

最先端のスーパーコンピュータを用いた天気予報研究

大塚成徳（理化学研究所 計算科学研究センター）

1. はじめに

世界トップクラスのスーパーコンピュータ「富岳」を運用する理化学研究所では未来の天気予報に向けて研究を行っている。本講義では高解像度・大アンサンブル・高頻度更新の実験的な天気予報や AI の活用、未来の観測装置を想定した仮想実験など、理化学研究所での最先端研究について紹介する。

2. 数値天気予報

現代の天気予報においてはスーパーコンピュータを用いて大気の運動に関する方程式を解く気象シミュレーションを行い、未来の大気の状態を予測する数値天気予報が中心である。予測のための方程式を解く計算機プログラムを大気モデルと呼び、様々な気象観測のデータを用いて大気モデルの状態を現実の大気に即したものにする過程をデータ同化と呼ぶ。

電子計算機による数値天気予報の初期の試みは 1950 年に最初期の電子計算機「ENIAC」を用いて行われた。以来、数値天気予報は電子計算機（コンピュータ）の高速化とともに発展してきた。我が国でも 2002 年稼働開始の「地球シミュレータ」、2012 年稼働開始のスーパーコンピュータ「京」など、当時の世界最高速を誇る計算機が開発され、気象学を含む多様な研究開発に用いられてきた。

3. スーパーコンピュータ「富岳」

「京」の後継として開発されたスーパーコンピュータ「富岳」は理化学研究所・計算科学研究センターにおいて 2021 年 3 月に正式に供用が開始された。汎用 CPU を 1 個搭載した計算ノードと呼ばれる単位を合計 158,976 ノード接続して構成される。計算ノード同士は高速通信網で接続されており、大規模な計算を各ノードに分散して高速に処理することが出来る。「富岳」は 2020 年 6 月から 2021 年 11 月まで 4 期連続で世界のスーパーコンピュータランキングの 4 部門（TOP500, HPCG, HPL-AI, Graph500）で 1 位を獲得した。2023 年 5 月現在、HPCG と Graph500 は 7 期連続世界 1 位である（2023 年 5 月 22 日理研広報おしらせ）。

4. データ同化とは

数値天気予報は運動方程式や熱力学方程式などに現在の大気の状態を初期値として入力し、時間発展を計算する。気象観測で得られる情報は時空間的に、あるいは物理量的に限られている。計算の初期値として大気の状態をモデル上のすべての点で定める必要があるため、大気モデルによる前の時刻からの予測と新たに得られた観測を最適に組み合わせ、尤もらしい大気の状態を得る。予測と観測、それぞれの誤差統計を用いて予測と観測の重み付き平均を取るような操作を行い、最も良く現在の状態を表す場を得る。

大気の詳細なデータ同化ではこの操作をモデルの全予報変数を連ねた巨大なベクトルに対して行わなければならないため、さまざまな工夫が求められる。多くの数値天気予報システムでは変分法やアンサンブルカルマンフィルタと呼ばれる手法が用いられている。

5. 理化学研究所における天気予報研究

「京」「富岳」などを用いて気象・気候研究を行うために、地球全体の大気をシミュレーションする全球大気モデル NICAM (Satoh et al. 2014) や、一部の領域を詳細に計算する領域大気モデル SCALE-RM (Nishizawa et al. 2015) が開発・利用されてきた。また、それらと組み合わせるデータ同化システムとして局所アンサンブル変換カルマンフィルタ (LETKF, Hunt et al. 2007) が開発されてきた。以下では主に数値天気予報システム SCALE-LETKF を用いた理化学研究所の研究の一端を紹介する。

5.1 観測ビッグデータとビッグシミュレーション

観測技術の発展とともに得られる観測データの量は飛躍的に増大している。一例として、フェーズドアレイ気象レーダによる降水観測があげられる。従来型のパラボラアンテナによるレーダ観測では一度に一方向しか観測できないため、全天の降水を観測するためにはアンテナを水平・鉛直に回転させる。そのため 15 度程度で全方位のデータを得るのに 5 分程度を要する。近年開発されたフェーズドアレイ気象レーダは多数のアンテナ素子を並べた板状のア

ンテナを用い、一度に 100 仰角程度の観測を行う。そのためアンテナは水平方向にのみ回転させればよく、鉛直方向に密な 3 次元観測をたとえば 30 秒で終えることが出来る (2012 年 8 月 31 日情報通信研究機構プレスリリース, Yoshikawa et al. 2013, Ushio et al. 2015)。これは従来型レーダによる観測と比べて約 100 倍のデータを得られるということになる。

こうした観測情報を余すことなく活用する数値天気予報を行おうとすると、30 秒毎に観測データを同化して新たな予報を行うシステムを設計することになる。従来の天気予報では最も高頻度な場合でもデータ同化は 1 時間毎にしか行っていない。従って従来に比べ 120 倍高頻度にデータ同化を行うシステムを構築する必要がある。また、高精細な観測データを生かすために計算の解像度も数 100m メッシュと、従来の天気予報より 1 桁細かくする必要がある。この場合、計算コストは一般に 3 桁増える。

このように従来と比べて 100 倍大きい観測データと、120 倍高頻度で解像度が 1 桁細かい予測計算を組み合わせデータ同化を行うことはこれまでにない取り組みであり、新たな技術開発が求められる。

5.2 ビッグデータ同化システム

いわゆるゲリラ豪雨は 10 分ほどの短時間で急激に積乱雲が発達し、予期せず豪雨となって災害に繋がるような現象である。こうした被害軽減のためには早期に積乱雲発達の予兆を捉え、その後の発達を予測できるシステムが必要である。その実現に向け、理化学研究所を中心とする研究グループでは SCALE-LETKF とフェーズドアレイ気象レーダを組み合わせた「ビッグデータ同化」システムの開発を 2013 年から行ってきた (2016 年 8 月 9 日理研プレスリリース, Miyoshi et al. 2016a, b, Lien et al. 2017, Honda et al. 2021a, b, Taylor et al. 2023)。

30 秒毎に得られるフェーズドアレイ気象レーダの観測を 500m 解像度の SCALE-LETKF を用いてデータ同化する。日本の現業天気予報では最も高解像度でも 2km 解像度であるから、大幅に詳細な計算である。

データ同化をより正確に行うために 1000 アンサンブルによる 30 秒予報を行い、予報のばらつきの情報を得る。一般には 100 アンサンブル程度が上限なので、一桁大きなアンサンブル計算である。こうし

てデータ同化で得られた場 (解析と呼ぶ) を初期値として 30 分先までの降水予測を行う。

5.3 東京オリンピック・パラリンピック実験

2021 年夏季の東京オリンピック・パラリンピックに合わせて「ビッグデータ同化」システムによるリアルタイムの天気予報実験を関東地方を対象として行った (2021 年 7 月 13 日理研広報おしらせ)。リアルタイムに計算を行うためには時間のロスをなくす様々な工夫が求められる。特に、今回は「富岳」全体の約 7% の計算資源をあらかじめこの実験のために専用に割り当ててもらい、常時計算を行うことが出来るようにした。また、埼玉大学に設置されたフェーズドアレイ気象レーダから神戸にある「富岳」に即時にデータを送ることが出来るよう、専用のプログラムを開発した。予報結果を 30 秒毎に即時配信する必要があるため、ウェブページ (理研天気予報研究, <https://weather.riken.jp/>) およびスマートフォンアプリ (株式会社エムティーアイの 3D 雨雲ウォッチ) を用いた配信システムを構築した (図 1)。

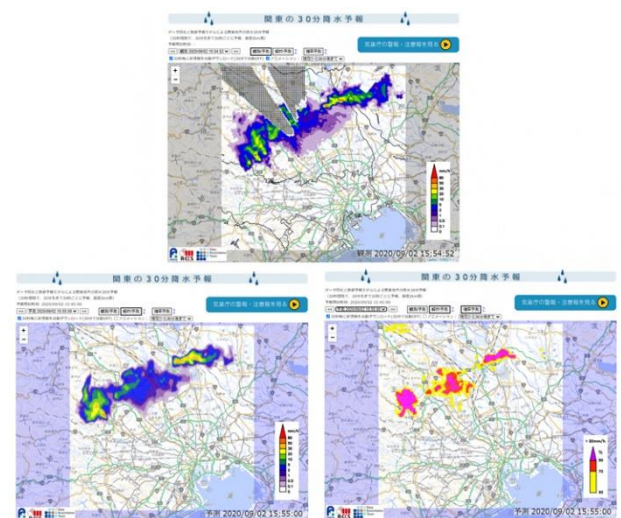


図 1 : 理研天気予報研究のウェブサイトにおける表示の例。上 : 観測降水強度、左下 : ビッグデータ同化システムによる予報降水強度、右下 : アンサンブル予報から算出した降水確率。2021 年 7 月 13 日理研広報おしらせより引用。

5.4 3D 降水ナウキャスト

ビッグデータ同化システムのリアルタイム計算には膨大な計算能力を要する。そのため現在ではまだ年間を通して常時予測し続けることは出来ない。そ

の代わりに、詳細な物理法則を計算せずに雨雲の移動を追跡して将来の位置を予測するナウキャストを常時行っている。ここではフェーズドアレイ気象レーダーの高頻度・高密度な三次元観測を活かし、雨雲内部での雨粒の移動を三次元的に計算することでゲリラ豪雨の早期予測を行うシステムを開発した(2017 年 7 月 4 日理研プレスリリース, Otsuka et al. 2016)。これにより水平方向の移動だけを考慮する従来のナウキャストに比べて精度良く降水予測を行うことが出来るようになった。こちらもウェブサイト・スマートフォンアプリで常時予測を公開している。

5.5 データ同化・数値天気予報・AI の融合による降水ナウキャスト

近年は機械学習手法が急速に発展し、降水予測の分野でも盛んに用いられている。ここではビッグデータ同化システムによる予測と機械学習手法の一種である深層学習を組み合わせて予測精度を高める試みを紹介する。ここでは畳み込み長短記憶(ConvLSTM, Shi et al. 2015)と呼ばれるニューラルネットワークを用いる手法について説明する。ConvLSTM は時系列情報を取り扱うのに優れた手法である。ConvLSTM に過去のレーダー画像の時系列を入力し、情報を格納する。続いて格納された情報を用いて ConvLSTM に将来時刻の時系列データ、すなわち予測を出力させる。その際に補助情報として SCALE-LETKF の予測を入力し、観測と数値天気予報の両者を総合的に考慮した予測を作成する。この手法によって、単に深層学習による予測を行った場合や、SCALE-LETKF 単独での

予測に比べて、より精度の高い予測が出来ることが分かった。

5.6 観測システムシミュレーション実験

天気予報の改善のためには、どこでどのような観測を行うと予報精度が向上するか知る必要がある。データ同化の技術を用いると、まだ現実には存在しない観測データが将来得られた場合の効果を調べることが出来る。

まず始めに大気モデルを用いてシミュレーションを行う。このシミュレーションのデータを真の大気の状態だと仮定し、Nature Run と呼ぶ。Nature Run を用いて、ある場所で何らかの観測を行ったと仮定して、Nature Run に観測誤差を上乗せした上で疑似観測データを生成する。この疑似観測をデータ同化システムで同化する実験を行って当該観測の影響を定量的に評価する。これを観測システムシミュレーション実験 (Observing System Simulation Experiment, OSSE, Atlas 1997 など) と呼ぶ。昨今では新たな人工衛星観測等を行う場合に、実際に機器を投入する前にその効果を評価する手法として活用されている。

5.7 線状降水帯の予測精度向上に向けた OSSE

ここではビッグデータ同化システムによる OSSE の例を紹介する。例年、梅雨前線などに伴い線状降水帯が発生して多くの被害をもたらす。その予測精度向上に向けて、2020 年 7 月に球磨川流域で記録的大雨が降った事例を対象に、もしフェーズドアレイ気象レーダーを九州に多数配置した場合に予測精度向

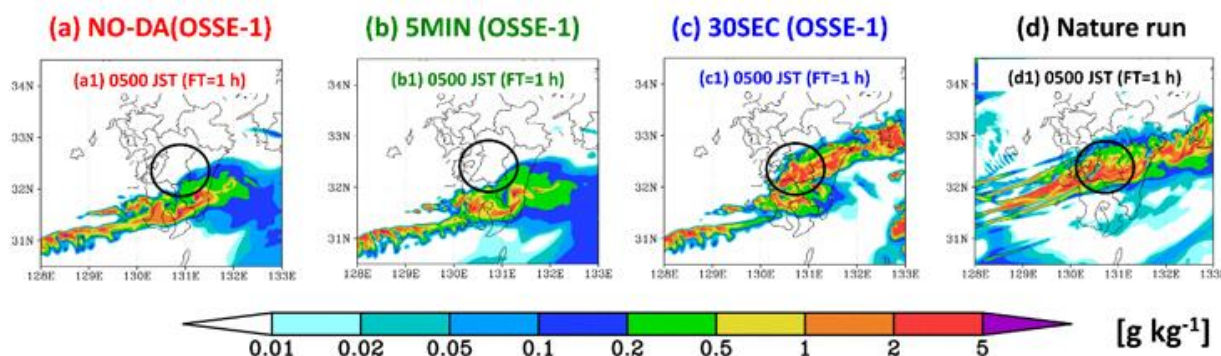


図 2 : OSSE の結果。(a) フェーズドアレイ気象レーダーの同化なし、(b) 5 分毎に同化、(c) 1 分毎に同化、(d) 真値。2020 年 7 月 4 日 4 時を初期時刻とした 1 時間先予測の雨粒量を示す。2022 年 3 月 7 日理研プレスリリースより引用。

上が見られるかどうか「富岳」を用いて実験した(図2)。その結果、30 秒毎のフェーズドアレイ気象レーダの観測が得られる場合は大幅に予測精度を向上できることが分かった(2022 年 3 月 7 日理研プレスリリース, Maejima et al. 2022)。

6. おわりに

最先端のスーパーコンピュータを用いることで、現業の数値天気予報で行われているよりも大規模な計算を行うことができるため、ここで述べたような新たな手法を研究することが出来る。今後も計算機の性能が年々向上すると期待すると、これらの最先端の手法は、すべてではないだろうが、将来、現業の数値天気予報システムに反映され、より安心安全な社会の構築に貢献すると期待している。

参考文献

- 2012 年 8 月 31 日情報通信研究機構プレスリリース: 日本初「フェーズドアレイ気象レーダ」を開発 〜ゲリラ豪雨や竜巻の詳細な 3 次元構造をわずか 10 秒で観測可能に〜,
<https://www.nict.go.jp/press/2012/08/31-1.html>
- 2016 年 8 月 9 日理研プレスリリース: 「京」と最新鋭気象レーダを生かしたゲリラ豪雨予測-「ビッグデータ同化」を実現、天気予報革命へ-,
https://www.riken.jp/pr/press/2016/20160809_1/index.html
- 2017 年 7 月 4 日理研プレスリリース: 30 秒更新 10 分後までの超高速降水予報を開始 -最新鋭気象レーダを活用したリアルタイム実証-,
https://www.riken.jp/pr/press/2017/20170704_1/index.html
- 2021 年 7 月 13 日理研広報おしらせ: 「富岳」を使ったゲリラ豪雨予報 -首都圏で 30 秒ごとに更新するリアルタイム実証実験を開始-,
https://www.riken.jp/pr/news/2021/20210713_1/index.html
- 2022 年 3 月 7 日理研プレスリリース: シミュレーションで線状降水帯の豪雨予測精度を改善 -もしも最新鋭気象レーダで九州全土を覆えたら-,
https://www.riken.jp/press/2022/20220307_1/index.html
- 2023 年 5 月 22 日理研広報おしらせ: スーパーコン

ピュータ「富岳」世界ランキングの結果と理化学研究所の今後の対応について-世界トップを引き続き維持-,

https://www.riken.jp/pr/news/2023/20230522_5/index.html

- Atlas, R., 1997: Atmospheric observations and experiments to assess their usefulness in data assimilation. *J. Meteor. Soc. Japan*, 75, 111-130, doi: 10.2151/jmsj1965.75.1B_111
- Honda, T., A. Amemiya, S. Otsuka, G.-Y. Lien, J. Taylor, Y. Maejima, S. Nishizawa, T. Yamaura, K. Sueki, H. Tomita, S. Satoh, Y. Ishikawa, and T. Miyoshi, 2022: Development of the real-time 30-s-update big data assimilation system for convective rainfall prediction with a phased array weather radar: description and preliminary evaluation. *J. Adv. Modeling Earth Systems*, 14, e2021MS002823. doi: 10.1029/2021MS002823
- Honda, T., A. Amemiya, S. Otsuka, J. Taylor, Y. Maejima, S. Nishizawa, T. Yamaura, K. Sueki, H. Tomita, and T. Miyoshi, 2022: Advantage of 30-s-updating numerical weather prediction with a phased-array weather radar over operational nowcast for a convective precipitation system. *Geophys. Res. Lett.*, 49, e2021GL096927. doi: 10.1029/2021GL096927
- 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, doi: 10.1016/j.physd.2006.11.008
- 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, doi: 10.2151/sola.2017-001
- Maejima, Y., T. Kawabata, H. Seko and T. Miyoshi, 2022: Observing system simulation experiments of a rich phased array weather radar network covering Kyushu for the July 2020 heavy rainfall event. *SOLA*, 2022, 25-32, doi: 10.2151/sola.2022-005

- Miyoshi, T., M. Kunii, J. 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. doi: 10.1175/BAMS-D-15-00144.1
- 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. J. Ruiz, Y. Maejima, S. Otsuka, M. Otsuka, K. Okamoto, and H. Seko, 2016b: "Big Data Assimilation" Toward Post-Petascale Severe Weather Prediction: An Overview and Progress. *Proc. IEEE*, 104, 2155-2179, doi: 10.1109/JPROC.2016.2602560
- 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, doi: 10.1175/WAF-D-15-0063.1
- 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. 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
- Shi, X., Z. Chen, H. Wang, D.-Y. Yeung, W.-K. Wong, and W.-C. Woo, 2015: Convolutional LSTM network: A machine learning approach for precipitation nowcasting. *Advances in Neural Information Processing Systems* 28, 802-810
- Taylor, J., T. Honda, A. Amemiya, S. Otsuka, Y. Maejima, and T. Miyoshi, 2023: Localization radii for an ensemble filter numerical weather prediction system with 30-second update. *Wea. Forecasting*, 38, 611-632, doi: 10.1175/waf-d-21-0177.1
- Ushio, T., T. Wu, and S. Yoshida, 2015: Review of recent progress in lightning and thunderstorm detection techniques in Asia. *Atmos. Res.*, 154, 89-102
- Yoshikawa, E., T. Ushio, Z. Kawasaki, S. Yoshida, T. Morimoto, F. Mizutani, and W. Wada, 2013: MMSE beam forming on fast-scanning phased array weather radar. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 51, 3077-3088