

令和 6 年 5 月 25 日現在

機関番号：12601

研究種目：学術変革領域研究(B)

研究期間：2020～2022

課題番号：20H05727

研究課題名（和文）DNA気候学実現への挑戦的マネジメント

研究課題名（英文）Management for the deep-numerical-analysis climate science

研究代表者

三浦 裕亮（Miura, Hiroaki）

東京大学・大学院理学系研究科（理学部）・准教授

研究者番号：70415991

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 14,500,000円

研究成果の概要（和文）：学術変革B「DNA気候学への挑戦」の総括班は、プロジェクトの全体を取りまとめ、計画班の研究に進捗を促すような企画調整を行なった。国外2名、国内3名のアドバイザーから助言をもらいつつプロジェクトを進行した。雲解像気候学ワークショップ、全球雲解像気候学セミナー、DNA Climate Science Meeting等を開催し、研究グループ間の意思疎通に努めた。本領域研究の実施時期はCOVID-19に関する活動自粛の期間に被っており、対面コミュニケーションが制限された難しさがあった。しかし、若手を中心に多くの画期的成果を創出した。取りまとめ論文は国際的に注目された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

現在、気候予測を行う気候モデルは、雲・降水過程を精緻に表現できない。そのため、地球温暖化に伴う温度上昇や、将来の気象災害の変化について、信頼できる情報を提供することができない。本プロジェクトでは、世界に先駆けて開発を進めてきた全球雲解像モデルと、IPCC等へ貢献してきた気候モデルを高度化・高速化し、世界初の第6世代GCMの実現を目指した。富岳を利用して世界最高解像度の長期積分を実施した。また、雲解像モデルと気候モデルを融合する手法として、気候モデルの階層モデル化に取り組んだ。挑戦的モデル班は、雨粒の変形落下モデルや不連続ラーキン法の数値流体モデルのような先端的モデリングを研究した。

研究成果の概要（英文）：The management team of the "Challenge for the DNA-Climate Science" project coordinated the project as a whole, and planned and coordinated the research of the all teams to encourage their progress. Two international and three domestic advisors provided suggestions on the project. The group held the cloud-resolving climate science workshop, the global cloud-resolving climate science seminars, the DNA climate science meetings, and other events to promote communication among the research groups. The project period of two and a half years (plus one year extension), from October 2020 to March 2023 in effect, covered the period of COVID-19. Although there were difficulties that limited face-to-face communication, many groundbreaking results were produced, especially by young researchers.

研究分野：気象学、大気物理学

キーワード：第6世代GCM 全球雲解像モデル 気候モデル NICAM MIROC

1. 研究開始当初の背景

(1) 現在気候予測に利用されている気候モデル (GCM; Global Climate Model) は、静的な雲を仮定した 1 次元放射モデルであった第 1 世代 (1970 年頃) 3 次元大気循環を計算し雲を動的に診断した第 2 世代 (1980 年頃) 静的な海洋が結合した第 3 世代 (1990 年頃) 3 次元海洋循環が結合した第 4 世代 (2000 年頃) と進化し、複雑な化学反応や炭素循環を解析できる 2010 年以降の GCM は第 5 世代に相当する。

(2) しかし、第 5 世代 GCM では、台風などの顕著現象を十分に再現できない。さらに、雲は気候予測の不確実性の最大要因である。これは、第 5 世代 GCM が雲の生成・発達・衰退・消滅の時間変化を直接に計算できず、雲の広がり・厚みなどを大域的なエネルギー収支や局所的な気温・相対湿度などの大気状態から推定し、架空の雲の熱力学的・光学的効果を計算するにとどまっていることによる。

2. 研究の目的

(1) 学術変革 B 「DNA 気候学への挑戦」では、雲の存在をその時間変化まで陽に計算し、気候シミュレーションにおける台風などの再現性、及び、雲-放射相互作用の表現を変革する第 6 世代 GCM の実用化を目指した。

(2) 第 6 世代 GCM では、雲水が凝集して雨を生成したり、雲氷が凝集して雪を生成したり、雪と雪が衝突併合しつつ落下したり、雨が蒸発したりする雲の生成・消滅の物理プロセスを雲微物理の方程式を用いて数値計算し、雲に実体を持たせる。雲が物質として存在するようになるため、雲の広がりや厚みが正確に表現され、放射やエアロゾルとの相互作用を第一原理に近い階層から表現できるようになる。さらに、気相・液相・固相の水の相変化や移動が、流体力学の表現する流れと結合して起こり、マッデン・ジュリアン振動 (MJO) や台風内に内在する雲の階層構造が自ずから発現するようになる。

(3) 本研究では、設計図 (デオキシリボ核酸; DNA) に従って細胞や器官が自発的に形成される生命のあり方になぞらえ、ミクロの設計図 (雲微物理の方程式) に従って雲システムの階層構造を自発的に形成する第 6 世代 GCM を活用する新しい気候学を、DNA 気候学と称した。

(4) 気候研究推進の国際組織「世界気候研究計画」は解決すべき 7 項目のグランドチャレンジを掲げており、雲・循環・気候感度問題はその 1 つとなっている。より具体的には 1) 積乱雲と雲-放射相互作用、2) 組織化した積乱雲の気候系での役割、3) ストームトラック (移動性低気圧の通り道) の変動、4) 熱帯降水帯の変動の 4 項目が提案されている。本領域の目的は、第 5 世代 GCM ではアプローチが困難なこれらの重要課題の研究を可能にするべく、第 6 世代 GCM の開発を推進することである。

3. 研究の方法

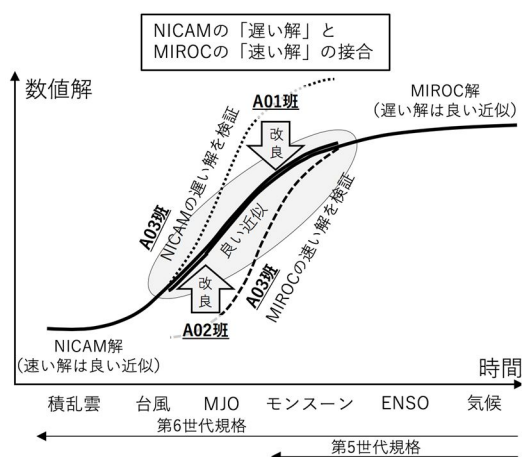


図 1: NICAM と MIROC の融合の概念図。

(1) 日本は、2002 年に運用を開始した地球シミュレータを活用して、第 6 世代 GCM のプロトタイプにあたる NICAM を世界に 10 年以上先行して実用化した。2010 年代前半には海面水温を与えた 20 年積分を実施し、2010 年代後半には 3 次元海洋循環を結合し、気候モデルとしての利用に向けて改良してきた。しかし、モンスーン循環のような比較的長い時間スケールの現象については検証が十分でなく、気候予測を実施できたとしてもその信頼性は乏しい (図 1: NICAM の「遅い解」)。

(2) 一方、第 5 世代 GCM の MIROC は「気候予測に関する政府間パネル」等に日本を代表して貢献してきた。エルニーニョ現象やモンスーン循環については世界トップレベルの再現性を誇るが、雲の階層構造が本質的に重要な MJO や台風は十分に再現できない (図 1: NICAM の「速い解」)。また、大規模並列計算機への対応が遅

れており、第 6 世代 GCM へ進化するにはプログラム構造の抜本的変更が必要とされている。

(3) このような状況に鑑み、NICAM と MIROC の両研究グループの協調によって世界初の第 6 世代 GCM を実現するため、NICAM が得意とする雲解像シミュレーションや並列計算と、MIROC が得意とする気候シミュレーションや長い時間スケールの現象の再現性を融合することを目指した。本領域のスタート時点では両モデルを融合する具体的方法は不明であり、既存の有力な方法を試しつつ、新しい方法を模索した。

4. 研究成果

(1) 総括班の役割は、NICAM と MIROC という 2 つのモデリンググループの交流を促し、異なる研究対象・研究手法などを互いに寛容に融合し、第 6 世代 GCM へ向けて研究を進めることで

- あった。コロナ禍において対面での交流が制限され、非常に難しい運営となった。
- (2) 国外の第6世代 GCM を具体的に意識し、また、将来的な第7世代 GCM への展開を考えるきっかけとするため、国内外の著名な研究者にアドバイザーをお願いした。国外のアドバイザーは David Randall 氏 (米国・CSU) と Bjorn Stevens 氏 (ドイツ・MPI)。国内のアドバイザーはプロジェクトの経験豊富な住明正氏 (東大)、地球システムモデル開発を主導する河宮未知夫氏 (JAMSTEC)、および、地球史的研究を専門とする田近英一氏 (東大)。
 - (3) 領域内で研究目標を共有し、一体感を醸成するために第1回雲解像気候学ワークショップ (2020年12月23日) と第2回雲解像気候学ワークショップ (2021年9月22日) を開催した。
 - (4) 外向きの競争意識を醸成するため、国際ワークショップを開催した。Workshop on the self-aggregation of clouds under the radiative-convective equilibrium (2022年3月9日)、The first DNA Climate Science Meeting (2022年4月26日)、UTokyo-NTU mini-Workshop (2022年11月14-15日)、NTU-UTokyo Workshop on Atmospheric Convection (2023年3月2-4日)。
 - (5) 若手研究者が中心となり、「雲解像気候学セミナー」を実施した。第1回「地球システムモデルによる気候-炭素循環シミュレーション」(羽島知洋)、第2回「スクラッチからのモデル作り」(富田浩文)、第3回「Predicting the morphology of ice particles in deep convection using the super-droplet method」(島伸一郎)、第4回「海洋モデルによる全球海洋熱塩循環のシミュレーション」(川崎高雄)、第5回「大気海洋結合モデルによる季節から数年規模予測」(片岡崇人)、第6回「数値気候モデル MIROC の雲・降水パラメタリゼーションの高度化」(道端拓朗)、第7回「領域雲解像モデルによる台風シミュレーションと強度変化のメカニズム」(辻野智紀)、第8回「火星大気・金星大気の全球非静力学シミュレーション (に向けて)」(櫻村博基)、第9回「古気候学とは何か?」(多田隆治)、第10回「米国 SciDAC 課題: E3SM における鉛直格子拡張手法のこれまでとこれから」(吉田龍二)、第11回「Clouds, Convective Self-Aggregation and Climate in a Multi-Model Ensemble of Radiative-Convective Equilibrium Simulations」(Allison Wing)、第12回「地球史のモデリング研究」(尾崎和海)、第13回「観測の価値」を最大化するデータ同化・予測手法の開発」(小槻峻司)、第14回「黒潮とメキシコ湾流の同期現象に関する諸問題」(神山翼)、第15回「Implementation of the 3D Smagorinsky turbulence scheme in the ICON model」(Junhong Lee)、第16回「Supermodelling as means to improve climate models and predictions」(Noel Sebastian Keenlyside)、第17回「Supermodeling: an interactive ensemble of models」(Francine Janneke Schevenhoven)。
 - (6) コロナ禍の自粛初期に、活動が制限された学生のためのオンライン談話会(セミナー)とオンライン相談会を開催した。第1回「MJO」(三浦裕亮)、第2回「北極圏の雲と観測」(小池真)、第3回「気候モデル(GCM)の歴史」(渡部雅浩)、第4回「インド洋の湧昇と気候変動」(升本順夫)、第5回「正20面体格子を利用した気象モデル」(三浦裕亮)、第6回「ニュージーランドで見た(い)地震と断層」(安藤亮輔)、第7回「気候モデルとハイパフォーマンスコンピューティング」(八代尚)。
 - (7) 大学院生が研究の解説コラムを執筆し、ホームページに掲載した。「モデル解像度と雲」(2021年8月6日)、「南シナ海の低気圧性ジャイア」(2021年9月21日)、「トランスパースラインとは?」(2021年10月11日)、「西部アラビア海の複雑な海面水温変動」(2021年11月25日)、「気候変動における海洋水温変動メカニズム」(2022年3月18日)、「海の換気」(2022年4月21日)、「放射対流平衡」(2022年7月14日)、「太平洋とインド洋を繋ぐ暖水プール」(2022年9月15日)、「積雲の表面で起こるエントレインメント」(2022年12月19日)、「中緯度海洋の水温の不思議な性質 海洋再出現過程」(2023年3月18日)、「海水温が高いほど台風は強くなる?」(2023年3月30日)、「赤道域から亜熱帯にかけた海洋上層の南北循環」(2023年4月7日)。
 - (8) 民間教育企業と協力し、コロナ禍で社会見学等が制限された中高生のために、セミナーと大学見学を企画した。「気象と気候の科学、研究者に聞く、研究室を訪ねる気象・気候の最先端」(2021年12月23日)、研究室見学(2022年3月24日)。
 - (9) 「雲解像気候学セミナー」で Noel Keenlyside 氏と Francine Schevenhoven 氏が紹介したスーパーモデリングを発展させるハイパーモデリングの手法が、NICAM と MIROC を融合する具体的手法として有効である可能性を見出した。本領域の成果を取りまとめ、シングルスケールモデリングとマルチスケールモデリングという二つの異なるアプローチを明確にして、ハイパーモデリングやスーパーパラメタリゼーションの有効性を提示した論文をアメリカ気象学会の機関紙 Bulletin of the American Meteorological Society に出版した (Miura et al. 2023)。本論文は、注目論文をハイライトする冊子版 BAMS で紹介される予定になっている。

<引用文献>

Miura, H., and Coauthors, 2023: Asymptotic Matching between Weather and Climate Models. Bull. Amer. Meteor. Soc., 104, E2308–E2315, <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-22-0128.1>.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Miura Hiroaki, Suematsu Tamaki, Kawai Yuta, Yamagami Yoko, Takasuka Daisuke, Takano Yuki, Hung Ching-Shu, Yamazaki Kazuya, Kodama Chihiro, Kajikawa Yoshiyuki, Masumoto Yukio	4. 巻 104
2. 論文標題 Asymptotic Matching between Weather and Climate Models	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Bulletin of the American Meteorological Society	6. 最初と最後の頁 E2308 ~ E2315
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1175/BAMS-D-22-0128.1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Takasuka Daisuke, Kodama Chihiro, Suematsu Tamaki, Ohno Tomoki, Yamada Yohei, Seiki Tatsuya, Yashiro Hisashi, Nakano Masuo, Miura Hiroaki, Noda Akira T., Nasuno Tomoe, Miyakawa Tomoki, Masunaga Ryusuke	4. 巻 16
2. 論文標題 How Can We Improve the Seamless Representation of Climatological Statistics and Weather Toward Reliable Global K Scale Climate Simulations?	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Journal of Advances in Modeling Earth Systems	6. 最初と最後の頁 e2023MS003701
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2023MS003701	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 0件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Hiroaki Miura
2. 発表標題 Ongoing progresses of DNA Climate Science Project
3. 学会等名 DNA (Deep Numerical Analysis) Climate Science Meeting (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 三浦裕亮
2. 発表標題 全球雲解像モデルによる気候研究への挑戦
3. 学会等名 第1回雲解像気候学ワークショップ
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 三浦裕亮
2. 発表標題 DNA気候学への挑戦: 1年目の総括と次の目標
3. 学会等名 第2回雲解像気候学ワークショップ
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hiroaki Miura, Chihiro Kodama, Yuki Takano, Daisuke Takasuka, and Tamaki Suematsu
2. 発表標題 Deep Numerical Analysis (DNA) climate project: Creating a framework for the matching between short and long time-scale climate
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Hiroaki Miura
2. 発表標題 Collaboration between a high-resolution modeling and an existing climate modeling groups for a global 0(km) scale earth system model
3. 学会等名 NTU-UTokyo Workshop on Atmospheric Convection (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Hiroaki Miura, Yuki Takano, Chihiro Kodama, Tamaki Suematsu, and Daisuke Takasuka
2. 発表標題 Collaboration between a high-resolution modeling and an existing climate modeling groups for a global 1-km scale earth system model
3. 学会等名 2022 American Geophysical Union Fall Meeting
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hiroaki Miura
2. 発表標題 Activities in DNA Climate science project and development of a new B-grid dynamical core on the icosahedral mesh
3. 学会等名 Atmosphere in the Earth System Seminar
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

DNA気候学 https://dna-climate.org/

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	小玉 知央 (Kodama Chihiro) (90598939)	国立研究開発法人海洋研究開発機構・地球環境部門(環境変動予測研究センター)・副主任研究員 (82706)	
研究分担者	梶川 義幸 (Kajikawa Yoshiyuki) (20572431)	神戸大学・都市安全研究センター・特命教授 (14501)	
研究分担者	升本 順夫 (Masumoto Yukio) (60222436)	東京大学・大学院理学系研究科(理学部)・教授 (12601)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	末松 環 (Suematsu Tamaki) (40872544)	国立研究開発法人理化学研究所・計算科学研究センター・特別研究員 (82401)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計4件

国際研究集会 DNA (Deep Numerical Analysis) Climate Science Meeting	開催年 2022年～2022年
国際研究集会 Workshop on the self-aggregation of clouds under the radiative-convective equilibrium	開催年 2022年～2022年
国際研究集会 UTokyo-NTU mini-Workshop	開催年 2022年～2022年
国際研究集会 NTU-UTokyo Workshop on Atmospheric Convection	開催年 2023年～2023年

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
米国	Pacific Northwest National Laboratory	National Center for Atmospheric Research		
その他の国・地域	National Taiwan University			