

国立環境研究所スーパーコンピュータ利用研究年報

令和 6 年度

NIES Supercomputer Annual Report 2024

国立環境研究所地球環境研究センター 編

地球環境研究センター
Center for Global Environmental Research



国立研究開発法人 国立環境研究所
National Institute for Environmental Studies, Japan





国立環境研究所スーパーコンピュータ利用研究年報

令和 6 年度

NIES Supercomputer Annual Report 2024

国立環境研究所地球環境研究センター 編

地球環境研究センター

Center for Global Environmental Research



国立研究開発法人 国立環境研究所

National Institute for Environmental Studies, Japan



出版にあたって

国立環境研究所では、地球規模での環境変化に関する現象解明や予測など研究所内外で実施される地球環境研究を支援するために、平成4（1992）年3月に初めてスーパーコンピュータ SX-3 Model 14 を整備しました。それ以後、平成9年にSX-4/32、平成14年にSX-6/64M8、平成19年3月にSX-8R/128M16、平成25年6月に、SX-9A/ECO、平成27年6月には、第6号機であるSX-ACEを導入、運用を開始しました。この間、広く所内外の地球環境研究者の利用に供し、大気・海洋モデリング、気候予測、地球流体力学その他数多くの分野で数々の研究成果を生み出してきました。さらに、令和2（2020）年3月からは、第7号機であるSX-Aurora TSUBASA A511-64 を運用しています。

わが国のスーパーコンピュータをはじめとする計算機状況は、当研究所がスーパーコンピュータを初めて導入したときから大きく変化し、地球環境研究に利用できる計算機資源の整備も進んできました。そこで、平成19年の更新を機に当研究所のスーパーコンピュータの研究利用方針を見直し、地球環境研究にとどまらず広く環境研究一般への利用の拡大を図ることとしました。研究所が自ら実施する研究課題のみならず、わが国すぐれた環境研究課題にも利用支援すべく課題公募・審査・評価体制を整備し、平成19年度から新しい制度でのスーパーコンピュータの研究利用支援を開始、環境研究における業績に寄与しています。

今回の年報には令和6年度に実施された利用研究の成果として、全9課題の研究年次報告を収めました。あわせて、スーパーコンピュータシステム（SX-Aurora TSUBASA A511-64）の概要について紹介しています。

この報告書が、国立環境研究所スーパーコンピュータ利用研究についてみなさまによりよくご理解いただく契機となるとともに、みなさまからの忌憚のないご意見ご助言を賜る契機にもなって、わが国の環境研究の一層の進展に役立てられることを期待しております。

令和7（2025）年12月

国立研究開発法人国立環境研究所
地球システム領域
地球環境研究センター長
谷本浩志

目 次

出版にあたって	i
目次.....	iii
1. 地球-人間システムのモデル開発による気候変動研究	1
課題代表者：国立環境研究所地球システム領域 横畠徳太	
2. IPCC AR7 に向けた気候モデルの開発と気候変動予測情報のダウンスケール	6
課題代表者：国立環境研究所地球システム領域 廣田渚郎	
3. 化学気候モデルを用いた全大気を包括する大気微量成分輸送と気候影響に関する研究	13
課題代表者：国立環境研究所地球システム領域 山下陽介	
4. 短寿命気候強制因子の変化に伴う気候・地域環境への影響評価	19
課題代表者：国立環境研究所地域環境保全領域 五藤大輔	
5. 閉鎖性水域における水環境への気候変動の影響と栄養塩類管理	25
課題代表者：国立環境研究所地域環境保全領域 東 博紀	
6. 大気モデル NICAM 効果を用いた大気物質の放出・吸収量推定に関する研究	33
課題代表者：国立環境研究所地球システム領域 丹羽洋介	
7. 高度な大気汚染予測のためのデータ同化手法の開発	40
課題代表者：国立環境研究所地域環境保全領域 五藤大輔	
8. Numerical study on cloud systems using NICAM (NICAM による雲降水システムの研究)	45
課題代表者：東京大学大気海洋研究所 佐藤正樹	
9. 系外惑星も含めた惑星気候多様性に関する数値計算：陸惑星における多重平衡解の探索	59
課題代表者：北海道大学大学院理学研究院 石渡正樹	
国立環境研究所 スーパーコンピュータシステム概要	63
国立環境研究所環境情報部	
日本電気株式会社	

CGER'S SUPERCOMPUTER ACTIVITY REPORT

国立環境研究所スーパーコンピュータ利用研究年報 (NIES Supercomputer Annual Report)

CGER'S SUPERCOMPUTER MONOGRAPH REPORT

既刊紹介 73



NEC SX Aurora TSUBASA A511-64 (運用期間：2020年3月～2025年10月)

研究課題名：
地球-人間システムのモデル開発による気候変動研究

実施年度：
令和 6 年度

課題代表者：国立環境研究所 地球システム領域 横畠徳太
共同研究者：国立環境研究所 地球システム領域 Irina Melnikova
韓国科学技術院 ムーンソウル未来戦略大学院 佐藤雄亮
北海道大学 工学部 山田朋人
エネルギー総合工学研究所 地球環境グループ 加藤悦史
茨城大学 農学部 木下嗣基
海洋研究開発機構 地球環境部門 立入郁
産業技術総合研究所 環境創生研究部門 高根雄也

1. 研究目的

パリ目標の実現に向けて、国内外で脱炭素に向けた動きが加速している。例えば日本は、2030 年度に温室効果ガスを 2013 年度から 46% 削減、2050 年までに温室効果ガスの排出を全体としてゼロにすること（カーボンニュートラル）を目標としている。このため、脱炭素社会がどのようにして実現されるのかを示すことは非常に重要な課題である。この一方で、排出ギャップ報告書によると、パリ協定で定められた目標を実現するために必要な排出削減量と、現状の排出削減量には、非常に大きなギャップがあることが示されている。このため、いったん気温目標を超えた後に目標気温を達成する可能性について調べることや、目標の通りに脱炭素社会が実現しない場合のリスクを示すことも重要な課題である。脱炭素社会が実現しない場合には、長期的な気候変化により、非常に大きな問題が生じる可能性もある。脱炭素社会が実現しない場合の大きなリスクを示すことは、脱炭素社会の必要性を示すことにもつながる。

この研究課題では、1) パリ協定で定められた気温目標を達成するようなスピードで脱炭素社会を実現する道筋を示すこと、2) いったん気温目標を超えた後に目標気温を達成する可能性を示すこと、3) 脱炭素社会が達成されない場合に生じる問題を示すことを目標とする。この目的のため、様々なシナリオを想定した地球一人間システムに関する数値モデル実験を行い、結果を分析する。地球システムは様々な形で人間システムに影響を及ぼし、逆に人間システムは様々な形で地球システムに影響を及ぼすことから、地球システムと人間システムの相互作用を考慮することのできる統合的なモデルの開発・改良を行う。これと並行して、地球システム・人間システムを構成する要素モデル（地球システムモデル・陸域生態系モデル・土地利用モデル・水資源モデル）の開発と改良、あるいはこれらのモデルを利用した数値実験も行う。

キーワード：
気候変動、脱炭素持続社会、気候変動適応、モデル統合

2. スーパーコンピュータ利用実績

2.1 計算機利用時間（2024 年 4 月 1 日～2025 年 3 月 31 日）

CPU 時間 v_debug :	502.2 [VE · hours]
v_normal :	101,150.3 [VE · hours]
計 :	101,652.5 [VE · hours]

2.2 利用概要

研究参画者が開発している陸域モデル（陸面モデル MATSIRO、水資源モデル HiGWMAT、作物モデル PRYSBI2、陸域生態系モデル VISIT、土地利用モデル TeLMO など）および地球システムモデル MIROC-ES2L、これらを統合した地球システム統合モデル MIROC-INTEG-ES などのモデル開発を行い、過去再現実験および将来予測実験を行った。令和 4 年度は、MIROC-INTEG-ES を利用して、長期間（最大で 2500 年まで）の将来予測実験を行い、地球システムにおいて起こり得る大きな変動について分析を行なった。また、MIROC-INTEG-ES を利用して、灌漑などの人間による水利用が地球システムに及ぼす影響について分析した。MIROC-INTEG-ES における土地利用モデル TeLMO において、農地面積を予測する定式化の改良のための改良を行い、TeLMO して過去再現実験を行なった。

3. 研究結果

3.1 概要

陸面物理過程モデル MATSIRO (Watanabe et al. 2010, Nitta et al. 2014)、水資源モデル H08 (Hanasaki et al. 2008, Pokhrel et al. 2012)、陸域生態系モデル VISIT (Ito and Inatomi 2012)、作物モデル PRYSBI2 (Sakurai et al. 2014)、土地利用モデル TeLMO (Yokohata et al. 2020) を結合した陸域統合モデル MIROC-INTEG-LAND (MIROC INTEGRATED LAND surface model, Yokohata et al. 2020) を開発し、さらに、地球システムモデル MIROC-ES2L (Hajima et al. 2020) に上記の水資源・作物・土地利用モデルを結合した地球システム統合モデル MIROC-INTEG-ES (MIROC INTEGRATED Earth System model) の開発を行ってきた。今年度は MIROC-INTEG-ES を利用して、長期的な（2500 年まで）の将来予測実験を行い、地球システムの長期的な挙動について分析を行なった。また、MIROC-INTEG-ES を活用し、灌漑などの人間による水管理が地球システムに与える影響について分析を行ない、モデル比較プロジェクトにデータ提供を行った。また、MIROC-INTEG-LAND による数値シミュレーションの結果を分野横断的気候モデル影響評価研究プロジェクト (Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project, ISIMIP) に提供することにより、水部門などの気候変動影響評価研究を行なった。また、全球の炭素循環に関する数値実験を行い、Global Carbon Project にデータを提供することにより、2024 年の全球炭素収支 (Global Carbon Budget 2024) の出版に貢献した。

3.2 背景と目的

気候変動によって、社会や生態系にさまざまな問題が生じている。このためパリ協定では、産業革命前からの気温上昇を 2 度に抑えること、また 1.5 度に抑えることを追求する目標が、国際的に合意された。地球温暖化を止める、つまり全球的な気温上昇トレンドを止め、気候を安定化するには、人為的な温室効果ガス排出を正味でゼロにすることが必要である。現在、先進国では温室効果ガス排出量が減っているものの、パリ協定で目指している通りには、脱炭素社会が実現しない可能性もあり得る。このため私たちは、「人為起源温室効果ガスの正味排出がゼロとなる」時期が、22 世紀以降にずれ込む場合の社会経済シナリオを考慮し、将来のシナリオ分析を行うことが重要な課題の一つだと考えている。このような場合には、非常に大きな気候変動が起こり、海洋深層循環などの「ティッピングエレメント」に関しては、不可逆的な変化が起こる可能性もある。脱炭素社会の実現が遅れる場合の地球システムの挙動を示すことは、気候変動がもたらす問題の大きさを明示することにより、人間社会が脱炭素の実現に向かうことにつながると考える。

3.4 結果

これまでの気候変動研究では、主として 2100 年までの社会経済シナリオにもとづき、21 世紀の気候変動メカニズムや社会への影響が分析されてきた。しかしながら 21 世紀中にネットゼロが達成されない場合、2100 年以降も気候変動が進む可能性がある。このことについて調べるた

め、私たちは 2500 年までの社会経済シナリオ（共通社会経済経路：Shared Socio-economic Pathways, SSP）を利用した地球システムモデル実験を行った。合計 8 シナリオの数値実験を行ったが、4 つのシナリオ（SSP1-1.9/2-2.6/5-3.4os/4-3.4）では、21 世紀中にネットゼロ排出が達成され、二酸化炭素濃度の低下が生じるシナリオである。この一方で残りのシナリオ（SSP2-4.5/4-6.0/3-7.0/5-8.5）では、2250 年になってやっとネットゼロ排出が実現するシナリオである。現在はパリ協定の影響もあり、CO₂排出増加のペース低下しているため、上記のうち SSP3-7.0/5-8.5 までの気温上昇が起こらない可能性が高いとの指摘もあるが、ここではすべての可能性を検討する。図 1 に示すように、2500 年までの数値実験の結果において、北半球海氷、ENSO 振幅、下層雲量・大西洋子午面循環（AMOC）強度などが、全球平均気温の上昇とともに、急激な変化、非線形的な応答、不可逆的な変化をもたらすことが分かった。MIROC モデルによるシミュレーションでは、全球平均気温上昇が 4 度を超えるあたりで、北半球海氷の急激な減少が生じている。また ENSO 振幅は、気温の上昇とともに振幅が増大するものの、全球平均気温上昇が 3 度を超えると、振幅が減少し始める。大西洋における海面水温の分析によると、全球平均気温の上昇とともに海面水温の東西コントラストが減少することで、ENSO 振幅が低下することになる。下層雲量も同様に、全球平均気温が 3 度を超えると下層雲量が減少に転じる。AMOC の強度は、気温の上昇とともに低下をし続ける。今後は地球システムの挙動について理解を深めるとともに、長期的な気候変動が社会にもたらす影響にも着目した研究を進める予定である。

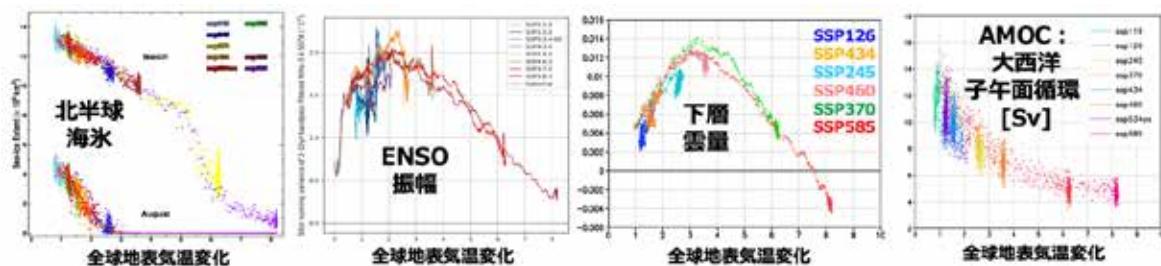


図 1. MIROC-ES2L による 2500 年までの数値実験の結果。共通社会経済経路（Shared Socio-economic Pathways, SSP）である SSP1-1.9/1-2.6/5-3.4os/4-3.4/2-4.5/4-6.0/3-7.0/5-8.5 の 8 シナリオを与えた場合の結果を示す。全てのシナリオ実験における北半球海洋面積 [10^6 km^2]、ENSO 振幅 [$^{\circ}\text{C}$]、下層雲量 [被覆率]、大西洋深層循環の最大流量 [Sv] を、全球平均地表気温変化の関数として表す。

参考文献

- Fujimori, S., Hasegawa, T., Masui, T., Takahashi, K., Herran, D. S., Dai, H., Hijioka, Y., Kainuma, M. (2017) SSP3: AIM implementation of Shared Socioeconomic Pathways. *Global Environmental Change*, **42**, 268-283. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.06.009>
- Hajima, T., Watanabe, M., Yamamoto, A., Tatebe, H., Noguchi, M.A., Abe, M., Ohgaito, R., Ito, A., Yamazaki, D., Okajima, H., Ito, A., Takata, K., Ogochi, K., Watanabe, S., Kawamiya, M. (2020) Development of the MIROC-ES2L Earth system model and the evaluation of biogeochemical processes and feedbacks. *Geosci Model Dev* 13:2197-2244. <https://doi.org/10.5194/gmd-13-2197-2020>
- Hanasaki, N., Kanae, S., Oki, T., Masuda, K., Motoya, K., Shirakawa, N., Shen, Y., and Tanaka, K. (2008) An integrated model for the assessment of global water resources – Part 1: Model description and input meteorological forcing. *Hydrology and Earth System Sciences*, **12**, 1007-1025. <https://doi.org/10.5194/hess-12-1007-2008>

- Ito, A., Inatomi, M (2012) Use of a process-based model for assessing the methane budgets of global terrestrial ecosystems and evaluation of uncertainty. *Biogeosciences*, **9**, 759-773. <https://doi.org/10.5194/bg-9-759-2012>
- Meinshausen, M., et al. (2020) The shared socio-economic pathway (SSP) greenhouse gas concentrations and their extensions to 2500. *Geoscience Model Development.*, **13**, 3571-3605, <https://doi.org/10.5194/gmd-13-3571-2020>
- Nitta, T., Yoshimura, K., Takata, K., O'ishi, R., Sueyoshi, T., Kanae, S., Oki, T., Abe-Ouchi, A., and Liston, G.E. (2014) Representing variability in subgrid snow cover and snow depth in a global land model: Offline validation. *J. Clim.*, **27**, 3318–3330. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-13-00310.1>
- Pokhrel, Y., Hanasaki, N., Koirala, S., Cho, J., Kim, H., Yeh, P.J.-F., Kanae, S., and Oki, T. (2012) Incorporating anthropogenic water regulation modules into a land surface model. *Journal of Hydrometeorology*, **13**, 255–269, <https://doi.org/10.1175/JHM-D-11-013.1>
- Sakurai, G., Iizumi, T., Nishimori, M., Yokozawa, M (2014) How much has the increase in atmospheric CO₂ directly affected past soybean production? *Scientific Reports*, **4** : 4978. <https://doi.org/10.1038/srep04978>
- Watanabe, M., Suzuki, T., O'ishi, R., Komuro, Y., Watanabe, S., Emori, S., Takemura, T., Chikira, M., Ogura, T., Sekiguchi, M., Takata, K., Yamazaki, D., Yokohata, T., Nozawa, T., Hasumi, H., Tatebe, H., and Kimoto, M. (2010) Improved climate simulation by MIROC5: Mean states, variability, and climate sensitivity. *J. Climate*, **23**, 6312-6335. <https://doi.org/10.1175/2010JCLI3679.1>
- Yokohata T., Kinoshita T., Sakurai G., Pokhrel Y., Ito A., Okada M., Satoh Y., Kato E., Nitta T., Fujimori S., Felfelani F., Masaki Y., Iizumi T., Nishimori M., Hanasaki N., Takahashi K., Yamagata Y., Emori S. (2020) MIROC-INTEG-LAND version 1: a global biogeochemical land surface model with human water management, crop growth, and land-use change. *Geoscientific Model Development*, **13**, 4713-4747 <https://doi.org/10.5194/gmd-13-4713-2020>

4. まとめ

地球システムモデルを利用し、長期的な時間スケール（2500年まで）での地球システムの挙動について分析を行なった。地球システムには、長い時間スケールにわたってゆっくりとした応答をする要素があるため、将来的に気候変動が長期に渡り進行する場合、このような slow response について分析を行うことが非常に重要な課題である。また、今年度のモデル開発によって、気候・生態系・水資源・作物・土地利用のモデルを結合した地球システム統合モデル MIROC-INTEG-ESにおいて、土地利用モデル、作物収量モデルの改良を行った。モデルによる過去の土地利用・バイオ燃料収量の再現性の向上を試みているが、まだ十分な成果は得られていないため、今後もモデル開発を継続する。

5. 研究成果発表

5.1 誌上発表（査読あり）

- Yao, Y., Ducharne, A., Cook, B.I., De Hertog, S.J., Aas, K.S., Arboleda-Obando, P.F., Buzan, J., Colin, J., Costantini, M., Decharme, B. and Lawrence, D.M., Lawrence P., Ruby Leung L., Lo M., Devaraju N., Wieder W.R., Wu R., Zhou T., Jägermeyr J., McDermid S., Pokhrel Y., Elling M., Hanasaki N., Muñoz P., Nazarenko L.S., Otta K., Satoh Y., Yokohata T., Jin L., Wang X., Mishra V., Ghosh S. & Thiery W.. (2025) Impacts of irrigation expansion on moist-heat stress based on IRRMIP results. *Nature Communications* **16**, 1045, <https://doi.org/10.1038/s41467-025-56356-1>
- Heinicke, S., Volkholz, J., Schewe, J., Gosling, S. N., Müller Schmied, H., Zimmermann, S., Mengel M., Sauer I.J., Burek P., Chang J., Kou-Giesbrecht S., Grillakis M., Guillaumot L., Hanasaki N., Koutroulis A., Otta K., Qi W., Satoh Y., Stacke T., Yokohata T. & Frieler, K. (2024). Global hydrological models continue to overestimate river discharge. *Environmental Research Letters*, **19** 074005, <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ad52b0>
- Friedlingstein, P., ..., Kato, E., ... et al. (2025), Global Carbon Budget 2024, <https://doi.org/10.5194/essd-17-965-2025>

5.2 誌上発表（査読なし）

該当なし。

5.3 口頭発表

- Yokohata T., Melnikova I., Hayashi M., Shiogama H., Yamamoto A., Suzuki T., Kamae Y., Kusahara K., Hajima T., Satoh Y., Kawamiya M., Takao S., Nishina K., Hirota N. and Yoshimori M. (2024) Long-term responses and tipping points in Earth system beyond 2100. AGU Fall Meeting 2024, December 15-19, 2024, hybrid, New Orleans, LA, USA, Abstracts (口頭発表)
- Yokohata T., Melnikova I., Hayashi M., Shiogama H., Yamamoto A., Suzuki T., Kamae Y., Kusahara K., Hajima T., Satoh Y., Kawamiya M., Takao S., Nishina K., Hirota N. and Yoshimori M. (2024) Long-term responses and tipping points in Earth system beyond 2100 and the TIPMIP simulations by MIROC-ES2L. TIPMIP General Assembly, hosted by Future Earth/Earth Commission, December 4-7, Baltimore, USA. (ポスター発表)
- 林未知也, 横畠徳太, 塩竈秀夫, 小倉知夫 (2024) 長期的将来気候変動シナリオにおけるエルニーニョ南方振動の変化. 日本気象学会 2024 年度秋季大会, 2024 年度秋季大会講演予稿集 (口頭発表)
- 横畠徳太, イリーナ・メルニコワ, 林未知也, 仁科一哉, 高尾信太郎, 塩竈秀夫, 山本彬友, 鈴木立郎, 草原和弥, 羽島知洋, 河宮未知生, 釜江陽, 佐藤雄亮, 吉森正和 (2024) 2100 年を超える地球システムの長期応答とティッピングポイント. 日本気象学会 2024 年度秋季大会, 2024 年度秋季大会講演予稿集 (口頭発表)
- Tachiiri K., Matsumoto K., Su X., Yokohata T., Hajima T. (2024) Feedback analysis of Earth-human systems using a loosely coupled model. Japan Geoscience Union Meeting 2024, May 26-31, 2024, Makuhari Messe, Chiba, Japan, Abstracts (ポスター発表)
- Yokohata T., Melnikova I., Hayashi M., Shiogama H., Yamamoto A., Suzuki T., Kusahara K., Kamae Y., Satoh Y., Hajima T., Kawamiya M., Nishina K., Takao S., Hirota N., Yoshimori M. (2024) Long-term responses and tipping elements in Earth system beyond 2100. Japan Geoscience Union Meeting 2024, May 26-31, 2024, Makuhari Messe, Chiba, Japan, Abstracts (口頭発表)

5.4 その他（書籍等）

該当なし。

6. 連絡先

横畠徳太
〒305-8506 茨城県つくば市小野川 16-2
国立研究開発法人国立環境研究所地球システム領域
Tel: 029-850-2347 Fax: 029-858-2645
E-mail: yokohata@nies.go.jp

研究課題名：IPCC AR7に向けた気候モデルの開発と気候変動予測情報のダウンスケール

実施年度：令和6年度

課題代表者：国立環境研究所地球システム領域 廣田渚郎

共同研究者：国立環境研究所地球システム領域 塩竈秀夫・小倉知夫・林未知也
長友利晴・千喜良稔

国立環境研究所気候変動適応センター 石崎紀子・Damiani Alessandro

東京大学大気海洋研究所 渡部雅浩

岡山大学大学院自然科学研究科 野沢徹

東京大学生産技術研究所 金炯俊・日比野研志・新田友子

株式会社三菱総合研究所 井上剛・田中良明・二階堂竜司・新井峻太

気象庁気象研究所 川瀬宏明

エム・アール・アイリサーチアソシエイツ株式会社 櫻木俊輔

茨城大学理工学研究科 若月泰孝

東京海洋大学学術研究院 関口美保

株式会社Gaia Vision 北祐樹

1. 研究目的（200字程度）

本研究課題では、気候モデルthe Model for Interdisciplinary Research on Climate version 7 (MIROC7) の開発する。これまでの課題などで開発されてきた、大気・海洋・陸域プロセスの改良をMIROC7に導入し、それらが適切に働く様に調整して、MIROC7による気候表現性能の向上を目指す。また、高解像度の領域気候モデルによるダウンスケーリングを行い、特に日本やアジア域における詳細な気候変動予測情報を創出する。また、MIROC7による気候変動実験データは、2029年に発表される気候変動に関する政府間パネル第7次評価報告書(Intergovernmental Panel on Climate Change 7th Assessment Report, IPCC AR7)でも利用される予定である。

2. スーパーコンピュータ利用実績

2.1 計算機利用時間（2024年4月1日～2025年3月31日）

CPU 時間 v_debug : 39.9 [VE・hours]

v_normal : 187,993.1 [VE・hours]

計 : 188,033.0 [VE・hours]

2.2 利用概要

国立環境研究所を含む日本の研究グループで、気候モデルMIROC7を開発した。MIROC7を用いて現実気候再現実験と温暖化実験を行った。モデルにおける大気・海洋・陸域のプロセスの表現や、そのパラメータを変更する感度実験を行い、それら各プロセスの気候表現性能や気候変動予測への影響を調べた。より高解像度の領域気候モデルNonhydrostatic Regional Climate Model (NHRCM)も利用し、温暖化の台風への影響を調べる実験も行った。モデル実験にはスーパーコンピュータを用い、ポスト処理はフロントエンドサーバ上で行った。

3. 研究結果

3.1 概要

本研究課題では、気候モデルMIROC7の開発を完了した。従来モデルMIROC6は高性能であったものの、エネルギー収支に大きなバイアスを抱えていた。MIROC7では、新たな雲・降水スキームの導入により、特に雲による太陽光反射の過剰なバイアスが軽減され、エネルギー収支の表現が大幅に改善された。2023年度時点の開発版では、海洋循環が弱い問題や、二酸化炭素倍増時の気温上昇量（気候感度）の高さなどの検討課題が残っていた。2024年度には、新しい放射スキームMstrn11の長波対応や、統合陸域シミュレータの導入、各種物理過程の調整を行い、モデル性能をさらに向上させた。これにより、海洋循環の表現が改善され、気候感度も約3.5°Cに抑え

られた。以上の成果により、IPCC第7次評価報告書（AR7）に向けた、信頼性の高い気候モデルが整備され、2025年度から公式実験を開始する予定である。

3.2 背景と目的

気候変動に関する政府間パネル（IPCC）の第7次評価報告書（AR7）は2029年末に発表予定である。日本では1990年代から東京大学・海洋研究開発機構・国立環境研究所を中心に全球気候モデルMIROCを開発し、気候変動実験を行い、IPCCに貢献してきた。IPCC AR6ではMIROC6が利用され、現在は、AR7に向けてMIROC7を開発している。

MIROC6は、気温や降水などの水平分布、季節変動、年々変動などの現実再現性が高く、世界の研究機関の他の気候モデルに比べても性能が高いモデルである(Fasullo 2020; Tatebe et al. 2019)。しかし、幾つか系統的なバイアスも残っている。例えば、MIROC6のエネルギー収支には大きなバイアスがある(Wild 2020)。大気上端における太陽から地球への短波入射エネルギー(SW)が、観測に比べて 10W/m^2 程度過少で、地球から宇宙への赤外放射のエネルギー射出(LW)も 10W/m^2 程度過少である。現在開発中のMIROC7では、エネルギー収支のバイアスを改善を目指している。これまでの課題で進められてきた大気・海洋・陸域プロセスの高度化を導入し、各プロセスの相互の働きを調査・調整して、モデルによる気候変動の表現性能を向上させる。

2023年度までの開発版のMIROC7_v231113では、MIROC6に比べてより精緻な雲・降水スキームの導入、海洋混合過程や海水の扱いの改良などにより、課題であったエネルギー収支の大幅な改善を達成している。しかし、海洋循環が弱い問題や、二酸化炭素倍増時の世界平均気温の上昇量(気候感度)が高いことなど、幾つかの検討課題が残っている。2024年度は、新しい放射スキームMstrn11の長波部分への適応や、新しい統合陸域シミュレータ(ILS; Nitta et al. 2020)の導入を行う。また、モデル調整を進め、海洋循環の問題の解決や気候感度についての調査を行う。IPCC AR7のタイムスケジュールに遅れない様、2024年度中にIPCC AR7向けの気候変動実験を行えるMIROC7を完成させる。

3.3 計算方法

これまでMIROC6で利用してきた放射スキームMstrnXと、気体吸収・散乱パラメータの更新などが行われた新しい放射スキームMstrn11を利用して、RFMIP実験を行う。RFMIP実験とは、雲やエアロゾルの影響を含まない理想的な大気場を与えてオフライン放射計算を行い、line-by-line計算(非常に精緻だが、計算コストが高い)と比較し、様々な大気の気温・水蒸気・大気構成の鉛直プロファイルにおける放射フラックスの表現性能を評価する為の実験である。MstrnXとMstrn11のRFMIP実験における放射フラックスのline-by-lineからのバイアスを図1に示す。MstrnXでは、対流圏から地表で短波(SW)放射フラックスが $+3\text{W/m}^2$ 以上の過剰バイアスがあるが、Mstrn11では、それが大きく改善されている。これはMstrn11では、MstrnXから更新されたパラメータによって、水蒸気のSW放射吸収が強まったためである。一方、LWフラックスについては、Mstrn11とMstrnXは共に、対流圏・成層圏で $\pm 1\text{W/m}^2$ 程度バイアスに抑えられている。Mstrn11はSWの改善が顕著であり、LWも十分な性能を示したため、MIROC7に導入する。

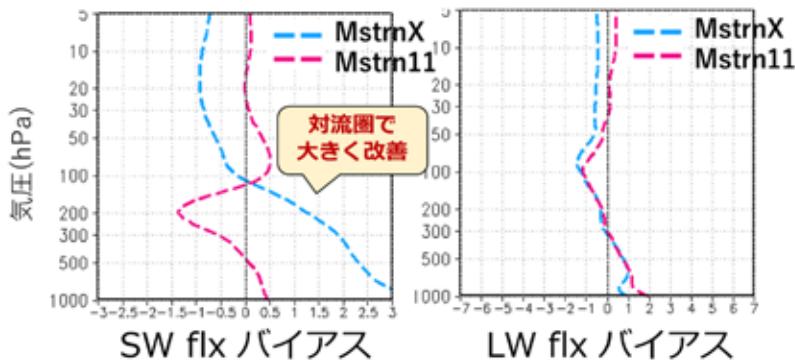


図1 MstrnXとMstrn11によるRFMIP実験におけるSWとLWの放射フラックスのバイアスの鉛直プロファイル。レファレンスはline-by-line。RFMIPで定義された100地点の平均で、およそ全球平均に対応する様に重み付けされている。

次にILSを導入する。ILSは、これまでの陸モデルMATSIRO(Takata et al 2003)と同様に地表の熱・水収支を計算するが、水平格子が河川流域に基づくより精緻なものになっている。また、将来的には水資源モデルなどを容易に導入できるなどの拡張性にメリットがある。

これまでの精緻な雲・降水プロセスの導入に加えて、Mstrn11とILSを導入したMIROC7によるhistorical実験を実施する。観測データに基づく、太陽光の入射、大気中の温室効果ガス濃度、地表からのエアロゾルのエミッション、土地利用条件などを境界条件として与え、過去の気候変動を再現する実験を行う。その結果を観測データと比較することで、モデルの現実気候を表現する性能を評価する。気候モデルの開発にとって、historical実験において、過去の気候変動を適切に表現することは、モデルによる将来予測の信頼性に関わる重要なことである(Hausfather et al. 2022)。用いた観測データは、GPCP2の降水量、GISTEMPやHadCRUの地表気温、CERESのエネルギー収支、JRA3Q再解析データなどである。

3.4 結果

Mstrn11とILSを導入した最新のMIROC7_v250101による過去再現実験(historical実験)を行った。MIROC7_v250101の1986-2014年の気候平均場を観測、MIROC6、MIROC7_v231113のものと比較する。図2に降水量、地表気温バイアス、及び大気上端におけるエネルギー収支のバイアスを示す。MIROC6、v231113、v250101の降水分布の観測とのパターン相関は、それぞれ0.91、0.85、0.88である。気温分布の二乗平方根誤差(RMSE)は、MIROC6が2.74°C、v23113が1.67°C、v250101が2.03°Cである。いずれのモデルも、現実の降水分布と気温分布を非常によく再現できている。v231113とv240101で大陸上の高温バイアスが軽減されているのは、Mstrn11による放射スキームの性能向上によるものである。太陽から入射するSW放射エネルギーと、地球から射出されるLW放射エネルギーは、MIROC6に大きなバイアスがある。SWとLWのバイアスのRMSEはそれぞれ17.68W/m²と12.90W/m²である。これは世界の他の気候モデルの中でも悪い表現性能である(Wild et al. 2020)。MIROC7ではこれらのエネルギー収支のバイアスが大きく改善している。SWとLWのバイアスのRMSEは、v231113で10.79 W/m²と7.08W/m²で、v250101で11.78W/m²と7.33W/m²である。v250101がv231113に比べて、エネルギー収支の表現性能が若干劣るのは、後述するv231113の海洋循環が弱い問題を解決する為である。

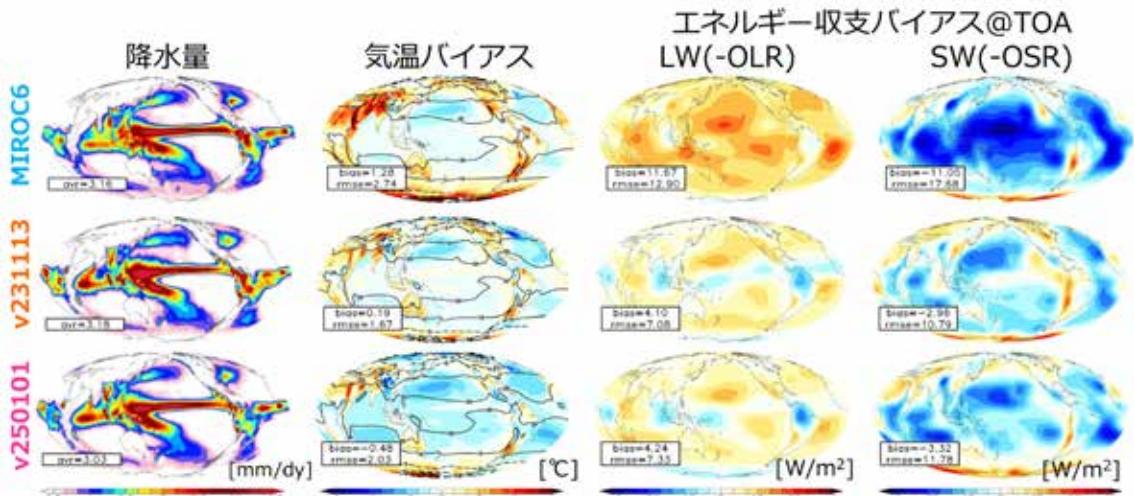


図2 MIROC6、v231113、v250101のhistorical実験における、降水量、地表気温バイアス、LW放射バイアス、SW放射バイアス。

図3に観測、MIROC6、v231113、v250101の全球平均気温変動を示す。観測データに見られる、1850年から2014年まで気温が上昇していく様子が、いずれのモデルでも良く再現されている。ただし、v231113は、20世紀末からの昇温が観測に比べて少し大きい。1981-2014年の昇温の線形トレンドは、v231113は $0.28^{\circ}\text{C}/\text{decade}$ で、観測の $0.15^{\circ}\text{C}/\text{decade}$ である。また、v231113の気候感度は 4.9°C と非常に高く、いわゆる”hot-model”になり、その気候変動予測の信頼性は低いと考えられる(Hausfather et al. 2022)。v231113の気候感度が高い原因は、MIROC6に見られた上層雲と下層雲の過小バイアスが改善されたことにより、雲による温暖化の加速効果が強化されたためである。上層雲の役割については以前にも報告しており、Hirota et al. (2022)にも発表されているので、ここでの説明は割愛する。下層雲については、MIROC6で主に東部熱帯海洋上で不足していたので、MIROC7では新たに層積雲スキーム(Kawai et al. 2019)を導入したことと関係している。v231113では、この層積雲スキームによって東部熱帯海洋上の下層雲量の過小バイアスは改善したが、中高緯度では下層雲量が増え過ぎてしまった。この中高緯度の過剰な下層雲が温暖化を加速させ、気候感度を高くした。v250101では、層積雲スキームを調整し、中高緯度の下層雲量を減少させた。その結果、v250101では、気候感度が 3.5°C 程度になり、1981-2014年の昇温の線形トレンドも $0.22^{\circ}\text{C}/\text{decade}$ 程度に抑制された。気候感度 3.5°C はAR6が推定する気候感度の確からしい幅に入っており、hot-modelに該当しない値である。

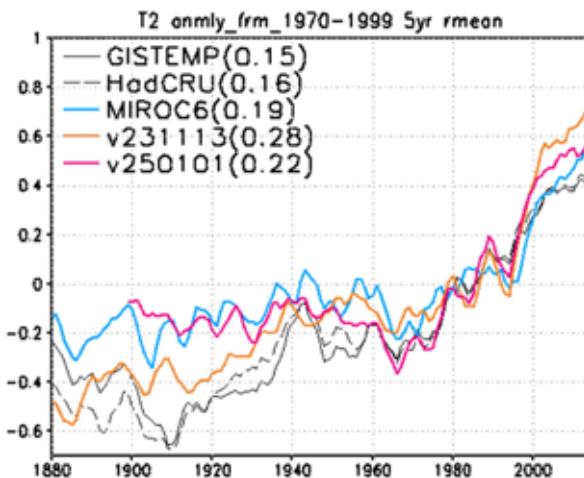


図3 過去の全球平均の地表気温変動(℃)。1970-1999年平均からの偏差を示す。GISTEMP観測(黒実線)、HadCRU観測(黒破線)、MIROC6(青線)、MIROC7_v231113(オレンジ)、v250101(赤線)。データ名の後ろに1981-2014年の昇温の線形トレンドの値(℃/decade)を示す。

図4に大西洋子午面循環(Atlantic Meridional Overturning Circulation; AMOC)の流線関数を示す。MIROC6では、最大値が18Sv程度の強さがあるが、v231113では10Sv程度である。現実のAMOCの強さは18Sv以上であり、v231113には海洋循環が弱いバイアスがある。v250101では、高緯度の雲を減らして海面蒸発を強くすることで高緯度海水塩分濃度を高くする、熱帯大気を冷やすなどの調整を行うことで、AMOCの強さを18Sv程度まで回復させた。この調整により、v250101はv231113に比べ、低緯度の過剰な雲量と高緯度の過小な雲量のバイアスが悪化し、エネルギー収支は若干悪化した。今後、AMOC回復のメカニズムを詳細に分析予定である。

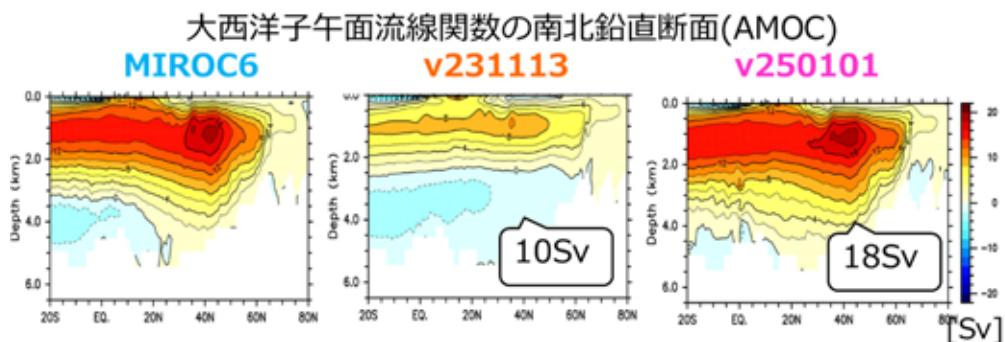


図4 MIROC6、v231113、v250101の大西洋子午面循環(AMOC)の流線関数(Sv)。

参考文献

- Fasullo, J. T. (2020). Evaluating simulated climate patterns from the CMIP archives using satellite and reanalysis datasets using the Climate Model Assessment Tool (CMATv1). *Geoscientific Model Development*, 13(8), 3627-3642.
- Tatebe, H., Ogura, T., Nitta, T., Komuro, Y., Ogochi, K., Takemura, T., ... & Kimoto, M. (2019). Description and basic evaluation of simulated mean state, internal variability, and climate sensitivity in MIROC6. *Geoscientific Model Development*, 12(7), 2727-2765.
- Nitta, T., Arakawa, T., Hatono, M., Takeshima, A., & Yoshimura, K. (2020). Development of integrated land simulator. *Progress in Earth and Planetary Science*, 7(1), 1-14.
- Wild, M. (2020). The global energy balance as represented in CMIP6 climate models. *Climate Dynamics*, 55(3-4), 553-577.
- Takata, K., Emori, S., & Watanabe, T. (2003). Development of the minimal advanced treatments of surface interaction and runoff. *Global and planetary Change*, 38(1-2), 209-222.
- Hausfather, Z., Marvel, K., Schmidt, G. A., Nielsen-Gammon, J. W., & Zelinka, M. (2022). Climate simulations: Recognize the ‘hot model’ problem. *Nature*, 605(7908), 26-29.
- Hirota, N., Michibata, T., Shiogama, H., Ogura, T., & Suzuki, K. (2022). Impacts of precipitation modeling on cloud feedback in MIROC6. *Geophysical Research Letters*, 49(5), e2021GL096523.
- Kawai, H., Yukimoto, S., Koshiro, T., Oshima, N., Tanaka, T., Yoshimura, H., & Nagasawa, R. (2019). Significant improvement of cloud representation in the global climate model MRI-ESM2. *Geoscientific Model Development*, 12(7), 2875-2897.
- Shiogama, H., Tatebe, H., Hayashi, M., Abe, M., Arai, M., Koyama, H., Imada, Y., and Kosaka, Y., Ogura, T., Watanabe, M. (2023). MIROC6 Large Ensemble (MIROC6-LE): Experimental design and initial analyses. *Earth System Dynamics Discussions*, 2023, 1-28, <https://doi.org/10.5194/esd-14-1107-2023>.

4. まとめ (300字程度)

次期IPCC AR7に向けてMIROC7の開発を進めた。最新版のv250101では、新しい放射スキーム

Mstrn11の長波対応と新しい統合陸域シミュレータの導入を行った。更に、モデル調整を進めて、2023年度版v231113に残されていた海洋循環が弱い問題と、気候感度が高いことに関する課題を解決した。IPCC AR7で利用するMIROC7の準備は完了し、2025年度はIPCC AR7の公式の気候変動実験を開始する予定である。また、気候プロセスと気候変動予測についての理解に関わる研究や、気候変動をより詳細に理解するためのダウンスケール研究も並行して進める予定である。これらのモデル開発、数値実験は、スーパーコンピュータの計算性能と使い易い利用環境があつて、可能になったものである。

5. 研究成果発表

5.1 誌上発表(査読あり)

なし

5.2 誌上発表(査読なし)

なし

5.3 口頭発表

Hirota, N., T. Michibata, Y. Yamagami, H. Tatebe, K. Suzuki, M. Watanabe, T. Kawasaki, T. Nitta, F. Saito, K. Ogochi, M. Sekiguchi, S. Watanabe, H. Shiogama, T. Ogura, T. Takemura, T. Ohno, M. Abe, K. Yoshimura, H. Kawai, M. Chikira, H. Yashiro, and D. Goto (Team MIROC): Development of the Model for Interdisciplinary Research on Climate version 7 (MIROC7). Japan Geoscience Union Meeting 2024, Chiba, Japan, 26-31 May, 2024. (invited)

Hirota, N., T. Michibata, Y. Yamagami, H. Tatebe, K. Suzuki, M. Watanabe, T. Kawasaki, T. Nitta, F. Saito, K. Ogochi, M. Sekiguchi, S. Watanabe, H. Shiogama, T. Ogura, T. Takemura, T. Ohno, M. Abe, K. Yoshimura, H. Kawai, M. Chikira, H. Yashiro, and D. Goto (Team MIROC): Development of MIROC7. Asian Conference on Meteorology 2024, Tsukuba, Japan, 18-20 Nov, 2024.

Ogura, T.: Understanding global warming levels and reducing uncertainty in climate projections, NIES-IAP Young Scientist Symposium on Atmospheric Environment and Climate Change, Tsukuba, Japan, 12 July, 2024.

Shiogama, H.: Two crucial issues in impact assessment studies using the CMIP6 ensemble: hot models and SSP3-7.0. The 4th Asian Conference on Meteorology (ACM) 2024, Tsukuba, 18-20 November, 2024.

Shiogama, H. Two crucial issues in climate change impact assessments: hot models and SSP3-7.0. GEWEX-OSC 2024, Sapporo, 7-12 July, 2024.

Shiogama, H.: Two Crucial Issues in Impact Assessment Studies Using the CMIP6 Ensemble. AOGS2024, Korea, 23-28 June, 2024.

Shiogama, H.: Two crucial issues in climate change impact assessments using the CMIP6 ensemble. JpGU Meeting 2024, Makuhari, 26-31 May, 2024.

廣田渚郎, 道端拓朗, 山上遙航, 建部洋晶, 鈴木健太郎, 渡部雅浩, 川崎高雄, 新田友子, 関口美保, 斎藤冬樹, 大越智幸司, 渡辺真吾, 阿部学, 小長谷貴志, 塩竈秀夫, 竹村俊彦, 小倉知夫, 大野知紀, 芳村圭, 鈴木立郎, 小室芳樹, 川合秀明, Ching-Shu Hung, 千喜良稔, 八代尚, 五藤大輔: 気候モデルMIROC7の開発. 日本気象学会2024年度秋季大会, つくば国際会議場, 2024年11月12-15日.

塩竈秀夫, 藤森真一郎, 長谷川知子, 林未知也, 平林由希子, 小倉知夫, 飯泉仁之直, 高橋潔, 竹村俊彦 (2024) SSP3-7.0の特殊性 : 気候変動影響評価研究と次期ScenarioMIPへの提言. 日本気象学会2024年度秋季大会, 2024年11月12-15日

5.4 その他(書籍等)

なし

6. 連絡先 (氏名、住所、所属、Tel、Fax、E-mail)

廣田渚郎

〒305-8506 茨城県つくば市小野川16-2

国立研究開発法人国立環境研究所地球システム領域

Tel: 029-850-2106 Fax: 029-850-2960

E-mail: hirota.nagio@nies.go.jp

研究課題名：
化学気候モデルを用いた全大気を包括する大気微量成分輸送と気候影響に関する研究

実施年度：
令和6年度

課題代表者：国立環境研究所地球システム領域 山下陽介
共同研究者：国立環境研究所地球システム領域 秋吉英治
国立環境研究所地球システム領域 池田恒平
国立環境研究所地球システム領域 田中智大

1. 研究目的

大気微量成分のモデリングおよび気候変動との相互作用の研究を進めるため、海洋過程を結合した化学気候モデルに対流圏～熱圏までの大気微量成分の入力が可能なモデルを整備・高度化する。それによって、大気微量成分濃度変動、および、成層圏から対流圏への輸送と大気微量成分による地表の気候影響を明らかにする。

キーワード：
化学気候モデル、MIROC、高解像度化、オゾン層、大気微量成分、成層圏、対流圏

2. スーパーコンピュータ利用実績

2.1 計算機利用時間 (2024年4月1日～2025年3月31日)

CPU 時間 v_debug :	4.7 [VE・hours]
v_normal :	207,874.0 [VE・hours]
計 :	207,878.7 [VE・hours]

2.2 利用概要

水平低解像度 T42 から高解像度 T85 にした MIROC6 化学気候モデルを用いて長期間のフリーランを行った。過去に開発を行った MIROC3.2 化学気候モデルを用いて、5 年間の 100 アンサンブル実験を 12 種類行った。また、NICAM の成層圏モデルを開発するに当たり、まずは比較のために MIROC5 化学気候モデルのオゾン化学過程を簡略化したモデルで実験を行った。さらに、水平解像度 56 km の NICAM-Chem に同様の成層圏化学モデルを導入し、数年間の実験を行った。

3 研究結果

3.1 概要

今年度は、高解像度 T85 にした MIROC6 化学気候モデルを用いて成層圏の水蒸気量や、成層圏から対流圏に流入するオゾン等の物質輸送のシミュレーションを行った。また、過去に開発を行った MIROC3.2 化学気候モデルを活用して、太陽プロトンイベントに伴うオゾン層変動を調べるため、イベント時の NO_x 等を入力した実験を行い、オゾン層などの解析を行った。オゾン化学過程を簡略化した MIROC5 化学気候モデルと NICAM-Chem とで比較実験を行った。

3.2 背景と目的

成層圏・中間圏の大気微量成分分布は、成層圏の南北循環場である Brewer-Dobson 循環 (BDC)、対流圏から流入するオゾン破壊物質や温室効果ガス等の大気微量成分、対流圏からの流入と成層圏でのメタン酸化による水蒸気の供給、中間圏～熱圏における太陽プロトンイベントによる NO_x 濃度増大に伴うオゾン破壊の促進や、対流圏～熱圏までの様々な時間スケールの大気変動の影響を受ける。BDC は対流圏から成層圏に伝播する大気波動によって駆動されるため、大気波動を駆動する地形・海陸分布や対流圏の気象・気候場の影響も受ける。このように成層圏の循環は対流圏の変動に受動的と考えられてきたが、1980 年代以降、成層圏から対流圏への寄与も議論されるようになり（例えば Haynes et al. 1991）、近年ではオゾン層の変化を通じた高緯度対流圏の気象・気候場や海洋循環への影響（Son et al. 2008；Thompson et al. 2011）、成層圏から対流圏熱帯域の対流活動への影響（Noguchi et al. 2020）なども活発に議論されるようになってきた。また、成層圏オゾンは対流圏界面を越えて対流圏に流入し、対流圏オゾンに影響を与える。このように、物質循環と気候影響を理解するには、全大気を包括する化学・放射・輸

送プロセスの理解が欠かせない。

国立環境研究所では、これまで CCSR/NIES 大気大循環モデルや MIROC モデルに大気化学過程を導入して化学気候モデルを開発し、オゾン層の将来予測を行い、UNEP/WMO オゾンアセスメントレポートや国際プロジェクト Chemistry Climate Model Validation (CCMVal) およびその後継の Chemistry Climate Model Initiative (CCMI) に貢献してきた。また、以前のスーパーコンピュータシステム利用課題において、気候との相互作用を解明するため、海洋を結合した化学気候モデルを開発し、前年度までに CCMI の推奨実験の解析などを行うことでモデルの検証を進めてきた。

本研究課題では、物質循環と気候影響の理解の促進に資するため、対流圏界面を越えて成層圏に流入するオゾン破壊物質や水蒸気、成層圏から対流圏に流入するオゾン等の物質輸送を扱うための高解像度化、中間圏～熱圏における太陽プロトンイベント等による大気微量成分の変化を計算できるモデル開発を進める。これにより、大気微量成分濃度変動、および、成層圏と対流圏の間の物質輸送と大気微量成分による地表の気候影響の解明や将来予測の不確実性を減らすことを目的としている。

3.3 計算方法

3.3.1 水平高解像度T85のMIROC6化学気候モデルを用いた実験

前研究課題では、MIROC6化学気候モデルをT42L34からT85L81まで高解像度化した。このモデルを用いて30年間のフリーランを行った。

3.3.2 太陽プロトンイベントに伴う高エネルギー粒子の流入による大気応答の解析

太陽プロトンイベントに伴う高エネルギー粒子の流入による大気応答を調べるために、1859年の巨大フレア、キャリントンイベント級のNO_xをMIROC3.2化学気候モデルに入力した5年間の実験を行なった。初期値を変えて100アンサンブル実験を行なっている。

3.3.3 オゾン化学過程を簡略化したMIROC5化学気候モデルとNICAM-Chemによる実験

NICAMの成層圏モデルを開発するに当たり、まずは比較のためにMIROC5化学気候モデルのオゾン化学過程を簡略化しており、そのモデルで実験を行った。さらに、水平解像度56 kmのNICAM-Chemに同様の成層圏化学モデルを導入し、数年間の実験を行った。

3.4 結果

3.4.1 水平高解像度T85のMIROC6化学気候モデルを用いた実験

高解像度のMIROC6化学気候モデル（T85L81）の成層圏水蒸気量分布を従来のMIROC3.2化学気候モデル（T42L34）と比較したところ、上部対流圏・下部成層圏（UTLS）で違いが大きく、特に北半球の亜熱帯ジェット付近でこれまでの低解像度モデルは水蒸気量を過大評価していたことがわかった（図1）。この傾向は世界の化学気候モデルでも見られ（Charlesworth et al., 2023）、UTLS領域の水蒸気分布の再現には高解像度モデルが必要であることがわかった。一方、上・中部成層圏の水蒸気量の両モデル間の違いは小さい。

成層圏から対流圏への物質の流入は、中緯度の発達した低気圧に伴う圏界面高度の低下によりもたらされることがある（e.g., Wernli and Bourqui, 2002）。スペクトルモデルで従来の低解像度MIROC5.0化学気候モデル（T42L34）では、高解像度（水平約56 km、220 km）のNICAMに比べ流入量を過小評価する傾向にあった（Yamashita et al., 2017）。そこで、スペクトルモデルでT85L81まで高解像度化したMIROC6化学気候モデルを用いて30年間のフリーランを行い、日本付近の発達した低気圧事例（スピンドアップ後の20年間で24事例）における対流圏の500 hPa高度の相対湿度のコンポジット平均を作成した（図2）。成層圏から対流圏への物質の流入が活発な領域では、成層圏の乾いた空気が流入するために相対湿度が低下する傾向にあり、高解像度化により低気圧の南縁付近にそのような領域（西日本から朝鮮半島、黄海へ続く青や白で表された領域）がシャープに見られた。

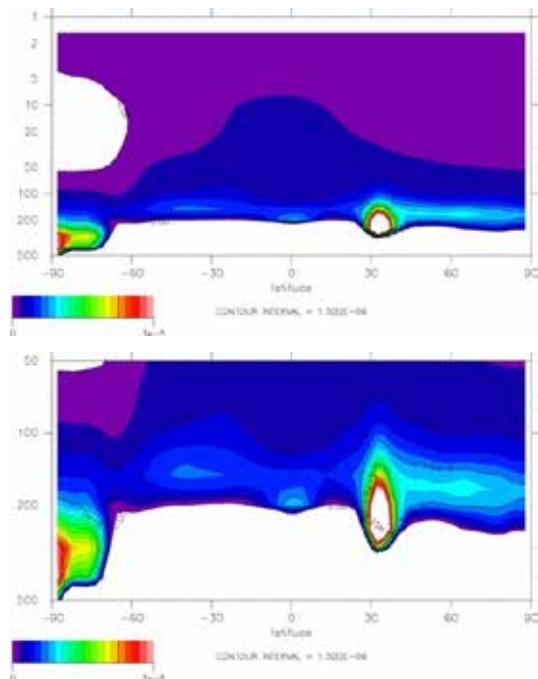


図1. 化学気候モデルを低解像度 (T42L34) と高解像度 (T85L81) で動かした場合の水蒸気量の差。 従来の MIROC3.2 化学気候モデル (T42L34) と、MIROC6 化学気候モデル (T85L81) との差を示す。
(上) 1~500 hPa、と (下) 50~500 hPa の範囲で作成。

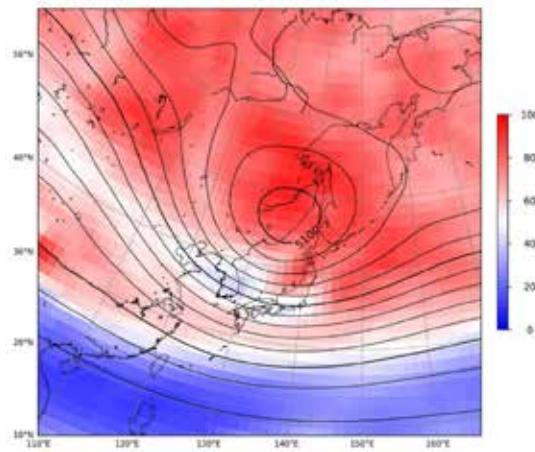


図2. MIROC6.0 化学気候モデル (T85L81) による発達した低気圧事例のコンポジット平均。 色は 500 hPa の相対湿度 (%)、等値線は 500 hPa のジオポテンシャル高度 (m)

3.4.2 太陽プロトンイベントに伴う高エネルギー粒子の流入による大気応答の解析

1859年大気ではCl_x濃度が低く2000年大気では高いため、2000年の場合には太陽プロトンイベントの影響によって増加したNO_xが、南極渦内の高濃度ClOと反応しClONO₂となってClO濃度が低くなる。このため、プロトンイベントが起こっていない平常時と比較してオゾン破壊への影響は弱められることがわかつた。この傾向は他の化学気候モデルでも見られる (Maliniemi et al., 2022)。

なお北極では、極渦の安定度が低くClO濃度が南極渦内ほど高くならないため、塩素濃度の違いによる影響は小さい。(どちらの大気も主にNO_x增加によるオゾン破壊が見られる)

3.4.3 オゾン化学過程を簡略化したMIROC5化学気候モデルとNICAM-Chemによる実験

MIROC5化学気候モデルのオゾン化学過程を簡略化した実験では、消失項の係数を15倍すると赤道域で周辺よりもオゾン全量が小さく、中高緯度域で多い分布が再現されていた。オゾンホールを生じるような反応は入っていないため、南極オゾンホールは見られない。NICAM-Chemのオゾン化学過程を同様に簡略化した実験では、解像度が高い (56 km) ため分布のノイズは多いものの、赤道域で少なく中高緯度域で多い分布の特徴はシミュレーションできていた。今後、詳細な比較を行う。

参考文献

- 1) Haynes, P. H, M. E. McIntyre, T. G. Shepherd, C. J. Marks, & K. P. Shine (1991), On the “downward control” of extratropical diabatic circulations by eddy-induced mean zonal forces , *J. Atmos. Sci.*, 48, 651 - 678. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1991\)048<0651:OTCOED>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1991)048<0651:OTCOED>2.0.CO;2)

- 2) Son S.-W., Polvani L. M., Waugh D. W., Akiyoshi H., Garcia R., Kinnison D., Pawson S., Rozanov E., Shepherd T. G., & Shibata K. (2008) The impact of stratospheric ozone recovery on the southern hemisphere westerly jet. *Science*, 320 (5882), 1486-1489. <https://doi.org/10.1126/science.1155939>
- 3) Thompson D. W. J. et al. (2011) Signatures of the Antarctic ozone hole in Southern Hemisphere surface climate change. *Nat. Geosci.*, 4, 741–749. <https://doi.org/10.1038/NGEO1296>
- 4) Noguchi, S., Kuroda, Y., Kodera, K., Watanabe, S. (2020) Robust enhancement of tropical convective activity by the 2019 Antarctic sudden stratospheric warming. *Geophys. Res. Lett.*, 47, e2020GL088743. <https://doi.org/10.1029/2020GL088743>
- 5) Charlesworth, E. et al. (2023) Stratospheric water vapor affecting atmospheric circulation. *Nat Commun*, 14, 3925. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-39559-2>
- 6) Wernli, H., & Bourqui, M. (2002) A Lagrangian “one-year climatology” of (deep) cross-tropopause exchange in the extratropical Northern Hemisphere. *J. Geophys. Res.*, 107, 4021. <https://doi.org/10.1029/2001JD000812>
- 7) Yamashita, Y. et al. (2017) Resolution dependency of numerically simulated stratosphere-to-troposphere transport associated with mid-latitude closed cyclones in early spring around Japan. *SOLA*, 13, 186 – 191, <https://doi.org/10.2151/sola.2017-034>
- 8) Yamashita, Y., H. Akiyoshi, and M. Inoue (2023) The role of sea-surface conditions in Southern-Hemisphere polar vortex strength and associated wave forcing revealed by a multi-member ensemble simulation with the chemistry-climate model. *SOLA*, 19B, 9–15. <https://doi.org/10.2151/sola.19B-002>
- 9) Maliniemi V., Arsenovic P., Seppälä A., & Tyssøy H. N. (2022) The influence of energetic particle precipitation on Antarctic stratospheric chlorine and ozone over the 20th century. *Atmos. Chem. Phys.*, 22(12), 8137–8149. <https://doi.org/10.5194/acp-22-8137-2022>

4.まとめ

今年度は、高解像度 T85L81 の MIROC6 化学気候モデルを用いて、成層圏水蒸気量分布の解像度間の比較や、成層圏から対流圏への物質の流入についての解析を行った。また、従来の MIROC3.2 化学気候モデルによる太陽プロトンイベントに伴う高エネルギー粒子の流入による大気応答実験も行った。今後、化学的な影響と力学的な影響の切り分けや気候への影響についても調べる。MIROC5 化学気候モデルでは、オゾン化学過程を簡略化したモデルで実験を行った。水平解像度 56 km の NICAM-Chem に同様の成層圏化学モデルを導入し、比較実験を行った。

5. 研究成果発表

5.1 誌上発表(査読あり)

- Tanimoto H., Matsunaga T., Someya Y., Fujinawa T., Ohyama H., Morino I., Yashiro H., Sugita T., Inoma S., Mueller A., Saeki T., Yoshida Y., Niwa Y., Saito M., Noda H., Yamashita Y., Ikeda K., Saigusa N., Machida T., Frey M., Lim H., Srivastava P., Jin Y., Shimizu A., Nishizawa T., Kanaya Y., Sekiya T., Patra P., Takigawa M., Bisht J., Kasai Y., Sato T. (2025) The greenhouse gas observation mission with Global Observing SATellite for Greenhouse gases and Water cycle (GOSAT-GW): Objectives, conceptual framework and scientific contributions. *Progress in Earth and Planetary Science*, 12 (8)
- 藤繩環, 林顯光, 佐藤知紘, 関谷高志, 山下陽介, 中村綾乃, 杉田考史, 金谷有剛, 笠井康子, 谷本浩志 (2024) GOSAT-GW TANSO-3 L2 NO₂プロダクト (T3L2NO₂) の導出アルゴリズム. 日本リモートセンシング学会誌, 44(2), 127-134, <https://doi.org/10.11440/rsj.2024.014>
- Deng Y., Tanimoto H., Ikeda K., Kameyama S., Okamoto S., Jung J., Yoon Y.J., Yang E.J., Kang S-H. (2024) Shipborne observations of black carbon aerosols in the western Arctic Ocean during summer and autumn 2016-2020: impact of boreal fires. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 24 (10), 6339-6357, <https://doi.org/10.5194/acp-24-6339-2024>
- Itahashi S., Terao Y., Ikeda K., Tanimoto H. (2024) Source identification of carbon monoxide over the greater Tokyo area: Tower measurement network and evaluation of global/regional model simulations at different resolutions. *Atmospheric Environment*, 23, 100284, <https://doi.org/10.1016/j.aeaoa.2024.100284>

5.2 誌上発表(査読なし)

5.3 口頭発表

- Hirooka T., Nakamura H., Akiyoshi H. (2025) Predictability of dynamical and ozone fields during the stratos

- pheric ozone reduction event over the southern tip of South America in November 2009. A joint QBO -SNAP-QUOCA meeting, -
- Yamashita Y., Naoe H., Inoue M., Takahashi M. (2025) Two possible pathways of the Southern Hemisphere atmospheric response to the QBO during winter and spring. A joint QBOi - QUOCA - SNAP workshop, incorporating the first APARC cross-activity convention on nudging simulations, -
- 山下陽介, 丹羽洋介, 五藤大輔, 八代尚, 池田恒平, 打田純也, 齊藤誠, 佐伯田鶴, 佐藤正樹, 田上雅浩, 永島達也, LIU Guangyu, 谷本浩志 (2025) NICAM-Chem を利用した簡易排出量推計システム. 2025 年度 NICAM 開発者会議, なし
- Niwa Y., Terao Y., Tohjima Y., Mueller A., Tanimoto H., Yamada K., Machida T., Nakaoka S., Umezawa T., Saito T., Goto D., Yashiro H., Yamashita Y., Ikeda K. (2024) Overview of the MOEJ-funded research initiative: monitoring GHGs and SLCFs for climate change mitigation. 21st Tripartite Presidents Meeting among NIER, CRAES and NIES, Abstracts, 40-49
- 山下陽介, 井上誠, 大久保武矢, 武藤大悟, 宮川拓真, 永吉武志 (2024) 秋田における集中観測時のブラックカーボン輸送の解析. 第 29 回大気化学討論会, 同予稿集
- 藤繩環, LIM Hyunkwang, 佐藤知紘, 関谷高志, 山下陽介, 中村綾乃, 杉田考史, 金谷有剛, 笠井康子, 谷本浩志 (2024) 第 3 世代 GOSAT (GOSAT-GW) TANSO-3 L2 NO₂ プロダクト (T3L2NO₂) 導出アルゴリズム. 第 29 回大気化学討論会, 同予稿集
- Ohyama H., Tanimoto H., Matsunaga T., Sugita T., Yashiro H., Morino I., Saito M., Inomata S., Ikeda K., Someya Y., Fujinawa T., Yoshida Y., Yamashita Y., Mueller A., Frey M., Lim H., Saeki T., Saigusa N., Kanaya Y., Sekiya T., Patra P., Takigawa M., Yamaguchi M., Bisht J., Kasai Y., Sato T., Nakamura A. (2024) GOSAT-GW update and validation plan. NDACC/IRWG-TCCON-COCCON Annual Meeting 2024, -
- Niwa Y., Goto D., Yashiro H., Yamashita Y., Ikeda K., Yamada K. (2024) Development of an integrated modeling analysis system for inferring emissions of GHGs and SLCFs. The 1st NIES-IAP Young Scientists Symposium on Atmospheric Environment and Climate Change, -
- Yamashita Y., Inoue M., Okubo T., Muto D., Miyakawa T., Nagayoshi T. (2024) The analysis of the black carbon transport to the northern Japan in December 2022 with the observation and the GEOS-CF products. The 16th International Commission on Atmospheric Chemistry and Global Pollution (iCACGP) Symposium and 18th International Global Atmospheric Chemistry (IGAC) Science Conference (iCACGP-IGAC Conference 2024), -
- Fujinawa T., Lim H., Sato O. T., Sekiya T., Yamashita Y., Nakamura A., Sugita T., Kanaya Y., Kasai Y., Tanimoto H. (2024) Progress of retrieval algorithm development for GOSAT-GW NO₂ product. The 16th International Commission on Atmospheric Chemistry and Global Pollution (iCACGP) Symposium and 18th International Global Atmospheric Chemistry (IGAC) Science Conference (iCACGP-IGAC Conference 2024), -
- 山下陽介, 井上誠, 大久保武矢, 武藤大悟, 宮川拓真, 永吉武志 (2024) 秋田における 2022 年 12 月の集中観測と GEOS-CF によるブラックカーボンの輸送解析. 大槌シンポジウム 2024 「多様な時空間スケールの先進的気象学・気候学・大気科学」, なし
- Akiyoshi H., Kadowaki, M., Yamashita Y., Nagatomo T. (2024) Dependence of Arctic column ozone on future ODSs and GHGs in the variability of 500-ensemble members of MIROC3.2- and MIROC5-CCMs and implications for future Arctic ozone. Quadrennial Ozone Symposium 2024, -
- Jorimann A., Sukhodolov T., Chiodo G., Rozanov E., Visoni D., Tilmes S., Plummer D., Watanabe S., Akiyoshi H., Yamashita Y., Luo B. (2024) Ozone in a Stratospheric Aerosol Injection Scenario. Quadrennial Ozone Symposium 2024, Abstracts

- Tourpali K., Chrysanthou A., Akiyoshi H., Dennison F., Joeckel P., Josse B., Cheroux F., Kinnison D., Cola rco P., Plummer D., Rozanov E., Egorova T., Sukhodolov T., Morgenstern O., Zeng G., Keeble J., Pet ropavlovskikh I., Godin-Beekmann S., Sofieva V. (2024) CCMI-2022 Ref-D1 and Ref-D2 stratospheric ozone trends and natural variability. Quadrennial Ozone Symposium 2024, Abstracts
- Hirasedo S., Motizuki Y., Hasebe Y., Cullens C. Y., Nakai Y., Akiyoshi H., Imamura T., Katsuda S. (2024) Key ionic reactions affecting stratospheric O₃ and HNO₃ changes caused by solar proton events. Spac e Climate 9, -
- Fujinawa T., Lim H., Yamashita Y., Sekiya T., Sato O. T., Nakamura A., Sugita T., Kasai Y., Kanaya Y., Tanimoto H. (2024) Progress of retrieval algorithm development for GOSAT-GW NO₂ product. The 45 th COSPAR 2024 Scientific Assembly, -
- 平瀬戸爽, 望月優子, 長谷部憂磨, 中井陽一, 秋吉英治, 今村隆史, 勝田哲 (2024) ハロワイン太陽プロト シイベントが引き起こす成層圏大気中の化学種濃度変動におけるイオン反応の重要性. 日本地球惑星 科学連合 2024 年大会, 同予稿集

5.4 その他(書籍等)

秋吉英治, 山下陽介 (2025) 溫暖化の科学 「Q13 オゾン層破壊が温暖化の原因?」, 研究者がズバリ科学 で答える! ココが知りたい地球温暖化. 国立研究開発法人国立環境研究所地球システム領域編, 成山 堂書店, 77-83, 2025 年 4 月 5 日

6. 連絡先 (氏名、住所、所属、Tel、Fax、E-mail)

山下陽介

〒305-8506 茨城県つくば市小野川16-2

国立研究開発法人国立環境研究所地球システム領域

Tel: 029-850-2107

E-mail: yamashita.yosuke@nies.go.jp

研究課題名 :
短寿命気候強制因子の変化に伴う気候・地域環境への影響評価

実施年度：
令和6年度

課題代表者： 国立環境研究所地域環境保全領域 五藤大輔
共同研究者： 国立環境研究所地球システム領域 永島達也
九州大学応用力学研究所 竹村俊彦・道端拓朗・富澤慧
名古屋大学大学院環境学研究科 須藤健悟・Hossain Mohammed Syedul Hoque・Do Thi Nhu Ngoc・水野光一郎・正木悠斗・郭力萌・翟旭峰・入戸野瑛・梅村茉有・
東京大学大気海洋研究所 鈴木健太郎
岡山大学学術研究院自然科学学域 出口歩海・吉村航人・田村誠也・橋本真一・川端碧衣・松葉穂
海洋研究開発機構地球表層システム研究センター 打田純也・Ha Thi Minh Phuc
東北大学大学院環境科学研究科 Isah Mohammed Engha
東京都市大学 持田祐行

1. 研究目的

本課題では、大気中のエアロゾルや対流圏オゾンのような地球の放射収支・水循環に影響を与える短寿命気候強制因子（Short-lived Climate Forcers: SLCFs）の変化が気候および地域環境に及ぼす影響を評価し、SLCFsに着目した地球温暖化に対する緩和策の検討に繋げることを大きな目的とする。このために、複数の数値モデルを用いて、SLCFsの組成ごと・地域ごとの気候変化を定量化するとともに、モデルの継続的な改良・検証も目的とする。

キーワード：大気汚染物質輸送モデル、短寿命気候汚染物質、モデル高度化

2. スーパーコンピュータ利用実績

2.1 計算機利用時間（2024年4月1日～2025年3月31日）

CPU 時間	v_debug	: 277.1 [VE・hours]
	v_normal	: 751,852.2 [VE・hours]
	計	: 752,159.3 [VE・hours]

2.2 利用概要

大気海洋結合モデルMIROCとエアロゾルモデルSPRINTARSが結合したMIROC-SPRINTARSモデル、MIROCと結合した大気化学モデルCHASER (MIROC-ESM) モデル、及び正二十面体全球大気格子モデルNICAMとSPRINTARS・CHASERが結合したNICAM-Chemモデルを用い、それぞれ並列計算を行った。

3. 研究結果

3.1 概要

MIROC-SPRINTARS を用いた国際モデル相互比較研究RAMIP のためのシミュレーションで計画された多数のシミュレーションを実施し、その結果を RAMIP に提出することができた。得られた結果は、産業革命前から現在における地表気温変化も IPCC-AR6 (2021)と概ね整合的であり、将来実験においても SSP3-7.0 と SSP1-2.6 のシナリオの違いを想定の範囲内での変化を示すことができた。また、MIROC に適用された降水予報型スキームの降水落下計算を陰解法にすることで、計算コストの再現に成功した。特に、MIROC7 で標準的に用いられている降水予報型スキームは、MIROC6 の標準版であった降水診断型スキームの計算コストと比べて 40%程度増えたのだが、今回の改良によって降水診断型スキームの計算コストと比べても 10%程度の増加にとどまった。また、MIROC-CHASER を用いた 2022 年フンガトンガ噴火シミュレーションも実施した。水蒸気增加に伴う OH 濃度の上昇、成層圏エアロゾル光学的厚さの増加とその分布の時系列変動、オゾン分布、これらの変化に伴う放射強制力などを定量的に評価できた。

3.2 背景と目的

気温上昇を早急に抑制するためには、大気寿命の短いSLCFsの中でも正の放射強制力を示す物質（ブラックカーボン、対流圏オゾン等）を減らすことが必要であり、国際的にも広く認知されている。SLCFsに着目した緩和策を検討するためには、高精度の数値モデルが必要となり、SLCFsの変化に対する気候応答を正しく見積もることが重要である。そこで本研究では、全球モデルを用いてSLCFsの排出量変化に対する物質濃度・放射強制力・気候応答を調べるとともに、その影響評価をより精度良くシミュレーションするためにモデル高度化を進める。

3.3 計算方法

3.3.1 MIROC-SPINTARS を用いた国際モデル相互比較研究のためのシミュレーション

近未来予測におけるエアロゾルの地域排出量の変化に対する気候・大気質の応答を量化解することを目的としたモデル相互比較プロジェクト（Regional aerosol model intercomparison project: RAMIP by Wilcox et al., 2023）が実施されている。RAMIPでは、標準実験に加えて、1850年から2014年までの歴史実験と複数の将来実験が計画されている。複数の将来実験には、大気海洋結合モデル漸増実験 Tier1（長寿命気体・オゾン・自然起源排出量に関しては SSP3-7.0 シナリオ、人為起源エアロゾル排出量に関しては SSP1-2.6 シナリオをベースにした設定。ただし、人為起源エアロゾル排出量は各領域で SSP3-7.0 シナリオとする感度実験も含まれる）、大気海洋結合モデル漸増実験 Tier2（人為起源エアロゾル排出量以外は Tier1 と同じ条件。人為起源エアロゾル排出量は各領域・各物質に変えた感度実験）、大気モデル実験（人為起源エアロゾル排出量以外は Tier1 と同じ条件。人為起源エアロゾル排出量は各領域・各物質に変えた感度実験）が含まれる。これら多数の数値実験に関して、MIROC-SPINTARS でも NIES スーパーコンピュータを用いて実施し、その結果を RAMIP に提出した。

用いた MIROC は、大気海洋結合モデル MIROC6.1.0 (Tatebe et al., 2019) であり、エアロゾルモデル SPRINTARS (Takemura et al., 2005; 2009) が結合されている。SPINTARS は土壤粒子、海塩粒子、有機炭素エアロゾル (OC)、ブラックカーボン (BC)、硫酸塩エアロゾル、といった主要な対流圏エアロゾルを取り扱っており、硫酸塩エアロゾルの前駆物質である二酸化硫黄 (SO_2) と DMS も取り扱っており、これらの物質の時空間分布や放射・雲との相互作用も加味したエアロゾル輸送モデルである。本報告書では、RAMIP に提出したシミュレーション結果の 1 例を 3.4.1 章に示す。

3.3.2 MIROC に適用された降水予報型スキームの改良

最新版の MIROC (MIROC7) には、降水予報型スキーム CHIMERRA (Cloud-Hydrometeors Interactive Module with Explicit Rain and Radiation) が実装されており、雲量や放射強制力のバイアス改善に重要な役割を果たしている (Michibata et al., 2019; Michibata et al., 2020)。しかし、降水粒子の落下に関して現在のオイラー型の解法では、繰り返し計算が必要であり、力学のタイムステップ時間よりも短いサブタイムステップ dt の設定が必要となる。この設定は MIROC の現状でのモデル解像度では問題がない。しかし、将来にかけて高解像度化を進める際には、特に最下層付近での CFL 条件 (Courant-Friedrichs-Lowy Condition) の制約が厳しくなり、 dt を細かく設定する必要があり、計算コストの更なる増大が予想される。このような事態を避けるために、降水落下の計算に要求される短い dt に伴う繰り返し計算を避けることが可能な落下計算スキーム（陰解法）を開発した。解析では、大気モデル MIROC の解像度は T85L40h で、6 年積分に要する計算経過時間に注目した。なお、計算される気候場はどのモデルでも同程度であることは確かめている。

3.3.3 MIROC-CHASER を用いた 2022 年フンガトンガ噴火シミュレーション

2022 年 1 月に発生したフンガトンガ噴火に伴う火山性物質が中長期的に放射・大気化学場に与える影響を評価する目的で、気候モデル MIROC5 (Watanabe et al., 2010) に結合された対流圏と成層圏オゾン化学・エアロゾル過程を計算できる CHASER (Sudo et al., 2002; Sudo and Akimoto, 2007; Sekiya et al., 2016) を利用した。本実験での水平解像度は T85 (約 1.8°)，鉛直方向は 57 層で計算した。フンガトンガ噴火がないと想定した標準実験に対して、感度実験では実際の観測結果に準拠するようにフンガトンガ噴火に伴う火山性物質として二酸化硫黄 0.5 Tg と水蒸気 145 Tg を高度 20-30 km に注入した。

3.4 結果

3.4.1 MIROC-SPRINTARS による RAMIP 実験

図1は、MIROC6.1.0で計算した地表気温の全球平均値に関して、産業革命前から現在、そして2100年までの時系列変動を示している。産業革命前から現在を見ると、1995-2014年では産業革命前からの差分が観測で得られている0.84-1.10°C (IPCC-AR6, 2021)と概ね整合的であった。将来実験ではSSP3-7.0シナリオを用いて計算した結果と、エアロゾルのみSSP1-2.6のシナリオを用いて計算した結果を示している。2100年におけるそれぞれの気温結果を見ると、SSP3-7.0シナリオでは約3.5°Cであり、エアロゾルのみSSP1-2.6シナリオでは約4.0°Cとなった。これはSSP1-2.6シナリオではエアロゾルが削減されるために、エアロゾル及びエアロゾルを介した雲による地球を冷やす効果が軽減したためだと解釈できる。このような傾向は、エアロゾル削減による温暖化の影響として既に現れていると示唆されている (Hodnebrog et al., 2024)。

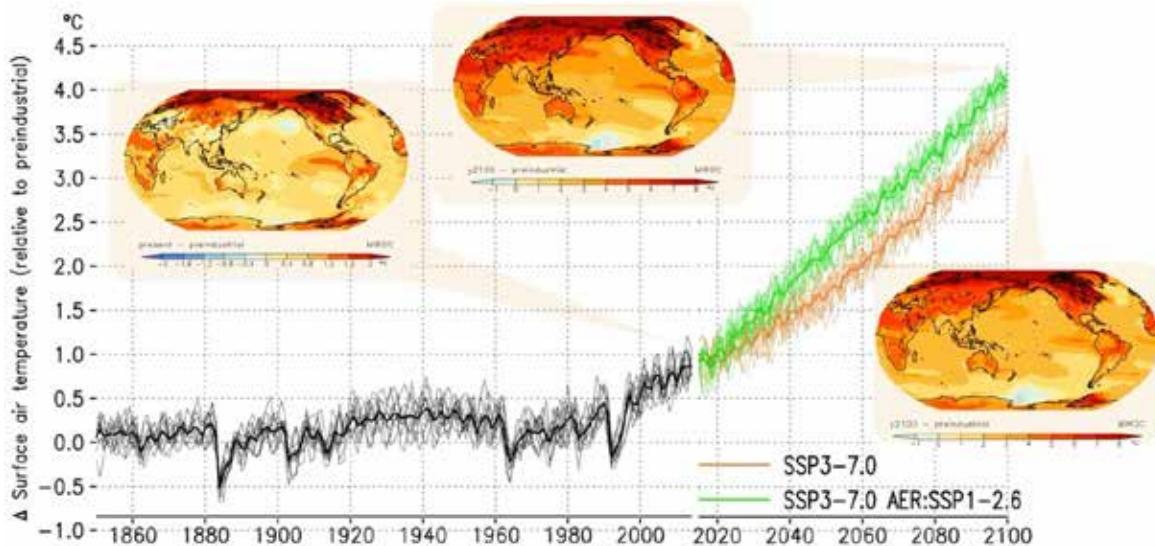


図1. 産業革命前から2100年におけるMIROC6.1.0で計算した地表気温全球平均値（産業革命前の気温に対する相対値）。現在（2014年）までの計算は過去再現実験設定、現在から2100年までの計算はRAMIPで設定された大気海洋結合モデル漸増実験Tier1および大気海洋結合モデル漸増実験Tier2の一部（人為起源エアロゾル排出量のみをSSP1-2.6シナリオにしたもの）の実験結果である。

3.4.2 MIROC に適用された降水予報型スキームの改良結果

MIROC の降水予報型スキームに関して、雲物理過程を陰解法で計算した場合の計算コストを評価したところ、これまでの標準版であった Eul60 (Eulerian スキームで微物理 60 秒・降水落下はさらに短い秒数が要求される) に比べて、同じ dt の Imp60 (時間 implicit スキームで微物理 60 秒・降水落下も 60 秒) では Eul60 に比べて 15% の高速化、Imp120 (時間 implicit スキームで微物理 120 秒・降水落下も 120 秒) では 22% の高速化を達成することができた。MIROC7 で標準的に用いられている降水予報型スキームは、MIROC6 の標準版であった降水診断型スキームの計算コストと比べて 40%程度増えたのだが、Imp120 では降水診断型スキームの計算コストと比べても 10%程度の増加にとどまった。したがって、本提案による陰解法によってモデル高速化が実現され、将来にかけてモデル高解像度化を進めて、積分時間が激増する問題を避けて、うまく対応できると見込まれる。

3.4.3 MIROC-CHASER を用いた 2022 年フンガトンガ噴火シミュレーション

注入されたSO₂と水蒸気の時間変動が衛星観測と強い一致を示すことを確かめた後、シミュレーション結果を解析した。図2には、成層圏のOH濃度の時間変動を示している。この結果、フンガトンガ噴火に伴う水蒸気の存在により、OH濃度が上昇し、2年に渡って高濃度OHが成層圏に留まることが示唆された。また、図3に示したシミュレーションした成層圏エアロゾル光学的厚さ (sAOD) は、衛星観測で得られた傾向を概ね再現できた（衛星観測結果の図は省略）。しかし、最大sAOD増加の大きさと時期については、衛星観測とはいいくつかの食い違いがあった。具体的には、噴火直後から見られた第一極大値は時期が観測より早かった。また、6月から見られた第二極大と南極輸送は時期がうまく再現できたが、sAODの値は衛星

観測結果に比べて過小評価であった。この理由は、MIROC5モデルによって計算された成層圏循環の偏りに起因していると考えられる。さらに、フンガトンガ噴火後の成層圏の硫酸塩エアロゾルが増大したこと、エアロゾルの表面積が増加し、不均質反応が促進され、オゾン分布を10%程度変化させることもわかった。放射影響を見ると、フンガトンガ噴火に関連した硫酸塩と水蒸気は、それぞれ短波放射冷却（全球平均で $0.1\text{--}0.5 \text{ W m}^{-2}$ ）と長波放射加熱（ $0.05\text{--}0.15 \text{ W m}^{-2}$ ）を引き起こすと推定された。

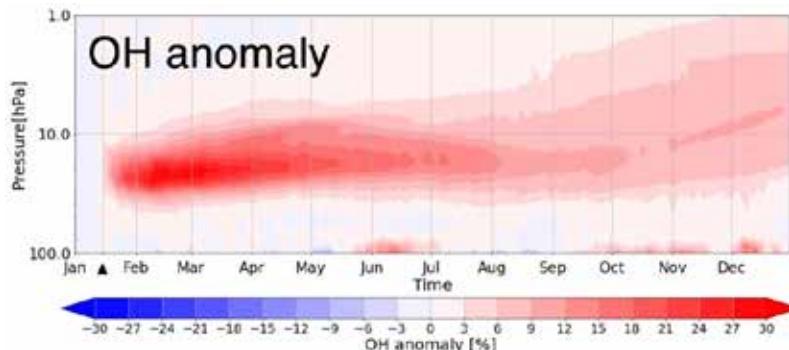


図2. MIROC-CHASERで計算された成層圏におけるOH濃度アノマリー

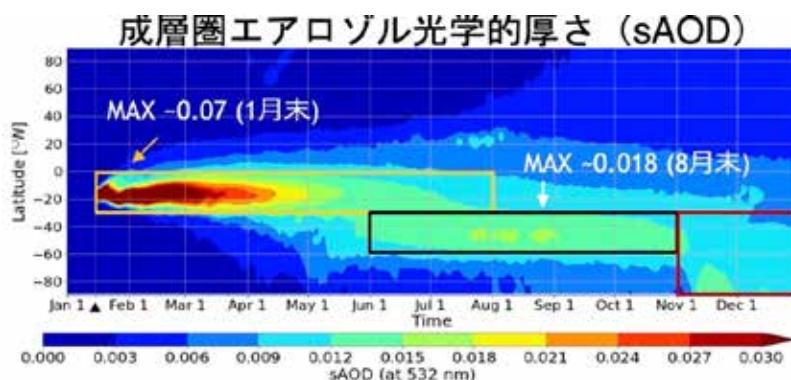


図3. MIROC-CHASERで計算された成層圏エアロゾル光学的厚さの緯度方向に関する時系列変動。フンガトンガ噴火直後の1月末に第一極大値があり、6月から10月にかけて第二極大値が見られた。

参考文献

- Hodnebrog Ø., G. Myhre, C. Jouan, T. Andrews, P. M. Forster, H. Jia, N. G. Loeb, D. J. L. Olivé, D. Paynter, J. Quass, S. P. Raghuraman, M. Schulz (2024) Recent reductions in aerosol emissions have increased Earth's energy imbalance, *communications earth & environment*, 5, 166, <https://doi.org/10.1038/s43247-024-01324-8>
- IPCC-AR6 (2021) in Chapter 1. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 147–286, doi:10.1017/9781009157896.003.
- Michibata T., Suzuki K., Sekiguchi M., Takemura T. (2019) Prognostic precipitation in the MIROC6-SPRINTARS GCM: Description and evaluation against satellite observations. *J. Adv. Model. Earth Syst.* 11, 839–860. <https://doi.org/10.1029/2018MS001596>
- Michibata T., Suzuki K., Takemura T. (2020) Snow-induced buffering in aerosol–cloud interactions. *Atmos. Chem. Phys.* 20, 13771–13780. <https://doi.org/10.5194/acp-20-13771-2020>
- Sekiya T., Sudo K., Nagai T. (2016) Evolution of stratospheric sulfate aerosol from the 1991 Pinatubo eruption: Roles of aerosol microphysical processes, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 121, 2911–2938, doi:10.1002/2015JD024313
- Sudo, K., Akimoto, H. (2007) Global source attribution of tropospheric ozone: Long-range transport from various source regions, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 112, D12302, <https://doi.org/10.1029/2006JD007992>
- Sudo K., Takahashi M., Kurokawa J., Akimoto H. (2002) CHASER: A global chemical model of the troposphere: 1. Model description, *J. Geophys. Res.*, 107(D17), 4586. <https://doi.org/10.1029/2001JD001113>
- Takemura T., Nozawa T., Emori S., Nakajima T. Y., Nakajima T. (2005) Simulation of climate response to aerosol direct and indirect effects with aerosol transport-radiation model. *J. Geophys. Res.*, 110, D02202, <https://doi.org/10.1029/2004JD005029>
- Takemura T., Egashira M., Matsuzawa K., Ichijo H., Oishi R., Abe-Ouchi A. (2009) A simulation of the global distribution and radiative forcing of soil dust aerosols at the Last Glacial Maximum. *Atmos. Chem. Phys.*, 9, 3061–3073, <https://doi.org/10.5194/acp-9-3061-2009>
- Tatebe T., Ogura T., Nitta T., Komuro Y., Ogochi K., Takemura T., Sudo K., Sekiguchi M., Abe M., Saito F., Chikira M., et al. (2024) MIROC-CHASER: A global chemical model of the troposphere and stratosphere for climate research. *Atmos. Chem. Phys.*, 24, 1011–1034, <https://doi.org/10.5194/acp-24-1011-2024>

- al. (2019) Description and basic evaluation of simulated mean state, internal variability, and climate sensitivity in MIROC6, *Geosci. Model Dev.*, 12, 2727-2765, <https://doi.org/10.5194/gmd-12-2727-2019>
- Watanabe M., Suzuki T., O’ishi R., Komuro Y., Watanabe S., Emori S., Takemura T., Chikira M., Ogura T., Sekiguchi M., et al. (2010) Improved climate simulation by MIROC 5: mean states, variability, and climate sensitivity, *J. Clim.*, 23, 6312-6335, doi: 10.1175/2010JCLI3679.1
- Wilcox L. J., Allen R. J., Samset B. H., Bollasina M. A., Griffiths P. T., Keeble J., Lund M. T., Makkonen R., Merikanto J., O'Donnell D., Paynter D. J., Persad G. G., Rumbold S. T., Takemura T., Tsigaridis K., Undorf S., Westervelt D. M. (2023) The Regional Aerosol Model Intercomparison Project (RAMIP). *Geosci. Model Dev.*, 16, 4451–4479, doi:10.5194/gmd-16-4451-2023

4. まとめ

本課題では、SLCFs の変化が気候および地域環境に及ぼす影響評価とモデルの継続的な改良・検証も目的としている。まず、MIROC-SPRINTARS を用いて、国際モデル相互比較研究 RAMIP のためのシミュレーションで計画された SLCF の変化に関する多数のシミュレーションを実施できた。また、MIROC に適用された降水予報型スキームの降水落下計算を陰解法にすることで、計算コストの再現に成功した。また、MIROC-CHASER を用いた 2022 年フンガトンガ噴火シミュレーションも実施することで、モデルの再現性の確認と問題点の把握を進めることができた。今年度は報告しなかったが、NICAM-Chem による SLCF 変化に伴う大気シミュレーションも NIES スーパーコンピュータを利用して進めている。

5. 研究成果発表

5.1 誌上発表(査読あり)

- Cai, Y., H. Irie, A. Damiani, S. Itahashi, T. Takemura, and P. Khatri (2024) Detectability of the potential climate change effect on transboundary air pollution pathways in the downwind area of China. *Science of the Total Environment*, 930, 173490, doi:10.1016/j.scitotenv.2024.173490.
- Do, N. T. N., K. Sudo, A. Ito, L. K. Emmons, V. Naik, K. Tsigaridis, Ø. Seland, G. A. Folberth, and D. I. Kelley (2025) Historical trends and controlling factors of isoprene emissions in CMIP6 Earth system models, *Geosci. Model Dev.*, 18, 2079–2109, <https://doi.org/10.5194/gmd-18-2079-2025>.
- Duran, B. M., C. J. Wall, N. J. Lutsko, T. Michibata, P.-L. Ma, Y. Qin, M. L. Duffy, B. Medeiros, and M. Debolskiy (2025) A new method for diagnosing effective radiative forcing from aerosol–cloud interactions in climate models, *Atmos. Chem. Phys.*, 25, 2123–2146, doi:10.5194/acp-25-2123-2025.
- Hoque, H.M.S., K. Sudo, H. Irie, Y. He, and M. F. Khan (2024) Evaluating CHASER V4. 0 global formaldehyde (HCHO) simulations using satellite, aircraft, and ground-based remote-sensing observations, *Geosci. Model Dev.*, 17, 5545–5571, <https://doi.org/10.5194/gmd-17-5545-2024>.
- Kim, D., M. Chin, G. Schuster, H. Yu, T. Takemura, P. Tuccella, P. Ginoux, X. Liu, Y. Shi, H. Matsui, K. Tsigaridis, S. Bauer, J. Kok, and M. Schulz (2024) Where dust comes from: Global assessment of dust source attributions with AeroCom models. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 129, e2024JD041377, doi:10.1029/2024JD041377.
- Michibata, T. (2024) Radiative effects of precipitation on the global energy budget and Arctic amplification, *npj Clim. Atmos. Sci.*, 7, 136, doi:10.1038/s41612-024-00684-4.
- Mülmenstädt, J., E Grisepeerdt, S. Dipu, J. Quaas, A. S. Ackerman, A. M. Fridlind, F. Tornow, S. E. Bauer, A. Gettelman, Y. Ming, Y. Zheng, P.-L. Ma, H. Wang, K. Zhang, M. W. Christensen, A. C. Varble, L. R. Leung, X. Liu, D. Neubauer, D. G. Partridge, P. Stier, and T. Takemura (2024) General circulation models simulate negative liquid water path–droplet number correlations, but anthropogenic aerosols still increase simulated liquid water path. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 24, 7331–7345, doi:10.5194/acp-24-7331-2024.
- Petrenko, M., R. Kahn, M. Chin, S. E. Bauer, T. Bergman, H. Bian, G. Curci, B. Johnson, J. W. Kaiser, Z. Kipling, H. Kokkola, X. Liu, K. Mezuman, T. Mielonen, G. Myhre, X. Pan, A. Protonotariou, S. Remy, R. B. Skeie, P. Stier, T. Takemura, K. Tsigaridis, H. Wang, D. Watson-Parris, and K. Zhang (2025) Biomass burning emission analysis based on MODIS aerosol optical depth and AeroCom multi-model simulations: implications for model constraints and emission inventories. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 25, 1545–1567, doi:10.5194/acp-25-1545-2025.
- Quaas, J., T. Andrews, N. Bellouin, K. Block, O. Boucher, P. Ceppi, G. Dagan, S. Doktorowski, H. M. Eichholz, P. Forster, T. Goren, E. Grisepeerdt, Ø. Hodnebrog, H. Jia, R. Kramer, C. Lange, A. C. Maycock, J. Mülmenstädt, G. Myhre, F. M. O’Connor, R. Pincus, B. H. Samset, F. Senf, K. P. Shine, C. Smith, C. W. Stjern, T. Takemura, V. Toll, and C. J. Wall (2024) Adjustments to climate perturbations – mechanisms, implications, observational constraints. *AGU Advances*, 5, e2023AV001144, doi:10.1029/2023AV001144.
- Ren, F., J. Lin, C. Xu, J. A. Adeniran, J. Wang, R. V. Martin, A. van Donkelaar, M. Hammer, L. Horowitz, S. T. Turnock, N. Oshima, J. Zhang, S. Bauer, K. Tsigaridis, Ø. Seland, P. Nabat, D. Neubauer, G. Strand, T. van Noije, P. L. Sager, and T. Takemura (2024) Evaluation of CMIP6 model simulations of PM2.5 and its components over China. *Geoscientific Model Development*, 17, 4821–4836, doi:10.5194/gmd-17-4821-2024.
- Wang, H., X. Liu, C. Wu, G. Lin, T. Dai, D. Goto, Q. Bao, T. Takemura, and G. Shi (2024) Larger dust cooling effect estimated from regionally dependent refractive indices. *Geophysical Research Letters*, 51, e2023GL107647, doi:10.1029/2023GL107647.

5.2 誌上発表(査読なし)

該当なし

5.3 口頭発表

- Do, T. N. N., K. Sudo, A. Ito, L. Emmons, V. Naik, K. Tsigaridis, Ø. Seland, G. A. Folberth, D. I. Kelley, Historical Trends and Controlling Factors of Isoprene Emissions in CMIP6 Earth System Models International Symposium on plant molecular phenology and climate feedbacks mediated by BVOCs (PCF2024), Gifu, Japan, October 2024
- Goto D (2024) Global aerosol-climate simulations on 14 km grid spacing, The 4th Asian Conference on Meteorology (ACM) 2024, Tsukuba, Ibaraki, November 2024
- Hirota, N., T. Michibata, Y. Yamagami, H. Tatebe, K. Suzuki, M. Watanabe, T. Kawasaki, T. Nitta, F. Saito, K. Ogochi, M. Sekiguchi, S. Watanabe, H. Shiogama, T. Ogura, T. Takemura, T. Ohno, M. Abe, K. Yoshimura, H. Kawai, M. Chikira, H. Yashiro, and D. Goto (Team MIROC): Development of MIROC7. Asian Conference on Meteorology 2024, Tsukuba, Japan, November 2024
- Hirota, N., T. Michibata, Y. Yamagami, H. Tatebe, K. Suzuki, M. Watanabe, T. Kawasaki, T. Nitta, F. Saito, K. Ogochi, M. Sekiguchi, S. Watanabe, H. Shiogama, T. Ogura, T. Takemura, T. Ohno, M. Abe, K. Yoshimura, H. Kawai, M. Chikira, H. Yashiro, and D. Goto (Team MIROC): Development of the Model for Interdisciplinary Research on Climate version 7 (MIROC7). Japan Geoscience Union Meeting 2024, Chiba, Japan, May 2024.
- Kawano N., Nagashima T., Itahashi S., Ohara T., Chatani S., A future projection of the impact of emissions from nature on the summertime surface ozone concentration in Asian metropolitan areas with WRF-CMAQ model. International Symposium on plant phenology and climate feedbacks mediated by BVOCs (PCF2024), Gifu, Japan, October 2024
- Masaki Y., T. Sekiya, and K. Sudo, Chemistry-climate model simulation of volcanic SO₂ and water vapor injected from the 2022 Hunga Tonga-Hunga Ha'apai eruption, International Symposium on plant molecular phenology and climate feedbacks mediated by BVOCs, (PCF2024), Gifu, Japan, October 2024
- Sudo K., Recent status of BVOCs in Earth system models: emissions and climate impacts, International Symposium on plant molecular phenology and climate feedbacks mediated by BVOCs (PCF2024), Gifu, Japan, October 2024
- Takemura, T., Modeling studies for assessing aerosol-induced climate change — Past and future. International Radiation Symposium 2024, Hangzhou, China, June 2024. [invited]
- 川端碧衣, 道端拓朗: エアロゾル・雲相互作用を緩和させる降水粒子の影響とメカニズム. 日本気象学会関西支部 2024 年度第 1 回例会 (中国地区), 広島合同庁舎, 2024 年 12 月
- 五藤大輔: 全球高分解能大気モデルを用いたエアロゾルシミュレーション, 気候変動と大気汚染 一短寿命気候強制因子の影響と緩和ー 公開ウェビナー 第 9 回, オンライン開催, 2025 年 3 月
- 出口歩海, 道端拓朗: CloudSat/MODIS 衛星観測データを用いた雲・降水特性の雲種別評価. 日本気象学会 2024 年度秋季大会, つくば国際会議場, 2024 年 11 月
- 中西萌々花, 道端拓朗: 北極域の現在気候と将来の温暖化予測に及ぼす雲・放射相互作用の解析. 日本気象学会 2024 年度秋季大会, つくば国際会議場, 2024 年 11 月
- 永島達也, 河野なつ美, 板橋秀一, 大原利眞, 鶴野伊津志, 黒川純一, 花岡達也. 2050 カーボンニュートラル環境の国内地表オゾンへの影響評価. 第 25 回環境と衛生のオンラインセミナー「カーボンニュートラル時代の大気環境 : PM2.5 とオゾンの未来予測」, オンライン, 2024 年 11 月
- 廣田渚郎, 道端拓朗, 山上遙航, 建部洋晶, 鈴木健太郎, 渡部雅浩, 川崎高雄, 新田友子, 関口美保, 斎藤冬樹, 大越智幸司, 渡辺真吾, 阿部学, 小長谷貴志, 塩竈秀夫, 竹村俊彦, 小倉知夫, 大野知紀, 芳村圭, 鈴木立郎, 小室芳樹, 川合秀明, Ching-Shu Hung, 千喜良稔, 八代尚, 五藤大輔: 気候モデル MIROC7 の開発. 日本気象学会 2024 年度秋季大会, つくば国際会議場, 2024 年 11 月
- 道端拓朗: 降水粒子の放射効果が全球エネルギー収支に及ぼす影響. 日本気象学会 2024 年度秋季大会, つくば国際会議場, 2024 年 11 月.
- 吉村航人, 道端拓朗: 環境場依存性を考慮に入れた降水生成スキームの開発. 日本気象学会 2024 年度秋季大会, つくば国際会議場, 2024 年 11 月
- 道端拓朗: エアロゾル・雲相互作用の数値モデリングと衛星観測. 第 46 回日本気象学会九州支部発表会, 九州大学応用力学研究所, 2025 年 3 月 (招待講演)

5.4 その他(書籍等)

該当なし

6. 連絡先 (氏名、住所、所属、Tel、Fax、E-mail)

五藤大輔

〒305-8506 茨城県つくば市小野川 16-2
国立研究開発法人国立環境研究所地域環境保全領域
Tel: 029-850-2899 Fax: 029-850-2580
E-mail: goto.daisuke@nies.go.jp

研究課題名：
閉鎖性水域における水環境への気候変動の影響と栄養塩類管理

実施年度：
令和 5 年度～令和 7 年度

課題代表者：国立環境研究所地域環境保全領域	東 博紀
共同研究者：国立環境研究所地域環境保全領域	中田聰史・赤星 恵
広島大学環境安全センター	西嶋 渉
大阪大学大学院工学研究科	入江政安
京都大学フィールド科学教育研究センター	小林志保
いであ株式会社国土環境研究所	竹内一浩・南浦修也・柴野良太
いであ株式会社情報システム事業本部	春山恭之・笠原彰人

1. 研究目的

気候変動が全国各地の閉鎖性水域の水環境に及ぼす影響を数値シミュレーションで予測し、水域ごとの影響の特性や対応すべき問題を明らかにする。また、それを踏まえて栄養塩類管理の方策を検討するとともに、地方自治体でも影響予測シミュレーションを実施することを可能とするグラフィカルユーザーインターフェース（GUI）を開発することを目的とする。

キーワード：
閉鎖性水域、気候変動、栄養塩類管理、陸域－海域モデル、GUI

2. スーパーコンピュータ利用実績

2.1 計算機利用時間（2024 年 4 月 1 日～2025 年 3 月 31 日）

CPU 時間 v_debug :	557.2 [VE・hours]
v_normal :	268,737.5 [VE・hours]
計 :	269,294.7 [VE・hours]

2.2 利用概要

前年度までに開発と検証を進めてきた有明海・八代海の陸域－海域モデルを活用して、RCP シナリオに基づく気候変動影響予測シミュレーションを行った。また、栄養塩類管理の影響評価モデルを構築するとともに、地方自治体の職員でも運用可能な GUI の開発を行った。陸域－海域モデルのプログラムコードには MPI と OpenMP のハイブリッド並列を用い、入力データの作成や出力データの整理・解析などのプリ・ポスト処理にはスカラー機を利用した。また、GUI 開発ではデータ活用社会創成プラットフォーム mdx を利用した。

3. 研究結果

3.1 概要

有明海・八代海の窒素輸送に気候変動が及ぼす影響を明らかにするため、RCP シナリオに基づく陸域流出－海域流動・水質・底質シミュレーションを行った。海水と TN の通年の正味フローは、外洋から橘湾を経て有明海に流入し、有明海湾奥部からの南下流とともに八代海を通過して外洋に流出する傾向を示した。有明海の窒素供給源は、TN では陸域からの流入が卓越したが、DIN では外洋からの流入が陸域からの流入に匹敵した。気候変動の影響は DIN のフローに特に強

く表れ、全体的に有明海・八代海から外洋への流出が強まる方向にフローが変化すると予測された。その結果、有明海湾奥部の正味 DIN フローは、現在気候では湾央部からの流入であるのに対し、RCP2.6 と RCP8.5 の将来気候では流出に転じ、ノリの漁期である 11~3 月の海水 DIN 量が現在気候よりも減少すると予測された。また、地方自治体の職員が独自に栄養塩類管理の影響評価シミュレーションを実施することを可能にする GUI の開発を行い、プロトタイプを構築した。

3.2 有明海・八代海の窒素輸送・循環を対象とした気候変動影響予測

3.2.1 背景と目的

瀬戸内海、伊勢・三河湾、東京湾の先行研究（東ら, 2020; 東ら, 2021; 東ら, 2024）を通じて、閉鎖性海域の水環境に及ぼす気候変動の影響は明らかになりつつある。一方、海域によっては気候変動の影響が定性的にも異なることが示され、海域ごとの事例研究の積み重ねが重要であることが浮き彫りとなった。

有明海・八代海等は広大な干潟と特有の生物相を有する閉鎖性海域であるが、2000 年代以降はノリの色落ちや有用二枚貝の斃死が相次ぎ、生物生産性の低迷が続いている（有明海・八代海等総合調査評価委員会, 2022）。有明海・八代海等総合調査評価委員会において再生方策が長年検討されているが、いまだ解決には至っていない。さらに、近年は気候変動の影響が顕在化し、九州地方では線状降水帯による記録的な豪雨災害が頻発化している。有明海・八代海等でも、底質の変化、流木等海洋ゴミの増加、過去最大規模の貧酸素水塊の発生など、水環境への影響が報告されている。有明海・八代海等を里海とする地域循環共生圏の実現に向けて、気候変動への適応、特に治水と水環境保全の両立・調和は最重要課題と言っても過言ではない。

本研究では、閉鎖性水域の気候変動の影響予測事例を拡充するため、前年度までに開発と検証を進めてきた有明海・八代海の陸域-海域モデルを活用して、RCP シナリオに基づく気候変動影響予測シミュレーションを行い、有明海・八代海の窒素輸送への気候変動の影響を明らかにすることを目的とする。

3.2.2 研究手法

予測モデルは、瀬戸内海、伊勢・三河湾、東京湾の先行研究（東ら, 2020; 東ら, 2024）をベースとして、前年度までに有明海・八代海等を対象に開発と検証を進めた陸域淡水・汚濁負荷流出-海域流動・水質・底質モデルを使用した（図 1）。陸域モデルは、降水量と蒸発散位を駆動力とし、集水域から海域への淡水・汚濁負荷 (SS, COD, TN, TP) 流出量を予測する分布型流出モデルである。先行研究と同様に、中小河川流域も含めて有明海・八代海等の集水域の落水線を 3 次メッシュ（水平解像度約 1 km）で作成し、汚濁負荷の計算に必要な点源負荷発生量は環境省(2021)の調査データを活用して整備した（図 1）。

海域モデルは、陸域からの流出、海上気象、外洋を駆動力とする流動モデルと C-N-P-O の物質循環を解析する水質・底質モデル（図 2）で構成されている。流動モデルは静水圧・Boussinesq 近似の基礎方程式で構成された 3 次元コロケート格子・レベル座標系モデルである。水質・底質モデルの植物プランクトンは、先行研究と同様に珪藻 2 種と渦鞭毛藻 1 種の計 3 種を考慮し、比増殖速度や半飽和定数など増殖に関わるパラメータは培養実験に基づいて設定した（図 3）。計算対象領域は、対馬暖流や暖水渦など外洋の影響を解析するために広域の 3 次メッシュ格子を設定した（図 1）。鉛直方向は海面から 850 m 深までの 50 層（層厚 0.5~100 m）とした。

気候変動の影響は以下の現在気候と 2 つの将来気候の計算結果を比較することによって評価した。気候変動影響予測の気象条件は DIAS で公開されている「創生・統合プログラム 2 km 格子 NHRCM 日本地域気候予測データセット」（以降、NHRCM02）を利用した。そのうち、20 世紀末の現在気候 SPA、RCP8.5 の中でも昇温傾向が強い 21 世紀末の将来気候 SFA_rcp85_c3、それに対応する RCP2.6 の SFA_rcp26_c3 を使用した。計算対象期間は、後述する現在気候の大気と海洋の入力データが揃う 1982 年 9 月～2000 年 8 月の 18 年間とし、RCP2.6 と 8.5 の将来気候は 96 年後の 2078 年 9 月～2096 年 8 月とした。

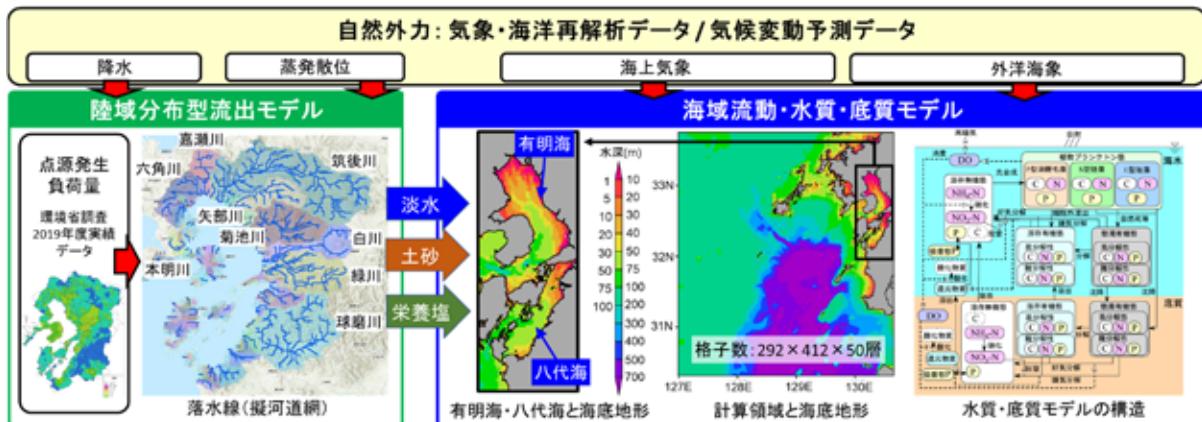


図1. 有明海・八代海等の陸域-海域モデルの概要（東ら, 2025）。

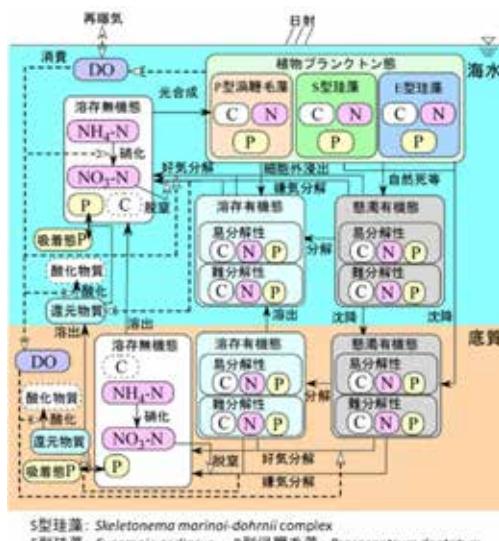


図2. 水質・底質モデルの構造（東ら, 2024）。

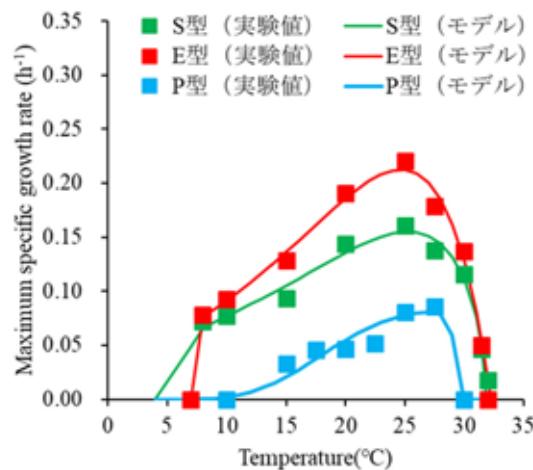


図3. 植物プランクトンの最大比増殖速度と水温の関係（東ら, 2024）。

3.2.3 結果と考察

現在気候、RCP2.6と8.5の将来気候の予測計算により、それぞれ18年間の日別値を得たが、本報では初期条件の影響が比較的強く含まれる最初の1年間を除いた17年間の月別平均値（気候値）を用いて考察を行った。以降の記述では、図4の海域区分と海域・断面呼称を使用し、特に断りがない限り、フローは海域間断面の正味（積分）の月別気候値を、海水容量や各種水質の量・濃度は海域積分もしくは海域平均の月別気候値を意味するものとする。

(1) 淡水・海水フローの季節性と気候変動の影響

図4に現在気候とRCP8.5の将来気候における通年（12ヶ月平均）の淡水・海水フローを示す。また、図5に現在気候および将来気候（RCP2.6と8.5）の陸域・海面から有明海全域への淡水流入フロー、外洋から有明海、外洋から八代海への海水流入フローを月別に示す。なお、各海域の流入と流出で若干の差が生じ、流入過多となっているが、これは集計の最初と最後の日時で2mほどの潮位差が生じているためである。

海域全体の海水フローは、外洋から橘湾を経て早崎海峡から有明海に流入し、有明海湾奥部・湾央部からの南下流と合流して八代海湾奥部に入り、八代海の内部で循環した後、2つの湾口から外洋に流出する時計回りの流れを示した（図4）。また、橘湾から有明海への流入フローは、淡水流入フローの変動に対応して、冬に強まり、夏に弱まる季節性が確認された（図5）。

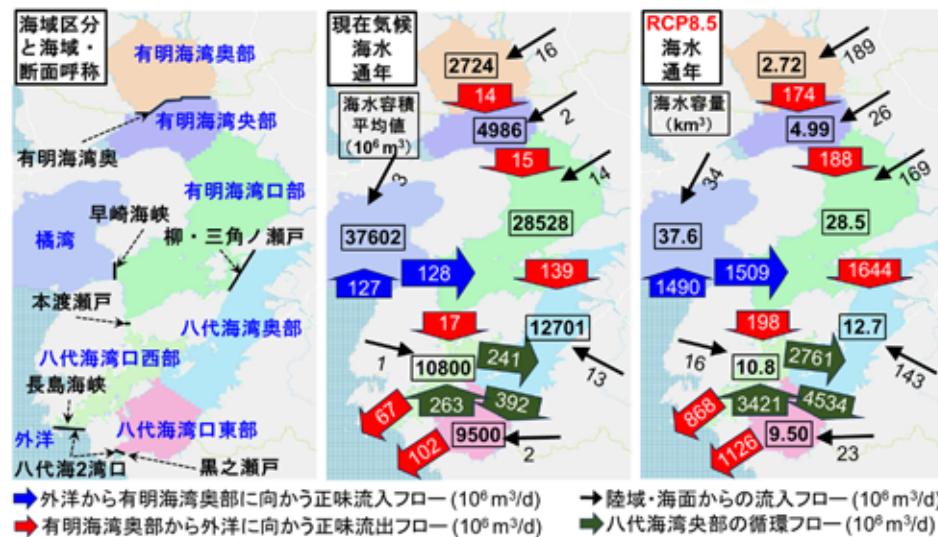


図4. 海域区分と海域・断面呼称（左）および現在気候（中）とRCP8.5の将来気候（右）における通年の正味淡水・海水フロー（東ら，2025）。

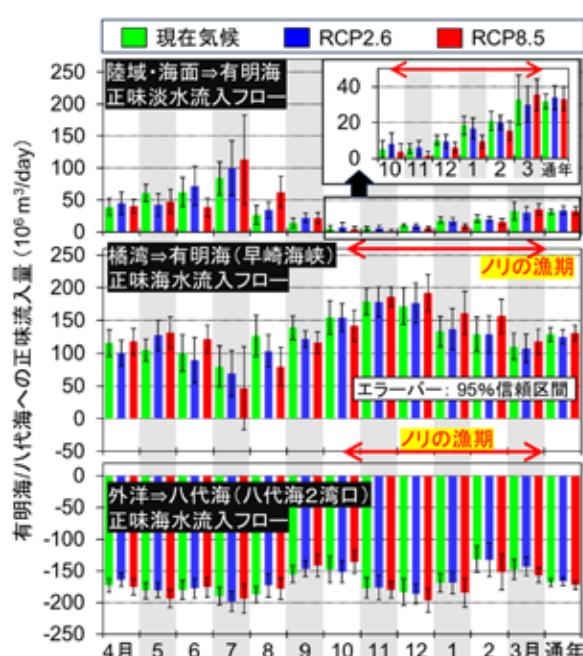


図5. 正味淡水・海水フローの季節性と気候変動の影響（東ら，2025）。

られるが、図4の淡水・海水フローのときとは異なり、海底への沈降・堆積・埋没が主な原因である。現在気候における海域全体のTNフローは、海水フローと同様に時計回りの輸送を示した（図6）が、淡水・海水フローのときとは異なり、橘湾からの流入に比べて陸域からの流入が卓越する結果となった。しかし、有明海に着目して月別の結果（図7）を見ると、ノリの漁期の前半にあたる10～12月においては、橘湾からの流入量と陸域からの流入量が同程度となることが分かる。有明海周辺の降水・河川流量は1年のうちで10～12月が最も少なく（図5）、対応して陸域からのTN流入量も減少するが、一方の早崎海峡では、淡水流入の季節的な減少に対応して外洋・橘湾からの海水流入フローが増加するため、TN流入量も増加したと考えられる。

有明海から八代海への海水フローは柳・三角ノ瀬戸が卓越し、通年の正味フローは $1.39 \times 108 \text{ m}^3/\text{day}$ ($1600 \text{ m}^3/\text{s}$) に達した。これについて2024年1月24日の狭路部にて断面ADCP観測を実施したところ $4000 \text{ m}^3/\text{s}$ が記録された。1回限りの大潮の下げ潮時に観測された瞬間値であるため厳密な比較・検討はできないが、少なくとも計算値の流量のオーダーを否定する観測結果ではないといえる。

気候変動の影響については、年々の変動に比べて有意な変化は確認されなかったが、淡水フローは7～8月に豪雨頻発による増加、ノリの漁期にあたる11～2月に減少の傾向が垣間見られ、外洋から有明海への流入にもそれらに対応した変化が窺えた（図5）。しかし、通年では降水・河川流量に有意な差がないため、有明海・八代海と外洋の海水フローに大きな変化は見られなかった。

(2) TNフローの季節性と気候変動の影響

淡水・海水フローの図4、5に対応したTNフローの結果をそれぞれ図6、7に示す。なお、図6の各海域の流入と流出でかなりの差が見

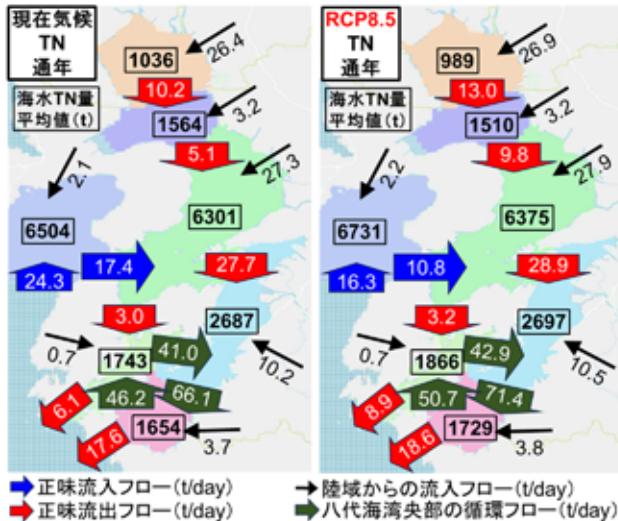


図6. 現在気候（左）とRCP8.5の将来気候（右）における通年の正味TNフローの比較（東ら、2025）

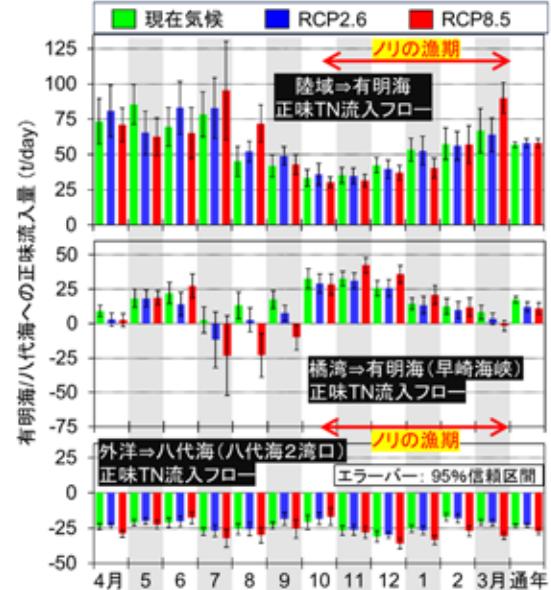


図7. 正味TNフローの季節性と気候変動の影響（東ら、2025）

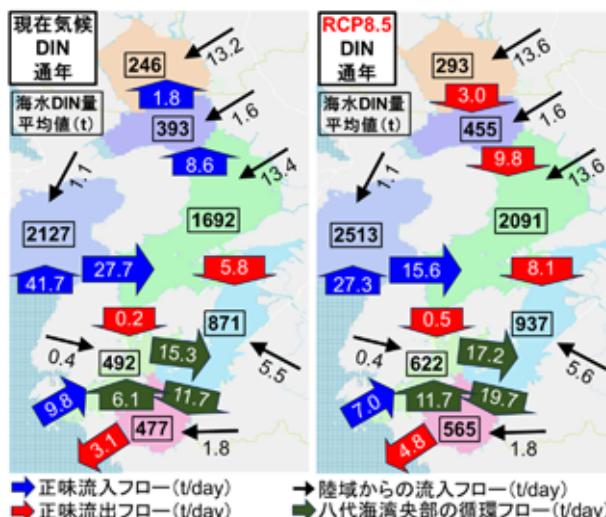


図8. 現在気候（左）とRCP8.5の将来気候（右）における通年の正味DINフローの比較（東ら、2025）

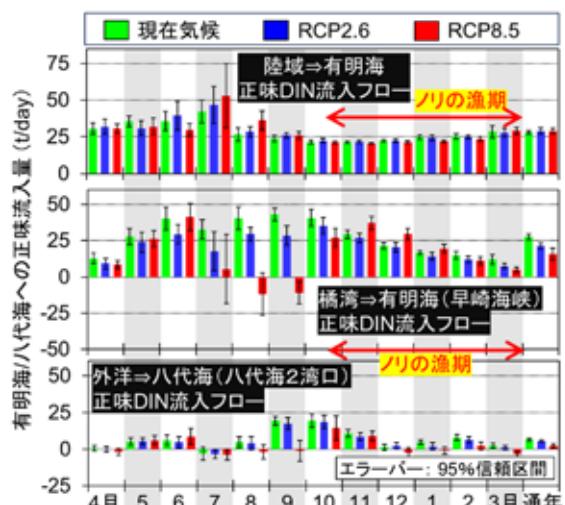


図9. 正味DINフローの季節性と気候変動の影響（東ら、2025）

気候変動の影響については、通年の陸域からの TN 流入量には有意な変化が見られないが、全体的に外洋への流出が強まる方向に通年の TN フローが変化する傾向が見られた（図 6）。特に RCP8.5 の変化は顕著であり、通年の外洋から有明海への TN 流入量は現在気候と比べて 38% 減少すると予測された。月別には、特に 7~9 月が顕著であり、早崎海峡のフローは現在気候では有明海への流入であるのに対し、RCP8.5 の将来気候では流出に転じるほどの大きな変化となった。

(3) DIN フローの季節性と気候変動の影響

TN フローの図 6、7 に対応した DIN フローの結果をそれぞれ図 8、9 に示す。DIN フローは必ずしも海水フローと対応しておらず、現在気候の有明海湾奥や長島海峡など、海水・TN と DIN でフローの方向が異なるところもあった。TN と DIN でフローの方向が異なる理由は、有機態の動態が無機態のそれと異なるためである。例えば有明海湾奥断面や長島海峡では、海上層からの有機態の流出が下層からの DIN の流入を上回るため、TN フローは DIN フローとは逆の流出にな

る（図 6、8）。TN 流出量が DIN 流入量より少ない場合は、早崎海峡のように、フローは同じ方向であるが、DIN が TN を上回ることになる。

現在気候の DIN フローの結果は、橘湾から有明海への流入量が陸域からの流入量に匹敵し（図 8）、6~10 月頃に多く、1~4 月頃に少ない季節性を有することを示した（図 9）。外洋から DIN の流入は八代海の長島海峡においても確認された。もう一方の湾口である黒之瀬戸は外洋への流出であるが（図 8）、2 湾口の合計は八代海への流入となり、早崎海峡の 25% 程度となった。また柳・三角ノ瀬戸の DIN フローは、海水・TN と異なり、早崎海峡の流入量よりも少ない特徴が見られ、大半の DIN は有明海において植物プランクトンの一次生産で消費され、海底に沈降・堆積すると考えられた。

気候変動の影響については、全体的に TN と同じ流出が強まる方向のフローの変化が見られ（図 8）、特に 7~9 月は顕著な変化量となった（図 9）。その結果、有明海湾奥部では現在気候の通年フローは湾央部からの流入であるのに対し、RCP8.5 は流出に転じた（図 8）。

(3) 有明海湾奥部と外洋の DIN

図 10 にノリの主要養殖海域である有明海湾奥部における水質・フローの気候変動影響予測結果を示す。図 6 と図 8 を見ると、有明海湾奥部の通年の海水 TN・DIN 量は現在気候よりも RCP8.5 の方が多くなっているが、図 10 より分かるように、多くなるのは 7~10 月のみであり、他の月はむしろ少なくなっている。この原因是、先行研究（東ら, 2020; 東ら, 2021; 東ら, 2024）でも述べた一次生産の変化であり、有明海湾奥部においても将来気候の夏～秋は水温が月平均で 30°C を超え、高温化によって植物プランクトンの増殖が阻害され、Chl. a 濃度の顕著な減少が生じている。海水容積より概算すると、有明海湾奥部の Chl. a 濃度 10 µg/L の減少は海水 DIN 量の約 200 t の増加に繋がるが、それに加えて植物プランクトン等の粒状有機態は沈降・堆積と巻上を繰り返すのに対し、溶存態はそれがないため水平輸送・拡散されやすい特徴の変化もある。平均水温が 30°C を超える RCP8.5 の 7~9 月に海水 DIN 量と流出フローが現在気候よりも顕著に増加する（図 10）のは正にそれが原因であり、ひいては前述の有明海・八代海全体で TN・DIN の流出が強まる方向にフローが変化することに繋がっていると考えられる。

その後の 10~12 月にかけては、現在気候では Chl. a 濃度が次第に減少するのに対し、将来気候では逆に増加している。その原因は水温上昇によって植物プランクトンの増殖が活発になったためである。それに伴って海水中の DIN 消費量が増加し、ノリの漁期の 11 月に入った頃には海水 DIN 量が現在気候よりも少なくなるまでに至っている（図 10）。この将来気候における DIN の減少は外洋でも確認され（図 11）、外洋から有明海への DIN 流入フローが減少する（図 9）主要因

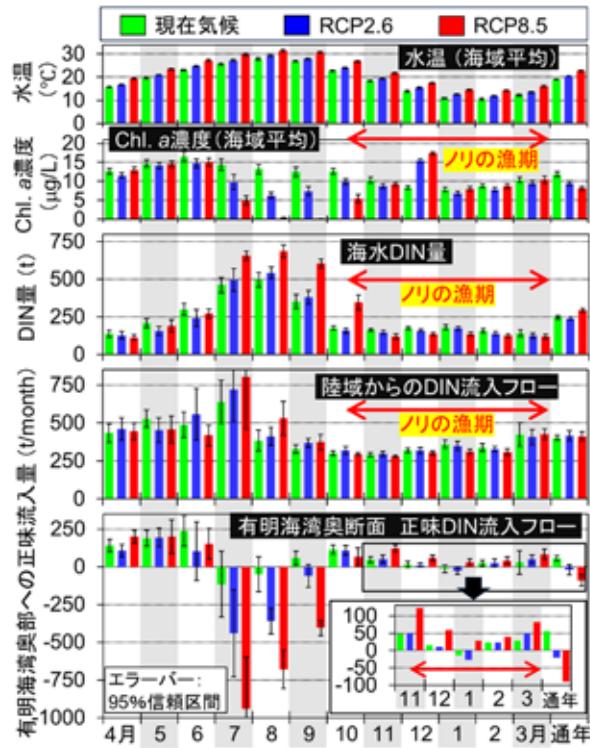


図10. 有明海湾奥部の水質・フローへの気候変動の影響（東ら, 2025）。

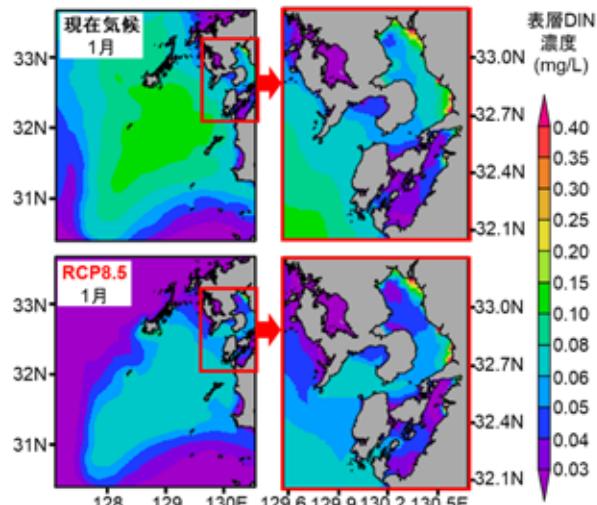


図11. 気候変動による表層DIN濃度への影響（東ら, 2025）

となっている。これが有明海湾奥部に有意な影響を及ぼすかどうかは今後解析する必要があるが、いずれにしろ気候変動によって有明海・八代海から外洋への DIN 流出が増加する傾向に変わりはなく、生物生産性のさらなる低下が懸念される。

3.3 グラフィカルユーザーインターフェース（GUI）の開発

2021 年に瀬戸内海環境保全特別措置法が改正され、「豊かな海」の実現に向けて新たな施策・取組みが開始された。地方自治体の計画のもと栄養塩類の供給も可能とする栄養塩類管理制度の創設もその 1 つである。栄養塩類管理の実施に当たっては周辺環境の保全が義務づけられており、計画策定にあたっては実施効果や影響について事前に評価・予測する必要がある。その手法としては数値シミュレーションがあげられるが、その実施には高度な専門的知識・技術が必要とされており、地方自治体が汎用的に利用可能な評価手法が整備されていないことが問題とされている。

本研究では、地方自治体でも独自に影響予測シミュレーションを実施することを可能とするグラフィカルユーザーインターフェース（GUI）の開発を進め、プロトタイプを構築した（環境省, 2025）。本 GUI は、著者らの先行研究で開発した瀬戸内海の海域流動・水質・底質モデルをベースとし、その瀬戸内海モデル（水平解像度約 1 km）から湾灘モデル（同 0.3 km）へ、さらに栄養塩類管理を実施する特定海域モデル（同 0.1 km）へと順にダウンスケールするネスティングモデルの運用を想定して開発を行った。瀬戸内海モデルと湾灘モデルについては、あらかじめサーバー管理者が直近 5 年間程度を対象に再現計算を実施し、特定海域モデルの初期・境界条件作成で参照するデータベースを構築する仕様である。ユーザー側において最低限準備が必要なものは、GUI 操作による特定海域モデルの計算ドメインと計算期間の設定のみであり、気象条件や初期・境界条件、デフォルトの陸域からの流入条件は自動的に生成されるため、数値シミュレーションの実行と出力結果の可視化までのハードルが低いものとなっている。現時点では、ユーザー側において計算の空間解像度や鉛直層、モデルパラメータの変更は出来ないが、海岸線や海底地形の修正、陸域からの窒素・リン負荷量の変更は可能であり、地方自治体における栄養塩類計画の検討において最初の叩き台となる影響予測結果の提供に大いに役立つものと考えている。

なお、ネスティングモデルについては、実際に下水処理場の季別調整運転の実証試験が 2023 年 10 月～2024 年 3 月に実施された広島県呉市の広湾を対象に別途開発と検証を進めており、これについては後日別報にて詳細に報告したい。

参考文献

- 有明海・八代海等総合調査評価委員会（2022）有明海・八代海等総合調査評価委員会中間取りまとめ, 160p.
- 環境省(2021) 令和 2 年度水質総量削減に係る発生負荷量等算定調査及び総量規制基準に係る検討業務報告書: 発生負荷量等算定調査（有明海及び八代海）, 140p.
- 環境省(2025) 令和 6 年度栄養塩類管理計画の水質予測支援に係るユーザーインターフェース構築業務報告書.
- 東博紀, 横山亜紀子, 中田聰史, 吉成浩志, 越川海 (2020) RCP8.5シナリオに基づく瀬戸内海の一次生産および水質への気候変動影響予測, 土木学会論文集B2(海岸工学), 76 (2), I_1147-I_1152.
https://doi.org/10.2208/kaigan.76.2_I_1147
- 東博紀, 吉成浩志, 中田聰史, 横山亜紀子, 越川海 (2021) RCP8.5の気候変動が播磨灘の窒素フローに及ぼす影響, 土木学会論文集B1(水工学), 77(2), I_1099-I_1104.
https://doi.org/10.2208/jscejhe.77.2_I_1099
- 東博紀, 越川海 (2024) 東京湾と伊勢・三河湾の貧酸素水塊を対象とした気候変動の影響と負荷管理の効果. 土木学会論文集, 80 (16), 論文ID: 23-16137.
<https://doi.org/10.2208/jscejj.23-16137>
- 東博紀, 赤星怜, 石崎紀子 (2025) 気候変動が有明海・八代海の窒素輸送に及ぼす影響. 土木学会論文集特集号 (海岸工学) (投稿中) .

4. まとめ

気候変動が有明海・八代海の窒素輸送・循環に及ぼす影響について、本予測結果はモデルの一次生産に強く左右されるが、モデルの Chl. *a* の再現性に課題を有しているため、定量的には不確実性が含まれていると言わざるを得ない。しかし、IPCC 海洋・雪氷圈特別報告書をはじめ、水温上昇・高温化による一次生産の低下を指摘する報告は多数あり、それに連動する栄養塩類の外洋流出の増加や冬季有明海の栄養塩の減少など本予測結果が示した気候変動の影響の傾向は確度が高いと考えられる。GUI については、瀬戸内海環境保全知事・市長会議の専門部会である瀬戸内海水環境研会議の令和 7 年度合同調査として複数の関係自治体との共同研究が開始され、構築したプロトタイプの実証試験を進める。なお、本報の 3.2 は土木学会論文集特集号（海岸工学）に投稿中の論文（東ら, 2025）を再編集したものである。

5. 研究成果発表

5.1 誌上発表（査読あり）

Onitsuka G., Yoshida G., Shimabukuro H., Takenaka S., Tamura T., Kakehi S., Setou T., Guo X., Higashi H. (2024) Modeling the growth of the cultivated seaweed *Undaria pinnatifida* under climate change scenarios in the Seto Inland Sea, Japan. Journal of Applied Phycology. doi.org/10.1007/s10811-024-03291-1

5.2 誌上発表（査読なし）

なし。

5.3 口頭発表

赤星怜, 東博紀 (2024) SOM を用いた有明海・八代海の海水交換特性に関する一考察. 環境水理部会研究集会 2024 in 奄美大島, 同予稿集.

東博紀 (2024) 気候変動が貧酸素水塊に及ぼす影響と陸域負荷管理の効果. 日本海洋学会 2024 年度秋季大会 シンポジウム 3 「江戸前の海：環境と生態系の今」（一般講演）.

東博紀 (2024) 気候変動と栄養塩類管理が瀬戸内海の水環境に与える影響～陸域-海域統合の視点から～. 第 31 回 2024 年度瀬戸内海研究フォーラム in 大阪, 同予稿集, 73-74 (招待講演) .

東博紀 (2024) 有明海・八代海の栄養塩動態に外洋・気候変動が及ぼす影響. 有明海の気候変動に関するシンポジウム, 同予稿集 (一般講演) .

東博紀 (2024) 瀬戸内海・広湾の栄養塩類管理を対象とした影響評価モデルの開発と数値実験. 令和 6 年度瀬戸内海の環境保全・創造研究ワークショップ～きれいで豊かな瀬戸内海の実現を支える研究の最前線～, 同予稿集, 55 (研究講演) .

東博紀, 越川海, 中田聰史, 赤星怜, 梅原亮, 濱脇亮, 西嶋渉 (2025) 広湾における下水処理場の季節別運転が水質・一次生産に及ぼす影響. 第 59 回日本水環境学会年会, 同予稿集, 424.

赤星怜, 東博紀 (2025) 有明海・八代海における海水交換の支配要因に関する考察. 第 59 回日本水環境学会年会, 同予稿集, 316

5.4 その他（書籍等）

なし。

6. 連絡先

東 博紀

〒315-8506 茨城県つくば市小野川 16-2

国立研究開発法人国立環境研究所地域環境保全領域

Tel: 029-850-2026 Fax: 029-850-2569

E-mail: higashi@nies.go.jp

研究課題名 :

大気モデルNICAMを用いた大気物質の放出・吸収量推定に関する研究

実施年度 :

令和6年度

課題代表者 : 国立環境研究所地球システム領域 丹羽 洋介

共同研究者 : 国立環境研究所地球システム領域 齊藤 誠・八代 尚・佐伯 田鶴・山下 陽介・村上 和隆
・亀井 秋秀・山田 恭平・Suman Maity・七里 与子

1. 研究目的 (200字程度)

気候変動枠組条約パリ協定で定められたグローバル・ストックティクでは、最良の科学に基づき、世界の温室効果ガス（GHG）排出量削減について進捗を評価することになっている。大気モデルを用いて大気観測データから地表面フラックスの推定を行う「逆解析」は、各国の排出量報告とは独立の評価方法として有力な手法である。しかしながら、排出削減施策に資するためには、フラックス推定のさらなる高解像度化、高精度化が必要であり、さらに、大気化学反応や共通の排出源を通してGHGと関連するSLCFなども含めた包括的な解析を可能とする解析技術の高度化も必要とされている。そこで本研究では、GHGやSLCFなどの大気物質の放出量推定のためのモデリング技術や逆解析手法、総合的なシステム開発を行い、それぞれの物質の放出量推定をより高精度に行うこととする。

2. スーパーコンピュータ利用実績

2.1 計算機利用時間 (2024年4月1日～2025年3月31日)

CPU 時間	v_debug	: 1,555.8 [VE・hours]
	v_normal	: 163,955.7 [VE・hours]
	計	: 165,511.5 [VE・hours]

2.2 利用概要

本研究では準一様格子大気モデル NICAM (Nonhydrostatic Icosahedral Atmospheric Model: Satoh et al., 2014) をベースとした大気輸送モデル NICAM-TM や NICAM に大気化学モデルを結合した NICAM-Chem を用いた。NICAM の水平解像度は、それぞれの課題に応じて設定した（約 14 km から 223km まで）。また、二酸化炭素 (CO₂) とメタン (CH₄) の逆解析には NICAM-TM のフォワード及びアジョイント・モデルと準ニュートン法を組み合わせた 4 次元変分法システム NISMON-CO₂/CH₄ (NICAM-based Inverse Simulation for Monitoring CO₂/CH₄: Niwa et al., 2017a,b, 2022) を用いた。NISMON では NICAM-TM のオフラインモデルを利用している。このオフラインモデルは物質の移流計算（有限体積法）や鉛直拡散、積雲対流といった過程のみを計算するモデルである。また、NICAM の格子を Schmidt 変換により一部に集中させたモード (NICAM-Stretch: Tomita, 2008) での計算も実施した。

3. 研究結果

3.1 NISMON-CO₂/CH₄によるCO₂とCH₄の長期逆解析

2020 年度から継続して行っている NICAM をベースとした 4 次元変分法逆解析システム NISMON-CO₂ による長期の CO₂ 逆解析の結果を今年度もグローバル・カーボン・プロジェクトの統合評価に提出した。さらに独自に、その NISMON-CO₂ を他の推定値と比較した。ここでは、大気ポテンシャル酸素 (APO) や CO₂ 安定同位体比 ($\delta^{13}\text{C}$) といった観測による全球の陸域・海洋吸収量の推定値やモデル・観測ベースの海洋フラックスデータ、陸域生態系モデルのデータを用いた。比較の結果、2010 年以降、陸域の吸収量の増加が停滞、もしくは減少している傾向、また海洋の吸収が長期的には増大している傾向に関して、データ間で一致が見られた。

一方、NISMON-CH₄を使ったCH₄の逆解析では、2020年から2022年にかけて生じた大気CH₄濃度の増加速度上昇に関して、大気CH₄の消失源であるOHラジカルの量を変化させた感度実験を行った。その結果、アフリカや南米といった地域の放出量推定には大きな影響が生じ、全球的にはOHの変化は決して無視できるものではないことがわかった。一方で、CH₄逆解析のコントロール解析で放出量増加が示唆されたアジア地域に対しては、OHの影響はそれほど大きくなこともわかった。このことから、アジア地域の放出量増加が、大気CH₄濃度を上昇させた原因である可能性が高いことが示唆された。

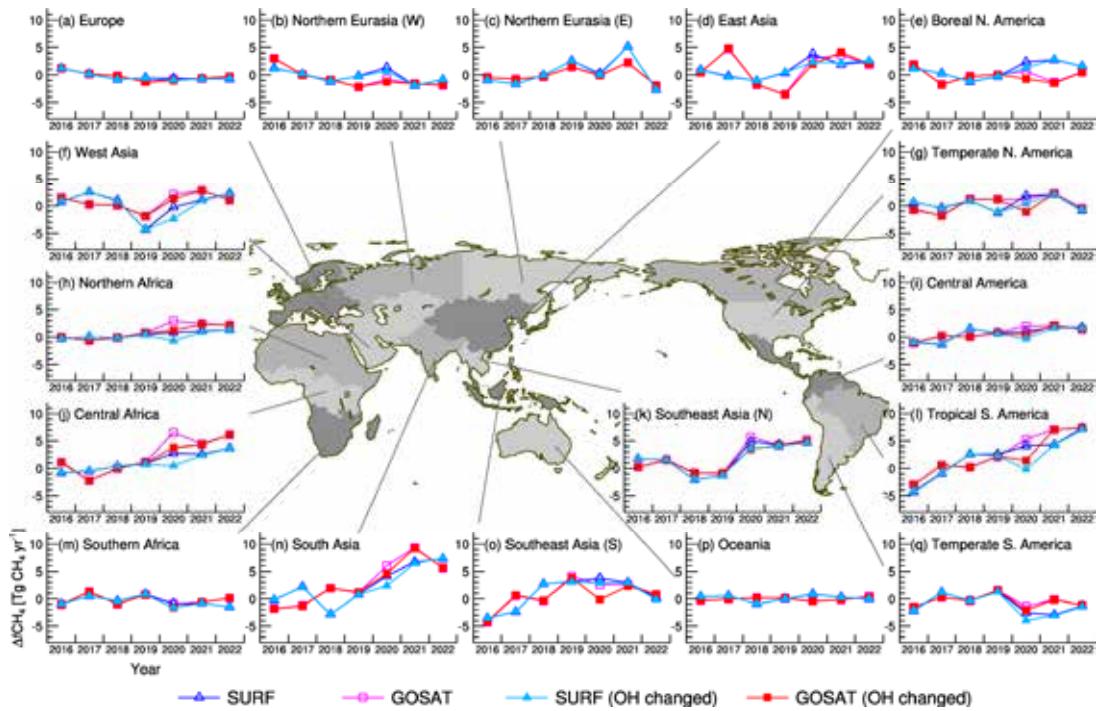


図1. NISMON-CH₄で領域毎に推定されたCH₄フラックスの時間変化（2016-2019年の平均値からの偏差）。地上観測のみを用いた場合（SURF）とGOSATを用いた場合を示す。また、それぞれに対して、2020年にOHを変化させた感度実験（OH changed）の結果も示す。

3.2 東京大都市圏におけるCO₂高解像度シミュレーション

NICAMのGHG輸送モデルNICAM-TMを用いた東京CO₂フラックス推定について、前年度まで行ってきた全球高解像度（14km）の結果に加えて、さらに局所的にグリッドを集中させて計算するモードNICAM-Stretch（図2）でNICAM-TMを走らせ、東京周辺においてより高解像度のCO₂大気輸送シミュレーションを実施した。このStretchモードでは、東京起源のCO₂のみを計算し、それ以外の起源については、全球高解像度による計算値を用いることで、観測データと比較可能とした。国立環境研究所が実施している東京スカイツリー観測のCO₂連続観測データとの比較の結果、全球高解像度モデルのみを用いるよりも、全球モデルとStretchモデルを組み合わせた方がCO₂濃度の再現性が向上することが確認された。

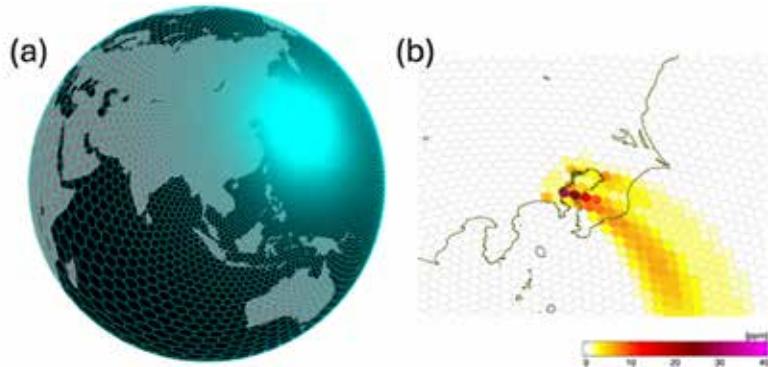


図2. NICAM-Stretchの格子分布(a)とNICAM-Stretchで計算された東京起源CO₂の濃度分布の例(b)。

3.3 GOSAT-2 Level 4 プロダクトについて

初号機GOSATで測定した放射輝度スペクトルから導出したCO₂・CH₄カラム平均濃度(G1L2)プロダクトをもとに全球吸収排出量を推定するGOSAT Level 4 プロダクトでは、地上濃度観測データを使用してG1L2 プロダクトのバイアス補正等を行った上で吸収排出量推定を行っている。一方、GOSAT-2 Level 4 プロダクトでは、GOSAT-2 の観測機能とデータを最大限に活用することを目指し、G2L2 プロダクトのみを観測データとして吸収排出量推定を行っている。これらの推定結果の解釈を通じ、水平方向に加えて鉛直方向にも濃度が大きく変動するCH₄において、地上観測データと衛星観測データの全球濃度分布に顕著な違いがあり、このことが吸収排出量推定結果に大きく影響する結果となった。特に高緯度帯において地上観測データとG2L2 プロダクト間のCH₄濃度差が大きくなることから、シベリアでの航空機観測による鉛直濃度プロファイルデータ等を使用して、この濃度差を引き起こすメカニズムについて研究を進めている。同時に、G2L2 プロダクトに内在するバイアスや、モデルの鉛直勾配再現性についても解析を進めている。

3.4 GOSAT-GW TANSO-3データ処理のための全球大気環境の短期解析・予測システムの開発

2025年度の打ち上げに向けて準備を行っているGOSAT-GW衛星に関して、衛星によって観測された放射輝度スペクトルデータからCO₂・CH₄カラム平均濃度を導出する際の先駆情報として、GHG・エアロゾルの全球濃度分布を提供するシステムの開発を進めた。このシステムは気象データ同化による解析・予測シミュレーションに基づく全球大気環境の短期解析・予測を提供するものであり、今年度は解析・予測精度の向上を目指し、結果検証の重点化を行なった。結果検証では、並行して定常運用を行なっているAI気象モデルのFourCastNetを用いた気象場予測結果と、本システムの予測結果、またERA5による解析結果を毎日比較可能にした。また、ERA5と本システムのデータ同化による解析結果の比較について、ティラーダイヤグラムを用いた可視化を実施し、より多くの性能評価結果を集約して表示できるようにした。今後は、解像度向上による予測性能の向上を行ない、さらに排出推定システムの精度検証を進める。

3.5 NICAM-Chemによる二酸化窒素(NO₂)のシミュレーション

NICAMに大気化学モデルを結合したNICAM-Chemを用いて、昨年度までに全球56 kmの解像度で二酸化窒素(NO₂)のシミュレーションを行い衛星観測から簡易的に排出量を推定するシステムの開発を進めた。NICAM-Chemでは、気象条件は実際の年のものに合わせている一方、NO_xのエミッション(排出量)は毎年同じものを与えている。そのため、衛星観測の対流圏カラム量やモデルの化学反応が正しいと仮定すると、エミッションの変化分を衛星観測とモデルとの濃度差とみなすことができる。月別の濃度差から排出補正係数を導出し、それをエミッションに適用し月別の排出量を導出している。本年度は、NO_x排出量を推定するシステムの改良を進め、メガシティなど都市域を指定した排出量推定の自動化を行い、毎月排出量データを更新できるようにした(図3)。

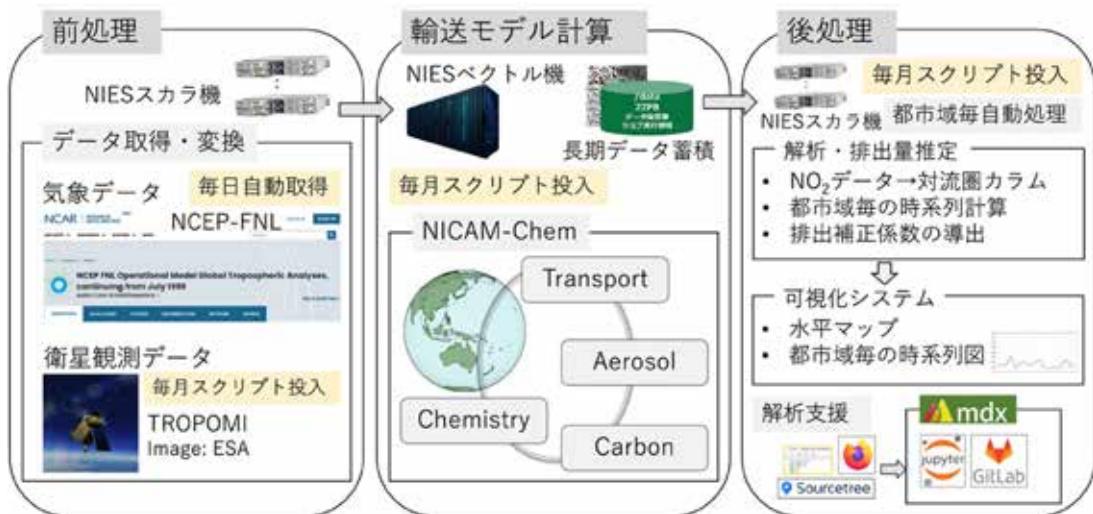


図3. 簡易的なNO₂排出量推定手法の概念図

参考文献

- Niwa Y., Fujii Y., Sawa Y., Iida Y., Ito A., Satoh M., Imasu R., Tsuboi K., Matsueda H., Saigusa N. (2017a) A 4D-Var inversion system based on the icosahedral grid model (NICAM-TM 4D-Var v1.0) – Part 2: Optimization scheme and identical twin experiment of atmospheric CO₂ inversion, Geosci. Model Dev., 10, 2201–2219. <https://doi.org/10.5194/gmd-10-2201-2017>
- Niwa Y., Tomita H., Satoh M., Imasu R., Sawa Y., Tsuboi K., Matsueda H., Machida T., Sasakawa M., Belan B., Saigusa N. (2017b) A 4D-Var inversion system based on the icosahedral grid model (NICAM-TM 4D-Var v1.0) – Part 1: Offline forward and adjoint transport models, Geosci. Model Dev., 10, 1157–1174. <https://doi.org/10.5194/gmd-10-1157-2017>
- Niwa Y., Ishijima K., Ito A., Iida Y. (2022) Toward a long-term atmospheric CO₂ inversion for elucidating natural carbon fluxes: technical notes of NISMON-CO₂ v2021.1., Prog Earth Planet Sci 9, 42. <https://doi.org/10.1186/s40645-022-00502-6>
- Satoh M., Tomita H., Yashiro H., Miura H., Kodama C., Seiki T., Noda A. T., Yamada Y., Goto D., Sawada M., Miyoshi T., Niwa Y., Hara M., Ohno T., Iga S., Arakawa T., Inoue T., Kubokawa H. (2014) The Non-hydrostatic Icosahedral Atmospheric Model: description and development, Progress in Earth and Planetary Science, 1, 1–32. <https://doi.org/10.1186/s40645-014-0018-1>
- Tomita, H. (2008), A stretched grid on a sphere by new grid transformation. J. Meteorol. Soc. Japan, 86A, 107-119. <https://doi.org/10.2151/jmsj.86A.107>

4.まとめ

本研究課題では、大気モデルNICAMを中心として逆解析・同化や大気化学計算などを実施するとともに、温室効果ガス観測衛星GOSATシリーズのデータ利用研究やシステム開発、またNICAMの特性を活かした高解像度シミュレーションを実施した。これらの解析で行うNICAMによるシミュレーションにおいて、MPIを利用した並列計算を実施しており、問題サイズ（またはNICAMの解像度）に応じて、利用するCPU数を変えて計算を実施した。今後も継続して、これらの解析を実施していく予定であるが、今後はNICAMの最新版を元にして、GHG逆解析システムやNO₂排出量推定システムなどを構築していく予定である。

5.研究成果発表

5.1 誌上発表(査読あり)

Tanimoto H., Matsunaga T., Someya Y., Fujinawa T., Ohyama H., Morino I., Yashiro H., Sugita T., Inomata S.,

- Mueller A., Saeki T., Yoshida Y., Niwa Y., Saito M., Noda H., Yamashita Y., Ikeda K., Saigusa N., Machida T., Frey M., Lim H., Srivastava P., Jin Y., Shimizu A., Nishizawa T., Kanaya Y., Sekiya T., Patra P., Takigawa M., Bisht J., Kasai Y., Sato T. (2025) The greenhouse gas observation mission with Global Observing SATellite for Greenhouse gases and Water cycle (GOSAT-GW): Objectives, conceptual framework and scientific contributions. *Progress in Earth and Planetary Science*, 12 (8). <https://doi.org/10.1186/s40645-025-00684-9>
- 藤繩環, 林顯光, 佐藤知紘, 関谷高志, 山下陽介, 中村綾乃, 杉田考史, 金谷有剛, 笠井康子, 谷本浩志 (2024) GOSAT-GW TANSO-3 L2 NO₂プロダクト (T3L2NO₂) の導出アルゴリズム. *日本リモートセンシング学会誌*, 44(2), 127-134. <https://doi.org/10.11440/rssj.2024.014>
- Miyauchi, T., Saito, M., Noda, H. M., Ito, A., Kato, T., and Matsunaga, T. (2025) Process-based modeling of solar-induced chlorophyll fluorescence with VISIT-SIF version 1.0. *Geosci. Model Dev.*, 18, 2329-2347. <https://doi.org/10.5194/gmd-18-2329-2025>
- Murakami, K., Saito, M., Noda, H. M., Oshio, H., Yoshida, Y., Ichii K., and Matsunaga, T. (2024) Impact of the 2015 El Niño event on Borneo: Detection of drought damage using solar-induced chlorophyll fluorescence. *Journal of Agricultural Meteorology*, 80(3), 69-78. <https://doi.org/10.2480/agrmet.D-24-00012>
- Arakawa, T., Yashiro, H., Sumimoto, S., and Nakajima, K., (2025) Large Scale Ensemble Coupling of Non-hydrostatic Atmospheric Model NICAM. In Proceedings of the International Conference on High Performance Computing in Asia-Pacific Region (HPCAsia '25). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 64-71. <https://doi.org/10.1145/3712031.3712035>
- Yamada K., Niwa Y., Terao Y., Tohjima Y., Tsuboi K., Ishijima K., Murayama S. (2025) Estimation of CO₂ fluxes from Tokyo using a global model and tower observation. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 103 (1), 67-85. <https://doi.org/10.2151/jmsj.2025-004>
- Niwa, Y., Tohjima, Y., Terao, Y., Saeki, T., Ito, A., Umezawa, T., Yamada, K., Sasakawa, M., Machida, T., Nakaoka, S.-I., Nara, H., Tanimoto, H., Mukai, H., Yoshida, Y., Morimoto, S., Takatsuki, S., Tsuboi, K., Sawa, Y., Matsueda, H., Ishijima, K., Fujita, R., Goto, D., Lan, X., Schuldt, K., Heliasz, M., Biermann, T., Chmura, L., Necki, J., and Xueref-Remy, I. (2024) Multi-observational estimation of regional and sectoral emission contributions to the persistent high growth rate of atmospheric CH₄ for 2020–2022, EGUphere [preprint]. <https://doi.org/10.5194/egusphere-2024-2457>

5.2 誌上発表(査読なし)

5.3 口頭発表

- Yamashita Y., Naue H., Inoue M., Takahashi M. (2025) Two possible pathways of the Southern Hemisphere atmospheric response to the QBO during winter and spring. A joint QBOi - QUOCA - SNAP workshop, incorporating the first APARC cross-activity convention on nudging simulations, - 山下陽介, 丹羽洋介, 五藤大輔, 八代尚, 池田恒平, 打田純也, 齊藤誠, 佐伯田鶴, 佐藤正樹, 田上雅浩, 永島達也, LIU Guangyu, 谷本浩志 (2025) NICAM-Chem を利用した簡易排出量推計システム. 2025 年度 NICAM 開発者会議, なし
- Niwa Y., Terao Y., Tohjima Y., Mueller A., Tanimoto H., Yamada K., Machida T., Nakaoka S., Umezawa T., Saito T., Goto D., Yashiro H., Yamashita Y., Ikeda K. (2024) Overview of the MOEJ-funded research initiative: monitoring GHGs and SLCFs for climate change mitigation. 21st Tripartite Presidents Meeting among NIER, CRAES and NIES, Abstracts, 40-49
- 山下陽介, 井上誠, 大久保武矢, 武藤大悟, 宮川拓真, 永吉武志 (2024) 秋田における集中観測時のプラックカーボン輸送の解析. 第 29 回大気化学討論会, 同予稿集
- 藤繩環, LIM Hyunkwang, 佐藤知紘, 関谷高志, 山下陽介, 中村綾乃, 杉田考史, 金谷有剛, 笠井康子, 谷本

浩志 (2024) 第3世代GOSAT (GOSAT-GW) TANSO-3 L2 NO₂ プロダクト (T3L2NO₂) 導出アルゴリズム. 第29回大気化学討論会, 同予稿集

Ohyama H., Tanimoto H., Matsunaga T., Sugita T., Yashiro H., Morino I., Saito M., Inomata S., Ikeda K., Someya Y., Fujinawa T., Yoshida Y., Yamashita Y., Mueller A., Frey M., Lim H., Saeki T., Saigusa N., Kanaya Y., Sekiya T., Patra P., Takigawa M., Yamaguchi M., Bisht J., Kasai Y., Sato T., Nakamura A. (2024) GOSAT-GW update and validation plan. NDACC/IRWG-TCCON-COCCON Annual Meeting 2024, -

Niwa Y., Goto D., Yashiro H., Yamashita Y., Ikeda K., Yamada K. (2024) Development of an integrated modeling analysis system for inferring emissions of GHGs and SLFCs. The 1st NIES-IAP Young Scientists Symposium on Atmospheric Environment and Climate Change, -

Yamashita Y., Inoue M., Okubo T., Muto D., Miyakawa T., Nagayoshi T. (2024) The analysis of the black carbon transport to the northern Japan in December 2022 with the observation and the GEOS-CF products. The 16th International Commission on Atmospheric Chemistry and Global Pollution (iCACGP) Symposium and 18th International Global Atmospheric Chemistry (IGAC) Science Conference (iCACGP-IGAC Conference 2024), - Fujinawa T., Lim H., Sato O. T., Sekiya T., Yamashita Y., Nakamura A., Sugita T., Kanaya Y., Kasai Y., Tanimoto H. (2024) Progress of retrieval algorithm development for GOSAT-GW NO₂ product. The 16th International Commission on Atmospheric Chemistry and Global Pollution (iCACGP) Symposium and 18th International Global Atmospheric Chemistry (IGAC) Science Conference (iCACGP-IGAC Conference 2024), -

山下陽介, 井上誠, 大久保武矢, 武藤大悟, 宮川拓真, 永吉武志 (2024) 秋田における2022年12月の集中観測とGEOS-CFによるブラックカーボンの輸送解析. 大槌シンポジウム2024「多様な時空間スケールの先進的気象学・気候学・大気科学」, なし

Fujinawa T., Lim H., Yamashita Y., Sekiya T., Sato O. T., Nakamura A., Sugita T., Kasai Y., Kanaya Y., Tanimoto H. (2024) Progress of retrieval algorithm development for GOSAT-GW NO₂ product. The 45th COSPAR 2024 Scientific Assembly, -

Akiyoshi H., Kadokami, M., Yamashita Y., Nagatomo T. (2024) Dependence of Arctic column ozone on future ODSs and GHGs in the variability of 500-ensemble members of MIROC3.2- and MIROC5-CCMs and implications for future Arctic ozone. Quadrennial Ozone Symposium 2024, -

齊藤誠, 大山博史, 龜井秋秀, 佐伯田鶴, 丹羽洋介, 野田響, 森野勇, 八代尚, 吉田幸生, 松永恒雄 (2025) GOSATシリーズによる全球温室効果ガス衛星観測の紹介とJapanFluxとの連携に向けて. 日本農業気象学会, 熊本, 2025年3月.

Yashiro H. and Arakawa T. (2024) Introduction to Global Atmospheric Simulation & Overview of h3-Open-UTIL/MP. NCTS Winter Course: Integration of Simulation, Data, and Machine Learning on a Heterogeneous Supercomputer System, Taipei, Feb. 17-18, 2025

八代尚, 照井健志, 佐藤枝美子, 中野藤之, 照井弘, 五藤大輔, 丹羽洋介, 松永恒雄 (2024) 仮想化計算基盤を用いたGHG/SLCF短期解析・予測システムの高度化, 第29回大気化学討論会, 神戸, 2024年10月9-11日

Yashiro H., Niwa Y., Goto D., Someya Y., Saeki T., Matsunaga T. (2024) Development of a short-term prediction system for greenhouse gases and SLFCs in conjunction with GOSAT-GW and TANSO-3 observations. The 1st NIES-IAP Young Scientists Symposium on Atmospheric Environment and Climate Change, Tsukuba, Jul. 11-12, 2024

Yashiro H., Sugita T., Saeki T., Someya Y., Fujinawa T., Yoshida Y., Kikuchi S., Kawazoe F., Kamei A., Kajihara T., Kanagawa M., Gognadze N., Tanimoto H., Matsunaga T. (2024) Preparation status of the data processing system for GOSAT-GW/TANSO-3 in NIES. 20th International Workshop on Greenhouse Gas Measurements from Space (IWGGMS-20), Boulder, May. 29-31, 2024

Niwa Y., Terao Y., Tohjima Y., Mueller A., Tanimoto H., Yamada K., Machida T., Nakaoka S., Umezawa T., Saito

T., Goto D., Yashiro H., Yamashita Y., Ikeda K. (2024) Overview of the MOEJ-funded research initiative: monitoring GHGs and SLCFs for climate change mitigation. 21st Tripartite Presidents Meeting among NIER, CRAES and NIES, Abstracts, 40-49

5.4 その他(書籍等)

秋吉英治, 山下陽介 (2025) 溫暖化の科学 「Q13 オゾン層破壊が温暖化の原因?」, 研究者がズバリ科学で答える! ココが知りたい地球温暖化. 国立研究開発法人国立環境研究所地球システム領域編, 成山堂書店, 77-83, 2025 年 4 月 5 日

6. 連絡先 (氏名、住所、所属、Tel、Fax、E-mail)

丹羽洋介

〒305-8506 茨城県つくば市小野川 16-2

国立研究開発法人国立環境研究所地球システム領域

Tel: 029-850-2537 Fax: 029-850-2219

E-mail: niwa.yosuke@nies.go.jp

研究課題名 :
高度な大気汚染予測のためのデータ同化手法の開発

実施年度：
令和6年度

課題代表者： 国立環境研究所地域環境保全領域 五藤大輔
共同研究者： 国立環境研究所地域環境保全領域 菅田誠治
国立環境研究所地球システム領域 八代尚
State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences Tie Dai, Yueming Cheng
九州大学応用力学研究所 弓本桂也
北海道大学大学院理学研究院 佐藤陽祐
近畿大学総合社会学部 中田真木子
気象庁気象研究所全球大気海洋研究部 梶野瑞王

1. 研究目的

本課題では、大気汚染物質の時空間分布を高精度で予測することを目的としている。この実現のために、利用可能な大気汚染物質の衛星成果物を、全球モデルである NICAM-Chem のデータ同化に適用して、大気汚染予測の初期値を作成することを目標とする。また母体モデルの再現性はデータ同化結果の再現性に大きく影響するため、NICAM-Chem 自身の継続的なモデル改良も目標とする。

キーワード : NICAM-Chem、大気汚染物質、データ同化、2DVar、LETKF、モデル改良

2. スーパーコンピュータ利用実績

2.1 計算機利用時間 (2024年4月1日～2025年3月31日)

CPU 時間	v_debug	: 0.0 [VE・hours]
	v_normal	: 8,614.8 [VE・hours]
	計	: 8,614.8 [VE・hours]

2.2 利用概要

本課題では、非静力学正20面体大気モデルNICAMで大気汚染物質の濃度を計算できるNICAM-Chemモデルを用いて、並列計算を行なっている。

3. 研究結果

3.1 概要

NICAM-Chem/LETKFによるエアロゾル同化シミュレーションを、JAXA/EORCで開発されているSGLI-AHIJAXAプロダクトのVersion4を用いて、2021年3月を対象として実施した。その結果、同化した結果の方が同化なしの結果よりも良好であることが確認でき、より再現性の高いエアロゾル同化プロダクトが作成できたことが示された。また、NICAM-Chem/2DVarモデルによるエアロゾル同化シミュレーションを、静止気象衛星ひまわり、極軌道衛星Aqua/MODIS、極軌道衛星CALIPSO/CALIOP、の複数の衛星データを統合した2次元量のAOTを用いて、2015年から2021年までの長期間計算を実施した。その結果、全体的には同化なしの結果が同化ありの結果よりもAOTの値が低い傾向であり、同化によって高濃度AOTをうまく再現することができた。しかし、同化によって極小時に過大評価してしまう傾向も見られた。

3.2 背景と目的

大気汚染は1970年頃から環境問題として着目されており、大気汚染物質の代表的なものであるエアロゾルについて2013年のPM_{2.5}騒動を機に、日本でも大きな社会問題にもなった。PM_{2.5}の人体への影響(健康問題)も懸念される中、PM_{2.5}自体の時空間分布をより正確に把握することが望まれている。その一方で、エアロゾルは大気中で太陽光を吸収散乱することや雲の凝結核として雲の微物理特性を変えることによつ

て、地球の放射収支および気候に大きな影響（気候問題）を与える。近年では、地球温暖化を抑制するために、対策効果が比較的早急に現れると期待される短寿命気候強制因子（SLCF）が最新の気候変動に関する政府間パネル（IPCC-AR6）でも特筆されている。パリ協定の目標達成は長寿命温室効果ガスの排出量削減だけでは困難であり、SLCFの効果的な削減が望まれる。大気環境・健康・気候の各問題の鍵となる大気汚染物質の時空間分布について、国立環境研究所が運用をしているVENUS (<http://venus.nies.go.jp/>) や、これ以外にも国内外の多機関で大気汚染予測が行われている。しかし、その予測精度は社会のニーズを十分に満たしているとはいはず、個々の数値モデルや予測手法に更なる改善が期待されている。

その一方で、全球規模で SLCF の空間分布を推定できる人工衛星が次々と打ち上がり、今後は更に衛星から膨大なデータを得ることができる。具体的には、2014 年に打ち上げられた日本の静止衛星ひまわりの AHI センサーによる高時間分解能のエアロゾル、2021 年に打ち上げられた韓国静止衛星 GEO-KOMPSAT-2B の GEMS センサーによる高時間分解能の NO_x 及びエアロゾル、2017 年に打ち上げられた European Space Agency (ESA) の極軌道衛星 Sentinel の TROPOMI センサーによる高時間分解能の NO_x、2023 年に打ち上げられた NASA の TEMPO センサーによる高時間分解能の NO_x 及びエアロゾル、2024 年に日本と ESA 共同で打ち上げられた極軌道衛星 EarthCARE の ATLID センサーによる高時間分解能の 3 次元エアロゾル、そして 2025 年度に打ち上げられる予定の日本の GOSAT-GW による高時間分解能の NO_x などである。これらの人工衛星データを大気汚染予測に利用することで、大気汚染予測を高精度化できる見込みが非常に高い。以上のような背景の下で、膨大な衛星データを利活用した大気汚染物質予測の高精度化が世界的にも進められており、国立環境研究所においても NICAM-Chem を用いたデータ同化手法の利用を始めたところである。

3.3 計算方法

3.3.1 LETKFによるエアロゾルデータ同化

非静力学正 20 面体格子大気モデル NICAM (e.g., Satoh et al., 2014) に搭載されたエアロゾルモデル NICAM-Chem に対して、局所アンサンブル変換カルマンフィルター (Localized Ensemble Transform Kalman Filter: LETKF by Hunt et al., 2007) を適用することで、エアロゾルデータ同化 (e.g., Dai et al., 2019; Cheng et al., 2019) を行った（以後 NICAM-Chem/LETKF）。様々な衛星センサーから AOT が得られる時代の中で、それぞれのセンサーから得られた AOT を組み合わせ、より高精度な AOT の衛星成果物情報をデータ同化に利用したい。そこで本年度は、JAXA/EORC で開発されている GCOM-C/SGLI と静止衛星ひまわり/AHI の AOT を融合した新しいデータセット（以後、SGLI-AHI JAXA プロダクトと呼ぶ）の Version 4 をテストとして用いることで、同化結果にどのような影響があるかを調べた。対象は 2021 年 3 月とし、水平解像度 56 km の NICAM-Chem/LETKF によるエアロゾル同化シミュレーションを実施した。

3.3.2 2DVar によるエアロゾル同化

NICAM-Chem/LETKF は 20 以上のアンサンブルが必要となるため、最適化を進めても通常のシミュレーションに比べて 10 倍近くの計算資源を必要とする。そこで、計算コストが数%程度しか増加せず、日々の予測モデルへの活用が現実的な 2 次元変分法 (2DVar: 2-dimensional variation method by Yumimoto et al., 2017) を NICAM-Chem に導入して、エアロゾルデータ同化 (Goto et al., 2024) を実施した（以後 NICAM-Chem/2DVar モデル）。シミュレーションは水平分解能 56 km で実施した。同化に用いた観測データは、静止気象衛星ひまわり、極軌道衛星 Aqua/MODIS、極軌道衛星 CALIPSO/CALIOP、の複数の衛星データを統合した 2 次元量の AOT (Goto et al., 2024) である。本年度は、2015 年から 2021 年までの長期間計算を実施し、世界各地の地上観測 AERONET (Holben et al., 1998) の観測地点でのモデル精度検証を実施した。

3.4 結果

3.4.1 LETKFによるエアロゾルデータ同化

SGLI-AHI JAXA プロダクト Version 4 の AOT を NICAM-Chem/LETKF の同化に用いた。同化の効果を調べるために、同化なしの AOT (NICAM の同化なし) と AERONET の AOT を比較した (図1a)。その結果、バイアス (BIAS) が -0.023、RMSE が 0.244、相関係数 (CORR) が 0.618 であり、同化なしでも NICAM のエアロゾル再現性が比較的良好であることがわかった。次に、SGLI-AHI JAXA プロダクト Version 4 の SGLI の AOT のみを同化した結果と、SGLI-AHI JAXA プロダクト Version 4 の AOT を同化した結果に関して AERONET と比較を実施した (図1b, 1c)。その結果、同化結果は同化なしの結果よりも AERONET の AOT との一致性が高かった。SGLI のみの AOT 同化では、BIAS が -0.029 と同化なしの結果よりもやや大きくなつたが、RMSE が 0.204 と小さくなり、CORR が 0.691 と大きくなつた。一方、SGLI と AHI の双方の AOT を同化した結果では、BIAS が -0.013、RMSE が 0.205、CORR が 0.706 となり、全て改善されたことがわかった。図1d に示したよ

うな頻度分布で確認しても、AERONETとNICAMのAOT差が0.05以内にある結果は、同化なしの結果が41.59%であるのに対して、SGLIのAOTのみの同化では50.19%、SGLIとAHIの双方の同化では51.01%にまで増加した。以上のことから、SGLI-AHI JAXAプロダクトのAOTを用いたNICAMの同化が成功し、特にVersion 4のAOTの結果を用いたことで、より再現性の高いエアロゾル同化プロダクトが作成できたことが示された。

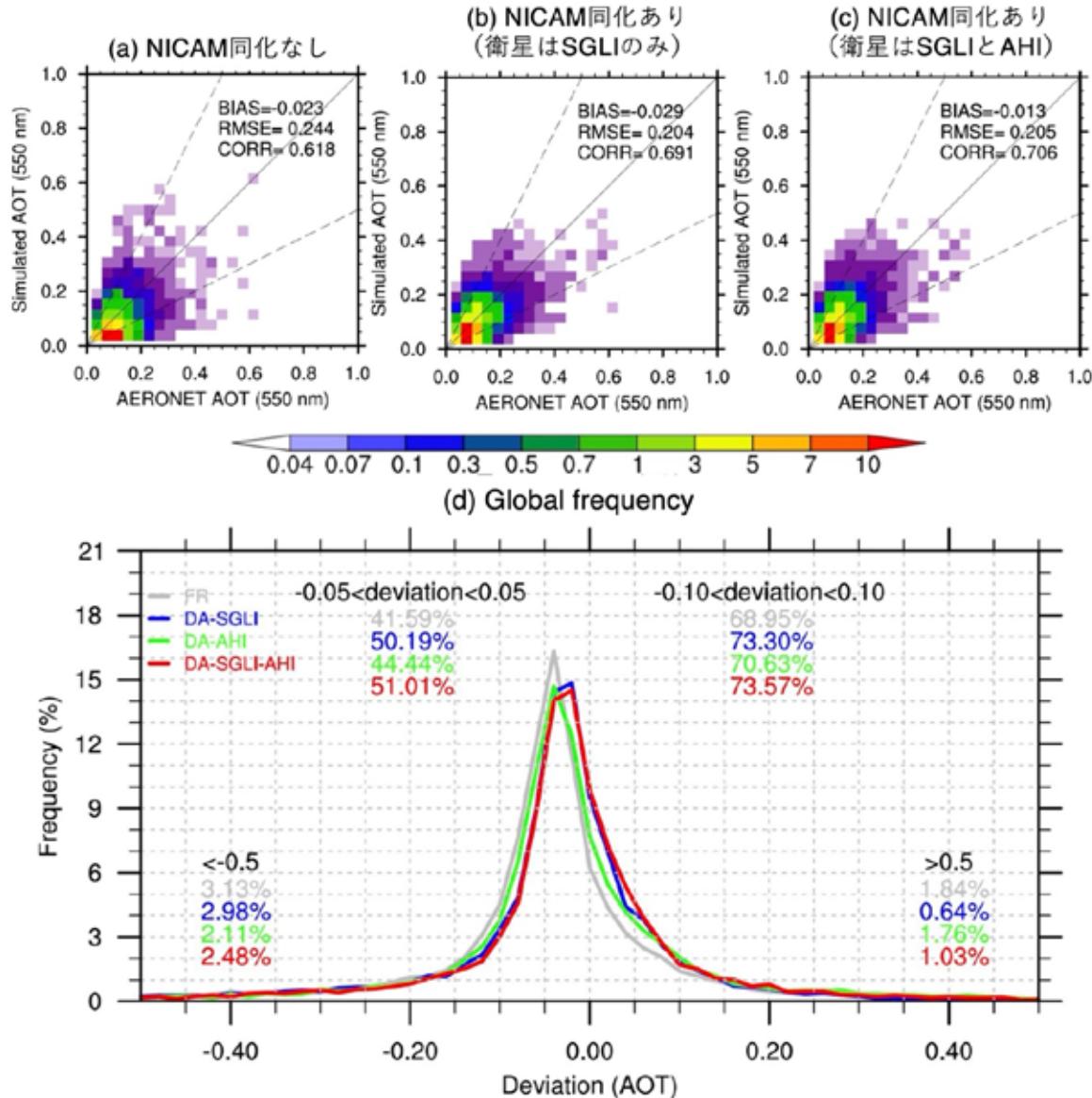


図 1.2021年3月における (a,b,c) AERONET と NICAM で計算された AOT に関する相関の密度分布と(d) AERONET と NICAM の差に関する頻度分布。NICAM で計算された AOT は 3 種類あり、(a) 同化なしの NICAM の結果、(b) SG LI-AHI JAXA プロダクト Version 4 の SG LI のみの AOT を同化した結果、(c) SG LI-AHI JAXA プロダクト Version 4 の AOT を同化した結果である。パネル内部に書かれた数字は統計変数 (BIAS, RMSE, CORR) である。パネル (d) 内に書かれた数字は、それぞれの偏差 (deviation) の中に存在するサンプル数を割合で表している。

3.4.2 2DVarによるエアロゾルデータ同化

長期間の衛星AOTをNICAM-Chem/2DVarを用いた同化によって、地上観測で得られたAOTをどの程度再現できるかを検証した。その結果、全体的には同化なしの結果が同化ありの結果よりもAOTの値が低い傾向

であった。図2(a)で示したUAE/Mezairaは土壤粒子が卓越するサイトであるが、同化なしの結果では夏の極大時に過大評価傾向、冬の極小時に過小評価傾向であった。同化した結果、夏の極大時に過大評価傾向は改善されたが、冬の極小時の過小評価傾向は値が大きくなりすぎたときもあった。このような傾向は、図2(c)で示したOsaka、図2(d)で示したUS/GFSC、図2(e)で示したRagged_Pointでも同様であった。つまり、極大時のAOTは同化ありの結果の方が良好であったが、極小時のAOTは同化なしの結果の方が良好であった。また、極小時のAOTが同化なしの結果の方が良好であった事例は、図2(f)で示したAscension Islandでも同様であった。現在はこの原因の解明のために解析を実施している。また図2(b)で示したIndia/Kanpurは、同化したとしても衛星及び地上観測で得られた高いAOTを再現することができなかった。考えられる理由は、モデル解像度が56 kmでやや粗いため、Kanpurでのエアロゾルをうまく再現することが難しいからだと考えられる。

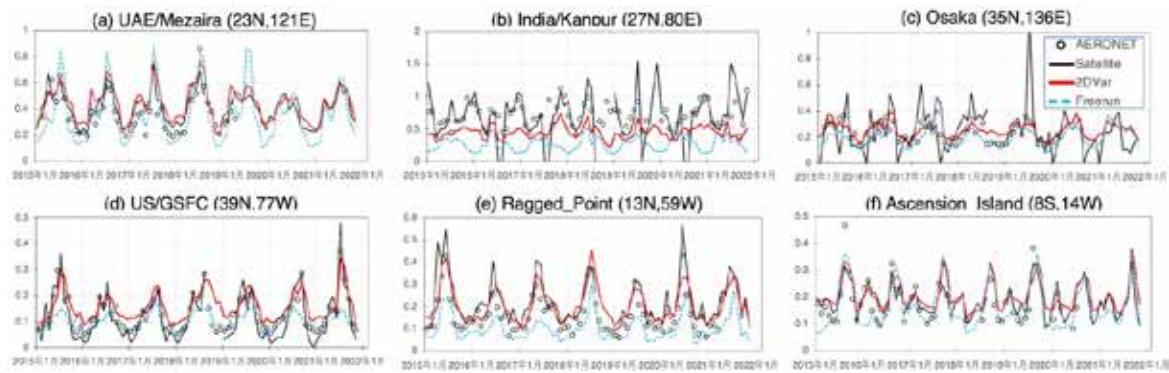


図 2. 2015 年から 2021 年における世界各地の AERONET 観測地点での観測結果（黒丸）、同化に用いた複合衛星結果（黒実線）、NICAM で同化して計算した AOT（赤実線）、NICAM で同化なしで計算した AOT（青点線）の時系列変動比較。比較した観測地点は、(a) UAE/Mezaira (23N, 121E)、(b) India/Kanpur (27N, 80E)、(c) Japan/Osaka (35N, 136E)、(d) US/GSFC (39N, 77E)、(e) Ragged_Point (13N, 59W)、(f) Ascension Island (8S, 14W) である。

参考文献

- Cheng Y., Dai T., Goto D., Schutgens N.A.J., Shi G., Nakajima T. (2019) Investigating the assimilation of CALIPSO global aerosol vertical observations using Four-Dimensional Ensemble Kalman Filter. *Atmos. Chem. Phys.*, 19, 13445-13467, doi:10.5194/acp-19-13445-2019
- Dai T., Cheng Y., Suzuki K., Goto D., Kikuchi M., Schutgens N.A.J., Yoshida M., Zhang P., Husi L., Shi G., Nakajima T. (2019) Hourly aerosol assimilation of Himawari-8 AOT using the four-dimensional local ensemble transform Kalman filter. *J. Adv. Model. Earth Syst.*, 11(3), 680-711, doi:10.1029/2018MS001475
- Holben B. N., Eck T. F., Slutsker I., Tanré D., Buis J. P., Setzer A., Vermote E., Reagan J. A., et al. (1998) AERONET - A federated instrument network and data archive for aerosol characterization, *Remote Sens. Environ.*, 66, 1-16
- Hunt B. R., Kostelich E. J., Szunyogh I. (2007) Efficient data assimilation for spatiotemporal chaos: A local ensemble transform Kalman filter. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 230 (1-2), 112-126. <https://doi.org/10.1016/j.physd.2006.11.008>
- Goto D., Nishizawa T., Uchida J., Yumimoto K., Jin Y., Higurashi A., Shimizu A., Sugata S., Yashiro H., Hayasaki M., Dai T., Cheng Y., Tanimoto H. (2024) Development of aerosol assimilation system using global non-hydrostatic model, 2-dimensional variation method, and multiple satellite-based aerosol products, *J. Adv. Model. Earth Syst.*, 16(9), e2023MS004046, <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2023MS004046>
- Satoh M., Tomita H., Yashiro H., Kodama C., Seiki T., Noda A. T., et al. (2014) The non-hydrostatic icosahedral atmospheric model: description and development. *Prog. Earth Planet. Sci.*, 1, 18. <https://doi.org/10.1186/s40645-014-0018-1>
- Yumimoto K., Tanaka T. Y., Oshima N., Maki T. (2017) JRAero: the Japanese Reanalysis for Aerosol v1.0, *Geosci. Model Dev.* 10(9), doi:10.5194/gmd-10-3225-2017

4.まとめ

本研究課題では、大気汚染物質の時空間分布を高精度で予測することを目的としており、このためにスーパーコンピュータを利用した同化手法を開発している。本年度は、NICAM-Chem/LETKFによるエアロゾル同化シミュレーションを、SGII-AHI JAXAプロダクトのVersion 4を用いて、2021年3月を対象として実施した。その結果、同化結果が良好であることが確認でき、より再現性の高いエアロゾル同化プロダクトが作成できた。また、NICAM-Chem/2DVarモデルによるエアロゾル同化シミュレーションを、ひまわり・Aqua/MODIS・CALIPSO/CALIOPの複数の衛星データを統合した2次元量のAOTを用いて、2015年から2021

高度な大気汚染予測のためのデータ同化手法の開発

年までの長期間計算を実施した。その結果、同化によって高濃度AOTをうまく再現することができた。しかし、同化によって極小時に過大評価してしまう傾向も見られた。この原因は現在解析中である。

5. 研究成果発表

5.1 誌上発表(査読あり)

- Cheng, Y., Dai T., Cao J., Goto D., Jin J., Nakajima T., Shi G. (2024) Improving estimation of a record-breaking east Asian dust storm emission with lagged aerosol Ångström exponent observations, *Atmospheric Chemistry and Physics.*, 24, 12643-12659, <https://doi.org/10.5194/acp-24-12643-2024>.
- Goto D., Nishizawa T., Uchida J., Yumimoto K., Jin Y., Higurashi A., Shimizu A., Sugata S., Yashiro H., Hayasaki M., Dai T., Cheng Y., Tanimoto H. (2024) Development of an aerosol assimilation system using a global non-hydrostatic model, a 2-dimensional variational method, and multiple satellite-based aerosol products. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems.*, 16(9), e2023MS004046, <https://doi.org/10.1029/2023MS004046>.
- Wang, H., Liu, X., Wu, C., Lin, G., Dai T., Goto D., Bao, Q., Takemura, T., Shi G. (2024) Larger Dust Cooling Effect Estimated From Regionally Dependent Refractive Indices, *Geophysical Research Letters*, 51(9), <https://doi.org/10.1029/2023GL107647>.

5.2 誌上発表(査読なし)

該当なし

5.3 口頭発表

五藤大輔, 西澤智明, 打田純也, 弓本桂也, 神慶孝, 日暮明子, 清水厚, 菅田誠治, 八代尚, 早崎将光, DAI Tie, CHENG Yueming, 谷本浩志: 全球非静力学モデルと2次元変分法と複数の衛星データを用いたエアロゾル同化システム開発, 日本気象学会2024年度秋季大会, 茨城県つくば市, 2024年11月

5.4 その他(書籍等)

該当なし

6. 連絡先 (氏名、住所、所属、Tel、Fax、E-mail)

五藤大輔

〒305-8506 茨城県つくば市小野川 16-2

国立研究開発法人国立環境研究所地域環境保全領域

Tel: 029-850-2899 Fax: 029-850-2580

E-mail: goto.daisuke@nies.go.jp

Project name:
Numerical study on cloud systems using NICAM

April 2024 – March 2025

Project leader:
Masaki Satoh, Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo

Project members:
Woosub Roh, Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo
Shuhei Matsugishi, Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo

Abstract:

Our goal is to evaluate and improve the simulation of cloud and precipitation systems simulated by a global non-hydrostatic model, NICAM (Non-hydrostatic ICosahedral Atmospheric Model), using satellite observations. Various types of cloud systems are formed depending on the environment on the earth, influencing human society via extreme events including heavy rain and strong winds. Also, the change in radiative forcing associated with cloud systems is one of the largest uncertainties in predicting climate change. To evaluate and improve the simulation of cloud systems by NICAM, we perform cloud-resolving simulations for regional and specific meteorological events using the NIES supercomputer.

This year, we analyzed radar reflectivity and Doppler velocity using EarthCARE CPR observations and global sub-kilometer NICAM simulations. The simulated results showed that vertical structures of cold fronts and convective systems were realistically captured in both datasets. By applying a retrieval method based on the relationship between Doppler velocity and radar reflectivity, we estimated terminal velocities of ice particles. However, limitations remain due to random errors, NUBF effects, and model biases. Continued validation and refinement of cloud microphysics are essential for improving vertical motion representation and the accuracy of convection observations.

Keywords:
global cloud system resolving model, precipitation systems, satellite simulator

Project name:
Numerical study on cloud systems using NICAM

April 2024 – March 2025

Project leader:
Masaki Satoh, Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo

Project members:
Woosub Roh, Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo
Shuhei Matsugishi, Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo

1. Research objectives

It is important to reproduce realistic cloud precipitation systems of numerical models in order to improve the prediction skills of climate models and data assimilation of satellite data. It is possible for the global non-hydrostatic model NICAM (Non-hydrostatic ICosahedral Atmospheric Model) to simulate global cloud systems explicitly with various levels of temporal and spatial resolution, and it is expected to be the next GCM to predict climate and hydrology cycles. This research aims at evaluating the cloud precipitation systems of NICAM using satellite data and a satellite simulator for the understanding of the physical processes of clouds and precipitation.

Keywords :
global cloud system resolving model, precipitation systems, satellite simulator

2. Record of supercomputer use

2.1 Devoted computing time (April 1, 2024 – March 31, 2025)

CPU hours	v_debug	: 0.00 hours [VE · hours]
	v_normal	: 0.00 hours [VE · hours]
	Total	: 0.00 hours [VE · hours]

2.2 Details of supercomputer usage

The NIES supercomputer was used mainly for the calculation of radiances from the NICAM results using a satellite simulator. Several sensitivity tests of cloud system resolving simulations were conducted with a stretched grid in NICAM. The visualizations and statics were done using the workstation of the Atmosphere and Ocean Research Institute.

3. Research progress and results

3.1 Outline

In this fiscal year, we analyzed radar reflectivity and Doppler velocity using EarthCARE CPR observations and global sub-kilometer NICAM simulations. The simulated vertical structures of cold fronts and convective systems were realistically captured in both datasets. Using a retrieval method based on the relationship between Doppler velocity and radar reflectivity, we estimated terminal velocities of ice hydrometeors. However, random noise, non-uniform beam filling (NUBF) effects, and model biases remain as limitations. These results underscore the need for continued validation and refinement of cloud microphysics schemes to improve the representation of vertical motion and enhance the accuracy of convection-related observations.

3.2 Research background and purpose

Clouds remain one of the most ambiguous and challenging elements in climate models, influencing the accuracy of both weather forecasts and climate projections. Addressing these uncertainties requires advancements in observational technologies and numerical simulations. In May 2024, the successful launch of the EarthCARE satellite (Illingworth et al. 2015; Wehr et al. 2023) marked a significant milestone in atmospheric science. Equipped with the groundbreaking Cloud Profiling Radar (CPR), EarthCARE provides unprecedented observations of radar reflectivity and Doppler velocity, enabling the detailed analysis of cloud particle size, falling speeds, and upward air motions. For the first time, the satellite offers a global view of atmospheric vertical motions, a property that remains one of the least understood in both observation and modeling.

The primary purpose of EarthCARE is to enable us deepening understanding of cloud and convective processes for the validation and improvement of numerical models using its observational data. This synergy between the satellite observations and numerical models represents a critical step toward reducing uncertainties in future climate projections. The first step in this effort involves a detailed comparison between EarthCARE observations and results from advanced numerical models.

Parallel to this observational breakthrough, global storm-resolving models (GSRMs) have emerged as pivotal tools for climate and weather studies (Satoh et al. 2019; Stevens et al. 2019). With a mesh size of approximately 1 km or less, these models provide a resolution capable of resolving mesoscale convective systems (MCSs) and their intricate dynamics (Stevens et al. 2020). For this purpose, we employ a global sub-kilometer mesh atmospheric model simulation, specifically obtained by the Nonhydrostatic Icosahedral Atmospheric Model (NICAM; Tomita and Satoh 2005; Satoh et al. 2008, 2014), which has a horizontal mesh size of 870 meters. While not the highest resolution tested by NICAM, this mesh size represents one of the finest resolutions commonly used for such studies (Satoh and Matsugishi 2020). Previous tests with NICAM at resolutions as fine as 220 meters have demonstrated improvements in capturing precipitation characteristics and better resolving the vertical velocity within meso-scale convective systems (MCSs), highlighting the model's sensitivity to mesh size (Satoh and Matsugishi 2022; Matsugishi et al. 2024).

The use of global storm-resolving models (GSRMs) like NICAM, with horizontal mesh sizes of around one kilometer, marks a recent and innovative direction in weather and climate simulation (Slingo et al. 2022). These models, referred to as global km-scale models, are being actively developed and utilized by several international institutes for a variety of research applications. Coordinated intercomparisons of GSRMs have also become a focus of the advanced modeling parties (Stevens et al. 2019; Takasuka et al. 2024). Such efforts aim to benchmark the performance of these models and refine their application in addressing key atmospheric and climate science challenges.

To complement EarthCARE's observations, we conducted a simulation using NICAM at an unprecedented resolution of 870 m, covering the entire globe during EarthCARE's initial observational period (June 28–29, 2024). This simulation represents one of the highest resolutions ever achieved for a GSRM (Miyamoto et al. 2016).

Using a satellite simulator, EarthCARE-like observation data were generated from NICAM's simulated meteorological and cloud microphysics profiles (Hashino et al. 2013; Roh et al. 2022). A comparison of EarthCARE CPR observations and NICAM simulation data revealed remarkable correspondence in locations and timing of MCSs. However, quantitative discrepancies in radar reflectivity and Doppler velocity highlighted biases, offering a valuable opportunity to evaluate and refine atmospheric models using EarthCARE data.

Vertical air motions, a key feature of atmospheric circulation, remain poorly understood in their detailed structure either by observations (Kollias et al. 2018) or by simulations (Sueki et al. 2019). The synergetic analysis with the EarthCARE and NICAM's sub-km resolution provides an important step forward. While not perfect, it bridges the gap between observations from EarthCARE and more commonly used GSRMs. The present study explores the vertical transport of hydrometeors and mass within convective cells, emphasizing the synergy between advanced satellite observations and high-resolution numerical simulations. These findings pave the way for improving the representation of convective processes in climate and weather models, fostering progress in the emerging science of vertical air motions.

Doppler velocity measurements from space are challenging due to various uncertainties. The EarthCARE satellite travels at approximately 7 km/s, and even small vibrations can introduce errors. There are some researches related to the uncertainty of Doppler velocity related to random errors from small satellite

vibrations, multiple scattering effects, non-uniform beam filling, and positioning errors (e.g., Battaglia et al., 2011; Kollia et al., 2018; Hagihara et al., 2022). Therefore, validating and assessing the performance of Doppler velocity measurements using numerical simulations is essential.

In this study, we use NICAM to simulate atmospheric conditions at an 870-meter resolution in the global domain and compare the results directly with EarthCARE observations.

3.3 Data and methodology

The Earth Cloud Aerosol and Radiation Explorer (EarthCARE) was jointly developed with the Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA) and the European Space Agency (ESA) (Illingworth et al. 2025, Wehr et al. 2023). It was launched at 23:20 UTC on May 28, 2024, from Vandenberg Space Force Base, California. The EarthCARE satellite is a groundbreaking mission aimed at reducing uncertainties in cloud processes and improving climate models. Its primary purpose is to enhance our understanding of cloud and convective processes through the validation and improvement of numerical models using EarthCARE's observational data. Cloud Profiling Radar (CPR) on board EarthCARE is the world's first spaceborne Doppler radar in the W-band (94 GHz) and was jointly developed by JAXA and the National Institute of Information and Communications Technology (NICT). This study utilized the CPR Level 1b product (version vCa), which was publicly released on 14th January 2025. The product includes radar reflectivity and Doppler velocity data. There were contaminations related to second-trip echoes (Battaglia 2021), and we removed them based upon a method of Battaglia (2021). Additionally, the Doppler velocity values were corrected by assuming the Doppler velocity at ground surface was zero, and unfolded for values exceeding the Nyquist velocity.

We use the Nonhydrostatic Icosahedral Atmospheric Model NICAM (Tomita and Satoh 2004; Satoh et al., 2008, 2014). The global horizontal grid interval is approximately 870m. The model has a terrain following grid system with 78 vertical layers. The model top height is 50 km, and layer thicknesses gradually increase with altitude. Applied physics schemes are the NICAM Single-Moment Water 6 cloud microphysics scheme (Tomita 2008; Roh and Satoh 2014), which considers six categories of hydrometers as prognostic variables, Smagorinsky type subgrid turbulence scheme and two-stream radiative transfer with a correlated k-distribution scheme MSTRNX (Sekiguchi and Nakajima 2008). The MATSIRO land surface model (Takata et al 2003) and slab-ocean model are used for the surface process. Initial conditions of the atmosphere and the ocean are derived by linear interpolation of ERA5 (Hersbach et al. 2020). The simulation started on 00 UTC 17 June 2024.

The satellite simulator, known as the Joint Simulator for Satellite Sensor (J-Sim), is used to calculate EarthCARE CPR-like signals based on NICAM simulation data (Hashino et al. 2015; Roh et al. 2022). Vertical profiles of radar reflectivity and Doppler velocity are derived using vertical profiles of cloud microphysical variables (specific mass, size distribution, and density of hydrometeors categorized as cloud water, cloud ice, rain, snow, and graupel), meteorological variables (temperature, pressure, and density), and surface conditions (albedo and emissivity). For simplicity, the satellite simulator is referred to as J-Sim throughout the text.

3.4 Results

Figure 3.1 shows cross sections of the EarthCARE CPR observation and the EarthCARE CPR like signals of the NICAM simulation calculated with J-Sim (see Methodology) during 1:08-1:20 UTC (referred to Case 1). In each panel, the radar reflectivity (a,cl) and the Doppler velocity (c,d) are shown. Case 1 is the observation along the cold front system of the extratropical cyclone. The radar reflectivity shows stronger signals in the middle level of convective clouds near 50°S. The Doppler velocity distinctly illustrates a faster falling speed in the lower levels and a slower downward motion above. This boundary is inclined, extending from approximately 52°S to higher and lower latitudes, with an altitude of about 2.5 km at 40°S. The faster falling speed corresponds to rainfall, while the slower downward motion indicates ice-phase hydrometeors. This structure is characteristic of stratiform clouds associated with extratropical cyclone systems. The boundary between the faster falling speed and the slower downward motion approximately corresponds to 0°C in temperature. A cold front forms when a mass of relatively colder air advances into a region occupied by warmer air. The drier, colder air creates a steeply sloping boundary beneath the warmer, moister air at the

surface, forcing it to ascend as the front progresses. The boundary near 52°S separates precipitation associated with cold air (snow, green) from precipitation linked to warm air (rain, blue). The Doppler velocity clearly distinguishes between cold and warm air near the surface.

The radar reflectivity reveals a weak melting layer at approximately 2.5 km altitude above 51°S, though it is not distinct enough to clearly differentiate between snow and rain. In contrast, the Doppler velocity cross-section provides a clearer distinction between rain (blue) and snow (green), reflecting differences in terminal velocity.

NICAM successfully reproduces a realistic cold front system similar to the observations, with a boundary location consistent with the observed system. The NICAM simulations also capture a similar structure in both the radar reflectivity's melting layer and the Doppler velocity distribution. However, NICAM tends to overestimate radar reflectivity and underestimate Doppler velocity due to an overestimation of the terminal velocity of ice hydrometeors.

In this case, convection associated with the cold front is relatively weak compared to terminal velocity, as evidenced by the lack of significant upward motion above the cold air between -55°S and -50°S in both the observations and simulations.

Figure 3.2 presents cross-sections of low clouds in the Southern Hemisphere and mesoscale convective systems (MCSs) developing off the coast of southern Africa and near the Caribbean Sea in the Northern Hemisphere during 07:30–07:42 UTC (referred to as Case 2). These cross-sections illustrate precipitation associated with low clouds producing drizzle, characterized by a Doppler velocity of approximately 2 m/s, and rainfall linked to a tropical storm, exhibiting a Doppler velocity of around 4 m/s.

In Case 2, stronger convective systems are observed near 8°N and 20°N in the EarthCARE data (Fig. 3.2a, b). Radar reflectivity is more pronounced at higher altitudes, reaching approximately 10 km. A faster falling speed is generally observed below 5 km, while slower downward motion appears at higher altitudes. However, in convective regions, the structure becomes more complex, with areas of enhanced downward motion near 8°N and a mix of strong upward and downward motions near 20°N. This profile suggests the presence of significant vertical air motion within the convective clouds.

In the EarthCARE data, two convective cores are evident near 8°N and 20°N, as indicated by radar reflectivity. The Doppler velocity reveals that the convective core near 8°N is a narrow and intense convective system. The observed precipitation appears to exhibit fast downward motion, but this is primarily due to a folding issue, where the Doppler velocity exceeds the Nyquist limit. The actual Doppler velocity likely represents strong upward motion within this convective system.

The convective system near 20°N is identified as an MCS, consisting of both a convective core and a stratiform precipitation region. This system demonstrates a mix of upward motion in convective regions and more uniform downward motion in the stratiform precipitation area, consistent with the expected structure of an MCS.

NICAM simulations successfully reproduce the cloud and precipitation structures observed in both hemispheres, including low clouds in the Southern Hemisphere and MCSs in the Northern Hemisphere (Fig. 3.2c, d). However, NICAM simulations capture only one of the convective systems near 20°N, and the convective core is very narrow, making it difficult to fully resolve, especially when compared to observations.

The radar reflectivity and terminal velocity are well represented by NICAM simulations, but there is a slight overestimation of radar reflectivity and underestimation of Doppler velocity compared to EarthCARE data, similar to what was observed in Case 1.

We investigate the relationship between radar reflectivity and Doppler velocity to estimate terminal velocity under the assumption that vertical velocity is relatively small. This approach has been widely used in ground-based observations to derive terminal velocity. For instance, previous studies have determined the terminal velocity of ice particles by fitting a power-law relationship between radar reflectivity and Doppler velocity (e.g., Protat and Williams, 2011). In this study, we apply the same assumption across different cases and compute the corresponding power-law relationships.

The Doppler velocity V_D from space is defined as

$$V_D = V_t + w + E \quad (1)$$

Where, V_t is the radar reflectivity-weighted terminal velocity of all hydrometeors, w is vertical air velocity, E accounts for errors arising from random satellite vibrations, multiple scattering effects, non-uniform beam filling (NUBF), and positioning errors (e.g., Battaglia et al., 2011; Kollas et al., 2018; Hagihara et al., 2022). However, these errors are not included in NICAM simulations.

The radar reflectivity-weighted terminal velocity (V_t) is expressed as

$$V_t = \frac{\int_0^\infty \sigma_b(D)N(D)v_t(D)dD}{\int_0^\infty \sigma_b(D)N(D)dD} \quad (2)$$

where D is the particle diameter, $N(D)$ is the particle size distribution (number concentration per unit volume per unit diameter), $v_t(D)$ is the terminal velocity of a particle of diameter D , and $\sigma_b(D)$ is the backscattering cross-section of a particle of diameter D .

Under the assumption that vertical velocity is relatively small compared to terminal velocity, the average vertical velocity is zero, and variations in terminal velocity are minimal in the radar reflectivity–Doppler velocity space. Consequently, we can estimate V_t using a power-law relationship:

$$V_t \approx aZ_e^b \quad (3)$$

where a and b are fitting parameters, and Z_e represents the radar reflectivity factor, which is the sixth moment of the particle size distribution. However, this method has inherent limitations due to its sensitivity to vertical velocity variations and the large uncertainties associated with terminal velocity.

To quantify the relationship between terminal velocity and radar reflectivity, we fitted a power-law function using data points where radar reflectivity exceeds -20 dBZ (with large signal to noise ratio) focusing on ice clouds above the melting layer (3 km for Case 1 and 5 km for Case 2). To consider the impact of turbulence and measurement errors, only Doppler velocity values below 1 m/s were considered. Our analysis shows that the power-law relationship between terminal velocity and radar reflectivity remains almost consistent to the power-law relationship between Doppler velocity velocity and radar reflectivity , with smaller variances compared to Doppler velocity in Case 1 (not shown).

The power-law relationship derived from EarthCARE is consistent with the results of Kalesse et al. (2013), who reported coefficients of $a = 0.71$ and $b = 0.06$ for ice clouds with cloud depths exceeding 3 km at the Atmospheric Radiation Measurement (ARM) site in the mid-latitudes. In our analysis, EarthCARE data yielded $a = 0.812$ and $b = 0.089$ for Case 1. When accounting for standard deviations in previous studies, our results align well with earlier findings.

For Case 2, we observe a high frequency of data points where radar reflectivity exceeds 5 dBZ and Doppler velocity is lower than -2 m/s. This suggests the presence of rimed particles such as graupel and hail. In contrast, Case 1 is dominated by smaller ice particles, including snow and cloud ice, which have slower terminal velocities than graupel and hail. As a result, the correlation between radar reflectivity and Doppler velocity is stronger in Case 2. Additionally, the power-law coefficients for Case 2 ($a = 0.853$, $b = 0.182$) show an increase compared to Case 1, reflecting the influence of rimed particles.

NICAM simulations show similar joint histograms to those observed in Case 1 (Fig.3.3). However, when comparing the fitted power-law relationships between radar reflectivity factor and Doppler velocity, discrepancies emerge. In NICAM, the a parameter (1.093) is overestimated compared to EarthCARE (0.812), while the b parameter (0.030) is underestimated relative to EarthCARE (0.089). This suggests that terminal velocity is generally overestimated in NICAM, particularly for weak radar reflectivity values. Despite these biases, NICAM captures the case dependency observed in EarthCARE data, with an increase in coefficients for Case 2 ($a = 1.387$, $b = 0.062$) compared to Case 1. However, the terminal velocity remains overestimated, similar to Case 1.

Using this relationship, we can quantitatively assess various microphysical processes. In cold front cases, where vertical velocity is weak and rimed particles are scarce, terminal velocity estimates for dry ice particles are more reliable. In contrast, in tropical convection cases, the presence of rimed particles and radar attenuation introduces challenges in estimating terminal velocity. However, this method still allows for a quantitative assessment of the fraction of hail and graupel.

By leveraging the derived power-law relationship, we can ultimately estimate the function of terminal velocity as a function of particle diameter ($v_t(D)$). This demonstrates the potential of EarthCARE observations to enhance our understanding of cloud microphysics and improve microphysics parameterizations in numerical models.

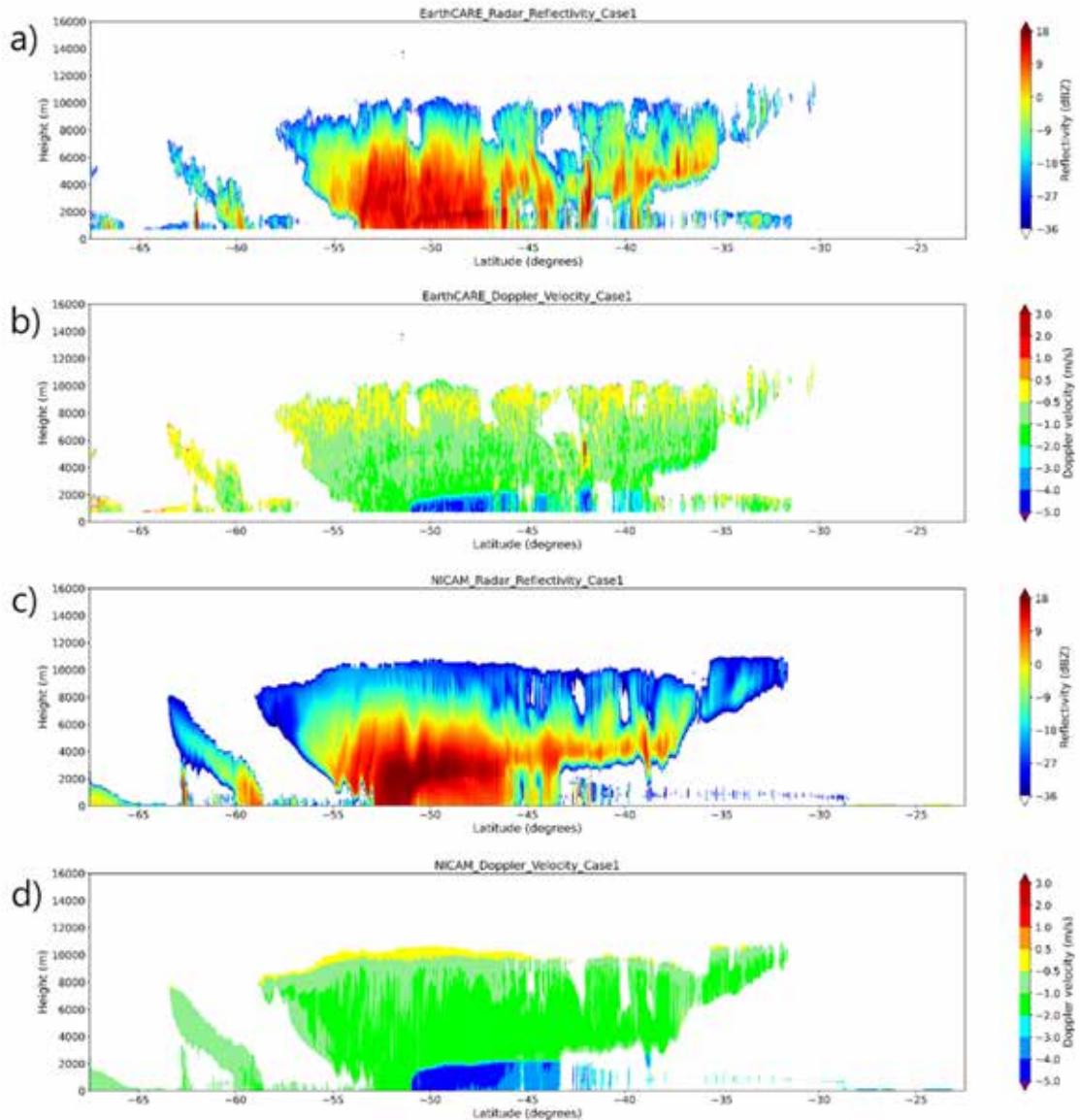


Fig. 3.1 Radar reflectivity (a, c) and Doppler velocity (b, d) from EarthCARE (a, b) and NICAM (c, d) for Case 1. The unit of radar reflectivity is dBZ, and the unit of Doppler velocity is m/s.

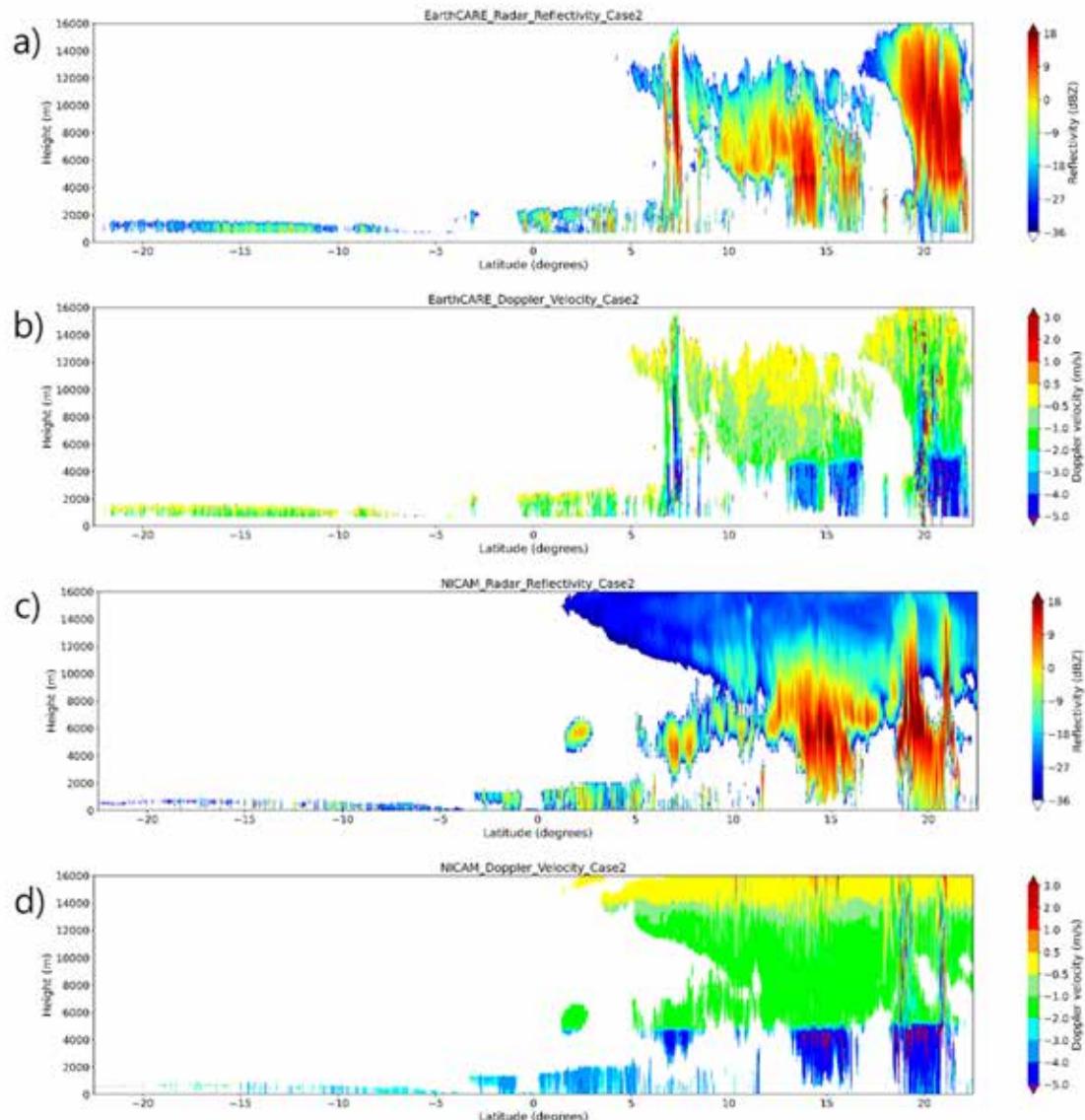


Fig. 3.2 Radar reflectivity (a, c) and Doppler velocity (b, d) from EarthCARE (a, b) and NICAM (c, d) for Case 2. The unit of radar reflectivity is dBZ, and the unit of Doppler velocity is m/s.

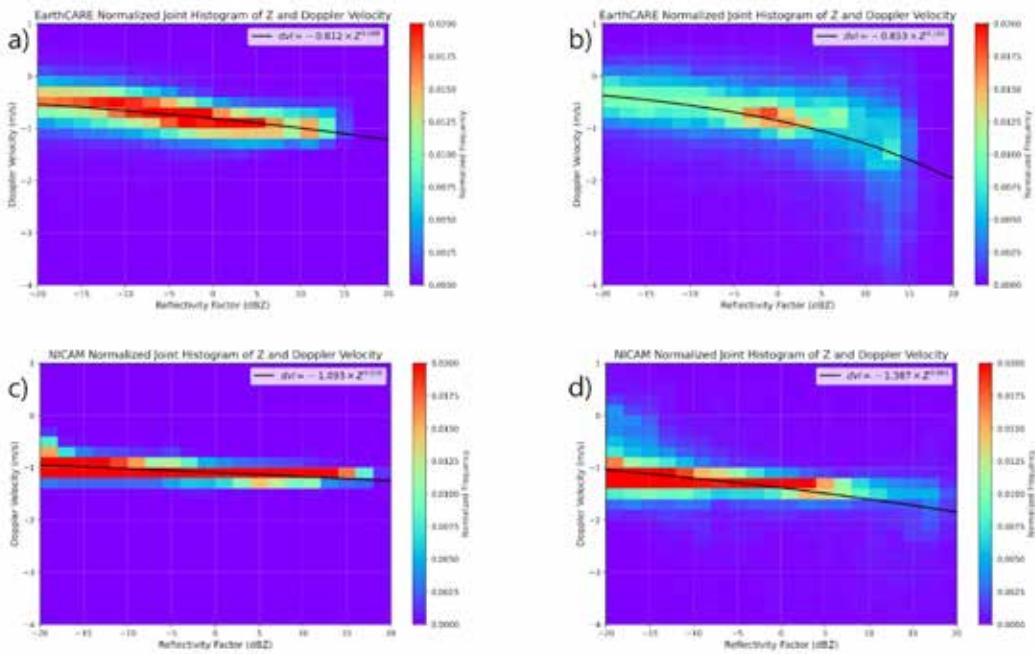


Fig. 3.3 Joint histograms of radar reflectivity and Doppler velocity for EarthCARE (top) and NICAM (bottom) in Case 1 (left) and Case 2 (right). The contour unit is normalized frequency. The bin size is 2 dBZ for radar reflectivity and 0.2 m/s for Doppler velocity. The black line represents a fitted power-law relationship between radar reflectivity and Doppler velocity.

3.5 Discussion

This study underscores the unique capabilities of the newly launched EarthCARE satellite, particularly through its Cloud Profiling Radar (CPR), which enables global observation of radar reflectivity and Doppler velocity. These measurements provide detailed insights into vertical hydrometeor motion and cloud structures. A key contribution of this study is the demonstration that global sub-kilometer simulations can realistically reproduce vertical cross-sections of convective systems and cold fronts, with strong resemblance to EarthCARE observations.

The synergy between EarthCARE data and global sub-km simulations reveals convective mass transport patterns that were previously unobservable on a global scale. Through the application of a satellite simulator, the study successfully links Doppler velocity and radar reflectivity to estimate terminal velocity. However, several limitations persist: Doppler velocity measurements from space are subject to random errors, NUBF effects, multiple scattering, and pointing errors.

Moreover, the study identifies areas for model improvement, especially in cloud microphysics and the representation of vertical air motion. Systematic overestimation of the terminal velocity of ice particles in models, as seen through comparison with EarthCARE data, reveals the importance of data assimilation and validation efforts.

References

- Battaglia, A., Augustynek, T., Tanelli, S., and Kollias, P. (2011) Multiple scattering identification in spaceborne W-band radar measurements of deep convective cores, *J. Geophys. Res.-Atmos.*, 116, D19201, <https://doi.org/10.1029/2011JD016142>.
- Hagihara, Y., Ohno, Y., Horie, H., Roh, W., Satoh, M., Kubota, T., and Oki, R. (2022) Assessments of Doppler velocity errors of EarthCARE cloud profiling radar using global cloud system resolving simulations: Effects of Doppler broadening and folding, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 60, 1–9, <https://doi.org/10.1109/TGRS.2021.3060828>.
- Hashino, T., Satoh, M., Hagihara, Y., Kubota, T., Matsui, T., Nasuno, T., Okamoto, H. (2013) Evaluating cloud microphysics from the NICAM against CloudSat and CALIPSO. *J. Geophys. Res.*, 118, 7273–7293, doi:10.1002/jgrd.50564.
- Hersbach H, Bell B, Berrisford P, et al. The ERA5 global reanalysis. *Q J R Meteorol Soc.* 2020; 146: 1999–2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>
- Illingworth, A., Barker, H., Beljaars, A., Ceccaldi, M., Chepfer, H., Delanoe, J., Domenech, C., Donovan, D., Fukuda, S., Hirakata, M., Hogan, R., Huenerbein, A., Kollias, P., Kubota, T., Nakajima, T., Nakajima, T., Nishizawa, T., Ohno, Y., Okamoto, H., Oki, R., Sato, K., Satoh, M., Wandinger, U., Wehr, T. (2015) The EARTH CARE satellite: The next step forward in global measurements of clouds, aerosols, precipitation and radiation. *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*, 96, 1311–1332. <http://dx.doi.org/10.1175/BAMS-D-12-00227.1>
- Kalesse, H., Kollias, P., & Szyrmer, W. (2013). On using the relationship between Doppler velocity and radar reflectivity to identify microphysical processes in midlatitudinal ice clouds. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(21), 12–168.
- Kollias, P., Battaglia, A., Tatarevic, A., Lamer, K., Tridon, F., and Pfitzenmaier, L. (2018) The EarthCARE cloud profiling radar (CPR) doppler measurements in deep convection: challenges, post-processing, and science applications", Proc. SPIE 10776, Remote Sensing of the Atmosphere, Clouds, and Precipitation VII, 107760R, <https://doi.org/10.1117/12.2324321>.
- Luo, Z. J., R. C. Anderson, W. B. Rossow, and H. Takahashi (2017), Tropical cloud and precipitation regimes as seen from near-simultaneous TRMM, CloudSat, and CALIPSO observations and comparison with ISCCP, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 122, doi:10.1002/2017JD026569.
- Matsugishi, S., Ohno, T., and Satoh, M., 2024: Differences in the cloud, precipitation, and convection representation between the global sub-km mesh simulation and km simulations, EGU General Assembly 2024,

- Vienna, Austria, 14–19 Apr 2024, EGU24-14676, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu24-14676>.
- Miyamoto, Y., Kajikawa, Y., Yoshida, R., Yamaura, T., Yashiro, H. and Tomita, H. (2013) Deep moist atmospheric convection in a subkilometer global simulation, *Geophys. Res. Lett.*, 40, 4922–4926.
- Protat, A., and C. R. Williams (2011) The Accuracy of Radar Estimates of Ice Terminal Fall Speed from Vertically Pointing Doppler Radar Measurements. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 50, 2120–2138, <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-10-05031.1>.
- Roh, W., Satoh, M., Hashino, T., Matsugishi, S., Nasuno, T., Kubota, T. (2023) Introduction to EarthCARE synthetic data using a global storm-resolving simulation. *Atmos. Meas. Tech.*, 16, 3331–3344, <https://doi.org/10.5194/amt-16-3331-2023>.
- Sekiguchi, M., and Nakajima, T. (2008) A k-distribution-based radiation code and its computational optimization for an atmospheric general circulation model. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 109, 2779–2793.
- Sato, K., Okamoto, H., Nishizawa, T., Jin, Y., Nakajima, T., Wang, M., Satoh, M., Roh, W., Ishimoto, H., and Kudo, R. (2024) JAXA Level 2 cloud and precipitation microphysics retrievals based on EarthCARE CPR, ATLID and MSI, *Atmos. Meas. Tech. Discuss.* [preprint], <https://doi.org/10.5194/amt-2024-99>, in review
- Satoh, M., Matsuno, T., Tomita, H., Miura, H., Nasuno, T., Iga, S. (2008) Nonhydrostatic Icosahedral Atmospheric Model (NICAM) for global cloud resolving simulations. *Journal of Computational Physics*, the special issue on Predicting Weather, Climate and Extreme events, 227, 3486–3514, doi:10.1016/j.jcp.2007.02.006.
- Satoh, M., Tomita, H., Yashiro, H., Miura, H., Kodama, C., Seiki, T., Noda, A. T., Yamada, Y., Goto, D., Sawada, M., Miyoshi, T., Niwa, Y., Hara, M., Ohno, Y., Iga, S., Arakawa, T., Inoue, T., Kubokawa, H. (2014) The Non-hydrostatic Icosahedral Atmospheric Model: Description and development. *Progress in Earth and Planetary Science*. 1, 18. doi:10.1186/s40645-014-0018-1.
- Satoh, M. and Matsugishi, S. (2023) Toward global large eddy simulations. *Gekkan Kaiyo*, , Vol. 55, No. 4, 172–179, <https://doi.org/10.15083/0002007328> (in Japanese).
- Slingo, J., Bates, P., Bauer, P. et al. (2022) Ambitious partnership needed for reliable climate prediction. *Nat. Clim. Chang.* 12, 499–503, <https://doi.org/10.1038/s41558-022-01384-8>.
- Stevens, B., Satoh, M., Auger, L., Biercamp, J., Bretherton, C., Chen, X., Duben, P., Judt, F., Khairoutdinov, M., Klocke, D., Kodama, C., Kornblueh, L., Lin, S.-L., Putman, W., Shibuya, R., Neumann, P., Rober, N., Vannier, B., Vidale, P.-L., Wedi, N., Zhou, L. (2019) DYAMOND: The DYnamics of the Atmospheric general circulation Modeled On Non-hydrostatic Domains. *Progress in Earth and Planetary Science*, 6, 61, <https://doi.org/10.1186/s40645-019-0304-z>
- Stevens, B., C. Acquistapace, A. Hansen, R. Heinze, C. Klinger, D. Klocke, H. Rybka, W. Schubotz, J. Windmiller, P. Adamidis, I. Arka, V. Barlakas, J. Biercamp, M. Brueck, S. Brune, S. A. Buehler, U. Burkhardt, G. Cioni, M. Costa-Surós, S. Crewell, T. Crüger, H. Deneke, P. Friederichs, C. C. Henken, C. Hohenegger, M. Jacob, F. Jakub, N. Kalthoff, M. Köhler, T. W. van Laar, P. Li, U. Löhnert, A. Macke, N. Madenach, B. Mayer, C. Nam, A. K. Naumann, K. Peters, S. Poll, J. Quaas, N. Röber, N. Rochetin, L. Scheck, V. Schemann, S. Schnitt, A. Seifert, F. Senf, M. Shapkalijevski, C. Simmer, S. Singh, O. Sourdeval, D. Spickermann, J. Strandgren, O. Tessiot, N. Vercauteren, J. Vial, A. Voigt, and G. Zängl, 2020: The added value of large-eddy and storm-resolving models for simulating clouds and precipitation. *J. Meteor. Soc. Japan*, 98, 395–435, doi:10.2151/jmsj.2020-021.
- Sueki, K., Yamaura, T., Yashiro, H., Nishizawa, S., Yoshida, R., Kajikawa, Y., & Tomita, H. (2019). Convergence of convective updraft ensembles with respect to the grid spacing of atmospheric models. *Geophysical Research Letters*, 46. <https://doi.org/10.1029/2019GL084491>
- Takasuka, D., Satoh, M., Miyakawa, T., Kodama, C., Klocke, D., Stevens, B., Vidale, P. L., and Terai, C. R. (2024) A protocol and analysis of year-long simulations of global storm-resolving models and beyond. *Progress in Earth and Planetary Science*, 11, 66, <https://doi.org/10.1186/s40645-024-00668-1>.
- Takata, K., Emori, S., and Watanabe, T. (2003). Development of the minimal advanced treatments of surface interaction and runoff. *Global and planetary Change*, 38, 209–222.
- Tomita, H. and Satoh, M. (2004) A new dynamical framework of nonhydrostatic global model using the icosahedral grid. *Fluid Dyn. Res.*, 34, 357–400.
- Wehr, T., Kubota, T., Tzeremes, G., Wallace, K., Nakatsuka, H., Ohno, Y., Koopman, R., Rusli, S., Kikuchi, M., Eisinger, M., Tanaka, T., Taga, M., Deghaye, P., Tomita, E., and Bernaerts, D.: The EarthCARE mission – science and system overview, *Atmos. Meas. Tech.*, 16, 3581–3608,

4. Summary

This study highlights the unique capabilities of the newly launched EarthCARE satellite in capturing global Doppler velocity and radar reflectivity through its Cloud Profiling Radar (CPR). By comparing these observations with global sub-kilometer resolution model simulations using a satellite simulator, the study reveals a strong resemblance between observed and simulated structures, particularly in cold fronts and convective systems. The combination of observations and simulations enables a novel characterization of vertical hydrometeor motion and terminal velocity on a global scale.

By bridging observational data and high-resolution simulations, this work establishes a foundation for improving cloud microphysics and vertical velocity representation in next-generation climate and weather models.

5. Future perspective

This study demonstrates that the integration of EarthCARE Doppler velocity observations and high-resolution global simulations offers a promising path toward improved understanding of cloud dynamics and microphysics. As EarthCARE continues to collect data, future validation efforts by JAXA and ESA—using ground-based and airborne observations—will be critical to reducing uncertainties in Doppler velocity measurements.

Advancing the retrieval algorithms for terminal and vertical velocities (e.g., Sato et al., 2024) and incorporating them into model evaluation will play a pivotal role in refining cloud microphysical schemes and convective parameterizations. Furthermore, global storm-resolving models (GSRMs) can support the interpretation of EarthCARE data, particularly in the identification and quantification of systematic model biases.

Looking forward, the EarthCARE mission marks the beginning of a new era in global atmospheric observation. The Doppler velocity dataset enables unprecedented global monitoring of vertical motion—an essential quantity for cloud lifecycles, precipitation formation, and atmospheric circulation. The mutual reinforcement of observations and models is expected to foster major advances in climate and weather prediction, particularly in convective process representation and radiative feedback understanding.

6. List of publications

6.1 Peer-reviewed articles

- Roh, W., Satoh, M., Hagihara, Y., Horie, H., Ohno, Y., and Kubota, T. (2024) An evaluation of microphysics in a numerical model using Doppler velocity measured by ground-based radar for application to the EarthCARE satellite, *Atmos. Meas. Tech.*, 17, 3455–3466, <https://doi.org/10.5194/amt-17-3455-2024>.
- Matsugishi, S., Chen, Y.-W., Terasaki, K., Yashiro, H., Kotsuki, S., Kanemaru, K., Yamamoto, K., Satoh, M., Kubota, T., Miyoshi, T. (2025) Intercomparison of NICAM–LETKF JAXA Research Analysis (NEXRA) version 2 and 3. SOLA, <https://doi.org/10.2151/sola.2025-035>
- Roh, W., Satoh M., Matsugishi S., Aoki S., Kubota T., Okamoto H. (2025) Vertical Motions Inside Clouds Viewed from EarthCARE Satellite Cloud Radar Observations and Global Sub-Kilometer Scale Modeling. *Communications Earth and Environment*. (under review)

6.2 Other publications

None.

6.3 Oral presentations

- Roh, W., Satoh, M. (2024) EarthCARE's Potential to Evaluate a Global Storm-Resolving Model Using a Satellite Simulator, EGU 2024, 14-19th Apr. in Austria. 2024
- Roh, W., Satoh, M. (2024) Utilizing Doppler Velocity from Cloud Radar on the Ground and EarthCARE-like Data for Global Storm-Resolving Model Evaluation, JPGU 2024 in Japan, 26-31st May 2024
- Roh, W., Satoh, M. (2024) Understanding of the Doppler Velocity from a Cloud Radar to Study Cloud and Precipitation Before the Launch of the EarthCARE, AOGS 2024 in Korea, 23-28th Jun. 2024

7. Contact person

Woosub Roh

Division of Climate System Research, Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo
5-1-5, Kashiwanoha, Kashiwa-shi, Chiba, 277-8568 Japan

Tel: 04-7136-4397 Fax: 04-7136-4375

E-mail: ws-roh@aori.u-tokyo.ac.jp

研究課題名 :
NICAM による雲降水システムの研究

実施年度 :
令和 6 年度 ~ 令和 7 年度

課題代表者 : 東京大学大気海洋研究所 佐藤正樹
共同研究者 : 東京大学大気海洋研究所 Woosub Roh
東京大学大気海洋研究所 松岸修平

要旨 :

本課題では、全球非静力学モデル NICAM で再現される雲降水場を、衛星観測を用いて評価し、改良することを目的とする。雲降水システムは地球上の環境に応じて様々な形態で発生し、豪雨や強風などの顕著現象によって人間社会に大きな影響を及ぼす。また、雲による放射強制力の変化は気候変動予測において大きな不確定性の要因の一つである。このような雲降水システムの再現性を評価し改善するため、国立環境研究所のスーパーコンピュータを利用して、領域と気象事例を絞った雲解像実験を行っている。

本研究では、地球観測衛星 EarthCARE の CPR (Cloud Profiling Radar) によって取得された ドップラー速度およびレーダー反射強度データを活用し、全球サブキロメートル解像度のモデルシミュレーションと比較解析を行った。その結果、対流活動や寒冷前線における鉛直構造が観測・シミュレーションの双方で良く再現されていることが確認された。特にドップラー速度とレーダー反射強度の関係を用いた終端速度の推定が有効であることが示された。一方で、観測にはランダムエラーや NUBF 効果などの不確実性が存在し、今後は地上観測との比較を通じた検証やモデル物理過程の改良が求められる。これらの成果は、雲微物理や対流過程の理解を深化させ、将来的な気候予測の精度向上に貢献するものである。

キーワード :

雲解像モデル、雲降水システム、衛星データシミュレータ

研究課題名：

系外惑星も含めた惑星気候多様性に関する数値計算：陸惑星における多重平衡解の探索

実施年度：

令和 6 年度～令和 6 年度

課題代表者：北海道大学大学院理学研究院 石渡正樹

共同研究者：九州大学大学院理学研究院 中島健介

神戸大学大学院理学研究科 林 祥介

1. 研究目的

表層の水量が地球の海洋に比べて少ない陸惑星の表面上に液体の水が存在する条件に関する考察をおこなうことを目的とした大気大循環モデル（AGCM）実験を実施する。全球表面にバケツモデルを適用し様々な太陽定数を用いたパラメータ実験を実施する。本年は陸惑星における多重平衡解の存在を調査するための数値実験を実施した。

キーワード：

系外惑星、陸惑星、大気大循環モデル（AGCM）、完全蒸発状態

2. スーパーコンピュータ利用実績

2.1 計算機利用時間（2024 年 4 月 1 日～2025 年 3 月 31 日）

CPU時間	v_debug	:	0.0 [VE・hours]
	v_normal	:	35,905.1 [VE・hours]
	計	:	35,905.1 [VE・hours]

2.2 利用概要

大気大循環モデル DCPAM5 を用いた陸惑星実験の実行のためにスーパーコンピュータシステムを使用した。実験によって得られたデータは北海道大学のデータサーバに転送し解析を行った。

3. 研究結果

3.1 背景と目的

最新の宇宙望遠鏡 JWST により地球型系外惑星の大気成分の観測 (Zieba et al., 2023 など) が実施されており、次世代の探索ミッションとしてハビタブルな（生命が存在し得る環境を持つ）系外惑星の探索を目的とするもの (Habitable World Observatory: HWO など) も計画されている。惑星がハビタブルとなる条件として惑星表面に液体の水（海洋）が存在できる条件が議論されてきている。従来の惑星表面における液体の水の存在条件に関する考察では、惑星表面全体が水に覆われた水惑星条件が主に使われてきた。水惑星において太陽定数が増大し全球平均日射吸収量が射出限界 (Nakajima et al., 1992) を超えると暴走温室状態が発生し惑星表面に液体の水を有する平衡状態が消失する (Ishiwatari et al., 2002) などの議論が行われてきた。

系外惑星気候を考察するための理想的な設定として陸惑星 (Abe et al., 2005) というものも考えられている。陸惑星とは惑星大気表層系の水量が平均水深にして 10m のオーダーの惑星である。 Abe et al. (2011) は陸惑星設定の大気大循環モデル (GCM) 計算により、全球平均日射吸収量が 415 W m^{-2} まで増加しても惑星表面に液体の水が保持され、 419 W m^{-2} になると土壤水分が全て蒸

発する完全蒸発状態が発生するという結果を得た。液体の水が存在できる 415 W m^{-2} という日射吸収量上限値は、水惑星における暴走温室状態発生の閾値（我々の予備的な 1 次元放射平衡モデル計算によれば、地球大気と同様な放射特性をもつ雲・エアロゾル無しの飽和水蒸気大気ではおよそ 320 W m^{-2} ）を大きく超える値であり、陸惑星は水惑星よりも大きな日射吸収量で液体の水を保持し得ることになる。

本研究では、惑星気候の多様性を掌握することを目指して、様々な設定における陸惑星の気候の多様性およびそれぞれの気候状態が発生するパラメータ範囲を求め、気候状態の遷移が発生する機構を明らかにすることを目指している。まずは Abe et al. (2011) と同様の実験設定（自転傾斜角は 0 度、初期土壤水分量は全球平均水深にして 40cm）を用いた追実験を実施するところから開始した。試行錯誤の結果、昨年度において、入射吸収量を 670 W m^{-2} まで増加させれば、ほぼ全ての土壤水分が蒸発する状態を得た。Abe et al. (2011) の結果よりも大きな日射吸収量が必要ではあったが、彼らの完全蒸発状態に対応する状態が得られることが確認できた。

今年度は、多重平衡解の探索、すなわち同一の日射吸収量に対して土壤水分が大量に存在する状態とほぼ蒸発した状態がともに解となることはないかを確認することを目指した。このために異なる初期状態を用いた場合に同一の太陽定数の値のもとで異なる土壤水分量を持つ状態が得られるかどうかを確認する。これにより、気候状態のパラメータ依存性を示した気候レジーム図における解の分岐構造を掌握のための基礎を得ることを目指す。

3.2 モデルと実験設定

用いるモデルは、我々の研究グループで開発している惑星大気大循環モデル DCPAM5 (<http://www.gfd-dennou.org/library/dcpam>, Noda et al., 2017) である。その力学過程は 3 次元球面プリミティブ方程式系から成る。水平離散化にはスペクトル法を用いる。鉛直座標には σ を採用し、Arakawa and Suarez (1983) の方法を用いて離散化を行なう。放射計算には、Chou et al. (1996) および Chou et al. (2001) の地球大気用スキームを使用する。積雲過程には、Relaxed Arakawa and Schubert スキーム (Moorthi and Suarez, 1992) を用いる。鉛直乱流拡散スキームとして Mellor and Yamada (1974) の level 2.5 スキーム、地表面フラックススキームとして Louis et al. (1992) を用いる。積雲スキームで診断された雲密度と上記の放射スキームを用いて雲による放射吸収量を計算する。雲水量は、生成（積雲対流スキームから計算）、移流、乱流拡散、消滅（雲水量に比例し、消散時間をパラメータとして与える）を考慮した時間発展方程式を解くことにより求める。水蒸気および雲水の移流は Kashimura et al. (2013) の補間方法を取り入れたセミラグランジュ法物質移流スキームを用いて計算する。雨水の蒸発は考慮しない。地表面モデルとして、バケツモデル (Manabe, 1969) を表面全体に適用する。惑星表面の水として、バケツモデルで計算される土壤水分と降雪過程によって生じる雪層の 2 種を考える。自転角速度は地球の値を用いる。初期に与える土壤水分量は水の深さにして 40 cm とする。解像度は T21L26 を用いる。自転傾斜角の値として 0 度を用いた。地表面アルベドは 0.2 とする。太陽定数 S の値として 3000 W m^{-2} から 3200 W m^{-2} の範囲の値を用いる。多重解存在の確認を行うため、 3200 W m^{-2} のもとで得られていたほぼ全ての土壤水分が蒸発した状態を初期状態とし $S=3150 \text{ W m}^{-2}$ を与えた計算をまず実施する。そこで約 2000 日の積分を実施する。その後に、更に 50 W m^{-2} ずつ太陽定数を減少させた実験を行った。現在は 3000 W m^{-2} まで減少させた実験を行っているところである。

3.3 結果

図 1 左図に本研究と Abe et al (2011) で得られた全球平均日射吸収量と全球平均土壤水分量の関係を示す。赤点は昨年度までに実施した実験の結果である。昨年度の年報において報告したように太陽定数が 3200 W m^{-2} の場合（一番右の赤点）には全球平均土壤水分量が 0.1 kg m^{-2} となっており土壤水分はほぼ消失している。この結果は Abe et al (2011) が得た完全蒸発状態に対応するものだと考えられる。緑点は土壤水分のほぼ全てが蒸発した状態から出発し順次太陽定数を減少させた場合に得られた結果である。一番右の緑点は $S=3200 \text{ W m}^{-2}$ の場合で得られた土壤水分がほぼ蒸発した状態を初期状態として $S=3150 \text{ W m}^{-2}$ を与え 2000 日の時間積分で得られ

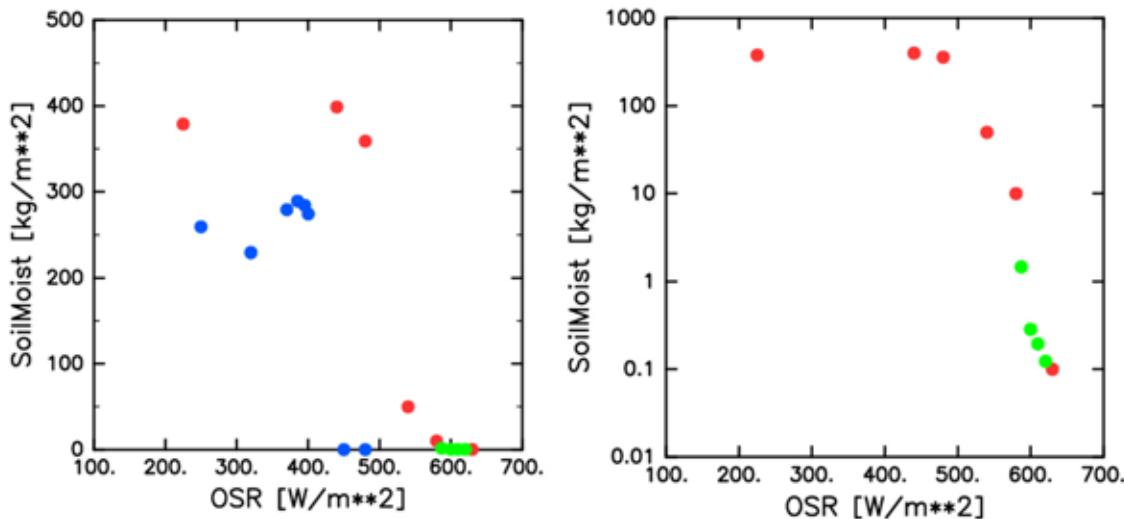


図 1. 全球平均日射吸収量 OSR と全球平均土壤水分量の関係 赤点は本研究で得られた結果を、青点は Abe et al. (2011) で得られている結果を示す。緑点は一番右の赤点の場合 ($S=3200 \text{ W m}^{-2}$) で得られた状態から出発し順次太陽定数を減少させた場合の結果である。赤点の右から 2 つめの場合 ($S=2800 \text{ W m}^{-2}$) はまだ統計的平衡状態に達しておらず実験を継続中である。初期水量が 40cm の場合。365 日平均の値を示している。左図は土壤水分量を線形プロットしたもの、右図は対数プロットしたものである。右図では青点は外してある。

た結果である。その状態を初期状態として太陽定数を 50 W m^{-2} 減少させて (与えた太陽定数は 3100 W m^{-2}) 2000 日の時間積分をして得られた結果が左から 2 番目の緑点である。同様にして順次太陽定数を 50 W m^{-2} ずつ減少させた結果が残り 2 つの緑点である。緑点で示された結果はいずれも全球平均土壤水分量は、 1 kg m^{-2} 以下となり低い値を維持してはいるが日射吸収量の減少とともに増加する結果となっていた (図 1 右図)。この実験を開始する際には太陽定数を順次減少させても土壤水分は 0.1 kg m^{-2} 以下のままで維持され同一の太陽定数に対して異なる土壤水分量を持つ状態が得られる可能性も想定していたがそのようなことは起こらずに連続的に土壤水分が変化する結果が得られた。以上の実験だけではまだ確定的なことは言えないが多重平衡解の存在は示唆されなかった。更に実験および検討を継続する必要がある。

参考文献

- Abe Y., Numaguti, A., Komatsu, G., Kobayashi, Y. (2005) Four climate regimes on a land planet with wet surface: Effects of obliquity change and implications for ancient Mars. *Icarus*, **178**, 27-39. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2005.03.009>
- Abe Y., A. Abe-Ouchi, N. H. Sleep, K. J. Zahnle (2011) Habitable zone limits for dry planets. *Astrobiology*, **11**, 443-460. <https://doi.org/10.1089/ast.2010.0545>
- Arakawa A., Suarez M. J. (1983) Vertical differencing of the primitive equations in sigma coordinates. *Mon. Weather Rev.*, **111**, 34-45. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1983\)111<0034:VDOTPE>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1983)111<0034:VDOTPE>2.0.CO;2)
- Chou M.-D., Lee K.-T. (1996) Parameterizations for the absorption of solar radiation by water vapor and ozone. *J. Atmos. Sci.*, **53**, 1203-1208. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1996\)053<1203:PFTAOS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1996)053<1203:PFTAOS>2.0.CO;2)
- Chou M.-D., Suarez M.J., Liang X.-Z., Yan M.M.-H. (2001) A thermal infrared radiation parameterization for atmospheric studies. 19, NASA/TM-2001-104606.
- Ishiwatari M., Takehiro S., Nakajima K., Hayashi Y.-Y. (2002) A numerical study on appearance of the runaway greenhouse state of a three-dimensional gray atmosphere. *J. Atmos. Sci.*, **59**, 3223-3238. [https://doi.org/10.1175/h1520-0469\(2002\)059<3223:ANSOAO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/h1520-0469(2002)059<3223:ANSOAO>2.0.CO;2)
- Ishiwatari M., Nakajima K., Takehiro S., Hayashi Y.-Y. (2007) Dependence of climate states of gray atmosphere on solar constant: from the runaway greenhouse to the snowball states. *J. Geophys. Res.*, **112**, D13120. <https://doi.org/10.1029/2006JD007386>
- Kashimura H., Enomoto T., Takahashi Y.O. (2013) Non-negative filter using arcsine transformation for tracer

- advection with semi-Lagrangian scheme. *SOLA*, **9**, 125-128. <https://doi.org/10.2151/sola.2013-028>
- Kaspi, Y., Showman, P. (2015) Atmospheric dynamics of terrestrial exoplanets over a wide range of orbital and atmospheric parameters. *Ap. J.*, 804:60.
- Louis, J.-F., M. Tiedtke, and J.-F. Geleyn, 1982: A short history of the PBL parameterization at ECMWF, Workshop on Planetary Boundary Layer Parameterization, 59-80, ECMWF, Reading, U.K..
- Manabe, S. (1969) Climate and the ocean circulation I. The atmospheric circulation and the hydrology of the Earth's surface. *Mon. Weather Rev.*, **97**, 739-774. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1969\)097<0739:CATOC>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1969)097<0739:CATOC>2.3.CO;2)
- Mellor G.L., Yamada T. (1974) A Hierarchy of turbulence closure models for planetary boundary layers. *J. Atmos. Sci.*, **31**, 1791-1806. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1974\)031<1791:AHOTCM>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1974)031<1791:AHOTCM>2.0.CO;2)
- Moorthi S., Suarez M. J. (1992) Relaxed Arakawa-Schubert: A parameterization of moist convection for general circulation models. *Mon. Wea. Rev.*, **120**, 978-1002. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1992\)120<0978:RASAPO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1992)120<0978:RASAPO>2.0.CO;2)
- Noda, S., Ishiwatari, M., Nakajima, K., Takahashi, Y. O., Takehiro, S., Onishi, M., Hashimoto, G. L., Kuramoto, K., Hayashi Y.-Y. (2017) The circulation pattern and day-night heat transport in the atmosphere of a synchronously rotating aquaplanet: Dependence on planetary rotation rate. *Icarus*, **282**, 1-18. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2016.09.004>
- Way, M.J., Aleinov, I., Amundsen, D.S., Chandler, M.A., Clune, T.L., Del Genio, A.D., Fujii, Y., Kelley, M., Kiang, N.Y., Sohl, L., and Tsigaridis, K. (2017) Resolving Orbital and Climate Keys of Earth and Extraterrestrial Environments with Dynamics (ROCKE-3D) 1.0: A General Circulation Model for Simulating the Climates of Rocky Planets. *Ap. J.*, **231**, 12. <https://dx.doi.org/10.3847/1538-4355/aa7a06>
- Wit J. de, Wakeford H. R., Lewis N. K. Delrez L. Gillon M., Selsis F., Leconte J., Demory B.-O., Bolmont E., Bourrier V., Burgasser A. J., Grimm S., Jehin E., Lederer S. M., Owen J. E., Stamenković V., Triaud A. H. M. J. (2018) Atmospheric reconnaissance of the habitable-zone Earth-sized planets orbiting TRAPPIST-1. *Nature Astronomy*, **2**, 214–219. <https://doi.org/10.1038/s41550-017-0374-z>

4.まとめ

陸惑星設定を用いた GCM 実験を実施し多重平衡解の探索を開始した。現在までに多重平衡解の存在を示唆する結果は得られていない。今後も検討を継続する。また、これまでに用いてきたモデルでは雨水の蒸発が起こらないという不具合が存在しているので、この不具合を解消した場合に結果がどの程度変わるかを確認する予定である。

5. 研究成果発表

5.1 誌上発表（査読あり）

なし。

5.2 誌上発表（査読なし）

なし。

5.3 口頭発表

石渡正樹、中島健介、林祥介 (2024) 陸惑星における完全蒸発状態の発生に関する GCM 実験. 日本気象学会 2024 年秋季大会

5.4 その他（書籍等）

なし

6. 連絡先

石渡正樹

〒 060-0810 北海道札幌市北区北 10 条西 8 丁目

国立大学法人北海道大学大学院理学研究院

Tel: 011-706-3564 Fax: 011-706-2760

E-mail: momoko@gfd-dennou.org

国立環境研究所 スーパーコンピュータシステム概要

国立環境研究所環境情報部
日本電気株式会社

1. システム構成

1.1 全体構成

国立研究開発法人国立環境研究所（以下、NIESという）は、2020（令和2）年3月より現行のスーパーコンピュータシステムの運用を実施している。本システムは1991年に導入されたNEC製SX-3から数えて6代目であり、2025（令和7）年11月までの運用を予定している。現行のシステムは、ベクトル処理用計算機（NEC製SX-Aurora TSUBASA A511-64）、スカラ処理用計算機（HPE製 Apollo 2000）、大容量ファイルシステム（DDN製 SFA200NV, ES18KE, SS9012等）を中心に構成され、高速ネットワーク接続にはInfiniBandを採用している。機器構成の概念図を図1に示す。

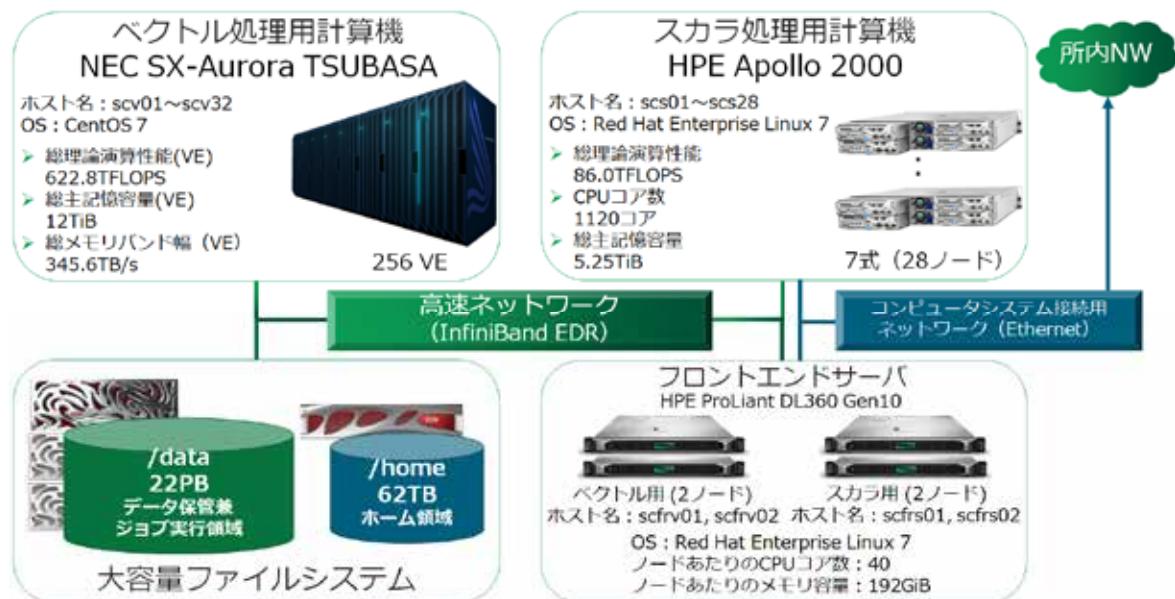


図 1. システム概要図（2020年3月～）

※2022年より、主記憶装置容量の単位表記をSI接頭辞表記から2進接頭辞表記に変更している。

1.2 ベクトル処理用計算機

ベクトル処理用計算機はベクトル処理を行うベクトルエンジン（以下、VEという）と、VEの制御やOS機能を担うベクトルホスト（以下、VHという）で構成され、地球環境シミュレーションなどの大規模計算に必要なベクトル演算能力と大容量メモリを有している。本システムでは、1つのVHは8つのVEをもち、1つのVEは8つのコアをもつ（図2）。ベクトル処理用計算機は総数で256のVEをもち、演算ピーク性能は622.8TFLOPS、総メモリバンド幅は345.6TB/s、総メモリサイズは12.0TiBである。システムの性能の詳細と、前システムとの比較を表1に示す。

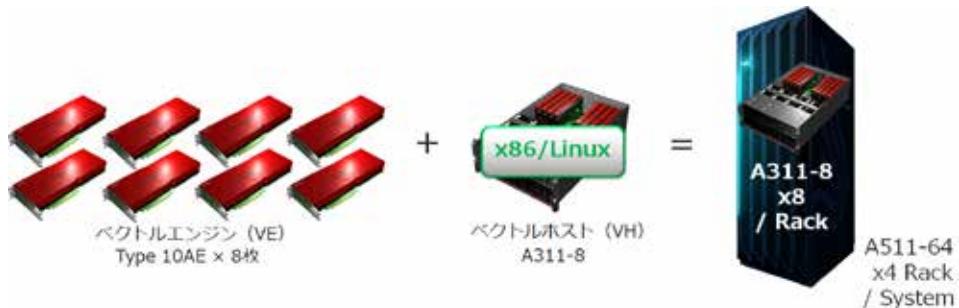


図 2. ベクトル処理用計算機 (SX-Aurora TSUBASA A511-64) の主要な構成

表1. ベクトル処理用計算機の性能と前システムの比較

		旧システム (SX-ACE/384ノード)	本システム (SX-Aurora TSUBASA/256VE)
プロセッサ (CPU/VE)	コア数	4	8
	FLOPS	64GFLOPS (コア) 256GFLOPS (CPU)	304GFLOPS (コア) 2,432GFLOPS (VE)
	ADB/LLCサイズ	1MB (コア) 4MB (CPU)	— 16MB (VE)
ノード	CPU/VE数	1	1
	FLOPS	256GFLOPS	2,432GFLOPS
	メモリバンド幅	256GB/s	1.35TB/s
	メモリサイズ	64GiB	48GiB
	ノード間転送性能 (ノード/VH)	8GB/s x2 (双方向)	12.5GB/s x2 (双方向)
システム	ノード数	384	256
	CPU/VE数	384	256
	総コア数	1536	2048
	FLOPS	98.3TFLOPS	622.8TFLOPS
	メモリサイズ	24TiB	12TiB
	メモリバンド幅	96TB/s	345.6TB/s
OS		SUPER-UX	CentOS Linux 7
ジョブ管理ソフト		NEC NQSII	NEC NQSV

1.3 スカラ処理用計算機

スカラ処理用計算機はIntel製CPUを備えた28台の計算ノードで構成され、演算ピーク性能は86TFLOPS、総メモリサイズは5.38TBである。システムの性能の詳細を表2に示す。

表2. スカラ処理用計算機の性能

HPE Apollo 2000		
CPU	製品名	Intel Xeon Gold 6148
	コア数	20
	周波数	2.40 GHz
ノード	CPU数	2
	コア数	40
	FLOPS	3072GFlops
	メモリサイズ	192GiB
	ノード間転送性能	12.5GB/s (双方向)
システム	ノード数	28
	CPU数	56
	総コア数	1120
	総FLOPS	86.0TFlops
	総メモリサイズ	5.25TiB

1.4 大容量ファイルシステム

大容量ファイルシステムはDDN製 SFA200NV, ES18KE, SS9012等のハードウェア、およびDDN製 ExaScaler等のソフトウェアで構成される。総容量としてはおよそ22PBであり、表3に記載される2つの領域をもつ。/home領域はファイルシステム全体の容量は小さいが、過去28世代分のバックアップを採取している。/data領域はファイルシステム全体の容量が大きく、スループット性能にも優れる。

また、本システムより、ユーザ単位または研究課題単位で利用可能な容量およびファイル数にQuota制限が導入された。Quota制限値の詳細を表4に示す。

表3. 大容量ファイルシステムの性能

ファイルシステム名	ファイルシステム	マウントポイント	容量
/home領域	Spectrum Scale (GPFS)	/home	62TB
/data領域	Lustre	/data	22PB

表4. 大容量ファイルシステムのQuota制限設定

ファイル システム名	ディレクトリ構成		Quota制限		
	区分	ディレクトリパス	制限対象	容量制限	ファイル 数制限
/home領域	すべてのユーザに 共通	/home/プライマリ グループ/ユーザ	ユーザ単 位	あり	あり
/data領域	ベクトル処理用計 算機ユーザまたは ベクトル処理用計 算機及びスカラ処 理用計算機ユーザ	/data/研究課題グ ループ/ユーザ	研究課題 グループ ディレク トリ単位	あり	あり
	スカラ処理用計算 機ユーザ	/data/scalar/ユーザ	ユーザ単 位 (グル ープ化も可 能)	あり	あり

2. システム運用形態

2.1 ジョブキューの構成（ベクトル処理用計算機）

現行システムでは、前システムで利用していたジョブスケジューリングソフトウェア NQSII の最新バージョンとして、NQSV が導入されている。ジョブスケジューリングソフトウェアはユーザからのバッチジョブのリクエストを受け取り、リクエストのスケジューリングやリソース割り当てを担当する。令和4年度のベクトル処理用計算機のジョブキュー構成を表5に示す。

表5. ベクトル処理用計算機のキュー構成

キュー名	v_normal	v_debug
用途	通常用	デバッグ用
実行VH (割り当てVH)	scv02-scv32	scv01
リクエストあたりの 論理ホスト数	上限値	8
	下限値	1
	無指定	1
論理ホストあたりの VE数	上限値	8
	下限値	1
	無指定	1
リクエストあたりの 経過時間	上限値	24時間
	無指定	0.5時間

2.2 利用支援

現行システムでは、日本電気株式会社の支援の下、システムの運用管理とユーザからの問い合わせやチューニング提案等の利用支援を行っている。また、利用者講習会の開催および利用者ポータルサイトを通じた各種マニュアルの提供を行っている。

3. システム利用実績

3.1 稼働実績（ベクトル処理用計算機）

ベクトル処理用計算機の稼働率の月平均値を図3に示す。2024年4月から2025年3月にかけての平均稼働率は93.6%であった。この値は、8月に実施した節電対策のための縮退運転、計画停電、定期メンテナンスのための停止時間を含む。これらを除いた平均稼働率は99.1%であり、2024年7月及び9月に計2度の落雷による停電はあったものの、それ以外はトラブルなくユーザに計算資源を提供できていたといえる。参考として、前年度（2023年4月から2024年3月）の平均稼働率、計画停電・メンテナンス・縮退運転を除いた平均稼働率はそれぞれ94.5%、99.8%であった。

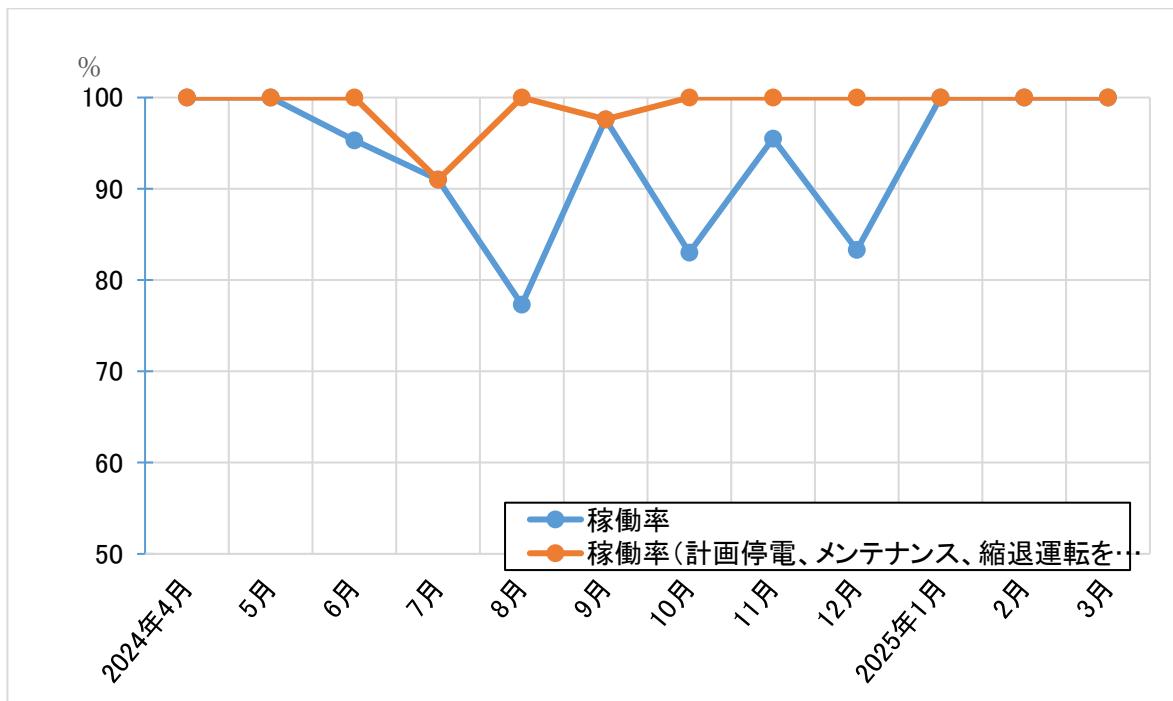


図3. 月ごとのベクトル処理用計算機の平均稼働率の推移（2024年4月1日～2025年3月31日）

3.2 利用実績（ベクトル処理用計算機）

本文書では、ベクトル処理用計算機の計算資源利用量をCPU時間という名称で記載している。CPU時間は、各ジョブがリクエストしたVEの数とジョブの実行にかかった経過時間の積であり、単位は[VE・hour]である。今年度は、v_normalキューとv_debugキューに加え、外部システムとの連携に用いるためのv_setoguiキューを新たに設置した。それぞれのキューについての、CPU時間の利用率の月平均値を図4に示す。このとき、利用率の上限は稼働中で利用可能なVHのリソースを100%としている。2024年4月から2025年3月の期間でのv_normalの平均利用率は80.2%（前年度は82.1%）であった。例年の利用率推移として、年度当初および年度末は利用率が低く推移し、9月、12月頃に利用率のピークが現れる傾向があったが、2024年度は12月を除き、1年を通して利用率が高いまま推移した。図4には、リクエストVE数の代わりに、ジョブ内で実際に稼働したVEコアの積算実行時間（コア時間）を元に計算した利用率も示している。VE時間ベースの利用率に対してコア時間ベースの利用率が若干低く、これは主にファイル入出力処理によってVEではなくVHでの処理が長引いたケース等が考えられる。

表6には、ベクトル処理計算機の利用状況を所内・所外それぞれについてまとめたものを示す。

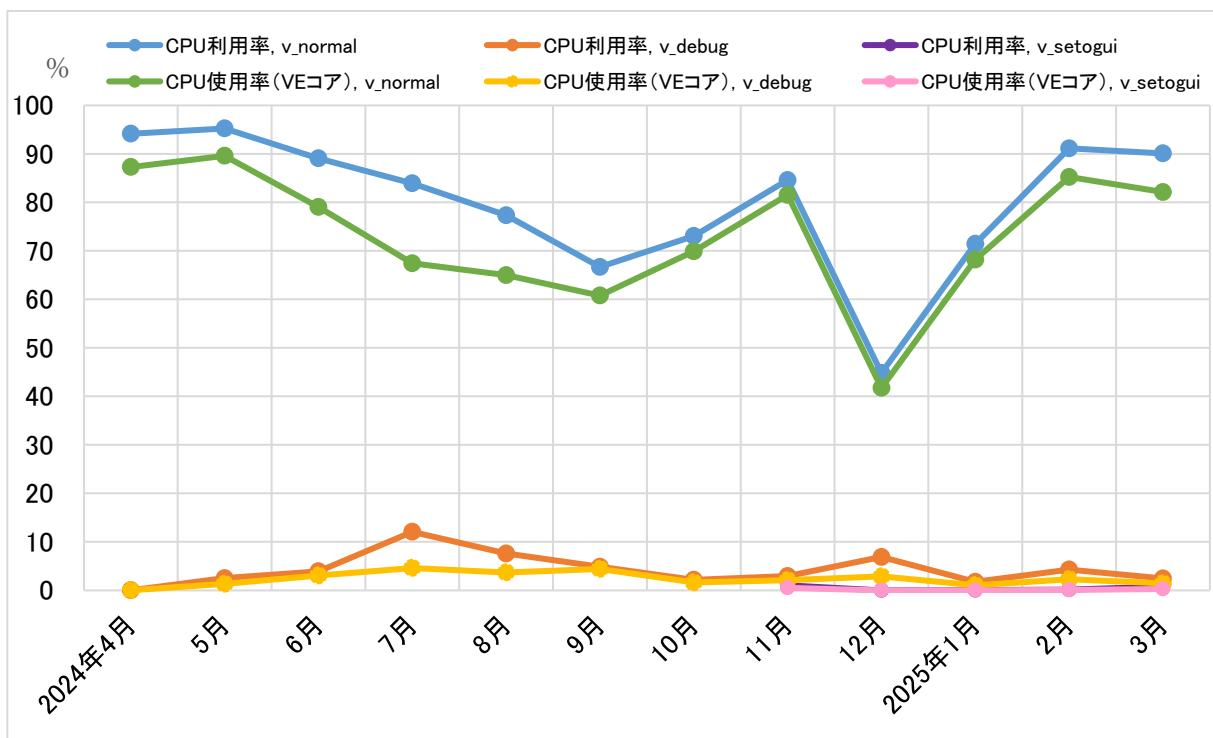


図4. 月ごとのベクトル処理用計算機の平均利用率の推移（2024年4月1日～2025年3月31日）

表6. ベクトル処理用計算機の利用状況（2024年4月1日～2025年3月31日）

所内/所外	課題数	CPU 時間 [VE・hour]				平均利用率 (v_normal)
		v_debug	v_normal	v_setogui	計	
所内課題	7	2,937	1,690,178	3,529	1,696,644	78.50%
所外課題	2	0	35,905	0	35,905	1.70%
合計	9	2,937	1,726,083	3,529	1,732,549	80.20%

図5に、期間内の各月におけるジョブのリクエスト数とジョブ投入から実行までの待ち時間の推移を示す。年度を通したジョブリクエスト総数は約42000であり、前年度、前々年度(約68000, 54000)からそれぞれ6割、3割減少した。CPU利用率は昨年と同等に稼働していることから、1ジョブあたりの利用VE数が増加したり、実行時間が増加し、計算がより大規模化したと推察される。実行までの待ち時間は年平均で3.5時間、月平均の最大で6.2時間と、前年度の値(それぞれ5.0時間、11.7時間)から減少した。昨年度同様、2~3月にジョブリクエスト数が少ないにも関わらず、平均待ち時間が長い傾向があり、この時期に多ノードを利用するジョブが一気に投入され、実行開始を待っていたと推察される。

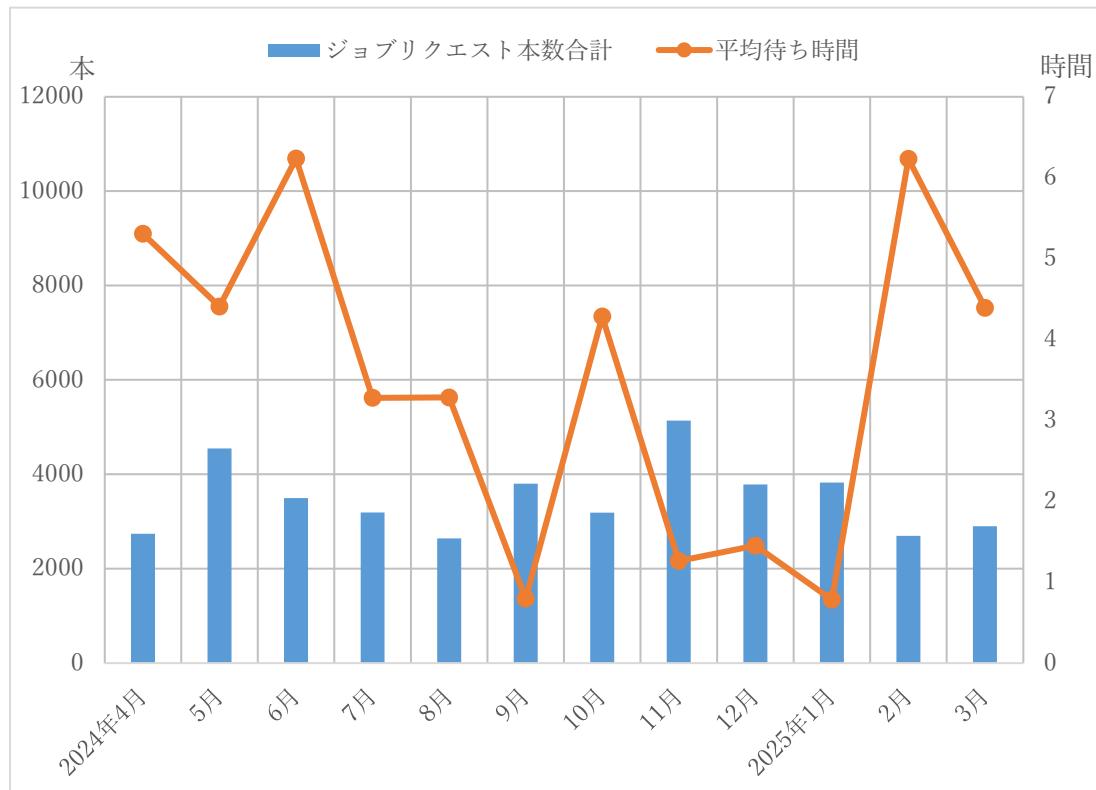


図5. ベクトル処理用計算機のジョブリクエスト数と平均待ち時間の推移
(2024年4月1日～2025年3月31日)

図6に、期間内の各月におけるジョブの平均実行時間を示す。期間全体での平均値は2.9時間であり、前年度平均の2.5時間から0.4時間増加した。特に2～3月に入ってからは、月平均値が4時間以上となっており、大規模で比較的長めのジョブが投入されている傾向がわかる。

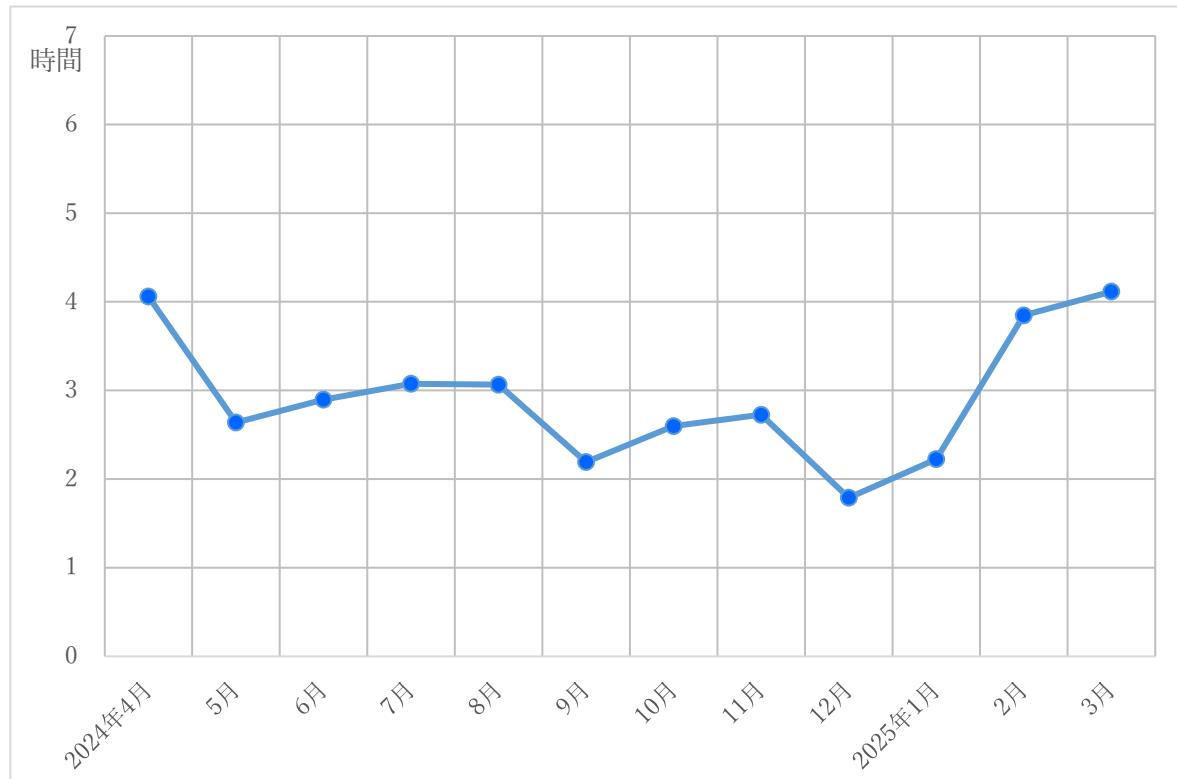


図6. 月ごとのベクトル処理用計算機の平均ジョブ実行時間の推移
(2024年4月1日～2025年3月31日)

3.3 利用実績（大容量ファイルシステム）

2024年4月から2025年3月にかけての大容量ファイルシステムの利用率は、51.1から62.6%に推移しており、期間全体の平均で57.9%であった（図7）。年間をかけて徐々にデータが増加している。Quota制限をかけたことにより、利用率の爆発的な増加は見られておらず、前システムの運用時期後半で見られたような、ファイルシステムの容量不足によって計算を進められない等の問題点は解消されているといえる。図8には、2020年4月からの5年間の大容量ファイルシステムの利用率の推移を示す。

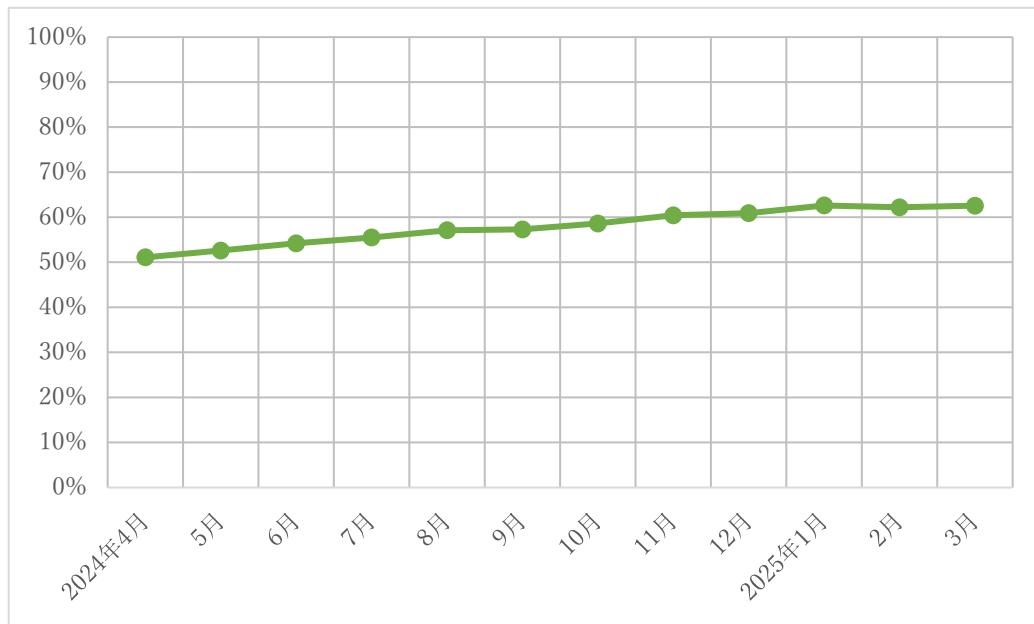


図7. 大容量ファイルシステム（/data領域）の使用率（2024年4月1日～2025年3月31日）

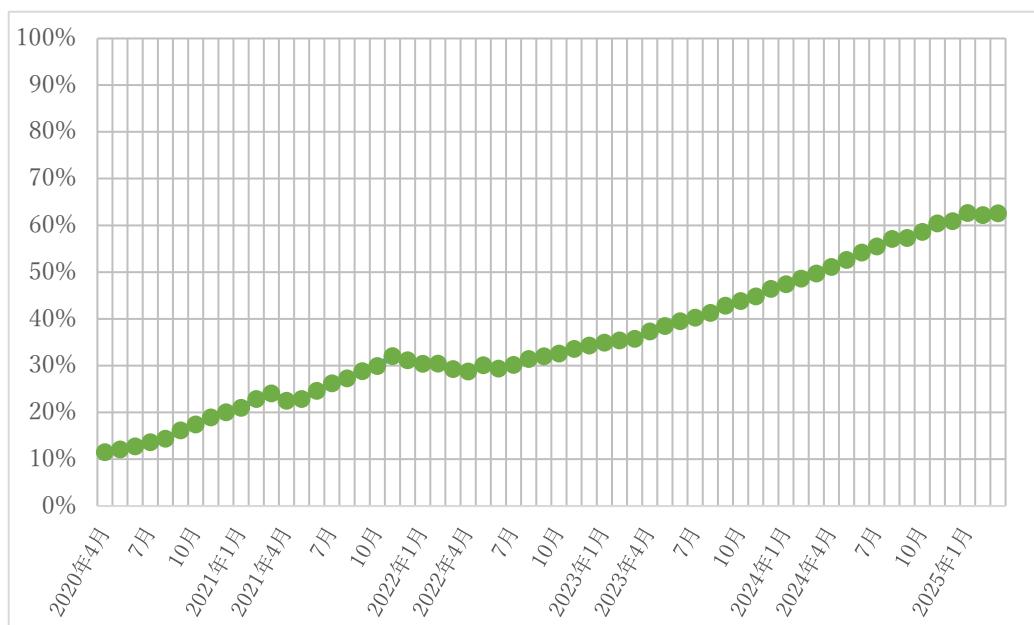


図8. 大容量ファイルシステム（/data領域）の使用率（2020年4月1日～2025年3月31日）

CGER'S SUPERCOMPUTER ACTIVITY REPORT (Out of stock)

Vol. 1-1992 (CGER-I010-1994)	Vol. 8-1999 (CGER-I043-2000)
Vol. 2-1993 (CGER-I016-1994)	Vol. 9-2000 (CGER-I050-2002)
Vol. 3-1994 (CGER-I020-1995)	Vol.10-2001 (CGER-I054-2002)
Vol. 4-1995 (CGER-I024-1996)	Vol.11-2002 (CGER-I058-2004)
Vol. 5-1996 (CGER-I030-1997)	Vol.12-2003 (CGER-I061-2005)
Vol. 6-1997 (CGER-I034-1999)	Vol.13-2004 (CGER-I064-2006)
Vol. 7-1998 (CGER-I039-2000)	Vol.14-2005 (CGER-I070-2007)

.....

国立環境研究所スーパーコンピュータ利用研究年報 NIES Supercomputer Annual Report

平成 18 年度 2006 (CGER-I078-2008) Out of stock
平成 19 年度 2007 (CGER-I086-2008) Out of stock
平成 20 年度 2008 (CGER-I090-2009) Out of stock
平成 21 年度 2009 (CGER-I095-2010) Out of stock
平成 22 年度 2010 (CGER-I099-2011) Out of stock
平成 23 年度 2011 (CGER-I106-2012) Out of stock
平成 24 年度 2012 (CGER-I113-2013) Out of stock
平成 25 年度 2013 (CGER-I119-2014) Out of stock
平成 26 年度 2014 (CGER-I125-2015)
平成 27 年度 2015 (CGER-I130-2016)
平成 28 年度 2016 (CGER-I136-2017)
平成 29 年度 2017 (CGER-I141-2018)
平成 30 年度 2018 (CGER-I146-2019)
令和元年度 2019 (CGER-I151-2020)
令和 2 年度 2020 (CGER-I156-2021)
令和 3 年度 2021 (CGER-I161-2022)
令和 4 年度 2022 (CGER-I168-2024)
令和 5 年度 2023 (CGER-I173-2024)
令和 6 年度 2024 (CGER-I176-2025)

.....

CGER'S SUPERCOMPUTER MONOGRAPH REPORT

- Vol. 1 CGER-I021-'96 (Out of stock)
KOMORI S.: Turbulence Structure and CO₂ Transfer at the Air-Sea Interface and Turbulent Diffusion in Thermally-Stratified Flows
- Vol. 2 CGER-I022-'96 (Out of stock)
TOKIOKA T., NODA A., KITOH A., NIKAIDOU Y., NAKAGAWA S., MOTOI T., YUKIMOTO S., TAKATA K.: A Transient CO₂ Experiment with the MRI CGCM -Annual Mean Response-
- Vol. 3 CGER-I025-'97 (Out of stock)
NUMAGUTI A., SUGATA S., TAKAHASHI M., NAKAJIMA T., SUMI A.: Study on the Climate System and Mass Transport by a Climate Model
- Vol. 4 CGER-I028-'97 (Out of stock)
AKIYOSHI H.: Development of a Global 1-D Chemically Radiatively Coupled Model and an

Introduction to the Development of a Chemically Coupled General Circulation Model

- Vol. 5 CGER-I035-'99 (Out of stock)
WATANABE M., AMANO K., KOHATA K.: Three-Dimensional Circulation Model Driven by Wind, Density, and Tidal Force for Ecosystem Analysis of Coastal Seas
- Vol. 6 CGER-I040-2000 (Out of stock)
HAYASHI Y.Y., TOYODA E., HOSAKA M., TAKEHIRO S., NAKAJIMA K., ISHIWATARI M.: Tropical Precipitation Patterns in Response to a Local Warm SST Area Placed at the Equator of an Aqua Planet
- Vol. 7 CGER-I045-2001 (Out of stock)
NODA A., YUKIMOTO S., MAEDA S., UCHIYAMA T., SHIBATA K., YAMAKI S.: A New Meteorological Research Institute Coupled GCM (MRI-CGCM2) -Transient Response to Greenhouse Gas and Aerosol Scenarios-
- Vol. 8 CGER-I055-2003 (Out of stock)
NOZAWA T., EMORI S., NUMAGUTI A., TSUSHIMA Y., TAKEMURA T., NAKAJIMA T., ABE-OUCHI A., KIMOTO M.: Transient Climate Change Simulations in the 21st Century with the CCSR/NIES CGCM under a New Set of IPCC Scenarios
- Vol. 9 CGER-I057-2004 (Out of stock)
MIYAZAKI T., FUJISHIMA S., YAMAMOTO M., WEI Q., HANAZAKI H.: Vortices, Waves and Turbulence in a Rotating Stratified Fluid
- Vol. 10 CGER-I060-2005 (Out of stock)
HAYASHI S., MURAKAMI S., XU K., WATANABE M.: Modeling of Daily Runoff in the Changjiang (Yangtze) River Basin and Its Application to Evaluating the Flood Control Effect of the Three Gorges Project
- Vol. 11 CGER-I063-2006 (Out of stock)
NAKAYAMA T., WATANABE M.: Development of Process-based NICE Model and Simulation of Ecosystem Dynamics in the Catchment of East Asia (Part I)
- Vol. 12 CGER-I073-2007 (Out of stock)
NOZAWA T., NAGASHIMA T., OGURA T., YOKOHATA T., OKADA N., SHIOGAMA H.: Climate Change Simulations with a Coupled Ocean-Atmosphere GCM Called the Model for Interdisciplinary Research on Climate: MIROC
- Vol. 13 CGER-I080-2008 (Out of stock)
SHIBATA K., DEUSHI M.: Simulations of the Stratospheric Circulation and Ozone during the Recent Past (1980-2004) with the MRI Chemistry-Climate Model
- Vol. 14 CGER-I083-2008 (Out of stock)
NAKAYAMA T.: Development of Process-based NICE Model and Simulation of Ecosystem Dynamics in the Catchment of East Asia (Part II)
- Vol. 15 CGER-I092-2010 (Out of stock)
MAKSUTOV, S., NAKATSUKA Y., VALSALA V., SAITO M., KADYGROV N., AOKI T., EGUCHI N., HIRATA R., IKEDA M., INOUE G., NAKAZAWA T., ONISHI R., PATRA P.K., RICHARDSON A.D., SAEKI T., YOKOTA T.: Algorithms for Carbon Flux Estimation Using GOSAT Observational Data
- Vol. 16 CGER-I097-2011 (Out of stock)
NAKAJIMA K.: Idealized Numerical Experiments on the Space-time Structure of Cumulus Convection Using a Large-domain Two-dimensional Cumulus-Resolving Model
- Vol. 17 CGER-I098-2011 (Out of stock)
UEDA H.: Atmospheric Motion and Air Quality in East Asia
- Vol. 18 CGER-I103-2012 (Out of stock)
NAKAYAMA T.: Development of Process-based NICE Model and Simulation of Ecosystem Dynamics in the Catchment of East Asia (Part III)
- Vol. 19 CGER-I108-2013 (Out of stock)

KOMORI S.: Numerical Simulations of Turbulence Structure and Scalar Transfer across the Air-Water Interfaces

- Vol. 20 CGER-I114-2014 (Out of stock)
NAKAYAMA T.: Development of Process-based NICE Model and Simulation of Ecosystem Dynamics in the Catchment of East Asia (Part IV)
- Vol. 21 CGER-I120-2015
SHIOGAMA H.: Influence of Anthropogenic Aerosol Emissions on Pattern Scaling Projections
- Vol. 22 CGER-I127-2016
SATOH M., ROH, W., HASHINO, T.: Evaluations of Clouds and Precipitations in NICAM Using the Joint Simulator for Satellite Sensors
- Vol. 23 CGER-I132-2017
GOTO D., SCHUTGENS, N.A.J., OIKAWA, E., TAKEMURA, T., NAKAJIMA, T.: Improvement of a global aerosol transport model through validation and implementation of a data assimilation system
- Vol. 24 CGER-I138-2018
TAKEMURA T., AND SPRINTARS DEVELOPER TEAM : Development of a global aerosol climate model SPRINTARS
- Vol. 25 CGER-I143-2019
MAKSYUTOV, S., ODA, T., SAITO, M., TAKAGI, H., BELIKOV, D., VALSALA, V.: Transport modeling algorithms for application of the GOSAT observations to the global carbon cycle modeling
- Vol. 26 CGER-I148-2019
NAKAYAMA T.: Development of Process-based NICE Model and Simulation of Ecosystem Dynamics in the Catchment of East Asia (Part V)
- Vol. 27 CGER-I153-2021
ISHIWATARI M., NAKAJIMA K., TAKEHIRO, S., KAWAI Y., TAKAHASHI Y. O., HASHIMOTO G. L., SASAKI Y., and HAYASHI Y.-Y.: Numerical studies on the variety of climates of exoplanets using idealistic configurations
- Vol. 28 CGER-I158-2022
YOKOHATA T.: Development of an integrated land surface model with ecosystems, human water management, crop growth, and land-use change: MIROC-INTEG-LAND
- Vol. 29 CGER-I167-2023
NAKAYAMA T.: Development of Process-based NICE Model and Simulation of Ecosystem Dynamics in the Catchment of East Asia (Part VI)
- Vol. 30 CGER-I169-2024
NAKAYAMA T.: Development of a process-based NICE model and simulation of ecosystem dynamics in the catchment of East Asia (Part VII)

レポートの多くは、地球環境研究センターのウェブサイトから PDF 形式で閲覧可能です。
<http://www.cger.nies.go.jp/ja/activities/supporting/publications/report/index.html>

Many of the reports are also available as PDF files.
See: <http://www.cger.nies.go.jp/ja/activities/supporting/publications/report/index.html>

令和 6 年度スーパーコンピュータ研究利用専門委員会

佐藤正樹	東京大学大気海洋研究所
西澤誠也	国立研究開発法人理化学研究所計算科学研究センター
出牛 真	国土交通省気象庁気象研究所
東 利博	国立研究開発法人国立環境研究所企画部・環境情報部
高見昭憲	国立研究開発法人国立環境研究所地域環境保全領域
小倉知夫	国立研究開発法人国立環境研究所地球システム領域
八代 尚	国立研究開発法人国立環境研究所地球システム領域
秋吉英治	国立研究開発法人国立環境研究所地球システム領域

スーパーコンピュータ事務局

研究利用：国立研究開発法人国立環境研究所地球システム領域地球環境研究センター
運用管理：国立研究開発法人国立環境研究所環境情報部

スーパーコンピュータ保守

日本電気株式会社

国立環境研究所スーパーコンピュータ利用研究年報

令和 6 年度

NIES Supercomputer Annual Report 2025

国立環境研究所地球環境研究センター 編

[CGER-REPORT: ISSN 2434-5679
CGER-I176-2025]

2025 年 12 月 発行

発行元
国立研究開発法人国立環境研究所地球環境研究センター

〒305-8506 茨城県つくば市小野川 16-2
電話 : 029-850-2384
Fax : 029-858-2645
E-mail : www-cger@nies.go.jp
<http://www.cger.nies.go.jp/>

本書を国立環境研究所地球環境研究センターに無断で転載・複製することを禁じます。

