY2011) / Dynamics of the Madden-Julian Oscillation (DYNAMO) が行われ、JAMSTEC研究船みらいや陸上拠点における観測が実施された (Yonayama et al. 2013[4])。本課題では、CINDY2011/DYNAMO期間中に連続して発生したMJO事例に関するアンサンブル再現計算を実施し、SSTの季節進行の影響について新たな見解を提示した (Miura et al. 2015[5])。

再現計算では、NICAMにおいて全球14km格子を用い、2011年10月12 - 16日を初期日とする5メンバーについてそれぞれ2か月積分を行った。結果のアンサンブル平均は、初めのMJO事例だけでなく次の事例の発生も捉えて

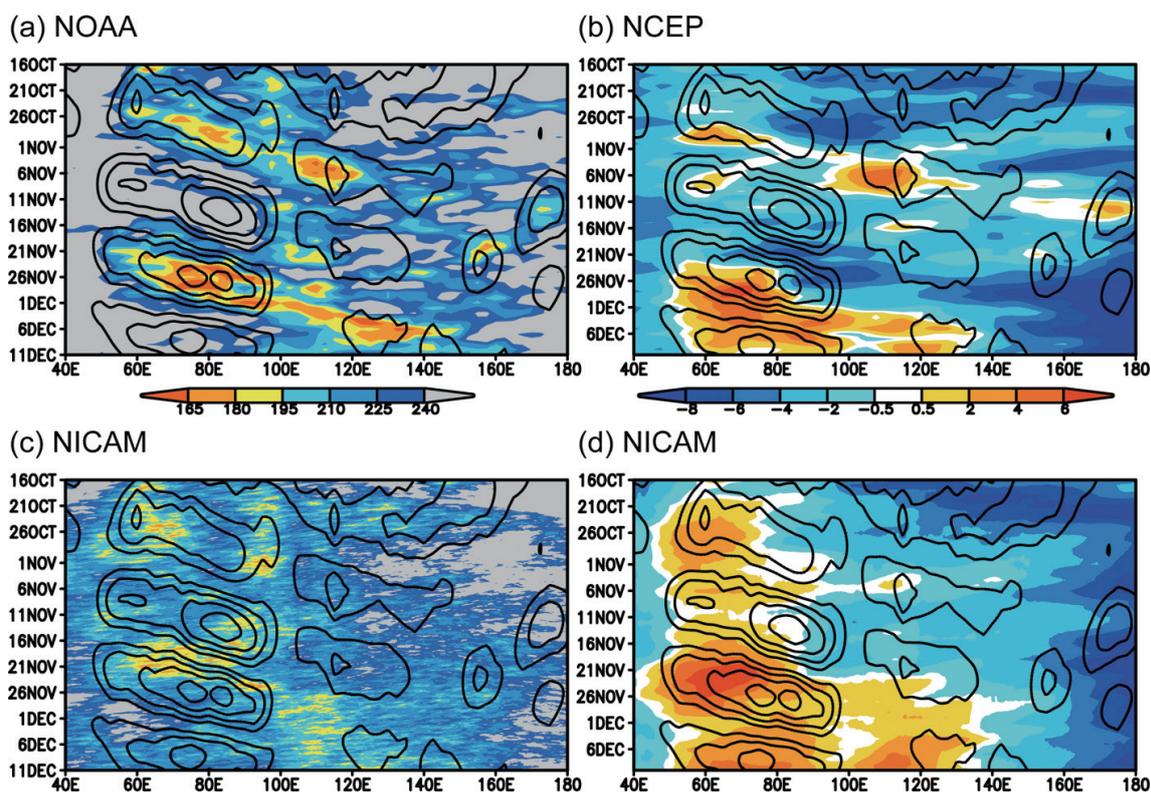


図3 (a, c) 外向き長波放射(OLR), (b, d) 850hPa 東西風速の時間—経度図 (5S-5N 平均値) (a) NOAA Interpolated OLR, (b) NCEP/NCAR reanalysis, (c, d) NICAM 標準実験のアンサンブル平均。等値線は NOAA OLR の 30 - 90 日周期成分。Miura et al. (2015, JMSJ), Fig. 5 より引用。

いた (図3)。SST の解析から、2つ目の MJO 事例の発生した 11 月下旬から 12 月初旬にかけて、SST が MJO の発生に好都合な分布、即ち、海洋大陸南東部においてインド洋よりも十分に高い状態にあったことが分かった。これらの結果に基づき、SST 分布の季節的推移が速い時期には、MJO は高 SST 域に追従する大規模な正の浮力域の東進に対する大気応答として現れるという見解を提示した。

#### 謝辞

Pre-YMC の予測計算の実施にあたってはジョブのスケジューリング等において多大なご協力を頂きました。深謝いたします。

#### 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., and 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] 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.
- [3] Nakano, M., T. Nasuno, M. Sawada, and M. Satoh, "Intraseasonal variability and tropical cyclogenesis in the western North Pacific simulated by a global nonhydrostatic atmospheric model," *Geophys. Res. Lett.*, 42, 2, 565-571, doi:10.1002/2014GL062479.
- [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., 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," *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 93A, 115-137, 2015.

# 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<sup>\*1</sup>, Masaki Satoh<sup>\*2,4</sup>, Hirofumi Tomita<sup>\*1,5</sup>, Akira T. Noda<sup>\*2</sup>, Shin-ichi Iga<sup>\*5</sup>, Hiroaki Miura<sup>\*1,6</sup>, Hiroshi Taniguchi<sup>\*7</sup>, Yohei Yamada<sup>\*1</sup>, Wataru Yanase<sup>\*4</sup>, Chihiro Kodama<sup>\*1</sup>, Masayuki Hara<sup>\*1</sup>, Kazuaki Yasunaga<sup>\*3,8</sup>, Tatsuya Seiki<sup>\*2</sup>, Masanori Yoshizaki<sup>\*1,9</sup>, Masuo Nakano<sup>\*1</sup>, Tomoki Miyakawa<sup>\*4</sup>, Hisashi Yashiro<sup>\*5</sup>, Tsuyoshi Yamaura<sup>\*5</sup>, Hiroyasu Kubokawa<sup>\*4</sup>, Masahiro Sawada<sup>\*10</sup>, Mikiko Ikeda<sup>\*1</sup>, Ying-Wen Chen<sup>\*2</sup>, Roh Woosub<sup>\*4</sup>, Yoshiki Fukutomi<sup>\*1</sup>, Mikiko Fujita<sup>\*1</sup> and Tomoki Ohno<sup>\*4</sup>

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

\*2 Project Team for Risk Information on Climate Change, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

\*3 Department of coupled Ocean-Atmosphere-Land Processes Research, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

\*4 Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo

\*5 Advanced Institute for Computational Science, RIKEN

\*6 School of Science, The University of Tokyo

\*7 Department of Science, Kobe City College of Technology

\*8 Department of Earth Science, University of Toyama

\*9 Faculty of Geo-environmental Science, Rissho University

\*10 Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency

The objective of this project is to deepen our understanding of diurnal to seasonal atmospheric variabilities (e.g., tropical cyclones, tropical waves, Madden-Julian Oscillation [MJO], monsoons) by high-resolution global simulations using Nonhydrostatic Icosahedral Atmospheric Model (NICAM). Focuses are on impact of oceanic variations on the atmosphere. The periods of JAMSTEC field campaigns are the main target of simulations. Two topics from the research results in FY2015 are reported: (1) A near real-time forecast system using NICAM was constructed on the Earth Simulator and forecasts were operated during the field campaign “Pre-YMC” (November-December, 2015). Forecast skill of the major observed events in our system are examined. (2) A new perspective on the impact of seasonal variation of sea surface temperature on the excitation and propagation of the MJO events that occurred during the CINDY2011/DYNAMO campaign in 2011, based on the ensemble simulation using NICAM, is proposed.

**Keywords:** global nonhydrostatic model, tropical weather forecast, tropical intensive observation, Madden-Julian Oscillation, Maritime Continent

## 1. Introduction

Meteorological disasters are in many cases accompanied with vigorous convection with severe precipitation, which are embedded in large-scale disturbances. Nonhydrostatic Icosahedral Atmospheric Model (NICAM; Satoh et al. [1]) was designed for global cloud-resolving simulations. This approach has potential advantages in accurate simulation of convective behavior and its interaction with the large-scale disturbances in a seamless framework. Here we use NICAM to gain our understanding of the multi-scale mechanisms of the convective disturbances, such as the Madden-Julian Oscillation (MJO) and local weather events.

## 2. Research Results

### 2.1 Near real-time forecasts of Pre-YMC field campaign

The Maritime Continent (MC) is a special region on the Earth with pronounced convective activity, and thus has great impacts on world weather and climate. The MC is characterized by strong air-sea interactions with clear diurnal variation. The convection over the MC is modulated by the MJO and vice versa. In order to gain our understanding of such multi-scale multi-process interactions over the MC, a field campaign “Pre-YMC” was operated by JAMSTEC in southwest Sumatra during November-December, 2015 (<http://www.jamstec.go.jp/>)

ymc/jpn/campaigns\_files/nicam/nicamj\_g110\_20151114.html). The project serve as a pilot study for the forthcoming international field project “YMC”. We have constructed a near real-time forecast system on the Earth Simulator using NICAM in this FY. The use of the Earth Simulator enables global 7-km (14-km) mesh week-long (month-long) forecasts with two (three) ensemble members with different settings of the ocean surface. The forecasts were daily (twice a week) performed using the NCEP final analysis and the results were sent to the observational sites via internet and e-mail. A merit of our forecast system is to cover a broad temporal and spatial range with explicit representation of moist convection and scale interactions.

Figure 1 shows a result of the month-long forecasts initialized in early December in comparison with the NCEP final analysis. Time-longitude sections of 850-hPa equatorial zonal wind are plotted. During November and early December, westerly peak is persisted over the Indian Ocean. In mid-December, abrupt eastward propagation of westerlies across the observational site occurred. This was related to intensification of the MJO event over the MC. The simulations capture this rapid change in the large-scale fields by approximately two weeks lead time (Fig. 1b-d). It is also found that the impact of different setting of the ocean surface (e.g., sea surface temperature, SST) on the large-

scale fields were not evident (Fig. 1b, c) and less than the impact of different initial date (Fig. 1c, d) within the 2-3 weeks lead time for this case. The diurnal variation of precipitation in the forecasts were also examined. The 7-km mesh forecasts successfully simulated the dependence of the amplitude of the diurnal mode relative to the daily mean value on the evolution of the MJO. The diurnal variation specific to the MC was better represented in the 7-km mesh simulations than in the 14-km mesh ones, but with 3-6 hours phase delay in comparison with observations.

## 2.2 Ensemble simulation of MJO events during the CINDY2011/DYNAMO

An international field project, the Cooperative Indian Ocean experiment on intraseasonal variability in the year 2011 (CINDY2011) / Dynamics of the Madden-Julian Oscillation (DYNAMO) was conducted to understand the initiation process and dynamics of the MJO by intensive observations over the Indian Ocean and to improve the representation of the MJO in numerical models (Yoneyama et al. 2013[4]; [http://www.jamstec.go.jp/iorgc/cindy/index\\_e.html](http://www.jamstec.go.jp/iorgc/cindy/index_e.html)). We performed an ensemble hindcast of a consecutive development of two MJO events observed during CINDY2011/DYNAMO to investigate influences of the seasonal SST change on the enhancement of the MJO activity (Miura et al. 2015 [5]).

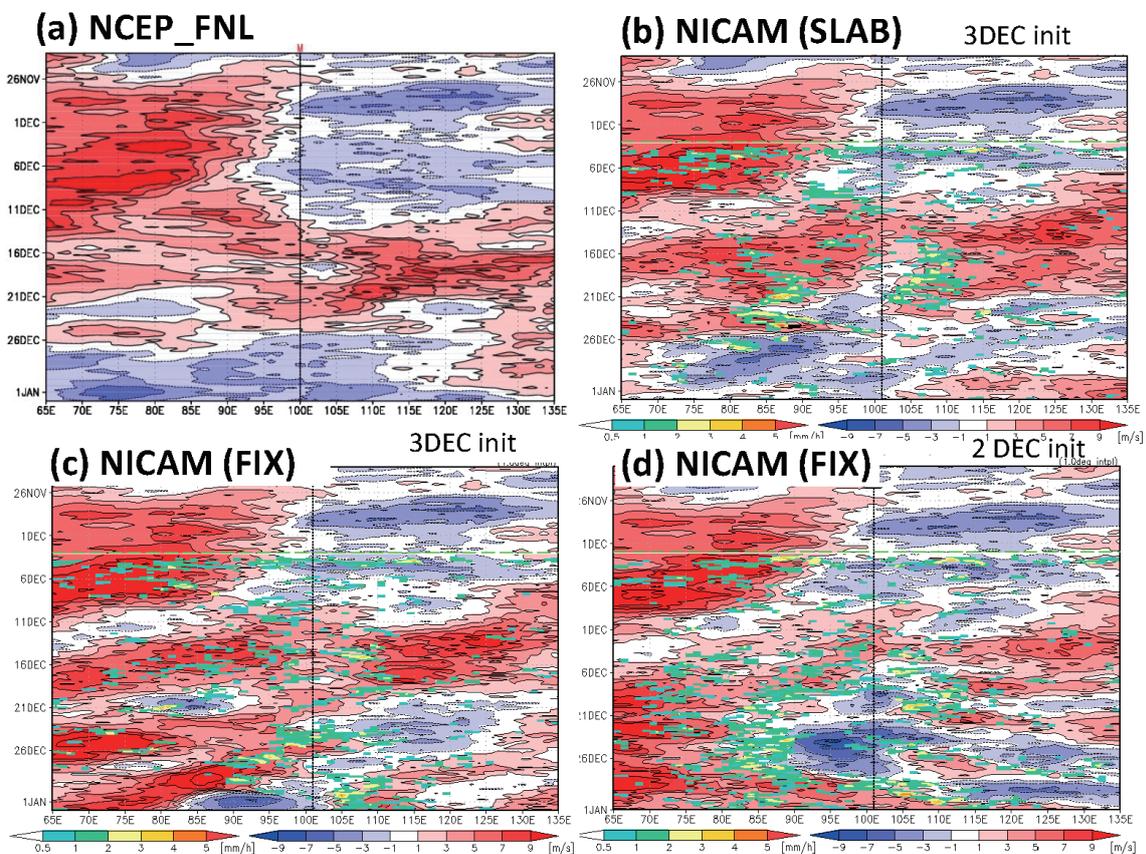


Fig. 1 Time-height sections of 850-hPa zonal wind averaged in 5S-5N. (a) NCEP final analysis and month-long forecasts using the 14-km mesh NICAM initialized on 3 December 2015 with sea surface temperature (b) predicted using the slab ocean model and (c) given by climatology plus anomaly on the initial date. (d) Same as (c), but initialized on 2 December 2015. The 40-day periods including the 10 days before the initial date (in NCEP final analysis) are displayed.

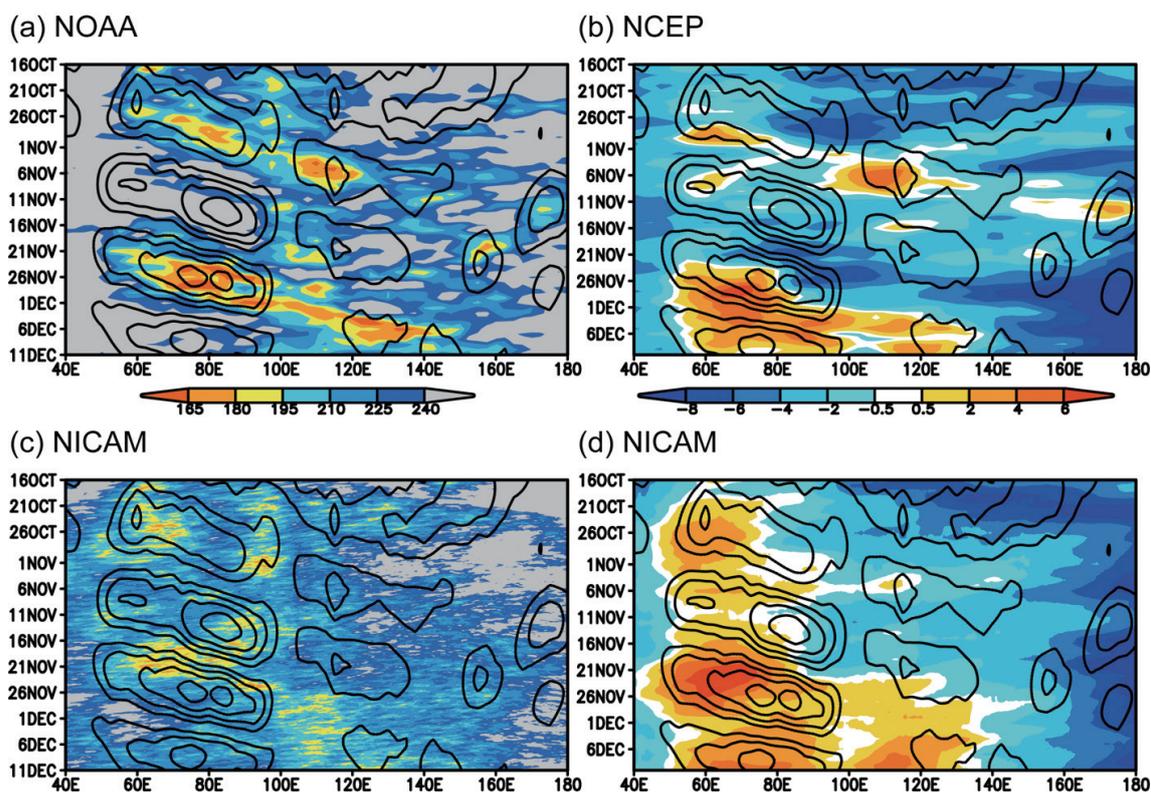


Fig. 2 Time-longitude sections of (a, c) OLR ( $\text{W m}^{-2}$ ) and (b, d) zonal wind ( $\text{m s}^{-1}$ ) averaged in  $10^{\circ}\text{S}$ - $10^{\circ}\text{N}$ . (a) The NOAA Interpolated OLR, (b) the NCEP/NCAR reanalysis, and (c, d) the ensemble mean of the control hindcasts. Contour lines show the 30–90 day filtered NOAA Interpolated OLR. Reproduced from Fig. 5 of Miura et al. (2015) with permission from the Meteorological Society of Japan.

The hindcast was composed of 5 members initialized with the one-day lag, using the observational data from 12 to 16 October 2011. The horizontal grid spacing was nearly 14 km and each member was numerically integrated for 60 days. It was found that the MJO events could be simulated marginally for nearly the two-months long (Fig. 2). We presented a hypothesis that the MJO-like eastward movement can be forced by the relatively fast seasonal change of SST such as in late November. The fast accumulation of moisture in the MC region possibly drives it.

### 3. Future study

The Pre-YMC campaign serve as a pilot study for the forthcoming international field project “The Years of Maritime Continent”, in which JAMSTEC is deeply engaged. The evaluations of the forecast skill of diurnal cycle over the MC and the MJO in our system find several points to be improved toward the YMC. For example, errors in diurnal phase of precipitation is expected to be fixed by the used of higher model resolution or more accurate representation of orography. The impacts of the air-sea interaction in the MJO regulation and migration in the MC region will be further investigated in these campaigns.

### Acknowledgements

The authors acknowledge the Earth Simulator administration office for the job scheduling during the Pre-YMC period, which enabled the daily update of the forecasts.

### 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., and 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] 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.
- [3] Nakano, M., T. Nasuno, M. Sawada, and M. Satoh, Intraseasonal variability and tropical cyclogenesis in the western North Pacific simulated by a global nonhydrostatic atmospheric model, *Geophys. Res. Lett.*, 42, 2, 565-571, doi:10.1002/2014GL062479.
- [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., 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,” 2015.

