

第2回 TOMACS 国際ワークショップの報告

—首都圏をフィールドとした極端気象に関する国際共同研究の進捗—

三 隅 良 平^{*1}・中 谷 剛^{*2}・小 司 禎 教^{*3}・瀬 古 弘^{*4}
 斉 藤 和 雄^{*5}・清 野 直 子^{*6}・鈴 木 真 一^{*7}・出 世 ゆかり^{*8}
 平 野 洪 實^{*9}・足 立 アホロ^{*10}・山 内 洋^{*11}

1. はじめに

TOMACS (Tokyo Metropolitan Area Convection Study) は、日本の首都圏をフィールドとした国際共同研究である。この国際共同研究は、文部科学省の予算で実施された日本国内の研究プロジェクト「気候変動に伴う極端気象に強い都市創り」で集積された観測データを共有することによって、①都市における極端気象のメカニズム解明、②極端気象の予測技術の向上、③社会実験を通じた高解像度気象データの社会実装を図ることを目的としている。TOMACS は2013年7月に WMO の世界天気研究計画 (WWRP) の研究開発プロジェクト (RDP) として認証され (Nakatani *et al.* 2013), 7 か国からの参加のもと、2016年6月まで実施される予定である。

TOMACS という名称はもともと、国内研究プロジェクト「・・・都市創り」の英語名として使われていた。しかし、そこで集積されたデータの利活用を軸として提案された研究計画が RDP として正式に認証

されたことによって、TOMACS はあらためて国際共同研究の名称として認知されることになったのである。

TOMACS では、各国の取り組み状況について情報交換を行うため、定期的に国際ワークショップを実施している。2013年12月につくば市で行われた第1回 (中谷ほか 2014 ; Nakatani *et al.* 2015) に引き続き、防災科学技術研究所 (防災科研) と気象研究所 (気象研) の共催により、第2回国際ワークショップを2014年11月26-27日に東京ビッグサイトで開催し、国内外から74名の研究者が参加した (第1図)。今回は2回目ということもあり、実際に海外の研究者が日本の観測データを活用した成果も紹介された。以下、当日行われた学術セッションの様子を紹介する。なお当日のプログラムと講演予稿は <http://mizu.bosai.go.jp/c/c.cgi?key=TOMACS> (2015.2.3閲覧) からダウンロードできる。

2. 極端気象の観測

2.1 レーダ観測

レーダを用いた観測研究に関しては、様々な波長帯をもつレーダの利用や二重偏波レーダの応用、フェイズドアレイレーダの現状に関する報告が行われた。牛尾知雄 (大阪大学) は、これまで大阪大学が開発してきた X バンドフェイズドアレイレーダを紹介した。このレーダは1 ボリュームスキャンに要する時間が10-30秒であり、従来のレーダ (約5分) に比べて格段に短いという特徴がある。また X バンドフェイズドアレイレーダおよび Ku バンド高速スキャンレーダのネットワークを活用した、大阪平野で発生した強雨の高時間分解能の観測事例についても紹介され、従来

^{*1} (連絡責任著者) Ryohei MISUMI, 防災科学技術研究所, misumi@bosai.go.jp

^{*2} Tsuyoshi NAKATANI, 防災科学技術研究所。

^{*3} Yoshinori SHOJI, 気象研究所。

^{*4} Hiromu SEKO, 気象研究所。

^{*5} Kazuo SAITO, 気象研究所。

^{*6} Naoko SEINO, 気象研究所。

^{*7} Shin-ichi SUZUKI, 防災科学技術研究所。

^{*8} Yukari SHUSSE, 防災科学技術研究所。

^{*9} Kohin HIRANO, 防災科学技術研究所。

^{*10} Ahoro ADACHI, 気象研究所。

^{*11} Hiroshi YAMAUCHI, 気象研究所。

© 2015 日本気象学会



第1図 参加者の集合写真。

のレーダでは観測できなかった強雨の詳細な時間変化の解析結果が示された。さらに現在開発中の二重偏波フェイズドアレイレーダのシミュレーション結果についても示された。

山内 洋（気象研）は、2014年6月に三鷹市などで発生した降雹の事例を気象研のCバンド二重偏波レーダで解析した事例を紹介した。偏波情報とドップラー速度などを組み合わせることにより、上昇流域や雹の発達領域など積乱雲の内部構造を解析することができる。この解析結果に対して、会議に出席していた V. Chandrasekar（コロラド州立大学）から共同研究を行いたいという提案があった。

柏柳太郎（千葉大学/日本無線）は、2012年8月に房総半島上で発生した積乱雲について、気象衛星ひまわりによる高頻度観測とXバンドレーダおよびWバンドレーダを用いて、時間的な発達の様子とこれに伴う上昇流について解析した結果を報告した。この雲は鉛直観測を行っていたWバンドレーダの直上で発生・発達したことから、今後の解析に期待するというコメントが寄せられた。

足立アホロ（気象研）は、降雨減衰のある周波数帯の二重偏波レーダを使って高精度に降雨強度を推定する手法を開発した。この手法は、レーダの動径方向に沿った二重偏波情報を用いた雨滴の粒径分布の推定と、推定された粒径分布に基づく減衰補正を行い、それらの結果が二重偏波情報土の自己整合性を満たすように繰り返し処理を行うものであり、レーダ観測値の校正のための地上観測を必要としないという利点をもつ。この手法によって推定された降雨強度について、 $Z-R$ （レーダ反射因子－降雨強度）関係や $K_{DP}-R$ （比偏波間位相差－降雨強度）関係から推定される降雨強度に比べて、真値（地上観測値）に対するバイ

アスが小さいという検証結果が示された。

D.-I. Lee（釜慶大学）は、済州島内に多数配置したディストロメータ、2台のSバンドドップラーレーダおよびゾンデ観測等を用いて、梅雨前線および台風の2つの事例における地形性降水の特性の違いを報告した。梅雨前線の事例では、下層の風速が比較的弱く、島中央のハルラ山の風下側で降水が多かった。一方台風の事例では、下層の風速が強く、ハルラ山の風上側で降水が多かった。この違いについて、フルード数の相違により、強い上昇流の発現位置が異なったためと考察した。

2.2 衛星データとGNSS

2014年10月に打ち上げられた「ひまわり8号」によるラピッドスキャン観測や、国土地理院が全国に展開しているGNSS（Global Navigation Satellite System）観測網で得られる高頻度の水蒸気量データは、局地的大雨を引き起こす積雲の発生・発達の監視等に利用できるすぐれた観測データである。

隅田康彦（気象衛星センター）は、「ひまわり8号」で行われるラピッドスキャン観測により、日本付近の領域では2.5分毎、水平分解能も可視で0.5～1kmという、これまでにない高分解能・高頻度なデータが得られることを紹介した。その観測データにより、発生初期の積雲を捉えられる可能性や、バンド数が16チャンネルに増えたことで雲粒子の特性や火山灰等を高度に把握できる可能性がある。

小司禎教（気象研）は、GNSSによる水蒸気量の推定法等についての解説を行うとともに、具体的な解析例として、2012年5月6日に発生したつくば市における竜巻事例を紹介した。今後、日本の準天頂衛星やロシアのGLONASS（Global Navigation Satellite System）等によって観測数が増加する視線遅延量を

用いることで、積雲対流スケールの水蒸気変動まで捉えられる可能性のあることが述べられた。

2.3 無人航空機と地上観測

三隅良平（防災科研）は、各国で開発・運用中の気象観測用無人航空機の現状を紹介するとともに、現在彼らが使用しているラジオゾンデ用センサーを搭載した無人航空機について報告した。無人航空機の姿勢と対気・対地速度から風ベクトルを推定する手法の精度を、同時に行ったドップラーライダー観測との比較で示し、さらに無人航空機による気象観測の初期結果を報告した。野呂瀬敬子（防衛大学校）は、2013年8月に群馬県高崎市から前橋市にかけて発生した突風の事例を、地上に高密度に設置した小型気象観測装置のデータを用いて解析した。その結果、気圧の急上昇と急低下が伝搬する様子から、この突風がダウンバーストとガストフロントに伴うものであることを明らかにした。

3. ナウキャストとデータ同化

3.1 ナウキャスト

首都圏に稠密にはりめぐらされた気象レーダ観測網の活用により、ナウキャストの精度が飛躍的に向上することが期待されている。D. Schertzer（パリ東大学）は、ナウキャストにおいて、現象を空間スケールに分けて取り扱うことが重要であると述べるとともに、レーダデータの空間解像度が水文モデルの流出応答に強く影響することを示した。

P. Joe（カナダ環境省）はトロント市で2015年に実施する The Pan Am Games と呼ばれる野外観測計画を紹介した。この計画には、ドップラーレーダやドップラーライダーを用いた観測の他に、大気質の観測も含まれている。また対流雲の発生予測に関して、大気下層の安定度と空気の収束量を監視することが重要であるという考え方を示した。2016年には世界各国で行われている都市気象に関する合同ワークショップが計画されており、TOMACS にも参加を呼びかけた。

P. C. Shakti（防災科研）は、オーストラリア気象局と英国気象局が共同開発したアンサンブル短期予報システム（STEPS）を用いて、関東の大雨の事例を対象に、気象庁が配信している「降水ナウキャスト」との比較結果を示した。平均的な予報のスコアには大差はなかったが、アンサンブル平均をとることで、降水ナウキャストで時折見られる大きな予測のはずれを回避できる可能性がある。

西嶋 信（気象庁）は気象庁が2014年から運用している「高解像度降水ナウキャスト」を紹介した。日本の陸地全域を250 m メッシュで予測していることに関して、海外参加者から驚きの声が聞かれた。また井上実（京都大学）は、Xバンドレーダのデュアル・ドップラー解析データを活用した「強風ナウキャスト」を紹介した。現時点ではスカラー量である風速のみを予測しているが、ベクトルとしての風の予測可能性について会場から質問があった。

中北英一（京都大学）は、豪雨による河川の鉄砲水の被害を防ぐには、豪雨をもたらす雨セルを早期検出し、豪雨が発生する前に警報を発表する必要があると強調した。またその実現に向けて開発された、Xバンド二重偏波レーダを用いた上空の雨セルの早期検出手法と、ドップラー速度から得られる過度より雨セルが強雨をもたらす危険度を決定する手法が紹介された。さらにこれらの手法をベースにした局地的豪雨探知システムが、国交省内部の現業システムとして試験的に運用されていることが報告された。

中村 功（東洋大学）は、消防、地方自治体、鉄道、建設、一般住民へ高解像度の気象情報を配信する社会実験について紹介した。2014年8月20日の広島市の豪雨災害を例にあげ、高解像度の気象情報を配信するだけでなく、その情報を防災担当者の行動計画の中に組み込むことが重要であることを強調した。

3.2 データ同化

首都圏における稠密な気象観測データを活用した、データ同化とそのインパクトに関する研究も、TOMACS における重要な課題である。横田 祥（気象研）は、2012年5月6日に関東地方で発生した竜巻に関する NHM-LETKF（局所アンサンブル変換カルマンフィルター）による同化実験を報告した。気象研の二重偏波レーダと高密度地上観測のデータを水平格子間隔350 m で同化し、同化結果を初期値とした水平格子間隔50 m の実験を行ったところ、比偏波間位相差を用いて推定した雨水量を同化した実験では、これを同化しない場合より下層の水蒸気量が多くなり、それに伴って後の降水が強くなるなどの結果を得た。

清水 慎吾（防災科研）は、IAU（Incremental Analysis Update）と呼ばれる計算コストの軽い同化手法を開発し、横田と同じ事例について、首都圏のレーダ観測網から得られた動径風を、5分間隔という高頻度で、水平格子間隔 1 km の CRSS-3DVAR（3次元変分法同化）システムを用いて同化した。

IAUを適用したものは、下層メソサイクロンを再現し、IAUを適用しないものに比べ、鉛直渦度を良く再現していた。こうした予測の改善は、RUC (Rapid Update Cycle) における鉛直渦度発達のスピンアップ、スピンドアウンの改善に起因すると考えられる。

瀬古 弘 (気象研) は、ドップラーレーダで観測したビルや鉄塔など静止構造物からの反射波の位相変化を利用し、電波経路上の屈折率を推定する手法を開発した。2008年8月4日の東京地方の線状降水事例についてNHM-LETKFを用い、屈折率を同化した結果、予測された降水の分布が観測に近づいた。

V. Wulfmeyer (ホーヘンハイム大学) は、ホーヘンハイム大学物理・気象研究所で開発されているWRF-NOAH-MP-HYDROモデルを紹介した。このモデルは、土壌とキャノピー層に独立したエネルギーバランスクロージャーを採用する地表面モデルを含んでいる。植生動態と根の成長を精細化することで、土壌水分と蒸発輸送を顕著に改善している。2013年7月から9月の間、北緯20-65度の帯状領域について水平3 km 格子でモデルを実行しているが、実行期間にはTOMACSの2013年夏の集中観測が含まれており、今後、データ同化による2013年7月18日の豪雨事例を対象に実験を行うとのことである。

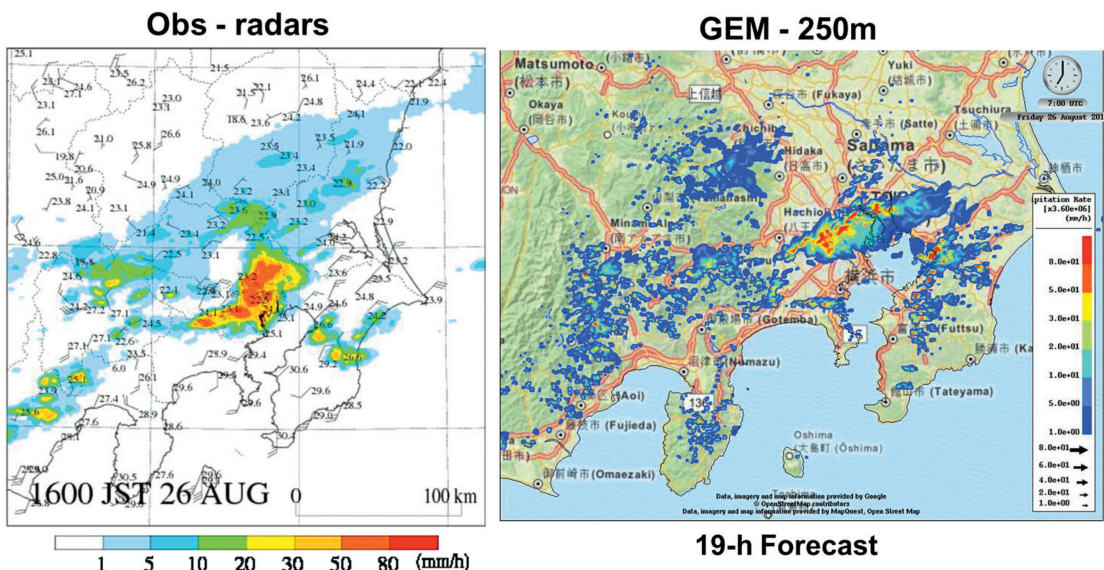
斉藤和雄 (気象研) は、対流スケールデータ同化システムの相互比較の必要性と、HPCI (High Perfor-

mance Computing Infrastructure) 戦略プログラムで行われている水平格子間隔2 kmのモデルによる予備的な実験結果について紹介した。この実験では、2013年7月18日の局地的降水の事例が対象として提案されている。講演ではNHM-LETKFを用いた実験が紹介された。7月18日09時 (日本時) を解析時刻として予測実験を行った結果、18時前後の弱い雨の表現は良いものの、21-22時に発生した強雨の予測については、側面境界条件の大きな影響が示唆される結果であった。この結果を受け、解析時刻の変更や、対象事例の変更等を検討しているとのことだった。

4. 都市の気象

都市気象のセッションでは、東京やグラス・フォートワースなどの都市を対象にした解析やモデリングに関する講演が行われた。TOMACSの観測成果の活用、とりわけ海外の参加者による研究の進展がうかがえたセッションであり、質疑も活発に行われた。

清野直子 (気象研) はTOMACS集中観測期間中に発生した2例の短時間強雨の特徴を、ゾンデ観測の解析結果と2 km 格子間隔のNHMによる数値実験から論じた。また瀬戸芳一 (東京都環境科学研究所/首都大学) は、2013年8月に東京都区部で発生した短時間強雨に着目し、GNSS観測から得られた可降水量集中度が強雨発生の指標となり得ることを示した。



第2図 2011年8月26日1600JSTの首都圏における1時間降水量分布 (左、解析雨量) とGEMモデルによるシミュレーション結果 (右)。

S. Belair (カナダ環境省) は、250 m 格子間隔の GEM (Global Environmental Multiscale model) を用い、2011年8月の大規模降水事例が概ね現実的に再現されることを示し (第2図)、あわせて解像度・初期値・都市効果の感度実験の結果を紹介した。一方、A. Pereira Filho (サンパウロ大学) は日本を対象として、ARPS による2011年から2013年の夏季3ヶ月のシミュレーション結果を示し、再現性の月毎の違い等を議論した。

V. Chandrasekar (コロラド州立大学) は、グラス・フォートワースで実施中の、都市圏における局地的気象災害軽減のための取り組みを紹介した。このプロジェクトでは X バンドレーダネットワークのデータが地域の関係者にリアルタイムで提供されており、竜巻や雹、強風、洪水の警報システムが有用であった最近の事例についても報告された。

5. TOMACS の意義と経緯

閉会挨拶で斉藤和雄 (気象研) は、局地的な大きな影響のある天気 (Local High Impact Weather) 研究としての TOMACS の意義と経緯について述べた。2008年夏季に頻発した局地豪雨についての気象学会専門分科会の開催が、国内研究プロジェクト「気候変動に伴う極端気象に強い都市創り」の発端となった。さらに、WWRP/RDP としての2008年の北京オリンピック予報実験へ参加した経験や、欧州での対流雲の高密度観測/予測実験の RDP である COPS (Convective and Orographically-induced Precipitation Study) が参考になり、日本が中心となっていく初めての WWRP/RDP として TOMACS が提案され、認証された。国内プロジェクト「気候変動に伴う極端気象に強い都市創り」は2015年3月で終了するが、WWRP/RDP としての TOMACS は少なくとも2016年6月までは続く。

謝 辞

本ワークショップの開催にあたり、地域組織委員会のメンバーとしてご尽力下さった中井綾子氏と今井菜美氏、およびワークショップの運営をサポートしていただいた気象研究所および防災科学技術研究所のスタッフの皆様に感謝いたします。

略語一覧

3DVAR : Three Dimensional Variational Assimilation

3次元変分法同化

ARPS : Advanced Regional Prediction System オクラホマ大学で開発された非静力学数値気象モデル

COPS : Convective and Orographically-induced Precipitation Study ヨーロッパで行われた降水量予測に関する研究開発プロジェクト

CRSS : Cloud Resolving Storm Simulator 名古屋大学地球水循環研究センターで開発された雲解像数値気象モデル

GEM model : Global Environmental Multiscale model カナダ環境省で開発された数値予報モデル

GLONASS : Global Navigation Satellite System ロシアが運用している全地球航法衛星システム

GNSS : Global Navigation Satellite System 全地球航法衛星システム (GPS はその代表的システム)

HPCI : High Performance Computing Infrastructure スーパーコンピュータ「京」を中核としたネットワーク・インフラ

IAU : Incremental Analysis Update 同化による修正量を、強制力として一定の割合で与え続ける手法

LETKF : Local Ensemble Transform Kalman Filter 局所アンサンブル変換カルマンフィルター

NHM : Non-Hydrostatic Model 気象庁非静力学モデル

RDP : Research and Development Project 研究開発プロジェクト

RUC : Rapid Update Cycle 高頻度でデータ同化を行うこと

STEPS : Short Term Ensemble Prediction System 英国気象局とオーストラリア気象局が共同開発したアンサンブル短期予報システム

WMO : World Meteorological Organization 世界気象機関

WRF : Weather Research and Forecasting model 天気研究予報モデル

WRF-HYDRO : Weather Research and Forecasting Model Hydrological modeling extension package WRF の水文過程を拡張したモデル

WRF-NOAH-MP : Weather Research and Forecasting Model coupled with the Noah Multi Physics land surface model WRF と地表面モデルを結合したもの

WWRP : World Weather Research Programme 世界天気研究計画

参 考 文 献

Nakatani, T., Y. Shoji, R. Misumi, K. Saito, N. Seino, H. Seko, Y. Fujiyoshi and I. Nakamura, 2013: WWRP RDP Science Plan: Tokyo Metropolitan Area Convection Study for Extreme Weather Resilient Cities

(TOMACS). http://www.wmo.int/pages/prog/arep/wwrp/new/documents/Doc4_6_TOMACS_RDP_proposal_20130704.pdf (2015.2.1閲覧).

中谷 剛, 三隅良平, 小司禎教, 齊藤和雄, 瀬古 弘, 清野直子, 鈴木真一, 出世ゆかり, 前坂 剛, 菅原広史, 2014: 第1回 TOMACS 国際ワークショップの報告—WMO 世界天気研究計画・研究開発プロジェクトの

開始—, 天気, **61**, 557–564.

Nakatani, T., R. Misumi, Y. Shoji, K. Saito, H. Seko, N. Seino, S. Suzuki, Y. Shusse, T. Maesaka and H. Sugawara, 2015: Tokyo Metropolitan Area Convection Study for Extreme Weather Resilient Cities (TOMACS). Bull. Amer. Meteor. Soc., doi:10.1175/BAMS-D-14-00209.1.