

4011 : 407 : 1052 : 1053 : 1071 (メソ気象予測; スパコン; メソスケール気象災害;  
雲解像モデル; ハイパフォーマンスコンピューティング)

### 3. 「京」によるメソ気象予測研究の最前線

齊藤 和雄\*

#### 1. はじめに

日本では梅雨末期や夏季に毎年のように集中豪雨や局地的大雨が発生し、人命損失を含む大きな被害が出ている。集中豪雨などメソスケール気象災害の予測は、防災・減災上きわめて重要であるが、数値予報での強雨の定量的な予測精度はまだ十分とは言えない。高精度の雲解像モデルに加えて、初期値の改善が非常に重要であり、そのために先端的なデータ同化手法を雲解像モデルに適用する必要がある。また、初期値や数値モデルには誤差が不可避であり、十分なリードタイムを確保した予測には、これらの誤差を考慮したアンサンブル予報が欠かせない。

神戸に設置されたスーパーコンピュータ「京」を先端研究に用いるための文部科学省のHPCI戦略プログラムが平成23年度から行われている。社会的・学術的に大きなブレイクスルーが期待できる分野として5つの戦略分野が決められ、分野3「防災・減災に資する地球変動予測」では、気象・気候・地震・津波など自然災害に関するシミュレーションを行っている(<http://www.jamstec.go.jp/hpci-sp/> 2017.1.31閲覧)。研究開発課題の一つが「超高精度メソスケール気象予測の実証」で、気象研究所と海洋研究開発機構が中心となり、東京大学、京都大学、東北大学、名古屋大学、神戸大学、琉球大学、防災科学技術研究所などが参加している。この課題では、台風、集中豪雨、局地的大雨や竜巻など顕著気象現象の力学的な予測と、リードタイムを持った定量的確率予測の可能性を実証することを最終的な目的として、1) 領域雲解像

4次元データ同化技術の開発、2) 領域雲解像アンサンブル解析予報システムの開発と検証、3) 高精度領域大気モデルの開発とそれをを用いた基礎研究、の3つの科学目標に沿った研究を実施している。これらの目標は、モデルの改良と初期値・境界条件などで結びついており、全球雲解像モデルを用いる分野3のもう一つの研究開発課題「地球規模の気候・環境変動予測に関する研究」とも情報交換している。戦略プログラムメソ課題の概要についてはSaito *et al.* (2013) で報告しており、主な成果は上述の戦略分野3のHPにもアップしている。本講演では、これらを中心に紹介し、現時点での到達点を示すとともに残されている課題について言及する。

#### 2. 研究成果の例

##### 2.1 2012年5月のつくば竜巻

竜巻は時として大きな災害につながる非常に激しい気象現象で、時間空間スケールが通常の気象擾乱よりもはるかに小さい。超高解像度の数値モデルによって竜巻をシミュレーションし、そのメカニズムを調べる研究は以前から行われているが、現実の竜巻の発生や移動を予測することは非常に難しく、データ同化を含めて数値モデルで予測するための研究は、日本では行われていなかった。

2012年5月6日、日本では最強クラスの藤田スケールF3に相当する竜巻が茨城県で発生し、つくば市北部を中心に死者を含む大きな被害が出た。この日は、茨城県筑西市や栃木県真岡市など北関東の別の場所でもF1~F2の竜巻が生じたことが報じられている。

この事例について、気象庁非静力学モデル(NHM; Saito *et al.* 2006, 2007) に基づく局所アンサンブル変換カルマンフィルタ(LETKF)の双方向

\* 気象研究所/海洋研究開発機構

ksaito@mri-jma.go.jp

© 2017 日本気象学会

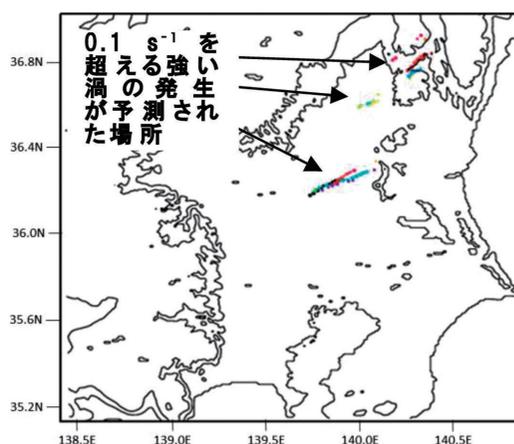
ネスティングシステムを開発して、数値モデルの初期値を変え、アンサンブル予報により竜巻を予測する試みを行った。水平格子間隔1.875 kmのLETKFにより得られた初期値から、水平格子間隔350 mの数値モデルを用いてダウンスケールしてアンサンブル予報を行った結果、竜巻をもたらしたメソ対流系が再現され、いくつかのメンバーは $0.1 \text{ s}^{-1}$ という大変強い鉛直渦度をもつ低気圧性循環を伴っていた (Seko *et al.* 2015)。強い渦の発生が予測された場所は3つの箇所に見られ、その場所も10 km程度の位置ずれはあるものの観測と概ね対応していた (第1図)。モデルの水平格子間隔を50 mにまで上げた超高解像度実験では、竜巻と言って差支えない $50 \text{ ms}^{-1}$ を超える強風もモデルで表現された (第2図)。将来的な場所を特定した竜巻の確率的予測につながる成果と言える。

このつば竜巻のケースについては、Yokota *et al.* (2016) が10分おきの気象研究所の固体素子2重偏波ドップラーレーダーから得られた降雨強度情報とドップラー速度、NTTドコモの地上気象観測データを含む関東地方の高密度地上観測データをLETKFで同化する実験を行っており、竜巻に対応する渦の位置ずれが修正できることを報告している。またMashiko (2014) は、気象庁メソ解析を初期値として、多重ネスティングしたNHMで水平格子間隔10 mの数値実験を行い、竜巻の多重渦構造の時間変化を含む竜巻の詳細構造をシミュレートしている。

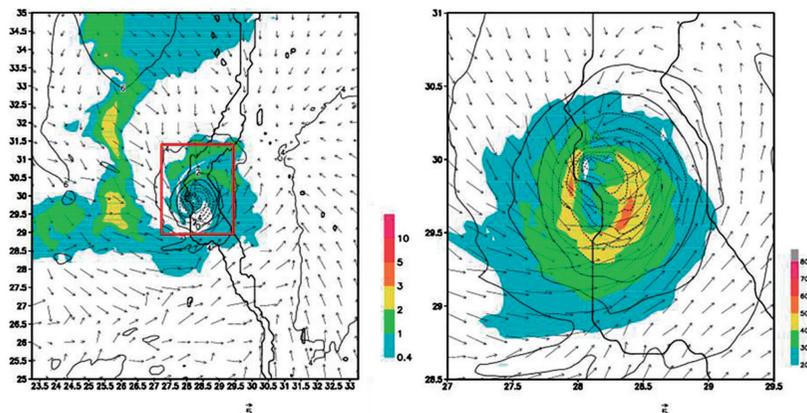
## 2.2 平成24年7月九州北部豪雨

平成24年7月九州北部豪雨は2012年7月11日から7月14日にかけて九州で発生した大雨で、熊本県、大分県、福岡県などで洪水や土砂による大きな災害が発生した。第3図は7月12日6時から9時の3時間雨量で、熊本県から大分県にかけて100 mmを超える大雨が解析されている。第4図の左列に示すのは、当時の現業数値予報に相当する気象庁メソ解析からの水平格子間隔5 kmのNHMによる予報で、東西に延びるバンド状の強い降水域が概ね表現されているもの、位

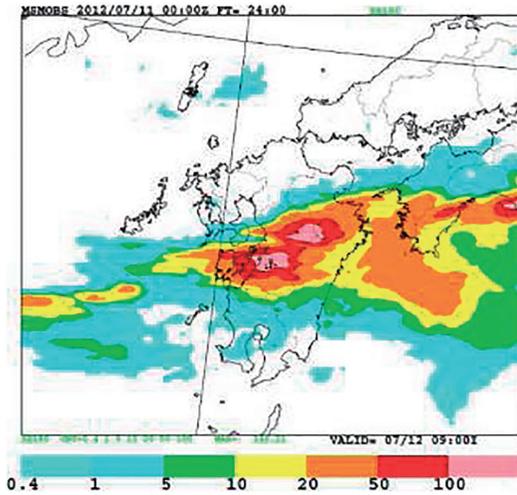
置が実況よりも南にずれて予測されている。第4図中列は、Kunii (2014a) による50メンバーのNHM-LETKFの連続同化サイクルで得られた半日～1日前の初期値からの計算による予測実験の結果で、熊本県から大分県にかけての大雨の予測が大きく改善されている。第4図右列は、アンサンブル予報に基づく50 mm以上の降水が生じる確率の分布図で、24時間前からの計算で40%、18時間前からで50%以上の確率で大雨が予測されている。18時間前からのアンサンブル予報による最大降水量分布図では、100 mm以上の降水



第1図 京コンピュータによる350 m解像度のシミュレーションで $0.1 \text{ s}^{-1}$ を超える強い渦度が予測された場所。Seko *et al.* (2015) より。



第2図 50 m ダウンスケール実験による高度20 mの降水量(左, 単位はg/kg)と風速(右, 単位はm/s)。ベクトルは水平風。戦略プログラム分野3 HPより。

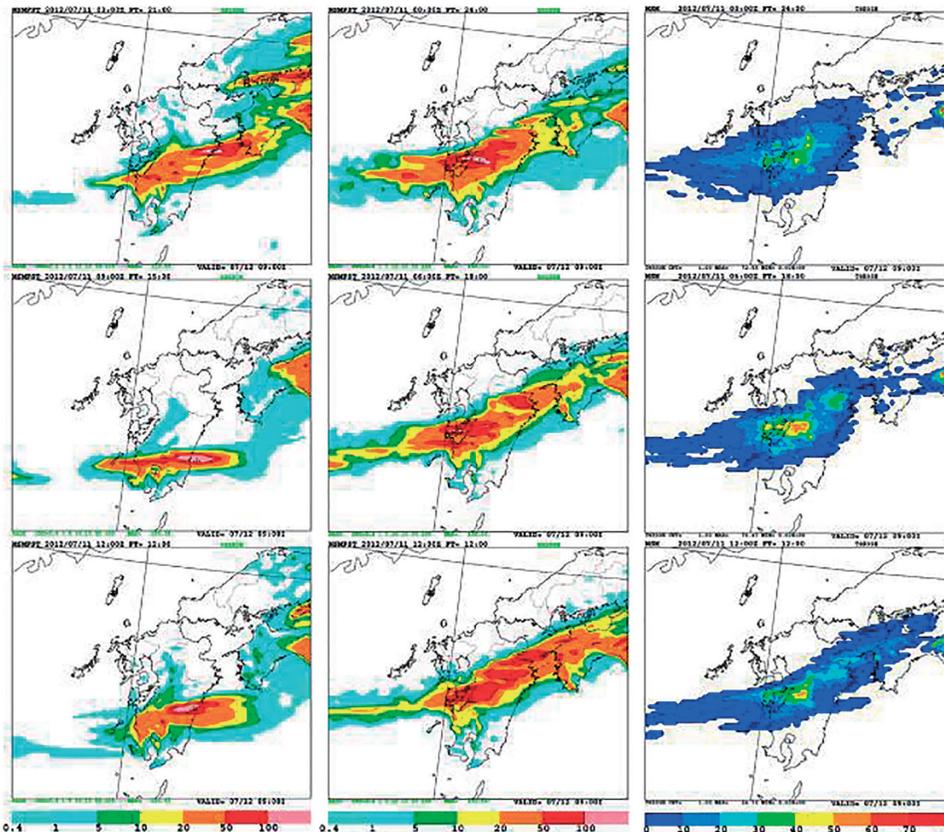


第3図 九州北部豪雨での2012年7月12日6時から9時の解析雨量。

が生じる危険性も示されている。このような場所や強度を特定した確率的大雨予測や最大雨量に関する予測が半日～1日前に出来れば、事前に防災対策をとるために大変有用な情報になると期待される。

### 2.3 ビル解像 LES モデルによる海風前線の再現

海風は沿岸域の気温や風、大気汚染などさまざまな気象に影響を与え、局地的な大雨のトリガーとなることもある。また高層ビルが立ち並ぶ大都市での風の予測では、個々のビルの影響も考慮する必要がある。高解像度の LES やビルを解像するモデルによる局地的な風のシミュレーションはこれまでも行われているが、観測された海風前線の詳細構造や侵入を正確に再現するためには、データ同化と結びついた超高解像度モデルによる領域予測システムが必要である。HPCI 戦略プログラムでは、個々のビルを表現できる超高解像度の数値流体力学 (CFD) モデルを並列化し



第4図 第3図に対応する3時間雨量についての実験結果。左列) 当時の現業解析からの予報による雨量。中列) NHM-LETKF 初期値からの雨量予測。右列) アンサンブル予報に基づく50 mm以上の降水確率分布。予報時間は上段からそれぞれ24時間前、18時間前、12時間前から。Kunii (2014a) より。

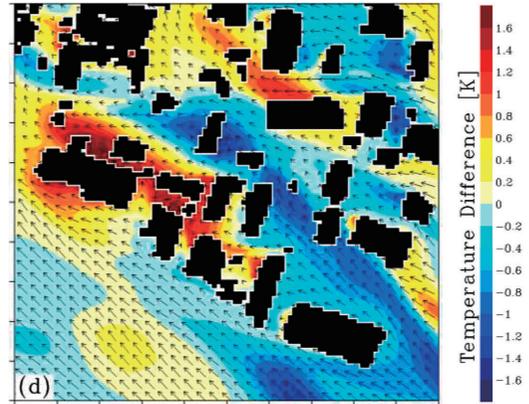
NHM-LETKF と結合させたダウンスケーリングシミュレーションシステム (DS3; Chen *et al.* 2014) を開発した。京コンピュータを用いることにより、数 m の格子間隔で個々のビルを解像しながら数十 km 四方の領域を対象にする実験を可能にしている。

2007年6月15日仙台空港でドップラーライダーによって海風前線の3次元構造が観測された。ライダーの動径風データをLETKFで同化するとともに、その気象場を水平格子間隔10 mのDS3に与えた。海上に小さな気温摂動(-1°C)を人工的に加えて重力流としての海風のフロントヘッドを強化したところ、海風前線の内陸への侵入と数百 m スケールでの不規則な多数の凹凸を伴う海風前線面の特徴が良く再現された (Chen *et al.* 2015a)。また建物の有無が海風前線に与える影響についても示された (第5図; Chen *et al.* 2015b)。実際に観測された海風前線の詳細構造を領域データ同化システムにネストしたビル解像モデルでこのような高解像度で再現したのは世界でも初めてのケースと言える。

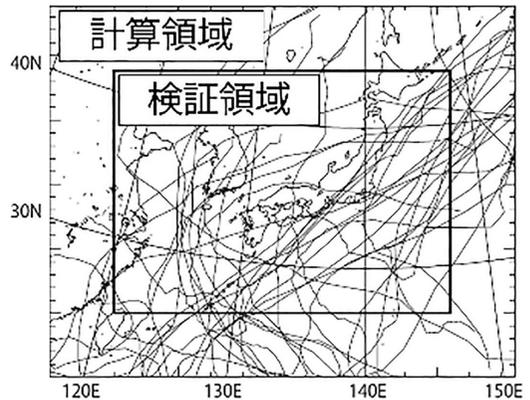
#### 2.4 高解像度大気海洋結合モデルによる台風強度予測

数値予報での台風の進路予報が年々改善されているのに対し、台風強度の予測には多くの課題が残されている。台風は海上で蒸発した水蒸気の潜熱をエネルギー源とするため、台風近傍の海面水温の影響を正確に予測に取り込むことが必要である。台風があるとその風により海洋の表層近くがかきまぜられ、海面水温が低下することが知られており、台風強度を正確に予測するためには大気と海洋

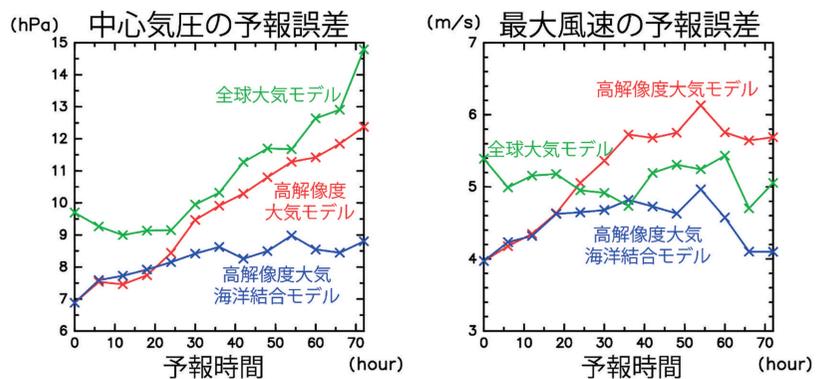
の状態を両方同時に予測する大気海洋結合モデルを用いることが望ましいと考えられる。Ito *et al.* (2015) は、NHMに1次元海洋混合層モデルを結合した高解像度大気海洋結合モデルを開発し、京コンピュータの資源を活かして、水平格子間隔5 kmで2009年4月から2012年9月に日本近傍を通過した全ての台風 (第6図) を対象とする合計281回の高解像度大気海洋結合シミュレーションを行った。



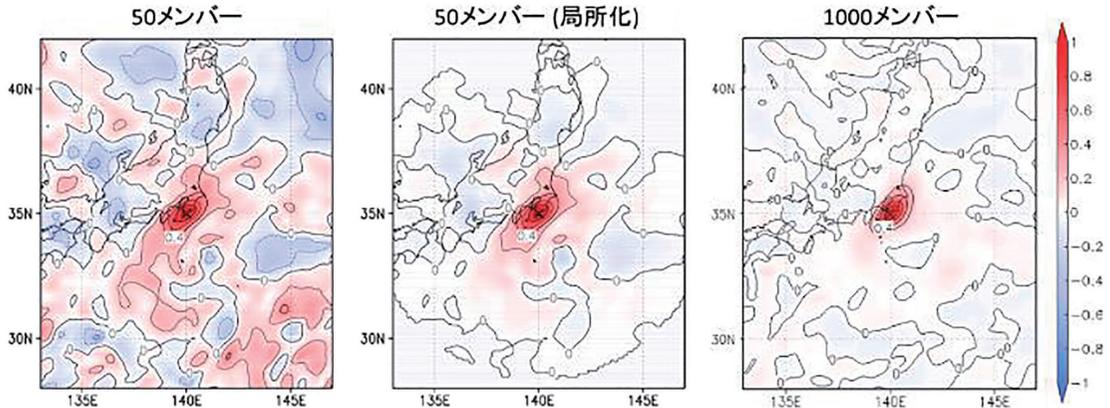
第5図 DS3によりシミュレートされた仙台平野海風侵入時の建物の有無による気温の差。Chen *et al.* (2015b) より。



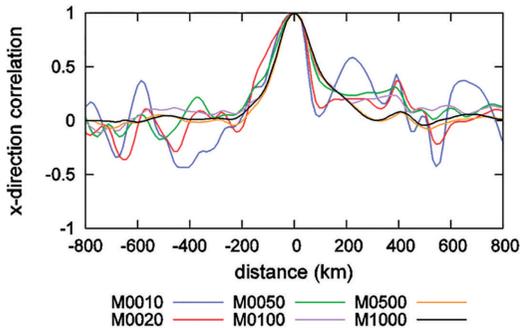
第6図 実験で対象とした台風 (34個) の進路。



第7図 予報時間ごとの台風の (左) 中心気圧の予報誤差 (hPa) と (右) 最大風速の予報誤差 ( $\text{ms}^{-1}$ )。Ito *et al.* (2015) より。



第8図 アンサンブルカルマンフィルタで見積もられる500 hPa（高度約5.5 km）における東西風の誤差共分散分布。左）50メンバーの結果，中）50メンバーの結果に局所化を施したもの，右）1000メンバーの結果。Kunii (2014b) より。



第9図 ある地点を基準とした500 hPa（高度約5.5 km）における東西風の東西方向の自己相関分布。Mのついた数字は、メンバー数。Kunii (2014b) より。

シミュレーションの結果，結合モデルでは既存の気象モデルに比べて，3日予報で，中心気圧に関しては約30–40%，最大風速に関しては約20–30%誤差（気象庁ベストトラックに対する二乗平均平方根誤差）が小さくなっていった（第7図）。高解像度気象海洋結合モデルで計算された海面の水温は，観測された値に近くなっており，台風が受け取るエネルギーをより正確に計算できるようになったことが強度予測が改善した理由と考えられる。

### 2.5 1000メンバー-LETKFの実行

LETKFなどアンサンブル予報を用いるデータ同化手法では，有限のアンサンブルメンバーの予報からデータ同化に必要な背景誤差の大きさを見積もっている。十分なアンサンブルメンバーの数を確保すること

が重要となるが，アンサンブルメンバー数を増やすと計算量も増加するため，現実的な数値予報モデルにアンサンブルデータ同化を応用する際は，通常50–100程度のメンバー数が用いられている。

Kunii (2014b) は，水平解像度15 kmのNHMを用いて1000メンバーによるLETKFを実行した。第8図は，アンサンブル予報で見積もられる誤差共分散の一例である。通常，中心点（図中の×）から離れたところでは誤差共分散は小さくなるが，50メンバーによる実験結果（左）ではサンプリング誤差の影響により離れた場所にも大きな値が見られる。LETKFでは，離れた地点で誤差共分散の大きさを小さくする「局所化」を適用してサンプリング誤差を取り除く（中）が，局所化は重要なシグナルも除去してしまうことがある。右図の1000メンバーによる実験では，局所化を使用せずとも滑らかな誤差共分散の分布が得られている。第9図は，中心点を通る東西断面における，局所化を施さない場合の誤差共分散とアンサンブルメンバー数の関係を示す。少数のアンサンブルメンバーによる実験では結果にばらつきがありサンプリング誤差が含まれていることが分かるが，500以上のアンサンブルメンバーによる実験では，ほぼ同じ結果に収束している。この実験は，アンサンブルデータ同化におけるメンバー数の効果を，世界で初めてフルスケールの領域数値予報モデルを用いて多数の実観測データを同化する大規模実験で調べたものと言える。

### 2.6 サイクロン「ナルギス」のデータ同化実験

サイクロン「ナルギス」は，2008年5月2日にミヤ

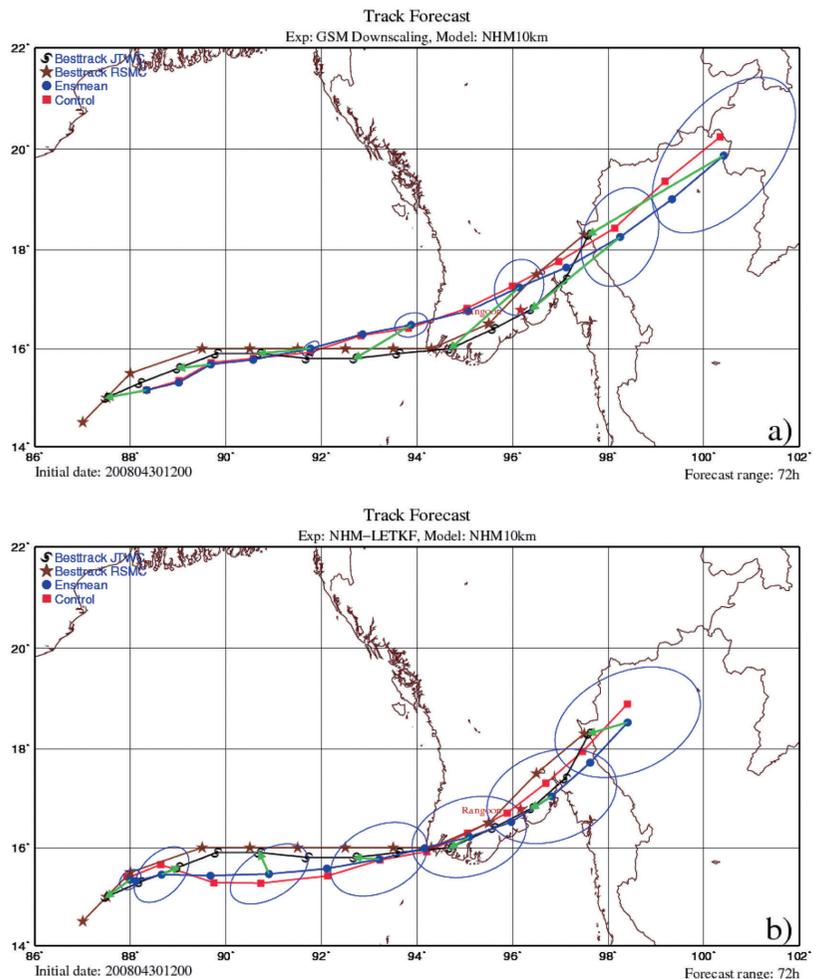
ンマー南部に上陸し、10万人を超える死者を出す高潮災害を引き起こした。この今世紀最大の気象災害を受け、日本気象学会は2008年の秋季大会でスペシャルセッション「ミャンマーサイクロン」を持ち、2010年に「気象集誌」にナルギス関連研究論文の特集号を刊行している。高解像度領域モデルや変分法データ同化を用いたいくつかの研究論文が発表されているが、上陸2日前の4月30日21時を初期時刻にしたこれまでの予測では、上陸時刻が実況よりも早く、上陸地点も200 kmほど北にずれるなどの課題が残されていた。

Duc *et al.* (2015) は、京コンピュータを用いて、50メンバーのNHM-LETKFでベンガル湾の観測データを同化して解析値を作成し、そこから10 km解像度のNHMによるアンサンブル予報実験を行った。同化実験では、海面水温の摂動を考慮する実験や、ベストトラックのデータを同化するテストも行った。海面水温の摂動の影響については、実際に近い不確定の表現として複数の予報センターの海面水温を用いて実験を行い、摂動を考慮すると進路予報の精度がわずかに改善されること、ランダムに摂動を与えた場合の改善は小さく、メンバー毎に用いる海面水温を変えた場合の方が、結果の改善が大きいことなどを示した。また中心気圧に関するデータを同化する場合は、大きめの予報誤差を与えた場合の方が解析からの予報の結果は良好だった。

第10図は上陸2日前からの予報で、それまでの全球解析を初期値とする予報(上)に比べ、NHM-LETKFによる解析からの予報は上陸時刻・位置を大

きく改善した。また中心気圧の予報でもNHM-LETKFによる解析からの予報は、全球解析からの予報に比べてナルギスの発達のタイミングをより適切に表現し、RSMCニューデリーのベストトラック解析(962 hPa)に近い965 hPa以下にまで発達したアンサンブルメンバーも2つ以上見られた。

NHM-LETKFに基づく解析からの10 km解像度NHMのアンサンブル予報を入力に用いた場合のプリンストン大学海洋モデル(POM)による海面水位の時系列についても計算され、イラワディ川河口付近で最大5 mを超える水位上昇のリスクが表現された。



第10図 ナルギスの72時間進路予報：上) 気象庁全球解析からの予報、下) NHM-LETKFからの予報。●が実況、■は解析からのコントロール(単独)予報、●はアンサンブル平均、楕円は、アンサンブル予報によるコントロール予報に対する中心位置の予報誤差共分散。Duc *et al.* (2015) より。

### 3. その他

水平格子間隔100 mのNHMを用いて、台風全域をシミュレートする実験がIto and Niino (2016)により行われている。京コンピュータの9,216ノードを用いて2,000 km四方の領域を対象に2重周期境界条件を用いた理想実験を行った。2つの異なるタイプのロール状対流を伴う眼の壁雲とその周辺の詳細構造が表現されている。

雲解像モデルCReSS (Tsuboki and Sakakibara 2002)を用いた台風の微細構造に伴う竜巻の発生がシミュレーションされている(坪木 2015)。2006年9月17日に宮崎県延岡市で甚大な被害をもたらした竜巻を伴った台風13号について京コンピュータの9,216ノードを用いて水平格子間隔75 mの実験を行い、九州東岸を北上する複数の降雨帯に竜巻に相当する多くの強い渦がシミュレートされた。台風全体の構造を再現しつつ竜巻の可能性のある場所や時刻を、数値モデルを用いて予測することに向けた一つの大きなステップと位置づけられる。

2013年10月の伊豆大島や2014年8月の広島での豪雨は土石流の発生を伴う深刻な気象災害となった。この2つの事例は、総観場や豪雨の空間スケールなどに大きな違いがあり、前者は台風接近に伴う前線付近の降水バンド、後者は明瞭な総観スケールの擾乱を伴わないバックビルディング形成による線状降水帯であった。これらの豪雨を数値予報で予測するために必要なモデルの解像度や領域についての高解像度数値予報実験を行っている(Oizumi *et al.* 2017; 大泉ほか 2015)。いずれのケースでも水平格子間隔を500 mにまで高めると予測される降水の位置や強度が大きく改善することが確かめられており、境界層の扱いや現象のスケールに見合った解像度が重要であることが示唆されている。

神戸大学の分布型降雨流出・洪水氾濫モデル(DRR/FI)について、京コンピュータに対する最適化を実施し、10 m解像度詳細浸水モデルを構築した。淀川本川周辺を対象とする計算節点数12,824,442 (= 3453×3714)の場合、「京」の1ノードでは5時間分のシミュレーションに約59時間かかったが、8,192ノードを利用すると9.3分まで短縮された(Kobayashi *et al.* 2015)。

京都大学のラグランジュ土石流モデル(Hydro-Debris3D)の粒子衝突アルゴリズムの改良および並列化、および流体部分の並列化を行っている。流体部

分・粒子部分それぞれについて、並列化によってコア数の増加に見合った計算時間の短縮が実現されている(山敷 2015)。今後通信コスト削減のための改良を行っていく必要がある。

### 4. おわりに

上記のほかここでは詳しく紹介できなかったが、目標1ではハイブリッド4次元変分法やアンサンブル予報を用いる変分法的データ同化手法などの先端的データ同化手法の開発や基礎的研究(Tsuyuki 2014など)が、目標2では豪雨事例を含む期間を対象とする雲解像アンサンブル予報の検証(Duc *et al.* 2013)や水文モデルとの連携(Kobayashi *et al.* 2016; Yu *et al.* 2015など)が、目標3ではビン法雲物理過程の開発やそれを用いた3次元実地形実験に向けた準備などが行われた。計画当初に夢見た計算のいくつかが現実のものとなった一方で、京コンピュータの能力をフルに活かした高解像度高頻度データ同化実験による局地的な大雨の直前予測や、超高解像度モデルの基礎研究に基づく雲解像モデルの不確定性の評価をアンサンブル解析予測システムに反映させること、などについてはまだ十分とは言えない。また高解像度数値モデルの予測を直接水文モデルに取り込んで災害そのものを予測していくことも今後の課題である。これらについては、戦略プログラムの後継課題としての意味合いを持つポスト「京」重点課題「観測ビッグデータを活用した気象と地球環境の予測の高度化」のサブ課題A「革新的な数値天気予報と被害レベル推定に基づく高度な気象防災」に引き継がれていくものと期待している。

### 謝辞

HPCI戦略プログラム「超高精度メソスケール気象予測の実証(課題番号hp120282, hp130012, hp140220, hp150214)」の実施に関して、目標担当者(露木 義, 瀬古 弘, 木村富士男および中村晃三)各位、課題参加者の皆様、および時岡達志、今脇資郎の両先生をはじめとする海洋研究開発機構の関係者に感謝します。

### 参考文献

Chen, G., W. Sha, T. Iwasaki, H. Seko and K. Saito, 2014: A building-resolving simulation of sea breeze over Sendai downtown with a parallelized CFD model. SENAC, 47(1), 7-12.

- Chen, G., X. Zhu, W. Sha, T. Iwasaki, H. Seko, K. Saito, H. Iwai and S. Ishii, 2015a: Toward improved forecasts of sea-breeze horizontal convective rolls at super high resolutions. Part I: Configuration and verification of a Down-Scaling Simulation System (DS<sup>3</sup>). *Mon. Wea. Rev.*, **143**, 1849-1872.
- Chen, G., X. Zhu, W. Sha, T. Iwasaki, H. Seko, K. Saito, H. Iwai and S. Ishii, 2015b: Toward improved forecasts of sea-breeze horizontal convective rolls at super high resolutions. Part II: The impacts of land use and buildings. *Mon. Wea. Rev.*, **143**, 1873-1894.
- Duc, L., K. Saito and H. Seko, 2013: Spatial-temporal fractions verification for high-resolution ensemble forecasts. *Tellus*, **65A**, doi:10.3402/tellusa.v65i0.18171.
- Duc, L., T. Kuroda, K. Saito and T. Fujita, 2015: Ensemble Kalman Filter data assimilation and storm surge experiments of tropical cyclone Nargis. *Tellus*, **67A**, doi: 10.3402/tellusa.v67.25941.
- Ito, K., T. Kuroda, K. Saito and A. Wada, 2015: Forecasting a large number of tropical cyclone intensities around Japan using a high-resolution atmosphere-ocean coupled model. *Wea. Forecasting*, **30**, 793-808.
- Ito, J., T. Oizumi and H. Niino, 2017: Near-surface coherent structures explored by large eddy simulation of entire tropical cyclones. *Sci. Rep.* (accepted)
- Kobayashi, K., D. Kitamura, K. Ando and N. Ohi, 2015: Parallel computing for high-resolution/large-scale flood simulation using the K supercomputer. *Hydrol. Res. Lett.*, **9**, 61-68.
- Kobayashi, K., S. Otsuka, Apip and K. Saito, 2016: Ensemble flood simulation for a small dam catchment in Japan using 10 and 2 km resolution nonhydrostatic model rainfalls. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, **16**, 1821-1839.
- Kunii, M., 2014a: Mesoscale data assimilation for a local severe rainfall event with the NHM-LETKF system. *Wea. Forecasting*, **29**, 1093-1105.
- Kunii, M., 2014b: The 1000-member ensemble Kalman filtering with the JMA nonhydrostatic mesoscale model on the K computer. *J. Meteor. Soc. Japan*, **92**, 623-633.
- Mashiko, W., 2014: Super high-resolution simulation of the fine-scale tornado structure. *CAS/JSC WGN Res. Act. Atmos. Ocean. Model.*, (44), 5.07-5.08.
- 大泉 伝, 黒田 徹, 齊藤 和雄, 2015: スーパーコンピュータ「京」とNHMを用いた2014年8月の広島の高解像度実験. 日本気象学会2015年度春季大会予稿集, P417.
- Oizumi T., K. Saito, J. Ito, T. Kuroda and L. Duc, 2017: An ultra-high resolution numerical weather prediction with a large domain using the K-computer: A case study of the Izu Oshima heavy rain event on 15-16 October 2013. *J. Meteor. Soc. Japan.* (in revision)
- Saito, K., T. Fujita, Y. Yamada, J. Ishida, Y. Kumagai, K. Aranami, S. Ohmori, R. Nagasawa, S. Kumagai, C. Muroi, T. Kato, H. Eito and Y. Yamazaki, 2006: The operational JMA nonhydrostatic mesoscale model. *Mon. Wea. Rev.*, **134**, 1266-1298.
- Saito, K., J. Ishida, K. Aranami, T. Hara, T. Segawa, M. Narita and Y. Honda, 2007: Nonhydrostatic atmospheric models and operational development at JMA. *J. Meteor. Soc. Japan*, **85B**, 271-304.
- Saito, K., T. Tsuyuki, H. Seko, F. Kimura, T. Tokioka, T. Kuroda, L. Duc, K. Ito, T. Oizumi, G. Chen, J. Ito and the SPIRE Field 3 Mesoscale NWP group, 2013: Super high-resolution mesoscale weather prediction. *J. Phys. Conf. Ser.*, **454**, 012073, doi:10.1088/1742-6596/454/1/012073.
- Seko, H., M. Kunii, S. Yokota, T. Tsuyuki and T. Miyoshi, 2015: Ensemble experiments using a nested LETKF system to reproduce intense vortices associated with tornadoes of 6 May 2012 in Japan. *Prog. Earth Planet. Sci.*, **2**, 42, doi:10.1186/s40645-015-0072-3.
- 坪本和久, 2015: CReSSを用いた台風の超高解像度実験. 平成26年度 HPCI システム利用研究課題利用報告書.
- Tsuboki, K. and A. Sakakibara, 2002: Large-scale parallel computing of cloud resolving storm simulator. *High Performance Computing*, ed. by H. P. Zima *et al.*, 243-259.
- Tsuyuki, T., 2014: Deterministic predictability of the most probable state and reformulation of variational data assimilation. *J. Meteor. Soc. Japan*, **92**, 599-622.
- 山敷庸亮, 2015: Hydro-Debris3D(HD3D)を用いた土砂災害予測. 「HPCI戦略プログラム」平成26年度成果報告書 分野3 防災・減災に資する地球変動予測, 76-79.
- Yokota, S., H. Seko, M. Kunii, H. Yamauchi and H. Niino, 2016: The tornadic supercell on the Kanto Plain on 6 May 2012: Polarimetric radar and surface data assimilation with EnKF and ensemble-based sensitivity analysis. *Mon. Wea. Rev.*, **144**, 3133-3157.
- Yu, W., E. Nakakita, S. Kim and K. Yamaguchi, 2015: Improvement of rainfall and flood forecasts by blending ensemble NWP rainfall with radar prediction considering orographic rainfall. *J. Hydrol.*, **531**, 494-507.