

「富岳」による新時代の大アンサンブル気象・大気環境予測

Large Ensemble Atmospheric and Environmental Prediction for Disaster Prevention and Mitigation with the Supercomputer Fugaku

佐藤 正樹・川畑 拓矢・宮川 知己・八代 尚・三好 建正

1. はじめに

SDGsの17の目標のうち、目標13「気候変動に具体的な対策を」が設定されており、そこでは、気候関連災害や自然災害に対する強靱性及び適応の能力を強化することがターゲットの一つとされている。日本でも、近年の地球温暖化の進行に伴って、集中豪雨、台風等の極端気象現象のさらなる激甚化が予想されている。2020年には九州地方を中心とした大雨により死者84名という激甚な災害が発生し、「令和2年7月豪雨」と名付けられた。また2019年秋季には台風が立て続けに襲来し、房総半島や東日本に大きな被害をもたらした(令和元年房総半島台風、東日本台風と命名)。このように、日本では、毎年のように極端気象現象による激甚災害が発生しており、これらに対する強靱性及び適応の能力の強化、特に事前の高精度気象予測に対する期待が益々高まっている。2020年度より世界トップの性能を誇るスーパーコンピュータ「富岳」を用いた研究課題「防災・減災に資する新時代の大アンサンブル気象・大気環境予測」を開始した。本研究課題では、極端気象現象予測として、より高精度な「線状降水帯」の事前予測や、いわゆる「ゲリラ豪雨」のピンポイント予測、「スーパー台風」の日本への襲来の予測等の実現を目指している。本稿では「富岳」を紹介するとともに、我々の研究課題において解決を目指す目標について解説したい。

「富岳」は、2011年から2019年まで稼働したスーパーコンピュータ「京」の後継機として、理化学研究所と富士通の共同で開発が進められた。「富岳」は、1秒間におよそ44京回の計算を実行できる性能を達成し、2020年の国際的なスーパーコンピュータのランキングにおいて同時に4部門で世界1位を獲得した。これは世界初の快挙であり、例えていうならば陸上の短距離走で1位の選手が、1万メートル走とハードル走と走り高跳びでも優勝したようなものである。「富岳」は単純に計算が速いだけでなく、データの読み書き速度や通信速度などを含めた性能のバランスが取れたマシンであり、様々な科学計算ソフトウェアを高速に実行できる高いポテンシャルをもっている。近年のスーパーコンピュータはたくさんの計算機を並べて、計算する部分を分担し、必要なデータを通信でやりと

りしながら同時に計算を実行させる「並列コンピュータ」が主流である。「富岳」は約16万台のコンピュータの集まりで、計算に使われる中央演算装置(CPU)のコアは総計で760万個もある。CPUにはIntelのCPUではなく、世界中のスマートフォンの大部分で利用されているARMのCPUを拡張したものが採用され、省電力の面でも高い性能を実現した。「富岳」は神戸市のポートアイランドにある理化学研究所計算科学研究センターの、もともと「京」が設置された場所に設置されており、「京」から40倍以上も性能が向上しているにもかかわらず、設置面積はほぼ同じで、最大消費電力は3倍程度に抑えられている。「京」から「富岳」への進化のひとつに、半精度(16ビット)浮動小数点実数での計算機能がある。16ビット実数計算は特に人工知能(AI)の分野で近年よく用いられており、「富岳」を用いたAI研究の発展も期待されている。

「富岳」を用いた研究は多岐に渡る。我々が行っている気象・気候の研究の他にも、創薬や医療、地震、新素材開発、車やプラントの設計、宇宙の起源や進化に関する研究が行われている。さらに2020年の「富岳」稼働の直後から、新型コロナウイルスの対策に貢献する研究開発が開始され、飛沫の飛散シミュレーションや治療薬の候補探索が進められている。「富岳」の共用開始は2021年からであるが、それに先んじて2020年度より「富岳」成果創出加速プログラムが開始された。このプログラムでは、「京」で十分に実績を重ねた研究課題について「富岳」の共用開始前のテスト段階から利用し、「富岳」を通じた研究成果を早期に創出することが期待されている。我々の研究課題は「京」の準備研究を経て¹⁾、同プログラムの一課題に選定され、研究を開始している。

本課題では、近年激甚化する集中豪雨等の極端気象現象からの防災・減災を実現するために、数日程度から数週間～季節スケールの大規模に災害をもたらす事例の気象・大気環境予測実験(大アンサンブル)を「富岳」を用いて実施し、リードタイム(予測から豪雨発生までの猶予時間)をもった確率予測情報の提供が可能な新時代の予測技術を確立することを目指している。気象災害の原因である集中豪雨や台風の正確なシミュレーションのためには、水平10km程度のスケール

の「積乱雲」を数1000 km以上の広域で忠実に表現する高解像度の気象シミュレーションモデルを活用することが必要である。さらに、大気の数値予測に内在する不確定性・カオス性のために、確率予測情報を付加した高精度な数値天気予報を実現する必要がある、このために、同一の事象に対し大アンサンブル実験、すなわち多数の「パラレルワールド実験」を実施する(図1)。激甚災害をもたらす極端気象現象は発生頻度が低いため、多数の大アンサンブルによる確率予測の手法を用いる必要である。我々は1000種類の大アンサンブル実験を行うことにより、初期値からの気象現象の変化の推移も含めて、長いリードタイムで詳細な確率予測情報を提供することを目標とする。これらのシミュレーションに、人工衛星や地上リモートセンシング等、近年の著しい観測技術の進歩がもたらした高精度・高頻度・高密度になった観測データ(観測ビッグデータ)と組み合わせることで、近未来の天気予報

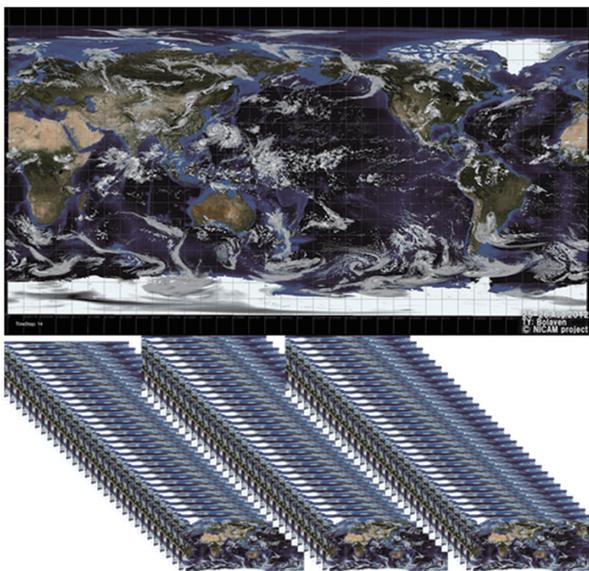


図1 高解像度全球シミュレーションによる大アンサンブル実験の例。画像は世界で最高解像度の1 km以下メッシュの全球雲解像モデルによる実験例¹⁾。このような高解像度モデルによる1000個以上の大アンサンブル実験を実施することで、高精度の数値予測技術を開発することが本課題の目標である。

に実現可能な革新的な数値気象・大気環境予測技術を実現する。

上記の目的のために、本課題では以下のテーマ1～3の研究内容を実施する。テーマ1では「短時間領域スケール予測」数日先までの豪雨等シビアウェザーの確率予測を実現する。テーマ2では「全球スケール予測」週から数か月先までの台風等、極端気象現象の確率予測を実現する。テーマ3では「先進的大規模データ同化」気象・大気質同化による大規模データ同化手法を開発する。以下では、各テーマの内容を具体的な研究成果を含めて紹介する。

2. 短時間領域スケール予測

本テーマ領域では、1-2日程度先の日本域に対して、水平メッシュ間隔1-2 km程度の大アンサンブルシミュレーションを行い、確率予測研究を実施する。研究対象としては、線状降水帯等の集中豪雨である。そもそも集中豪雨をもたらす積乱雲は水平10 kmほどの大きさなので降水量を精度良く予測するためには数 km以下の細かいメッシュ間隔(解像度)の数値シミュレーションを行うことが必要である。通常、アンサンブルシステムは解像度を粗くして計算量を削減した上で、シミュレーションの数を増やす戦略を採るが、「富岳」の計算パワーを用いることで、解像度の細かさとアンサンブル数の多さの両方を追求することが可能である。本節では、「令和2年7月豪雨」のなかでも特に熊本県球磨川に氾濫をもたらした線状降水帯を対象に実験を行った結果を紹介する²⁾。本実験においては、1000個のアンサンブルを用いて観測データをシミュレーションに同化させる手法(アンサンブル同化)を用いた。これによって、シミュレーション計算を開始する時点で現実に近い正確な初期値を作成することができる。この際、観測値やシミュレーションに含まれる誤差の範囲内で、少しずつ異なる初期値を1000個生成した。この1000個の平均値はもっとも真値に近いと考えられ、これを用いて予測を行ったものが図2bである。また1000個の初期値を用いてそれぞれ予測を行うと確率分布が得られる(図2c)。観測

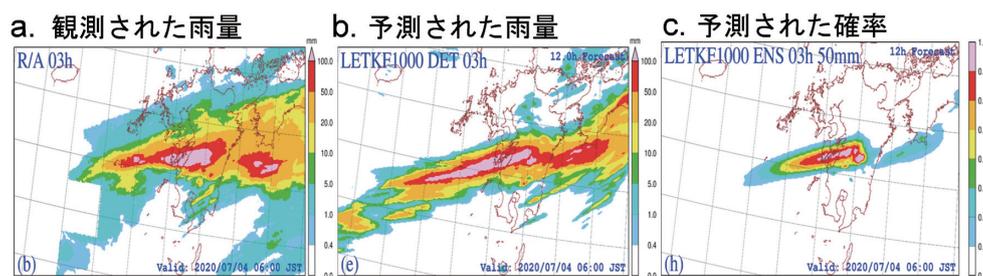


図2 令和2年7月豪雨における2020年7月4日03-06時(氾濫発生時)に対する雨量の実況及び予測値。(a)、(b)はそれぞれ観測値、予測値で、赤い領域が50 mmを超える領域、(c)は50 mmを超える確率を表し、赤-ピンクが70%以上。

された雨量(図2 a)と比較して、予測された雨量はその位置・量ともよく観測と一致しており、この線状降水帯を非常に良く予測できたことがわかる。予測された線状降水帯は西に長く延びており、ここは観測と異なっている点も見受けられる。一方、確率分布を見ると、確率の高い領域(70%以上)は観測された大雨の領域とよく一致しており、さらに西側の予測が誤っている領域に対する確率値が低い。このように降水量予測と、確率予測を合わせて提供することで、予測の信頼度が分かり、住民の避難行動へ繋がりがやすくなるものと期待できる。今後は、システムの性能強化、信頼度検証等が必要であり、他の様々な極端気象事例について予測実験を行うことで、実際の現業の数値気象予測への活用するための課題を明らかにする。

3. 全球スケール予測

日本における最も顕著な気象災害である台風とそのもたらす風水害は本プログラムの重要なターゲットである。一般的に、数値シミュレーションで台風を精緻に表現するにはデータ点のメッシュを細かくする必要がある。一方で、台風の発生や経路にはエルニーニョ・モンスーン・熱帯の雲活動・ジェット気流の状態など、全地球規模のものを含む様々な要因が影響する(図3 a)。限られた計算資源を使用するにあたり、メッシュを細かくすることを重視するか、遠方の影響を反映できるように計算領域を広くとることを重視するか、というジレンマが存在する。遠方の影響が効いてくるには相応の時間がかかるため、前者は短期予測向き、後者は長期予測向きである。例えば前者では計算領域内に存在している台風については高精度に予測するが、領域外で発生して近づいてくるものについて事前に捉えることはできない。このように全球スケール予測は、比較的長い時間スケール、具体的には1週間～半年程度の中・長期予測の精度向上を目指すテーマである。

「地球シミュレータ」「京」と言った近年のスーパーコンピュータは、台風や積乱雲の塊などをそれなりに良く表現できる10 km程度以下のメッシュで全球の計算を可能にしたことで、1週間より先の予測に光明をもたらしてきた。しかし、台風のように散発的な現象について早い段階から有益な確率予測を行うには、従来よりも多くのアンサンブルメンバーを必要とする。図3 bに模式的に示すように、アンサンブルメンバー間の散らばりは時間とともに大きくなる。少ないメンバー数だと1週間以上先ではスカスカになってしまい、まともな確率分布を得られなくなるのである。「富岳」を用いることで、10 km程度のメッシュを用いて、1週間より長いリードタイムで、全球において1000メンバーアンサンブル実験を実施することが可能である。この予測実験の成功により、1週間以上先の台風予測

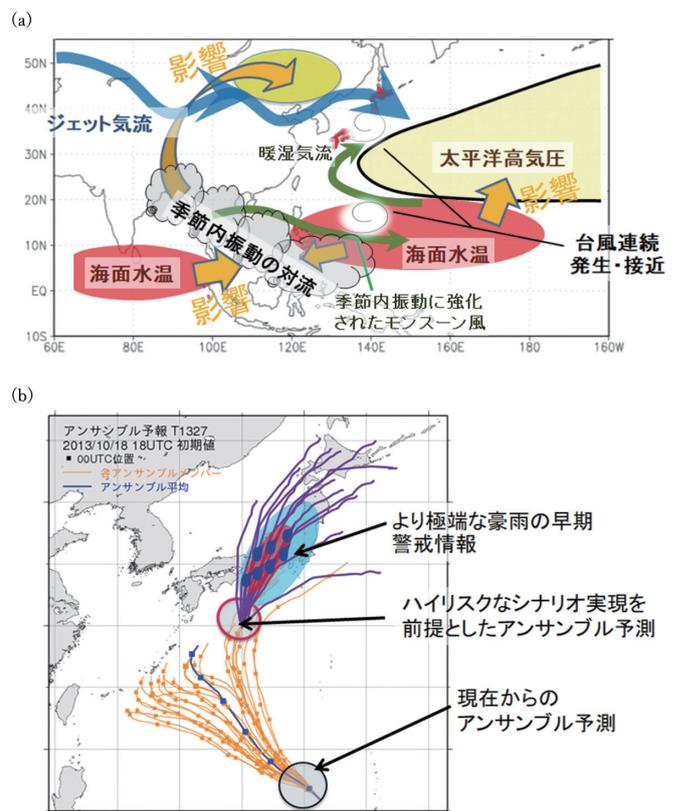


図3 (a)日本に襲来する台風に影響する気象要素を示した模式図。全球規模の現象が多く関わり、中・長期の予測においてはその動向の把握が必要となる。(b)階層的なアンサンブル計算の模式図。2013年10月に関東に接近した台風26号の例。ハイリスクなシナリオが実現した場合に起こりうる豪雨の状況について早期に警戒情報を提供することを目指す。

に大きな変革をもたらすものと期待される。

現在、「令和元年房総半島台風」を対象とした1000アンサンブル実験に取り組んでいる。1週間より以前の大アンサンブル実験による台風予測により、台風進路の早期予測で得られる確率分布から、実現可能性が高いシナリオや万一実現した場合に被害が大きいシナリオを同定して、その実現を前提とした階層的なアンサンブル予測を試行する(図3 b)。気象庁の現業予報では台風の予測は5日先までであるため、本研究の目標はチャレンジングであるが、成功すれば台風による豪雨や洪水等の局地的な現象についても有益な早期警戒情報の提供に繋がれる可能性がある。

4. 先進的大規模データ同化

本研究課題では、前述の気象予報を支える「データ同化」の基盤的技術開発を並行して進めている。データ同化により、仮想世界のシミュレーションと現実世界の観測データを結ぶことができる。シミュレーションによる仮想世界を観測された現実世界と同期することで、現実に近いシミュレーション予測が可能となる。

データ同化の精度は、天気予報の精度と直結する。データ同化は誤差を扱う科学であり、観測データに含まれる誤差の統計分布と、シミュレーションに含まれる誤差の統計分布を重ね合わせ、シミュレーションの誤差を減らすことを目指す。ここで、誤差の統計分布を正確に捉えることが重要となる。

誤差の統計分布を捉える方法として、アンサンブル手法がある。サンプルを取ってそのサンプル統計により近似する方法である。サンプル数が増えるほどサンプル誤差が減り、より正確に誤差の統計分布を捉えられる(図4)。1つシミュレーションを行うには、大規模な計算が必要である。このため、アンサンブルの数は、通常の場合100個程度に限られるが、それでも100個のシミュレーションを同時に行う必要があり、100個の天気予報シミュレーションを同時に行うことを考えると、その膨大さがイメージできるだろう。

本研究課題のスタートする前段階では、「京」を使って世界最大規模となる10240個のアンサンブルを使ったデータ同化の計算に成功した(図4)。この実験により、シミュレーションの誤差の統計分布をより正確に捉えることで、データ同化の精度がどれほど向上するか、また複雑な分布をどのように捉えられるようになるのか、新たな知見を生むことができた。「富岳」を使うとこの100倍の計算が可能となる。「京」で計算した10240個は、全球を224 kmのメッシュでのシミュレーションで、豪雨や台風を表現するには粗かった。「富岳」を使うと、このメッシュを細かくして豪雨や台風をよく表現することができる。また、複雑な誤差分布を考慮した高度なデータ同化手法にチャレンジできるようになる。10年後の天気予報システムがどうあるべきか、「富岳」を使うことで時間を先取りして調べることが可能になる。

さて、「富岳」のシステム全部を用いたら、どれだけ大きなアンサンブルデータ同化計算が実現可能できるだろうか。この問いに答える気象分野のグランドチャレンジ実験として、我々は全球水平3.5 kmメッシュ、1024メンバーアンサンブルでのデータ同化計算を実施した。この計算は世界の気象機関で日々行わ

れているアンサンブルデータ同化計算と比べて500倍以上の規模で、計算にかかる時間はもとより、1024個の気象シミュレーションで得られる1.3ペタバイトもの計算結果をデータ同化システムに受け渡す時間がボトルネックとなる。我々は様々なプログラムの改良や高速化を進め、最終的に約13万個の「富岳」のCPUを用いて、この史上最大規模の気象計算となるグランドチャレンジ実験を、目標計算時間内で達成することができた。得られた成果をまとめた論文は計算科学において最も栄誉ある賞のひとつであるゴードン・ベル賞のファイナリストにも選出された³⁾。

データ同化は気象予報だけでなく、気候変動や大気環境予測でも活用される。大気中の温室効果ガスやPM2.5をはじめとする大気汚染物質の観測データを用いて、それらの物質がどの地域から、いつ、どのくらい放出されているかをシミュレーションとデータ同化で逆推定することが可能である。例えば二酸化炭素では、地上での観測や航空機・船舶を用いた観測に加えて、日本が世界に先駆けて打ち上げた温室効果ガス観測衛星である「いぶき」「いぶき2号」の観測データを有効に活用し、都市などの排出源や森林などの吸収源の強さを推定している。2016年に発効した「パリ協定」では、世界各国に対し定期的な温室効果ガス排出量の報告と削減努力の実施が義務づけられた。各国がまとめた温室効果ガス排出量の報告値と比較し、検証するツールとして、データ同化による推定値は重要視されている。「富岳」の登場によって可能になった「高解像度・大アンサンブル」での温室効果ガスデータ同化を活用し、推定値の精度向上を目指している。これに加え、気象と大気環境物質をデータ同化で同時に扱うことで、双方の予測精度を高める試みも進めている。

5. 今後の展望とまとめ

「富岳」の2021年度からの一般共用に先んじて、気象予測に関する本研究課題を開始し、「富岳」の威力をまざまざと感じている。全地球を数kmメッシュ

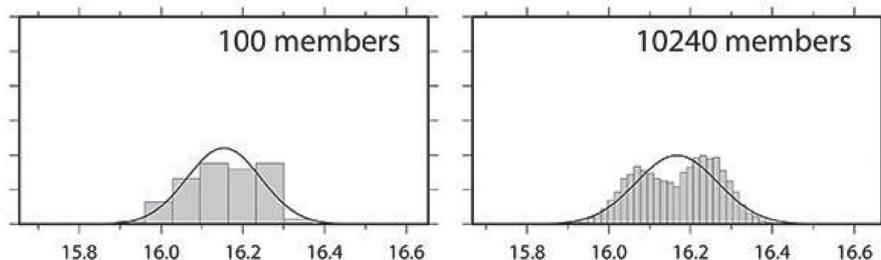


図4 100個のアンサンブル(左)と10240個のアンサンブル(右)を使った際のシミュレーション開始後18日目の日本の南方海上(北緯16.7度、東経150度)における水蒸気量の誤差を表すヒストグラム。実線のガウス分布(正規分布)関数からのずれ(非ガウス性)があることを示している。このような大気状態のばらつきの非ガウス性を大アンサンブル実験によって直接確認するのは初めてである。2014年7月23日理化学研究所プレスリリース(https://www.riken.jp/press/2014/20140723_2/)の図2より転載。

で覆う高解像度な「全球雲解像モデル」は世界に10年以上先んじて我々が開発してきたもので⁴⁾、これを用いた1000個以上の大アンサンブル実験が実現可能となった。従来は数値予測モデルで再現することが難しかった線状降水帯について、高解像度な大アンサンブル実験によって、半日前からの高精度な確率予測が可能であることを示すことができた。高解像度・大アンサンブルの数値天気予報が今後の我々のめざす方向性である。今までは、限られた計算機資源を、解像度かアンサンブル数かに振り分ける必要があったが、「富岳」によってこれらを同時に追い求めることが可能になった。「富岳」を利用し、本研究課題を遂行することで、毎日の天気予報ではまだ実現されていない数値気象予測の将来像を明確に指し示すことができるだろう。「富岳」のようなパワフルなスーパーコンピュータはまだ現業の気象予測では利用することができない。このためには、「富岳」の規模の計算資源を、常時、気象予測に占有する必要があるからである。今後の地

球温暖化の進行に伴い、激甚災害を引き起こすような集中豪雨や台風がますます高頻度で発生することが予想されている。SDGsの目標の達成を目指すために、「富岳」で実現可能性が示された数値気象予測技術を一刻も早く実際の毎日の天気予報に利用することが必要である。

参考文献

- 1) Masaki Satoh et al., Prog. Progress in Earth and Planetary Science, **4**, 13, doi:10.1186/s 40645-017-0127-8 (2017).
- 2) Le Duc et al., SOLA, 17, accepted (2021).
- 3) Hisashi Yashiro et al., SC 20, **1**, 1-10. [https://doi.ieeeecomputersociety.org / 10.1109 / SC 41405.2020.00005](https://doi.ieeeecomputersociety.org/10.1109/SC41405.2020.00005) (2020).
- 4) Masaki Satoh et al. Current Climate Change Reports, **5**, 172-184 (2019).



MASAKI SATOH
 東京大学 大気海洋研究所 博士(理学)
 〒270-0111 千葉県柏市柏の葉5-1-5
 東京大学大気海洋研究所
 E-mail: satoh@aori.u-tokyo.ac.jp
 〈専門〉 気象学、大気科学
 〈趣味〉 ラグビー、バレエ鑑賞



TAKUYA KAWABATA
 気象研究所 気象観測研究部 室長
 博士(理学)
 〒305-0052 茨城県つくば市長峰1-1
 E-mail: tkawabat@mri-jma.go.jp
 〈専門〉 気象学、データ同化



TOMOKI MIYAKAWA
 東京大学 大気海洋研究所 准教授
 博士(理学)
 〒277-8568 千葉県柏市柏の葉5-1-5
 東京大学大気海洋研究所
 Tel: 0471-36-4399 Fax: 0471-36-4375
 E-mail: miyakawa@aori.u-tokyo.ac.jp
 〈専門〉 気象学・気候学
 〈趣味〉 サッカー・スキー・ハング/パラ
 グライダー・読書



HISASHI YASHIRO
 国立研究開発法人国立環境研究所
 地球環境研究センター 主任研究員
 博士(学位)
 〒305-8506 茨城県つくば市小野川16-2
 E-mail: yashiro.hisashi@nies.go.jp
 〈専門〉 大気科学・大気化学・高性能計算



TAKEMASA MIYOSHI
 国立研究開発法人 理化学研究所
 計算科学研究センター データ同化研究
 チーム チームリーダー 博士(気象学)
 〒650-0047 神戸市中央区港島南町7-1-26
 〈専門〉 気象学・データ同化