

第5回超高精度メソスケール気象予測研究会報告

齊藤和雄^{*1}・瀬古 弘^{*2}・露木 義^{*3}
中村晃三^{*4}・坪木和久^{*5}

1. はじめに

第5回超高精度メソスケール気象予測研究会は、海洋研究開発機構、気象研究所、名古屋大学地球水循環研究センターの共催により、2015年3月9日に名古屋大学東山キャンパス ES 総合館 ES ホールで開催された。この研究会は、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」の研究開発課題②「超高精度メソスケール気象予測の実証」の成果報告会を兼ねた公開研究会として、2011年から毎年行われている。HPCI 戦略プログラムは、神戸ポートアイランドに設置された理化学研究所のスーパーコンピュータ「京」の能力を最大限に活用して世界最高水準の研究成果を創出するとともに、計算科学技術推進体制を構築する取り組みを支援するために実施されている文部科学省の補助金研究で、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 (戦略分野) として、以下の5つの分野で研究が行われている。

分野1 予測する生命科学・医療および創薬基盤

分野2 新物質・エネルギー創成

分野3 防災・減災に資する地球変動予測

分野4 次世代ものづくり

分野5 物質と宇宙の起源と構造

平成21年度に各戦略分野の戦略機関を公募し、実施可能性調査 (FS) を経て戦略機関を決定し、平成22

年度に準備研究、平成23年度から本格実施 (5年間) として、研究開発が行われている。このうち分野3は、海洋研究開発機構が代表機関となっており、全国の大学・研究機関等と共同で、「地球温暖化時の台風の動向の全球的予測と集中豪雨の予測実証、および次世代型地震ハザードマップの基盤構築と津波警報の高精度化」を戦略目標として事業を推進している。研究開発課題は、防災・減災に資する気象・気候・環境予測研究として、

課題①：地球規模の気候・環境変動予測に関する研究

課題②：超高精度メソスケール気象予測の実証の2つが、

地震・津波の予測精度高度化に関する研究として

課題①：地震の予測精度の高度化に関する研究

課題②：津波の予測精度の高度化に関する研究

課題③：都市全域の地震等自然災害シミュレーションに関する研究

の3つが、行われている。

このうち、「超高精度メソスケール気象予測の実証」

では、科学目標として、

目標①：領域雲解像4次元データ同化技術の開発

目標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

目標③：高精度領域大気モデルの開発とそれを用いた基礎研究

の3つを定め、集中豪雨や台風、局地的大雨など災害につながる顕著現象の予測精度向上に関する研究を行っている (Saito *et al.* 2013)。これらの科学目標は、数値モデルとその初期値、予報誤差の評価などで互いに密接に関係している。

「超高精度メソスケール気象予測研究会」は、2011

^{*1} (連絡責任著者) Kazuo SAITO, 気象研究所/海洋研究開発機構, ksaito@mri-jma.go.jp

^{*2} Hiromu SEKO, 気象研究所/海洋研究開発機構,

^{*3} Tadashi TSUYUKI, 気象大学校/気象研究所,

^{*4} Kozo NAKAMURA, 海洋研究開発機構,

^{*5} Kazuhisa TSUBOKI, 名古屋大学地球水循環研究センター,

第1表 超高精度メソスケール気象予測研究会の開催実績。

	開催日	場所	基調講演者とその所属	参考 URL
第1回	2011年 6月2-3日	計算科学研究機構		https://www.jamstec.go.jp/hpci-sp/info/110602/110602.html
第2回	2012年 3月22日	計算科学研究機構		https://www.jamstec.go.jp/hpci-sp/info/120322/120322_report.html
第3回	2013年 3月21日	ニチイ学館神戸ポートアイランドセンター	Ming Xue (米国 オクラホマ大学) SongYou Hong (韓国延世大学)	https://www.jamstec.go.jp/hpci-sp/info/130321/index_report.html
第4回	2014年 3月7日	神戸国際会議場	Brian Golding (英国気象局) 井口享道 (米国メ リーランド大学)	https://www.jamstec.go.jp/hpci-sp/info/meso_sg2014/index_repo.html
第5回	2015年 3月9日	名古屋大学 ES 総合館	David Stensrud (米国ペンシルバ ニア州立大学)	https://www.jamstec.go.jp/hpci-sp/event/meso_sg2015/index.html

年から毎年行われ、今回が5回目となる。これまでの開催実績を第1表に示す。このうち第1回の研究会は、当初、神戸国際展示場で2011年3月28-29日に予定していたが、同年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震に伴う大規模災害の影響により、6月に開催を延期して行われたものである。第3回研究会から

は、この分野における国際的に著名な研究者を国外から招聘して基調講演をお願いし、会合での発表スライドにも英文を用いるようになっている。

第5回研究会は、2015年3月9日に名古屋大学 ES 総合館で、第2表のプログラムに沿って開催された。基調講演者として、米国ペンシルバニア州立大学から David Stensrud 教授を招聘し、一般からの講演を含め60名を超える参加者があった。第1図に今回の研究会のチラシで用いた図を、第2図に集合写真を示す。以下には、各セッションの概要を記す。

2. 研究会の概要

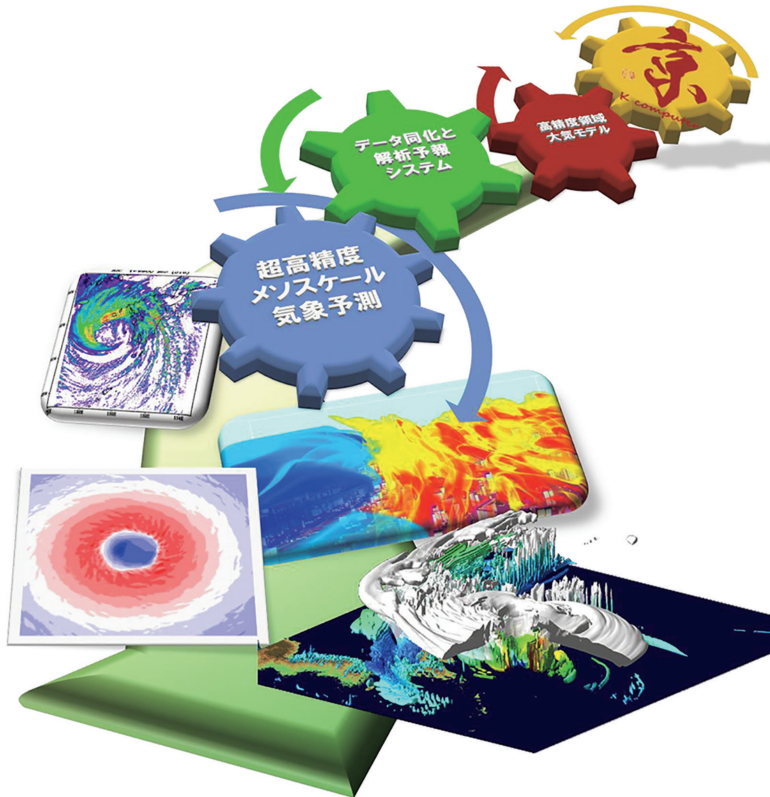
2.1 オープニング

研究会の冒頭に、永田 雅気象研究所長による挨拶を頂いた。過去には、第3回研究会で瀬上気象研究所

第2表 第5回超高精度メソスケール気象予測研究会のプログラム。

9:00-9:20	挨拶	永田 雅
	HPCI 戦略プログラム分野3	時岡達志
	超高精度メソスケール気象予測の実証	斉藤和雄
9:20-10:40	領域雲解像4次元同化システムの開発	(座長 露木 義)
11:00-12:40	領域雲解像アンサンブル予報解析予報システムの開発	(座長 瀬古 弘)
13:50-14:30	基調講演	David J. Stensrud
14:30-17:20	高精度領域大気モデルの開発とそれを用いた基礎研究	(座長 木村富士男)
17:20-17:40	総合討論	(司会 斉藤和雄)

長(当時)に、第4回会合では、文部科学省研究振興局情報課から川口計算科学技術推進室長に挨拶を頂いている。永田所長は、1959年の現業数値予報の開始からの技術の発展について触れた後、集中豪雨など激しい現象の予測はまだ十分とは言えないとして、この研究への期待を述べた。続いて戦略プログラム分野3の防災・減災に資する気象・気候・環境予測研究の課題責任者(平成27年度からは海洋研究開発機構の今脇特任参事)として、海洋研究開発機構の時岡達志特任上席研究員(当時)が、戦略プログラム分野3についての説明を行った。斉藤和雄(気象研究所/海洋研究開発機構)は、「Super high accuracy mesoscale weather prediction」の演題で、気象庁メソ数値予報と降水短時間予報の精度の変遷や強雨予測の課題、「超高精度メソスケール気象予測の実証」でのこれま



第1図 第5回超高精度メソスケール気象予測研究会のチラシに用いられた図。

での取り組みについて、レビューした。(斉藤和雄)

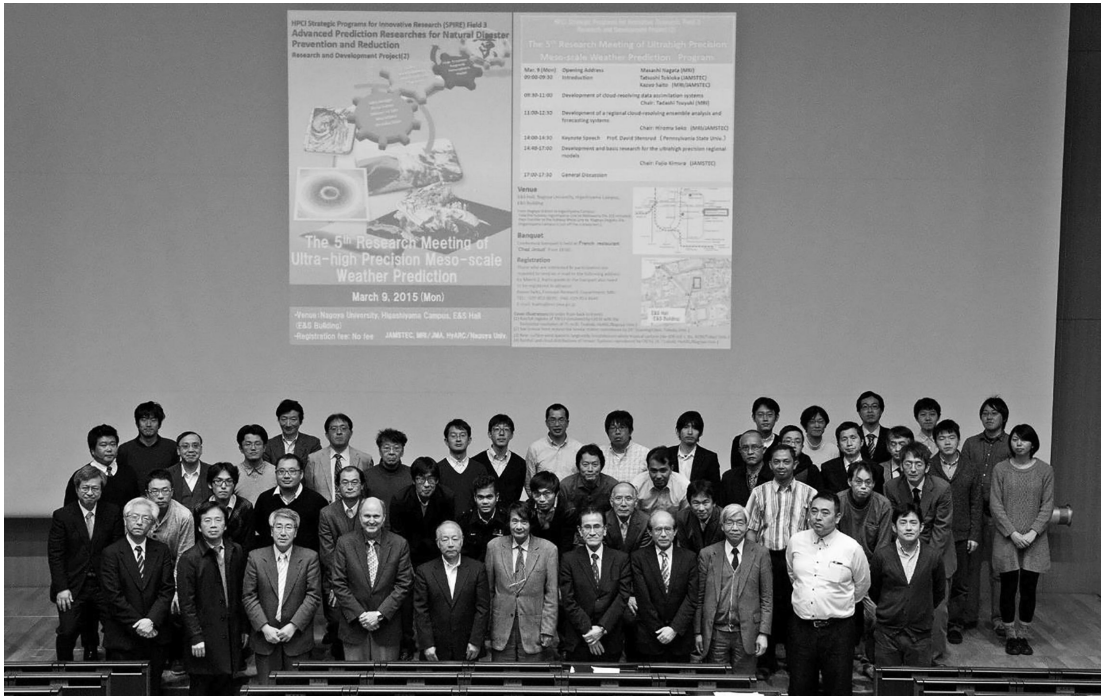
2.2 領域雲解像4次元同化システムの開発

このセッションでは、集中豪雨、局地的大雨、竜巻などを高精度に予測するための雲解像データ同化に関する研究が発表された。まず、露木 義（気象大学校／気象研究所）が本目標の研究計画の概要を説明した後、今回の参加者からは発表されない研究成果として、アンサンブル変分法の実装方法の比較（気象研究所）、アンサンブル変分法と LETKF の比較（気象研究所）、マルチパラメータレーダデータの同化実験（防災科学技術研究所）、「ひまわり」のラピッドスキャンデータの同化実験（気象研究所）を簡単に紹介し、最後に雲解像データ同化法の相互比較実験の計画について述べた。

青梨和正（気象研究所）は、雲解像モデル用のアンサンブルを使った変分同化法スキームの開発について発表した。雲解像モデルの降水物理量の深刻なサンプリング誤差に対応するため、2 スケール分離と

Neighboring Ensemble 法からなるサンプリング誤差抑制法を導入した。この同化スキームの性能評価のため、2004年6月9日の台風事例について、従来データと衛星マイクロ波イメージャによる輝度温度データを同化する観測システムシミュレーション実験を行ったところ、第一推定値と比べて特に降水強度の解析誤差が減り、アンサンブル予報実験では降水強度だけでなく地上風速や気圧の予測精度が改善した。会場からは、台風の進路予報が大きく向上した図が注目された。横田 祥（気象研究所）は、2012年5月6日のつくば竜巻を対象とした、ネストされた LETKF システムによる同化実験について報告した。水平解像度 350 m にダウンスケーリン

グした予報実験では、従来観測データのみの同化だと竜巻の発生位置が北に10 km 以上ずれていたのに対し、気象研究所の二重偏波レーダと NTT ドコモの地上気象観測網による稠密な観測データを同化することによって、観測とほぼ同じ位置に竜巻の発生が予測された。ただし、発生時刻は観測より30分程度早い。以前に瀬古 弘（気象研究所）が発表した従来観測データのみの同化予報実験では、観測と同じく関東地方に竜巻が3個再現されていたが、今回の実験では1個のみである原因について質問があった。伊藤耕介（琉球大）は、ハイブリッド同化システムをメソ気象予測に適用した結果を報告した。このシステムでは、4次元変分法で用いる背景誤差共分散行列として、NMC 法による計算値と LETKF による計算値の重み付き平均を採用する。台風の中心付近の仮想的な1点観測データの同化実験から、NMC 法による従来の4次元変分法と比べて、台風の構造をよく反映した解析インクリメントが得られることを示した。2011年の台風第15号と平成24年7月九州北部豪雨の事例について、ハ



第2図 集合写真。

イブリッド法を4次元変分法やLETKFと比較したところ、比較的短時間の予測ではハイブリッド法が最もよいが、予測時間が長くなるとLETKFが最も優れるという結果が得られた。この結果がほぼ一般的に成り立つことなのか、興味が持たれる。Duc（海洋研究開発機構）は、同様のハイブリッド同化システムについて、背景誤差共分散行列の重み付き平均をとる方法だけでなく、カルマンゲインの重み付き平均をとる方法も試みた。2014年8月20日に発生した広島市の大雨の予測に適用した結果では、予測スコアに用いる降水量の閾値が大きい場合を除いて、どちらの方法でも従来の4次元変分法に対する優位性は見られなかった。この事例では、閾値が大きい場合には前者のハイブリッド法の方が予測スコアが高いという結果であったが、後者のハイブリッド法は前者と比べて計算機資源が少なく済むという利点があるので、多くの事例で性能を比較することが望まれる。

なお、当初予定されていた山口弘誠（京都大学防災研究所）によるマルチパラメータレーダ観測から推定される氷粒子情報の同化に関する発表が、止むを得ない事情により当日キャンセルになったのは残念であった。（露木 義）

2.3 領域雲解像アンサンブル解析予報システムの開発

このセッションでは、目標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」の参加者により、平成26年度の成果が報告された。目標②では、「京」の計算資源を活用して雲解像度によるアンサンブル予報を行うとともに、データ同化を含めた領域解析予報システムを構築して、集中豪雨などの顕著現象に対する予測精度の検証、定量的確率予測の可能性の実証、さらにアンサンブル予報の予測結果を用いた流出予測モデルの検証を目標にしている。

まず、本セッションの最初に、瀬古 弘（気象研究所/海洋研究開発機構）が、目標②の目的やこれまでにホームページ等で紹介されている主な成果、今回発表できない参加者の成果を紹介した。次に個々の参加者の成果として、折口征二（気象研究所）が、「2012年台風第15号の多重壁雲と風速特性」という表題で、アンサンブル予報で得られた複数の予報の出力を用いて、台風の多重壁雲がより一様な円形の分布になるほど、台風の中心付近の気圧傾度が小さく、最大風速も弱くなることを報告した。次に、國井 勝（気象研究所）は、「高解像度大気海洋結合モデルを用いたアン

サンプルカルマンフィルタの構築」という表題で、1次元の海洋混合層モデルと結合させたNHM-LETKFシステムについてと、さらにこのシステムで実験すると現れる海面水温や降水量の負バイアスについて紹介した。陳 桂興（東北大学）は、「Urban weather forecast at super high resolutions using a full scale nested local prediction」という表題で、LETKFを用いて得られた解析値からダウンスケールを行い、さらに格子間隔数mのDS³（Down-Scaling Simulation System）という個々のビルまで表現するモデルを用いて、海風が仙台市内に侵入してくる様子を示した（第1図歯車すぐ下の図）。次に、大泉 伝（海洋研究開発機構／気象研究所）は「『京』を用いた広域を対象にした豪雨の高解像度実験」という表題で、2014年8月に発生した広島豪雨や2013年の台風第26号による伊豆大島の大雨について、広い領域を高分解能なモデルを用いて予報した結果を示した。広島豪雨については、水平格子間隔2kmのモデルにより、線状降水帯が再現できること、格子間隔を500mにすると北東にずれて再現されていた線状降水帯の先端が広島付近まで近づいて、より実況に近くなることを報告した。

山敷庸亮（京都大学）は「土石流発生予測ソフトHydro-debris 2D&3Dの開発とスーパーコンピューティングへの応用」という表題で、2013年の台風第26号による伊豆大島の大雨や広島豪雨により発生した土砂災害について、レーダーで観測された降水量や数値モデルで再現された降水量を適用した結果を示し、広島豪雨では実際に土砂災害が発生した沢の範囲が良く再現できたことを報告した。小林健一郎（神戸大学）は、「アンサンブル洪水予測」という表題で、雲解像アンサンブル予報の結果をダムの流量予測モデルや洪水・浸水予測モデルに適用した結果を示し、ダムの流量予測モデルの評価領域が狭い場合、良好な結果を得るには工夫が必要であることを報告した。さらに、ユ・ワンシク（京都大学防災研究所）が、「超高精度アンサンブル降水予測情報を用いた洪水早期警報への適用評価」という表題で、レーダーによる降水量と数値モデルの出力を用いたハイブリッド予測システムを紹介し、そのシステムを用いたダム管理やリアルタイムの洪水予測の利用可能性を示した。（瀬古 弘）

2.4 基調講演

米国ペンシルバニア州立大学気象学部のDavid Stensrud教授から、「Convective-scale Warn-on-Forecast」という演題での基調講演があった。Warn-on-Forecastは、竜巻など顕著気象の注意報警報を予測に基づいて行う、というプロジェクトで、Stensrud教授が2013年まで在籍していた米国海洋大気庁（NOAA）の国立シビアストーム研究所（NSSL）が中心となって、大学などの参加を得て取り組まれている。基調講演では、まず竜巻（トルネード）予測のリードタイムについて、25年前は3分程度だったものが、近年は15分程度になっていることを示した。これはレーダーなど実況監視システムの充実と処理の迅速化によるものであり、1時間以上のリードタイムを確保するプロジェクトとして、雲解像モデルによるデータ同化とアンサンブル予報による確率予測の概念について示した（第3図）。講演では、対流スケールのデータ同化の課題として、雲物質などリトリブすべき状態変数は直接観測される量でないために劣決定系（under determined）であること、アンサンブルデータ同化では解析場を観測に合わせるができるが、リトリブされる場合はモデルに強く依存すること、などを述べた。またいくつかのケーススタディでの渦度や反射率の確率予測の例などを示した。

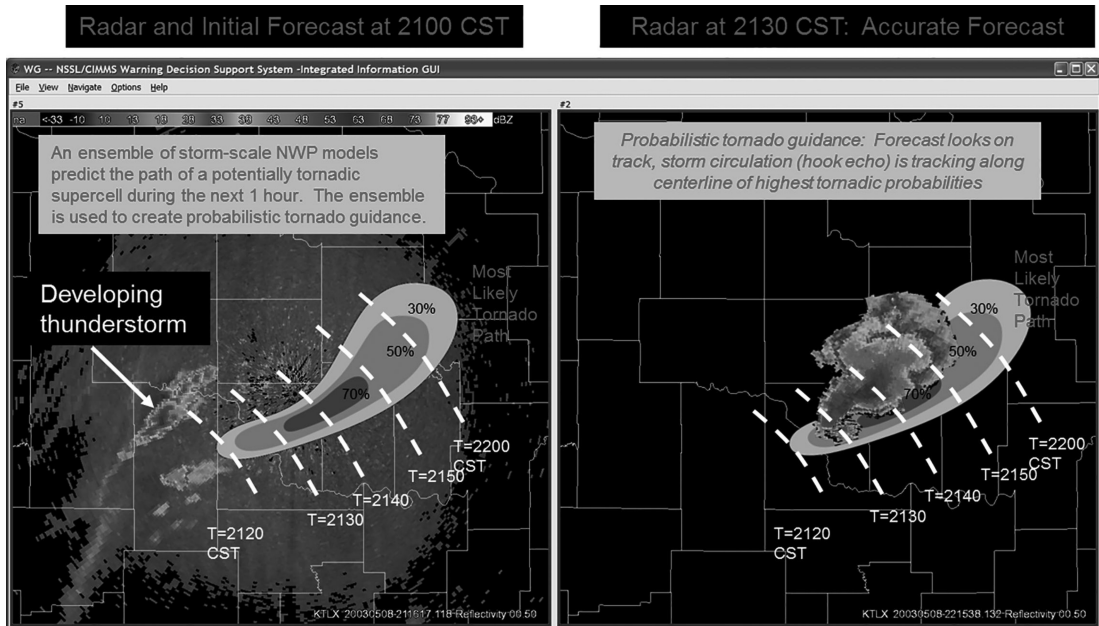
（斉藤和雄）

2.5 高精度領域大気モデルの開発とそれを用いた基礎研究

このセッションでは、高精度領域モデルを竜巻、台風、気候に適用した結果や、モデルに含まれる物理過程（乱流、雲微物理）の改良に関する研究が発表された。まず、木村富士男（海洋研究開発機構）が、本目標の研究計画の概要と今回の発表の概要を紹介した。

益子 渉（気象研究所）は2012年つくば竜巻を対象に、「京」を用いて水平解像度10mの再現実験を行った結果を示した。竜巻の最盛期に多重渦構造ができる過程が再現され、その過程の力学的解析結果や、観測や室内実験との対応などを示した。

坪木和久（名古屋大学）は水平解像度75mのCReSS（Cloud Resolving Storm Simulator）を「京」で実行し、台風に伴う竜巻の予測実験の結果を示した（第1図で歯車の左の図）。2006年の台風第13号では、九州を中心に多数の竜巻が観測されたが、予測実験でも降雨帯に沿って多くの竜巻に相当すると考



第3図 Stensrud教授基調講演における Warn-on-Forecast による竜巻発生の確率予測の概念図（原本は、Stensrud *et al.* 2009）。

えられる気圧偏差を伴う強い渦が再現され、竜巻発生の場所や時刻を数値モデルで直接予測する可能性が示された。辻野智紀（名古屋大学）は「京」を用いて理想化した台風の大規模実験を行い、多重壁雲の置き換えに関する力学的エネルギーの解析結果を示した。台風のも多重壁雲は、壁雲が置き換わる場合と、同じ壁雲が持続する場合がある。後者の場合は、エネルギー効率が大きく時間変化せず、一方、前者の場合、内側の壁雲が消滅するときエネルギー効率は最大になることが示された。伊藤純至（東京大学大気海洋研究所）は「京」を使い、JMANHM（気象庁非静力学モデル）を水平解像度100 mとして台風全域を覆う領域（水平サイズ2000 km×2000 km）でLESとして走らせた結果を示した（第1図中の左下の図）。境界層内のロール状対流の構造やその結果対流による運動量の鉛直輸送が増加し台風全体の構造に影響を与えることなどが示された。

杉 正人（気象研究所）は水平解像度2 km～20 kmのグレイゾーンでの積雲対流パラメタリゼーションスキームに関して議論した。西部熱帯太平洋域での解像度200 mの再現実験結果を正解として、様々な解像度での対流質量輸送などの物理量を計算し、それぞれの解像度でのモデル実験結果との比較を示し、高度

なブリュームモデル開発の重要性を指摘した。竹見哲也（京都大学防災研究所）は湿潤中立に近い成層の条件下でのメソ対流系の組織化と強度に対する湿度の影響について議論した。積雲対流の鉛直方向への発達には雲頂高度より低い高度での環境の相対湿度と密接に関係するが、一方、強い対流が環境に影響されずに上層へ到達してその湿潤化に寄与することが示された。

川瀬宏明（気象研究所）は地域気候モデル（NHRCM）で再現される山岳積雪の解像度依存性について調べ、高度1000～2000 mでは、粗い解像度のモデル結果の方が降雨量、降雪量、積雪量が多くなることを示した。また詳細な地形データを用いると同じ高度でも降雨量の水平分布が変化することも示された。野坂真也（気象研究所）はNHRCMの現在気候再現性に及ぼす地形の影響について調べた結果を発表した。現在利用している地形データは実際の高度よりも低くなっているが、山岳の高度をより高くすることで降水量の再現性が改善された。一方、降雪量は過大評価になった。新たな地形と現在の地形の間の値を使うことで、降水量の再現性をある程度改善し、降雪量の過大評価も改善することができることを示した。

橋本明弘（気象研究所）は、「京」で走らせた多次元ビン法雲微物理過程モデルを用いた再現実験の結果

を発表した。理想的なパーセルの上昇実験と JMA-NHM に組み込んだ 2 次元対流再現実験の結果で、それぞれの場合について、氷晶、凍結水滴、雪片、雹などの時間空間変化から、ライミングや併合成長の様子がよく再現できることが示された。中村晃三（海洋研究開発機構）は、暖かい雨に関するビン法について、運動場は共通で、雲微物理過程モデルだけ変化させた比較実験の結果を示した。微物理過程を凝結核の活性化、凝結成長過程、衝突併合過程の 3 つに分け、それぞれの過程でのモデルによる違いを示した。

（中村晃三）

2.6 総合討論

総合討論では、斉藤がメソスケール気象予測の現状と今後、そのための筋道について、表を示して議論を行った。データ同化ではマルチスケールの効果や非線形性の考慮、アンサンブル数値予報システムでは、システムの最適化、予報モデルの誤差の考慮、確率予測の信頼度の検証、高解像度モデルでは、モデルの最適化や可視化、新しいスキームの開発などを挙げた。また、文部科学省研究振興局の諮問によりまとめられた「計算科学ロードマップ」に触れ、HPCI 戦略プログラムの後継に位置付けられるプロジェクトとして、「ポスト京で重点的に取り組むべき社会的・科学的課題」が始まっており、防災環境問題の気象・気候課題として「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」が採択されていることに言及した。

（斉藤和雄）

3. おわりに

これまでの超高精度メソスケール気象予測研究会は第 4 回まで毎年神戸で開催していたが、平成 26 年度は非静力学モデルに関する国際ワークショップ (3rd International Workshop on Nonhydrostatic Models) とデータ同化に関する国際シンポジウム (4th International Symposium on Data Assimilation) のいずれもが神戸で行われたため、場所を初めて神戸以外に移して開催した。会場となった名古屋大

学 ES 総合館は、2011 年に完成した工学研究科と理学研究科の機能的な研究・交流スペースで ES ホールはこの研究会に最適な会議場であった。同じ建物には、名古屋大学が輩出したノーベル賞受賞者の展示施設もあり、学際的な雰囲気に入ることができた。基調講演者として招聘した Stensrud 教授からは、第 1 図の絵を用いたチラシについて非常に美しい、とお褒めを頂き、また帰国後に大変良い研究会だったと感想が寄せられた。本戦略プログラムは終盤戦にかかり、データ同化とアンサンブル予報の高度化ならびにモデルの超高分解像度化により、これまで難しかった豪雨、竜巻、台風や都市気象の微細構造などの再現や予測が可能となることを示しつつある。「京」ならではの成果であり、残り 1 年にさらなる研究の発展を期したい。最後に会場の設営や懇親会を含む会議のロジスティックにご協力頂いた海洋研究開発機構と名古屋大学の関係者の皆様に感謝するものである。

（斉藤和雄・坪木和久）

略語一覧

HPCI : High Performance Computing Infrastructure
 LETKF : Local Ensemble Transform Kalman Filter
 NMC : National Meteorological Center
 NOAA : National Oceanic and Atmospheric Administration
 NSSL : National Severe Storms Laboratory

参考文献

- Saito, K., T. Tsuyuki, H. Seko, F. Kimura, T. Tokioka, T. Kuroda, L. Duc, K. Ito, T. Oizumi, G. Chen, J. Ito and 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.
- Stensrud, D.J., L.J. Wicker, K.E. Kelleher, M. Xue, M.P. Foster, J.T. Schaefer, R.S. Schneider, S.G. Benjamin, S.S. Weygandt, J.T. Ferree and J.P. Tuell, 2009: Convective-scale warn-on-forecast system. Bull. Amer. Meteor. Soc., **90**, 1487-1499.