-Report-

# Construction of near real-time forecast system using global nonhydrostatic model and actual uses at JAMSTEC intensive observations

Mikiko Ikeda<sup>1\*</sup> and Tomoe Nasuno<sup>2</sup>

The JAMSTEC's facilities and equipment, including research vessels, latest observation instruments, and supercomputers, enable us to approach research targets in marine and earth science both from the in-situ observations and the numerical simulations. We have developed a near real-time forecast system using Nonhydrostatic ICosahedral Atmospheric Model "NICAM" on the Earth Simulator, and operated the system in JAMSTEC intensive field campaigns. Near real-time forecasts were carried out during the research vessel "MIRAI" cruise over the Eastern Indian Ocean (MR17-08, MR15-04), as a part of an international campaign "YMC (Years of the Maritime Continent)", led by JAMSTEC. During the "MIRAI" Arctic Ocean cruise (MR17-05C), we carried out near real-time forecasts for the polar regions for the first time, as a pilot study toward optimization of targeted observation.

We plan to improve the forecast system by thorough validations in the forthcoming campaigns in various locations on the globe.

Keywords: near real-time forecast, intensive observation, nonhydrostatic model, supercomputer

Received 2 October 2017; Revised 8 March 2018; Accepted 16 March 2018

- 1 Center for Earth Information Science and Technology (CEIST), Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC)
- 2 Department of Seamless Environmental Prediction Research (DSEP), Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC)

\*Corresponding author:

Mikiko Ikeda Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology 3173-25 Showa-machi, Kanazawa-ku, Yokohama, Kanagawa 236-0001, Japan mikikoi@jamstec.go.jp

Copyright by Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

—報告—

# 全球非静力学モデルを用いた準実時間予測計算システムの構築と JAMSTEC集中観測における実利用

池田 美紀子1\*, 那須野 智江2

海洋研究開発機構は、船舶や各種観測機器およびスーパーコンピュータを有しており、現場観測と数値シミュレーショ ン双方から海洋地球科学の課題にアプローチすることができる. 我々は、全球非静力学モデルNonhydrostatic ICosahedral Atmospheric Model (NICAM)を用いた準実時間予測計算システムを地球シミュレータ上に構築し、機構による集中観測 プロジェクトにおいて実利用した. 即ちインドネシアを中心とする海大陸とその周辺海域を対象とする国際キャンペー ンYears of the Maritime Continent (YMC; 海大陸研究強化年)において、海洋地球研究船「みらい」による集中観測 間中 (MR17-08, MR15-04)、準実時間計算を実行し、現場の最新の情報や観測地点付近の気象予測情報を共有すること により、多面的な現象理解と観測の円滑な実行の一端を担った. また、「みらい」北極航海 (MR17-05C)では、機動的 観測の最適化を目的として、初めて極域を対象とする準実時間予測を実施した. 今後、様々な緯度帯での観測との比較 検証を積み重ね、予測技術の高度化に取り組む.

キーワード: 準実時間予測, 集中観測, 全球非静力学モデル, スーパーコンピュータ

2017年10月2日受領;2018年3月8日改訂稿受理;2018年3月16日採択

1 国立研究開発法人海洋研究開発機構 地球情報基盤センター

2 国立研究開発法人海洋研究開発機構 シームレス環境予測研究分野

\*代表執筆者:

池田 美紀子 国立研究開発法人海洋研究開発機構 〒236-0001 神奈川県横浜市金沢区昭和町3173番25 mikikoi@jamstec.go.jp

著作権:国立研究開発法人海洋研究開発機構

# 1. 背景

海洋研究開発機構では、船舶等を用いた地球環境の観 測・監視と、地球環境の数値モデリング・予測の双方にお いて世界的な研究を行っている. 観測と数値モデリング が一体となった研究開発の一例として、世界に先駆けて 開発を進めてきた全球非静力学モデルを応用し、準実時 間予測計算システムを構築して、海洋地球研究船「みら い」による熱帯域の洋上観測と組み合わせる研究体制を 敷いている. 我々はこれまで, CINDY2011 (Yoneyama et al., 2013), PALAU2013等の集中観測プロジェクトにおい て、PCクラスタを用いた準実時間予測を行い、予測技術 の向上に取り組んできた。2015年には、予測計算システ ムを地球シミュレータに移築し、大規模計算による全球 の準実時間予測を実現した(Nasuno et al., 2016b). 2017 年から2019年にかけて、インドネシアを中心とする海大 陸および周辺海域において国際キャンペーン Years of the Maritime Continent (YMC: 海大陸研究強化年)が実施さ れている.YMCは、観測と数値シミュレーションを駆使 し、海大陸域の気象・気候システムのマルチスケール変 動が全球に与える影響を理解し、予測技術を更に向上さ せることを目的とする.機構は地球環境の理解・監視の 一環として(第3期中期計画).熱帯域の「みらい」航海 による洋上観測および陸上観測(大気海洋相互作用研究 分野,地球環境観測研究開発センター他)を実施し,国 際集中観測プロジェクトをリードしている. 我々はモデ ル研究においてYMCに参画し、集中観測期間中、地球シ ミュレータを用いた予測計算を実施した.また、同シス テムを2017年の北極航海において運用し、初めて機動的 観測との連携を実現した.

本稿では、予測計算システムの概要と地球シミュレー タにおける予測計算の実施内容、観測船やその他の観測 拠点へのデータ配信について報告し、今後の課題につい て議論する.

# 2. 全球大気の準実時間予測計算システム

#### 2.1 全球非静力学モデル (NICAM)

本予測計算システムでは、全球非静力学モデル Nonhydrostatic ICosahedral Atmospheric Model (NICAM) (Satoh et al., 2014)を数値モデルとして使用している. NICAMは世界初の「全球雲解像モデル」として機構において開発が開始され、現在、シームレス環境予測モデル の土台として、研究開発が進められている。全球において個々の積乱雲(水平スケール約10km)を解像し、その カ学・物理過程を原理に忠実にシミュレートするために, 非静力学方程式系を基礎方程式とし(Satoh, 2002, 2003), 雲・降水の生成および変化過程は雲微物理モデルを用い て算出する(Tomita, 2008b).大規模な並列計算での演算 効率を高めるため,全球準一様な正二十面体格子を採用 している(Tomita and Satoh, 2004).これまでに,地球シ ミュレータ等を用いた計算に基づく研究により,特に熱 帯域の大規模な雲擾乱のメカニズムや内部構造(Miura et al., 2007, 2015; Miyakawa et al., 2012, 2014; Nakano et al., 2017a, 2017b; Nasuno et al., 2016a; Yamada et al., 2010, 2017)および全球の雲の気候場や物理特性(Kodama et al., 2012, 2015; Noda et al., 2015, 2016; Seiki et al., 2015) に関する知見が示されている.

#### 2.2 準実時間予測計算システム

予測計算システムにおいて,一連の処理は以下の手順 で実行される.データ取得および計算初期値の作成を定 期的に自動実行し,その後の配信までの処理は順次自動 的に実行される仕組みになっている.

- 1. 初期値作成に用いる解析データの取得
- 2. 計算初期値の作成
- 3. 予測計算の実施
- 4. ポスト処理 (データ変換・作図)
- 5. 配信(電子メール, WEB)

準実時間予測計算システムの初版(2010年)では、処理 時間の制約から領域集中格子(Tomita, 2008a)を採用し た.水平解像度は14~56kmという粗さであったが、2011 年10月~2012年1月の「みらい」航海を含む国際集中観測 CINDY2011(Yoneyama et al., 2013)において、インド洋 で発生した大規模雲擾乱Madden-Julian Oscillation(MJO) (Madden and Julian, 1971, 1972)の開始過程や発達・東進 をほぼ予測することができ、大規模な擾乱に伴う様々な スケールの気象現象をシミュレートできるNICAMの有 用性が示された.同時に、解像度が粗いことに起因する と思われる系統的なバイアスも検出された(予測精度の 検証結果についてはNasuno, 2013, Nasuno et al., 2017を 参照).

2015年には、初版での処理系列等を参考に、全球一様 格子版(標準)のNICAMを用いた一連のシステムを地 球シミュレータ上に新たに構築した.地球シミュレータ への移築に当たっては、格子系・計算規模・並列化のた めの領域分割方法等計算の枠組みの変更の他、計算機シ ステムの違いに対応した処理方法等、大幅な変更を施し た.ただし、モデルの方程式系や雲・降水の算出方法等 の「全球雲解像モデル」の本体は同一である.

#### 2.3 計算結果のWEB公開

海洋地球研究船「みらい」やその他の観測拠点への予 測計算結果の配信は、電子メールやインターネットを用 いて行った. CINDY2011では、米国の連携プロジェクト DYNAMOにデータを提供し、提供したデータはDYNAMO のWEBページで公開されると共に、毎日の概況・予測報 告にも活用された. 観測の現場では、測器の準備にかか る時間や資材の状況を鑑みながら観測スケジュールの調 整を行う. 実況や予測情報の確認に割くことのできる時 間は限られるので、見やすく、すぐに取り出せる形での情 報提供が望ましい. WEBを用いた配信は、この点で利便 性が高い. 2017年にはWEBページを独自に開設し、デー タ公開を開始した(Fig.1). 観測現場の通信事情はよい とは限らない. 現場の要望を極力取り入れ、図の容量を 縮小する、図をまとめて直接ダウンロードできるように する、等の工夫を施した.



Fig. 1. NICAM forecast WEB page. http://nicamfcst.jamstec.go.jp/ 図1. NICAM予測WEBページ. http://nicamfcst.jamstec.go.jp/

50

# 3. 地球シミュレータでの準実時間予測

#### 3.1 熱帯集中観測

2015年の「みらい」航海において、地球シミュレータを用 いたNICAMによる準実時間予測計算を実施した(Nasuno et al., 2016b). 準実時間予測計算の概要を以下に記す.

水平解像度	予測期間	実行頻度	メンバ数
約7km	1週間	1回/日	2メンバ
約14 km	1ヶ月	2回/週	2メンバ

初期値はNCEP解析データから内挿し,境界値の海面 水温には,日平均の気候値に計算初期日の偏差を加えた 場を与えた.また,海洋モデルとして実装されている単 層混合層モデルを用いて海面水温を与える計算も行った.

地球シミュレータでの使用ノード数および経過時間は, 各々の解像度について以下の通りである.

水平解像度	使用ノード数	経過時間
約7km	640(2,560並列)	約4時間
約14 km	160(640並列)	約7時間

観測期間中,12月11日には激しい降雨イベントが観測 された. Fig.2に海洋地球研究船「みらい」のレーダー画



Fig. 2. Cooperation with the tropical intensive observation project. (upper-left) MIRAI during the Eastern Indian Ocean cruise. (upperright) Precipitation observed by MIRAI radar on 11 Dec, 2015. (lowerright) Precipitation, clouds, and wind vectors simulated by NICAM on 11 Dec, 2015. (lower-left) Radiosonde observation at Bengkulu (land site).

図2. 熱帯集中観測プロジェクトとの連携.(上左)東インド洋航海中の みらい.(上右)2015年12月11日にみらいレーダーで観測された降水域. (下右)同日のNICAM予測計算結果における降水・雲と風ベクトル.(下 左)陸上観測拠点におけるラジオゾンデ観測. 像(中心が「みらい」の位置),およびNICAMによる予測 計算結果を示す.カラーバーは降雨強度を表示している. NICAMの図中の黒い丸がレーダーの範囲を表しており, 図より「みらい」が半径500km程度の大きな渦状の擾乱 の中に位置していたことが分かる.Fig.3に示すNICAM の予測結果(ゾンデ観測比較)は、各時刻において7つの 異なる初期日から計算した東西風の平均を取ったもので ある.下層の西風が強化された時期に、フィリピン東沖 では反時計周りの回転(低気圧回転)が強まって,12月 に台風27号が発生した.熱帯の気象はこのように幅の広 い空間スケールでダイナミックに変動しており、また日 本を含む中緯度域にまで影響を及ぼす.地球シミュレー タを用いることで、このように大規模な計算を行うこと が可能となり、観測期間中の気象変動を捉えることがで きた.

#### 3.2 北極集中観測

2017年には、初めての北極航海の観測支援として準実時間計算を実施した(国立極地研究所 猪上淳准教授 他と

の連携研究). 北極域では4-5日程度の時間スケールで総 観規模の場が変動し, 高低気圧の発達に伴う降水イベン ト等が発生する. 予備調査の結果, 初期値の影響がかな り残っている3日以内の予測であれば, 機動的観測にも ある程度利用できることが分かった. 時々刻々変化する 状況において, できる限り迅速に予測結果を出すことを 最優先し, 6時間おきにNCEP解析データを入手して, 短 期間の準実時間計算を実施した. 予測計算の概要を以下 に記す.

水平解像度	予測期間	実行頻度
約14 km	4日	4回/日

初期値や境界値の海面水温の与え方等,計算設定は基本的にこれまでの予測計算と同様にし,海氷については 第0近似として,気候値に固定した.単層混合層モデル を用いた計算は行っておらず,今後海洋が予測計算に与 える影響を調べる.

海洋地球研究船「みらい」の集中観測期間中,1日4回 の準実時間計算が完了次第,風や降雨,海面気圧の図を



Fig. 3. Time-height section of zonal wind at Bengkulu in (a) radiosonde observation, and in (b) NICAM simulation. (Averages of seven simulations with different initial date are plotted.) (c) Low-level zonal wind (color), wind vectors, OLR and vertical wind speed in NICAM simulation (average in 11–17 Dec, 2015).

図3. 東西風速のプンクルにおける時間一高度図. (a) ラジオゾンデ観測. (b) NICAM予測計算. (各時刻において異なる7つの初期日からの計算の平均を図示.) (c) NICAM予測計算における下層東西風速(色),風ベクトル(12/11-17平均値), OLR,および鉛直風速.

出典: Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (2017), Research and Development on Marine and Global Environmental Change Annual Report FY2015, Department of Seamless Environmental Prediction Research, Figs. 1 and 2 (p. 60).

描画し, WEBページにアップロードする形で「みらい」 に予測計算結果を配信した (Figs. 4a and 4b).

観測結果とNICAMによる予測計算結果を比較する (Fig.5).NICAMによる予測計算結果は,位置に関して 多少ずれが生じているものの,低気圧に伴って降雨帯が 発達する様子をよく捉えている.観測では低気圧の北側 で降雨帯が東西に伸びているが(Fig.5a),2日予測の計 算結果でも類似した形状が見て取れる(Fig.5c).

研究船の運航は,安全や様々なプロジェクトの目的を 総合して決められるものであり,激しい気象擾乱の中で の観測には、相応の準備が必要となる.気象観測的な好 機を把握することで有意義なデータを取得できる可能性 が高まる.今回の航海では、予測データの配信と予測結 果についての議論を継続的に行い、発達中の低気圧に伴 う降水域内でのゾンデ等による観測に成功した.

なお,この北極航海は,YMCと同期して実施されている WMOのプロジェクトThe Year of Polar Prediction (YOPP; 極域予測年)にも貢献するものである.



http://www.nipr.ac.jp/aerc/map.html

Fig. 4. Forecast charts. (a) Precipitation intensity (color), sea level pressure (contour) and 10-m wind vectors. (b) 10-m wind speed (color), sea level pressure (contour) and wind vectors. (c) Map of arctic area. A red-line frame indicates drawing area.

図4. 予測計算の結果(WEBの配信画像). (a) 降水強度(色),海面高度気圧(等値線)および10m高度の風ベクトル. (b) 10m高度の風速(色),海面高度 気圧(等値線)および風ベクトル. (c) 北極域の地図.赤枠は(a), (b)の描画範囲.



Fig. 5. Cooperation with the arctic intensive observation project. (a) (left) MIRAI during the Arctic Ocean cruise and radiosonde observation. (right) Precipitation observed by MIRAI radar on 13 Sep, 2017. (b) 10-m wind speed and wind vectors in NCEP\_FNL on 13 Sep, 2017. (c) The prediction results by NICAM [from the top, one day forecast, two day forecast, three day forecast] (left) 10-m wind speed (color), sea level pressure (contour) and wind vectors. (right) Precipitation intensity (color), sea level pressure (contour) and 10-m wind vectors.

図5. 北極集中観測プロジェクトとの連携. (a) (左) 北極海航海中のみらいラジオゾンデ観測. (右) 2017年9月13日にみらいレーダーで観測された降水 域. (b) 同日のNCEP解析データによる10m高度風速と風ベクトル. (c) NICAMの予測結果 [上から,1日予測,2日予測,3日予測]. (左) 10m高度の風速 (色),海面高度気圧(等値線)および風ベクトル. (右) 降水強度(色),海面高度気圧(等値線)および10m高度の風ベクトル.

# 4. 今後の課題・将来展望

以上のように、全球非静力学モデルNICAMを用いた 準実時間予測計算システムを構築し、地球シミュレータ 上で運用することにより、熱帯の大規模な雲擾乱MJOを 始め、様々な時空間スケールの大気変動を観測と並行し て準実時間に予測することが可能となった.また、極域 の気象現象の予測への適用の足掛かりを得た.

現在,世界各国の気象予報センターや研究機関の予測 結果がWEBで公開されており、最新の結果を誰でも自由 に閲覧することができる.しかし、それらが集中観測の 目的に副った出力変数・時空間分解能を有するとは限ら ない. 例えば, 北極航海で行った高頻度予測(6時間間 隔の初期値について順次実施)や海大陸域での日周期変 動を調べるための高頻度出力(1-3時間間隔)は、現業 予測情報として通常は提供されない.集中観測の目的に 副った計算データを用意することで、 気象イベントが発 生した際,周辺状況や発生要因の推定に直ちに利用でき る.これは、次に発生し得る気象イベントの時期や規模 の推定にも役立つ、観測地点上の天候は、気象衛星や総 観規模の場から予想される状況と異なることも少なくな い、ゾンデ観測のスケジューリング等において、総観規 模と観測点近傍双方のスケールをカバーする高解像度モ デルの予測は、他にない情報源と言える.

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)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., 2016b). 今後,様々な緯度帯での観測結果との比較検証を通して, 地球上の多様な環境での雲・降水の生成過程の違いを適 切に表現できるよう予測計算システムを改善していく必 要がある. 観測結果との比較による検証を積み重ね, 雲 を伴う大気擾乱にとって重要な、水蒸気や海面からの潜 熱・顕熱供給のモデリングおよびパラメータ設定、また雲 の自己組織化のメカニズムに深く関わる雲微物理過程や 乱流過程等の検証・課題点の把握、および改善に向けた 試みを継続して行う.長期予測においては、海洋の影響 が本質的に重要となる (Miyakawa et al., 2017). NICAM には単層混合層モデルが実装されているが、現在開発中 のNICAMと全球海洋モデルを結合した大気海洋結合モ デルを用いた検証も行っていく.また,海水や海氷の設 定を高度化し、これらが極域の大気に対して及ぼす影響 の理解を深める.

将来,更に実験・配信環境が整備され,計算機システ ムが増強されれば,アンサンブルメンバ数を増やした予 測計算や,高解像度アニメーション画像等の容量の大き な画像データの配信も可能になり,観測期間中に発生し た現象の早期解析や気象イベントの予測の改善が期待される. ゾンデ観測等により取得されたデータは, Global Telecommunication System (GTS; 全球通信システム)を通じて客観解析データの同化システムに取り込まれ,現行の予測計算システムの初期値に反映されている.将来展望として,観測データを直接同化した予測計算の実施や,データ同化のインパクトの高い観測点の予測情報配信-観測サイクルの実現を念頭に,研究・開発を進める.

### 謝 辞

本稿を作成するにあたり,東京大学佐藤正樹教授,宮川 知己特任助教,国立極地研究所猪上淳准教授,タスマニ ア大学佐藤和敏特別研究員,神戸高専谷口博准教授,海 洋研究開発機構米山邦夫分野長,森修一分野長代理,勝 侯昌己グループリーダー代理,横井覚主任研究員,城岡 竜一主任技術研究員,YMC参加メンバー(大気海洋相互 作用研究分野,地球環境観測研究開発センター他),小玉 知央ユニットリーダー,山田洋平博士研究員,中野満寿 男技術研究員,NICAM開発チーム(東京大学大気海洋研 究所,理化学研究所計算科学研究機構,海洋研究開発機 構他)にご支援ご協力を賜りました.謹んで御礼申し上 げます.

本成果は地球シミュレータを利用して得られたもので す(所内課題「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」).地球シミュレータでの実行では、地 球情報基盤センター情報システム部にもご協力頂きまし た.ご協力に感謝致します.

# 参考文献

- Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (2017), Research and Development on Marine and Global Environmental Change Annual Report FY2015, 60.
- Kodama, C., A.T. Noda, and M. Satoh (2012), An Assessment of the cloud signals simulated by NICAM using ISCCP, CALIPSO, and CloudSat satellite simulators, *J. Geophys. Res.*, 117, D12210, doi:10.1029/2011JD017317.
- Kodama, C., Y. Yamada, A.T. Noda, K. Kikuchi, Y. Kajikawa, T. Nasuno, T. Tomita, T. Yamaura, H.G. Takahashi, M. Hara, Y. Kawatani, M. Satoh, and M. Sugi (2015), A 20-Year Climatology of a NICAM AMIP-Type Simulation, J. Meteor. Soc. Japan, 93, 393–424, doi:10.2151/jmsj.2015–024.

- Madden, R.A. and P.R. Julian (1971), Detection of a 40–50 Day Oscillation in the Zonal Wind in the Tropical Pacific, *J. Atmos. Sci.*, 28, 702–708.
- Madden, R.A. and P.R. Julian (1972), Description of Global-Scale Circulation Cells in the Tropics with a 40–50 Day Period, *J. Atmos. Sci.*, 29, 1109–1123.
- Miura, H., M. Satoh, T. Nasuno, A.T. Noda, and K. Oouchi (2007), A Madden-Julian Oscillation Event Realistically Simulated by a Global Cloud-Resolving Model, *Science*, 318, 1763–1765.
- Miura, H., T. Suematsu, and T. Nasuno (2015), 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, doi:10.2151/jmsj.2015–055.
- Miyakawa, T., Y.N. Takayabu, T. Nasuno, H. Miura, M. Satoh, and M.W. Moncrieff (2012), Convective momentum transport by rainbands within a Madden–Julian oscillation in a global nonhydrostatic model with explicit deep convective processes. Part I: Methodology and general results, J. Atmos. Sci., 69, 1317–1338.
- Miyakawa, T., M. Satoh, H. Miura, H. Tomita, H. Yashiro, A.T. Noda, Y. Yamada, C. Kodama, M. Kimoto, and K. Yoneyama (2014), Madden-Julian Oscillation prediction skill of a new-generation global model demonstrated using a supercomputer, *Nat. Commun.*, 5, 3769, doi:10.1038/ncomms4769.
- Miyakawa, T., H. Yashiro, T. Suzuki, H. Tatebe, and M. Satoh (2017), A Madden-Julian Oscillation event remotely accelerates ocean upwelling to abruptly terminate the 1997/1998 super El Niño, *Geophys. Res. Lett.*, 44, 9489– 9495, doi:10.1002/2017GL074683.
- Nakano, M., A. Wada, M. Sawada, H. Yoshimura, R. Onishi, S. Kawahara, W. Sasaki, T. Nasuno, M. Yamaguchi, T. Iriguchi, M. Sugi, and Y. Takeuchi (2017a), Global 7 km mesh nonhydrostatic Model Intercomparison Project for improving TYphoon forecast (TYMIP-G7): experimental design and preliminary results, *Geosci. Model Dev.*, 10, 1363–1381, doi:10.5194/gmd-10-1363-2017.
- Nakano, M., H. Kubota, T. Miyakawa, T. Nasuno, and M. Satoh (2017b): Genesis of Super Cyclone Pam (2015), Modulation of Low-Frequency Large-Scale Circulations and the Madden–Julian Oscillation by Sea Surface Temperature Anomalies, *Mon. Wea. Rev.*, 145, 3143– 3159, doi:10.1175/MWR-D-16-0208.1.
- Nasuno, T. (2013), Forecast Skill of Madden-Julian Oscillation Events in a Global Nonhydrostatic Model during the CINDY2011/DYNAMO Observation Period, Scientific Online Letters on the Atmosphere, 9, 69–73, doi: 10.2151/sola.2013-016.

- Nasuno, T., H. Yamada, M. Nakano, H. Kubota, M. Sawada, and R. Yoshida (2016a), Global cloud-permitting simulations of Typhoon Fengshen (2008), *Geoscience Letters*, 3(32), doi:10.1186/s40562-016-0064-1.
- 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 (2016b), Study of Cloud and Precipitation Processes Using a Global Cloud Resolving Model, *Annual Report of the Earth Simulator*, April 2015-March 2016, 175–181.
- Nasuno, T., K. Kikuchi, M. Nakano, Y. Yamada, M. Ikeda, and H. Taniguchi (2017), Evaluation of the Near real-time Forecasts Using a Global Nonhydrostatic Model during the CINDY2011/DYNAMO, *J. Meteor. Soc. Japan*, 95, 345–368, doi:10.2151/jmsj.2017–022.
- Noda, A.T., M. Satoh, Y. Yamada, C. Kodama, T. Miyakawa, and T. Seiki (2015), Cold and Warm Rain Simulated Using a Global Nonhydrostatic Model without Cumulus Parameterization, and their Responses to Global Warming, J. Meteor. Soc. Japan, 93, 181–197, doi: 10.2151/jmsj.2015-010.
- Noda, A.T., T. Seiki, M. Satoh, and Y. Yamada (2016), High cloud size dependency in the applicability of the fixed anvil temperature hypothesis using global nonhydrostatic simulations, *Geophys. Res. Lett.*, 43, 2307–2314, doi:10.1002/2016GL067742.
- Satoh, M. (2002), Conservative Scheme for the Compressible Nonhydrostatic Models with the Horizontally Explicit and Vertically Implicit Time Integration Scheme, *Mon. Wea. Rev.*, 130, 1227–1245.
- Satoh, M. (2003), Conservative Scheme for a Compressible Nonhydrostatic Model with Moist Processes, *Mon. Wea. Rev.*, 131, 1033–1050.
- Satoh, M., H. Tomita, H. Yashiro, H. Miura, C. Kodama, T. Seiki, A.T. Noda, Y. Yamada, D. Goto, M. Sawada, T. Miyoshi, Y. Niwa, M. Hara, T. Ohno, S. Iga, T. Arakawa, T. Inoue, and H. Kubokawa (2014), The Non-hydrostatic Icosahedral Atmospheric Model: description and development, *Progress in Earth and Planetary Science*, 1(18), doi:10.1186/s40645-014-0018-1.
- Seiki, T., C. Kodama, A.T. Noda, and M. Satoh (2015), Improvement in Global Cloud-System-Resolving Simulations by Using a Double-Moment Bulk Cloud Microphysics Scheme, J. Climate, 28, 2405–2419, doi:10.1175/JCLI-D-14-00241.1.
- Tomita, H. (2008a), A Stretched Icosahedral Grid by a New Grid Transformation, *J. Meteor. Soc. Japan*, 86A, 107–119.
- Tomita, H. (2008b), New Microphysical Schemes with Five and

Six Categories by Diagnostic Generation of Cloud Ice, *J. Meteor. Soc. Japan*, 86A, 121–142.

- Tomita, H. and M. Satoh (2004), A new dynamical framework of nonhydrostatic global model using the icosahedral grid, *Fluid Dynamics Research*, 34, 357–400.
- Yamada, Y., K. Oouchi, M. Satoh, H. Tomita, and W. Yanase (2010), Projection of changes in tropical cyclone activity and cloud height due to greenhouse warming: Global cloud-system-resolving approach, *Geophys. Res. Lett.*, 37, L07709, doi:10.1029/2010GL042518.
- Yamada, Y., M. Satoh, M. Sugi, C. Kodama, A.T. Noda, M. Nakano, and T. Nasuno (2017), Response of tropical cyclone activity and structure to global warming in a high-resolution global nonhydrostatic model, *J. Clim.*, 30, 9703–9724, doi:10.1175/JCLI-D-17-0068.1.
- Yokoi, S., S. Mori, M. Katsumata, B. Geng, K. Yasunaga, F. Syamsudin, Nurhayati, and K. Yoneyama (2017), Diurnal Cycle of Precipitation Observed in the Western Coastal Area of Sumatra Island: Offshore Preconditioning by Gravity Waves, *Mon. Wea. Rev.*, 145, 3745–3761.
- Yoneyama, K., C. Zhang, and C. N. Long (2013), Tracking Pulses of the Madden-Julian Oscillation, *Bull. Amer. Meteor.* Soc., 94, 1871–1891.

#### 略語

56

CINDY2011: Cooperative Indian Ocean experiment year 2011 intraseasonal variability in the on <http://www.jamstec.go.jp/iorgc/cindy/index\_e.html> DYNAMO: Dynamics of the Madden-Julian Oscillation <http://www.eol.ucar.edu/projects/dynamo/> NCEP: National Center for Environmental Prediction PALAU2013: Pacific Area Long-term Atmospheric observation for Understanding of climate change 2013 WMO: World Meteorological Organization