

2. 「京」による全球大気研究の最前線

佐藤正樹^{*1}・宮本佳明^{*2}・小玉知央^{*3}
宮川知己^{*4}・中野満寿男^{*3}・山田洋平^{*3}

1. はじめに

「京」は理化学研究所計算科学研究機構 (AICS) において2012年9月から共用が開始された10PFのスーパーコンピュータであり、2015年7月の時点でスーパーコンピュータランキング Top500の4位の計算性能をもつ。本稿では、「京」による全球大気研究の最前線として、全球非静力学モデル NICAM (Non-hydrostatic Icosahedral Atmospheric Model; Tomita and Satoh 2004; Satoh *et al.* 2008, 2014) によるシミュレーション研究について紹介する。「京」以前の NICAM による研究は、主として地球シミュレータ (海洋研究開発機構) を用いたもので、メッシュサイズ約3.5 km が最高解像度であり、計算期間1ヶ月程度のケーススタディ的なアプローチが主体であった。最初の3.5 km メッシュ全球実験は、Tomita *et al.* (2005) による水惑星実験であり、引き続き Miura *et al.* (2007) によりマッデン・ジュリアン振動 (MJO) の再現実験を行った。これらの研究により、NICAM のような高解像度全球非静力学モデルによるシミュレーション結果は以下のような特徴をもち、これらの研究にアドバンテージを持つことが示された: 1) 数 km の積雲スケールから、惑星スケールの MJO 等の対流システムのマルチスケール構造が自然と再現される。2) 日変化や地形性降雨のようなメソスケールの対流システムの特徴が全球にわたって自

然と再現される。3) MJO や北半球夏季の季節内振動 (BSISO) の組織化、伝播が現実的に再現される。4) 雲物理過程によって雲が生成されることで、雲のシミュレーション結果と人工衛星観測との比較が可能である。また、高解像度数値計算データを解析することによって、観測のみからでは描像を得ることが難しい現象について理解を得ることができる。例えば、Miyakawa *et al.* (2012) は Miura *et al.* (2007) の計算データを用いて、MJO に伴う対流運動量輸送の3階建ての構造を発見した。

地球シミュレータよりも一回り高速な「京」の登場により、全球高解像度モデルについて次のような方向性の研究を進めることが可能になった。第一に、さらなる高解像度計算が可能になり、870 m メッシュの実験を実施し解析した (Miyamoto *et al.* 2013, 2015)。第二に、より長期間の積分が実施可能になり、数十年積分により、気候特性を議論することが可能になった (Kodama *et al.* 2015; Satoh *et al.* 2015)。第三に、季節内変動のスケールの現象についてアンサンブル実験を行うことが可能になった。Miyakawa *et al.* (2014) が北半球冬季の MJO についてのアンサンブル実験を、Nakano *et al.* (2015) が北半球夏季の北西太平洋における台風の発生過程についての実験を、Kajikawa *et al.* (2015) がインド夏季モンスーンのオンセットに関する実験を実施した。本稿では、これらの3つの方向性についての研究を紹介する。

2. 870 m メッシュ解像度での全球計算

2.1 はじめに

さらなる高解像度化の実験として、「京」の20,480 ノード (約16万コア) を用いて、全球を870 m メッシュで離散化したシミュレーションを行った。このよ

*1 (連絡責任著者) 東京大学大気海洋研究所,
satoh@aori.u-tokyo.ac.jp

*2 理化学研究所計算科学研究機構,

*3 海洋研究開発機構,

*4 東京大学大気海洋研究所,

© 2017 日本気象学会

うな1 km以下のメッシュによる全球シミュレーションは高解像度全球シミュレーションの一つの目標点であり、対流雲がより現実的に表現可能になることが期待されていた。この解像度は原稿作成時点（2015年8月）でも世界で最も高い解像度である。12時間の積分を行うために要した計算時間は約60時間、初期・境界値の作成から計算実行のための待ち時間も含めると数年の時間を要した。

1 km以下の格子サイズでの全球シミュレーション結果から、深い湿潤対流（以下では対流とする）に着目する。対流は鉛直方向にエネルギー・運動量を輸送する役割を担っており、それ自身で豪雨災害をもたらす。また、台風など雲擾乱の構成要素でもあるため、大気の数値計算においては、対流を解像できるかが非常に重要となる。そこで我々は、地球全体での対流の解像度依存性を議論し（Miyamoto *et al.* 2013）、雲擾乱ごとの対流の性質の違いを調べ（Miyamoto *et al.* 2015）、さらに対流が生じる前の場を明らかにした（Miyamoto *et al.* 2016）。

2.2 実験設定

NICAMを用いて、6種類の水平メッシュサイズで積分を行った。まず28.0, 14.0, 7.0, 3.5 kmの各解像度で3日間の積分を行い、得られた結果を2倍の解像度の格子点に内挿したデータを作成した。これらを初期値にして12時間の積分を行った。ここで、最高解像度（870 m）の実験は3.5 kmの結果を基にした。このとき、凝結や蒸発などの雲物理過程には氷相まで解くシングルモーメントバルクモデルNSW6（Tomita 2008）、境界層スキームには乱流運動エネルギークロージャーモデルMYNN2.5（Nakanishi and Niino 2004；Noda *et al.* 2010）、地表面フラックスを計算するスキームとしてLouis（1979）、短波・長波の放射フラックスを計算するスキームとしてMSTRNX（Sekiguchi and Nakajima 2009）を用いた。積雲パラメタリゼーションは使用していない。鉛直方向には高度30 kmまで94層に分割し、下層ほど細かな解像度になるよう設定した。実験設定の詳細についてはMiyamoto *et al.*（2013）を参照されたい。

2.3 結果

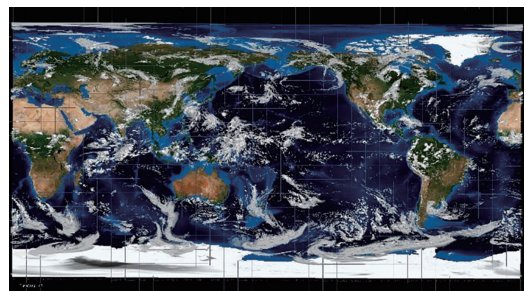
第1図に水物質（水蒸気以外）の混合比の全球分布を示す。全球の雲分布が良く再現できていることが分かる。また、西部太平洋に二つの台風が存在している点や、温帯低気圧や前線の位置、東部インド洋から西部太平洋にMJOに伴う対流活発域が存在している点

も観測結果と整合的である（図略、cf. Miyamoto *et al.* 2015）。さらに注意深く見ると、個々の積雲対流に伴うメソ循環まで再現されていることが分かる。この結果から対流を抽出してその構造を調べたところ、解像度が3.5 kmより細かいと対流のコア部（上昇流域）を複数点で表現できること、即ち、対流コアを解像できはじめることが分かった（Miyamoto *et al.* 2013）。解像度を上げると約2-3 kmを境に対流の構造が確かに変わることを示しており、この違いが全球の流れ場に影響を与えることが示唆される。

3. 現在・将来気候実験

3.1 背景

モデルを用いた気候システム研究において、全球モデルの高解像度化と雲スキームの精緻化には様々な恩恵がある。湿潤過程がより適切に再現されることで、全球熱・水収支、大気大循環、台風、MJO、豪雨等の極端現象、大気波動、といった様々な時空間スケールの現象とそれらの相互作用について理解が進むであろう。また、気候感度の不確定性低減のためには雲の表現の向上が不可欠であり、高解像度化とともに衛星データ等を用いた雲プロセスの評価・スキーム改良を同時に進める必要がある。スーパーコンピュータの性能向上とともに、気候計算に用いられる全球モデルの水平解像度は16-20 kmへと高解像度化が進んでいる（Mizuta *et al.* 2006, 2012；Kinter *et al.* 2013）。しかし、積雲対流スキームを用いた気候システムの表現には限界が指摘されている（Stevens and Bony 2013）。例えば台風の発生数や強度は積雲対流スキームに強く依存しており（Murakami *et al.* 2012；



第1図 水平870 mメッシュNICAMシミュレーションで得られた凝結物混合比の水平分布。Miyamoto *et al.*（2013）による。白が濃いほど凝結物混合比の量が多い。

Zhao *et al.* 2012), 将来予測の信頼性向上にとって障壁となりうる。本節では積雲パラメタリゼーションを用いないNICAMによる気候実験 (Kodama *et al.* 2015) について紹介する。

3.2 実験設定

14 km メッシュのNICAMを用いて、現在・将来気候それぞれの条件で30年積分を行った。雲微物理スキームとして6種類の水物質の質量濃度を予報するシングルモーメントバルク法NSW6 (Tomita 2008) を使い、積雲対流スキームは使用しなかった。870 m ラン (第2節) の結果に示した通り14 km メッシュでは対流コアを十分解像できないが、モデルの不確定性低減と今後の更なる高解像度化を考慮して対流を陽に解く設定とした。深さ15 mのスラブ海洋モデルを用いて観測された海面温度 (SST) ヘナッジングを行う。ナッジングの緩和時間は7日とした。

3.3 結果

第2図に北半球夏季および秋季における地上降水量の30年平均気候値を示す。モデルの結果はGPCP (Adler *et al.* 2003) やCMAP (Xie and Arkin 1997) の全球平均降水量をよく再現している。東西平均についても熱帯における極大の値と位置をよく捉えており、定性的な地理的分布も季節変化まで含めて概ねよく再現できている。これらの結果は以前のNICAM季節実験の結果 (Noda *et al.* 2012) に比べて格段に改善しているが、SST固定条件をスラブ海洋モデルに変更したことが改善の大きな理由である。一方、熱

帯収束帯 (ITCZ) における過剰降水、アマゾン・フィリピン・北半球中緯度での過小降水、北半球秋季の二重ITCZなど、まだ改善すべき気候バイアスも残っている。

台風の再現性と将来変化については第6節で述べる。各種基本場やMJO、梅雨を含むアジアモンスーン、降水日変化、下部成層圏変動の再現性についてはKodama *et al.* (2015) でまとめて報告している。また、熱帯総観規模擾乱の再現性の詳細についてはFukutomi *et al.* (2016) を参照されたい。

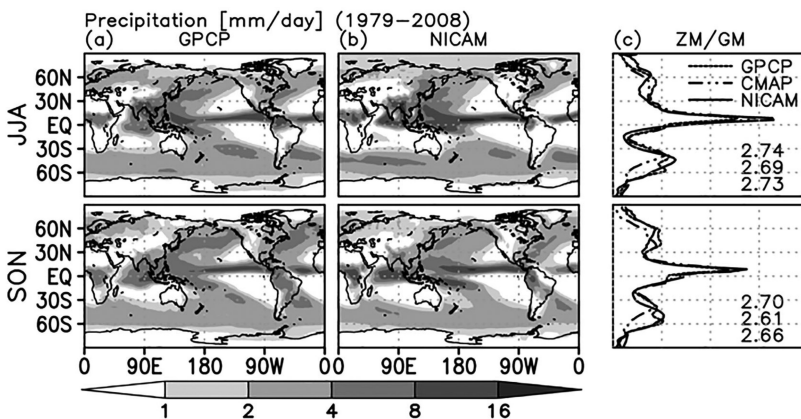
4. MJO 予測実験

4.1 概略

MJOは熱帯気象における主要な季節内スケールの変動の一つであり、2週間を超えるいわゆる延長予測を行う上で重要な現象であるが、現在の数値モデルの多くは十分にMJOを再現することができていない。NICAMはMiura *et al.* (2007) が示したようにMJOを精度良く再現できるケースがあることが確認されていた。今回、「京」によって豊富になった計算資源を活かして多数のMJOシミュレーションを水平14 km 格子間隔のNICAMにより実施し、予測スキルを統計的に調査した (Miyakawa *et al.* 2014)。MJOに関するモデル性能評価手法 (Gottschalck *et al.* 2010) によって解析した結果、NICAMはおおよそ4週間にわたって有効な予測を維持していた。また、MJOに伴う降水偏差の水平分布も観測とよく対応していた。

4.2 実験設定

対象とする10年間 (2003-2012年) の冬季MJOについて、次のような方法で実験開始日を決めて実験を行った。まず、MJOの位相を1-8までで定義するRealtime Multivariate MJO (RMM) index (Wheeler and Hendon 2004) を用いて、MJOに伴う降水の特に多いインド洋から海洋大陸に対応する位相2-5を通じての振幅が平均で1以上であるものを本実験において



第2図 JJA (6-8月) およびSON (9-11月) における地上降水量の30年平均気候値 (mm day^{-1})。 (a) GPCP. (b) NICAM. (c) GPCP, CMAP, NICAMそれぞれの東西・全球平均値。Kodama *et al.* (2015) による。

取り扱う MJO として抽出する。次に、抽出された各 MJO 事例において、MJO が位相 8, 1, 2 (西半球～インド洋に対応) に入った最初の日を実験開始日と決定する。これにより、19 の MJO 事例と 54 の実験開始日を得た。大気・海洋の初期値は ERA-Interim 再解析データ (Dee *et al.* 2011) を用いた。スラブ海洋モデルを利用し、海面水温は季節変化する気候値と初期アノマリとの和へ向かってナッジングをかけた。リアルタイムの予測を模した実験とするために、モデルには実験開始以降の観測データを与えずに動かした。

4.3 結果

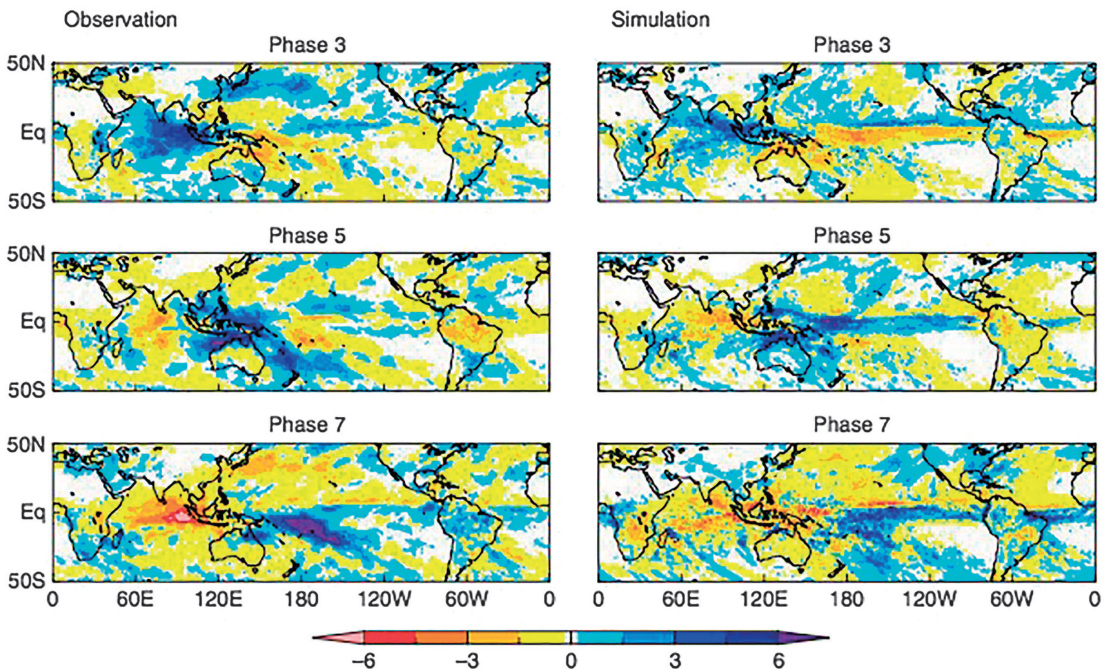
NICAM は、初期日の MJO の位相によって多少の違いはあるものの有効な RMM スキルスコアの目安となる 0.6 以上を実験開始後 26-28 日維持していた (54 本のシミュレーションを全て含めた場合では 27 日)。第 3 図はシミュレートされた降水アノマリの MJO 位相別 (位相 3, 5, 7) コンポジットを観測 (GPCP) と比較したものである。NICAM の降水偏差の分布は、実験開始から平均で 28 日が経過している位相 7 においても観測と整合的である。もっとも、ITCZ においては特に位相 5 において降水過剰となっ

ている。このようなバイアスは 14 km メッシュ NICAM ではしばしば見られることから、ローカルな水蒸気輸送過程が十分に解像されていない可能性がある。今回抽出された事例には CINDY2011/DYNAMO 国際集中観測プロジェクトで捕捉された MJO も含まれている。NICAM は、MJO に伴ってモルジブのガン島で観測された西風の侵入や水蒸気の深まりをよく再現していた。また、4 週間のリードタイムにも関わらず、続いて発生する MJO の兆候も捉えていた。

5. 台風発生延長予測

5.1 はじめに

北半球夏季には、BSISO と呼ばれる季節内変動が台風の活動度を変調することが知られている (Nakazawa 2006; Satoh *et al.* 2012; Yoshida *et al.* 2014)。季節内変動の再現性の高い数値モデルは、季節内変動で変調された大気場での台風発生の予測可能性も高いことが期待される。実際、NICAM を用いたこれまでの研究 (Fudefyasu *et al.* 2008; Taniguchi *et al.* 2010; Yanase *et al.* 2010) によって、季節内変



第 3 図 MJO の位相別の降水偏差コンポジット図 (左: 観測, 右: NICAM)。実験開始日からの平均経過日数は、上段 (位相 3) : 16 日, 中段 (位相 5) : 25 日, 下段 (位相 7) : 28 日。Miyakawa *et al.* (2014) による。降水偏差の単位は mm day^{-1} 。

動に伴う台風発生を3週間前から予測できるケースも示されている (Oouchi *et al.* 2009). しかしながらこれらの研究は1つの台風発生事例,あるいは,1つの初期値からの計算結果の解析である。「京」を使うことによって,多くの台風発生事例について,アンサンブル予測実験が可能となり,台風発生の予測可能性のメカニズムを調べることができるようになった.ここでは2004年8月の北西太平洋域における8つの台風発生事例について調べる.

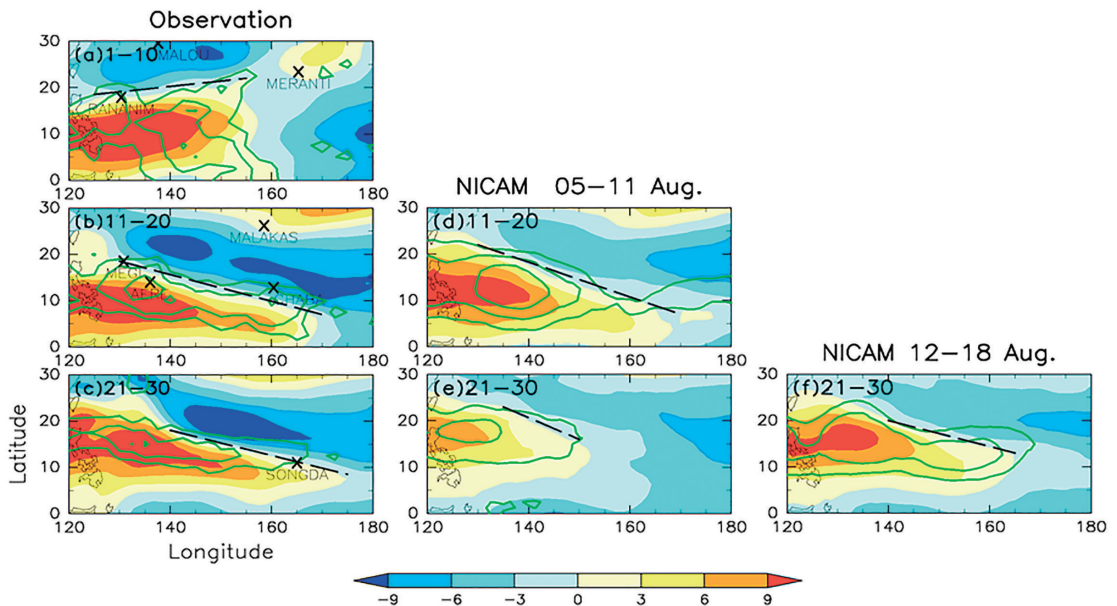
5.2 実験設定と解析手法

この実験では,第3.2節と同様な水平14 kmメッシュのNICAMを用いた.初期値はERA-Interim (Dee *et al.* 2011) から作成した,2004年8月の各日00UTCを初期時刻として30日間積分する.計算された渦擾乱が,観測された台風発生日の前後1日の間に,観測の台風発生域から10度円内を通過し,かつ,観測された発生日から前後5日以内に台風へと発達していれば,それを観測された台風発生に対応するモデルでの台風発生と判定する.より詳しい実験設定や判定方法についてはNakano *et al.* (2015) を参考されたい.

5.3 結果

NICAMは6つの台風発生を再現することができた.特に8月後半の4つの台風発生については2週間前から再現できた.再現できなかったのは台風Malou (11号)とMalakas (14号)であり,最低気圧も高く(それぞれ996,990 hPa),また持続時間も短かった(それぞれ21時間,2日18時間).加えて観測されている8月の対流活発域の北進と,9月の対流不活発 (Nakazawa 2006) もよく再現していた.

最も多くの初期時刻からの実験が行われた台風Songda (18号)の発生予測とBSISOによって変調された大気場との関係を調べた.観測では8月上旬は対流活発域が東経120-140度で北緯12度に沿って東西に伸び,東経140-160度では北西-南東に走向を持っている.モンスーントラフに伴うシアーラインが対流活発域の北の北緯20度近辺に位置しており,東端は東経155度に達している.第4図に,観測およびNICAMの10日平均OLRと850 hPaにおける東西風の10日ごとの分布を示す.8月中旬には(第4図b)東経140-160度の対流活発域が東西方向に伸び,東端は東経170度に達している.シアーラインも同様に東経170度ま



第4図 観測(左列)とNICAM(中列:8/5-11初期値,右列:8/12-18初期値)による10日平均OLR(実線)と850 hPaにおける東西風(陰影). (a) 8/1-10, (b, d) 8/11-20, (c, e, f) 8/21-30をそれぞれ示す. ×印は観測された台風発生位置を示す. OLRは 200 W m^{-2} 以下の値をコンター間隔 20 W m^{-2} で示す.東西風の単位は m s^{-1} .破線はシアーラインの位置を示している. Nakano *et al.* (2015) による.

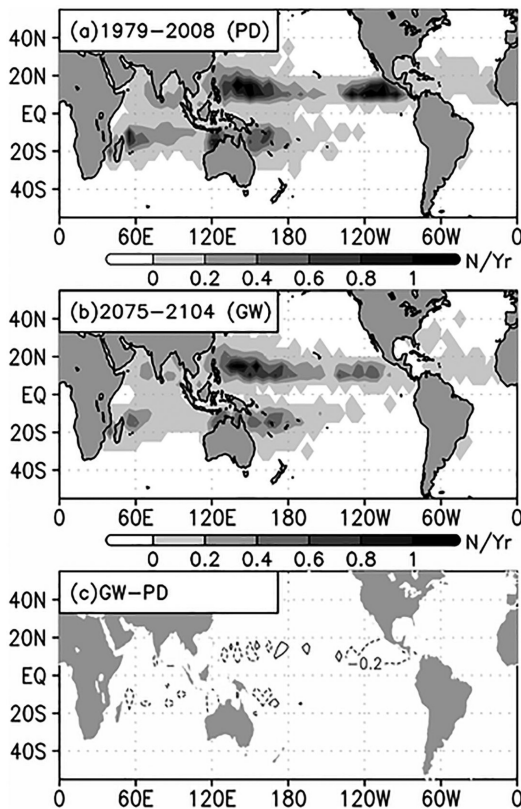
で延びている。8月下旬も、対流活発域はライン状の構造を維持しており、東端は東経165度に達し、約5度北上している。シアーラインは東経175度まで延びている。

Songda 発生3週間前（8月5-11日）を初期値とする実験では、8月中旬の対流活動とモンスーントラフに伴うシアーラインはよく再現した（第4図d）ものの、8月下旬の対流活動とシアーラインは西へ後退している（第4図e）。Songda 発生2週間前（8月12-18日）を初期値とする実験では、8月下旬の線状の対流活発域と、シアーラインの東方への延伸をよく再現している。2週間前から Songda の発生が再現されたことから、シアーラインの東方への延伸が Song-

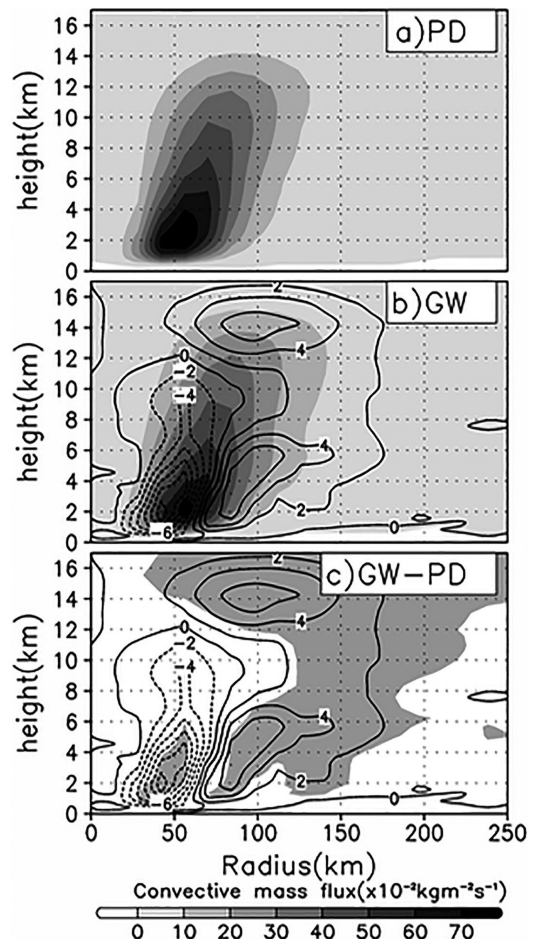
da 発生に深く関係していたことがわかる。このようにモンスーントラフの東西方向の時間発展を精度よく予測できる数値モデルは、それに伴う台風発生精度の高い予測可能性があることを示している。

6. 台風将来変化

地球温暖化による海面水温の上昇は熱帯低気圧の活動に影響することが考えられている。多くの気候モデルを用いた熱帯低気圧の将来変化が議論されており、全球規模では熱帯低気圧の発生数は減少し、強い熱帯



第5図 (a) 現在実験 (1979-2008年) と (b) 将来実験 (2075-2104年) の熱帯低気圧の発生頻度分布と (c) その将来変化。発生頻度は $5^\circ \times 5^\circ$ の領域内で1年あたりの発生数で定義した。将来変化は点線(実線)で囲まれた領域で年あたり発生数が0.2より減少(増加)した領域を示す。



第6図 現在実験 (a) と将来実験 (b) で発生した強い熱帯低気圧 (上位5%) の周りで方位角平均した対流質量フラックスのコンポジット。(b, c) の実線と点線は将来と現在の差を示す。(c) の灰色の領域は差が90%以上有意な領域を示す。Sato *et al.* (2015) による。

低気圧の発生数は増加することが報告されている (Knutson *et al.* 2010). 近年ではスーパーコンピュータの性能向上とモデルの精緻化に伴い、水平格子間隔が25 km 以下の高解像度全球モデルを用いた研究がおこなわれるようになり、熱帯低気圧の構造や強度の再現性が向上されると報告されている (例えば Murakami *et al.* 2012).

第5図は第3節で紹介した水平14 km 格子間隔のNICAMを用いた実験 (Kodama *et al.* 2015) と将来実験で発生した熱帯低気圧の発生分布を示す。現在気候実験の全球での一年あたりの熱帯低気圧発生数は84.4個で同じ期間の観測 (82.1個) と同程度であった。将来気候実験での個数は64.8個であり、Knutson *et al.* (2010) で報告されている減少率 (6-34%) と整合的な結果であった。

熱帯低気圧の全球発生数が温暖化によって減少する原因としては、熱帯循環の弱화에関連した深い対流に伴う上向き質量フラックスの減少 (Sugi *et al.* 2002) と対流圏中層の saturation deficit の増加 (Emanuel *et al.* 2008) の二つのメカニズムが提案されている (Knutson *et al.* 2010). Satoh *et al.* (2015) は上述のNICAMの出力を用いて対流質量フラックスを解析し、熱帯低気圧の減少メカニズムを新たに提案した。彼らは熱帯低気圧に伴う対流質量フラックスを抽出し、熱帯全体の対流質量フラックスに対する熱帯低気圧の寄与率 (R) を算出した。現在と将来で R はほとんど変わらないか減少すること、熱帯低気圧の強度に伴って熱帯低気圧に伴う対流質量フラックスが増加することを示した。温暖化によって強い熱帯低気圧が増加すると、熱帯低気圧はより多くの対流質量フラックスを伴う。仮に R が一定となるという制約条件のもとでは、熱帯低気圧の強化のためには発生数が減少しなければならない。温暖化によって個々の熱帯低気圧に伴う対流質量フラックスが増加する理由は、上昇流が減少するのではなく、第6図 (Satoh *et al.* 2015) に示すように熱帯低気圧の眼壁の半径が増加し、上昇流域の面積が増加するためであった。

7. まとめ

「京」を用いたNICAMによるシミュレーション研究について紹介した。「地球シミュレータ」、「京」へのコンピュータの進化とともに、NICAMの気候モデルとしての利用や、アンサンブル実験等と、NICAMをより通常の数値モデルとして使うアプローチが取り

やすくなっているといえる。NICAMのような高解像度全球非静力学モデルでは全球にわたってメソ対流システムが解像され、研究上・実用上の要求は大きい。「京」を用いることで、NICAMによるさまざまな計算が可能になった。ポスト「京」を念頭におけば、高解像度全球非静力学モデルの汎用化の方向性はさらに加速されるだろう。また、将来の現業モデルへの利用について、NICAMを含めたいくつかの力学コアの比較実験を気象庁等と連携して進めている。全球非静力学モデルは、国際的にもドイツ、アメリカ、イギリス、フランス等の様々なグループが開発を手がけており、現業化を視野にいたした活動も進められている (例: NGGPS: http://www.weather.gov/sti/stimodeling_nggps 2017.1.23閲覧)。一方で、「京」に頼らず大学のスーパーコンピュータ等を用いても、NICAMによる計算が容易になってきており、科学的な研究についてはすでにNICAMを利用可能なツールとして用いることが可能である。さらなる全球高解像度モデリングの今後の方向性について、本シンポジウムを通じて議論を深めることができた。

謝辞

NICAMによる数値実験は文部科学省のHPCI戦略プログラム分野3「防災・減災に資する地球変動予測」の枠組みのもと、理研計算科学研究機構の京コンピュータを利用して実施した (課題番号: hp120279, hp120313, hp130010, hp130021, hp140219)。関係者の協力に感謝する。ひまわり8号データは情報通信研究機構のサイエンスクラウドより取得した。

参考文献

- Adler, R. F., G. J. Huffman, A. Chang, R. Ferraro, P. P. Xie, J. Janowiak, B. Rudolf, U. Schneider, S. Curtis, D. Bolvin, A. Gruber, J. Susskind, P. Arkin and E. Nelkin, 2003: The Version-2 Global Precipitation Climatology Project (GPCP) Monthly Precipitation Analysis (1979-present). *J. Hydrometeorol.*, 4, 1147-1167.
- Dee, D. P., S. M. Uppala, A. J. Simmons, P. Berrisford, P. Poli, S. Kobayashi, U. Andrae, M. A. Balmaseda, G. Balsamo, P. Bauer, P. Bechtold, A. C. M. Beljaars, L. van de Berg, J. Bidlot, N. Bormann, C. Delsol, R. Dragani, M. Fuentes, A. J. Geer, L. Haimberger, S. B. Healy, H. Hersbach, E. V. H'olm, L. Isaksen, P. Kallberg, M. Kohler, M. Matricardi, A. P. McNally,

- B. M. Monge-Sanz, J.-J. Morcrette, B.-K. Park, C. Peubey, P. de Rosnay, C. Tavalato, J.-N. Thepaut and F. Vitart, 2011: The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **137**, 553-597.
- Emanuel, K., R. Sundararajan and J. Williams, 2008: Hurricanes and global warming: Results from downscaling IPCC AR4 simulations. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **89**, 347-367.
- Fudeyasu, H., Y. Wang, M. Satoh, T. Nasuno, H. Miura and W. Yanase, 2008: Global cloud-system-resolving model NICAM successfully simulated the lifecycles of two real tropical cyclones. *Geophys. Res. Lett.*, **35**, L22808, doi:10.1029/2008GL036003.
- Fukutomi, Y., C. Kodama, Y. Yamada, A. T. Noda and M. Satoh, 2016: Tropical synoptic-scale wave disturbances over the western Pacific simulated by a global cloud-system resolving model. *Theor. Appl. Climatol.*, **124**, 737-755.
- Gottschalk, J., M. Wheeler, K. Weickmann, F. Vitart, N. Savage, H. Lin, H. Hendon, D. Waliser, K. Sperber, M. Nakagawa, C. Prestrelo, M. Flatau and W. Higgins, 2010: A framework for assessing operational Madden-Julian Oscillation forecasts: A CLIVAR MJO working group project. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **91**, 1247-1258.
- Kajikawa, Y., T. Yamaura, H. Tomita and M. Satoh, 2015: Impact of tropical disturbance on the Indian summer monsoon onset simulated by a global cloud-system-resolving model. *SOLA*, **11**, 80-84.
- Kinter, J. L., B. Cash, D. Achuthavarier, J. Adams, E. Altshuler, P. Dirmeyer, B. Doty, B. Huang, E. K. Jin, L. Marx, J. Manganello, C. Stan, T. Wakefield, T. Palmer, M. Hamrud, T. Jung, M. Miller, P. Towers, N. Wedi, M. Satoh, H. Tomita, C. Kodama, T. Nasuno, K. Oouchi, Y. Yamada, H. Taniguchi, P. Andrews, T. Baer, M. Ezell, C. Halloy, D. John, B. Loftis, R. Mohr and K. Wong, 2013: Revolutionizing climate modeling with project Athena: A multi-institutional, international collaboration. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **94**, 231-245.
- Knutson, T. R., J. L. McBride, J. Chan, K. Emanuel, G. Holland, C. Landsea, I. Held, J. P. Kossin, A. K. Srivastava and M. Sugi, 2010: Tropical cyclones and climate change. *Nature Geosci.*, **3**, 157-163.
- 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.
- Louis, J.-F., 1979: A parametric model of vertical eddy fluxes in the atmosphere. *Bound.-Layer Meteor.*, **17**, 187-202.
- 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.
- 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. *Nature Comm.*, **5**, 3769, doi:10.1038/ncomms4769.
- Miyamoto, Y., Y. Kajikawa, R. Yoshida, T. Yamaura, H. Yashiro and H. Tomita, 2013: Deep moist atmospheric convection in a subkilometer global simulation. *Geophys. Res. Lett.*, **40**, 4922-4926.
- Miyamoto, Y., R. Yoshida, T. Yamaura, H. Yashiro, H. Tomita and Y. Kajikawa, 2015: Does convection vary in different cloud disturbances? *Atmos. Sci. Lett.*, **16**, 305-309.
- Miyamoto, Y., T. Yamaura, R. Yoshida, H. Yashiro, H. Tomita, and Y. Kajikawa, 2016: Precursors of deep moist convection in a subkilometer global simulation. *J. Geophys. Res.*, **121**, 12080-12088,
- Mizuta, R., K. Oouchi, H. Yoshimura, A. Noda, K. Katayama, S. Yukimoto, M. Hosaka, S. Kusunoki, H. Kawai and M. Nakagawa, 2006: 20-km-mesh global climate simulations using JMA-GSM model —Mean climate states—. *J. Meteor. Soc. Japan*, **84**, 165-185.
- Mizuta, R., H. Yoshimura, H. Murakami, M. Matsueda, H. Endo, T. Ose, K. Kamiguchi, M. Hosaka, M. Sugi, S. Yukimoto, S. Kusunoki and A. Kitoh, 2012: Climate simulations using MRI-AGCM3.2 with 20-km grid. *J. Meteor. Soc. Japan*, **90A**, 233-258.
- Murakami, H., Y. Wang, H. Yoshimura, R. Mizuta, M. Sugi, E. Shindo, Y. Adachi, S. Yukimoto, M. Hosaka, S. Kusunoki, T. Ose and A. Kitoh, 2012: Future changes in tropical cyclone activity projected by the new high-resolution MRI-AGCM. *J. Climate*, **25**,

- 3237-3260.
- Nakanishi, M. and H. Niino, 2004: An improved Mellor–Yamada Level–3 model with condensation physics: Its design and verification. *Bound.–Layer Meteor.*, **112**, 1–31.
- Nakano, M., M. Sawada, T. Nasuno and M. Satoh, 2015: Intraseasonal variability and tropical cyclogenesis in the western North Pacific simulated by a global nonhydrostatic atmospheric model. *Geophys. Res. Lett.*, **42**, 565–571.
- Nakazawa, T., 2006: Madden–Julian Oscillation activity and typhoon landfall on Japan in 2004. *SOLA*, **2**, 136–139.
- Noda, A. T., K. Oouchi, M. Satoh, H. Tomita, S.-I. Iga and Y. Tsushima, 2010: Importance of the subgrid-scale turbulent moist process: Cloud distribution in global cloud-resolving simulations. *Atmos. Res.*, **96**, 208–217.
- Noda, A. T., K. Oouchi, M. Satoh and H. Tomita, 2012: Quantitative assessment of diurnal variation of tropical convection simulated by a global nonhydrostatic model without cumulus parameterization. *J. Climate*, **25**, 5119–5134.
- Oouchi, K., A. T. Noda, M. Satoh, H. Miura, H. Tomita, T. Nasuno and S.-I. Iga, 2009: A simulated preconditioning of typhoon genesis controlled by a boreal summer Madden–Julian Oscillation event in a global cloud-system-resolving model. *SOLA*, **5**, 65–68.
- Satoh, M., T. Matsuno, H. Tomita, H. Miura, T. Nasuno and S. Iga, 2008: Nonhydrostatic Icosahedral Atmospheric Model (NICAM) for global cloud resolving simulations. *J. Comput. Phys.*, **227**, 3486–3514.
- Satoh, M., K. Oouchi, T. Nasuno, H. Taniguchi, Y. Yamada, H. Tomita, C. Kodama, J. Kinter, D. Achuthavarier, J. Manganello, B. Cash, T. Jung, T. Palmer and N. Wedi, 2012: The intra-seasonal oscillation and its control of tropical cyclones simulated by high-resolution global atmospheric models. *Clim. Dyn.*, **39**, 2185–2206.
- 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.-I. Iga, T. Arakawa, T. Inoue and H. Kubokawa, 2014: The Non-hydrostatic Icosahedral Atmospheric Model: Description and development. *Prog. Earth Planet. Sci.*, **1**, 18, doi:10.1186/s40645-014-0018-1.
- Satoh, M., Y. Yamada, M. Sugi, C. Kodama and A. T. Noda, 2015: Constraint on future change in global frequency of tropical cyclones due to global warming. *J. Meteor. Soc. Japan*, **93**, 489–500.
- Sekiguchi, M. and T. Nakajima, 2009: The improvement of the absorption process using a computational optimization in an atmospheric general circulation model. *AIP Conf. Proc.*, **1100**, 89–92.
- Stevens, B. and S. Bony, 2013: What are climate models missing? *Science*, **340**, 1053–1054.
- Sugi, M., A. Noda and N. Sato, 2002: Influence of the global warming on tropical cyclone climatology: An experiment with the JMA global model. *J. Meteor. Soc. Japan*, **80**, 249–272.
- Taniguchi, H., W. Yanase and M. Satoh, 2010: Ensemble simulation of cyclone Nargis by a global cloud-system-resolving model—Modulation of cyclogenesis by the Madden–Julian Oscillation. *J. Meteor. Soc. Japan*, **88**, 571–591.
- Tomita, H., 2008: 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 Dyn. Res.*, **34**, 357–400.
- Tomita, H., H. Miura, S. Iga, T. Nasuno and M. Satoh, 2005: A global cloud-resolving simulation: Preliminary results from an aqua planet experiment. *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L08805, doi:10.1029/2005GL022459.
- Wheeler, M. C. and H. H. Hendon, 2004: An all-season real-time multivariate MJO index: Development of an index for monitoring and prediction. *Mon. Wea. Rev.*, **132**, 1917–1932.
- Xie, P. and P. A. Arkin, 1997: Global precipitation: A 17-year monthly analysis based on gauge observations, satellite estimates, and numerical model outputs. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **78**, 2539–2558.
- Yanase, W., H. Taniguchi and M. Satoh, 2010: The genesis of tropical cyclone Nargis (2008): Environmental modulation and numerical predictability. *J. Meteor. Soc. Japan*, **88**, 497–519.
- Yoshida, R., Y. Kajikawa and H. Ishikawa, 2014: Impact of boreal summer intraseasonal oscillation on environment of tropical cyclone genesis over the western North Pacific. *SOLA*, **10**, 15–18.
- Zhao, M., I. M. Held and S.-J. Lin, 2012: Some counter-intuitive dependencies of tropical cyclone frequency on parameters in a GCM. *J. Atmos. Sci.*, **69**, 2272–2283.