

3. 次世代スーパーコンピュータとビッグデータが拓く 未来の気象予測

三 好 建 正*

1. はじめに

本シンポジウムの主題は、「線状降水帯などに代表される集中豪雨や台風に伴う大雨、それに伴う災害を主な対象とし、最も大きな被害をもたらす土砂災害の様相、10年程度先を見通したときに必要となる観測・予測技術及び災害情報の提供に関する技術」である。気象は乱流スケールから惑星スケールの広範囲に渡るスケール間相互作用を含むマルチスケール現象である。スケール毎に予測可能性が異なり、予測手法・予測技術も違えば、予測情報が果たすべき役割も違う。大きなスケールの現象ほど予測可能性が長く、細かくピンポイントになるほど予測可能性が短い。例えば、主題にある「線状降水帯などに代表される集中豪雨」は、総観規模に対流不安定な環境下で、同じ場所で大気下層の水蒸気供給が継続し対流が立ち続ける条件が揃ったときに起こる。その予測可能性は、総観規模の環境場から、個々の積乱雲まで複数のスケールを含む。それぞれのスケールで、数日先まで予測可能性を持つ総観規模の環境場、12時間程度先まで予測可能性を持つ積乱雲の集合組織化、直近30分程度先まで予測可能性を持つ個々の積乱雲の内部構造などが考えられ、それぞれ予測手法も違えば、防災情報として果たすべき役割も違う。

本発表では、著者らのグループで取り組んできたスーパーコンピュータ「京」を使った研究を紹介し、フェーズドアレイ気象レーダやひまわり8号といった新しい観測技術と次世代スーパーコンピューティング技術を活用することでどのような予測が技術的に可能

となるか議論する。これに基づき、これまでとは異なる新しい予測が可能となった時、これを防災情報としてどのように役立てうるか考察する。これらを通じ、今後どのような予測技術を切り拓いていくべきか、先端研究の方向性についても考えたい。

2. 個々の積乱雲のピンポイント予測

フェーズドアレイ気象レーダは鉛直方向約100層を瞬時に観測する新型センサである。これにより、わずか30秒の間に60km先まですき間なく3次元的な雨雲の分布を観測する。パラボラアンテナはこの間に1層しか観測しないため、フェーズドアレイ気象レーダのデータ量は約100倍と2桁多くなる。新型センサによる「ビッグデータ」である。

著者らのグループは、スーパーコンピュータ「京」とフェーズドアレイ気象レーダを生かし、個々の積乱雲をピンポイントに捉える100mメッシュで30秒更新の30分予測という革新的な天気予報の可能性を示した(Miyoshi *et al.* 2016a, b; 2016年8月9日理化学研究所プレスリリース, http://www.riken.jp/pr/press/2016/20160809_1/ 2019.4.15閲覧)。また、スーパーコンピュータを使わず、フェーズドアレイ気象レーダを生かした30秒更新の10分後までの降水ナウキャスト(Otsuka *et al.* 2016; 2017年7月4日理化学研究所プレスリリース, http://www.riken.jp/pr/press/2017/20170704_1/ 2019.4.15閲覧)を開発し、リアルタイム配信を行ってきた。

第1図に示すのは、解像度100mの領域数値天気予報モデルSCALE-RM(Nishizawa *et al.* 2015)を使って、フェーズドアレイ気象レーダの30秒毎の3次元データ(反射強度及びドップラー風速)を同化した結果である。SCALE-RMに局所アンサンブル変換カ

* 理化学研究所計算科学研究センター。

takemasa.miyoshi@riken.jp

© 2019 日本気象学会

ルマンフィルタ (LETKF, Hunt *et al.* 2007) を実装した SCALE-LETKF システム (Lien *et al.* 2017) を新たに開発し、30秒毎に同化できるよう工夫を凝らした。観測された雨雲が精密にシミュレーションで再現された。

第1図に示しているのは、いわゆる「ゲリラ豪雨」と呼ばれる急速に発達する局地的豪雨である。これと同じことが、線状降水帯や、台風に伴う雨雲についても、個々の積乱雲を100m メッシュで解像して、行うことができる。個々の積乱雲の空間スケールは数 km 程度、1時間程度以内で生成消滅する。その予測可能性は高々1時間程度であろうが、ピンポイントに降雨強度、場所が表現できる。

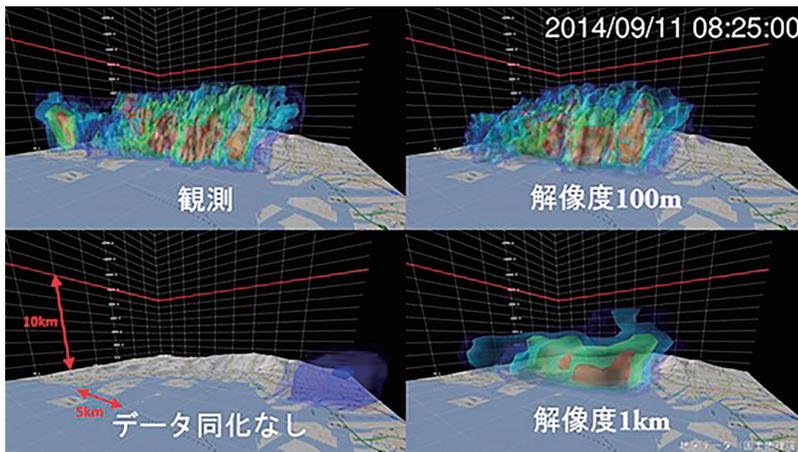
このような詳細な予測情報は、直前であっても、ある特定の場所の崖崩れや洪水リスクの把握に役立つ可能性がある。急速に発生、発達する局地的豪雨であれば、緊急地震速報の豪雨版としての役割も考えられるだろう。

3. ひまわり 8号を生かした台風や集中豪雨の予測 ひまわり 8号の新型センサは、10分毎にフルディス

ク撮像を行い、バンド数及び解像度の向上と合わせて、以前のひまわり 7号の約50倍のデータを得る。著者らのグループは、ひまわり 8号の10分毎の観測データを生かし、10分毎に予報を更新することの有効性を示した (Honda *et al.* 2018a, b; 2018年1月18日理化学研究所プレスリリース, http://www.riken.jp/pr/press/2018/20180118_1/ 2019.4.15閲覧)。

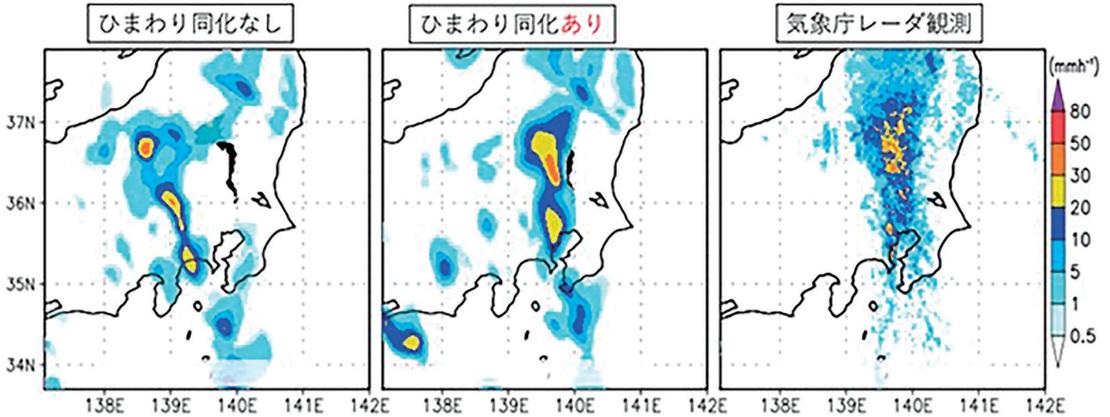
第2図に示すのは、鬼怒川の堤防が決壊して災害をもたらした平成27年9月関東・東北豪雨の際の12時間後の降水量予測の例である。ひまわり 8号の10分毎の赤外輝度温度 (バンド 9) を、雲域を含めた全天候で同化することで、線状降水帯の位置が大きく修正され、実際に観測された降水域に近づいた。これにより、鬼怒川の流量予測を10分毎に更新することが可能となり、一刻も早い時点で洪水リスクを捉えることができる (第3図)。

このほか、2018年1月18日理化学研究所プレスリリースでは、台風事例についても示しており、ひまわり 8号の10分毎のデータ同化により、台風の予測が大幅に向上することを示した。Honda *et al.* (2018a) は、30分毎のデータ同化では台風の強度予測の改善が

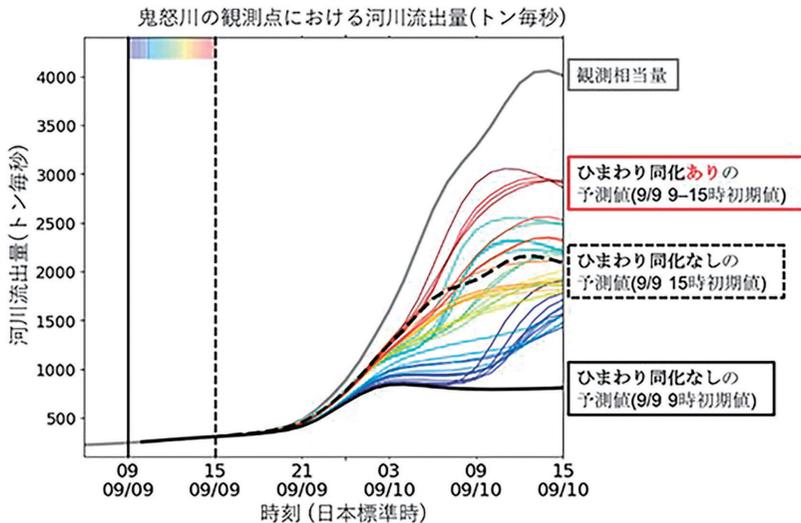


第1図 2014年9月11日午前8時25分の神戸市付近における雨雲の分布。左上：フェーズドアレイ気象レーダの実測データ。左下：データ同化をしないシミュレーションの結果。右上：解像度100mの「ビッグデータ同化」によるシミュレーション結果。右下：解像度1kmのデータ同化によるシミュレーション結果。右上の解像度100mの「ビッグデータ同化」によるシミュレーション結果は、左上の観測データをよく再現している。右下の1kmのデータ同化によるシミュレーション結果は、観測データが表す雨雲の内部構造を詳細に表すには不十分である。左下は30秒ごとの観測データを同化しない場合を示し、観測データに対応する雨雲が現れない。なお、強い雨ほど赤く示している。2016年8月9日理化学研究所プレスリリースの図1より転載。

予報開始から12時間後の前1時間降水量(mm h⁻¹)



第2図 2015年9月9日午前9時を初期時刻とする12時間降水予報の結果と実際のレーダ観測。左はひまわり8号同化なし, 中央はひまわり8号同化ありの降水予測, 右は気象庁によるレーダ観測から推定された降水量。ひまわり8号観測を同化することで, 南北に伸びる降水帯の位置が大幅に改善されたことが分かる。いずれも, 理研の数値天気予報モデル SCALE-RM, データ同化システム LETKF を用いた計算。2018年1月18日理化学研究所プレスリリースの図3より転載。



第3図 2015年9月9日の河川流出量の予測結果。6時間ごとの従来型観測のみの場合, 河川流出量予測も6時間ごとにしか更新できない(図の黒線と黒破線)。一方, 10分間隔の高頻度で観測するひまわり8号を最大限に活用すれば, 降水および河川流出量予測を10分ごとに更新することが可能となる(色線, 赤に近いほどより遅い初期時刻)。頻繁に予測を更新することで, 洪水リスクをより長いリードタイムで捉えられることを示した。いずれも, 理研の数値天気予報モデル, データ同化システムを用いた計算。2018年1月18日理化学研究所プレスリリースの図4より転載。

小さく、10分毎のデータ同化により台風の強度予測が大幅に改善することを示した。

ここで述べた予測は、前節での個々の積乱雲のピンポイントな直近予測とは異なり、12時間後、24時間後の予測である。この時間スケールでの線状降水帯や台風を構成する個々の積乱雲の予測可能性は恐らくない。しかし、線状降水帯や台風といった積乱雲が集まり組織化した大きなスケールの現象は、そのスケールに見合った予測可能性を持つ。これら異なるスケールの予測情報を、それぞれの特長を生かして適切に活用することが重要となる。

4. まとめと展望

ここまで、著者らのグループが取り組んできたスーパーコンピュータ「京」を生かした先端研究の主な成果を紹介した。著者らが目指してきたのは、新型センサによるビッグデータと、次世代スーパーコンピューティング技術を生かして、どのような気象予測が可能となるかを探索することだった。これまでの研究から、フェーズドアレイ気象レーダの30秒毎のビッグデータを生かし、個々の積乱雲をピンポイントに予測する30秒毎に更新する気象予測の可能性が見えてきた。また、ひまわり8号の10分毎のビッグデータを生かし、10分毎に更新する1日後といったタイムスケールでの集中豪雨や台風の予測技術が視野に入ってきた。これらを実際に実用化するには、恐らく今後10年といった時間が必要となる先端技術であろう。

このようなこれまでにない予測情報が得られるとき、どのように防災に生かし被害を最小化するのか、その実装方法は自明ではない。30秒毎に刻々と更新される詳細情報を、どのように活用するのか。30分後までしかない予測情報を、どのように活用するのか。また、不確実な予測情報を、アンサンブルを活用した不確実性の定量的情報とともに最適に活用する方法も、検討の余地がある。応用数学分野では、Uncertainty Quantification (UQ) という不確実性定量化の理論研究が急速に発展している。このほか、人間が処理しきれない膨大な情報を処理するため、近年急速に発展しているAI技術の活用も考えられる。また、情報の受け手である利用者との協働も重要だろう。

スーパーコンピュータの性能向上によって可能となるのは、解像度、更新頻度、アンサンブル数の向上である。これまでも数値天気予報はこの3点で向上し続けてきた。また、センサ技術の発展も、観測データの

高解像度化、高頻度化、高精度化を実現してきた。さらに、ICT技術の発展により様々なセンサがネットワークに繋がるIoTの時代となり、気象予測に活用される観測データの多様化も進んでいく。実際ドイツでは、自動車会社とドイツ気象局が手を組み、自動車の計測データをリアルタイムに活用し、最新の高解像度アンサンブル予報データを基に5分や10分といった時間間隔でアンサンブルの絞り込みを行い、予測を更新して自動車に配信するシステムの開発に取り組み始めたと聞く。観測技術の刷新、スーパーコンピューティング技術の発展の双方に支えられ、解像度、更新頻度、アンサンブル数の向上はますます進んでいく。これと同時に、新しい予測情報の有効な利用方法についても、ユーザーを巻き込んで検討を進めていく必要がある。

新しい数学や理論体系、AI技術の発展、高解像度・高頻度・多数アンサンブルの新しい予測情報の活用も含め、様々な分野の英知を集結して、よりよい防災情報、防災体制のあり方を築き上げていくことが重要だろう。そのために、次世代スーパーコンピューティング技術を活用した先端研究の方向性を考える際、予測技術の発展の方向性と、その活用方法とが相互に影響しながら、軌道修正していくことが望ましいと思う。

謝辞

本研究は、HPCI一般課題「ゲリラ豪雨予測を目指した「ビッグデータ同化」の研究（課題番号：hp150019, hp160162, hp170178)」、文部科学省フラッグシップ2020プロジェクト（ポスト「京」の開発）「ポスト「京」で重点的に取り組むべき社会的・科学的課題」における重点課題④「観測ビッグデータを活用した気象と地球環境予測の高度化（課題番号：hp160229, hp170246)」（課題責任者：海洋研究開発機構・高橋桂子）および京高度化枠「データ解析とシミュレーションの融合研究のための共通基盤的研究開発（課題番号：ra000015)」として、JST戦略的創造研究推進事業（CREST）「科学的発見・社会的課題解決に向けた各分野のビッグデータ利活用推進のための次世代アプリケーション技術の創出・高度化」（研究総括：田中 譲）における研究課題「「ビッグデータ同化」の技術革新の創出によるゲリラ豪雨予測の実証」（研究代表者：三好建正）、「ビッグデータ統合利活用のための次世代基盤技術の創出・体系化」（研究

総括：喜連川 優)における研究課題「EBD：次世代の年ヨッタバイト処理に向けたエクストリームビッグデータの基盤技術」(研究代表者：松岡 聡)および公益財団法人計算科学振興財団研究教育拠点(COE)形成推進事業における研究課題「複数の災害リスク評価に基づく都市計画に資する計算科学研究」(研究代表者：富田浩文)の支援を受けて行われました。

参 考 文 献

- Honda, T., T. Miyoshi, G.-Y. Lien, S. Nishizawa, R. Yoshida, S. A. Adachi, K. Terasaki, K. Okamoto, H. Tomita and K. Bessho, 2018a: Assimilating all-sky Himawari-8 satellite infrared radiances: A case of typhoon Soudelor (2015). *Mon. Wea. Rev.*, **146**, 213-229.
- Honda, T., S. Kotsuki, G.-Y. Lien, Y. Maejima, K. Okamoto and T. Miyoshi, 2018b: Assimilation of Himawari-8 all-sky radiances every 10 minutes: Impact on precipitation and flood risk prediction. *J. Geophys. Res.*, **123**, 965-976.
- Hunt, B. R., E. J. Kostelich and I. Szunyogh, 2007: Efficient data assimilation for spatiotemporal chaos: A local ensemble transform Kalman filter. *Physica D*, **230**, 112-126.
- Lien, G.-Y., T. Miyoshi, S. Nishizawa, R. Yoshida, H. Yashiro, S. A. Adachi, T. Yamaura and H. Tomita, 2017: The near-real-time SCALE-LETKF system: A case of the September 2015 Kanto-Tohoku heavy rainfall. *SOLA*, **13**, 1-6.
- Miyoshi, T., M. Kunii, J. Ruiz, G.-Y. Lien, S. Satoh, T. Ushio, K. Bessho, H. Seko, H. Tomita and Y. Ishikawa, 2016a: "Big Data Assimilation" revolutionizing severe weather prediction. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **97**, 1347-1354.
- Miyoshi, T., G.-Y. Lien, S. Satoh, T. Ushio, K. Bessho, H. Tomita, S. Nishizawa, R. Yoshida, S. A. Adachi, J. Liao, B. Gerofi, Y. Ishikawa, M. Kunii, J. Ruiz, Y. Maejima, S. Otsuka, M. Otsuka, K. Okamoto and H. Seko, 2016b: "Big Data Assimilation" toward post-peta-scale severe weather prediction: An overview and progress. *Proc. of the IEEE*, **104**, 2155-2179.
- Nishizawa, S., H. Yashiro, Y. Sato, Y. Miyamoto, and H. Tomita, 2015: Influence of grid aspect ratio on planetary boundary layer turbulence in large-eddy simulations. *Geosci. Model Dev.*, **8**, 3393-3419.
- Otsuka, S., G. Tuerhong, R. Kikuchi, Y. Kitano, Y. Taniguchi, J. J. Ruiz, S. Satoh, T. Ushio and T. Miyoshi, 2016: Precipitation nowcasting with three-dimensional space-time extrapolation of dense and frequent phased-array weather radar observations. *Wea. Forecasting*, **31**, 329-340.