

計算科学ロードマップ 2022

気象気候分野 抜粋

2023 年 12 月 4 日版

はじめに

本文書は、計算科学フォーラムから、2022 年発行を目指して執筆されていた「計算科学ロードマップ 2022」のうち、気象学・気候学分野に関連する部分のみを抜粋した文書である。今日（2023 年 12 月 4 日）現在、「計算科学ロードマップ 2022」は、2024 年春の発行を目指して、執筆推敲作業が行われているところである。本文書は、「計算科学ロードマップ 2022 (2024?)」が公開され次第、公開終了を予定している。

本文書は、2030 年頃の計算機を使ったサイエンステーマとそれを達成するための課題について記述したものである。前回までの「計算科学ロードマップ」との大きな違いは、海洋の節が加わったことである。また、昨今、発展が著しい AI・機械学習についても、これまでよりも紙面を割いて取り上げた。

執筆は、世話人が各節毎に代表執筆者を決めて依頼し、代表執筆者お一人、もしくは、共同執筆者と分担して執筆いただいた。テーマの偏りや分野全体の傾向や目標を反映しきれなかったところがあれば、世話人の不得の致すところである。是非、世話人（小玉・足立）までお知らせ頂きたい。次回以降の執筆に活かしていければと考えている。

（文責：足立）

目次

第 1 章	序論	1
第 2 章	各計算科学分野の課題	3
2.1	気象・気候	4
第 3 章	各課題の詳細	17
3.1	気象・気候	18
付録 A	用語集	65
付録 B	執筆者一覧	69

第 1 章

序論

はじめに

本文書は、計算科学フォーラムから、2022 年発行を目指して執筆されていた「計算科学ロードマップ 2022」のうち、気象学・気候学分野に関連する部分のみを抜粋した文書である。今日（2023 年 12 月 4 日）現在、「計算科学ロードマップ 2022」は、2024 年春の発行を目指して、執筆推敲作業が行われているところである。本文書は、「計算科学ロードマップ 2022 (2024?)」が公開され次第、公開終了を予定している。

本文書は、2030 年頃の計算機を使ったサイエンステーマとそれを達成するための課題について記述したものである。前回までの「計算科学ロードマップ」との大きな違いは、海洋の節が加わったことである。また、昨今、発展が著しい AI・機械学習についても、これまでよりも紙面を割いて取り上げた。

執筆は、世話人が各節毎に代表執筆者を決めて依頼し、代表執筆者お一人、もしくは、共同執筆者と分担して執筆いただいた。テーマの偏りや分野全体の傾向や目標を反映しきれなかったところがあれば、世話人の不得の致すところである。是非、世話人（小玉・足立）までお知らせ頂きたい。次回以降の執筆に活かしていければと考えている。

（文責：足立）

第 2 章

各計算科学分野の課題

2.1 気象・気候

2.1.1 分野の概要

毎年、世界各地でさまざまな気象災害の発生が報告されている。2021年は、ヨーロッパ南部や米国南西部を含む北半球各地で顕著な高温が観測され、米国南西部では「50年に1回以下」の極端な乾燥に見舞われた。一方、2019年から2021年にかけて、インドや中国、ヨーロッパ中部などで記録的な大雨が観測され、死亡者や行方不明者が多数発生した^{*1}。国内においては、2018年7月猛暑による熱中症患者の発生、2019年の台風19号（東日本台風）や令和2年（2020年）7月豪雨、2021年7月の東海地方・関東地方南部を中心とした大雨に伴う日本各地での河川の氾濫や熱海での土砂災害は、記憶に新しいところである。これらの気象災害リスクは、地球温暖化に伴う気候変動により、より一層高まることが懸念されている。実際、過去のいくつかの事例については、事後解析により、地球温暖化が発生リスクを高めたことが指摘されている [1]。

気象災害や将来気候変化を事前に予測し、リスク回避のための情報を提供することは、本分野の重要な役割の一つである。このためには、日々の天気予報から数十年先の気候の予測まで、幅広い時間スケールでの予報・予測精度向上が求められる。これを達成するには、予報予測技術の発展はもちろんのこと、実験や観測、理論に基づき、様々な時空間スケールをもつ大気現象の理解をより一層高めることが不可欠である。数値モデルによる数値実験は、これらを押し進めるための強力なツールの一つである。現在、気象・気候分野のシミュレーションモデルの用途は、天気予報、および、気候の再現・予測に大別することができる。以下では、当分野での数値シミュレーションの歴史を紹介するとともに、世界的な取り組みや最近の動向について述べる。

大気の数値シミュレーションの歴史は古く、Richardson (1922)[2]の手動計算による数値天気予報の試みまでさかのぼる。Richardson (1922)の試み自体は、天気予報にとって重要ではない高周波のノイズが原因で失敗に終わったが、初期値にノイズを含まない客観解析、およびノイズをダンプするシミュレーションモデルの必要性が主張された [3]。現代においても、数値天気予報の精度はシミュレーションモデルとその初期値を提供する客観解析の二つの精度に依存する。大型計算機の発展とともに、数値計算手法や初期値を作成する客観解析技術の向上、水平解像度や鉛直層数の増強、アンサンブルメンバー数増強などが行われ、数値天気予報システムの性能はこれまで継続して向上してきた [4]。

一方、気候モデルの歴史は、1次元モデルを用いて、大気の放射バランスを計算した Manabe and Wetherald (1967)[5]にさかのぼる。真鍋らはこの論文の中で、数値モデルを用いて地球のエネルギーバランスを解き、大気的气温の鉛直分布を再現した。また、同じ論文の中で、大気中の二酸化炭素濃度を2倍に変化させると地表平均気温が2.36度上昇することを示し、二酸化炭素の気候影響について、定量的に評価した。また、その後、真鍋らは、3次元の全球モデルの開発も行い、この際に用いられた3次元モデルが、現在広く使われている地球温暖化予測モデルの原型となった [6]。これらの功績により真鍋らは2021年のノーベル物理学賞に選ばれた。最初の気候モデルは大気と放射のみの計算であったが、その後、雲、乱流、陸面、海洋などが加わり、最新の地球システムモデル (Earth system model, ESM) では、化

^{*1} https://www.data.jma.go.jp/gmd/cpd/monitor/annual/annual_2020.html

学物質やエアロゾル、炭素循環も組み込まれている (e.g., [7], [8])。

全球気候モデルの開発は世界各地で行われており、社会経済シナリオや温室効果ガスシナリオなど、統一した条件で計算した結果を比較するプロジェクト (結合モデル相互比較計画; CMIP: Coupled Model Inter-comparison Project) が 1995 年より行われている [9]。これは、観測データの乏しい過去や将来気候の計算結果を異なるモデル間で比較することで、信頼性の高い情報を得るだけでなく、予測情報に含まれる不確実性や気候モデルに対する理解を深める目的で行われている。CMIP に提出された気候データは広く公開され、それを解析して論文として出版された知見は、気候変動に関する政府間パネル (IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change) 評価報告書や特別報告書の根拠となっている。^{*2} これらの活動は今後も計画されており、さらなる解像度の向上や、発生頻度の低い極端事象も捉えるためのアンサンブル数の増強、海洋の予測データの拡充などが望まれている。

これまでの気象予報や気候予測をさらに発展させた取り組みとして、近年、地球のデジタルツインである”Digital Earth”の構築が提唱され [10]、欧州において大型プロジェクト (Destination Earth) が開始されるとともに、WCRP (World Climate Research Programme; 世界気候研究計画) において今後 10 年を見据えた Digital Earths Lighthouse Activity が開始されている。Digital Earth は利用可能なあらゆる観測データを統合し、数値モデルやデータ科学の力を借りながら、過去・現在の地球の気候状態を仮想世界上に可能な限り忠実に再現し、さらに未来を予測しようという試みである。未来についてはユーザがシナリオを自在に選択することで政策の効果を定量的に検証することが可能となる。Digital Earth は精緻な気象・気候モデルを前提としており、近年急速に実用化が進んでいる高解像度の全球雲解像モデル [11] と密接に関連している。全球雲解像モデルの気候モデル化を求める声も高まっている [12] が、膨大な計算コストとともに、膨大な出力データの取り扱いが研究のボトルネックとなっている。シミュレーションから解析までを同じプラットフォームで行う “Digital Earth” は、この問題に対しても有効と期待される。

気候計算など、より長期的な予測を行う場合には、初期値の精度よりも、大気とともに気候システムを形成する海洋や陸域、生物圏などのモデル内での扱いが予測結果において重要な要素となってくる。例えば、海洋は大気に比べて流れは緩やかであるが熱容量が大きいいため、長期の気候変動に対して重要な役割をもつ。人間活動によるさまざまな化学物質の大気中への放出は、放射過程や雲微物理過程等を介して大気および地表面の物理化学過程に大きな影響を与えうる。また、高濃度の大气汚染物質に長期間曝露されることにより呼吸器系疾病の発病率や植物の枯死、農作物の収穫量減少など、地表動植物の生態系にも広く影響を及ぼす。さらには、黄砂をはじめとする土壌粒子中に含まれる鉄分や降水を介した栄養塩供給により海洋生態系にも大きく影響する。これら、各要素の気候への影響についての理解を深め、各モデル要素の精緻化を進めるとともに、気候影響の定量的な評価を行なっていくことも重要な課題である。

この他、夏の猛暑に対する工学分野で発展してきた建物解像モデルを用いた都市域内での熱環境評価、土砂を含む河川モデルなどによる大雨に起因する土砂災害・洪水被害などの複合災害評価、また、社会システムモデルやエージェントモデルによる気象災害による人的被害や経済リスクの評価、日本近海の流れ情報を利用したスマート水産業や洋上発電などさまざまな分野との連携も進んでおり、気候変動適応策の

^{*2} 直近では、気候変動やその影響、また気候変動の緩和についてまとめた IPCC 第 6 次評価報告書 (AR6) が 2021 年から 2022 年にかけて発表されたところである。

観点からも、分野の垣根を超えた研究が今後ますます発展していくものと期待される。

2.1.2 長期目標と社会貢献

気候気象分野の社会貢献としては、日々の天気予報と防災情報の提供、及び、将来の気候変化に対する適応策や影響評価のための将来気候予測情報の提供にある。そのため、これらの予測精度の向上に向けた新たな数値スキームの提案や高度化、その根拠となる各現象の理解を進めていく必要がある。以下では、数値天気予報、将来気候予測、モデルの精緻化の視点から、長期目標と社会貢献について述べる。

近年、顕著な気象による自然災害が激甚化しており、今後更に災害が深刻化するおそれが懸念されている。気象災害防止と軽減のため、数値予報の精度向上が求められる。特に、近年の大雨に伴う災害では線状降水帯が寄与していることが多く、気象庁は「線状降水帯の発生・停滞の予測精度向上により、集中豪雨の可能性を高い確度で予測する。特に、明るいうちからの避難など、早期の警戒と避難を可能にする」という目標を掲げている [13]。しかし、最も解像度の高い局地モデル (LFM: Local Forecast Model) であっても、線状降水帯を半日程度前から時間と場所を絞って予測することは依然困難である。予測の精度向上には、個々の積乱雲を表現するための高解像度化、高い解像度に適した物理過程の開発、海上の水蒸気量や風などの予報モデルの初期状態の精度向上などが課題である [13]。

台風防災も気象庁の 2030 年に向けた主な開発項目^{*3}の一つであり、観測データの充実とともにモデルの精緻化が重要な課題となっている。地球観測技術は年々高度化しており、数多くの人工衛星や地上観測装置が開発されている。そのデータ量は 1 世代前のものに比べて数十～百倍と、まさにビッグデータである。それ故、膨大な観測データを効率的にシミュレーションに取り込むデータ同化システムの開発も必要である。

一方、将来気候予測においては、世界の機関と協力して気候変動問題に貢献していくことが、気象気候分野に課された重要な課題である。2021 年 8 月に公表された IPCC 第一作業部会 (WG I) による第 6 次評価報告書 (AR6) では、「人間の影響が大気、海洋及び陸域を温暖化させてきたことには疑う余地がない」という強い表現で人間活動の気候への影響が断言された [14]。このような背景のもと、全球気候モデルは、気候変動予測に対する科学的理解の増進に加え、温暖化の進行そのものを止める緩和抑制策の立案や温暖化への対策立案に資するデータ創出への貢献という大きな役割を担っている。

気候モデルに生態系の働きなどを組み入れた地球システムモデル (ESM) では、温室効果気体の排出による気候変化のみならず、二酸化炭素の海洋吸収による海洋酸性化、農作物や生物燃料栽培、あるいは都市化に伴う土地利用変化の環境影響など、様々な問題を包括的に取り扱うことができる。こうした問題は伝統的な気候科学の範疇では取り扱えず、農学や社会経済など多様な分野の研究者との協働が必要とされる。さらに、社会問題としての地球環境問題に対処するためには一般社会における利害関係者の意見も聞きながら問題設定を行う必要がある。専門性を高め取り扱う問題を厳密に定義することで知見を集積し発展してきた従来型の科学とは異なるアプローチが必要になる。こうした状況に対し、社会経済分野で発達してきた統合評価モデル（将来想定シナリオの策定などに用いられる）と、ESM とを結合した地球システム-社会経済結合モデルを開発することで、有用なツールを提供できる。完成したツールを通じ、多様

^{*3} https://www.jma.go.jp/jma/kishou/knownow/tecdev/nwp_strategic_plan_towards_2030.html

な分野、セクターを巻き込んだコミュニケーションを促進して、連携を深めることが可能になると期待される。

また、温暖化適応策のための気候予測情報においては、全球を対象とした気候モデルでは計算機資源の制約により、現在において、最も高解像度のモデルでも格子間隔は 20km 程度である。この解像度では、細かな地形の影響を受ける降水や地表面状態の影響を直接受ける気温などについて、高い再現精度が望めない。そこで、日本周辺など対象となる特定領域のみを高解像度の領域モデルで計算したり、統計的なモデルを用いて高解像度化（ダウンスケーリング）したりすることで、適応策のための領域気象情報を作成している。ダウンスケーリングで予測される気候情報の信頼性向上のためには、全球モデル及び領域モデルの両方の再現性や予測精度を向上させていく必要がある。それと同時に、ダウンスケールによって計算された地域気候予測結果に含まれる不確実性の要因の理解と定量的評価も気候情報の信頼性に不可欠である [15, 16, 17]。

気象災害につながるような極端現象など、出現率の低い現象の発生確率や将来変化の予測においては、予測結果の信頼性を統計的に評価するのに十分なサンプル数を確保する必要がある。国内においては、世界に先駆けて力学的ダウンスケーリングとアンサンブル実験によって温暖化の影響評価のための大規模データセット d4PDF[18] を作成し、様々な分野での影響評価に役立てている [19]。今後は、モデルの精緻化・高解像度化と気候予測のアンサンブル数の増加のどちらも向上させていく必要がある。

上記の数値天気予報、および、気候変動予測で用いる気象・気候モデルの再現や予測性能に対する信頼度を現状よりも高めていくためには、モデルそのものの高度化・精緻化が必要である。気象・気候モデルの高度化・精緻化は、2つの方向がある。1つは、対象とする領域を覆うメッシュを細かくする「高解像度化」、もう1つは、物理プロセスの精緻化である。気象・気候モデルにおける物理プロセスとは、格子サイズで解像可能なスケール以上の大気の流れを計算する力学過程以外の計算を扱うプロセスのことを指す。また、物理プロセスの精緻化には、高解像度化や物理モデルの精緻化が進むにつれて、従来の手法の適応限界を超えるため、新たに物理モデルを開発する意味での精緻化と、従来の気象・気候モデルでは計算資源の制約から考慮に入れることができなかった物理過程を取り入れる精緻化がある。

個々の現象を物理的に正しく再現するという観点からは、モデルの高解像度化はストレートなアプローチである。地球大気は全球規模の大スケール（～10,000km）から雲・乱流といった小スケール（10m 以下）の現象が相互に作用する複雑な系である。特に水平解像度を数 km 程度まで高めると、対流圏全層に渡る深い鉛直対流がモデル格子で直接解像され始め、雲・降水システムの表現が質的に大きく向上する [20, 21]。このような雲解像（cloud-resolving）モデルでは、雲・循環・放射の相互作用を物理的に整合した方法で表現できるため、現在の気候モデルでは不確定性が大きい雲の気候感度の見積りに加え、対流活動が活発な熱帯の気象現象の理解向上や台風などの予測の向上につながることを期待できる。さらに水平・鉛直解像度を 100m 程度以下まで微細化できれば乱流の一部が解像されはじめる。モデルで乱流を陽に扱えるようになれば（Large-eddy シミュレーション, LES）、大気境界層の表現が飛躍的に向上し、現在では直接的な再現が難しい、下層雲を含む全球の雲の高さや光学的厚さの分布について、自励的に再現されることが期待できる。このような全球 LES が気候スケールで実用的になれば、雲と気候の相互作用に対する理解が飛躍的に進展すると予想される。さらに、2030 年頃に実用化が期待される技術として、雲が持つ電荷や雷を直接計算し、雷頻度を直接予報する「気象雷モデル [22, 23]」がある。これが実用化されれば、現在は雷警報や雷活動度といった抽象的な物理量による予報しか存在していない雷の予測を雷

頻度や電荷の分布の予報に繋げることができるだけでなく、雷による電気設備への被害や航空機への被雷被害低減という点で、社会に対して大きな貢献となる。

気候モデルによる長期気候変動の予測の向上においては、大気モデルだけでなく、海洋モデルや化学モデルの高精度化も必須である。気候モデルの海洋コンポーネントモデルで、全球をほぼ同じサイズの格子で覆う場合、CMIP6に参加している我が国のモデルの格子幅は100km程度、海洋高解像度版でも25km程度と、世界で最も細かいモデルの格子サイズ（約10km）より粗い。将来のCMIPを見据えて、5年後を目標に、全球10km解像度の海洋モデルを組み込んだ気候モデルの構築を目指す。海洋モデルの高解像度化により、黒潮やメキシコ湾流などの西岸境界流の表現が大きく向上することが期待される。さらには、海洋モデルの精度向上により、気候予測だけでなく、実用面から社会的に重要視されている北極域や日本近海の流れ情報の提供も期待される。一方、大気微量成分の大気中での動態およびその気候的影響を正しく評価するためには、大気中で物質がどのように運ばれ消えていくのか、すなわち1) 地表・海洋表面上などから大気への排出および植物等による吸収、2) 輸送過程、3) 変性過程、4) 沈着過程の諸過程と、大気中における放射過程とをなるべく精緻に評価する必要がある。モデルの高解像度化に加えて、諸過程への理解を深め、それらのモデルへの取り込みを継続して進めていく。

2.1.3 課題とその解決に必要な計算手法・アプリケーション

気象・気候モデルは、大気モデルを中心に、用途に応じて海洋・海氷、陸地、雪氷、化学・エアロゾル、陸域・海洋生態系、といった多くの要素モデルを含む（図2.1）。大気モデルは力学コアと物理スキームから構成され、力学コアでは運動方程式や熱力学の式を用いて各格子点における物理量を予報する。物理スキームでは、力学コアの方程式の適用対象外、もしくはモデル格子以下（サブグリッド）の現象がもたらす熱・運動量・水物質の輸送や相変化を計算する。特に放射、雲・降水、乱流プロセスが重要である。天気予報のような短期積分では初期値が重要であり、モデルの改良とともに観測データを利用してモデルの第一推定値を修正するデータ同化システムが重要である。一方、気候予測のような長期積分では、海洋・海氷をはじめとする要素モデルの重要性が相対的に増す。

気象・気候モデルに共通する特徴として、ソースコード（多くの場合はFortran）の総行数が $O(10^5 \sim 10^6)$ 程度と大規模であるとともに、演算密度の低い（＝高B/F比の）コンポーネントが多数あり、特に力学コアや3次元物理スキーム・要素モデルでは時間ステップごとに全通信や軸通信を必要とする。また、どこかのコンポーネントに浮動小数点演算量と処理時間が偏っていることがない（＝Flat Profile）。その結果、データを移動させる時間や最適化の甘い計算ループがソースコードの至る所でボトルネックとなっている。対策としては、浮動小数点演算の低精度化やデータの局所化といったデータ移動を削減する高速化施策が積極的に進められてきた。また、出力データの増大（ペタバイトクラス）も大きな課題であり、シミュレーションから解析までを同じプラットフォーム上で行うことも検討されている。

気象・気候モデルが目指す方向性として、大アンサンブル化、高解像度化、長期積分化、複雑化という軸がある。この中で大アンサンブル化はcapacity computingであることから達成は比較的容易であり、今後も急速な発展が見込まれる。アンサンブル数に比例して増大する出力データサイズおよびファイル数への対応や、解析・可視化における並列化が課題である。高解像度化については基本的にはcapability computingであり、格子ステンシル計算のような演算が局所化されたモデルであれば、格子数に比例して

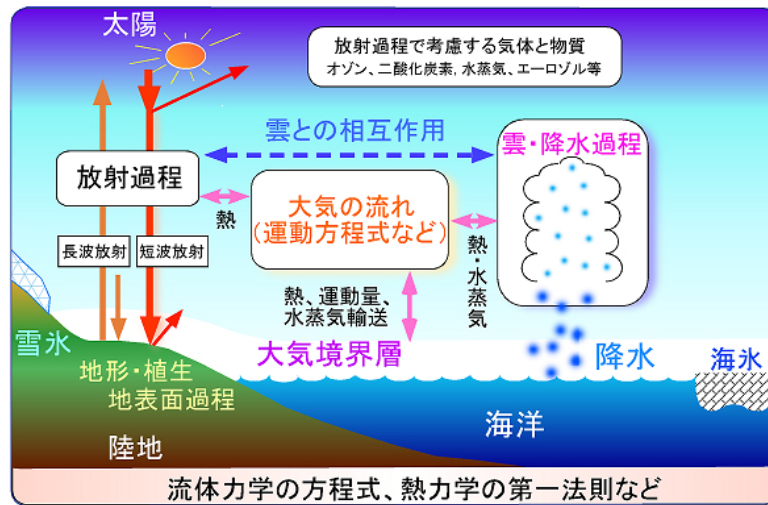


図 2.1 気象・気候モデルで考慮されているプロセスの模式図。気象庁ホームページ (<https://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/whitep/1-3-1.html>; 2022 年 7 月 7 日閲覧) より。

ノード数を増加させる（weak-scaling 問題）ことで技術的には比較的容易に達成できる。ただし、一般的に高解像度化によって時間刻みを小さくする必要があるため、計算時間が増加することに注意する必要がある。また、高解像度化に応じて利用する数値解法や物理スキームを再検討する必要がある（後述）。長期積分については現在、水平格子サイズが $O(10^2 \text{ km})$ の気候モデルを利用することが一般的であり、高解像度モデルの長期積分は計算時間がかかりすぎるという問題がある。全体の問題サイズを変えずにノード数を増加させる（strong-scaling 問題）必要があるが、これにより並列性確保が困難になるとともに通信時間が増大するため、計算時間の削減は限定的である。複雑化については、予報変数の増加によるメモリ使用量増大への対処や、異なるタイプのモデルを連成させるためのカップラ技術の開発が課題である。

気象・気候モデルは、扱う対象に応じて全球モデルと領域モデルに分類される。全球モデルは天気予報から気候予測まで幅広く用いられ、領域モデルは天気予報や全球モデルからの力学的ダウンスケールなどの用途で用いられる。また、高解像度化による現象の忠実な再現を重視するか、実用的な気候予測情報の創出を重視するか、日々の天気予報の改善を重視するか、といった観点から、気象・気候分野では複数のタイプのモデルが開発されてきた経緯がある。以下では便宜上、(1) 全球高解像度モデル、(2) 全球気候モデル、(3) 領域気候モデル、(4) 現業数値予報モデル、に分けてモデルの特徴と課題を述べる。

(1) 全球高解像度モデル (3.1.1.1 節) は、数 km もしくはそれ以下の格子サイズを用いた全球モデルである。力学コアとして格子ステンシル計算を採用し、高い weak-scaling 性能を確保している。また、積雲スキームといった任意性を生む物理スキーム（パラメタリゼーション）を極力排除し、物理法則に沿ってスケール間相互作用をシームレスに取り扱うことが強みである。国内では NICAM、MSSG、SCALE-GM などが開発されており、ここでは代表アプリとして NICAM を取り上げる。NICAM は各時代のフラグシップマシンにおいて世界最高解像度のシミュレーションを達成し、富岳では全球 200m シミュレーションに挑戦中である。また、 $O(10^3)$ クラスの大アンサンブルシミュレーションによる延長予報・季節予測研究も活発である。気候モデルとしての利用は発展途上であるが、特に欧米ではモデルの全面的な書き換えを含む高速化の取り組みが急速に進んでいる。

(2) 全球気候モデル (3.1.1.2 節) は、気候の再現および予測を重視した全球モデルである。積雲対流スキームをはじめとする半経験則に基づく物理スキームを多用し、地球のエネルギーバランスを保つようパラメータ・チューニングされている。これにより、海洋モデルと結合して 100 年以上の積分を安定的に実行することが可能である。IPCC 報告書のベースとなる気候予測データの創出やイベント・アトリビューション研究、領域モデルの親モデルとしての利用など、温暖化の影響評価や適応策の研究において幅広く用いられている。さらに、生態系の働きなどを組み込んだ地球システムモデルを温暖化の緩和抑制策へ用いる動きも活発である。このタイプのモデルは MIROC、および MRI-ESM が国内主要モデルである。これらのモデルは一般にスペクトル法を用いており、特に高解像度化した場合に集団通信にかかる時間の占める割合が増大する。

(3) 領域気候モデル (3.1.1.3 節) は、日本域など領域を限定して総演算量を削減し、その代わりに空間解像度を高めて、精度の高いシミュレーションを行うモデルである。モデルとしての特徴は (1) と同様であり、格子ステンシル計算であることから weak scaling 性能は高い。解像度は、現在は数 km 程度であるが、空間詳細な地形や土地利用を表現したり、積雲を格子で解像するためには数百 m 以下が、都市域の熱環境評価ではさらに細かい数十 m 以下が必要とされており、水平・鉛直分割によるノード増加が有力な高速化手法である。高解像度における領域気候のパフォーマンスへの影響調査や適切なスキームの検討が今後の課題である。また、現在、領域モデルは、将来気候変化に対する適応策検討への貢献が大変期待されている。モデルで計算された気候予測情報の信頼性向上のため、予測結果に含まれるシナリオやモデルエラーなどに由来する不確実性の定量的な理解を進めていくことも重要である。代表アプリとして取り上げる SCALE-RM の他、NHM やその後継の asuca ((4) を参照)、WRF、CReSS などが領域モデルとして研究コミュニティでは広く用いられている。

(4) 現業数値予報モデル (3.1.1.4 節) は、実際の天気予報システムに組み込まれている気象モデルである。信頼性および迅速性を最も重視し、日々の予報サイクルを通じてモデルの再現性・予測性能は厳しくチェックされている。初期値が重要であることから、客観解析の基盤技術であるデータ同化 (後述) の重要性が高い。確率分布の非ガウス性を考慮した $O(10^5)$ スケールのアンサンブル同化による顕著現象予測や、水平 100m 格子以下の超高解像度化による現象の再現性向上などが次のマイルストーンである。フラッグシップマシンは 10 年先の現業マシンと同程度の性能であり、フラッグシップマシンで得られた知見を現業に生かす Research to Operation (R2O) や、現業システム・データの研究現場への提供といった Operation to Research (O2R) が近年ますます重視されてきている。代表アプリとして領域モデル asuca を取り上げる。

以上の気象・気候モデルを構成する力学コアおよび物理スキームの高度化は、モデル全体の性能を決める重要な課題である。特に気象・気候モデルの高解像度化がさらに進んだ場合、各物理プロセスの前提となる仮定が崩れることで従来の手法の適応限界を超えてしまう場合が生じる。例えば、力学コアとして多くのモデルで採用されている 2 次精度の空間差分式では、数値誤差が LES におけるサブグリッドスケールの渦粘性項の寄与を上回ってしまうことが指摘されている [24]。また、物理スキームについては特に乱流、放射、および雲微物理過程の高度化を検討する必要がある (3.1.2.1 節)。乱流過程の計算については、境界層内の対流や乱流の取り扱いに関するグレーゾーン [25] に相当する水平メッシュサイズ 100m~1km が今後主流となってくるため、このスケールでの乱流の取り扱いについて検証や知見を積み重ねる必要がある。さらに解像度 100m スケール以下での LES を気象気候に適用することを見据え、湿潤過程を考慮

した理論の再構築が必要である。

放射過程に関しては、気象・気候モデルにおいて広く用いられている放射伝達モデルは、平行平面大気を仮定して、光の伝達方向を上下方向のみに近似する 2 流近似を用いているものが多いが、LES モデルが対象とする高解像度スケールにおいては、平行平面大気の仮定が成り立たず、斜めに光が入る効果を考慮する必要がある。LES スケールを念頭に、3 次元的に放射伝達を計算する 3 次元放射伝達モデルの開発をするとともに、どの程度の解像度から 3 次元的な放射を考慮しなければならないかを明確にすることにも取り組んで行く必要がある。また、現状の気象モデルでは、雲の中における氷相の雲粒の微物理特性（雲粒の大きさや形状、密度）を経験的に仮定しているのが現状であり、このことが計算の不確実性を生む原因となっている。氷相の微物理特性を直接計算する雲モデル（Habit 予測型ビン法 [26] や、超水滴法 [27, 28]）の開発を進めていく必要がある。さらに、雲に関連して気象雷モデルの実用化も今後進展すると見込まれる。これらはいずれも予報変数すなわち必要メモリ量の増大を招くとともに、物理スキームの 3 次元化に伴う全通信が計算速度のボトルネックとなりうる。ターゲットとなるスケールよりもさらに解像度の高い超高解像度実験や詳細で非常に計算量の多い物理過程スキームによる実験結果をベースに新しい理論の構築をしたり、それらを教師データとしてスキームそのものを機械学習で置き換えるという試みも想定される。

大気化学モデル（3.1.2.2 節）や海洋モデル（3.1.2.3 節）も気象・気候モデルを構成する重要な要素モデルである。大気化学モデルはエアロゾルを含む様々な化学物質の動態を計算するコンポーネントである。特に気候・化学相互作用や大気汚染の観点から重要であるとともに、最近では COVID-19 や原発事故に対する高い即応性も求められている。国内では MIROC-ESM および MRI-ESM が主要モデルであり、ここでは代表アプリとして MIROC-ESM に含まれる CHASER (MIROC-CHASER) を取り上げる。予報化学種のトレーサ数に応じて計算負荷が高まり、特に移流過程と光化学反応過程についてアルゴリズム改良が今後の課題である。

海洋は大気に比べて大きな熱容量を持つとともに、CO₂ やメタンを吸収するため、長期の気候変動を扱う場合に海洋モデルは不可欠な要素モデルである。特に、顕著な南北熱輸送を担う黒潮やメキシコ湾流・北大西洋海流を正確に表現するためには水平解像度 10km 程度が必要とされ、最新の気候モデルにおいても未だ実用化されていない。また、温暖化の影響を強く受ける北極海や日本近海の海流情報に対する産業界からのニーズの高まりを受け、北極海だけを高解像度化した海洋ネスティングモデルや、日本近海を 500m 程度まで高解像度化したモデルの開発も進められている。海洋 100m 格子モデルについては非静力学コアの導入を検討する必要がある。

データ同化による初期値の推定は、数値天気予報における最も重要な技術の一つである。特に、災害をもたらす顕著現象を精度よく予測するためには、モデルおよび観測の高い時空間解像度、およびアンサンブル同化システムの大アンサンブル化が必要となる。また、確率分布の非ガウス性を考慮した新しい手法（粒子フィルタ、機械学習）の検討が進められている。さらに、計算コスト削減のため単精度演算や超解像技術の活用、モデル物理過程の機械学習による置き換え、機械学習を用いたデータ同化手法の改善、といった点も検討課題である。ここでは代表アプリとして NICAM-LETKF を取り上げる。アンサンブルデータ同化は行列演算であり、アンサンブル数の増大とともに演算量は劇的に増大する。また、データ量だけでなくファイル数の増大にも耐える必要がある。データ同化・データサイエンスについては 3.1.3 節で詳述する。

以上のような課題は、気象・気候モデル開発者だけでは解決は難しく、技術トレンドとのギャップを橋渡しする必要もある。従って、コデザインを通じた気象・気候モデル開発者とハード開発者の協調設計は、これまで以上に重要になってくるだろう。技術トレンドと気象・気候モデルの対応については3.1.4節に詳述する。また、コデザインのプロセスに携わることができる気象・気候モデル開発者が不足しているという問題もあり、大学や学会において人材育成に向けた取り組みが行われている。

2.1.4 ロードマップ

図 2.2 参照。

2.1.5 必要な計算機資源

2032 年頃における課題解決のために必要な計算機資源の見積りを行い、代表的アプリケーションについて、図 2.3 に記載する。また、計算機資源の見積りの詳細は第 3.1 節に記載している。

参考文献

- [1] Imada, Y., M. Watanabe, H. Kawase, H. Shiogama, and M. Arai. The July 2018 high temperature event in Japan could not have happened without human-induced global warming. *SOLA*, Vol. 15A, pp. 8–12, 2019. <https://doi.org/10.2151/sola.15A-002>.
- [2] Richardson, L. F. *Weather prediction by numerical process*. Cambridge University Press, 1922.
- [3] Charney, J. G., R. Fjörtoft, and J. Neumann. Numerical integration of the barotropic vorticity equation. *Tellus*, Vol. 2, No. 4, pp. 237–254, 1950.
- [4] 気象庁. 数値予報 60 年誌. 60 pp., 2019. https://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/whitep/doc_1-3-2-1/all.pdf.
- [5] Manabe, S. and R. T. Wetherald. Thermal equilibrium of the atmosphere with a given distribution of relative humidity. *J. Atmos. Sci.*, Vol. 24, No. 3, pp. 241–259, 1967. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1967\)024<0241:TEOTAW>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1967)024<0241:TEOTAW>2.0.CO;2).
- [6] Manabe, S. and R. T. Wetherald. The effects of doubling the CO₂ concentration on the climate of a general circulation model. *J. Atmos. Sci.*, Vol. 32, No. 1, pp. 3–15, 1975. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1975\)032<0003:TEODTC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1975)032<0003:TEODTC>2.0.CO;2).
- [7] T. Hajima, M. Watanabe, A. Yamamoto, H. Tatebe, M. A. Noguchi, M. Abe, R. Ohgaito, A. Ito, D. Yamazaki, H. Okajima, A. Ito, K. Takata, K. Ogochi, S. Watanabe, and M. Kawamiya. Development of the MIROC-ES2L earth system model and the evaluation of biogeochemical processes and feedbacks. *Geosci. Model Dev.*, Vol. 13, No. 5, pp. 2197–2244, 2020.
- [8] M. Kawamiya, T. Hajima, K. Tachiiri, S. Watanabe, and T. Yokohata. Two decades of earth system modeling with an emphasis on model for interdisciplinary research on climate (MIROC). *Prog. Earth Planet. Sci.*, Vol. 7, No. 64, 2020. <https://doi.org/10.1186/s40645-020-00369-5>.
- [9] Meehl, G. A., G. J. Boer, C. Covey, M. Latif, and R. J. Stouffer. The coupled model intercom-

- parison (CMIP). *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*, Vol. 81, No. 2, pp. 313–318, 2000.
- [10] Bauer, P., B. Stevens, and W. Hazeleger. A digital twin of Earth for the green transition. *Nat. Climate Change*, Vol. 11, No. 2, pp. 80–83, 2021. <https://doi.org/10.1038/s41558-021-00986-y>.
- [11] Stevens, B. and Coauthors. DYAMOND: the DYnamics of the Atmospheric general circulation Modeled On Non-hydrostatic Domains. *Prog. Earth Planet. Sci.*, Vol. 6, No. 61, 2019. <https://doi.org/10.1186/s40645-019-0304-z>.
- [12] Slingo, J. and Coauthors. Ambitious partnership needed for reliable climate prediction. *Nat. Climate Change*, Vol. 12, No. 6, pp. 499–503, 2022. <https://doi.org/10.1038/s41558-022-01384-8>.
- [13] 気象庁. 2030 年に向けた数値予報技術開発重点計画. 41 pp., 2018. https://www.jma.go.jp/jma/press/1810/04b/nwp_strategic_plan_towards_2030_2body.pdf.
- [14] IPCC. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Vol. In Press. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, US, 2021.
- [15] Wilby, R. L. and S. Dessai. Robust adaptation to climate change. *Wea.*, Vol. 65, No. 7, pp. 180–185, 2010. <https://doi.org/10.1002/wea.543>.
- [16] Hawkins, E. and R. Sutton. The potential to narrow uncertainty in regional climate predictions. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, Vol. 90, No. 8, pp. 1095–1107, 2009. <https://doi.org/10.1175/2009BAMS2607.1>.
- [17] Hawkins, E. and R. Sutton. The potential to narrow uncertainty in projections of regional precipitation change. *Climate Dyn.*, Vol. 37, pp. 407–418, 2011. <https://doi.org/10.1007/s00382-010-0810-6>.
- [18] Mizuta, R. and Coauthors. Over 5,000 years of ensemble future climate simulations by 60-km global and 20-km regional atmospheric models. *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*, Vol. 98, No. 7, pp. 1383–1398, 2017. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-16-0099.1>.
- [19] Ishii, M. and N. Mori. d4PDF: large-ensemble and high-resolution climate simulations for global warming risk assessment. *Prog. Earth Planet. Sci.*, Vol. 7, No. 58, 2020. <https://doi.org/10.1186/s40645-020-00367-7>.
- [20] Miyamoto, Y., Y. Kajikawa, R. Yoshida, T. Yamaura, H. Yashiro, and H. Tomita. Deep moist atmospheric convection in a subkilometer global simulation. *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 40, No. 18, pp. 4922–4926, 2013. <https://doi.org/10.1002/grl.50944>.
- [21] Prein, A. F., R. M. Rasmussen, D. Wang, and S. E. Giangrande. Sensitivity of organized convective storms to model grid spacing in current and future climates. *Philos. Trans. R. Soc., A*, Vol. 379, No. 2195, p. 20190546, 2021. <http://doi.org/10.1098/rsta.2019.0546>.
- [22] Sato, Y., Y. Miyamoto, and H. Tomita. Large dependency of charge distribution in a tropical cyclone inner core upon aerosol number concentration. *Prog. Earth Planet. Sci.*, Vol. 6, No. 62, 2019. <https://doi.org/10.1186/s40645-019-0309-7>.
- [23] Sato, Y., S. Hayashi, and A. Hashimoto. Difference in the lightning frequency between the July 2018 heavy rainfall event over central Japan and the 2017 northern Kyushu heavy rainfall event

- in Japan. *Atmos. Sci. Lett.*, Vol. 23, No. 1, p. e1067, 2022. <https://doi.org/10.1002/asl.1067>.
- [24] Kawai, Y. and H. Tomita. Numerical accuracy of advection scheme necessary for large-eddy simulation of planetary boundary layer turbulence. *Mon. Wea. Rev.*, Vol. 149, No. 9, pp. 2993–3012, 2021. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-20-0362.1>.
- [25] Wyngaard, J. C. Toward numerical modeling in the “Terra Incognita”. *J. Atmos. Sci.*, Vol. 61, No. 14, pp. 1816–1826, 2004. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(2004\)061<1816:TNMITT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(2004)061<1816:TNMITT>2.0.CO;2).
- [26] Hashino, T. and G. J. Tripoli. The Spectral Ice Habit Prediction System (SHIPS). part III: Description of the ice particle model and the habit-dependent aggregation model. *J. Atmos. Sci.*, Vol. 68, No. 6, pp. 1125–1141, 2011. <https://doi.org/10.1175/2011jas3666.1>.
- [27] Shima, S., K. Kusano, A. Kawano, T. Sugiyama, and S. Kawahara. The super-droplet method for the numerical simulation of clouds and precipitation: a particle-based and probabilistic microphysics model coupled with a non-hydrostatic model. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, Vol. 135, No. 642, pp. 1307–1320, 2009. <https://doi.org/10.1002/qj.441>.
- [28] Shima, S., Y. Sato, A. Hashimoto, and R. Misumi. Predicting the morphology of ice particles in deep convection using the super-droplet method: Development and evaluation of SCALE-SDM 0.2.5-2.2.0, -2.2.1, and -2.2.2. *Geosci. Model Dev.*, Vol. 13, No. 9, pp. 4107–4157, 2020. <https://doi.org/10.5194/gmd-13-4107-2020>.

年代 課題		2022 ～	2024 ～	2026 ～	2028 ～	2030 ～	2032 ～
全球規模での 高解像度予測		← 全球LESモデル開発/全球200m実験 O(10 ³)アンサンブル予報実験 ← 全球雲解像10年気候実験 ← 全球雲解像地球システムモデル開発	← 全球100m実験 (LES) O(10 ³)アンサンブル全球雲解像予報実験 ← 全球雲解像100年気候実験 ← 全球雲解像地球システム実験				
全球気候 シミュレーション		← 適応データセット公開 ← 気候モデル・ESMによる10年規模予測システム開発 ← 地球システム-社会経済結合モデル開発	← 適応データセット公開更新モデル高解像度化 ← 気候モデル・ESMによる10年規模予測システム開発 ← 地球システム-社会経済結合モデル開発	← 適応データセット創出、公開 ← 気候モデル・ESMによる10年規模予測システム実験 ← 地球システム-社会経済結合モデル開発	← 次期適応データセット仕様検討、モデル開発 ← 気候モデル・ESMによる10年規模予測システム実験 ← 地球システム-社会経済結合モデル開発		
気象予報	気象庁システム	← 1km狭領域LFM試験運用ハイブリッドデータ同化導入 ← 様々な観測データの利用拡大・利用手法改良(断続的に実施)	← LFM予報時間延長	← LFM高解像度化LEPS運用開始	← LFM改良LEPS改良アンサンブルデータ同化導入		
	超高解像度シミュレーション	← 水平解像度<100m級LESの利用			← 水平解像度<50m級LESの利用		
	アンサンブルデータ同化	← asuca-based EnVar, EnKFの開発		← 全現業データ同化(5km)高解像度化(～1km)	← 非ガウス性10万メンバー同化		
領域気候予測		← O(10 ³ m)でアンサンブル気候計算 ← O(10 ² m)で現在気候再現実験		← O(10 ² m)で気候実験			← O(10 ² m)でアンサンブル気候計算
物理モデル	3次元放射伝達モデル(3D-RD)	← 3D-RDの開発気象モデルへの実装		← 結合モデルを用いた小スケールでの数値実験	← 実問題での数値実験		
	精緻な雲モデルの開発	← 精緻な雲モデルの開発と実事例での実行に向けた高度化			← 実問題での数値実験		
	気象雷モデルの実用化	← ハインドキャスト実験と高速化モデルの検証と改良	← 特定の地点を対象とした実証実験	← 日本全体を対象とした予測 ← 全球モデルへの拡張			
大気化学		← エアロゾルモデルの高度化	← 高解像度衛星データを用いた高解像度輸送検証	← 化学反応系の精緻化	← 精緻化されたモデルでのO(1km)でのイベント実験	← 精緻化されたモデルでの長期計算	
海洋(長期気候予測)		← 海洋全球10kmの気候モデル ← 北極3-5km/全球25kmの気候モデル	← 左記モデルのアンサンブル実験	← 日本近海500m(多重ネスト)の海洋モデル ← 日本近海100mの海洋非静力モデル			
データ同化 機械学習		← 地球システムモデルによる強結合データ同化システムの開発 ← 高解像度データ同化手法の開発(解像度100m以下) ← データ同化とAIの融合研究	← 地球システムモデルによる強結合データ同化実験 ← 高解像度データ同化手法の開発(解像度10m以下) ← AIを使った新しいデータ同化手法の開発				

図 2.2 気象・気候分野のロードマップ

課題	アプリケーションの名称	概要と計算手法	(a) 問題規模	(b) ケース数	(c) 計算時間 /ケース (hour)	(d) 演算量/ ケース (EFLOP)	(e) メモリ量/ ケース (PB)	(f) メモリ転送量 /ケース (EB)	(g) ストレージ 量/ケース (PB)	(h) 総演算量 (EFLOP)	(i) 要求性能 (PFLOPS)	(j) 要求メモリ/ バンド幅 (PB/s)
全球規模での高解像度予測(全球LES)	NICAM	有限体積法、完全圧縮非静力学モデル	格子点数: 4兆(水平解像度110m、鉛直400層)、ステップ数70万(dt=0.25秒、2日積分)	1	336	340000	51	714000	29	340000	281.1	590.3
領域気候予測	SCALE	有限体積法、完全圧縮非静力学モデル	格子点数: 6億(水平解像度1km、鉛直60層)、ステップ数3億(dt=6秒、60年積分)	90	6	8700	0.0017	6800	24	783000	402.8	314.8
数値天気予報(超: 高解像度シミュレーション)	asuca	有限体積法、完全圧縮非静力学モデル	格子点数: 5兆(水平解像度30m(5万×5万格子)、鉛直200層)、ステップ数500万(dt=0.1秒、6日積分)	1	24	23000	1.5	0.327	23000	266.2		
大気化学	MIROC-CHASER	スペクトル法、静力学モデル+化学モデル	格子点数: 1200万(水平解像度80km、鉛直60層)、ステップ数530万(dt=1分、10年積分)	1		14000	40		14000			
データ同化	NICAM-LETKF	大気モデル: NICAM(上述)、アンサンブルデータ同化: LETKF(行列演算)	格子点数: 43億(水平解像度3.5km、鉛直94層)、サイクル数1440(1時間毎、2ヶ月)、アンサンブルメンバ数1000	2	576	448000	1.4	559872	15	896000	216.0	270.0

アプリケーションの名称	(k) 要求ファイルI/O性能 (TB/s)	(l) 想定する ノード数	(m) 通信にか けてよい 時間 (%)	(n) 主要な通 信 パターン (プルダウン より選択)	(o) 通信サイズ	(p) ネットワーク バンド幅/ ノード (PB/s)	(q) レイテン シ (μs)	(r) オンチップ メモリ容 量(MB)	(s) 算出方法	(t) B/F
NICAM	0.6	655360	10	隣接通信	7.8MB/node/step (1ノードあたり水平2°7×4方向×400層×20変数×2回)。ステップ数70万よりトータル2.6TB/node	2.10E-08	要求なし	要求なし	前回ロードマップから外挿	2.1
SCALE	4	10000	10	隣接通信	72MB/node/step	3.51E-04	要求なし	要求なし	富岳での実行結果をもとに算出	0.78
asuca				隣接通信						
MIROC-CHASER										
NICAM-LETKF	80	100000	2	all_to_all	3PB/データ同化1サイクル	4.77E-07				1.2

図 2.3 気象・気候分野：代表的アプリケーションの要求性能

第 3 章

各課題の詳細

3.1 気象・気候

本節では気象・気候分野における 2032 年頃に解決すべき科学的課題についてその課題の内容とアプリケーション・計算機資源について詳細を述べる。2.1.3 節で述べたように、気象・気候モデルは、扱う対象や目的に応じて複数のタイプのモデルが開発されてきた。3.1.1 節ではそれぞれのタイプのモデルを用いたシミュレーションについて詳述する。これらのモデルに含まれる物理プロセスや海洋や化学といった要素モデルの改良も重要な課題であり、3.1.2 節で取り上げる。発展が著しい AI（人工知能）の活用を含むデータ同化・データサイエンスについては 3.1.3 節で述べる。近年の気象・気候モデル開発に大きな影響を与えているハードウェアの動向について 3.1.4 節で解説する。

3.1.1 気象・気候シミュレーション

3.1.1.1 全球高解像度シミュレーション

背景

全球大気を水平格子サイズ数 km 以下で解く数値モデルは、大循環から深い対流までをシームレスに解き、マルチスケール相互作用が重要な役割を果たす多くの気象現象の再現と予測にとって有用なツールである。特に台風は、現象全体の水平スケールは数百 km スケールであるが、眼の構造は 10～数十 km 程度のスケールを持つ。また、台風の発生は数千 km スケールの環境場による影響が大きいことから、台風の理解と予測において全球高解像度モデルが果たす役割は大きい。また、台風は日本を含む東・東南アジアや北米において甚大な人的・経済的損失をもたらしており、台風の動向や予測に対する社会的な関心は高い。日本国内では、2019 年台風 19 号（東日本台風）（死者・行方不明者 108 人）、2011 年台風 12 号（同 98 人）、2004 年台風 23 号（同 98 人）のように、近年においても 100 人規模の死者・行方不明者が発生している^{*1}。海外に目を向けると、2008 年のサイクロン・ナルギス（ミャンマー：同 13 万人）、2013 年の台風 30 号（フィリピン：同 6 千人）のように、特に東南アジアの発展途上国において台風は未だに膨大な数の人命を奪っている。

防災・減災や温暖化適応策の観点から、台風をはじめ豪雨や暴風といった極端現象について、様々な時間スケールの予測を改善する努力が続けられてきた。例えば、1 週間程度先までの決定論的な台風予報については、進路予報の精度は長期的には向上している^{*2}が、近年は頭打ちの兆しがある。台風強度の予報精度向上はさらに難しく、観測データの充実とともにモデルの精緻化が重要な課題となっている。気象庁は 2030 年に向けた数値予報技術開発重点計画の主な開発項目^{*3}の一つとして台風防災を掲げており、台風予報研究は気象庁と研究者の連携強化のもとで重点的に進められている。週を超える台風予報や月・季節スケールの台風発生傾向の予測については研究段階であり、モンスーンや偏東風波動、季節内振動、上層の寒冷渦といった台風発生と関連が深い現象の理解と予測が重視されている。また、季節予測では海洋予測の重要性が増してくる。気候スケールでは、地球温暖化によって強い台風の割合が増加する傾向が最

^{*1} 令和 3 年版防災白書（内閣府）：<http://www.bousai.go.jp/kaigirep/hakusho/r3.html>

^{*2} https://www.data.jma.go.jp/fcd/yoho/typ_kensho/typ_hyoka_top.html

^{*3} https://www.jma.go.jp/jma/kishou/now/tecdev/nwp_strategic_plan_towards_2030.html

新の IPCC 第 6 次評価報告書 (AR6) においても予測されている [1]。しかし、海盆毎、地域毎の台風予測については不確定性が大きい。近年の観測に基づく研究においても、東アジアに上陸する台風の強度の増加 [2]、東京に接近する台風の増加 [3]、台風移動速度の鈍化 [4] などの傾向が既にみられると指摘されており、温暖化適応策の観点からも信頼性の高い将来気候予測が求められている。

近年、地球のデジタルツインである “Digital Earth” の構築が提唱され [5]、欧州において大型プロジェクト^{*4}が開始されるとともに、WCRP（世界気候研究計画）において今後 10 年を見据えた Digital Earths Lighthouse Activity^{*5} が開始されるなど、Digital Earth は 2020 年代のトレンドになりつつある。Digital Earth は利用可能なあらゆる観測データを統合し、数値モデルやデータ科学の力を借りながら、過去・現在の地球の気候状態を仮想世界上に可能な限り忠実に再現し、さらに将来をできるだけ高い信頼度で予測しようという試みである。将来予測についてはユーザがシナリオを自在に選択でき、政策の効果を定量的に検証することも可能である。このような Digital Earth 構築の大前提として、できる限り多くのプロセスを取り入れた精緻な気象・気候モデルが必要となる。

以上のような社会的課題を解決するためには、用いる気象・気候モデルの再現・予測性能に対する信頼度を現状よりも高めていく必要がある。さらに学術的課題の解決までを見据えると、モデル性能の改善を着実に進めるアプローチとして、地球大気をできるだけ高解像度で計算することが有効である。地球大気は全球規模の大スケール（～10,000 km）から雲・乱流といった小スケール（10 m 以下）の現象が相互に作用する複雑な系である。特に水平解像度を数 km 程度まで高めると、対流圏全層に渡る深い対流がモデル格子で直接解像され始め、雲・降水システムの表現が質的に大きく向上する [6, 7]。このような全球雲解像（cloud-resolving）モデル^{*6}では、雲・循環・放射の相互作用を物理的に整合した方法で表現できるため、雲フィードバックへの理解が進展し、現在の気候モデルでは不確定性が大きい気候感度の制約に結びつく可能性がある。また、対流の自己組織化や季節内振動、モンスーン、日変化といった熱帯気象の中心的な課題に対して特に強力なツールであるとともに、台風の基本的な構造が表現されることで最大風速などの予測の向上につながることを期待できる。さらに水平・鉛直解像度を 100 m 程度以下まで微細化できれば乱流の一部が解像されはじめる。このような全球を対象とする Large-eddy シミュレーション (LES) では大気境界層の表現が飛躍的に向上し、現在では直接的な再現が難しい、下層雲を含む全球の雲の高さや光学的厚さの分布について、自励的に再現されることが期待できる。このような全球 LES が気候スケールで実用的になれば、雲と気候の相互作用に対する理解が飛躍的に進展すると予想される。また、自励的に発生した台風について微細構造 [8] が再現できるようになり、疑似観測データとして活用することで台風発達の鍵を握る境界層スキームの改善につながることも期待できる。

全球雲解像実験に向けた新しいモデル開発の取り組みは、2000 年代初頭に日本 (NICAM) およびドイツ (ICON) において開始された [9]。特に NICAM は、世界初の全球雲解像実験 [10]、及び、マッデン・ジュリアン振動 (MJO) の再現実験 [11] に成功して以来、多くの実績を残してきた。米国では 2 次元の雲解像モデルを粗い全球モデルの格子に埋め込む super-parameterization [12, 13] が利用されてきた。計算

^{*4} Destination Earth : <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/destination-earth>

^{*5} <https://www.wcrp-climate.org/digital-earths>

^{*6} 類似の呼称として、全球嵐解像 (storm-resolving; $dx < \sim 5\text{km}$) モデル、全球対流許容 (convection-permitting) モデルといった呼称も広く使われている。呼称には議論があるが、数 km 程度の水平格子サイズで雲微物理スキームを用いる全球非静力学モデル、という意味では実質的な違いはあまりないと考えられる。

機の高速化を背景に、2010年代後半になると多くのモデルグループにおいて全球雲解像モデルの実用化が進み、日本およびドイツの主導によってモデル相互比較プロジェクト DYAMOND[14] が開始された。ここ数年は全球雲解像モデルを気候モデルとして実用化する動きが大型プロジェクト*7によって急速に進められている。全球 LES については現在の計算機能力では実現のハードルが高いが、NICAM、ICON のグループが実現に向けた取り組みを進めている。計算資源の削減のため、3次元 LES モデルを親モデルのグリッドに埋め込む方法 [15] や、特定の物理スキームのみ鉛直層を増強する方法 [16] など提案されている。いずれにせよ、ここまで述べてきたような高解像度全球シミュレーションの出力は膨大であり、データの移動や解析は今後ますます困難になると予想される。これに対応して ECMWF では、クラウド上でシミュレーション・解析を行う “Digital Earth” システムのプロトタイプを 2023 年頃にリリースする見込みであり、他機関への波及も予想される*8。

学術的・技術的課題、目標

社会的・学術的課題を解決するため、高解像度全球モデルを用いた研究としてはさらなる高解像度化、大アンサンブル化、長期積分化、精緻化の方向性が考えられる。それぞれについて、5~10 年程度先の代表的な目標をロードマップとして示す。特に全球 LES の実現は全球雲解像実験以来のマイルストーンであり、技術トレンドを考慮すると 2020 年代後半の実現が想定される。大アンサンブル化、長期積分化、精緻化については、水平解像度 3.5km 程度の全球雲解像モデルをベースにした研究が主流になると予想される。富岳での研究により $O(10^3)$ アンサンブルの有用性が少しずつ明らかになってきている。気候スケールの研究については、全球雲解像モデルを用いた 100 年気候実験や 10 年アンサンブル気候実験が視野に入るだろう。また、Digital Earth 構築に向けた必然的な流れとして全球雲解像モデルの精緻化が加速し、地球システムモデルとしての利用可能性が模索されていくと予想される。

DYAMOND モデルに代表される多くの高解像度全球モデルでは、水平格子として準一様格子を用いている。一般的な全球モデルでは水平離散化法として球面調和関数を用いたスペクトル法が主流であるが、時間ステップ毎に大域通信を必要とする上、球面展開の演算量が水平解像度に対して非線形に増大する。従って、高解像度全球モデルではスペクトル法は回避される傾向にあるが、IFS (ECMWF) は水平解像度 5km モデルにおいてもスペクトル法を利用している。演算量の削減という観点では二重フーリエ法の有効性も検討されている [17]。準一様格子における離散化手法や山岳の取り扱いについても課題が残っている。

一般的な全球モデルでは、対流・雲スキームを用いることで格子スケール未満の対流・雲が格子スケールへ与える影響を表現している。しかし、このような診断型のスキームは半経験則に基づくため定式化やパラメータの任意性が大きく、特に将来気候予測において不確定性をもたらす大きな要因とされている。水平数 km スケールの全球雲解像モデルでは、雲や雨の質量などを予報する雲微物理スキームを用いるのが一般的であるが、追加的に対流・雲スキームを導入するかどうかはモデルによって判断が分かれている

*7 海外における代表事例としては、NextGEMS (欧州)、E3SM (米国)、EarthWorks (米国) が挙げられる。国内では DNA 気候学 (<https://dna-climate.org/>) および富岳成果創出加速課題 (<https://cesd.aori.u-tokyo.ac.jp/fugaku/>) が全球雲解像気候実験に向けた研究を推進している。

*8 最近のトレンドについては WMO が公開予定の白書 (WMO Research Board Concept Note on Exascale Computing and Data) も参照のこと。

[14]。水平数 km スケールでは深い対流は解像され始めるがまだ不十分であり、水平スケールが小さく背の低い浅い対流に至っては解像できない。放射への影響を考慮して多くのモデルでは部分雲診断スキームを導入しているが、雲・放射・対流の整合性という観点では理想的には望ましくない。また、雲微物理スキームで用いられているバルク法の精緻化や超液滴法 [18] のようなラグランジュ法の全球モデルへの導入も今後 5~10 年の検討課題になるだろう。水平数 km スケールというモデルの格子幅は衛星観測のフットプリントに近いことから、雲微物理スキームにおける未知パラメータについては、雲・降水過程を観測可能な衛星データから制約する試みも行われている。しかし、スキームが前提とする空間スケールとモデル格子幅の間には大きな乖離があるため、適切な気候場が再現されるという保証はない。超高解像度実験や詳細で非常に計算量の多い物理過程スキームによる実験を行って結果の収束性を探ることも、フラグシップマシンを用いた研究に求められる役割であろう。それらのチャンピオンデータは、データ同化や AI を用いたパラメータ・チューニングにおいても教師データとして有効に活用されることが期待される。

全球 LES に至るまでの水平メッシュサイズ 100 m~1km では、境界層内の対流や乱流におけるグレーゾーン問題に直面する [19]。気象モデルで用いられてきた予報式を診断的に簡略化したクロージャ境界層モデルの仮定が成り立つ範囲と、慣性小領域と呼ばれる領域より大きなスケールの渦を直接解像する LES での仮定が成り立つ範囲のちょうど狭間に位置するため、乱流スキームの扱いには注意を要する。さらに水平・鉛直解像度を 100 m スケール以下にまで微細化した LES は、多くの場合は乾燥大気を仮定して理論構築がされているため、気象に適応する場合には湿潤過程を考慮した理論の再構築が必要である。また、多くの全球モデルでは力学コアにおいて 2 次精度の空間差分式を採用しているが、これによる数値誤差は LES におけるサブグリッドスケールの渦粘性項の寄与を上回ってしまう。気象モデルにおける高次精度スキームの検討 [20] が進められるとともに、局所化と高精度化を両立した不連続ガラーキン法といった新しいスキームが次世代全球 LES の力学コアとして検討されている。

シミュレーションの大アンサンブル化については、これまでのモデルの延長線上で比較的容易に達成できる。特に社会的要請の大きい週スケールの台風進路予測や週を越えた台風の発生・進路や豪雨発生の確率予測といった研究が今後も発展するだろう。また、季節スケールの天候予測は農産業や水産業にとって重要であるが、初期値問題であるとともに境界条件（陸面・海面条件や大気組成等の外部条件など）も重要となる時間スケールであるため、予測可能性の有無を含めてさらなる理解が必要である。このような時間スケールでは季節内振動やエルニーニョ現象といった月から季節スケールのメモリを持った現象の再現が重要であり、海洋と結合した全球雲解像モデルを用いたアンサンブル実験が多用されるであろう。並行して、大気・海洋の初期条件を作成するためのデータ同化手法も検討する必要がある。

気候予測という観点では、ストロング・スケール問題により全球雲解像モデルを数十年以上にわたって連続積分することは現時点では困難であり、モデルのさらなる高速化が技術的な課題である。台風や豪雨といった極端現象を統計的に取り扱うため、全球雲解像モデルを用いたアンサンブル気候実験の活用も進むであろう。

目標達成に向けて必要な取り組み

モデルの高解像度化を達成するためには、計算ノードの増加に対してウィーク・スケーリング性能が維持されることが重要である。演算が局所化された全球モデルであれば、理論上はモデル本体部分のウィーク・スケーリング性能の維持はそれほど難しくない。但し、時間刻みを解像度とともに小さくする必要が

年代 課題	2022 ～	2024 ～	2026 ～	2028 ～	2030 ～	2032 ～
全球規模での 高解像度予測	全球LESモデル開発/全球200m実験			全球100m実験(LES)		
	O(10 ³)アンサンブル予報実験			O(10 ³)アンサンブル全球雲解像予報実験		
	全球雲解像10年気候実験			全球雲解像100年気候実験		
	全球雲解像地球システムモデル開発			全球雲解像地球システム実験		

図 3.1 気象・気候分野、全球高解像度シミュレーションのロードマップ

あり、同じ積分期間に対する実行時間は解像度とともに遅くなってしまいます。また、メッシュの微細化によるノードインバランスの拡大、ノード数増加による計算・IO エラー処理、といった課題が顕在化する可能性もある。また、NICAM（恐らく多くの高解像度モデル）では水平方向に MPI 並列、鉛直方向にスレッド並列を採用しているが、鉛直層数の増加によるノードあたりの必要メモリ量の増大にも対応する必要がある。

全球 LES を実現するためには、理論上は富岳（全球 200m 実験が可能）に対して 16 倍（空間格子数 8 倍、時間ステップ数 2 倍）程度の実行性能が必要である。これを現在の物理モデルだけの枠組みで 5～10 年後に達成するためには、モデル全体の演算加速器への最適化、低精度化、もしくは現在よりも高い B/F 比のマシンが不可欠であると予想される。代理モデルの活用までを考慮すると、広い意味での全球 LES の実現は間近の可能性もある^{*9}。

大アンサンブル化については capacity computing であることから、現在のモデルフレームワークのままでも比較的容易に達成できる可能性が高い。アンサンブル数に比例して出力データサイズが増大することから、ワークフロー全体を考慮すると解析や可視化までも含めた並列化を行う必要性が高まるであろう。

長期積分を現実的な実時間で実行するためにはストロング・スケーリング性能が重要になってくるが、ウィーク・スケーリング性能に比べて大規模ノードでの確保は極めて難しい。その要因として、ループ長短縮によるメモリアクセス・SIMD 演算・パイプライン処理の非効率化、単位演算あたりのノード間通信量の増大、ノードインバランスの顕在化、といった多くの点が考えられる上、これらはターゲットマシンの仕様に強く依存するため、長期的な性能向上は容易ではない。

アプリケーションと計算量・計算資源

アプリケーション

- モデル名：NICAM (Non-hydrostatic Icosahedral Atmospheric Model) [22, 23, 24, 25]
- 力学コア：正二十面体準構造格子、有限体積法、完全圧縮、非静水圧近似のナビエストークス方程式
- 物理過程：雲微物理（シングルもしくはダブルモーメントバルク法）、大気放射、乱流、陸面過程

^{*9} DNS の効果を代理モデルによって LES に取り込んだ例：Kochkov et al. (2021)[21]

など

- 海洋モデル COCO[26] と結合して、大気海洋結合モデルとして実行することも可能

計算量・計算資源

- 問題規模
 - － 格子点数：17 兆（水平解像度 110m、鉛直 400 層： $400 \times 10 \times 4^{16}$ ）
 - － ステップ数：70 万（ $dt=0.25$ 秒、2 日積分）
- 総メモリ量：51PByte（格子点数に比例すると仮定し、前回ロードマップより推定： $12/94 \times 400$ ）
- 総演算量：340 ZFLOP（格子点数・ステップ数に比例すると仮定し、前回ロードマップより推定： $1,216 \times (400/96) \times (70/1040)$ ）
- 実行時間：2 週間（10 EFLOPS、実行性能 3% を仮定）
- アプリケーション B/F 比（演算密度の逆数）：2.1
- 総メモリ転送量：総演算量 \times アプリケーション B/F 比 $\rightarrow 340\text{ZFLOP} \times 2.1 = 714\text{ZByte}$
 - － 要求メモリ転送性能： $1/(10\text{EFLOPS} \times 3\%) \times 2.1 = 0.63\text{EByte/s}$
- 総ストレージ使用量：29PByte（実行時間中に 4 バイトの 3 次元変数換算で 10 変数を 1 時間毎に出力すると仮定； $4 \times 10 \times 17 \text{兆} \times 24 \times 2$ ）
- 要求ファイル IO 性能：0.6 TB/s（ $29\text{PByte}/14/3600$ ）

3.1.1.2 全球気候シミュレーション

背景

地球温暖化の影響が顕在化している、と考える専門家は多い。実際、2021 年 8 月に公表された「気候変動に関する政府間パネル」(IPCC) の第一作業部会 (WGI) による第 6 次評価報告書 (AR6) で、「人間の影響が大気、海洋及び陸域を温暖化させてきたことには疑う余地がない」という強い表現で人間活動の気候への影響が断言されたことは、メディアでも盛んに報じられた [1]。温暖化が人間活動によるものと断定されことを受け、科学的理解の増進に加え、温暖化への対策立案に資するデータの創出が気候モデルの大きな役割として注目されてきている。

こうした状況のもと、気候モデルを高解像度化し、今後避けられない温暖化に社会が適応するための政策（適応策）立案に資するよう、地域ごとに詳細な情報を発信する動きが盛んになってきている [27]。この場合、全球を対象とした気候モデルでは計算機資源の面から高解像度化に限界があり、最も高解像度のモデルでも格子間隔 20km 程度である。この解像度では、細かな地形の影響を受ける降水分布などについて、精度の高い再現性が望めないため、日本周辺など特定の領域を対象とした領域モデルが用いられることが多い。ただし、対象領域周辺に関する情報（境界条件）は全球モデルによる予測結果から与える必要があるため、全球モデルと領域モデル両方の再現性や予測精度を向上させていく必要がある。

このように、全球モデルで得られた予測データの一部を境界条件として領域モデルに与え、対象領域に関する予測データを高解像度化する手法を、力学的ダウンスケーリングと呼ぶ（他に、統計的なモデルを用いて高解像度化を行う統計的ダウンスケーリングという手法もある）。実際、温暖化の影響評価のため

に作成されたデータセット d4PDF[28] では、力学的ダウンスケーリングとアンサンブル実験によって大規模なデータセットを作成し、様々な分野での影響評価に役立っている [29]。

領域ごとの詳細な情報提供は、日本だけでなく世界的にも大きな趨勢になっている。例えば、前出の IPCC AR6(WGI) では、地域的な空間規模における温暖化予測について、全体 12 章のうち 3 章が充てられ、全球規模変化との関連、台風などの極端現象の変化、災害影響などについて評価がなされている。

また、将来予測だけでなく、現在発生している異常高温や集中豪雨に関し、温暖化がどの程度寄与しているかを評価する、「イベント・アトリビューション」と呼ばれる研究も盛んになってきている。例えば今田ら [30] は、2018 年に発生した日本の猛暑は、温暖化の寄与がなければほぼあり得ないレベルの高温であったことを明らかにしている。国際的にも、アメリカ気象学会誌 (BAMS) が毎年 1 回イベント・アトリビューションの特集を組むことにするなど、この種の研究の発展は著しい。極端現象発生に対する温暖化の寄与の評価は、適応策を立案するうえでも重要な情報となる。

一方、適応策だけではなく、温暖化の進行そのものを止める緩和抑制策の立案にも、気候モデルによる予測は貢献している。こうした場合、二酸化炭素の「大気中濃度」ではなく、人間活動による排出量を直接入力データとして与えられるよう、気候モデルに生態系の働きなどを組み入れた地球システムモデル (ESM) が用いられることが多い。ESM を用いた研究を通した緩和抑制策への貢献として代表的な成果の一つに、人間活動で排出された CO₂ の累積量と、その時点までの昇温とのよい比例関係を示したことがあげられる [31]。このときの比例定数は「排出に対する過渡気候応答」(TCRE) と呼ばれる。国際交渉でしばしば言及される 2°C 目標や、2015 年に締結されたパリ協定で強調された 1.5°C 目標の達成のために、今後の排出量をどの程度にとどめておくべきか、その上限を決定する因子の一つである。TCRE 等に基づいて評価された今後の二酸化炭素排出許容量はカーボンバジェット (CB) と呼ばれる。また特に、CB の総量から現在までの排出量を差し引いた値を残余 (remaining) カーボンバジェット (RCB) と呼び、今後の排出削減を検討するうえで決定的に重要な量となる。

上述の AR6 では、1.5°C 目標達成のための RCB は、産業革命以前からの累積値で 500GtCO₂ と見積もられている。これは現在の年間の人為起源二酸化炭素排出量約 40GtCO₂ の 10 数年分ほどの量にあたる。世界各国が協調して取り組み、直線的に排出を削減して 2050 年までに排出ゼロを達成すれば、それまでの排出量は 1.5°C に対応する RCB とほぼ等しくなる。このことが、日本を含むいくつかの国が宣言している 2050 年カーボンニュートラルの背景になっていると見られ、ESM が社会的に有用な情報を提供しうる一つの例証と言えよう。他に ESM による研究から社会に発信できる可能性のある情報として、様々な社会経済シナリオに付随する土地利用変化の気候影響評価、温室効果気体の年々変動の収支の精確な把握、などが考えられる。

学術的・技術的課題、目標

・ 気候モデル・ESM による 10 年規模予測

近年、季節予報の手法をより長い時間スケールに応用し 10 年規模の予測情報を社会に発信するための研究が盛んにおこなわれている [32]。気象予報用のモデルのみならず、気候変動予測用のモデルをこうした時間スケールへ適用する試みも活発になってきている [33]。さらに、同様の手法を ESM にも応用した、炭素循環 10 年規模予測の研究も各国研究機関が取り組みを始めた。炭素循環 10 年規模予測システ

ムは、今後進むであろう CO₂ 排出削減努力の可視化などに有効となることが期待できる。炭素以外の物質循環にも同様の手法を拡張することで、種々の温室効果気体の年々変動の収支の精確な把握にも寄与することが可能であろう。

・ 適応データセット高解像度化

文部科学省、気象庁、環境省などが協力して、適応策立案のための予測データセットを 2022 年度までに整備し、以降、概ね 5 年毎に更新するという方針が気候変動適応法に基づき打ち立てられている。2022 年公表予定の「データセット 2022」*¹⁰では、既出の d4PDF を基盤としてデータ配信システムなどの整備が図られる見込みであるが、その後の更新ではさらなる解像度の向上や、まれな極端事象の発生も捉えるためのアンサンブル数の増強、現状では緒に就いたばかりの海洋の予測データの拡充などが望まれる。

・ 複合問題としての地球環境問題

ESM では、温室効果気体の排出による気候変化のみならず、二酸化炭素の海洋吸収による海洋酸性化、農作物や生物燃料栽培、あるいは都市化に伴う土地利用変化の環境影響など、様々な問題を包括的に取り扱うことができる。一方で、こうした問題は伝統的な気候科学の範疇では取り扱えず、農学や社会経済など多様な分野の研究者との協働が必要とされる。さらに、社会問題としての地球環境問題に対処するためには一般社会における利害関係者の意見も聞きながら問題設定を行う必要がある。専門性を高め取り扱う問題を厳密に定義することで知見を集積し発展してきた従来型の科学とは異なるアプローチが必要になる。こうした状況に対し、社会経済分野で発達してきた統合評価モデル（将来想定シナリオの策定などに用いられる）と、ESM とを結合した地球システム-社会経済結合モデルを開発することで、有用なツールを提供できる。完成したツールを通じ、多様な分野、セクターを巻き込んだコミュニケーションを促進して、連携を深めることが可能になる。

年代 課題	2022 ～	2024 ～	2026 ～	2028 ～	2030 ～	2032 ～
全球気候 シミュレーショ ン	適応データ セット公開	適応データ セット公開更 新用モデル 高解像度化	適応データ セット創出、 公開	次期適応データセット仕様検討、モデル開発		
	気候モデル・ システム開発	ESMによる10年規模予測シ		気候モデル・ESMによる10年規模予測シ		
				システム実験		
	地球システム・社会経済結合	モデル開発		地球システム・社会経済結合モデル開発		

図 3.2 気象・気候分野、全球気候シミュレーションのロードマップ

目標達成に向けて必要な取り組み

・ 気候モデル・ESM 精度向上

気候モデル・ESM 開発の今後の大きな方向性として、高解像度化、アンサンブル数増大、多くのプロ

*¹⁰ 既に公開済: <https://diasjp.net/ds2022/> (2023 年 1 月 28 日時点)

セスを取り込む複雑化の3つが挙げられる。高解像度化は、細かな空間スケールでの大気の大気対流活動や地形の変化が重要な役割を果たす降雨過程などについて、モデルの再現性を向上させるために必須である。全球の気候変動予測に用いられるモデルは、計算期間の長さや空間規模の大きさがネックとなり水平解像度は100km前後のものが多い。今後、理想的には、大気側では、日本周辺の気象もある程度詳しく再現できる20km、海洋側では中規模渦の再現が可能な10km程度の解像度で予測を行うことが望ましい。また、100年や1,000年に一度と言った、非常にまれな集中豪雨、熱波、渇水の発生確率の変化を検出するためには、従来高々100程度が普通であったアンサンブル数を1桁は増やす必要がある。

さらに、対流圏オゾンや各種エアロゾルなど、大気中の滞留時間は短いものの放射収支に有意な影響を与える短寿命気候強制因子(SLCF)の取り扱いには、大気中の化学反応などについて、これまでモデルに含まれていなかったプロセスも導入する必要がある(3.1.2.2節参照)。これらの方向性はいずれも計算負荷の増大を伴うことになるため、今後大型計算機の性能が順調に向上することがこの分野の発展にとって決定的に重要である。

・ 計算機の発展とモデルの高度化に伴うプログラムコードの複雑化への対応

GPU等の高速化技術を活用するためには、ESMのプログラムコードを書き換える必要がある。また、上述の通りモデルの高度化のため多くのプロセスが加わる傾向にあり、これらが相まってプログラムコードが著しく複雑化してきている。バージョン管理ツールなどのソフトウェア導入で対応を図ってはいるが、コードに初めて触れる若手研究者などに対する障壁となる可能性がある。プログラム構造を容易に把握できるツールの開発など、モデル開発環境の一層の整備が望まれる。

アプリケーションと計算量・計算資源

アプリケーション

- モデル名：MIROC (Model for Interdisciplinary Research on Climate) [34]
- 力学コア：スペクトル法
- 格子点数：大気 1.7×10^7 (水平解像度約 60km, 鉛直層数 81), 海洋 1.2×10^8 (水平解像度約 30km, 鉛直層数 63)
- 演算量：800 PFLOP (1年積分あたり)
- メモリ使用量：1,000 GB
- 出力データ量：400 GB (1年積分あたり)
- 要求 B/F：2.5 (大気), 3.5 (海洋)

実験規模 (一例)

- 積分年数：250年 (ヒストリカル + 21世紀予測; 1850~2100年)
- アンサンブル数：100程度
- 想定実行時間：3カ月
- 総演算量： $20\text{ZFLOP} = 800\text{PFLOP} \times 250 \times 100$

- 総ファイル出力量：10PB = 400GB × 250 × 100

計算資源

- 総演算量：システム全体で約 1.7 EFLOPS (システムの全ノードの 5% を使用し (数カ月の実験実施中にジョブの待ち時間があまり発生しないようにするため)、理論ピーク性能の 3% の実行性能を仮定。)

参考文献： 研究開発戦略センター (2019) 研究開発の俯瞰報告書 環境・エネルギー分野^{*11}

(気候モデリング分野でのトレンドや将来的な方向性について概説されており、本文中で直接の引用はないが、本稿執筆者が作成に協力している。本稿の執筆にあたり参照した。)

3.1.1.3 領域気候予測

背景

毎年、世界各地で台風や大雨、高温などによる気象災害が毎年のように発生している。国内だけみても、例えば、令和 2 年 (2020 年) 7 月豪雨に伴う日本各地での河川の氾濫、2021 年 7 月の東海地方・関東地方南部を中心とした大雨に伴う熱海での土砂災害、2018 年 7 月猛暑に伴う熱中症患者の発生などがある。ここ数年は、大雨や台風、高温などの気象災害による人的・社会的被害は毎年どこかの地域で発生しており、これらの災害への備えは喫緊の課題となっている。これらの気象イベントの一部の発生には、イベント・アトリビューションによって地球温暖化の影響が無視できないことが報告されている [30]。地球温暖化に伴う気候変動の地域気候への影響は、将来に懸念される事象ではなく、すでに実際の影響として顕在化しつつある。今後も続くと予測される気候変動に対し、原因となる温室効果ガス排出量削減といった地球温暖化の緩和への取り組みとともに、気候変動への適応も進めていく必要がある。2020 年には気候変動適応法が施行され、自治体ごとに気候変動への適応を推進するための拠点 (地域気候変動適応センター、LCCAC) の設置が努力目標となった。LCCAC は、2023 年 1 月時点で 54 の自治体に設置済みである^{*12}。

領域気候に関する研究は、従来、地域特有の気象・気候現象の理解を目的に、観測、理論、数値計算を用いて行う研究の総称と言えるが、ここ 10 年ほどは、将来の領域気候予測のための研究に人的リソースと計算リソースの多くを投入している。これは、上記でも述べた通り、気候変化への地域スケールでの影響評価や適応策の検討への需要が高まっているためである。これまでの 10 年は、気候学者や影響評価研究者の間で、地域気候の将来予測とそれに伴う農業等への影響の評価に関する研究がメインであったが、今後 10 年は、よりステークホルダーとの連携を深め、具体的な施策への貢献が求められるようになると推測される。より一層、気候研究者、影響評価研究者、自治体職員、民間企業、市民が一体となって、気候変動対策に取り組んでいくようになるであろう。さらには、得られた将来予測や影響評価をどのように施策に反映させるかなど、社会学系の研究者とも連携していくことも重要である。

^{*11} <https://www.jst.go.jp/crds/report/CRDS-FY2018-FR-01.html> (2022 年 5 月 4 日閲覧)

^{*12} A-PLAT; <https://adaptation-platform.nies.go.jp/local/lccac/list.html>

学術的・技術的課題、目標

地域の空間詳細な気候情報の見積もりには、力学的ダウンスケールという手法が使われる。全球気候モデルで計算された空間解像度の粗い気候情報を、高解像度の領域モデルを用いて、空間解像度を高める手法である。ただし、単に粗い解像度のデータを細かくするだけでなく、空間詳細な地形や土地利用をモデル内で表現することで、全球モデルでは表現できなかった地形性の降水や詳細な気温分布などの付加価値 (Added value) が加わることも利点の一つである。力学的ダウンスケールの他に、粗い気候情報と観測データとの関係から構築した統計モデルを用いて、空間解像度の高い気象データを見積もる統計的ダウンスケールという手法もある。統計的ダウンスケールは、力学的ダウンスケールに比べて、計算リソースが小さく、大型計算機を使用することは稀であるため、以下では、力学的ダウンスケールについて述べる。

力学的ダウンスケールによる気候変動適応策のための気候予測と、予測に基づく影響評価を行う上で課題となるのが、(1) 気候予測情報の時空間解像度の向上と (2) 予測結果に含まれる不確実性への対応である。まず、時空間解像度のうち、地域の気候はその地域が位置する気候帯だけでなく、海からの距離や標高といった地形や土地利用の影響も受けるため、それらの地域特性をある程度再現可能な空間解像度が必要である。必要な空間解像度は評価対象によって異なるが、数 km 程度あれば、大雨や豪雨などの降水イベントや地域の気温分布、局地循環などをある程度精度良く再現できると言われている。一方、気候データを農業や生態系などの影響評価に利用する場合には、さらに細かな数 100m 以下の空間解像度や、街区内の熱環境評価となると、さらに 1 オーダー小さい 100m 以下の解像度が求められることがある。しかしながら、数 100m 以下の空間解像度の計算においては、計算リソース以外にも、課題は多い。気象気候モデルの高解像度化のための学術的課題については、他の節に詳しい記載があるため (3.1.1.1 節等) ここでは詳しく述べないが、一般的には高解像度化により、地形を含む地表面状態や乱流、積雲対流の表現の向上などが期待される。一方で、それらの表現向上による、領域気候のパフォーマンスへの影響については、十分な知見が得られていない。また、現在使われている数値スキームが、どの解像度まで適用可能であるかについても、検討すべき課題が残っている。次の 5~10 年でターゲットとなる $O(100m)$ の空間スケールにおけるモデルパフォーマンスへの影響とスキームの検討については、早急に進めていく必要がある。一方で、影響評価や適応策検討をする際に、本当に現在よりも 1 オーダー 2 オーダー小さい解像度の気候情報が必要かどうか、という観点での検証も同時に必要である。時間解像度については、一般的に、必要とされる時間解像度よりも、モデルの計算間隔の方が十分に短いため、出力間隔の調整が可能であり、あまり問題になることはない。ただし、影響評価者や適応策を検討する自治体研究者は、大規模データの取り扱いの経験が少ないことも多く、アスキーデータでの受け渡しを望むことも多い。ユーザー側が大規模データの取り扱いに不慣れでも、必要な地域のデータが入手可能なシステムの導入などが必要と考えられる。

力学的ダウンスケールは、温室効果ガス排出量や土地利用などの社会経済シナリオ、境界値データを提供する全球気候モデルのモデルエラー、そして、力学的ダウンスケールに使用する領域気候モデルのモデルエラーなどの不確実性の影響を受ける [35, 36]。不確実性は、予測を行う過程の中でカスケードし、一般に、予測過程の下流になるほど、不確実性は大きくなると考えられる [35]。地域スケールでの影響評価は、予測過程の中でも下流にあたるため、不確実性の影響が避けられない。このため、予測の幅 (不確実性) や極値など出現率の低い現象においてはその発生確率を統計的に示すことなどにより、予測結果に対する信頼性情報を提供することも、予測と同様に重要である。予測の幅の見積もりには、親モデル (全球気

候モデル)や物理スキームなどの計算条件を変えたアンサンブル実験が、極値の予測には、サンプル数を増やす目的でのアンサンブル実験が有効である。

領域気候予測の精度向上のためには、高解像度化とアンサンブル数の増加のどちらも重要であるが、どちらにどれくらい計算リソースを投入するかは、使用可能な計算リソースから逆算して決定しているのが現状である。確率的予測のための大規模領域気候アンサンブル実験として、全球 d4PDF (水平解像度 60km) を力学的ダウンスケールした領域 d4PDF 実験 (水平解像度 20km) が実施されている [28, 29]。現在 (2022 年度) 実施中の、日本全域を対象とした領域 d4PDF からの更なるダウンスケールのうち、解像度が高く最もアンサンブル数が多いものは、水平格子サイズ 5km、アンサンブル数は約 1500 年分である。次の 5 年では、全球結合モデルによる新たな d4PDF 結果を基に、日本全国を水平格子サイズ 5km で 3000 年、2km で 500 年積分、及び、1km 解像度での気候計算 (数十年程度) が目標である。気候モデルの格子サイズが 1km 程度になると、モデルで表現される地表面状態や地形の表現が向上し、気温や地形性降水、積雪の再現性向上などが期待される。また、さらに 5 年先の目標である $O(100m)$ の格子サイズで LES 計算が可能となれば、乱流や雲の表現の改善によりモデルパフォーマンスの向上が期待されるが、この点については、次の 5 年の間に解析をすすめ、把握しておく必要がある。

将来の領域気候情報は、河川モデルや農業モデルなどの入力値として使用され、降水による災害リスクや農作物の生育など、各方面への影響の見積りが行われる [27, 37, 38]。これまでに、農業分野や水文分野などで、多数の影響評価研究が実施されており、今後は、他分野にもさらに広がると推測される。例えば、夏季の熱中症対策として、高解像度数値流体力学 (computational fluid dynamics; CFD) モデルや建物解像大渦解像 (LES) モデルを用いた都市域の熱環境評価 [39] は、研究段階から実用段階へとシフトしつつある。これらのモデルは主に、建築分野などの工学分野で発展してきたモデルであり、気象モデルと建物解像モデルの融合も、今後、研究が進展していくことが期待される。

年代 課題	2022 ~	2024 ~	2026 ~	2028 ~	2030 ~	2032 ~
領域気候予測	$O(10^3m)$ でアンサンブル気候計算					$O(10^2m)$ でアンサンブル気候計算
			$O(10^2m)$ で気候実験			
	$O(10^2m)$ で現在気候再現実験					

図 3.3 気象・気候分野、領域気候予測のロードマップ

必要な計算手法

高解像度シミュレーションについては、気象計算のように短時間の積分期間でよいものについては計算機の規模に合わせて実現可能な最高解像度を選択 (ケイパビティ・コンピューティング) すればよいが、気候計算では統計情報を得るための長期積分 (多くの場合、30 年程度が基準。アンサンブル計算ではそれを複数本実施する) が必要であるため、現実的な実時間内に計算を実行するためには、実現可能な最高解像度よりも解像度を落としたり、積分期間を複数個に分けて並行して実施 (キャパシティー・コンピューティング) したりする必要がある。実際には、その両方を適用することが多い。また、不確実性の問題に対して有効な気候アンサンブルを実施する際にも、キャパシティー・コンピューティング的な使用がメイ

ンとなる。

一般的に、計算量は格子サイズ比の3~4乗で増加する。よって、現在行なっている実験の格子サイズを1/3にすると計算量は27~81倍、格子サイズを1/10にすると計算量は1,000倍以上となる。増えた計算量は、計算機性能の向上と並列数の増加、アプリ側の高速化でカバーする必要がある。

領域気候モデルにおいては、ノード間通信は隣接通信が主であり、一般に week scale 性能は高い。従って、高解像度化に伴う計算量増加の対策として、使用ノード数を増やすことが有効である。そのためには、現状のほとんどの領域気候モデルで採用されている水平2次元のプロセス空間分割を鉛直方向も含めた3次元分割に拡張するなどが考えられる。また、現状における力学過程計算部分のボトルネックはメモリバンド幅であるが、将来の計算機のB/F比はより小さくなることが予想されるため、計算機の効率的利用のためにはB/F比を下げるアルゴリズムの検討が課題である。

アプリケーションと計算量・計算資源

アプリケーション

- モデル名：SCALE(Scalable Computing for Advanced Library and Environment)[40, 41]
- 力学コア：3次元完全圧縮非静力学方程式系、有限体積法

計算量・計算資源

- 問題規模：日本全域、1km
 - － 格子点数：2750 × 3775
 - － 鉛直層数：60層
 - － 積分時間：60年（現在、将来2度上昇、将来4度上昇）
 - － アンサンブル数：各30メンバー
 - － ステップ数：3億回
- 総メモリ数：2TB
- 総演算量：780ZFLOP
- 実行時間：1ケース当たり6時間
- アプリケーションB/F比（演算密度の逆数）：0.8
- 総メモリ転送量：610ZB
 - － 要求メモリ転送性能：315PB/s
- 総ストレージ使用量：2150PB（20変数を1時間毎に出力）
 - － 要求ファイルIO性能：4TB/s

3.1.1.4 数値天気予報

背景

数値天気予報では、大気（天気）のシミュレーション計算を、現在の大気状態に基づいて未来に向かっ

て行い、その未来の状態を客観的に予測する。毎日の暮らしを支える天気予報や防災気象情報は数値天気予報の予測計算結果をもとに発表されている。これらの情報に基づいた防災・減災行動を求めるためには予測に対する信頼性を担保する必要がある、そのために不断の努力が為されている。このように国民生活の基盤となる情報であることから、数値天気予報は気象学による知見の最終的な出口と言って良く、実験や観測あるいは理論的考察からシミュレーションモデルへの実装に至る研究は、数値天気予報システムの精度向上を支えている。

最初の数値天気予報は Richardson (1922)[42] の手動計算によって試みられ、大型計算機の開発とともに栄光の道を歩み始めた [43]。ただし Richardson (1922) は初期値を観測データの内挿によって作成したためノイズを含み、かつ方程式系にこのノイズをダンプするスキームが備わっていないために非現実的な予測を算出するに至り、Charney et al. (1950)[43] はバロトロピックモデルを採用することで大気重力波をダンプすることに成功したものの、そもそもノイズを含まない初期値を作成する客観解析の必要性を訴えた。このように数値天気予報の精度はシミュレーションモデルとその初期値を提供する客観解析の二つの精度に依存している。

気象庁は 1959 年に世界で 3 番目に大型計算機を用いた数値天気予報を開始し [44]、同年の伊勢湾台風の予測にも用いられた [45]。現在では気象庁のスーパーコンピュータシステムは第 10 世代数値解析予報システム（理論性能 18.16PFlops）に進化し、全球モデル（GSM）、メソモデル（MSM）、全球アンサンブル予報システム（GEPS）、局地モデル（LFM）及びメソアンサンブル予報システム（MEPS）が運用されるとともに、水平解像度や鉛直層数の増強、アンサンブルメンバー数増強、物理過程等の計算手法の改良などにより数値天気予報システムの性能を向上させてきた [44]。

また、客観解析手法についても、世界の数値予報センターで広く利用されていた最適内挿法から 3 次元変分法及び 4 次元変分法などの高度なデータ同化手法への移行が進み、さらにアンサンブル情報を用いて背景誤差共分散行列の大気状態への依存性を考慮するハイブリッド手法の導入に至っている。変分法の導入に伴い、衛星による放射観測など予報変数ではない物理量の同化ができるようになり、これによる利用できる観測データの拡大も客観解析の精度向上に貢献してきた。

このように気象庁では、客観解析を含む数値予報システムの機能向上を継続的に実施し、システムを高精度化、複雑化させてきた。このような不断の努力により、現在の数値予報の 3 日予報の精度は 1980 年代の 1 日予報の精度で行えるまでに至っている。

現業機関である気象庁のシステムが高度化していることから、数値天気予報技術の発展のためには、その高性能なシステムを研究者へ提供し、ここへ研究者による最先端の技術を取り込むことでさらなる進化を図る Operation to Research (O2R)、Research to Operation (R2O) と呼ばれるサイクルの必要性が認識されてきている。

R2O の一例として、天気予報のために開発された気象モデルを極めて高い解像度に設定したシミュレーションが、特定事例の詳細解析やパラメタリゼーションの開発といった気象学の基礎研究として利用されている。例えば、甚大な被害をもたらした 2013 年大島豪雨や 2014 年広島豪雨について数 100m の水平解像度のシミュレーションを行い、従来の計算より現実的な極端降水が再現されている [46, 47]。また、台風の内部において突風をもたらす微細構造を明らかにしている [8]。高解像度化により、大気を計算機で扱うために必須な離散化に伴う誤差が低減できるため、極端気象などの再現に関して、より精緻な再現が可能になると期待できる。

さらに O2R、R2O 双方向に利益をもたらしている成功例として、アンサンブルシステムの開発がある。上の気象庁システムに挙げられているハイブリッド同化や MEPS に使用されているアンサンブルシステムは研究サイドの開発が現業に用いられた例であり、また、研究サイドで用いられているアンサンブルデータ同化システムには気象庁で開発されている気象モデルや観測データが利用されている。

本節では (A) 気象庁による高解像度の現業数値天気予報システム、及び、(B) 超高解像度シミュレーション研究、(C) アンサンブルデータ同化研究について述べる。

学術的・技術的課題、目標

近年、顕著な気象による自然災害が激甚化しており、今後更に災害が深刻化するおそれが懸念されることから、気象災害防止と軽減のため、数値予報精度向上はさらに強く求められている。このうち豪雨防災では「線状降水帯の発生・停滞の予測精度向上により、集中豪雨の可能性を高い確度で予測する。特に、明るいうちからの避難など、早期の警戒と避難を可能にする」との目標が掲げられている [48]。

(A) 気象庁数値天気予報システム

気象庁 (2018)[48] によれば、最も解像度の高い LFM でも線状降水帯を半日程度前から時間と場所を絞って予測することは依然困難であり予測の不確実性が高いこと、個々の積乱雲を表現するには水平 2km の格子間隔では解像度が不足していること、また高い解像度に適した物理過程が必要なこと、海上の水蒸気量や風についての初期状態の精度が不十分であることなどが課題として述べられている。これらの課題を解決し、上記豪雨防災目標を達成しうる現業数値予報システムを運用することが気象庁数値天気予報システムの目標となる。また、ここでは触れないが LFM に境界値を与える MSM、さらに MSM に境界値を与える GSM の精度向上も重要な課題である。さらに、数値天気予報が現在の大気状態を速やかに解析し、それを初期値として予測計算を行った結果をリアルタイムに活用するため、日々決められた時間までにこれらの計算を確実かつ速やかに行う必要があるという極めて重要な要件があることに留意が必要である。

(B) 超高解像度シミュレーション

超高解像度シミュレーションで用いる力学・物理過程等の多くの部分は、天気予報のために開発された気象モデルを大幅に変更することなく活用できる。ただし一部の過程は解像度に応じた変更が必要である。様々な過程のうち、より単純化する方向の変更が必要な過程（対流・乱流・力学など）とより複雑する方向の過程（放射・接地境界層など）の両者があり、それぞれの過程の適応策の研究開発が必要である。この研究開発自体のためにより高解像度のシミュレーションが必要になる場合がある。

(C) アンサンブルデータ同化システム

アンサンブルデータ同化システムは、気象庁が現業運用している 4 次元変分法 (4D-Var) データ同化システムと比べて開発が容易であるために、世界的にも研究コミュニティで広く用いられている。また、現業機関においても変分法データ同化システムとのハイブリッドシステムが普及しており、天気予報に欠かせない技術となってきた。

アンサンブル同化システムにおける本質的な課題はサンプリングエラーと誤差共分散行列におけるラン

ク不足の克服である。前者については概ね 1,000 メンバーのアンサンブルによって実用上は問題ないことが過去研究で示されている。例えば Duc et al. (2021)[49] は 1,000 メンバーによる線状降水帯アンサンブル予測を実行し、アンサンブル平均解析場を初期値とする決定論予測精度、確率予測ともに非常に良い結果が得られた。後者については、アンサンブル変分法 (EnVar) ではハイブリッドで対処可能であるが、アンサンブルカルマンフィルタ (EnKF) では有効な手法についてまだ研究段階にある。

サンプリングエラーに対して実用上、1,000 メンバーでは問題ないとしても、完全に無視できるレベルではなく、水平局所化と呼ばれる技術によって対応が必要である。また、ハイブリッド手法を用いずにリンク不足にならないアンサンブルサイズは同化する観測データ数と近いオーダーが必要である。従って、現業メソ同化システムと同等の性能をアンサンブルデータ同化システムが持つためには、およそ 10 万メンバーが必要と推定され、これがポスト富岳において目指したいサイズとなっている。

また、研究コミュニティで広く使われている EnKF では、現業変分法データ同化システムで使われる変分 BC (バイアス補正)、変分 QC (品質管理)、ノイズ抑制項などが自然に実装できず、まだまだ開発の余地がある。一方、EnVar においては摂動生成手法に工夫の余地が多く、研究段階にある。

今後 10 年程度の目標としては、現業で同化可能な観測データはすべて同化し、かつ現業より優れた精度を持つアンサンブル同化システムの開発である。同時に積乱雲や線状降水帯といった極端現象の予測には高解像度のシステムが必要であり、ここでは従来のデータ同化理論の基礎であるガウス仮定を超えて非ガウス性を導入していく必要がある。

年代 課題		2022 ～	2024 ～	2026 ～	2028 ～	2030 ～	2032 ～
気象予報	(A) 気象庁システム	1km狭領域 LFM試験運用 ハイブリッドデータ 同化導入	LFM 予報時間 延長	LFM 高解像度化 LEPS 運用開始	LFM改良 LEPS改良 アンサンブルデータ同化導入		
		様々な観測データの利用拡大・利用手法改良(断続的に実施)					
	(B) 超高解像度シミュレーション	水平解像度<100m級LESの利用			水平解像度<50m級LESの利用		
	(C) アンサンブルデータ同化	asuca-based EnVar, EnKFの開発(水平15km)		全現業データ同化(5km) 高解像度化(～1km)		非ガウス性10万メンバー同化	

図 3.4 気象・気候分野、数値天気予報のロードマップ

目標達成に向けて必要な取り組み

(A) 気象庁数値天気予報システム

気象庁 (2018)[48] によれば、LFM を 1km 以下に高解像度化すること、積乱雲に関する諸過程を改良すること、集中豪雨の予測が持つ不確実性を適切に補足可能なアンサンブル予報システムを開発すること、衛星、航空機、レーダー、船舶 GNSS、IoT 化した多様なセンサなど最新の様々な観測による時間的、空間的に高密度な観測ビッグデータを更に活用すること、衛星データについて全天候利用手法を開発する

こと、複数の手法を組み合わせた最先端の同化技術であるハイブリッド同化を導入すること、豪雨事例等のメカニズム研究による最新の科学的知見に基づく改良をすることなどが開発の方向性として述べられている。また、このような開発計画を実施していくためには、十分な能力を持つスーパーコンピュータや通信インフラを、継続的かつ計画的に確保していくことは必須であり、さらにそのインフラを有効に活用するため、プログラムの高速化（最適化）を実施することが必要とされている。

(B) 超高解像度シミュレーション

一般的にシミュレーションの計算精度は、解像度に従い向上することが期待される。しかし科学的に意義がある結果を得るために、計算コストが高くなってしまうため、高解像度化は必ずしも最善とは限らない。注目する現象の解像度依存性を把握しながら、適切なターゲットに対し超高解像度シミュレーションを戦略的に実行する必要がある。超高解像度の計算時に適したパラメタリゼーション等を確立させ、シミュレーションに実装する必要がある。また技術的な側面として、前処理やモデル本体も含めて、莫大な計算格子数による実行に様々な問題が生じうる。計算の実行および実行時の問題解決の円滑化も望まれる。

(C) アンサンブルデータ同化システム

現業システムと研究用システムの親和性を高めるために、気象庁メソモデル用の EnVar、EnKF の開発が必要である。新開発のシステムを用いて、衛星輝度温度、レーダー反射強度など全現業データ同化など、現行の研究用同化システムである NHM-LETKF で同化できない観測データ同化に取り組む。また、同時に 1,000 を超える大アンサンブル計算を行いつつ、高解像度化を図り、最終的に 10 万メンバー同化を目指す。さらに非ガウス性導入を行い、強非線形な積乱雲や線状降水帯といった顕著現象の予測を実現する。

アプリケーションと計算量・計算資源

(A) 気象庁数値天気予報システム

ここでは、気象庁の数値天気予報で最も高解像度で予測を行う局地数値予報システムの 2022 年 7 月現在の仕様について述べる。局地数値予報システムは、初期値を作成する局地解析 LA と局地モデル LFM により構成されている。LA では、MSM の予測値を対一推定値として対象時刻の前 3 時間を 1 時間毎に、様々な観測データの同化と予測計算を繰り返す手法を用いて対象時刻の初期値解析を行っている。観測データの同化は asuca-Var を用い、MEPS により出力される予報値を元に計算した流れ依存背景誤差を利用するハイブリッド 3 次元変分法により行っている [50]。なお LA におけるデータ同化は 5km の水平解像度で実施している。LFM では水平解像度 2km、鉛直 76 層の非静力学領域モデル asuca により 10 時間予報を実施している。この LA と LFM による計算を 1 日 24 回（毎正時）実施し、その結果は防災気象情報や航空気象情報、降水短時間予報等の作成支援に役立てられている。asuca 及び asuca-Var の詳細については気象庁予報部 (2014)[51] を参照願いたい。なお、LFM の側面境界値は解像度 5km の MSM により与えられており、さらに MSM の側面境界値は解像度 20km の GSM により与えられている。これらの親モデルの精度向上も LFM の精度向上に大きく影響する。

将来的には LFM の予報時間延長と、高解像度化及び LFM をベースとしたアンサンブル予報システムである局地アンサンブル予報システム LEPS の運用を実施する予定である。LEPS のメンバー数についてはリアルタイム運用可能な計算資源の制約により決定される。また、LA については、データ同化手法自体にアンサンブル手法 (EDA) を導入することも今後の検討課題である。将来的には入力する観測データ量についても、静止気象衛星の赤外サウンダのデータが入ることなどで大幅に増加すると考えられる。

○ 現行 LFM の仕様

- － 水平解像度 2km、水平 1581×1301 格子、鉛直 76 層（～21.8km）、積分時間間隔 12 秒
- － 約 1,000 秒で 10 時間予測を実施（現行気象庁スパコンシステム（CrayXC50）138 ノード）
※ 1 時間（300 ステップあたり）約 100 秒（1 ステップあたり 0.3～0.4 秒）
XC50 の演算性能はノード当たり約 3.2TFlops
- － 入力データ量：初期値 0.6GB+ 境界値 0.6GB× 予報時間
- － 1 時間当たりの出力データ量：約 1.2GB（12GB/10 時間予測）

● 将来 LFM の仕様想定

- － 水平解像度 1km、水平 3161×2601 格子、鉛直 76 層（～21.8km）、積分時間間隔 6 秒
- － 約 1,000 秒で 18 時間予測を実施
- － 入力データ量※：初期値 0.6GB+ 境界値 0.6GB× 予報時間
※初期値解析の解像度や親モデルの解像度が現状維持だった場合
- － 1 時間当たりの出力データ量：5GB（90GB/18 時間予測）

● 将来 LEPS の仕様想定

LFM（1km）をメンバー数 100 で実施すると想定した場合。

なお個々のメンバーの仕様は上記将来の LFM の仕様想定に準拠する。

出力データ量はトータルで 9PB/18 時間予測（90GB/18 時間予報 ×100）と推定できる。

※実際にはリアルタイム運用できる計算機資源の規模により解像度及びメンバー数の想定は変わってくる。

● 現行 LA（ハイブリッド LA）における asuca-Var の仕様

- － 水平解像度（インナーモデル）5km、水平 633×521 格子、鉛直 48 層
- － 約 60 秒でデータ同化を実施（現行気象庁スパコンシステム（CrayXC50）120 ノード）
- － 入力データ量 350GB
- － 出力データ量 0.6GB
※出力データ量はアウターモデル (LFM) 解像度準拠

● 将来の LA における asuca-Var の仕様想定（50 メンバー EDA）

- － 水平解像度（インナーモデル）5km、水平 633×521 格子、鉛直 48 層、50 メンバー
- － 約 60 秒でデータ同化を実施
- － 入力データ量 370GB
※衛星観測データ量については、現行で最大 50MB×4 時間=200MB 程度である。
100 倍程度と見積もることで 20GB と想定する。
- － 出力データ量 120GB

※出力データ量はアウターモデル (LFM) 解像度準拠、
 $0.6\text{GB} \times 4$ (アウターモデル水平解像度 2 倍 (1km 化)) = $2.4\text{GB} \times 50$ メンバー

(B) 超高解像度シミュレーション

高解像度のシミュレーションのために高い解像度を設定しながら、広い計算領域をカバーするためには膨大な格子数が必要になる。その一方、計算時間に関する制限は厳しくない。実現できる計算規模は、直接的にはメモリやストレージによって制約される。

気象シミュレーションでは鉛直方向の成層を表現するため、従来、鉛直方向には比較的高い解像度を設定されている。水平解像度が 100m 程度に達するまでは鉛直解像度は大幅に増加させなくても合理的であった。しかし、水平解像度が 100 m を切ると鉛直解像度も水平解像度に比例させ向上させる必要がある。これは将来 LES の仕様を想定する場合は考慮しなければならない。

○ 現行 LES の仕様

- － 水平解像度 100m、水平 20,000 × 20,000 格子、鉛直 60 層 (～23km)、積分時間間隔 0.8 秒、計算時間 20 時間で 4 時間分の計算が進行 (富岳 2,000 ノード)
- － メモリ使用量：60TB
- － 入力データ量：初期値 1TB (リスタートの場合 17TB)
- － 1 計算当たりの出力データ量：1TB (1 時間毎の計算結果) + 17TB (リスタート用)

● 将来 LES の仕様想定

- － 水平解像度 33m、水平 50,000 × 50,000 格子、鉛直 200 層 (～21.8km)、積分時間間隔 0.1 秒
- － メモリ使用量：1.5PB
- － 入力データ量：初期値 18TB (リスタートの場合 300TB)
- － 1 計算あたりの出力データ量：27TB (1 時間毎の計算結果) + 300TB (リスタート用)

(C) アンサンブルデータ同化

大アンサンブルデータ同化では、現在、数年前まで気象庁で現業モデルとして使用されていた NHM と組み合わせて、EnKF の一種である LETKF を富岳で運用している。アンサンブルサイズは 1,000、同化システムの水平解像度は 15km で、5km 解像度の NHM をアンサンブルシミュレーションに用いている。アンサンブルサイズは 1,000 で、計算領域は気象庁メソ解析と同じ、同化ウィンドウは 3 時間である。

このスペックで 4 日間に対して計算した場合の計算資源を図 3.5 に示した。今後、高解像度化によって 1,000 倍程度、メンバー数増加によって 100 倍程度の計算資源増加が見込まれている。グランドチャレンジによって試みたい。

3.1.2 気象・気候モデルにおける物理コンポーネントの精緻化

3.1.2.1 大気モデルの物理プロセス (雲・放射・雷コンポーネント)

背景

近年、計算機の性能の向上によって、気象・気候モデルは高度化・精緻化が劇的に進んでいる。具体的

	モデル名 (略称)	モデル名	文献	計算手法	問題規模	総演算量	要求演算性能	想定ノード数	メモリ使用量
(A) 将来LFM	asuca	Asuca is a System based on a Unified Concept for Atmosphere	気象庁予報部 (2014)	有限体積法完全圧縮非静力学モデル	水平解像度1km、水平3161×2601格子、鉛直76層、積分時間間隔6秒、18時間予報、毎時	6.4EFlop /Member 毎日毎時実行	6.4PFlops /Member	2070ノード /Member	
(B) 将来LES	asuca-LES	Large eddy simulation by asuca	Ito et al. (2017)	有限体積法完全圧縮非静力学モデル	水平解像度30m、水平50000×50000格子、鉛直200層、積分時間間隔0.1秒、ステップ数500万	2.3ZFlops			1.5PB
(C) アンサンブルデータ同化	NHM-LETKF	Nohydrostatic Model initialized by Local Ensemble Transform Kalman Filter	Duc et al. (2021)	NHM: 完全圧縮非静力学モデル、雲物理過程、Mellor-Yamada Level2.5 LETKF: 局所アンサンブルカルマンフィルタ	NHM: 格子サイズ 5km、格子数 817x661x50、ステップ数 5760、アンサンブル数 1000、実行期間 4日 LETKF: 格子サイズ 15km、格子数 273x221x40、水平局所化半径 700km、鉛直局所化なし、5日間で20回	NHM: 172800 EFLOP LETKF: 388800 EFLOP		NHM: 10000 ノード LETKF: 1000 ノード	NHM: 320TB/cycle LETKF: 32TB/cycle

図 3.5 各実験の計算設定と計算量

には、気象・気候モデルは2つの方向での高度化・精緻化を続けている。1つ目は対象とする領域を覆うメッシュが細くなる「高解像度化」、2つ目は「物理プロセスの精緻化」であり、従来の気象・気候モデルでは計算資源の制約から考慮に入れることができなかった物理過程を取り入れた計算がその代表的な例である。精緻化に関しては、高解像度化などが進むにつれて、従来の手法の適応限界を超えるため、新たに物理モデルを開発するといった精緻化も含まれる。なお、気象・気候モデルの物理プロセスとは、図 2.1 に示される気象・気候モデルで考慮されるプロセスのうち、「大気の流れ」と表記されたプロセス以外のプロセスのことを指す。

このような高度化は、IPCC 第6次評価報告書 [1] をはじめとして報告されている「気候予測の不確実性の低減」、日々の天気予報をはじめとする「気象予測の予測精度の向上」、「気象予測においてこれまで提供されてこなかった新たな付加価値の提供」といった社会的な要請に応える形で進められてきた背景がある。また前回のロードマップが作成された2010年代前半以降は、雲一つ一つを表現した計算が可能になったことで、気象予測の精度が向上するとともに、これらの高解像度な計算は衛星観測アルゴリズムの性能向上に大きく貢献してきた。

しかしながら、高度化が進んでもなお、雲の中の微物理特性に関する数値モデルの不確実性（特に氷を含んだ雲粒の微物理特性に関する不確実性）が高いのが現状であり [52]、この部分の高度化が気候予測・気象予測・さらには観測アルゴリズムの高度化のために求められている。また同時に、富岳をはじめとした現在の最先端の計算機によって開発が進み、2030年ごろに汎用的な利用や、実用化が見込まれるようになってきた技術もある。

モデルの開発・高度化は防災や気候変動への対応の基盤となる技術であり、モデルの高度化なくしては、気象に関連した自然災害や気候変動に対する適応策や緩和策を立てることは困難である。それらの2030年頃に向けたモデルの高度化・技術の実用化につなげるために取り組むべき課題について本章で記載する。なお、1つ目の項目である「高解像度化」については3.1.1.1節や3.1.1.4節にその説明を譲るとして、本節では2つ目の物理プロセスの精緻化と2031年前後までに実現が可能と見込まれ、現時点で取

り組むべき点について記述する。物理プロセスの高度化という観点では、図 2.1 の全ての物理プロセスに対して高度化が進むことが考えられる。エーロゾルや大気化学に関しては 3.1.2.2 節、海洋モデルに関しては 3.1.2.3 節、陸面モデルに関しては 3.1.1.3 節で議論されており、本節では、これら以外で高度化が必要と考えられる物理プロセス（具体的には、雲・大気放射・雷）について議論する。

学術的・技術的課題、目標

気象・気候モデルの高解像度化がさらに進み、従来の手法の適応限界を超えてしまう可能性が高く、気象・気候モデルのコミュニティが解決しなければならない課題を抱えているのは、図 2.1 の大気境界層と書かれる「乱流過程」と「放射過程」である。また雲・降水に関連して、上記で述べたように「雲の中に含まれる氷の微物理過程の高度化」が必要である。

乱流過程の計算については、気象・気候モデルにおいて広く用いられているレイノルズ平均モデル（RANS モデル）はメッシュが 1km を切るような高解像度の計算に用いることは適切ではない。2030 年に最先端の計算機を用いた計算は、ラージ・エディ・シミュレーション（LES）モデルでの計算が一般的になると考えられ、LES モデルを用いた計算を積み重ねる必要がある。これについては 3.1.1.1 節に説明がされている。

放射過程に関しては、気象・気候モデルにおいて広く用いられている放射伝達モデルは、平行平面大気を仮定して、光の伝達方向を上下方向のみに近似する 2 流近似を用いているものが多いが、これらの仮定はモデルの水平格子幅が十分に大きい場合には良い仮定であったが、LES モデルで計算をすることが適切な高解像度（メッシュの幅が数 10m～数 100m）の計算においては、斜めに光が入る効果を考慮せねばならず、仮定が崩れる。この問題に対応するために、3 次元的に放射伝達を計算する 3 次元放射伝達モデルの開発が必要であるが、気象モデルと結合した形で 3 次元放射伝達モデルの開発を進め、この問題に対応する取り組みをしている国は、世界的にみても欧州の一部の国を除いて存在しない。そのため、この対応を世界に先駆けてできれば、日本が世界をリードできる可能性がある。

また、現状の気象モデルでの雲粒の扱いにおいては、雲の中における氷相の雲粒の微物理特性（雲粒の大きさや形状、密度）を経験的に仮定しているのが現状であり、このことが計算の不確実性を生む原因となっている。この問題に対応するために、氷相の微物理特性を直接計算する雲モデル（Habit 予測型ビン法 [53] や、超水滴法 [18, 54] の開発が進められており、これらを利用することで気象・気候予測だけでなく、衛星観測の観測精度向上にも寄与できることが期待される。さらに、雲に関連した現象であり、2030 年実用的に利用されることが期待される技術として、雲が持つ電荷や雷を直接計算し、雷頻度を直接予報する「気象雷モデル [55, 56]」がある。これが実用化されれば、現在は雷警報や雷活動度といった抽象的な物理量による予報しか存在していない雷の予測を雷頻度や電荷の分布の予報に繋げることができるだけでなく、雷による電気設備への被害や航空機への被雷被害低減という点で、社会に対して大きな貢献となる。

以上を踏まえると、2030 年までに達成することが見込まれる目標は、「1.LES モデルを用いた計算の汎用化」「2. 気象モデルと結合できる 3 次元放射伝達モデルを開発と、気象モデルと結合させた実験の実施」「3. 精緻な雲モデル（氷の形状を直接計算するモデル）を用いた現実事例での数値実験」「4. 気象雷モデルによる雷の予測の実用に向けた開発・検証」の 4 点である。これらの達成目標のロードマップについて表 3.6 に示す。なお、1 については 3.1.1.1 節、3.1.1.3 節、3.1.1.4 節に説明がされているため、この章では

割愛する。

年代 課題		2022 ～	2024 ～	2026 ～	2028 ～	2030 ～	2032 ～
物理 モデル	3次元放射伝達モデル(3D-RD)	3D-RDの開発 気象モデルへの実装		結合モデルを用いた 小スケールでの数値実験		実問題での数値実験	
	精緻な雲モデルの開発	精緻な雲モデルの開発と実事例での実行に向けた高度化				実問題での数値実験	
	気象雷モデルの実用化	ハインドキャスト実験と高速化 モデルの検証と改良		特定の地点を対象 とした実証実験		日本全体を対象とした予測 全球モデルへの拡張	

図 3.6 気象・気候分野、大気モデルの物理プロセスのロードマップ

目標達成に向けて必要な取り組み

図 3.6 の目標達成に対して問題となるのは、どの目標を達成するためにも、既存の気象・気候モデルに比べて、予報変数が増えるため、全てのモデルが従来のモデルに対して大きなメモリを必要とする点と、計算速度のボトルネックとなる全通信を必要とする計算が含まれるという点である。また、このような要求されるメモリの増加に対して、近年における最先端の大型計算機のメモリが小さくなり続けており、理論性能値としては高いが、上記のような目標達成の障害となることが想定される。

気象学のコミュニティにおいて、物理モデルを開発するユーザーの多くは計算機の知見をあまり持ち合わせていないことが多く、実際に最先端の大型計算機が利用できる環境があったとしても、目標達成のために開発したモデルの性能が出ないという問題に直面する。そういう状態に陥った時に多くの物理モデルの開発者は最先端の大型計算機での利用を諦める傾向がある。

これらを解決するために、具体的には以下の 2 点の取り組みが必要となると考えられる。1 点目は、計算機科学と気象学の共同によるモデル開発といった、既に研究者として活躍している者同士の共同開発機関の設置である。計算機を使いこなすためのノウハウの提供とは“言うは易し行うは難し”という事項の典型例である。気象学者と計算機科学者は、お互いの研究上の興味は一致しないことがほとんどであるため、研究を共同で行うのは難しい。これを解決するには常日頃から気象学者と計算機科学者が顔を合わせる状況を作っておき、いざ必要な時に意見交換ができる状態を保っておくくらいしか方法は思いつかない。

2 点目は、計算機科学の知見も持ち合わせた気象学の人材育成である。気象学者が必ずしも計算機の知見を持ち合わせていないのは、教育カリキュラムにそのような知見を獲得する機会がないためである。気象学者の中で計算機の知見を持ち合わせている者は、計算機に興味を持って自分で調べて知見を獲得したものか、研究遂行上必要なため自分で調べて知見を獲得した者に限られる。そのため、多くの気象学者は大型計算機がなければ研究を進められないにもかかわらず、計算機の知見を持ち合わせていないというのが現状である。

これら 2 点を同時に解決する方法として、大学などの教育機関において、気象学者と計算機科学者が所属するモデリング研究センターの設置が挙げられる。若手育成は、大学が主導するべきであり、大学にモ

デリング研究センターが設置され、そこに学生が配属されるような環境を作れば、人材育成は進み、2点目の取り組みそのものになるであろう。同時に、既に活躍している研究者がそのようなモデリング研究センターに所属することで、1点目の取り組みにもつながるであろう。

最後に、欧米や中国をはじめとして、世界的にも物理モデルの高度化は日々進んでおり、日本でも開発を続けていかなければ世界に取り残される。その際に、欧米のように大型計算機の利用者として物理モデルの開発者を取り込む制度の設計が必要になるであろう。

アプリケーションと計算量・計算資源

上記の目標のために、精緻な雲モデル（超水滴方法、Habit 予測型ビン法）、雷モデルは既に気象ライブラリ SCALE に実装が完了しており、3次元放射伝達モデルについては SCALE への実装を見据えて開発に着手している。このうち SCALE と結合した気象雷モデル [56] について取り上げる。

水平解像度 500m で、計算領域は 5,000km 四方（日本全域を想定）、鉛直 90 層で雷の予報計算を行う。その際雷をもたらす日時に絞って計算を行うため年間の 2/3 程度の 200 事例を対象とする。必要な計算量は図 3.7 の通りである。

モデル名 (略称)	モデル名	文献	計算手法	問題規模	総演算量	備考
SCALE-LT	Scalable Computing for Advanced Library and Environment with LighTning (LT) component	Nishizawa et al. (2015), Sato et al. (2015), Sato et al. (2019)	力学過程： 有限体積法、構造格子、非静力学完全圧縮 流体方程式 物理過程： 雲微物理、大気放射、乱流、陸面過程、大 気電気計算（SCALE本体にはない機能とし てBi-CGSTABによる線形ソルバーあり）	格子サイズ：500m 問題サイズ： 10000x100000x90(90億) ステップ数：約50万ステッ プ（dt=0.5s、72時間） ケース数：200ケース	200000EFLOP (2000EFLOP/ ケース)	SCALEのデフォ ルトでの時間に対し て計算時間が2~5 倍程度の計算量

図 3.7 各実験の計算設定と計算量

3.1.2.2 大気化学

背景

人間活動によるさまざまな化学物質の大気中への放出は、放射過程や雲微物理過程等を介して大気および地表面の物理化学過程に大きな影響を与え得る。具体的には、二酸化炭素をはじめとする温室効果気体や、光化学オキシダントや PM2.5(微小粒子状物質) などの大気汚染物質は、さまざまな人為的および自然起源放出源から大気中に排出され、太陽からの短波放射や地表からの長波放射を吸収もしくは散乱するとともに、雲の生成・成長過程等に影響を与えることにより地球温暖化等に大きく影響している。また、高濃度の大気汚染物質に長期間曝露されることにより呼吸器系疾病の発病率や植物の枯死、農作物の収穫量減少など、地表動植物の生態系にも広く影響を及ぼすと考えられる。さらに、黄砂をはじめとする土壌粒子中に含まれる鉄分や降水を介した栄養塩供給が海洋生態系にも大きく影響を及ぼしている。

このような大気微量成分の大気中での動態や、気候・気象等との多岐にわたる相互作用について、地球表層を含めた循環メカニズムを詳細にシミュレートすることは、現在の計算機資源を以ってしても十全と

は言い難いものの、気候モデルシミュレーションの黎明期からいくつかのキーププロセスに着目したシミュレーション実験が行われてきた。二酸化炭素の気候影響については、真鍋らが1次元モデルおよび3次元モデルを用いて評価し、二酸化炭素の大気中濃度を2倍に変化させると地表平均気温が2.36度上昇することを初めて示した[57, 58]。この際に用いられた3次元モデルが、現在広く使われている地球温暖化予測モデルの原型となっているといえる。また、1980年代からは成層圏オゾン層破壊、いわゆるオゾンホールとその要因としてのフロンの人為起源排出が広く認識されてきたが、要因となる化学物質の排出量の長期的な規制シナリオとしてモントリオール議定書が1987年に採択された。この排出シナリオに基づく成層圏オゾン層の回復傾向を予測する際にも、2次元および3次元の全球化学輸送モデルを用いた長期シミュレーション実験が行われており、2000年代に入ってからベクトル計算機を利用した3次元モデル計算が日本国内でも行われている[59, 60]。

二酸化炭素をはじめとする気候-化学相互作用の重要性が広く認識されるようになってからは、地球表層の大気、海洋、陸域といった気候システムを構成するサブシステムとしての大気モデルが地球システムモデルのなかに要素モデルとして組み込まれ、要素モデル間での変数交換を行いながら大気中濃度等の時間発展をシミュレートすることが広く行われている。IPCC第6次報告書の科学的知見の基盤となるCMIP6の中ではAerChemMIPがそれら化学輸送モデルの相互比較プロジェクトであるが、世界的には10のモデルグループ、うち日本からは2つのモデルグループが参加している。

学術的・技術的課題、目標

大気微量成分の大気中での動態およびその気候的影響を正しく評価するためには、大気中で物質がどのように運ばれ消えていくのか、すなわち1) 地表・海洋表面上などから大気への排出および植物等による吸収、2) 輸送過程、3) 変性過程、4) 沈着過程の諸過程と、5) 大気中における放射過程とをなるべく精緻に評価する必要がある。そのため、この諸過程において考えられる課題について概観したい。

1) 排出・吸収過程

地球温暖化に最も影響を及ぼす大気成分である二酸化炭素は、人間活動における化石燃料消費や土地利用変化に伴う排出と、海洋や陸域生態系による吸収が重要な変動源であり、これらのプロセス理解の深化と交換量の精緻化が重要な課題である。大気モデルや人工衛星を用いたトップダウン推定のほかに陸域モデルや統計データを用いたボトムアップ推定がある。これまではこれらの推定手法間の差異が大きかったものの、近年では観測データの拡充やモデル高度化に伴い、比較解析が進みつつある。たとえばグローバルカーボンプロジェクトでは、毎年大気モデルを用いたトップダウン推定を含めた二酸化炭素排出量の推定結果を取りまとめており、2020年にはCOVID-19によるロックダウン等の影響で5.4%減少したと推定されている[61]。近年は人工衛星のセンサー性能の向上に伴い、衛星データの高解像度化が進みつつある。たとえばESA(欧州宇宙機関)が2017年に打ち上げたSentinel-5Pに搭載されたTROPOMIは7×7kmの解像度であり、JAXA(宇宙航空研究開発機構)が2023年に打ち上げ予定のGOSAT-GWは3×3kmの解像度を想定している。これらの高解像度衛星に近い空間分解能で、かつCOVID-19や福島第一原発事故のようなイベント的な変動に対しても即応性の高い対応が行えるようにすることが当面の課題として挙げられる。

エアロゾルに関しては気候変動に関連した地表生態系の応答に関する理解がまだ十分でないと考えられ

るため、これらのプロセス理解の深化が求められる。具体的には、気温上昇に伴う植生起源揮発性有機化合物 (BVOC) の排出量増大と、それに伴う 2 次有機エアロゾルの濃度増大、および二酸化炭素濃度増加に伴う植物のイソプレン排出量の増加が挙げられる。また、信頼性の高い統計データを得づらい森林火災由来の排出量についても精緻化が求められる。とくに衛星から観測しづらい泥炭火災や、火災由来の対流による鉛直輸送などの精緻化については、土中の炭素含有量や燃焼時の熱量などにも大きく影響されるので、気候モデルにおける陸面過程の精緻化がこれらのプロセスの表現向上につながる可能性がある。

2) 輸送過程

大気微量成分の大気中の輸送およびその過程での混合等については、水平および鉛直方向の解像度が大きく影響している。例えば、八代らは水平解像度を 2~3km 程度まで高めることにより、インドネシアにおける降水の日変化が低解像度の場合と比較して大きく振る舞いを変えることを指摘している [62]。また、佐藤らは 3.5km 程度の高解像度実験を行うことにより、極向きのエアロゾル輸送が低解像度の際よりもより適切に表現されうること示した [63]。前線内の収束帯や降雨の構造をより適切に表現するためには、この程度の解像度が必要となると考えられるが、以降の変性過程や沈着過程などの精緻化と並行して、気象の諸プロセスが適切に表現できる水平・鉛直解像度で実験が行えるよう、気象モデル開発者・研究者と連携をとりつつ開発を進めることが求められる。

3) 変性過程

たとえば、光化学オキシダントの主成分である対流圏オゾンは地表から直接排出されず、大気中における光化学反応によって窒素化合物や炭化水素などから生成される。このように、とくに短寿命な大気微量成分にとっては大気中における変性過程が非常に重要である。一例として、MIROC-CHASER では 90 以上の化学種の 250 種以上の化学反応を考慮している [64]。ただし衛星によるホルムアルデヒドやイソプレンなどの観測結果などから、都市域や森林周辺での未解明の VOC(炭化水素) と OH(水酸基) ラジカルの反応がありうるともいわれている。また、海洋上の遠隔地においてはオゾン濃度が 10ppb 以下になるような極低濃度が観測されているが、ハロゲン等との反応も指摘されており、海洋起源のヨウ素や臭素およびその大気中での化学反応を導入することによりモデルの予報精度が改善される可能性がある。より長期的には、今後の高解像度化および化学反応系の複雑化とともに、準定常状態 (QSSA: quasi-steady-state approximation) を仮定するのではなく、より効率的な化学反応モジュールの導入が望ましいと思われる (cf. Shen et al., 2020[65])。

4) 沈着過程

大気中を漂う微小粒子であるエアロゾルは、降雨、降雪に捕らえられたり凝集核として雲に取り込まれたりするなどして大気中から除去される。PM2.5 の成分の一つであるブラックカーボン (黒色炭素粒子) は、森林火災等での不完全燃焼の際に排出される「すす」である。排出時には水に溶けにくい疎水性粒子として排出されるが、輸送途上において徐々に表面に水滴が付着し、親水性を獲得していく (cf. Kanaya et al., 2016 [66])。このような過程を適切に表現するためには、エアロゾルの種類だけでなく、粒径やその表面に付着した他の物質等も表現しうる 2 次元の粒径分布を考慮する必要がある。現在日本国内においても複数の研究機関でそのような詳細なエアロゾル状態を表現できるモデルが開発されつつあり、今後も

継続的な改良が期待できる (cf. Kajino et al., 2019 [67] ; Matsui & Liu, 2021 [68])。

また、日本の山岳域などでは地表付近の霧による大気中からの除去が重要であるといわれており、関西域での実観測等に基づくパラメタリゼーションが一部の領域化学モデルに導入されている [69, 70]。

5) 放射過程

沈着過程の項目で触れたようなエアロゾル表面上への水滴の被覆量は、エアロゾルの大気中からの除去されやすさだけでなく、表面の水滴がレンズのように太陽光等を屈折させてエアロゾルの大気加熱効果を増幅させる役割があり、この観点からも詳細なエアロゾルモデルは重要な役割を持っている。粒径や被覆量を適切に考慮することによって、ブラックカーボンエアロゾルの地球温暖化への影響が既存の粒子表現と比べて 7 倍近い幅を持ち、排出時の粒径分布や輸送経路上での親水性獲得を適切に評価する必要があると指摘されている [71]。

年代 課題	2022 ～	2024 ～	2026 ～	2028 ～	2030 ～	2032 ～
大気化学	エアロゾル モデルの 高度化	高解像度衛 星データを用 いた高解像 度輸送検証	化学反応系 の精緻化	精緻化され たモデルで のO(1km)で のイベント実 験	精緻化されたモデルでの 長期計算	
	←	→	←	→	←	→

図 3.8 気象・気候分野、大気化学のロードマップ

目標達成に向けて必要な取り組み

二酸化炭素を含む気候-化学相互作用シミュレーションについては、30 年以上の長期積分が一般的であるが、メタンなどの SLCF(短寿命気候因子) のシミュレーションについても光化学的なフィードバックを考慮した場合、成層圏の水蒸気生成等まで含めると 10 年程度の積分期間が必要となる。対流圏における全球的な汚染気塊の輸送シミュレーションとしては数週間程度と比較的短い積分期間での事例解析で良い場合もあるが、気候応答を考える場合は年単位のシミュレーションが必要となる。また、森林火災のように年々変動の影響が大きいものもあるため、長期トレンドと年々変動の適切な評価のためには複数年のシミュレーションを行う必要がある。

全球化学輸送モデル MIROC-CHASER においては数十種類のトレーサーの移流計算が必要になるため、気候モデルよりもノード間通信は隣接通信の比重が大きい。このため高解像度化に伴う計算量増加の対策として、使用ノード数を増やすことが有効である。現在 MIROC では緯度方向でのノード分割と鉛直方向のノード内並列を考慮しており、プロセス空間の分割についてはより最適化する必要がある。

また、現状における力学過程計算部分は予報化学種のトレーサー数に応じて計算負荷が高くなっており、計算機の効率的な利用のためにはとくに移流過程と光化学反応過程のアルゴリズム改良が必要である。

アプリケーションと計算量・計算資源

全球スケールおよび領域スケールの化学輸送モデルとしては国内研究機関において開発・運用されてい

るものが複数あるが、ここでは一例として MIROC-CHASER を取り上げる。以下の例では水平解像度 80km での 10 年積分だが、解像度を 2 倍にすると必要資源量は約 8 倍に増加する。

アプリケーション

- モデル名: MIROC-CHASER (Chemical AGCM for study of atmospheric environment and radiative forcing)
- 力学コア: スペクトル法
- 移流スキーム: フラックスセミラグランジュ法
- 物理過程: 雲微物理、大気放射、乱流、陸面過程など
- 化学過程: 光乖離、気相反応、エアロゾル、雷 NO_x 生成、湿性・乾性沈着、生物起源放出など

問題規模

- 格子点数: 1200 万 (水平解像度 80km, 鉛直 60 層)
- ステップ数: 530 万 (dt=1 分, 10 年積分)

要求性能精査の根拠等 (過程) などの説明

- メモリ量: 40PB
- 総演算量: 14,000 EFLOPS

3.1.2.3 海洋

背景

海洋は大気に比べて流れは緩やかであるが熱容量が大きいので、特に長期の気候変動に対して重要な役割を果たしている。また、CO₂ やメタンの吸収などの海洋による物質循環を通じて、地球温暖化にも大きな影響を持つと考えられる。すなわち、気候モデルを用いた長期気候変動予測のために、海洋は欠かすことのできない要素である。

全球規模の気候変動において、北極海は最も温暖化の影響が大きい海域で、特にここ数十年間での海水面積の減少とそれに伴う海上気温の上昇は最も顕著である。近年は、北極海のバレンツ・カラ海での海氷減少に伴ってシベリア高気圧が強化し、我が国を含む北半球中緯度の冬季気候に対して遠隔的に影響しているとの指摘もある。さらに、北極海の家氷減少に伴って、我が国と米国東海岸・欧州を結ぶ航路として北極海を通る航路 (北極海航路) の利用可能性に関する調査も進んでおり、数週間から数十年スケールの予測が航路選択や造船計画に利活用されつつある。このように、北極海の海洋-海氷変動システムの解明に対する学術界・産業界での重要性が近年高まっている。

一方、北大西洋のメキシコ湾流・北大西洋海流、北太平洋の黒潮は、低緯度にある高温な海水を高緯度に輸送することで顕著な南北熱輸送を担う代表的な海流である。しかしながら、これらの海流の正確な表現は、CMIP6 に参画するような最新の気候モデルでも困難である。特に我が国の南岸を流れる黒潮は、全球規模の気候に対してはもちろんのこと、日本の気候・気象に対しても大きな影響を持つことが知られ

學術的・技術的課題、目標

上記は 5 年以内に着手可能なものであるが、10 年先を見据えてかつ日本近海の流れ情報に対するニーズの高まりを考慮すると、日本近海をさらに高解像度としたモデルについても着手する必要があると考えている。この場合、最低でも日本近海の水平解像度を 500m 程度とする海洋モデルの構築を目指すべきだと考えている。また、海洋循環の応用分野をより広げるためにはさらなる高解像度モデルが必要で、日本近海のみ水平格子幅 100m 程度にしたモデルの構築も可能になるのではないかと期待している。

年代 課題	2022 ～	2024 ～	2026 ～	2028 ～	2030 ～	2032 ～
海洋 (長期気候予測)	海洋全球10kmの気候モデル ←──────────────────→		左記モデル のアンサンブル実験 ←──────────→	日本近海500m(多重ネスト)の 海洋モデル ←──────────────────→		
	北極3-5km/全球25kmの 気候モデル ←──────────────────→			日本近海100mの海洋非静カモデル ←──────────────────→		

図 3.9 気象・気候分野、海洋のロードマップ

まず、水平格子幅 10km の全球海洋気候モデルの開発の現状について述べる。我々のグループで開発している海洋モデル COCO は、水平格子幅 10km の海洋単体モデルとして、現在、研究などに活用されており、問題なく稼働している。さらに、大気非静力モデル NICAM と海洋モデル COCO を結合したモデル NICOCO においても、水平格子幅 10km の海洋モデルの結合に既に着手しており、それをういた黒潮

域における大気海洋相互作用に関する研究を進めている。このように、気候モデルにおける海洋モデル高解像度化に関する技術的な課題はこれらの経験を踏まえて克服されており、あとは計算機資源の不足が唯一の問題である。

また、北極海高解像度の海洋ネスティングモデルは、既に海洋単体でのテストランを完了している。さらに、黒潮域を含む日本近海を高解像度とした海洋ネスティングモデルを組み込んだ気候モデルによる研究例も既に存在し、これらの経験が北極海高解像度気候モデルの構築にそのまま生かされる。すなわち、長期気候変動をターゲットとして海洋ネスティング気候モデルを構築・実行する上での技術的課題はおおよそ解決済みであり、既に計算機資源の充実が待たれる段階にある。

日本近海 500m の海洋モデルを組み込んだ気候モデルについては、多重ネスティング手法によって構築した海洋単体モデルの実行・研究経験がある一方、大気モデルを結合した気候モデルの開発は未着手であり、今後取り組むべき技術的課題であると考えている。また、日本近海のみ水平格子幅 100m 程度にした海洋単体モデルは、従来のモデルで用いられてきた静力学仮定が満たされない現象も陽に表現できるようになるため、非静力海洋モデルの導入も検討するべきだと考えている。

アプリケーションと計算量・計算資源

全球 10km 海洋モデル COCO は、格子数が $3,600 \times 3,000 \times 62$ である。タイムステップは 6 分、長期気候変動をターゲットとするために 200 年の積分を考えると、タイムステップ数は 1.3×10^8 である。東京大学 Wisteria (1 ノードあたり 48 コア/CPU で理論値 3.3TFLOPS) を 500 ノード (理論値 1.65PFLOPS) 使用して 1 年間の積分に約 5 時間半を要するので、200 年積分 (1 ケース) に 1 か月半かかる。上記は海洋単体モデルであり、気候モデル MIROC において大気モデルも同程度の計算量を割り当てると、1 ケース辺り 3 カ月要する。数ケースのシナリオの実行を想定すると、1.65PFLOPS を 1 年間使用する計算になる。さらにアンサンブル数を 5 程度として、それを数年間で実行すると考えると、必要な総演算資源量は 3PFLOPS 程度である。

海洋モデル COCO の北極海高解像度ネスト版は、外モデルは全球 25km 海洋モデルで格子数が $1,440 \times 1,280 \times 62$ 、北極海モデル (解像度 3km) は $7,200 \times 1,280 \times 62$ である。タイムステップは 3 分、長期気候変動をターゲットとするために 200 年の積分を考えると、タイムステップ数は 2.6×10^8 である。上記の全球 10km モデルに比べて、実行内容は同じで海洋部分の総演算量は約 2 倍、大気モデルは前述の海洋 10km モデルと共通とすると気候モデル MIROC としては 1.5 倍となる。そのため、必要な総演算資源量は 4.5PFLOPS 程度である。

日本近海 500m の海洋モデルは 4 重ネストで全球モデルから段階的に細かくする。最も解像度の高い最内モデルの格子数が $4,500 \times 3,600 \times 62$ である (より解像度の粗い外側のモデルの総計算量は最内モデルの 20% 程度だと考えられるので以下の見積もりでは割愛する)。積分期間は長くても 1 年程度であり、タイムステップを格子幅からの推定で 1 分とすると、タイムステップ数は 5.3×10^6 である。ただし、これほどの高い解像度では潮汐の影響を考慮に入れなければならない、流速の大きい短周期の潮流が生じるため、タイムステップは 1 分より短くなる可能性もある。このような高解像度シミュレーションにおいては、アンサンブル数を確保する必要がある、それを 20 程度とすると必要な総演算資源量は 81TFLOPS である。これよりさらに細かい日本近海 100m 格子モデルを用いて同様の計算を行うと、500m 格子モデルの 125 倍だとすると必要な総演算資源量は 10PFLOPS である。なお、この水平解像度では静水圧近

似が成り立たない現象が顕著になる可能性もあり、日本近海 100m 格子モデルとして非静力海洋モデル KINACO の使用も検討する。

詳細な問題規模と総演算量については、図 3.10 を参照いただきたい。

モデル名 (略称)	モデル名	文献	計算手法	問題規模	総演算量
MIROC	Model for Interdisciplinary Research on Climate	Tatebe et al. (2019)	(大気モデル) 力学過程: スペクトル法、静力学圧縮流体方程式 物理過程: 積雲対流スキーム、大気放射、陸面過程など (海洋モデル) 一般直交全球三極座標・静力学プシネスク流体方程式・海面混合層スキーム・海底境界層スキーム・高次移流スキーム	格子サイズ: 大気はT213L40(60km)、海洋は3600×3000×62 ステップ数: 1.3億 (dt=6分、200年積分) ケース数: 3 ケース アンサンブル数: 5	3PFLOPS
MIROC	Model for Interdisciplinary Research on Climate	Tatebe et al. (2019)	(大気モデル) 力学過程: スペクトル法、静力学圧縮流体方程式 物理過程: 積雲対流スキーム、大気放射、陸面過程など (海洋モデル) 一般直交全球三極座標・ネスティング手法・静力学プシネスク流体方程式・海面混合層スキーム・海底境界層スキーム・高次移流スキーム	格子サイズ: 大気はT213L40(60km)、海洋は全球1440×1280×62+北極海7200×1280×62 ステップ数: 2.6億 (dt=3分、200年積分) ケース数: 3 ケース アンサンブル数: 5	4.5PFLOPS
COCO	CCSR Ocean Component Model	Hasumi (2006)	(海洋モデル) 一般直交全球三極座標・ネスティング手法・静力学プシネスク流体方程式・海面混合層スキーム・海底境界層スキーム・高次移流スキーム	格子サイズ: 日本近海4500×3600 (500m)×62と全球モデルを段階的多重ネストモデルで連結 ステップ数: 530万 (dt=1分、1年積分) アンサンブル数: 20	81TFLOPS
COCO or KINACO	CCSR Ocean Component Model or KINACO is Not A COCO	Hasumi (2006) or Matsumura and Hasumi (2008)	(海洋モデル) 一般直交全球三極座標・ネスティング手法・静力学or非静力学プシネスク流体方程式・海面混合層スキーム・海底境界層スキーム・高次移流スキーム	格子サイズ: 日本近海22500×18000 (100m)×62と全球モデルを段階的多重ネストモデルで連結 ステップ数: 2650万 (dt=12秒、1年積分) アンサンブル数: 20	10PFLOPS

図 3.10 各実験の計算設定と計算量

3.1.3 データ同化・データサイエンス (AI, 機械学習)

背景

データ同化は、数値予報モデルによる第一推定値を、観測データを利用して修正することで最適な初期値（解析値）を推定する方法である。これまで様々なデータ同化手法が多くの研究によって開発されてきた。現在では、4次元変分法 (4D-VAR [72, 73]) 及びアンサンブルカルマンフィルタ (EnKF [74, 75]) が主流となっている。4D-VAR、EnKF ともに流れに依存した誤差成分を考慮する高度なデータ同化手法で、理想的な条件のもとでは同等の精度が得られることが知られている [76]。また、両手法のメリットを生かすハイブリッドデータ同化手法の開発が盛んに進められている。さらに、これまでのデータ同化手法が確率分布のガウス性を仮定しているのに対し、非ガウス性を考慮することが可能な粒子フィルタ法を気象モデルに適用する研究も進んでおり [77]、降水過程などの非ガウス性の強い現象に対して効果を発揮することが期待される。また、様々な分野で研究開発が進められている機械学習をデータ同化で活用する取り組みも盛んである。

降水、強風、落雷といった顕著現象をより精度良く予測するには、時空間的には数 100m～数 km、数

分～数時間スケールの気象情報が必要であり、数値モデルの計算のメッシュとしては数 10m～数 100m、時間刻みとしては 1 秒以下という高い時空間解像度が求められる。竜巻のようなマイクロスケールの顕著現象の実用的な予測のためには、時空間的にさらなる高解像度が必要となる可能性がある。また、高い空間解像度は、数値モデルだけでなく、データ同化のための観測データにも求められる。

学術的・技術的課題、目標

これまで、数値天気予報におけるデータ同化は、大気、海洋などそれぞれにおいて行われてきた。近年では、大気と海洋のデータ同化を同時に行う強結合データ同化の開発が進められている。数値予報モデル開発においては、エアロゾルモデルや化学モデル、植生モデルなど様々なコンポーネントをつなぐ地球システムモデルの開発も進められている。地球システムモデルの包括的データ同化は数値予報の精度向上に重要な役割を果たすと考えられる。また、近年では、様々な分野で研究開発が進められている機械学習をデータ同化で活用する動きも見られる。

これまでも、気象レーダや地上観測、人工衛星観測などの膨大なデータが用いられてきたが、近年はフェーズドアレイ気象レーダや気象衛星ひまわり 8 号などの登場により、従来と比べて一桁以上大きな観測ビッグデータが利用可能になってきた。高解像度高頻度の観測データを有効活用し予測精度を向上するには、数値モデルのさらなる高解像度化や膨大な観測データを効率的にシミュレーションに取り込むデータ同化システムの開発が求められている。線状降水帯のような極端現象は非線形性が強く、非ガウスを考慮するデータ同化手法の開発が必要となる。これを達成するためには、大規模並列計算に適した数値予報モデルとデータ同化手法が必要となる。例えば、数値予報モデルの解像度や観測データに含まれる誤差相関などの影響で、多くの観測データを有効に利用できず、捨てざるを得ない。今後、データ同化の更なる研究開発により、観測誤差相関を直接考慮する方法などを開発して、より多くの観測データを効率よく利用して予報精度が向上することが期待される。

気象予測において、データ同化を用いて多くの観測情報を取り込んで精度の良い初期値を作成することは必要不可欠である。地球観測技術は年々高度化しており、数多くの人工衛星や地上観測装置が開発されている。そのデータ量は 1 世代前のものと比べると桁違いの数十～百倍となり、まさにビッグデータである。こうした人工衛星や、レーダ等の地上観測網の整備には多額の資金が必要であり、その価値を余すことなく利用することは我々に課せられた重要な責務である。近年では測器の設計前にその有効性をシミュレーションして評価する「観測システムシミュレーション実験 (Observing Systems Simulation Experiment: OSSE)」の重要性が高まっている。OSSE により、どのような測器をどう配置・運用すれば効果的か、どのようなデータ同化システムを用いればどの程度予測の精度向上につながるかを事前に定量的に評価することが出来る。社会基盤としての気象予測システムの維持発展のためにはこのような研究も欠かすことができない。

実際の気象予測においては、フラッグシップ計算機のような計算資源を投入することは出来ないが、フラッグシップ計算機による知見を低コストで反映するために機械学習手法を応用することが考えられる。例として大規模計算の結果を学習し、低解像度の計算から高解像度予測を作成する超解像技術が挙げられる。その他のデータ駆動手法の応用としては、物理過程のパラメタリゼーションの機械学習による置き換え、モデル誤差の修正、観測演算子の機械学習による構築、機械学習手法を用いたデータ同化手法の改善、モデル出力の統計補正などが挙げられる。

年代 課題	2022 ～	2024 ～	2026 ～	2028 ～	2030 ～	2032 ～
データ同化 機械学習	地球システムモデルによる 強結合データ同化システムの開発			地球システムモデルによる 強結合データ同化実験		
	高解像度データ同化手法の開発 (解像度100m以下)			高解像度データ同化手法の開発 (解像度10m以下)		
	データ同化とAIの融合研究			AIを使った新しいデータ同化手法の開発		

図 3.11 気象・気候分野、データ同化・データサイエンス（AI, 機械学習）のロードマップ

目標達成に向けて必要な取り組み

現在気象分野で用いられているデータ同化手法には、大きく分けて変分法とアンサンブルカルマンフィルタがある。将来的な方向として、アンサンブルカルマンフィルタによって得られる「その日の流れ場」を考慮した背景誤差共分散を4次元変分法の中で利用することによって精度向上を図る、ハイブリッド手法があり、近年盛んに研究されている。また、これらのデータ同化手法が確率分布のガウス性を仮定しているのに対し、非ガウス性を考慮することが可能な局所粒子フィルタ法を気象モデルに適用する研究も進んでおり、降水過程などの非ガウス性の強い現象に対して効果を発揮することが期待される。同様に、非線形性を考慮するために機械学習手法を用いる研究もある。

アンサンブルカルマンフィルタにおける主要な演算は、固有値分解や逆行列などの行列演算である。これまでアンサンブル数はせいぜい数十から百程度であったが、今後は少ないアンサンブル数によるサンプリングノイズを減らすために数百以上のアンサンブル数を確保することが求められるようになるだろう。しかし、行列の演算量は行列の大きさに対してその2乗や3乗で増加するため、アンサンブル数や観測データ数によって演算量は劇的に増加する。数値予報モデルでは演算効率を上げるために、単精度実数の利用が進められている。データ同化においても単精度実数の利用を検討する必要があるが、行列演算の精度に影響を与える可能性がある。富岳でのグランドチャレンジでは、数値予報モデル、データ同化両方において積極的に単精度の利用を試み、解析精度の精度悪化は最小限であることを確認した。このような問題を含め、演算効率を向上させるために単精度実数の利用やアルゴリズムの改良を含めたさらなる開発が必要となるだろう。また、アンサンブルカルマンフィルタでは、アンサンブル数だけのファイル入出力を伴うため、ストレージの量だけではなく巨大になるファイル数に対応したファイルアクセス速度の向上も非常に重要である。気象学やデータ同化のアプリケーション開発者のみでこれらの問題を解決することは難しい。富岳の開発では、アプリケーション開発者と計算機開発者による協調設計「コデザイン」によって、アプリケーションの高度化、様々なタイプのアプリケーションにとって使いやすい計算機開発に成功した。次世代のスーパーコンピュータ開発においても「コデザイン」が非常に重要となる。

アプリケーションと計算量・計算資源

(A) データ同化 (NICAM-LETKF)

NICAM-LETKF は、局所変換アンサンブルカルマンフィルタ (LETKF) を全球非静力学大気モデル (NICAM) に適用したものである。LETKF は格子毎に計算が完全に独立しているため並列性に非常に優れている。

問題規模

- 実行形態：1 時間毎に新たな観測データを取り込んで初期値をアップデートする (1 時間サイクル)。このため、大気モデルのシミュレーションを 1.5 時間分行い、1.5 時間積分した時刻の前後 30 分の 10 分毎のアンサンブル出力値を用いてデータ同化を実行する。これを 1,440 サイクル繰り返し 2 ヶ月間のシミュレーションを行う。
- 格子数：全球 3.5km、鉛直 94 層 (約 43 億格子)
- アンサンブルメンバー数：1,000
- ケース数：2
- 総演算量：896,000 EFLOP
- 総メモリ使用量：10 万ノードを使った実行で 1.4PB
- 総ストレージ容量：15PB

大気モデルの演算量は解像度 n 倍に対して n^3 倍に増える一方、アンサンブルデータ同化では、解像度に対して n^2 倍、アンサンブルメンバー数 m に対して m^2 倍から m^3 倍で増加する。この実験を 1 ケースあたり 24 日で行うとする場合、必要となる計算機性能は演算性能で 220PFLOPS、メモリバンド幅性能で 270PB/s である。このうち、アンサンブルデータ同化は行列演算が大きな部分を占めるので、大気モデルと比較してより高い演算性能を要求する傾向にある。ネットワーク通信については、大気モデルでは主に隣接通信を行い、アンサンブルデータ同化では数回の大域通信を行う。どちらも現在のネットワーク速度で十分と見積もられる。ファイル I/O では、大気モデルシミュレーションとアンサンブルデータ同化にかかる時間が 1:1 であるとする、大気モデルでは実時間で 20~30 秒ごとにノードあたり 3GB 程度のファイル出力を行うと見積もられ、300MB/s 程度のファイル I/O 性能が必要である。これに対しアンサンブルデータ同化は書き出された大気モデルの結果を一気に読み込んで処理するため、ストレージ帯域全体で 80TB/s 程度の性能があると望ましい。大気モデル及びデータ同化における通信は、富岳での実測値からの推定で総経過時間に対する割合は高くないことがわかっている。上記の問題サイズにおける、1 サイクルでのデータ同化での通信量は約 3PB と見積もられる。データ同化 1 サイクルを約 1 時間で終わらせ、通信にかけても良い時間を全体の 2% と仮定すると、要求されるネットワークバンド幅はノード当たり高々 0.5GB/s となる。

富岳のコデザインでの取り組みによって、アルゴリズムの改良やチューニングによって演算性能が向上した。また、現在気象モデルでは倍精度実数を用いるのが一般的であるが、演算性能を向上させるために単精度化への取り組みが始まっている。これにより演算性能が上がることが実証され、さらに物理性能もおおよそ保証されることが示されている。

(B) データ同化 (SCALE-LETKF)

SCALE-LETKF は大規模並列計算に向けて設計された領域気象モデル SCALE-RM と、並列実行性

能に優れたデータ同化手法である局所アンサンブル変換カルマンフィルタ LETKF を組み合わせたシステムである。ここでは SCALE-LETKF を念頭に、将来の領域気象予測に必要なとなる計算量の見積もりを行う。

問題規模

竜巻スケールの現象を解像できる数値天気予報の実現可能性について考える。解析領域としてフェーズドアレイ気象レーダの探知範囲 120km 四方を設定する。50m 解像度、100 アンサンブルの領域気象モデルの時間積分を 30 秒先まで行い、30 秒毎にデータ同化を行う。観測データとして、300 方位、600 レンジビン、110 仰角のフェーズドアレイ気象レーダの観測データを同化する。得られた解析アンサンブルを初期値として、100 メンバーの 30 分先までのアンサンブル予測計算を行う。

- 格子数：50m 解像度、鉛直 50 層（2.88 億格子）
- アンサンブルメンバー数：100
- 総演算量：2EFLOP（30 秒あたり）

以上を 30 秒以内に処理するために必要な計算機性能は、約 10^{17} FLOPS=100PFLOPS。実行効率を現在と同じレベルの 10 %と仮定すると、計算機の理論性能としては 1EFLOPS が求められる。主記憶は合計 300TB、ファイル IO は 1 サイクル辺り 12TB 必要となる。

3.1.4 世界の動向とハードウェアに求める計算機性能

本項では気象・気候アプリケーションがハードウェアに求める性能要求について、各アプリケーションに見られる共通項を抽出し、俯瞰的な視点でまとめる。しかし現在のアプリケーションが置かれている立場は、ハードウェアに自由な要求を行う側にいるというよりも、電力性能向上や計算機の市場トレンドに駆動されたハードウェアの変化に起因し、さまざまな制限を受けている側にいるといえる。そのため、ハードウェア側への要求と同時に、アプリケーション側でどのような変革を行うべきかという視点に立って述べることにする。加えて本項では、世界における気象・気候アプリケーションの開発動向についても触れるが、多くのプロジェクトはハードウェアから受ける制約を如何に打破するかという視点で行われているという特徴がある。将来実現を目指す科学的な挑戦を進めるために克服すべき技術的挑戦の比重は増大しており、ハードウェアとシステムソフトウェア、そしてアプリケーションが互いに連携したコデザイン活動の重要性は一層増している。

並列性の確保の問題

ここ 30 年のコンピュータの性能は、ムーアの法則に従い 1 年間に 1.6 倍の浮動小数点演算性能の向上を達成してきた。しかし 2000 年代以降、CPU の動作周波数向上は電力消費量の増加を理由に頭打ちとなり、演算コアの数を増加させる方法に切り替えることで、性能向上が維持されることとなった。近年における CPU 内でメインメモリ・キャッシュを共有したコア数の増加は顕著であり、Intel Xeon Phi (Knights Landing 世代) や AMD EPYC (Millan 世代) のように、1CPU に 50 コア以上搭載されるのも珍しくない。また、CPU1 コア内においても、1 回の命令で複数のデータに対して同じ演算を行う方法

(Single Instruction Multi Data: SIMD) が強化される方向にあり、例えば京コンピュータでは倍精度・単精度演算で同時2つであったのに対して、富岳では倍精度・単精度・半精度の演算でそれぞれ8、16、32個のデータを処理する [78]。GPU においても、例えば NVIDIA TESLA A100 は約 7,000 の Streaming Processor (SP, NVIDIA の場合は CUDA コア) を備え、CPU がコア数 \times SIMD で並列処理するデータを SP で処理する。この時、CPU も GPU も演算に対して相対的に速度の遅いデータ転送を隠蔽するために、演算とデータ転送がオーバーラップされる形で実行する。CPU ではこの手法をソフトウェアパイプラインングを用いて実現しており、性能が向上するために必要なデータ数は SIMD 実行数の数倍になる。そのため、実際にハードウェアが同時処理するデータ数よりもさらに多くのデータ数を用意する必要があり、例えば富岳では数百個のデータを同じ命令で同時処理する形になりがちである。スーパーコンピュータでは、このような CPU・GPU をさらに数千・数万と並べてネットワーク接続することで最大性能を実現している。シミュレーション側はこのようなハードウェアの階層的な並列処理機構に合わせて、計算を処理する必要がある。最も重要なのは同じアルゴリズムで同時処理できるデータを用意することであり、これを並列性の確保という。気象・気候計算の科学的な要請とマッチしつつ並列性を確保するのに有効なのは、空間解像度 (格子点数) の向上とアンサンブル実行数の向上である。特にアンサンブル数の向上は、後述する空間解像度の向上と比較して困難が少なく、シミュレーションモデルそのものに加える改良も少ないため、向こう 10 年の計算機の変化の中でも非常に有効な手段であるといえる。

一方で空間解像度を向上させた場合、一般的に CFL 条件により時間刻みも小さくしなければならず、同じ時間分をシミュレーションするために必要な演算量が増大する。気象・気候モデルはほとんどの場合、空間方向にプロセス分割して並列化するため、高解像度化に伴う格子点数の増加はプロセスあたりの格子点数を変えずにプロセス数を増加 (ウィーク・スケーリング) させることによって対応できる。しかしそのままでは、時間刻み幅が小さくなり計算ステップ数が増大したことに対応できないため、高解像度シミュレーションは気候シミュレーションと同程度の計算ステップ数では数日から数ヶ月の短期間計算にとどまらざるを得ない。現業の気象予報や長期気候計算で必要となる、計算をより短い時間で達成する (Time-to-Solution) という観点においては、ステップ数の増大に対応するためにプロセスあたりの問題サイズ (= 格子点数) を減らしながら利用プロセス数を増加 (ストロング・スケーリング) させる必要があり、並列性の確保や通信時間が占める比率の相対的な増加により、性能向上はかなり困難である。今後のモデル開発では、1) 1 時刻ステップの計算を高速化する、2) 1 時刻ステップの時間刻み幅を長くする、3) プロセス間通信にかかる時間を短縮する、といった点が重要視されると考えられる。ハードウェア・システムソフトウェア側に期待する機能を以下に挙げる。

- SIMD 並列実行の柔軟性の向上：長い SIMD のビット幅を使い切れないような計算の場合も、ループ内の複数の計算式をまとめ上げて計算可能にするようなコンパイラの機能や、ハードウェア機構が追加されることが望ましい。
- 通信速度・レイテンシ性能に比重をおいた設計：相対的に比重の増すプロセス間通信について、できる限り通信時間を削減するような設計が行われることが望ましい。特に加速機構へオフロードしたデータをノード間をまたいで通信するケースについて、より通信時間を削減するための研究開発が求められる。

一方で、アプリケーション側に求められる変革としては、以下のようなものが挙げられる。

- モデルの時間発展に着目したアルゴリズム研究開発：1 時刻ステップの時間刻み幅を長く取れるようなスキームの選択や、計算安定性を向上させるための開発が求められる。一方で、空間解像度と同様に時間解像度もシミュレーションの表現力を向上するために重要な要素であり、敢えて短い時間刻み幅を前提としてアルゴリズムの簡略化を図り、1 時刻ステップの計算を高速化するという戦略も考えうる。
- 新たな方法による計算高速化：解きたいアルゴリズムを計算機に最適化する方法は限界にきており、後述する低精度計算の活用や代替モデルの活用など、これまでのシミュレーション精度を犠牲にするリスクを伴う変革が必要とされる。
- 通信スキームの改良：ハードウェア側へ要求する通信速度向上と連動して、アプリケーション側も通信部分の再実装を必要に応じて進め、コデザインを行うことが想定される。

メモリ性能と容量の問題

ムーアの法則に従って性能が向上しているのは浮動小数点数演算性能であり、メモリ性能の向上はより緩やかにしか進展しない。その速度は概ね 1 年で 1.16 倍と見積もられており、10 年で 4.4 倍しか高速化しないことになる。気象・気候モデルは演算量に対して用いる変数の数が多く、データ転送量が多いメモリ律速型のプログラムであり、ハードウェアのメモリ性能に頼った形の性能向上を期待しては、いつまでも計算可能な問題を拡大することは出来ない。メモリ容量の問題もある。高速なメモリはコストが高く小容量であり、安価で大容量のメモリは低速であるというトレードオフがある。そのため、格子点を一度にたくさんメモリ上に準備して並列性を確保することと、高性能のメモリを準備して計算を高速化することの両立を図ることは困難である。また、より多くの鉛直層数やより多くの予報変数を用いて計算したいという科学的要請から、利用メモリは増大する傾向にあり、容量の不足により今後 10 年で計算したい問題がこれ以上大きくできない可能性も高い。

この問題を解決する方法として、低精度浮動小数点実数の活用と不揮発性メモリの利用が挙げられる。前者はアプリケーション側で行う施策であり、精度を落とすことにより、さまざまな計算上の恩恵を受けようとするものである。例えば、メモリ使用量の減少、メモリからの転送データ量の削減による高速化、キャッシュに留まるデータ数の増大、SIMD 演算で同時に処理できるデータ数の増大、保存するファイルサイズの削減、ファイル圧縮率の向上等が利点として挙げられる。一方でシミュレーション結果の改悪が起きることもあるため、解きたい問題に合わせた再現性能の検証が必要となる。国内では大気モデル NICAM の力学コアについて、理想実験を用いた単精度シミュレーション結果の精度検証が行われ、その差は十分に小さいことが示された [79]。また欧州 ECMWF は、2021 年 5 月より現業予報を単精度で行うよう変更し、その代わりに鉛直層を増加させることによって、ほぼ同じ計算リソースで総合的なシミュレーション精度を向上させたと報告している [80]。

後者に挙げた不揮発性メモリは、ファイルストレージとメインメモリの中間に位置するような大容量のメモリである。この容量を活かして、より大きなメモリ空間を必要とする問題を計算することが期待されるが、前述の通り容量の大きいメモリは低速であったり、レイテンシが長いという特徴も併せ備えている。演算装置からキャッシュ、メインメモリに連なるデータ格納場所の階層構造がもう一段深くなり、さらに複雑化するという点も技術的課題として考えられる。これらの難点を打破し、高速な計算を実現するため、システムソフトウェアの研究開発の進展が望まれる。その際には、気象・気候モデルの開発者が協

調して研究を支援し、アプリケーションにとって有効かつ望ましいハードウェアの進化が行われるべきである。

プログラム・性能の移植性の問題

向こう 10 年のスーパーコンピュータのトレンドとして、GPU を用いた計算機が大勢を占めることは想像に難くない。近年の高性能計算の新たな需要は機械学習が牽引しており、多くの機械学習ライブラリが活用する GPU への研究開発投資や生産設備投資が増大している。結果として、計算機の調達コストは GPU を利用した方が抑えられる。今後利用可能な計算資源の中で GPU の占める割合が大きくなる場合、GPU 上で計算を行うことの可能なソフトウェアに有利に働く場面が多くなると予想される。しかし、気象・気候モデルを GPU に対応させるのは一般的に困難である。これは、データ転送律速型のアプリケーションであることと同時に、特定の区間が計算時間の大部分を占める「ホットスポット」が存在しないため、数十万行にわたるモデルコードの全体を GPU 上で計算しないといけないためである (例えば Yashiro et al., 2016[81], Lawrence et al., 2018[82])。モデル開発者はハードウェアテクノロジーの変革のたびに大移植作業を行いたくないと考えており、そのような要請から、Fortran や C 言語でのソフトウェア開発をやめ、ドメイン特化言語 (Domain Specific Language, DSL) や新たな設計で作られたプログラム言語を用いて、アルゴリズムの記述と計算機への最適化を分離するような開発の方向性が提案された。海外では既に、このような可搬性と高性能を両立させるプログラミング環境への移行が試験的なフェーズを終え、実際にプロダクションランを行う域に達している。例を挙げると、米国で開発されている E3SM は C++ のテンプレートフレームワークである kokkos [83] を利用して力学コアと主要な物理課程スキームを置き換え、世界トップクラスの GPU スパコンを用いた計算性能評価を進めている (例えば Bertagna et al., 2019 [84])。また、NOAA の新現業予報システム UFS の中核となる大気モデル FV3 は、地球物理流体力学研究所 (GFDL) とアレン人工知能研究所の研究者らの手によって、スイスのスーパーコンピュータセンターが開発した GridTools および GT4Py を用いた記述に置き換えられつつある [85, 86]。GridTools は C++ のテンプレートフレームワークであり、GT4Py はアルゴリズム開発者が Python で記述したコードを変換し、GridTools フレームワークに適用させるライブラリである。一方、カリフォルニア工科大学、マサチューセッツ工科大学、NASA ジェット推進研究所による気候モデリングアライアンス CliMA [87] は、変数の型変換や GPU の利用が容易な新しいプログラミング言語である Julia を用いて、ClimateMachine.jl をはじめとする新たな気候モデルソフトウェア群を整備している (例えば Sridhar et al., 2021 [88])。欧州では、ECMWF が気候モデルの格子生成、離散化、プロセス並列化などを容易に切り替えられる DSL 言語 Atlas[89] を開発し、従来のスペクトルモデルから格子モデルへの移行や、マシンアーキテクチャの移行をスムーズに行おうとしている。物理過程についても、前述の GridTools/GT4Py を用いた実装が進められている。英国気象局は次世代モデル開発基盤として PSyclone というドメイン特化コンパイラを開発し、DSL で記述した新たな大気・海洋モデルの力学コアのプログラムコードをマシンに合わせた形で生成する機能のほか、既存の Fortran コードを解析して変換する機能を実現した [90]。また、EU の次世代地球システムモデル開発のための国際共同プロジェクト NextGEMS(<https://nextgems-h2020.eu/>)に関連して、ドイツ気象局とマックスプランク気象研究所が共同で開発した気候モデル ICON を、GridTools/GT4Py を用いて置き換えるプロジェクト (<https://exclaim.ethz.ch/the-project.html>) が進行している。

人工知能技術の活用

ディープニューラルネットワークをはじめとする機械学習技術の急速な進展は、気象・気候分野においても無視できないものとなった。この技術はまず気象・気候予測データから意味のある現象を抽出する試みから開始された。NICAM の計算結果から台風の「卵」を検出する試みは機械学習研究のコミュニティで広く行われている公開コンペの形で開催され、気象学と情報科学分野の新たな共同研究の繋がりを形成した [91]。気候データセットを用いた極端現象の抽出は 2018 年のゴードン・ベル賞に選出され [92]、その DNN アルゴリズムは現在機械学習のベンチマークである MLperf の一部として広く利用されている [93]。低解像度のシミュレーション結果から、高解像度の気象場分布を推定・生成する「超解像」という技術についても、ダウンスケーリングを用いた影響評価に用いられつつある (例えば Baño-Medina, 2019[94], Serifi et al., 2021[95], Vaughan et al., 2022[96])。

機械学習技術をモデルシミュレーションの高速化に利用するという考え方も台頭してきている。物理モデルの結果を用いてニューラルネットワークを学習させ、「代理モデル」として利用することにより、計算時間を 100-1,000 倍高速化させようというものである。長時間の計算には向かない超高解像度計算や、爆発的に増加する観測データを用いて、まずは物理コンポーネントの中でも雲過程 [97, 98] や放射過程 [99] などのデータ駆動型モデルの構築が研究されている。また、粗い空間解像度の気候モデルの各格子点に高解像度 2 次元大気モデルを埋め込む「スーパーパラメタリゼーション」という手法の延長として、埋め込まれた子モデルをデータ駆動型モデルで代替する試みも進められている [100, 101]。

新たな計算原理等に基づくコンピュータの利用

量子コンピュータやニューロモーフィックコンピュータなどの、ノイマン型とは異なる原理に基づくコンピュータが台頭してきている。これらのコンピュータは今のところ特定のアルゴリズムの計算を劇的に高速化するが、気象・気候モデルが現状利用しているアルゴリズムは多岐に渡り、その全てを新計算原理によってカバーできるわけではないため、まだ応用について検討が始められたばかりである。しかし、当初は特定の用途のために開発された GPU が世代を重ねることでより汎用化され、現在のように気象モデルの大半のコンポーネントを GPU 上で計算できるようになったという歴史を鑑みても、さまざまなハードウェア・ソフトウェアの研究開発により実用的な利用が進む可能性はある。また、特定の物理課程については新計算原理を活用したパラメタリゼーション研究やモデリング研究が行われると考えられる。

近年利用が活発化している計算機コンポーネントに、FPGA がある。FPGA はプログラミングされたアルゴリズムを回路で再現するものであり、気象・気候モデルを含むデータ転送律速型のアプリケーションの計算を高速化、省エネ化する。現状における FPGA 利用の課題はチップサイズであり、巨大な気象モデルのソースコードをまるまるチップ上に再現するには回路面積が足りない。高位合成と呼ばれる回路作成についても時間がかかり過ぎて実用的ではないという問題がある。しかし FPGA についても、今後の技術進展によって気象モデルの一部または全部を FPGA で計算し高速化するといったことが現実になることが期待され (例えば Ashworth et al., 2019[102])、モデル側の研究開発についても、積極的な検討を行うべきである。

参考文献

- [1] IPCC. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Vol. In Press. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, US, 2021.
- [2] Mei, W. and S.-P. Xie. Intensification of landfalling typhoons over the northwest Pacific since the late 1970s. *Nat. Geosci.*, Vol. 9, No. 10, pp. 753–757, 2016. <https://doi.org/10.1038/ngeo2792>.
- [3] Yamaguchi, M. and S. Maeda. Increase in the number of tropical cyclones approaching Tokyo since 1980. *J. Meteorol. Soc. Japan Ser. II*, Vol. 98, No. 4, pp. 775–786, 2020. <https://doi.org/10.2151/jmsj.2020-039>.
- [4] Kossin, J. P. A global slowdown of tropical-cyclone translation speed. *Nature*, Vol. 558, No. 7708, pp. 104–107, 2018. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0158-3>.
- [5] Bauer, P., B. Stevens, and W. Hazeleger. A digital twin of Earth for the green transition. *Nat. Climate Change*, Vol. 11, No. 2, pp. 80–83, 2021. <https://doi.org/10.1038/s41558-021-00986-y>.
- [6] Miyamoto, Y., Y. Kajikawa, R. Yoshida, T. Yamaura, H. Yashiro, and H. Tomita. Deep moist atmospheric convection in a subkilometer global simulation. *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 40, No. 18, pp. 4922–4926, 2013. <https://doi.org/10.1002/grl.50944>.
- [7] Prein, A. F., R. M. Rasmussen, D. Wang, and S. E. Giangrande. Sensitivity of organized convective storms to model grid spacing in current and future climates. *Philos. Trans. R. Soc., A*, Vol. 379, No. 2195, p. 20190546, 2021. <http://doi.org/10.1098/rsta.2019.0546>.
- [8] Ito, J., T. Oizumi, and H. Niino. Near-surface coherent structures explored by large eddy simulation of entire tropical cyclones. *Sci. Rep.*, Vol. 7, No. 3798, 2017. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-03848-w>.
- [9] Satoh, M., B. Stevens, F. Judt, M. Khairoutdinov, S.-J. Lin, W. M. Putman, and P. Düben. Global cloud-resolving models. *Curr. Climate Change Rep.*, Vol. 5, No. 3, pp. 172–184, 2019. <https://doi.org/10.1007/s40641-019-00131-0>.
- [10] Tomita, H., H. Miura, S. Iga, T. Nasuno, and M. Satoh. A global cloud-resolving simulation: Preliminary results from an aqua planet experiment. *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 32, No. 8, p. L08805, 2005. <https://doi.org/10.1029/2005GL022459>.
- [11] Miura, H., M. Satoh, T. Nasuno, A. T. Noda, and K. Oouchi. A Madden-Julian oscillation event realistically simulated by a global cloud-resolving model. *Science*, Vol. 318, No. 5857, pp. 1763–1765, 2007. <http://doi.org/10.1126/science.1148443>.
- [12] Grabowski, W. W. and P. K. Smolarkiewicz. CRCP: A cloud resolving convection parameterization for modeling the tropical convecting atmosphere. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, Vol. 133, No. 1–4, pp. 171–178, 1999. [https://doi.org/10.1016/S0167-2789\(99\)00104-9](https://doi.org/10.1016/S0167-2789(99)00104-9).

- [13] Grabowski, W. W. Coupling cloud processes with the large-scale dynamics using the cloud-resolving convection parameterization (CRCP). *J. Atmos. Sci.*, Vol. 58, No. 9, pp. 978–997, 2001. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(2001\)058<0978:CCPWTl>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(2001)058<0978:CCPWTl>2.0.CO;2).
- [14] Stevens, B. and Coauthors. DYAMOND: the DYnamics of the Atmospheric general circulation Modeled On Non-hydrostatic Domains. *Prog. Earth Planet. Sci.*, Vol. 6, No. 61, 2019. <https://doi.org/10.1186/s40645-019-0304-z>.
- [15] Grabowski, W. W. Towards global large eddy simulation: Super-parameterization revisited. *J. Meteorol. Soc. Japan. Ser. II*, Vol. 94, No. 4, pp. 327–344, 2016. <https://doi.org/10.2151/jmsj.2016-017>.
- [16] Yamaguchi, T., G. Feingold, and V. E. Larson. Framework for improvement by vertical enhancement: A simple approach to improve representation of low and high-level clouds in large-scale models. *J. Adv. Model. Earth Syst.*, Vol. 9, No. 1, pp. 627–646, 2017. <https://doi.org/10.1002/2016ms000815>.
- [17] Yoshimura, H. Development of a nonhydrostatic global spectral atmospheric model using double Fourier series. In A. Zadra, editor, *Research Activities in Atmospheric and Oceanic Modeling*, Vol. 42 of *CAS/JSC WGNE*, pp. 3.05–3.06. WMO, 2012. https://wgne.net/bluebook/uploads/2012/individual-articles/03_Yoshimura_Hiromasa_WGNE_Yoshimura_1203.pdf.
- [18] Shima, S., K. Kusano, A. Kawano, T. Sugiyama, and S. Kawahara. The super-droplet method for the numerical simulation of clouds and precipitation: a particle-based and probabilistic microphysics model coupled with a non-hydrostatic model. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, Vol. 135, No. 642, pp. 1307–1320, 2009. <https://doi.org/10.1002/qj.441>.
- [19] Wyngaard, J. C. Toward numerical modeling in the “Terra Incognita”. *J. Atmos. Sci.*, Vol. 61, No. 14, pp. 1816–1826, 2004. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(2004\)061<1816:TNMitt>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(2004)061<1816:TNMitt>2.0.CO;2).
- [20] Kawai, Y. and H. Tomita. Numerical accuracy of advection scheme necessary for large-eddy simulation of planetary boundary layer turbulence. *Mon. Wea. Rev.*, Vol. 149, No. 9, pp. 2993–3012, 2021. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-20-0362.1>.
- [21] Kochkov, D., J. A. Smith, A. Alieva, Q. Wang, M. P. Brenner, and S. Hoyer. Machine learning-accelerated computational fluid dynamics. *Proc. Natl Acad. Sci.*, Vol. 118, No. 21, p. e2101784118, 2021. <https://doi.org/10.1073/pnas.2101784118>.
- [22] Tomita, H. and M. Satoh. A new dynamical framework of nonhydrostatic global model using the icosahedral grid. *Fluid Dyn. Res.*, Vol. 34, No. 6, p. 357, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.fluidyn.2004.03.003>.
- [23] Satoh, M., T. Matsuno, H. Tomita, H. Miura, T. Nasuno, and S. Iga. Nonhydrostatic icosahedral atmospheric model (NICAM) for global cloud resolving simulations. *J. Comput. Phys.*, Vol. 227, No. 7, pp. 3486–3514, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2007.02.006>.

- [24] Satoh, M. and Coauthors. The Non-hydrostatic Icosahedral Atmospheric Model: Description and development. *Prog. Earth Planet. Sci.*, Vol. 1, No. 18, 2014. <https://doi.org/10.1186/s40645-014-0018-1>.
- [25] Kodama, C. and Coauthors. The Nonhydrostatic ICosahedral Atmospheric Model for CMIP6 HighResMIP simulations (NICAM16-S): experimental design, model description, and impacts of model updates. *Geosci. Model Dev.*, Vol. 14, No. 2, pp. 795–820, 2021. <https://doi.org/10.5194/gmd-14-795-2021>.
- [26] Hasumi, H. CCSR Ocean Component Model (COCO) version 4.0. Vol. 25 of *CCSR Rep.*, pp. 1–103. Center for Climate System Research, The University of Tokyo, 2006. <https://repository.exst.jaxa.jp/dspace/handle/a-is/42981>.
- [27] 気象庁. IPCC の RCP8.5 シナリオを用いた非静力学地域気候モデルによる日本の気候変化予測. 地球温暖化予測情報第9巻, 79 pp., 2017. <https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/GWP/>.
- [28] Mizuta, R. and Coauthors. Over 5,000 years of ensemble future climate simulations by 60-km global and 20-km regional atmospheric models. *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*, Vol. 98, No. 7, pp. 1383–1398, 2017. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-16-0099.1>.
- [29] Ishii, M. and N. Mori. d4PDF: large-ensemble and high-resolution climate simulations for global warming risk assessment. *Prog. Earth Planet. Sci.*, Vol. 7, No. 58, 2020. <https://doi.org/10.1186/s40645-020-00367-7>.
- [30] Imada, Y., M. Watanabe, H. Kawase, H. Shiogama, and M. Arai. The July 2018 high temperature event in Japan could not have happened without human-induced global warming. *SOLA*, Vol. 15A, pp. 8–12, 2019. <https://doi.org/10.2151/sola.15A-002>.
- [31] IPCC. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2013. 1535 pp.
- [32] Smith, D. M., R. Eade, A. A. Scaife, and Coauthors. Robust skill of decadal climate predictions. *npj Clim. Atmos. Sci.*, Vol. 2, No. 13, 2019. <https://doi.org/10.1038/s41612-019-0071-y>.
- [33] Boer, G. J. and Coauthors. The decadal climate prediction project (DCPP) contribution to CMIP6. *Geosci. Model Dev.*, Vol. 9, No. 10, pp. 3751–3777, 2016. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-3751-2016>.
- [34] Tatebe, H. and Coauthors. Description and basic evaluation of simulated mean state, internal variability, and climate sensitivity in MIROC6. *Geosci. Model Dev.*, Vol. 12, No. 7, pp. 2727–2765, 2019. <https://doi.org/10.5194/gmd-12-2727-2019>.
- [35] Wilby, R. L. and S. Dessai. Robust adaptation to climate change. *Wea.*, Vol. 65, No. 7, pp. 180–185, 2010. <https://doi.org/10.1002/wea.543>.
- [36] Hawkins, E. and R. Sutton. The potential to narrow uncertainty in regional climate predictions. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, Vol. 90, No. 8, pp. 1095–1107, 2009. <https://doi.org/10.1175/2009BAMS2607.1>.
- [37] 気象庁. 日本の気候変動 2020 –大気と陸・海洋に関する観測・予測評価報告書–, 2020.

- <https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/ccj/index.html>.
- [38] 環境省. 気候変動影響評価報告書（総説）, 2020. <https://www.env.go.jp/earth/気候変動影響評価報告書（総説）.pdf>.
- [39] Ashie, Y. and T. Kono. Urban-scale CFD analysis in support of a climate-sensitive design for the Tokyo Bay area. *Int. J. Climatol.*, Vol. 31, No. 2, pp. 174–188, 2010. <https://doi.org/10.1002/joc.2226>.
- [40] Nishizawa, S., H. Yashiro, Y. Sato, Y. Miyamoto, and H. Tomita. Influence of grid aspect ratio on planetary boundary layer turbulence in large-eddy simulations. *Geosci. Model Dev.*, Vol. 8, No. 10, pp. 3393–3419, 2015. <https://doi.org/10.5194/gmd-8-3393-2015>.
- [41] Sato, Y., S. Nishizawa, H. Yashiro, Y. Miyamoto, Y. Kajikawa, and H. Tomita. Impacts of cloud microphysics on trade wind cumulus: which cloud microphysics processes contribute to the diversity in a large eddy simulation? *Prog. Earth Planet. Sci.*, Vol. 2, No. 23, 2015. <https://doi.org/10.1186/s40645-015-0053-6>.
- [42] Richardson, L. F. *Weather prediction by numerical process*. Cambridge University Press, 1922.
- [43] Charney, J. G., R. Fjörtoft, and J. Neumann. Numerical integration of the barotropic vorticity equation. *Tellus*, Vol. 2, No. 4, pp. 237–254, 1950.
- [44] 気象庁. 数値予報 60 年誌. 60 pp., 2019. https://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/whitep/doc_1-3-2-1/all.pdf.
- [45] Kawabata, T., M. Kunii, K. Bessho, T. Nakazawa, N. Kohno, Y. Honda, and K. Sawada. Reanalysis and reforecast of Typhoon Vera (1959) using a mesoscale four-dimensional variational assimilation system. *J. Meteorol. Soc. Japan. Ser. II*, Vol. 90, No. 4, pp. 467–491, 2012. <https://doi.org/10.2151/jmsj.2012-403>.
- [46] Oizumi, T., K. Saito, J. Ito, T. Kuroda, and L. Duc. Ultra-high-resolution numerical weather prediction with a large domain using the K computer: A case study of the Izu Oshima heavy rainfall event on October 15-16, 2013. *J. Meteorol. Soc. Japan. Ser. II*, Vol. 96, No. 1, pp. 25–54, 2018. <https://doi.org/10.2151/jmsj.2018-006>.
- [47] Oizumi, T., K. Saito, L. Duc, and J. Ito. Ultra-high resolution numerical weather prediction with a large domain using the K computer. Part 2: The case of the Hiroshima heavy rainfall event on August 2014 and dependency of simulated convective cells on model resolutions. *J. Meteorol. Soc. Japan. Ser. II*, Vol. 98, No. 6, pp. 1163–1182, 2020. <https://doi.org/10.2151/jmsj.2020-060>.
- [48] 気象庁. 2030 年に向けた数値予報技術開発重点計画. 41 pp., 2018. https://www.jma.go.jp/jma/press/1810/04b/nwp_strategic_plan_towards_2030_2body.pdf.
- [49] Duc, L., T. Kawabata, K. Saito, and T. Oizumi. Forecasts of the July 2020 Kyushu heavy rain using a 1000-member ensemble Kalman filter. *SOLA*, Vol. 17, pp. 41–47, 2021. <https://doi.org/10.2151/sola.2021-007>.
- [50] 気象庁数値予報開発センター. 局地解析へのハイブリッド同化手法の導入. 数値予報開発センター年報, pp. 102-105, 2022.

- https://www.jma.go.jp/jma/kishou/books/npdc/r03/npdc_annual_report_r03.pdf.
- [51] 気象庁予報部. 次世代非静力学モデル asuca. 数値予報課報告・別冊第 60 号, 151 pp., 2014. https://www.jma.go.jp/jma/kishou/books/nwpreport/60/No60_all.pdf.
 - [52] Morrison, H. and Coauthors. Confronting the challenge of modeling cloud and precipitation microphysics. *J. Adv. Model Earth Syst.*, Vol. 12, No. 8, p. e2019MS001689, 2020. <https://doi.org/10.1029/2019MS001689>.
 - [53] Hashino, T. and G. J. Tripoli. The Spectral Ice Habit Prediction System (SHIPS). part III: Description of the ice particle model and the habit-dependent aggregation model. *J. Atmos. Sci.*, Vol. 68, No. 6, pp. 1125–1141, 2011. <https://doi.org/10.1175/2011jas3666.1>.
 - [54] Shima, S., Y. Sato, A. Hashimoto, and R. Misumi. Predicting the morphology of ice particles in deep convection using the super-droplet method: Development and evaluation of SCALE-SDM 0.2.5-2.2.0, -2.2.1, and -2.2.2. *Geosci. Model Dev.*, Vol. 13, No. 9, pp. 4107–4157, 2020. <https://doi.org/10.5194/gmd-13-4107-2020>.
 - [55] Sato, Y., Y. Miyamoto, and H. Tomita. Large dependency of charge distribution in a tropical cyclone inner core upon aerosol number concentration. *Prog. Earth Planet. Sci.*, Vol. 6, No. 62, 2019. <https://doi.org/10.1186/s40645-019-0309-7>.
 - [56] Sato, Y., S. Hayashi, and A. Hashimoto. Difference in the lightning frequency between the July 2018 heavy rainfall event over central Japan and the 2017 northern Kyushu heavy rainfall event in Japan. *Atmos. Sci. Lett.*, Vol. 23, No. 1, p. e1067, 2022. <https://doi.org/10.1002/asl.1067>.
 - [57] Manabe, S. and R. T. Wetherald. Thermal equilibrium of the atmosphere with a given distribution of relative humidity. *J. Atmos. Sci.*, Vol. 24, No. 3, pp. 241–259, 1967. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1967\)024<0241:TEOTAW>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1967)024<0241:TEOTAW>2.0.CO;2).
 - [58] Manabe, S. and R. T. Wetherald. The effects of doubling the CO₂ concentration on the climate of a general circulation model. *J. Atmos. Sci.*, Vol. 32, No. 1, pp. 3–15, 1975. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1975\)032<0003:TEODTC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1975)032<0003:TEODTC>2.0.CO;2).
 - [59] Akiyoshi, H., T. Sugita, H. Kanzawa, and N. Kawamoto. Ozone perturbations in the Arctic summer lower stratosphere as a reflection of NO_x chemistry and planetary scale wave activity. *J. Geophys. Res.*, Vol. 109, No. D3304, 2004. <https://doi.org/10.1029/2003JD003632>.
 - [60] Shibata, K., M. Deushi, T. T. Sekiyama, and H. Yoshimura. Development of an MRI chemical transport model for the study of stratospheric chemistry. *Pap. Meteorol. and Geophys.*, Vol. 55, No. 3+4, pp. 75–119, 2005. <https://doi.org/10.2467/mripapers.55.75>.
 - [61] Friedlingstein, P. and Coauthors. Global carbon budget 2021. *Earth Syst. Sci. Data*, Vol. 14, No. 4, pp. 1917–2005, 2022. <https://doi.org/10.5194/essd-14-1917-2022>.
 - [62] Yashiro, H., Y. Kajikawa, Y. Miyamoto, T. Yamaura, R. Yoshida, and H. Tomita. Resolution dependence of the diurnal cycle of precipitation simulated by a global cloud-system resolving model. *SOLA*, Vol. 12, pp. 272–276, 2016. <https://doi.org/10.2151/sola.2016-053>.
 - [63] Sato, Y., H. Miura, H. Yashiro, D. Goto, T. Takemura, H. Tomita, and T. Nakajima. Unrealistically pristine air in the Arctic produced by current global scale models. *Sci. Rep.*, Vol. 6,

- No. 26561, 2016. <https://doi.org/10.1038/srep26561>.
- [64] Lamarque, J.-F. and Coauthors. The Atmospheric Chemistry and Climate Model Intercomparison Project (ACCMIP): overview and description of models, simulations and climate diagnostics. *Geosci. Model Dev.*, Vol. 6, No. 1, pp. 179–206, 2013. <https://doi.org/10.5194/gmd-6-179-2013>.
- [65] Shen, L., D. J. Jacob, M. Santillana, X. Wang, and W. Chen. An adaptive method for speeding up the numerical integration of chemical mechanisms in atmospheric chemistry models: application to GEOS-Chem version 12.0.0. *Geosci. Model Dev.*, Vol. 13, No. 5, pp. 2475–2486, 2020. <https://doi.org/10.5194/gmd-13-2475-2020>.
- [66] Kanaya, Y., X. Pan, T. Miyakawa, Y. Komazaki, F. Taketani, I. Uno, and Y. Kondo. Long-term observations of black carbon mass concentrations at Fukue Island, western Japan, during 2009–2015: constraining wet removal rates and emission strengths from East Asia. *Atmos. Chem. Phys.*, Vol. 16, No. 16, pp. 10689–10705, 2016. <https://doi.org/10.5194/acp-16-10689-2016>.
- [67] Kajino, M. and Coauthors. NHM-Chem, the Japan Meteorological Agency’s regional meteorology – chemistry model: Model evaluations toward the consistent predictions of the chemical, physical, and optical properties of aerosols. *J. Meteorol. Soc. Japan. Ser. II*, Vol. 97, No. 2, pp. 337–374, 2019. <https://doi.org/10.2151/jmsj.2019-020>.
- [68] Matsui, H. and M. Liu. Importance of supersaturation in Arctic black carbon simulations. *J. Climate*, Vol. 34, No. 19, pp. 7843–7856, 2021. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-20-0994.1>.
- [69] Kajino, M. and Coauthors. Deposition and dispersion of radio-caesium released due to the Fukushima nuclear accident: 2. Sensitivity to aerosol microphysical properties of Cs-bearing microparticles (CsMPs). *J. Geophys. Res.*, Vol. 126, No. 1, p. e2020JD033460, 2021. <https://doi.org/10.1029/2020JD033460>.
- [70] Katata, G., M. Kajino, T. Hiraki, M. Aikawa, T. Kobayashi, and H. Nagai. A method for simple and accurate estimation of fog deposition in a mountain forest using a meteorological model. *J. Geophys. Res.*, Vol. 116, No. D20, p. D20102, 2011. <https://doi.org/10.1029/2010JD015552>.
- [71] Matsui, H., D. S. Hamilton, and N. M. Mahowald. Black carbon radiative effects highly sensitive to emitted particle size when resolving mixing-state diversity. *Nat. Commun.*, Vol. 9, No. 3446, 2018. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-05635-1>.
- [72] Talagrand, O. and P. Courtier. Variational assimilation of meteorological observations with the adjoint vorticity equation. I: Theory. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, Vol. 113, No. 478, pp. 1311–1328, 1987. <https://doi.org/10.1002/qj.49711347812>.
- [73] Rabier, F. and Z. Liu. Variational data assimilation: theory and overview. *Proc. Seminar on Recent Developments in Data Assimilation for Atmosphere and Ocean*. pp. 29–43, Reading, UK, 2003. ECMWF. <https://www.ecmwf.net/sites/default/files/elibrary/2003/11805-variational-data-assimilation-theory-and-overview.pdf>.
- [74] Evensen, G. Sequential data assimilation with a nonlinear quasi-geostrophic model using Monte

- Carlo methods to forecast error statistics. *J. Geophys. Res.*, Vol. 99, No. C5, pp. 10143–10162, 1994. <https://doi.org/10.1029/94JC00572>.
- [75] Hunt, B. R., E. J. Kostelich, and I. Szunyogh. Efficient data assimilation for spatiotemporal chaos: A local ensemble transform Kalman filter. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, Vol. 230, No. 1–2, pp. 112–126, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.physd.2006.11.008>.
- [76] Kalnay, E., H. Li, T. Miyoshi, S. C. Yang, and J. Ballabrera-Poy. 4-D-Var or ensemble Kalman filter? *Tellus A Dyn. Meteorol. Oceanogr.*, Vol. 59, No. 5, pp. 758–773, 2007. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0870.2007.00261.x>.
- [77] R. Potthast, A. Walter, and A. Rhodin. A localized adaptive particle filter within an operational nwp framework. *Mon. Wea. Rev.*, Vol. 147, No. 1, pp. 345–362, 2019. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-18-0028.1>.
- [78] Sato, M. and Coauthors. Co-design for A64FX manycore processor and "Fugaku". In *SC '20: International Conference for High Performance Computing, Networking, Storage and Analysis*, pp. 1–15, online, 2020. IEEE. <https://doi.org/10.1109/SC41405.2020.00051>.
- [79] Nakano, M., H. Yashiro, C. Kodama, and H. Tomita. Single precision in the dynamical core of a nonhydrostatic global atmospheric model: Evaluation using a baroclinic wave test case. *Mon. Wea. Rev.*, Vol. 146, No. 2, pp. 409–416, 2018. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-17-0257.1>.
- [80] Lang, S. T. K. and Coauthors. More accuracy with less precision. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, Vol. 147, No. 741, pp. 4358–4370, 2021. <https://doi.org/10.1002/qj.4181>.
- [81] Yashiro, H., M. Terai, R. Yoshida, S. Iga, K. Minami, and H. Tomita. Performance analysis and optimization of Nonhydrostatic ICosahedral Atmospheric Model (NICAM) on the K computer and TSUBAME2.5. In *PASC '16: Proceedings of the Platform for Advanced Scientific Computing Conference*, No. 3, pp. 1–8, Lausanne, Switzerland, 2016. Association for Computing Machinery. <https://doi.org/10.1145/2929908.2929911>.
- [82] Lawrence, B. N. and Coauthors. Crossing the chasm: how to develop weather and climate models for next generation computers? *Geosci. Model Dev.*, Vol. 11, No. 5, pp. 1799–1821, 2018. <https://doi.org/10.5194/gmd-11-1799-2018>.
- [83] Edwards, H. C., C. R. Trott, and D. Sunderland. Kokkos: Enabling manycore performance portability through polymorphic memory access patterns. *J. Parallel Distrib. Comput.*, Vol. 74, No. 12, pp. 3202–3216, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.jpdc.2014.07.003>.
- [84] Bertagna, L., M. Deakin, O. Guba, D. Sunderland, A. M. Bradley, I. K. Tezaur, M. A. Taylor, and A. G. Salinger. HOMEXX 1.0: a performance-portable atmospheric dynamical core for the Energy Exascale Earth System Model. *Geosci. Model Dev.*, Vol. 12, No. 4, pp. 1423–1441, 2019. <https://doi.org/10.5194/gmd-12-1423-2019>.
- [85] Fuhrer, O. and Coauthors. Enabling performance portability for FV3/xSHIELD using a Python-based domain-specific language. *ESCAPE-2 Final Dissemination Workshop*. online, 2021. https://www.hpc-escape2.eu/sites/default/files/2021-09/20210703_fuo_ESiWACEDisseminationWorkshop.pdf.

- [86] Ben-Nun, T. and Coauthors. Productive performance engineering for weather and climate modeling with Python. arXiv, 2022. <https://doi.org/10.48550/ARXIV.2205.04148>.
- [87] Schneider, T., N. Jeevanjee, and R. Socolow. Accelerating progress in climate science. *Phys. Today*, Vol. 74, No. 6, pp. 44–51, 2021. <https://doi.org/10.1063/PT.3.4772>.
- [88] Sridhar, A. and Coauthors. Large-eddy simulations with ClimateMachine v0.2.0: a new open-source code for atmospheric simulations on GPUs and CPUs. *Geosci. Model Dev.*, Vol. 15, No. 15, pp. 6259–6284, 2022. <https://doi.org/10.5194/gmd-15-6259-2022>.
- [89] Deconinck, W. and Coauthors. Atlas : A library for numerical weather prediction and climate modelling. *Comput. Phys. Commun.*, Vol. 220, pp. 188–204, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.cpc.2017.07.006>.
- [90] Adams, S. V. and Coauthors. LFRic: Meeting the challenges of scalability and performance portability in Weather and Climate models. *J. Parallel Distrib. Comput.*, Vol. 132, pp. 383–396, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jpdc.2019.02.007>.
- [91] Matsuoka, D., M. Nakano, D. Sugiyama, and S. Uchida. Deep learning approach for detecting tropical cyclones and their precursors in the simulation by a cloud-resolving global nonhydrostatic atmospheric model. *Prog. Earth Planet. Sci.*, Vol. 5, No. 80, 2018. <https://doi.org/10.1186/s40645-018-0245-y>.
- [92] Kurth, T. and Coauthors. Exascale deep learning for climate analytics. In *Proceedings of the International Conference for High Performance Computing, Networking, Storage, and Analysis (SC '18)*, Piscataway, NJ, 2018. IEEE Press. <https://doi.org/10.1109/SC.2018.00054>.
- [93] Farrell, S. and Coauthors. MLPerfTM HPC: A holistic benchmark suite for scientific machine learning on HPC systems. In *2021 IEEE/ACM Workshop on Machine Learning in High Performance Computing Environments (MLHPC)*, pp. 33–45, St. Louis, MO, USA, 2021. IEEE. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2110.11466>.
- [94] Baño-Medina, J., R. Manzananas, and J. M. Gutiérrez. Configuration and intercomparison of deep learning neural models for statistical downscaling. *Geosci. Model Dev.*, Vol. 13, No. 4, pp. 2109–2124, 2020. <https://doi.org/10.5194/gmd-13-2109-2020>.
- [95] Serifi, A., T. Günther, and N. Ban. Spatio-temporal downscaling of climate data using convolutional and error-predicting neural networks. In G. Wang, editor, *Front. Climate*, Sec. Predictions and Projections, pp. 1–15. april 2021. <https://doi.org/10.3389/fclim.2021.656479>.
- [96] Vaughan, A., W. Tebbutt, J. S. Hosking, and R. E. Turner. Convolutional conditional neural processes for local climate downscaling. *Geosci. Model Dev.*, Vol. 15, No. 1, pp. 251–268, 2022. <https://doi.org/10.5194/gmd-15-251-2022>.
- [97] Seifert, A. and S. Rasp. Potential and limitations of machine learning for modeling warm-rain cloud microphysical processes. *J. Adv. Model. Earth Syst.*, Vol. 12, No. 12, p. e2020MS002301, 2020. <https://doi.org/10.1029/2020MS002301>.
- [98] Grundner, A., T. Beucler, P. Gentine, F. Iglesias-Suarez, M. A. Giorgetta, and V. Eyring. Deep learning based cloud cover parameterization for ICON. arXiv, 2021.

- <https://doi.org/10.48550/ARXIV.2112.11317>.
- [99] Chevallier, F., J.-J. Morcrette, F. Ch  r  y, and N. A. Scott. Use of a neural-network-based long-wave radiative-transfer scheme in the ECMWF atmospheric model. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, Vol. 126, No. 563, pp. 761–776, 2000. <https://doi.org/10.1002/qj.49712656318>.
- [100] Rasp, S., M. S. Pritchard, and P. Gentine. Deep learning to represent subgrid processes in climate models. *Proc. Natl Acad. Sci.*, Vol. 115, No. 39, pp. 9684–9689, 2018. <https://doi.org/10.1073/pnas.1810286115>.
- [101] Yuval, J., P. A. O’Gorman, and C. N. Hill. Use of neural networks for stable, accurate and physically consistent parameterization of subgrid atmospheric processes with good performance at reduced precision. *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 48, No. 6, p. e2020GL091363, 2021. <https://doi.org/10.1029/2020GL091363>.
- [102] Ashworth, M., G. D. Riley, A. Attwood, and J. Mawer. First steps in porting the LFRic weather and climate model to the FPGAs of the EuroExa architecture. *Sci. Program.*, Vol. 2019, No. 7807860, 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/7807860>.

付録 A

用語集

用語	解説
A-Z	
CFL 条件	クーラン条件ともいう。離散化された運動方程式で数値解析を行う際に、用いる時間ステップ Δt の値が、実際の波動が隣り合う格子に伝達するまでの時間よりも小さくなければならないという制約条件。
MJO	マッデン・ジュリアン振動は、水平方向に数 1000km にわたる巨大な積乱雲群（対流活動が活発な領域）が、赤道付近を東に向かって進んでいく現象。30～60 日周期で繰り返し発生する大気変動の一つだが、数値モデルでの再現が難しい現象の一つとして知られている。
あ行	
アンサンブル実験	シミュレーションモデルに対して与える条件のわずかな違いにより結果に差がもたらされる場合に、少しずつ条件を変えて多数の実験を行うことで、結果の統計的な扱いを可能にする数値実験手法。このときの個々の実験をアンサンブルメンバーと呼び、この数が多いほど結果の統計的有意性は高くなる。
か行	
気候モデル	大気や海洋の運動方程式やエネルギー伝達に関わる方程式、格子スケール以下の空間規模を持つ現象を記述するためのパラメタ化といった支配方程式を数値的に解くことで、エルニーニョなどの気候の内部振動や、地球温暖化など外的要因による気候の変化の再現や予測を行うシミュレーションモデル。支配方程式を大胆に簡略化した簡易気候モデルも含めることがあるが、本稿では、第 1 原理としての支配方程式を直接数値的に解く大気海洋結合大循環モデルのことを指している。

（次ページに続く）

用語	解説
季節内振動現象	中緯度帯にみられる高低気圧等の総観規模現象に比べて長く、季節変化より短い時間スケール (およそ 10 日～90 日周期) の現象を総称して季節内振動現象と呼ぶ。有名な季節内振動現象として、地球規模の活発な積雲活動域が熱帯を東進していく Madden-Julian 振動や、アジアにおけるモンスーン活動が知られており、中長期予報を行う際の重要な現象と考えられている。
球面調和関数展開	球面調和関数は完全性をもち、球面上の任意の連続関数を一意に展開できる。このため、球面上のスカラー場の表現に用いられる。
境界層	大気層のうち、地表面に最も近い大気層。正式には大気境界層という。地表面の影響を熱や摩擦応力などを介して強く受ける。境界層の厚さは日変化や季節変化、場所による変化があるが、熱対流が卓越しているときは、高度 1000m～2000m に達する。大気境界層内では、乱流による熱、運動量、物質の輸送が卓越している。
極端現象	極端な高温/低温や強い雨など、特定の指標を越える現象のこと。
雲フィードバック	外力 (例えば温室効果気体の増加) が直接的にもたらす気候変化によって雲の頻度や高さ、厚さが変化し、それが気候変化をさらに増幅 (正のフィードバック)、もしくは減衰 (負のフィードバック) させる働き。
さ行	
地球温暖化	気候変動の一種で、温室効果ガスによって地球表面の大気や海洋の平均温度が長期的に上昇する現象。ここで温室効果とは、大気圏を有する惑星の表面から発せられる放射 (電磁波により伝達されるエネルギー) が大気圏外に届く前にその一部が大気中の物質に吸収されることで、そのエネルギーが大気圏より内側に滞留し、結果として大気圏内部の気温が上昇する現象。温室効果ガスとは、大気圏にあり、地表から放射された赤外線の一部を吸収することにより温室効果をもたらす気体の総称であり、対流圏オゾン、二酸化炭素、メタンなどが該当する。
た行	
デジタルツイン	実世界の測定データによってリアルタイムで駆動される、仮想世界上に構築された実世界のデジタル複製。元々は工業生産や宇宙技術から産まれた概念であるが、AI やクラウド技術の発達で、現在では地球環境を含め幅広い分野で用いられている。
トレーサ	一般的に大気や海洋の流れの影響を受けて、モデル内を移動する微量気体成分、溶存成分や個体のことを (パッシブ) トレーサーと呼ぶ。海洋生態系モデルにおいては栄養塩、植物・動物プランクトンや魚類がトレーサにあたる。

(次ページに続く)

用語	解説
な行	
は行	
パラメータ化, パラメタリゼーション	連続流体の性質を持つ大気を数値モデル化する際、有限個の格子や波数で表現する必要がある。このとき、モデル格子で表現できない格子サイズよりも小さなスケールの現象が格子スケールの現象に及ぼす影響が無視できないことがある。そのとき、格子の物理量を用いて、格子サイズよりも小さな現象が格子スケールに及ぼす影響を表現することをパラメータ化といい、その手法のことをパラメタリゼーションという。
パリ協定	地球温暖化対策に関わる国際的な法的枠組み。2015 年にフランス・パリで開催された国連気候変動枠組条約第 21 回締約国会議 (COP21) で採択された。気候変動枠組条約に加盟する 196 カ国全ての国が削減目標・行動をもって参加することをルール化した。世界共通の長期目標として、「世界的な平均気温上昇を産業革命以前に比べて 2C より十分低く保つとともに、1.5C に抑える努力を追求すること」が掲げられている（全国地球温暖化防止活動推進センターによる資料* ¹ を一部抜粋）。
非静水圧	大気や海洋の支配方程式を考える際、水平方向に十分大きな現象（気象では数十キロ以上）に着目する場合は、重力と鉛直方向の気圧傾度力が釣り合っていると近似（静水圧近似または静水圧近似と呼ぶ）することができる。全球を対象とした多くの大気・海洋モデルでは、静水圧近似した方程式が用いられている。一方、より細かな現象に着目する場合などは、静水圧近似が成り立たず、鉛直方向の運動方程式を陽に考慮する必要がある。このような方程式を、非静水圧の方程式と呼ぶ。
微物理過程	大気中で雲を構成する水滴・氷晶（雲粒）が、発生してから、雨・雪などの降水現象として地表面に落下する、もしくは蒸発により消滅するまでの一連の成長・消滅過程をさす。雲粒同士が大気中で衝突して併合する過程、雲粒が凍結・融解する過程などがある。
フーリエモード展開	時間微分を含む偏微分方程式を、正弦波の重ね合わせであるフーリエ級数に変換すること。複雑な波動を単純な波の重ね合わせとして表現することができる。
ブシネスク近似	流体を非圧縮性とし、圧力の変化に伴う密度変化は無視するが、温度変化に伴う密度変化は考慮する近似手法。
(平衡) 気候感度	大気中の CO ₂ 濃度が倍増した時に実現する、（平衡状態における）全球平均した地上気温の上昇量。詳しい解説は（吉森 et al. 2012）を参照のこと。

(次ページに続く)

*¹ https://www.jccca.org/global-warming/trend-world/paris_agreement (2022 年 5 月 4 日閲覧)

用語	解説
ま行	
メソ降水系	水平スケールが 100km 程度 (メソスケール) の積乱雲の集合体である。単純な集合体ではなく、上昇・下降流域といった構造を持つ「系」であるため、単一の積乱雲に比べて寿命が長い (6 時間以上)。大気の状態や地域特性によって形態を変え、停滞すると同じ場所に多量の降水をもたらす。
ら行	
力学コア	気象・気候モデルにおいて、流体力学の方程式系を解く部分。有限差分法、有限体積法、有限要素法などの格子ステンシル計算や、スペクトル法 (フーリエ変換、ルジャンドル変換) を用いて計算され、雲微物理や大気放射などの諸物理過程の計算部分と対比して用いられる。

付録 B

執筆者一覧

気象・気候		
執筆者		
足立 幸穂	理化学研究所 計算科学研究センター 複合系気候科学研究チーム	研究員
伊藤 純至	東北大学 理学研究科	准教授
大越智 幸司	海洋研究開発機構 地球環境部門 環境変動予測研究センター 地球システムモデル開発応用グループ	准研究副主任
大塚 成徳	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	研究員
川崎 高雄	東京大学 大気海洋研究所 気候システムモデリング研究部門	特任助教
川畑 拓矢	気象研究所 気象観測研究部 第4研究室	室長
河宮 未知生	海洋研究開発機構 地球環境部門 環境変動予測研究センター	センター長
小玉 知央	海洋研究開発機構 地球環境部門 環境変動予測研究センター 雲解像モデル開発応用グループ	副主任研究員
佐藤 陽祐	北海道大学大学院理学研究科	准教授
佐藤 芳昭	気象庁 情報基盤部 数値予報課 数値予報モデル基盤技術開発室	室長
滝川 雅之	海洋研究開発機構 北極環境変動総合研究センター 北極化学物質研究グループ	グループリーダー
寺崎 康児	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（現 気象研究所 気象観測研究部 第4研究室）	研究員
西澤 誠也	理化学研究所 計算科学研究センター 複合系気候科学研究チーム	研究員
八代 尚	国立環境研究所 地球システム領域 衛星観測研究室	主任研究員
三好 建正	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
執筆協力者		
大野 知紀	海洋研究開発機構 地球環境部門 環境変動予測研究センター 雲解像モデル開発応用グループ	特任研究員

（次ページに続く）

川瀬 宏明	気象研究所 応用気象研究部	主任研究員
富田 浩文	理化学研究所 計算科学研究センター 複合系気候科学研究チーム	チームリーダー
Le Duc	東京大学 工学系研究科 附属総合研究機構	助教
編集協力者		
佐賀 真理子	理化学研究所 計算科学研究センター 複合系気候科学研究チーム	研究 パート タイ マー

計算科学ロードマップ 2022
(気象気候分野抜粋版)
2023 年 6 月