

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5年度

NIES Supercomputer Annual Report 2023

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5年度

NIES Supercomputer Annual Report 2023

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、わが国の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5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6(2024)年11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
三枝信子

三枝信子

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. 気候モデルの性能向上と気候変動予測情報の創出	7
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物質循環と気候影響に関する研究	12
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	20
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	30
課題代表者：国立環境研究所地域環境保全領域 東 博紀	
6. 温室効果ガスのマルチスケールモデリング.....	38
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	45
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)	52
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：陸惑星気候の太陽定数依存性	64
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	69
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



NEC SX Aurora Tsubasa A511-64 (運用期間：2020年3月～2026年2月〈予定〉)

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5年度

課題代表者：国立環境研究所 地球システム領域 横島徳太

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

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-人間システムに関わ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（2023年4月1日～2024年3月31日）

CPU 時間	v_debug	：	6,002.9 [VE・hours]
	v_normal	：	773,428.8 [VE・hours]
	計	：	779,431.7 [VE・hours]

2.2 利用概要

研究参加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。2023 年度は、ISIMIP においてデータをもっとも多く提供した研究グループに送られる Maillot Jaune Award を、MIROC-INTEG-LAND のグループとして受賞した。

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。

3.3 数値シミュレーション

地球システムモデル (Hajima et al. 2020) に水資源・作物成長・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 を活用したシミュレーションを行った。ここでは、水資源・作物成長・土地利用モデルを動作させない、オリジナルの MIROC-ES2L と同等のモデルを利用する。この研究では、長期的な気候変動が起こった際に地球システムにおいて生じる帰結について調べるため、2500 年までの長期的な将来予測実験を行なった。2100 年を超える長期的な気候シナリオとして Meinhausen et al. 2020 による Extended RCP が挙げられる。Meinhausen et al. 2020

によるシナリオでは、人為起源温室効果ガス排出量が2050年から減少を始め、2250年にゼロとなる。この排出量に対応した濃度シナリオ（二酸化炭素のみを示す）であり、濃度は2250年頃まで上昇し、その後、人為起源排出量がゼロとなるため、濃度が減少する（図1）。

3.4 結果

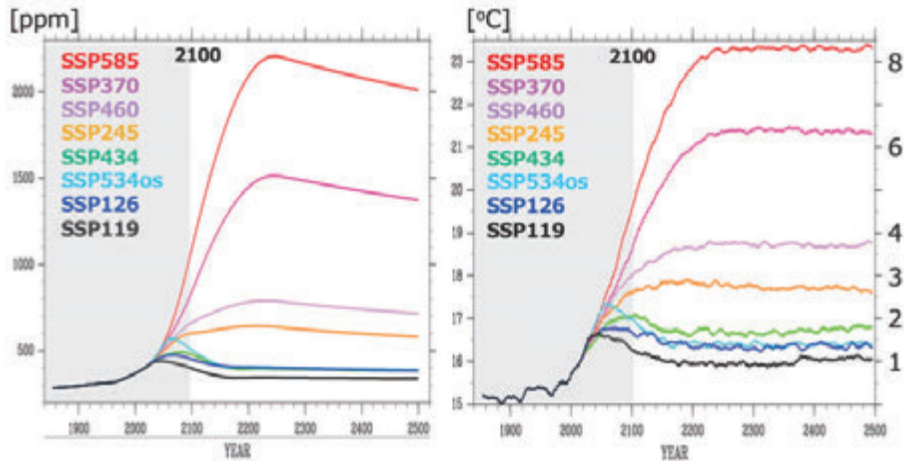


図 1. MIROC-ES2L による 2500 年までの数値実験の結果。延長共通社会経済経路（Extended Shared Socio-economic Pathways, SSP）である SSP119/126/534os/434/245/460/370/585 の 8 シナリオにおける 左) 二酸化炭素濃度、右) 全球平均地表気温を示す。Extended SSP の GHG 濃度を地球システムモデルに与える濃度駆動実験の結果である。

8つのシナリオのうち、4つのシナリオ（SSP119/226/534os/434）では、2100年前に脱炭素社会が実現され、気温上昇が低く抑えられるシナリオになっている。この一方で残りのシナリオ（SSP245/460/370/585）では、2250年までCO₂濃度が増加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SSP370/585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、様々なレベルの昇温が生じていることがわかる。2250年までCO₂濃度が増加するシナリオでは（SSP245/460/370/585）、2250年に GHG 排出量がほぼゼロになり、二酸化炭素濃度が低下し、正の放射強制力が低下する。放射強制力の低下による冷却効果が、海洋がゆっくりと温まる効果によって相殺されるために、2500年以降、地表気温が安定化する。今年度は Extended SSP シナリオ実験の結果を利用して、MIROC-ES2L における様々な地球システム応答を分析し、全球平均気温の上昇に対して、1) ENSO振幅・下層雲・気候フィードバックなどが非線形的な応答をしていること、2) 気温上昇がある閾値を超えると北半球海氷やアマゾンの正味生態系生産量が急激に低下すること、3) 気温上昇に応じて北大西洋子午面循環（Atlantic Meridional Overturning Circulation, AMOC）が低下して回復（もしくは安定化）あるいはほぼ停止すること、などを明らかにし、詳しい分析を行っている。

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、土地利用モデルの改良を行った。今年度は、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うとともに、土地利用モデル TeLMO の調整を行った。今後、MIROC-INTEG-ES の活用などを通じて、地球-人間システムの相互作用について調べ、社会が気候変動に対応する上で意義のある研究成果を得ることが目標である。

5. 研究成果発表

5.1 誌上発表（査読あり）

- McDermid, S., Nocco, M., Lawston-Parker, P., Keune, J., Pokhrel, Y., Jain, M., Jägermeyr, J., Brocca, L., Massari, C., Jones, A. D., Vahmani, P., Thiery, W., Yao, Y., Bell, A., Chen, L., Dorigo, W., Hanasaki, N., Jasechko, S., Lo, M.-H., Mahmood, R., Mishra, V., Mueller, N. D., Niyogi, D., Rabin, S. S., Sloat, L., Wada, Y., Zappa, L., Chen, F., Cook, B. I., Kim, H., Lombardozzi, D., Polcher, J., Ryu, D., Santanello, J., Satoh, Y., Seneviratne, S., Singh, D., Yokohata, T. *Nature Reviews Earth & Environment*, 4(7): 435-453, 2023. <https://doi.org/10.1038/s43017-023-00438-5>
- Gnann, S. J., Reinecke, R., Stein, L., Wada, Y., Thiery, W., Schmied, H. M., Satoh, Y., Pokhrel, Y., Ostberg, S., Koutroulis, A., Hanasaki, N., Grillakis, M., Gosling, S. N., Burek, P., Bierkens, M. F. P., Wagener, T. Functional relationships reveal differences in the water cycle representation of global water models. *Nature Water*, 1, 1079–1090, 2023. <https://doi.org/10.1038/s44221-023-00160-y>

5.2 誌上発表（査読なし）

該当なし。

5.3 口頭発表

- Tachiiri, K., Matsumoto, K., Su X., Yokohata, T., Hajima, T. Impact of feedback from climate to socio-economic system through changes in labor productivity, agricultural yields, and heating/cooling demands. AGU Fall meeting 2023（ポスター発表）
- Satoh, Y., Pokhrel, Y., Kim H., Yokohata, T. An impact estimation of irrigation and groundwater pumping on the regional hydro-climate using the Earth-system model, MIROC-INTEG-ES. AGU Fall meeting 2023（ポスター発表）
- Su, X., Takahashi, K., Yokohata, T., Tanaka, K., Fujimori, S., Takakura, J., Shiogama, H., Xiong, W. Developing an Integrated Assessment Model to determine the best cost-benefit paths to reduce GHG emissions for SSP1-5. IAMC 2024（ポスター発表）
- Yokohata, T. Melnikova, I., Xuanming, S., Takahashi, K., Tanaka, K., Hajima, T., Yamamoto, A., Tachiiri, K., Kusahara, K., Saito, F., Saito, K., Sueyoshi, T., Yoshimori, M., Kamae, Y., Okubo, H., Abe-Ouchi, A., Shiogama, H., Ogura, T., Hirota, N., Hayashi, M., Nishina, K., Ito, A., Takao, S., Kawamiya, M. Projection of long-term responses and tipping elements of Earth system using MIROC-ES2L. “Addressing Key Uncertainties in Modelling Physical and Ecological Tipping Dynamics in the Earth System (towards TIPMIP)” seminar, November 05-08, 2023 Templin, Germany（ポスター発表）
- 佐藤雄亮, Yadu Pokhrel, 金炯俊, 横島徳太. 統合地球システムモデル MIROC-INTEG-ES を用いた灌漑・地下水汲み上げが地域気候に与える影響の評価. 水文・水資源学会/日本水文科学会 2023 年研究発表会（ポスター発表）
- 横島徳太, 岩花剛, 斉藤和之, 末吉哲雄, 石崎紀子, 荒川隆, 竹島滉, 新田友子, 山崎大, 芳村圭. 日本における現在の山岳永久凍土分布の推定と将来予測. 雪氷研究大会, 2023 年, 郡山（口頭発表）
- 横島徳太, MELNIKOVA Irina, 高尾信太郎, 仁科一哉, 伊藤昭彦, 塩竈秀夫, 佐藤雄亮, 羽島知洋, 立入郁, 山本彬友, 齋藤冬樹, 斉藤和之, 末吉哲雄, 吉森正和, 岡頭, 阿部彩子, 松本健一, 木下継基, 釜江陽一. 地球システム統合モデル開発と長期的将来気候変動シナリオ分析. 日本気象学会 2023 年度春季大会（口頭発表）
- 横島徳太, 岩花剛, 斉藤和之, 末吉哲雄, 石崎 紀子, 日本における現在の永久凍土分布の推定と将来予測, Japan Geoscience Union Meeting 2023（口頭発表）
- Yokohata, T., Satoh, Y., Melnikova, I., Hajima, T., Tachiiri, K., Matsumoto, K., Kinoshita, T., Yamamoto, A., Takao S., Yoshimori M., Oka A., Kamae Y., Nishina K., Ito A., Abe-Ouchi A., Saito F., Saito K., Sueyoshi T., Shiogama H. Development of an integrated earth system model, MIROC-INTEG-ES and a scenario analysis of future long-term changes in earth system, Japan Geoscience Union Meeting 2023（ポスター発表）
- Tachiiri, K., Matsumoto, K., Su X., Yokohata, T., Hajima, T. Sophistication of a coupled Earth-human system model and feedback analysis using it. Japan Geoscience Union Meeting 2023（ポスター発表）

- Kawamiya, M., Hajima, T., Tsutsui, J., Tatebe, H., Tachiiri, K., Yokohata, T., Advanced studies of climate change projection – Area Theme 2: Biogeochemical modeling and climate simulations for carbon budget assessment, Japan Geoscience Union Meeting 2023 (ポスター発表)
- Satoh, Y., Pokhrel, Y., Kim H., Yokohata, T. Assessing the impact of irrigation and groundwater pumping on the regional hydro-climate using the Earth system model MIROC-INTEG-ES. Japan Geoscience Union Meeting 2023 (ポスター発表)
- Su, X., Tachiiri, K., Tanaka, K., Watanabe, M., & Kawamiya, M. (2022). Identifying crucial emission sources under low forcing scenarios by a comprehensive attribution analysis. JpGU Meeting 2023 (ポスター発表)
- Yamamoto, A., Hajima, T., Abe, M., Yokohata, T., Abe-Ouchi, A. Response of deep ocean circulation and dissolved oxygen to climate change on millennial time-scales, Japan Geoscience Union Meeting 2023 (ポスター発表)

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： 気候モデルの性能向上と気候変動予測情報の創出

実施年度：
令和5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・佐々木秀孝
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・大山剛弘・田中良明・二階堂竜司
気象庁気象研究所 川瀬宏明
株式会社パスコ 姫木祐太郎・村瀬将隆
エム・アール・アイリサーチアソシエーツ株式会社 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

1. 研究目的

本研究課題では、気候モデルthe Model for Interdisciplinary Research on Climate version 7 (MIROC7) の開発を進める。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。研究成果は、国際学術誌で発表すると共に、一般にも分かり易い形で発信する。また、MIROC7による気候変動予測実験データは、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。

キーワード: 気候モデル開発、気候変動予測、ダウンスケーリング、IPCC

2. スーパーコンピュータ利用実績

1.1.2.1 計算機利用時間 (2023年4月1日～2024年3月31日)

CPU 時間	v_debug	:	343.4 [VE・hours]
	v_normal	:	800,351.0 [VE・hours]
	計	:	800,694.4 [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が開発している気候モデル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の開発を進めた。従来のMIROC6では、例えば、雲表現にバイアスがあり、気候システムに入射するエネルギーと気候システムから射出されるエネルギーに、それぞれ $10\text{W}/\text{m}^2$ 程度のバイアスがあった。MIROC7では、雲・降水・放射プロセスなどを改良・調整することにより、それらのバイアスを大幅に改善することに成功した。MIROC7による1850年からの過去再現実験も行い、これまでの気候変動を適切に表現できることを確認した。今後は、海洋循環の問題などを解決して、IPCC AR7で利用するMIROC7の開発を更に進める予定である。

また、モデルの大気プロセスが気候変動予測に与える影響の調査(Ogura et al. 2023)や、気候変動を理解するための大規模アンサンブル実験(Shiogama et al. 2023)、ダウンスケール実験も行った。ダウンスケール実験では、特に日本付近の台風への温暖化の影響を定量的に明らかにし、その情報を分かり易くパンフレットにまとめて発信した(環境省2023)。

3.2 背景と目的

IPCC AR7は2029年に発表される予定である。日本では、1990年代から、東京大学・国立環境研究所・海洋研究開発機構を中心に、全球気候モデルMIROCを開発し、気候変動予測実験を行って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を開発中である。

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入射エネルギーが、観測に比べて $10\text{W}/\text{m}^2$ 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も $10\text{W}/\text{m}^2$ 程度過少である。MIROC7の開発では、エネルギー収支のバイアスを改善することを目指している。これまでの課題などで、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。

ここでは、2023年度に取り組んだ開発中のMIROC7(MIROC7 α と呼ぶ)による過去再現実験(historical実験)における、現在気候の表現性能と、残っている課題などについて報告する。

3.3 計算方法

これまでのMIROC7開発では、MIROC6から、より精緻な雲・降水プロセスの導入、放射スキームの更新、海洋混合過程や海氷の扱いなどの改良を行ってきた。2023年度は、MIROC7 α によるhistorical実験を実施した。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、ERA-InterimやJRA55再解析データなどである。

3.4 結果

図1に観測とモデル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、MIROC6とMIROC7 α で良く再現されている。MIROC7 α は、MIROC6を比較すると、昇温の幅が大きくなっている。これは、温暖化の進行に伴って雲が変わることで温暖化を加速する効果(雲フィードバック)が、MIROC7 α で強くなっているからである。この雲の役割の変化は、特にMIROC6に見られた上層雲の過小バイアスの改善と関係している。MIROC7 α は、MIROC6に比べて気温変動に関わる雲プロセスがより適切に働いていると考えられる(Hirota et al. 2022)。

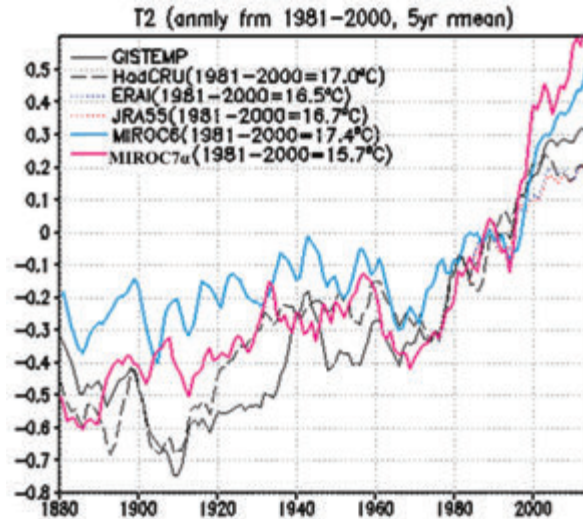


図1 過去の全球平均の地表気温変動(°C)。1980-2000年平均からの偏差を示す。GISTEMP観測(黒実線)、HadCRU観測(黒破線)、ERAJ再解析(青点線)、JRA55再解析(赤点線)、MIROC6(青線)、MIROC7a(赤線)。

次に、MIROC6とMIROC7aの1986-2014年の気候平均場の再現性能を調べる。図2に、MIROC6とMIROC7aのhistorical実験における、降水量、地表気温バイアス、長波(LW)放射バイアス、短波(SW)放射バイアスを示す。MIROC6とMIROC7の降水分布の観測とのパターン相関は、それぞれ0.91と0.88である。気温分布の二乗平方根誤差(RMSE)は、MIROC6が2.54°Cで、MIROC7が2.51°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。一方、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で大きなバイアスがある。バイアスの全球平均値は、SWとLWのいずれも10W/m²以上であり、RMSEはそれぞれ17.78W/m²と12.98W/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)。しかし、MIROC7aでは、SWとLWのバイアスの平均値は、それぞれ-1.76W/m²と2.89W/m²で、RMSEはそれぞれ8.73W/m²と6.36W/m²である。MIROC7aでは、MIROC6から、エネルギー収支の表現が大幅に改善されたことがわかる。

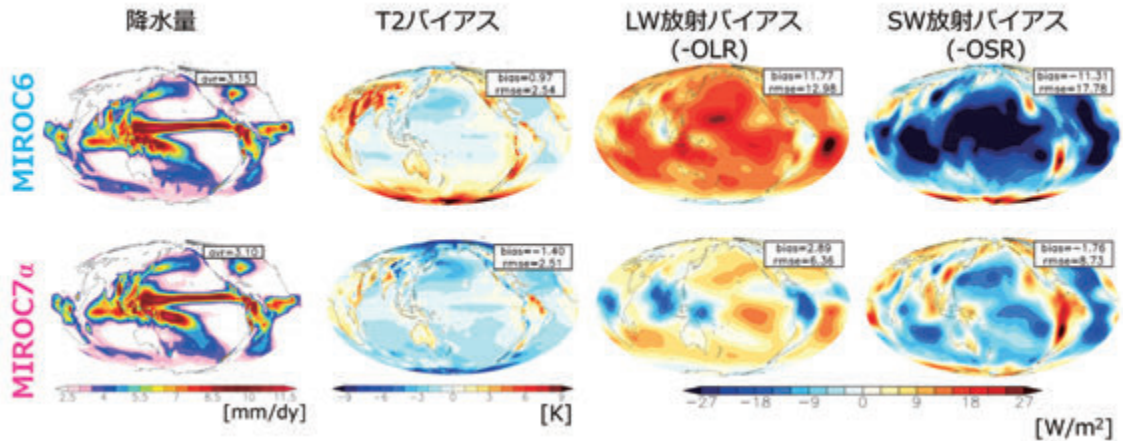


図2 MIROC6とMIROC7aのhistorical実験における、降水量、地表気温バイアス、長波(LW)放射バイアス、短波(SW)放射バイアス。

MIROC7aには課題も残っている。図3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20Sv程度の強さがあるが、MIROC7aでは10Sv程度である。現実のAMOCの強さは20Sv以上であり、MIROC7aにはAMOCが弱いバイアスがある。また、太平洋子午面循環(Pacific Meridional Overturning Circulation; PMOC)の流線関数の大きさは、MIROC6では8Sv程度なの

に対して、MIROC7 α では4Sv程度である。MIROC7 α では、MIROC6に比べて海洋循環が弱い。

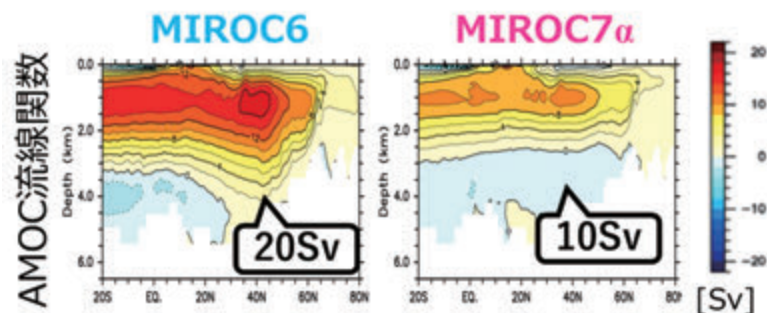


図3 MIROC6とMIROC7 α の大西洋子午面循環(AMOC)の流線関数(Sv)。

高解像度(水平2km格子など)の領域モデルを用いて、日本付近の台風が地球温暖化に伴ってどのように変化するかを調査した。その成果は、パンフレット”勢力を増す台風～我々はどうなリスクに直面しているのか～2023”(環境省2023)にて、一般にも広く公開した。機械学習による温暖化の影響の統計的ダウンスケール研究も、ベクトル機によるテスト計算など、順調に準備を進めている。

参考文献

- 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>.
- Ogura, T., Webb, M. J., & Lock, A. P. (2023). Positive low cloud feedback primarily caused by increasing longwave radiation from the sea surface in two versions of a climate model. *Geophysical Research Letters*, 50(20), <https://doi.org/10.1029/2023GL104786>.
- 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, <https://doi.org/10.5194/gmd-13-3627-2020>.
- 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, <https://doi.org/10.5194/gmd-12-2727-2019>.
- Wild, M. (2020). The global energy balance as represented in CMIP6 climate models. *Climate Dynamics*, 55(3-4), 553-577, <https://doi.org/10.1007/s00382-020-05282-7>.
- 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, <https://doi.org/10.1038/d41586-022-01192-2>.
- 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, <https://doi.org/10.1029/2021GL096523>.

4. まとめ (300字程度)

次期IPCC AR7に向けてMIROC7の開発を進めている。2023年度は、開発中のMIROC7 α による過去再現実験(historical実験)を行った。MIROC6に見られたエネルギー収支のバイアスは大きく改善され、過去の気候変動も適切に表現できることが確認できた。一方で、AMOCやPMOCの海洋循環が弱い問題があることがわかった。今後は、これらの問題を改善し、IPCC AR7に向けた気候変動予測実験の準備を進める。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を行った。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って、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)

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>.

Ogura, T., Webb, M. J., & Lock, A. P. (2023). Positive low cloud feedback primarily caused by increasing longwave radiation from the sea surface in two versions of a climate model. *Geophysical Research Letters*, 50(20), <https://doi.org/10.1029/2023GL104786>.

環境省 (2023) 勢力を増す台風~我々はどのようなリスクに直面しているのか~ . <https://www.env.go.jp/content/000147982.pdf>

5.2 誌上発表(査読なし)

なし

5.3 口頭発表

Ogura, T., M. J. Webb, A. P. Lock (2023) Positive low cloud feedback primarily caused by increasing LW radiation from the sea surface in a climate model. CFMIP-GASS conference on clouds, precipitation, circulation and climate sensitivity, 9 July 2023, Palis.

Hirota, N., T. Michibata, Y. Yamagami, H. Tatebe, K. Suzuki, M. Watanabe, T. Nitta, T. Kawasaki, F. Saito, K. Ogochi, M. Sekiguchi, S. Watanabe, H. Shiogama, T. Ogura, T. Ohno, T. Takemura, K. Yoshimura, H. Kawai, M. Chikira, H. Yashiro (2023) Development of MIROC7: Mean states, variability, and climate sensitivity. The 2nd Open Science Conference of the World Climate Research Programme (WCRP OSC), 23 October 2023, Kigali.

廣田 渚郎, 道端拓朗, 山上遥航, 建部洋晶, 鈴木健太郎 (2023) 気候モデルMIROC7に導入する新たな物理過程と性能評価. 気象学会2023年度春季大会, 2023年5月18日, オンライン.

5.4 その他(書籍等)

環境省 (2023) 勢力を増す台風~我々はどのようなリスクに直面しているのか~ . <https://www.env.go.jp/content/000147982.pdf>

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物質循環と気候影響に関する研究

実施年度：
令和5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

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 MIROC5、および MIROC6 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。このモデルによる数値シミュレーションの手法を用いて、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（2023年4月1日～2024年3月31日）

CPU 時間	v_debug	:	360.1 [VE・hours]
	v_normal	:	1,446,484.9 [VE・hours]
	計	:	1,446,845.0 [VE・hours]

2.2 利用概要

水平低解像度 T42 の MIROC3.2 化学気候モデル、MIROC5 化学気候モデル、および MIROC6 化学気候モデルを用いて海洋過程を結合した実験と海洋結合なしの実験を行った。海洋結合ありなし両方の MIROC 化学気候モデルを用いた Chemistry Climate Mode Initiative (CCMI) -Phase2 推奨実験（オゾン層と気候の過去再現実験および将来予測実験）の解析を行い、前課題で行った MIROC 化学気候モデルで T42 の低解像度を用いた同様の実験結果と比較した。また、海洋オフラインの MIROC3.2 を用いて、成層圏と対流圏の間の物質輸送と気候変動への影響を調べるための実験も行った。水平高解像度の MIROC6 化学気候モデルによる CCMI の推奨実験を行い解像度による違いも評価した。

3. 研究結果

3.1 概要

今年度は、海洋結合ありなし両方の MIROC 化学気候モデルを用いた Chemistry Climate Mode Initiative (CCMI) -Phase2 推奨実験の解析を行い、前課題で行った MIROC 化学気候モデルで T42 の低解像度を用いた同様の実験結果と比較した。また、海洋オフラインの MIROC3.2 化学気候モデルを用いて、大アンサンブル実験（1000 アンサンブルメンバー実験）を行い、成層圏と対流圏の間の物質輸送と気候変動への影響の解析を行った。さらに、水平低解像度 T42 の MIROC6 化学気候モデルを T85 に高解像度化し、CCMI 推奨実験を行い解像度による違いを評価した。

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. 1991¹⁾）、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. 2008²⁾；Thompson et al. 2011³⁾）、成層圏から対流圏熱帯域の対流活動への影響（Noguchi et al. 2020⁴⁾）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、対流圏オゾン量に影響を与える。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、先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の開発を行った。今後は、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入力が可能な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 MIROC5化学気候モデルを使ったCCMI-2の推奨実験（海洋オフラインとオンライン）

前研究課題では、海洋を結合した水平解像度T42のMIROC気候モデルを整備・高度化した。今年度は海洋をオンライン設定としているT42のMIROC5モデルを使って、CCMIで推奨されたオゾン層と気候の将来予測実験（REF-D2、1950～2100年）を行った。比較のため、海洋をオフライン設定とした同様の実験も行った。オゾン破壊物質の地表濃度はWMO2018シナリオで与えた。温室効果ガス濃度は、SSP1-2.6、SSP2-4.5、SSP3-7.0シナリオの3種類の実験を行った。

3.3.2 成層圏と対流圏の間の物質輸送と気候変動への影響の解析

1) 海表面温度の南半球成層圏力学場への影響を調べるため、海洋を結合していないMIROC3.2化学気候モデルに対して、南半球では異例となる成層圏突然昇温（sudden stratospheric warming : SSW）が発生した2002年、2019年のSSTを与えた大アンサンブル実験（1000アンサンブルメンバー実験）を行った（表1）。E2002、E2019がそれぞれの実験で、比較のために1991～2020年の気候値を与えた標準実験（CNTL）を行った。また対流圏の気象場をJRA-55客観解析にナッジングした実験（E2019Trop）も行った。CNTLでは、温室効果ガス濃度とオゾン破壊物質の地表濃度を2000年平均値に固定し、SSTやSea iceは月平均OISST v.2の1991～2020年平均値を与えた。実験は1010年間行い、最初の10年分はスピニアップとして除外し、残り1000年分のアンサンブルを用いた。

表1. 1000アンサンブル実験の設定。実験名、どの年のSST、Sea iceを与えたか、対流圏のナッジングを行ったかどうかと、太陽flux、GHG、ODSの条件を表す。

実験名	SST、Sea ice	大気ナッジング	太陽flux	GHG、ODS
CNTL	1991-2000年平均	なし	平均値	2000年条件
E2002	2002年	なし	平均値	2000年条件
E2019	2019年	なし	平均値	2000年条件
E2019Trop	2019年	対流圏	平均値	2000年条件

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を調べるため、海洋を結合していないMIROC3.2化学気候モデルに対して、1859年の巨大フレア、キャリントンイベント級のNOxを入力した実験を行なった。

3.3.3 水平低解像度T42のMIROC6化学気候モデルをT85に高解像度化した実験

本課題では、水平低解像度T42L34のMIROC6化学気候モデルの水平鉛直解像度を上げ、T85L81へ高解像度化した。そのモデルを用いて、CCMIで推奨されたオゾン層と気候の近過去実験（REF-D1、1950～2018年）を行い、結果を前課題のT42L34で行った同様の実験結果と比較した。

3.4 結果

3.4.1 MIROC5化学気候モデルを使ったCCMI- Phase2の推奨実験（海洋オフラインとオンライン）

図1はオゾン層と気候の将来予測実験REF-D2の結果で、将来の温室効果ガス濃度をSSP1-2.6、SSP2-4.5、SSP3-7.0シナリオの3種類に設定したものを示している。黒丸で示したTOMS/OMIの衛星観測では、1980～2000年頃の減少傾向と、それ以降に横ばいから回復に転じる傾向が見られる。海洋オフライン（大気モデルと表記）とオンラインで行った結果（結合モデルと表記）ともに、1980～2000年頃の減少傾向は観測値と概ね一致している。大気モデルでは、オゾン極小値が2000年頃になり観測値と概ね一致している一方で、結合モデルでは、春季のオゾン全量最小値が極小に達するのが10年ほど遅れ、その後の回復が遅れる傾向にある。なお、大気モデル・結合モデルともに、温室効果ガス濃度の増大に応じて今世紀末までオゾン全量の春季の最小値が増加する特徴がシミュレーションされている。

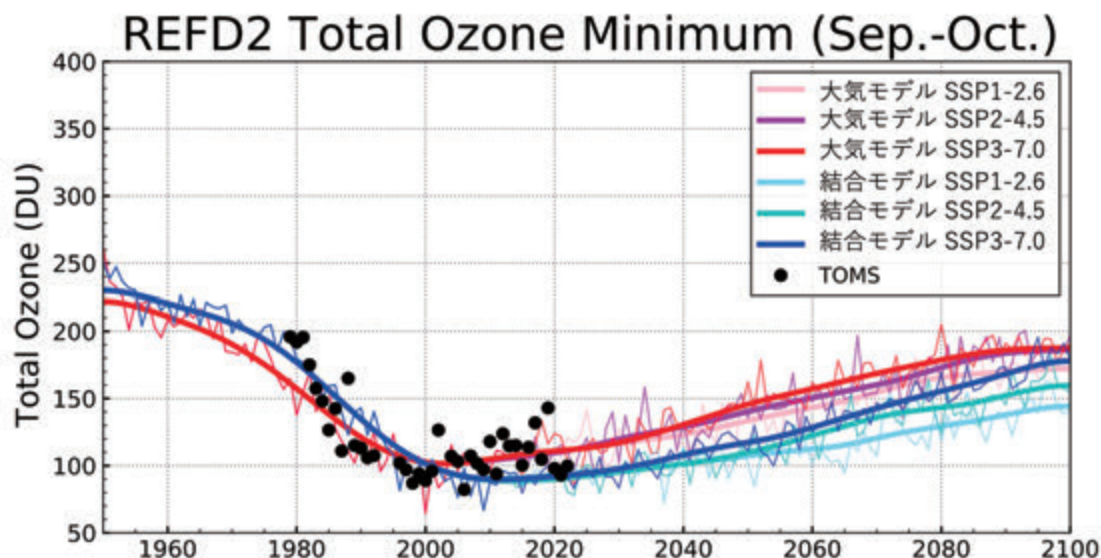


図1. 海洋オフライン設定（大気モデルと表記）と海洋オンライン設定（結合モデルと表記）としたMIROC5.0化学気候モデルのオゾン全量年最低値（南極域9～10月）の時系列図。CCMI推奨の将来予測（REF-D2）実験の結果。凡例は上から海洋オフラインで行ったSSP1-2.6、SSP2-4.5、SSP3-7.0シナリオ実験、海洋オンラインで行った同様の実験。細線は毎年の値で太線は平滑化したもの。黒丸でTOMS衛星観測を重ねた。

3.4.2 成層圏と対流圏間の物質輸送と気候変動への影響の解析

1) 図2は表1で示したCNTL、E2002、E2019の実験の南極域のオゾン全量を箱ひげ図にしたもので、

2002年、2019年（赤）ともに、気候値的な海面水温を与えた実験（黒）よりもオゾン全量が増加していた。60°S、10hPaの東西風を指標とした南極渦の強度を調べると、2002年、2019年ともに対流圏から成層圏への波伝播が気候値的な海面水温を与えた実験よりも活発で、それに伴い南極渦強度が低下しており、南極域のオゾン全量の増加と整合的になっていた。なお、分布の25%を示す箱の上端は上方にずれ、分布の1%を示すひげの上端は上方に大きく拡がり、さらに、1%から外れたアンサンブルメンバー（○）も上方に大きく拡がっている。このように、大アンサンブル実験を行うことで、2002年、2019年の海面水温によって成層圏の南極渦やオゾン層に、稀ではあるが大きな変動が起こり得ることを示すことができた（Yamashita et al., 2023⁵⁾）。

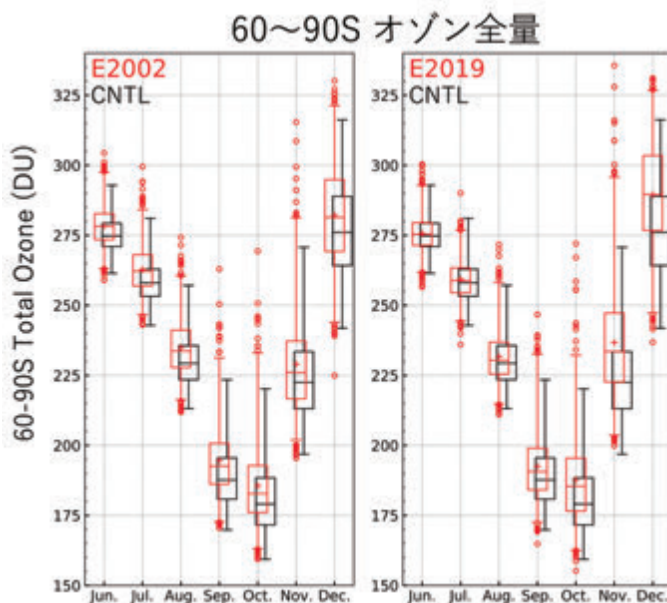


図2. MIROC3.2化学気候モデルによる1000アンサンブル実験から計算された南極オゾン全量の箱ひげ図。（左）2002年、（右）2019年のSSTを与えた実験。赤色の箱ひげは、比較のため気候値のSSTを与えた実験結果を表す。平均値は+、中央値は横線、箱は25～75%、ひげの範囲は1～99%、外れ値は丸で表示。Yamashita et al. (2023) のFig. 3を再掲（改）

2) 1859年の巨大フレア、キャリントンイベント級の太陽プロトンイベントによるNO_xの増加をMIROC3.2化学気候モデルに入力した予備的なシミュレーションを行なった。アンサンブル平均を行なった場合、粒子降下の影響が20 hPa以下の成層圏で識別しにくくなっているが、100アンサンブルの個々の結果を見ていくと、対流圏まで影響が伝わっているケースが数例あることがわかった(図3)。今後、こうした特異なケースがどのような気象場のもとで見られるかを詳細に調べる。

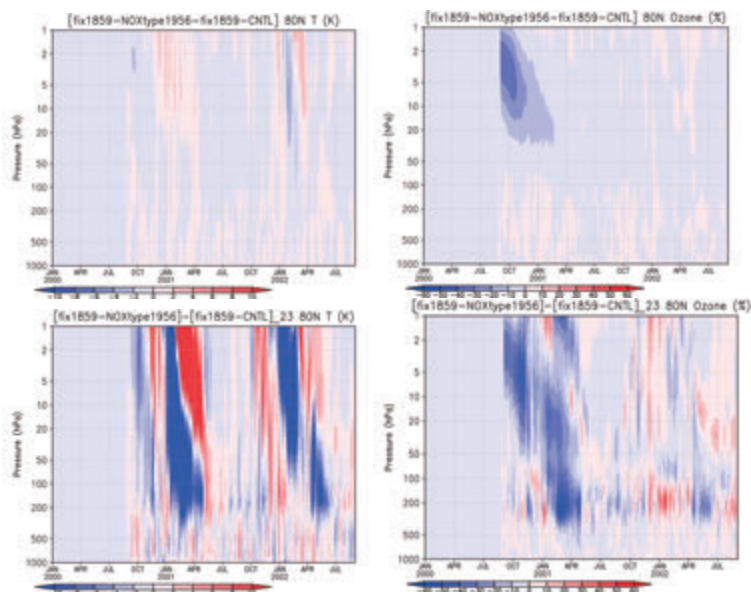


図3. MIROC3.2化学気候モデルによる1859年の巨大フレア、キャリントンイベント級の影響シミュレーション。(上) 100アンサンブルの平均と(下) その中の一つのアンサンブルメンバー#23の結果。(左) 気温と(右) オゾン混合比の実験間の差。約2年分の高度—時間変化を示す。

3.4.3 水平低解像度T42のMIROC6化学気候モデルをT85に高解像度化した実験

MIROC6化学気候モデルをT85L81へ高解像度化し、CCMIで推奨されたオゾン層と気候の近過去実験を行った。図1はオゾン全量を1995~2005年で平均した時間—緯度断面図を表す。前課題の低解像度T42L34で行った同様の実験結果と比較すると、赤道域や中緯度域ではオゾン全量の季節変化は似ており、TOMSの衛星観測とも概ね一致しているものの、T85L81では南極のオゾン全量が春季に減りにくいバイアスが見られた。

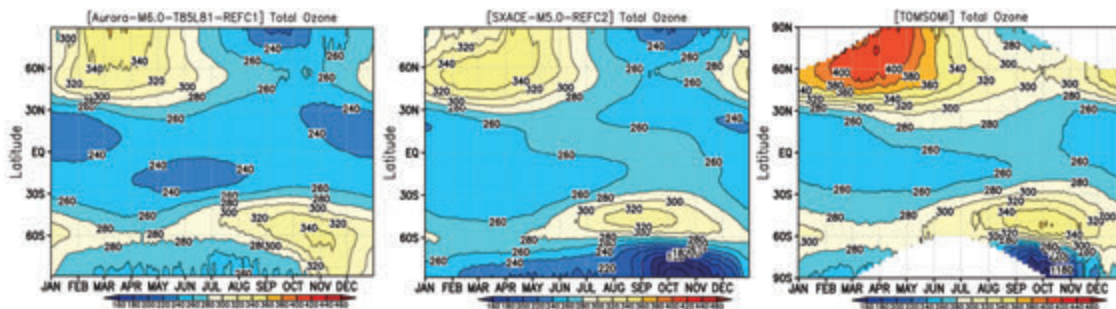


図4. (左) T85L81と(中) T42L34とした際の日平均オゾン全量の時間—緯度断面図(1995~2005年)。CCMI推奨の近過去実験(REF-D1)結果。比較のため(右) TOMS/OMI衛星観測を示す。

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) 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>

4. まとめ

海洋結合あり／なし両方の MIROC5 化学気候モデルを用いた Chemistry Climate Mode Initiative (CCMI) -Phase2 推奨実験（オゾン層と気候の過去再現実験および将来予測実験）の解析では、衛星観測と概ね一致する過去の変化を示す一方、海洋結合ありの実験では将来のオゾン回復時期が遅れる傾向にあった。海洋オフラインの MIROC3.2 化学気候モデルによる実験では、成層圏と対流圏の間の物質輸送と気候変動への影響の解析を行い、多くのアンサンブル実験を行うことで、2002 年、2019 年の海面水温によって成層圏の南極渦やオゾン層に、稀ではあるが大きな変動が起こり得ることを示すことができた。また、T85L81 へ高解像度化した MIROC6 化学気候モデルモデルでは、観測のオゾン全量の緯度–時間分布は概ね再現できたが、南極春季のオゾン全量が多すぎるというバイアスが見られた。

5. 研究成果発表

5.1 誌上発表(査読あり)

- 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>
- Friedel, M., Chiodo, G., Sukhodolov, T., Keeble, J., Peter, T., Seeber, S., Stenke, A., Akiyoshi, H., Rozanov, E., Plummer, D., Jockel, P., Zeng, G., Morgenstern, O., Josse, B. (2023) Weakening of springtime Arctic ozone depletion with climate change. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 23, 10235-10254. <https://doi.org/10.5194/acp-23-10235-2023>
- Charlesworth, E., Ploger, F., Birner, T., Baikhadzhaev, R., Abalos, M., Abraham, N.L., Akiyoshi, H., Bekki, S., Dennison, F., Jockel, P., Keeble, J., Kinnison, D., Morgenstern, O., Plummer, D., Rozanov, E., Strode, S., Zeng, G., Egorova, T., Riese, M. (2023) Stratospheric water vapor affecting atmospheric circulation. *Nature Communications*, 14 (3925), 1-9. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-39559-2>
- Ikeda, K., Tanimoto, H., Kanaya, Y., Taketani, F., Matsuki, A. (2023) Evaluation of black carbon concentration levels and trends in East Asia from CMIP6 climate models: Comparison to long-term observations in Japan and biases due to Chinese emissions. *SOLA*, 19, 239-245. <https://doi.org/10.2151/sola.2023-031>

5.2 誌上发表(査読なし)

山下陽介, 秋吉英治, 井上誠 (2024) 大アンサンブル実験による海表面条件の南極渦や波伝播への影響の解析, 月刊海洋, 56(4), 229–236. <https://doi.org/10.15083/0002009834>

5.3 口頭発表

山下陽介, 秋吉英治, 井上誠 (2023) 大アンサンブル実験による海表面条件の南極渦や波伝播への影響の解析. 東京大学大気海洋研究所大槌沿岸センター共同利用研究集会

山下陽介 (2024) NICAM-Chemをベースとした簡易NO₂排出量推定手法の開発. 2023年度NICAM開発者会議

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 (2023) 衛星観測と化学輸送モデルによる簡易的なNO₂排出量推定手法の開発. 第28回大気化学討論会, 同予稿集

Akiyoshi, H., Kadowaki, M., Yamashita, Y., Nagatomo, T. (2023) Dependence of column ozone on future ODSs and GHGs in the variability of 500-ensemble members. CCMi 2023 Science Workshop

Yashiro, H., Fujinawa, T., Goto, D., Ikeda, K., Inomata, S., Kamei, A., Kawazoe, F., Kikuchi, S., Morino, I., Murakami, K., Niwa, Y., Noda, H., Ohyama, H., Saeki, T., Saito, M., Someya, Y., Sugita, T., Tanimoto, H., Yamashita, Y., Yoshida, Y., Zeng, J., Matsunaga, T. (2023) Observation of global CO₂ and CH₄ by GOSAT series satellites and our efforts toward observation by GOSAT-GW. The Workshop on Observations within the Global Greenhouse Gas Watch (GGGW)

Yamashita, Y., Akiyoshi, H., M. Inoue (2023) The role of sea-surface conditions in Antarctic polar-vortex and associated wave forcing with a multi-member ensemble simulation of the CCSR/NIES-MIROC3.2 CCM. CCMi 2023 Science Workshop

Tanimoto, H., Matsunaga, T., Sugita, T., Yashiro, H., Morino, I., Saito, M., Ohyama, H., Inomata, S., Ikeda, K., Someya, Y., Fujinawa, T., Yoshida, Y., Yamashita, Y., Mueller, A., Frey, M., Lim, H., Xu, H., Saeki, T., Saigusa, N., Kanaya, Y., Sekiya, T., Patra, P., Takigawa, M., Yamaguchi, M., Bisht, J., Kasai, Y., Sato, T., Nakamura, A. (2023) The GOSAT-GW satellite mission: Potential roles in quantifying greenhouse gases and air pollutants emissions from local to global scales. The 28th IUGG General Assembly

山下陽介, 秋吉英治, 井上誠 (2023) The CCSR/NIES CCM simulations for the variations of wave propagation and Antarctic polar vortex strength responded to the sea surface conditions. 日本地球惑星科学連合2023年大会, 同予稿集

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) ハロウィン太陽プロト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

Hirooka, T., Nakamura, H., Akiyoshi, H. (2023) Predictability of Dynamical and Ozone Fields during the Stratospheric Ozone Reduction Event over the Southern Tip of South America in November 2009. AGU23, Abstracts

中村東奈, 廣岡俊彦, 秋吉英治 (2023) 南半球春季成層圏オゾンの初期値同化データの違いによる予測について. 日本気象学会2023年度秋季大会, 2023年度秋季大会講演予稿集, 124, 335

Akiyoshi, H., Kadowaki, M., Yamashita, Y., Nagatomo, T. (2023) Dependence of column ozone on future ODSs and GHGs in the variability of 500-ensemble members. CCMi 2023 Science Workshop

永島達也, 秋元肇, 池田恒平, 谷本浩志 (2023) SLCP削減による気候変動緩和に向けた経験的アプローチのCMIP6気候モデルデータによる検証. 第28回大気化学討論会, 同予稿集

池田恒平, 谷本浩志, 金谷有剛, 竹谷文一, 松木篤 (2023) 地上観測と化学輸送モデルを用いた中国からのブラックカーボン排出量の長期推計. 第28回大気化学討論会, 同予稿集, O3-07

5.4 その他(書籍等)

Yamashita, Y., Akiyoshi, H., Inoue, M. (2022) 1000-member ensemble simulation output from NIES Chemistry-

Climate Models for investigating Southern Hemisphere Stratospheric response to the sea surface temperature. ver.1.1.0, Earth System Division, NIES. <https://doi.org/10.17595/20221215.001> (2023.10.18 Version 1.1.0 was released)

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2年度～令和4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 永島達也・打田純也
九州大学応用力学研究所 竹村俊彦・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・何 彦
峰・Do Thi Nhu Ngoc・鎌田友美・水野光一郎・Hui
Wei・正木 悠斗・郭 力萌・翟 旭峰
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 道端拓朗・出口歩海・吉村航人・田村誠也・橋本
真一
海洋研究開発機構地球表層システム研究センター Ha Thi Minh Phuc
東北大学大学院環境科学研究科 Isah Mohammed Engha

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

1.1 2.1 計算機利用時間（2023年4月1日～2024年3月31日）

CPU 時間 v_debug	:	393.6 [VE・hours]
v_normal	:	8,232,570.9 [VE・hours]
計	:	8,232,964.5 [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) の大気大循環モデル版および大気海洋結合版の3次元全球規模大気汚染物質輸送モデル、及び正二十面体全球大気格子モデルNICAMとSPRINTARS・CHASERが結合した大気汚染物質輸送モデル（NICAM-Chem）を用い、それぞれ並列計算を行った。

3. 研究結果

3.1 概要

大気海洋結合モデルMIROC-SPRINTARSでは、硫酸塩エアロゾルの前駆物質であるSO₂の人為起源排出量を全球でゼロにしたところ、全球・年平均で+0.510 Kとなり、妥当な定量的結果が得られた。人為起源SO₂の排出量の多い北半球中緯度だけではなく、アイスアルベドや水蒸気のフィードバックにより、北半球高緯度での昇温も非常に大きかった。地域ごとのSO₂排出量減少による地上気温変化は、地域間でのばらつきが大きかったが、必ずしも排出源付近の気温変化が大きいわけではなかった。MIROCの

さらなる高度化の一環として、降霰も陽に予報するスキームを新たに開発し、衛星観測と統合的な結果が得られた。また、雲内に存在する霰をトリガーとして発生する雷の頻度診断スキームも併せて実装を行ったところ、温暖化に伴い、北極域のほとんど全ての領域で発雷頻度は有意に増加することがわかった。全球大気モデルNICAM-Chemでは、異なる雲モデルを用いて、対象物質をブラックカーボンとし、排出量削減対象領域はアジア・中国・インドに設定したS-20感度実験を実施した。その結果、雲モデルの違いによる結果の差は大きく、ブラックカーボン削減に対する雲の応答の重要性が示唆された。

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-SPRINTARSを用いたS-20感度実験

2021年度から環境省環境研究総合推進費S-20「短寿命気候強制因子による気候変動・環境影響に対応する緩和策推進のための研究」（代表：竹村俊彦）の中で計画した共通排出量データおよびシナリオを用いた数値実験（以後、S-20感度実験と呼ぶ）を実施した。本研究では大気海洋結合モデルMIROC6 (Tatebe et al., 2019) とエアロゾルモデルSPRINTARS (Takemura et al., 2000; 2002; 2005; 2009) が結合されたMIROC-SPRINTARSを用いてS-20感度実験を行った。SPRINTARSは土壌粒子、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 (SO₂) とDMSも取り扱っている。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。

化石燃料燃焼起源のSLCFs（この中でSO₂、BC、OC）排出量を特定地域（全球、日本、中国、インド、インドネシア・タイ・ベトナム、アフリカ、欧州 (EU)、その他欧州・ロシア、中央アジア・中東、北米、中南米、を対象とした）においてゼロにしたS-20感度実験を実施し、削減しない場合との放射・気象場等の変化差を見ることで、SLCFsの環境・気候影響を評価した。また、長寿命温室効果ガス (GHG) の濃度を2060年に設定したS-20感度実験も実施した。なお、本報告書ではSO₂の気温変化に注目した。

モデル水平分解能は1.4度、鉛直方向は40層とした。大気海洋結合モデルとして利用しているため、気象場はナッジングしていない。解析対象期間は、50年間のスピニングアップの後の100年間である。これによって、SLCF変化に対する海洋応答も加味した遅い応答を考慮できる。なお、人為起源BC及びSO₂の排出量はCEDS (Community Emissions Data System: <https://github.com/JGCRI/CEDS>) を利用した。その他、モデル及びシミュレーション設定の詳細に関しては、Takemura and Suzuki (2019) にも記載がある。

3.3.2 MIROCに適用する降霰予報型スキームの開発

最新版のMIROCには、降雨・降雪を予報する「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)。このスキームはMIROCの次期バージョンMIROC7への搭載が決定しているが、さらなる高度化の一環として、これまでの数値気候モデルでは考慮されてこなかった降霰も陽に予報するスキームを新たに開発した。降雨・降雪と同様に、降霰粒子の質量混合比および数濃度混合比を予報する 2 moment スキームである (本年度研究成果: Michibata, 2024)。降霰粒子は比較的落下速度が大きく、モデル最下層付近で特に短い時間ス

トップが要求される問題点を回避するために、降水粒子の落下が時間ステップに依存しない手法を用いた (Guo et al., 2021)。

また、雲内に存在する霰をトリガーとして発生する雷の頻度も評価できるよう、発雷頻度診断スキームも併せて実装を行った。MIROC-ESMに実装されたHe et al. (2022) に基づき、対流有効位置エネルギー (CAPE) および大気中の固体粒子の質量に依存して発雷頻度を診断するパラメタリゼーションを用いた。

3.3.3 NICAMによるS-20感度実験

全球雲解像モデルNICAM (e.g., Satoh et al., 2014) と結合した大気汚染物質輸送モデルであるNICAM-Chem (e.g., Goto et al., 2020) を用いて、3.3.1で記述したS-20感度実験を実施した。モデル水平分解能は56 km、鉛直方向は78層とした。NICAMでは大気モデルとして利用したため (つまり、大気海洋結合モデルではなく、海水面温度および海氷を外部境界条件として与えた)、海洋応答の影響が強くなる気温ではなく、雲・降水・放射フラックスに関する変化に着目した。本年度は、雲微物理過程を陽に表現可能なNICAM-Chemの利点を活かし、3種類の雲物理モジュール (①改良版の雲微物理モジュールNDW6 (NICAM Double-moment bulk Water 6; Seiki and Nakajima, 2014)、②これまでの高分解能計算の標準版であるNSW6 (NICAM Single-moment bulk Water 6; Tomita, 2008)、③雲微物理過程を陽に表現しない古典的な方法である大規模凝結過程と積雲パラメタリゼーション) を用いた。以後、①はNICAM-NDW6、②はNICAM-NSW6、③は単にNICAMと表現する。本報告書では、S-20感度実験の中で、対象物質をBCとし、排出量削減対象領域はアジア・中国・インドに設定した。雲物理モジュール①と②は雲微物理過程を計算できるため、14 km以下の分解能で利用することが多い (本年度研究成果: Goto et al., 2024; Goto et al., 2020)。しかし56 km分解能であってもその基本的な再現性は問題がなく、同じ解像度であっても③より①と②の雲微物理モジュールを使った方がエアロゾル再現性は良いことは確認している (Goto et al., 2020)。

3.4 結果

3.4.1 MIROC-SPRINTARSによるS-20感度実験

図1には、硫酸塩エアロゾルの前駆気体であるSO₂の人為起源排出量を地域ごとにゼロにしたシミュレーションと標準シミュレーションとの地上気温の差を示している。全球で人為起源SO₂排出量をゼロにした場合は、全球・年平均で0.510 Kの昇温をもたらすという結果を得た。これは、MIROCも参画しているIPCC第6次評価報告書での人為起源エアロゾルによる全球平均気温変化のマルチモデル評価と、その硫酸塩エアロゾルの寄与度を考慮すれば、妥当な定量的結果である。人為起源SO₂の排出量の多い北半球中緯度だけではなく、アイスアルベドフィードバックや水蒸気フィードバックにより、北半球高緯度での昇温も非常に大きいことが示された。地域ごとのSO₂排出量減少による地上気温変化への寄与度は、その地域によってばらつきが大きいという結果が得られており、かつ、必ずしも排出源付近の気温変化が大きいわけではない。例えば、インドからの排出量減少により東アジアや中近東での昇温が大きかったり、東南アジアからの排出量減少により北極域で降温したりする結果となっている。また、どの地域からの排出量変化でも、インドでは降温していることが興味深い。これらは、硫酸塩エアロゾル濃度の変化に伴うアジアモンスーンの変化を示唆しており、今後詳細な解析が必要となる。また、南極周辺海域での低温化も示されており、これはモデル間のばらつきの大きい海氷プロセスに依存すると考えられるため、現在進められている新しいモデル相互比較 (本年度研究成果: Wilcox et al., 2023) と協調しながら、その確からしさを確認する必要がある。さらに、GHG濃度をSSP3-7.0の2060年に設定して、人為起源SO₂排出量をゼロにした実験の結果 (図1右下) は、全球・年平均で0.612 Kの昇温を示している。バックグラウンドとなるGHG濃度が高くなると、SO₂排出量を同じように減少させても昇温度が大きくなることは、将来の現実的なSLCFsの気候変化を評価する上で重要なポイントとなる。

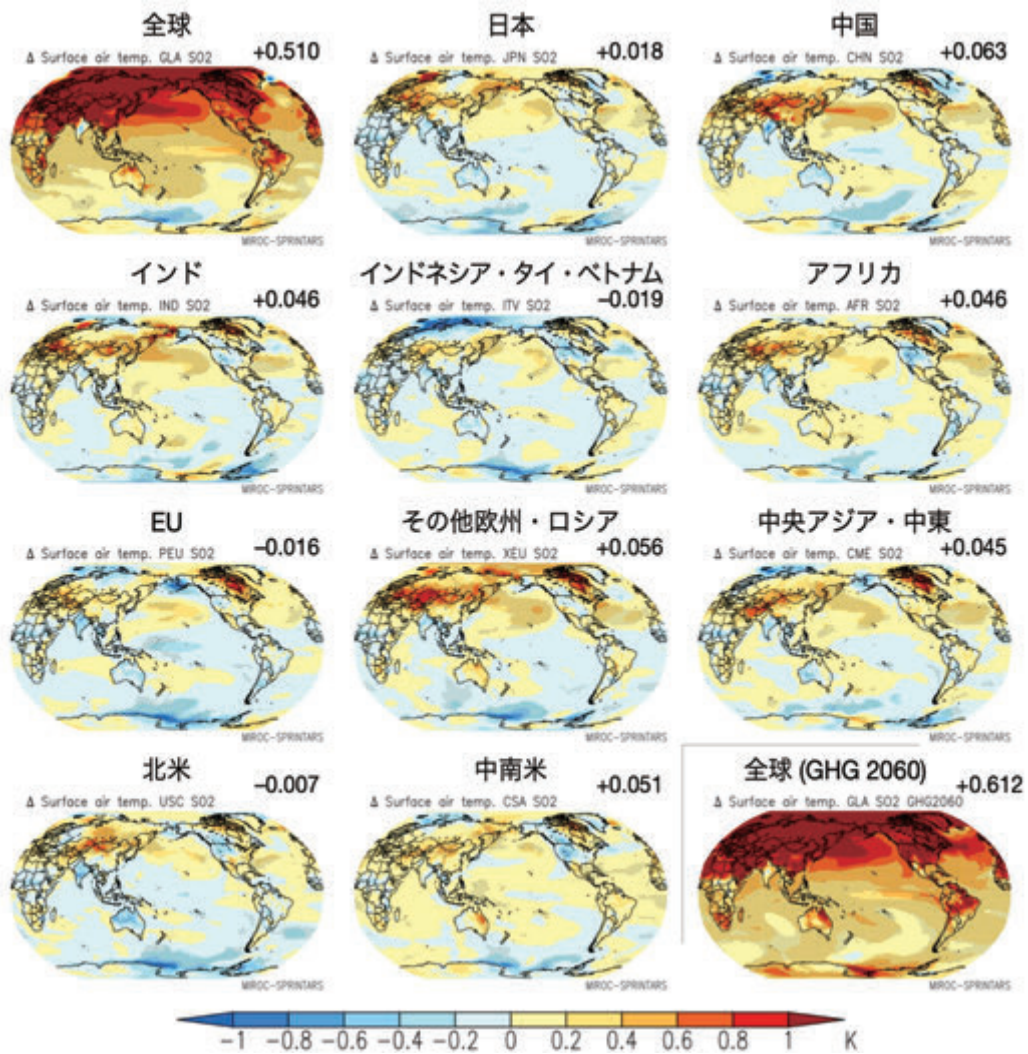


図1. 大気海洋結合モデルMIROC-SPRINTARSによって計算された各地域からの人為起源SO₂排出量をゼロにした場合の年平均地上気温変化。各図の右上の数値は全球平均値。点描は統計的有意な地域。

3.4.2 MIROCに適用する降霰予報型スキームの性能検証

MIROCに新規に実装した降霰予報型スキームの性能を検証するために、図2に人工衛星観測（GPM/DPRとLIS/OTD）とMIROCとの比較結果を示す。GCMは積雲対流を陽に考慮しないため熱帯・亜熱帯域で降霰発生率の過小評価が見られるものの、それ以外の地域については概ねGPM/DPR衛星観測と整合的な分布を示している。また、発雷頻度についても概ねLIS/OTD衛星観測と比較して整合的な海陸分布を示している。熱帯・亜熱帯域の降霰・発雷頻度の特性を議論する際には、積雲への微物理過程の導入や、積雲性降水も予報するなどの高度化を今後の検討課題としている。

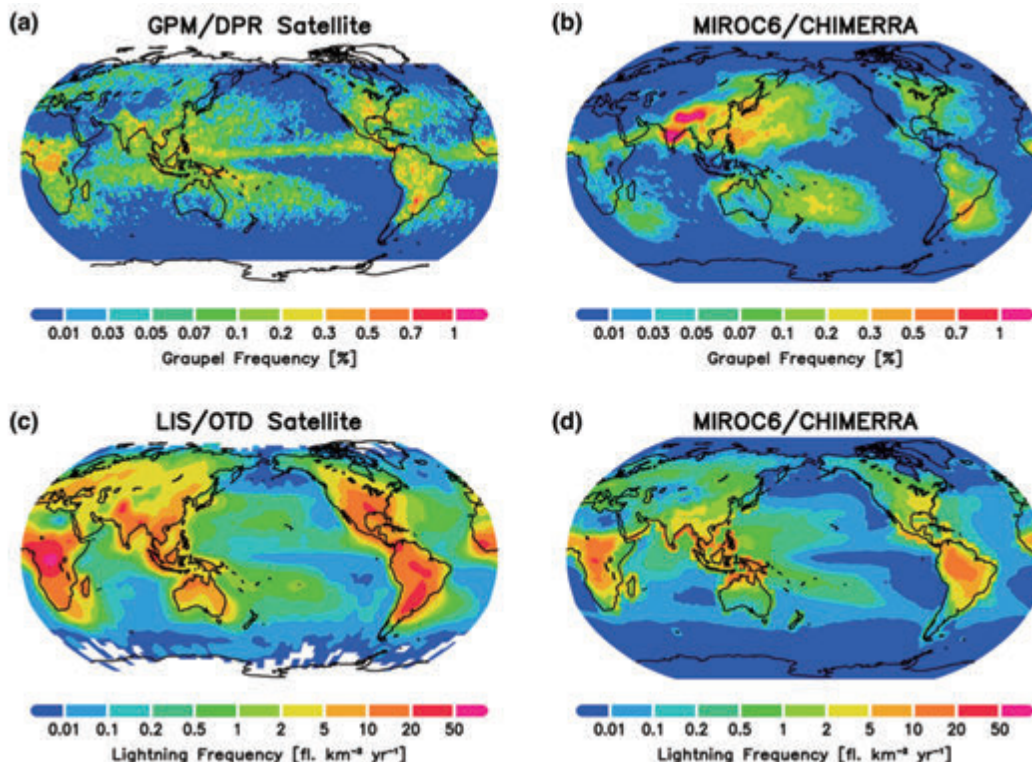


図2. 衛星観測とMIROC降霰予報型スキームの (a, b) 降霰頻度および (c, d) 発雷頻度の比較。降霰はGPM/DPR衛星による観測結果を示す。発雷はLIS/OTD衛星による観測結果を示す。Michibata (2024) Fig. 2 より引用。

図3は、温暖化時に発雷頻度および降霰発生頻度がどのように変化するかを北極中心として示した水平分布図である。温暖化に伴い、北極域のほとんど全ての領域で発雷頻度は有意に増加することがわかった（図3a）。一般に、温暖化すると雲中の氷粒子は融解して水粒子に変化するが、極域への水蒸気輸送の増大が雲を増加させることで降霰の増加を引き起こしていると考えられる（図3b）。発雷は北極域における主要な火災発生原因であるため、もし温暖化時に発雷が増加すると、二酸化炭素や凍土からのメタン放出などのリスクの増大を意味し、正のフィードバックに寄与する可能性がある。

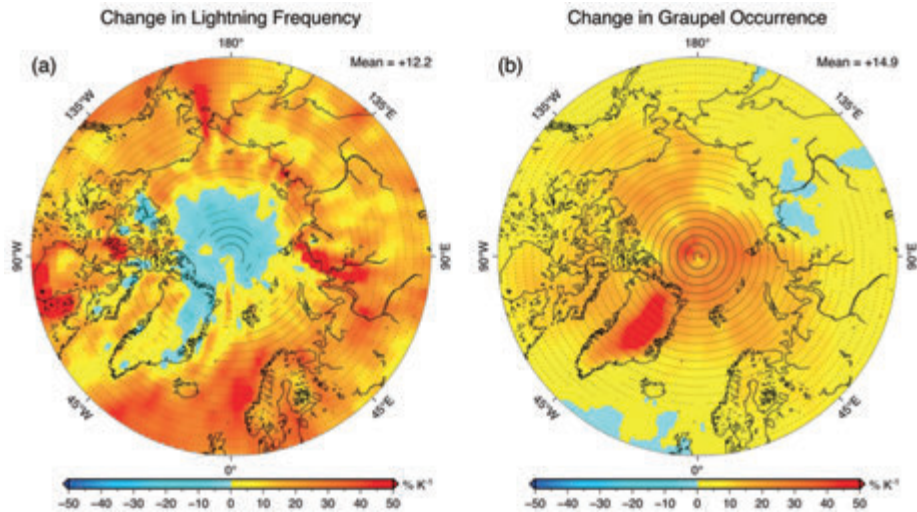


図3. 海面水温を一様に4K上昇させた実験 (SST+4K) と現在気候実験 (PD) との差異 (SST+4K minus PD) を、単位温度変化あたりの%偏差 (% K⁻¹) で示した図。(a) 発雷頻度の%偏差および (b) 降霰頻度の%偏差を示す。95%信頼度で有意な変化が生じた地点にドットを付す。北極点を中心として投影。Michibata (2024) Fig. 3 より引用。

3.4.3 NICAMによるS-20感度実験

全球56 km分解能のNICAM-Chemを用いて、人為起源BC排出量を0に設定した感度実験と標準実験との差に関して、アジアでの結果を比較した。図4には大気上端における短波でのエアロゾル放射強制力 (Aerosol Radiative Forcing: ARF) を示した。人為起源BC排出量を0にした場合、BCによる光吸収成分の減少によってARFは負の値となることが予想される応答である。例えば、インドでの人為起源BC排出量を0にしたシミュレーションでは、どのモデル結果もARFは負の値となり、想定される結果が得られた。しかし、中国での人為起源BC排出量を0にしたシミュレーションでは、人為起源BC排出量が

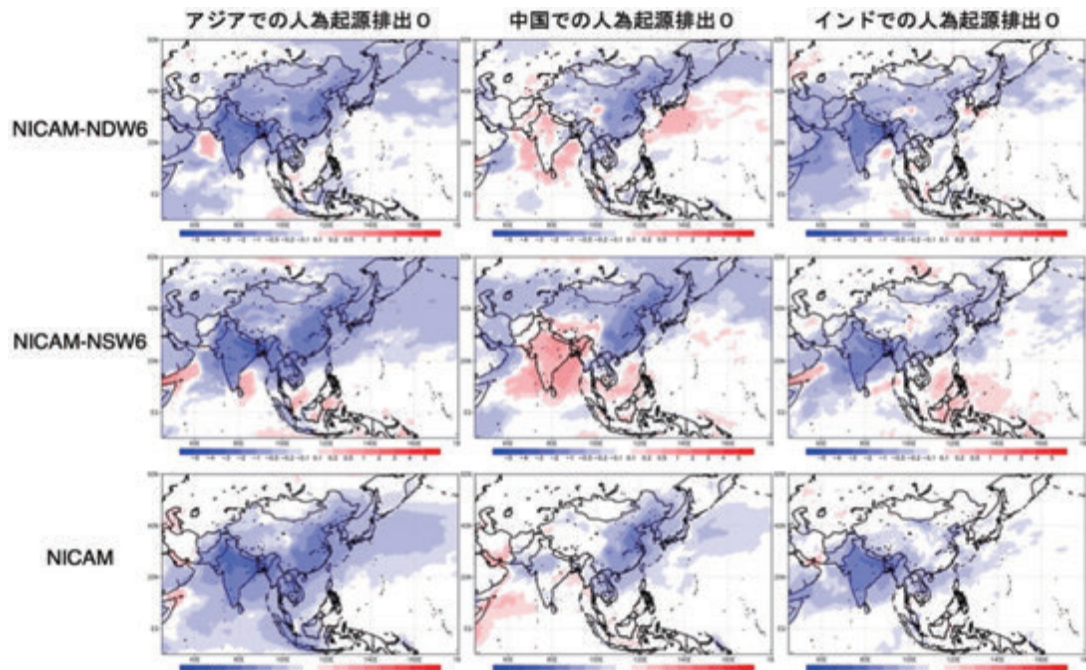


図4. 大気上端における短波のエアロゾル放射強制力 (Wm^{-2}) の年平均水平分布。NICAMによる雲物理モジュールおよび人為起源BC排出量の違いによる感度実験と標準実験との差。

何も変わっていないインドでのARFがモデルによって大きく異なっており、特にNICAM-NSW6では大きな正の値であった。これは、AOT値があまり変わらなかったが雲水量が増えたことで、雲の多重散乱による暖める効果が増加したためと解釈できる。

参考文献

- Guo H., Ming Y., Fan S., Zhou L., Harris L., Zhao M. (2021) Two-moment bulk cloud microphysics with prognostic precipitation in GFDL's Atmosphere Model AM4.0: configuration and performance. *J. Adv. Model. Earth Syst.* 13, e2020MS002453. <https://doi.org/10.1029/2020MS002453>
- He Y., Hoque H., Sudo K. (2022) Introducing new lightning schemes into the CHASER (MIROC) chemistry climate model. *Geosci. Model Dev.* 15, 5627–5650. <https://doi.org/10.5194/gmd-15-5627-2022>
- 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>
- Satoh M., Tomita H., Yashiro H., Miura H., Kodama C., Seiki T., Noda A. T., Yamada T., 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. *Prog. Earth Planet. Sci.* 1, 18. <https://doi.org/10.1186/s40645-014-0018-1>
- Seiki T., Nakajima T. (2014) Aerosol effects of the condensation process on a convective cloud simulation. *J. Atmos. Sci.*, 71 (2), 833–853. <https://doi.org/10.1175/JAS-D-12-0195.1>
- Takemura T., Okamoto H., Maruyama Y., Numaguti A., Higurashi A., Nakajima T. (2000) Global three-dimensional simulation of aerosol optical thickness distribution of various origins. *J. Geophys. Res.*, 105, 17853–17873
- Takemura T., Nakajima T., Dubovik O., Holben B. N., Kinne S. (2002) Single-scattering albedo and radiative forcing of various aerosol species with a global three-dimensional model. *J. Clim.*, 15, 333–352, [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2002\)015<0333:SSAARF>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2002)015<0333:SSAARF>2.0.CO;2)
- 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., O'ishi 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>
- Takemura T., Suzuki K. (2019) Weak global warming mitigation by reducing black carbon emissions. *Sci. Rep.*, 9, 4419, <https://doi.org/10.1038/s41598-019-41181-6>
- Tatebe T., Ogura T., Nitta T., Komuro Y., Ogochi K., Takemura T., Sudo K., Sekiguchi M., Abe M., Saito F., Chikira M., et 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>
- Tomita, H.: New microphysics with five and six categories with diagnostic generation of cloud ice, *J. Meteorol. Soc. Jpn.*, 86A, 121–142, 2008.

4. まとめ

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目的とした。この知見提供のために、環境省S-20プロジェクトの中で計画した数値実験を、スーパーコンピュータを用いて実施した。大気海洋結合モデルMIROC-SPRINTARSでは、硫酸塩エアロゾルの前駆物質であるSO₂の人為起源排出量を地域ごとにゼロとすると、地上気温変化は地域間でのばらつき、必ずしも排出源付近で大きいわけではなかった。全球大気モデルNICAM-Chemを用いた実験では、雲モデルの違いによる結果の差が大きく、ブラックカーボン削減に対する雲の応答の重要性が示唆された。MIROCのさらなる高度化の一環として、降霰も陽に予報するスキームや発雷頻度診断スキームを新たに開発し、良好な結果を得た。

5. 研究成果発表

5.1 誌上発表(査読あり)

- Ahsan H., Wang H., Wu J., Wu M., Smith S. J., Bauer S., Suchyta H., Olivie D., Myhre G., Matsui H., Bian H., Lamarque J.-F., Carslaw K., Horowitz L., Regayre L., Chin M., Schulz M., Skeie R. B., Takemura, T., Naik V. (2023) The Emissions Model Intercomparison Project (Emissions-MIP): quantifying model sensitivity to emission characteristics. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 23, 14779–14799, doi:10.5194/acp-23-14779-2023
- Anita W. M., Uttajug A., Seposo X. T., Sudo K., Nakata M., Takemura T., Takano H., Fujiwara T., Ueda K. (2024) Interplay of climate change and air pollution - projection of the under-5 mortality attributable to ambient particulate matter (PM_{2.5}) in South Asia. *Environmental Research*, 248, 118292, doi:10.1016/j.envres.2024.118292
- Fiedler S., Naik V., O'Connor F. M., Smith C. J., Griffiths P., Kramer R. J., Takemura T., Allen R. J., Im U., Kasoar M., Modak A., Turnock S., Voulgarakis A., Watson-Parris D., Westervelt D. M., Wilcox L. J., Zhao A., Collins W. J., Schulz M., Myhre G., Forster P. M. (2024) Interactions between atmospheric composition and climate change – progress in understanding and future opportunities from AerChemMIP, PDRMIP, and RFMIP. *Geoscientific Model Development*, 17, 2387–2417, doi:10.5194/gmd-17-2387-2024
- Goto D., Seiki T., Suzuki K., Yashiro H., Takemura T. (2024) Impacts of a double-moment bulk cloud microphysics scheme (NDW6-G23) on aerosol fields in NICAM.19 with a global 14 km grid resolution. *Geoscientific Model Development*, 17, 651–684, doi:10.5194/gmd-17-651-2024
- He Y., Sudo K (2023) Historical (1960-2014) lightning and LNO_x trends and their controlling factors in a chemistry-climate model, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 23, 13061-13085, doi:10.5194/acp-23-13061-2023
- Horii S., Takahashi K., Shiozaki T., Takeda S., Sato M., Yamaguchi T., Takino S., Hashihama F., Kondo Y., Takemura T., Furuya K. (2023) East-west variabilities of N₂ fixation activity in the subtropical North Pacific Ocean in summer: potential field evidence of the phosphorus and iron co-limitation in the western area. *Journal of Geophysical Research Oceans*, 128, e2022JC019249, doi:10.1029/2022JC019249.
- Jordan G., Malavelle F., Chen Y., Peace A., Duncan E., Partridge D. G., Kim P., Watson-Parris D., Takemura T., Neubauer D., Myhre G., Skeie R., Laakso A., Haywood J. (2024) How well are aerosol-cloud interactions represented in climate models? Part 1: Understanding the sulphate aerosol production from the 2014–15 Holuhraun eruption. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 24, 1939–1960, doi:10.5194/acp-24-1939-2024
- Michibata T. (2024) Significant increase in graupel and lightning occurrence in a warmer climate simulated by prognostic graupel parameterization, *Scientific Reports* 14, 3862, <https://doi.org/10.1038/s41598-024-54544-5>
- Nagashima K., Kawakami H., Sugie K., Fujiki T., Nishioka J., Iwamoto Y., Takemura T., Miyakawa T., Taketani F., Noguchi Aita M. (2023) Asian dust-deposition flux to the subarctic Pacific estimated using single quartz particles. *Scientific Reports*, 13, 15424, doi:10.1038/s41598-023-41201-6

- Satake A., Hagiwara T., Nagano A. J., Yamaguchi N., Sekimoto K., Shiojiri K., Sudo K. (2024) Plant Molecular Phenology and Climate Feedbacks Mediated by BVOCs, *Annual Review of Plant Biology*, 10.1146/annurev-arplant-060223-032108
- Schmidt G. A., Andrews T., Bauer S. E., Durack P. J., Loeb N. G., Ramaswamy V., Arnold N. P., Bosilovich M. G., Cole J., Horowitz L. W., Johnson G. C., Lyman J. M., Medeiros B., Michibata T., Olonscheck D., Paynter D., Raghuraman S. P., Schulz M., Takasuka D., Tallapragada V., Taylor P. C., Ziehn T. (2023) CERESMIP: a climate modeling protocol to investigate recent trends in the Earth's Energy Imbalance, *Frontiers in Climate*, 5, <https://doi.org/10.3389/fclim.2023.1202161>
- Sekiya T., Miyazaki K., Eskes H., Bowman K., Sudo K., Kanaya Y., Takigawa M. (2023) The worldwide COVID-19 lockdown impacts on global secondary inorganic aerosols and radiative forcing, *Science Advances*, 9 (30), doi: 10.1126/sciadv.adh2688
- Shiogama H., Fujimori S., Hasegawa T., Hayashi M., Hirabayashi Y., Ogura T., Iizumi T., Takahashi K., Takemura T. (2023) Important distinctiveness of SSP3–7.0 for use in impact assessments. *Nature Climate Change*, 13, 1276–1278, doi:10.1038/s41558-023-01883-2
- Stjern C. W., Forster P. M., Jia H., Jouan C., Kasoar M. R., Myhre G., Olivié D., Quaas J., Samset B. H., Sand M., Takemura T., Voulgarakis A., Wells C. D. (2023) The time scales of climate responses to carbon dioxide and aerosols. *Journal of Climate*, 36, 3537–3551, doi:10.1175/JCLI-D-22-0513.1
- 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). *Geoscientific Model Development*, 16, 4451–4479, doi:10.5194/gmd-16-4451-2023
- Yasunari T. J., Narita D., Takemura T., Wakabayashi S., Takeshima A. (2024) Comprehensive impact of changing Siberian wildfire severities on air quality, climate, and economy: MIROC5 global climate model's sensitivity assessments. *Earth's Future*, 12, e2023EF004129, doi:10.1029/2023EF004129
- Zhong Q., Schutgens N., van der Werf G. R., Takemura T., van Noije T., Mielonen T., Checa-Garcia R., Lohmann U., Kirkevåg A., Olivié D. J. L., Kokkola H., Matsui H., Kipling Z., Ginoux P., Le Sager P., Rémy S., Bian H., Chin M., Zhang K., Bauer S. E., Tsigaridis K. (2023) Threefold reduction of modeled uncertainty in direct radiative effects over biomass burning regions by constraining absorbing aerosols. *Science Advances*, 9, doi:10.1126/sciadv.adi3568

5.2 誌上発表(査読なし)

- Nakajima T., Takemura T., Suzuki K., Goto D. (2023) Impacts of air pollutants on climate change: Importance of SLCF co-control for climate change mitigation in short- and long-term future. In: Akimoto H., Hanimoto H. (eds.) *Handbook of air quality and climate change*, Springer, Singapore, https://doi.org/10.1007/978-981-15-2527-8_40-1
- Nagashima T., Kawano N. (2023) Impacts of Climate Change on Tropospheric Ozone (O3). In: Akimoto, H., Tanimoto, H. eds., *Handbook of Air Quality and Climate Change*, Springer, https://doi.org/10.1007/978-981-15-2527-8_38-2
- Sudo K. (2023) Atmospheric Mixing ratios of O3 and radiative forcing, In: Akimoto H., Hanimoto H. (eds.) *Handbook of air quality and climate change*, Springer, Singapore, https://doi.org/10.1007/978-981-15-2527-8_30-1
- 永島達也 (2023) 気候変動影響と適応・緩和-第6講 気候変動が大気質に与える影響-. *大気環境学会誌*, 58 (5), A113-A125

5.3 口頭発表

- Goto D., Seiki T., Suzuki K., Yashiro H., Takemura T. (2023) Improvement of global 14 km aerosol simulation with update of cloud microphysics module, 2023 International Conference on CMAS-Asia-Pacific, Saitama, Japan, July 2023
- Goto D., Seiki T., Suzuki K., Yashiro H., Takemura T. (2023) Evaluation of differences in aerosol distribution and its radiative forcing for two different cloud microphysics modules using a global high-resolution model, 2023 American Geophysical Union (AGU) Fall Meeting, San Francisco, USA, December 2023
- Charlotte M. B., Ma P-L., Christensen M. W., Mulmenstadt J., Varble A., Suzuki K., Michibata T. (2023) Droplet collection efficiencies estimated from satellite retrievals constrain effective radiative forcing of aerosol-cloud interactions AGU Fall Meeting 2023
- Hirota, N., Michibata T., Yamagami Y., Tatebe H., Suzuki K., Watanabe M. (Team MIROC) (2023) Development of MIROC7: Mean states, variability, and climate sensitivity, WCRP Open Science Conference 2023
- Michibata T., Suzuki K. (2023) Process representations of cloud and precipitation in MIROC6 with prognostic precipitation: Evaluation against A-Train observations, ICCP-GSRA Workshop 2023 jointly with The 2nd EarthCARE Modeling Workshop (招待講演)
- Sudo, K., Wang J. (2023) Impacts of the Chinese SLCFs emission changes during 2010s on East Asian and global climate, JpGU 2023 Annual Meeting
- 五藤大輔, 清木達也, 鈴木健太郎, 八代尚, 竹村俊彦 (2023) 雲微物理モデルの違いによる全球高解像度エアロゾルシミュレーション, 日本気象学会2023年度秋季大会, 宮城県仙台市, 2023年10月
- 関谷高志, 羽島知洋, 須藤健悟, 金谷有剛, 河宮未知生 (2023) Potential impacts of climate-biogeochemical feedback on future methane projection, 第28回大気化学討論会
- 富澤慧, 佐藤陽祐, 安井良輔, 竹村俊彦 (2024) 超高解像度エアロゾル気候モデルの開発, 第45回日本気象学会九州支部発表会
- 富澤慧, 佐藤陽祐, 安井良輔, 竹村俊彦 (2024) SCALE-RMを用いた超高解像度エアロゾル気候モデルの開発, 第7回アジア域の化学輸送モデルの現状と今後の展開に関する研究集会
- 中西萌々花, 道端拓朗 (2023) CMIP6モデルを用いた北極温暖化と雲の相互作用メカニズムに関する研究, 日本気象学会関西支部2023年度第3回例会(中国地区)
- 正木悠斗, 関谷高志, 須藤健悟 (2023) Initial dispersion and conversion of stratospheric SO₂ injected by 2022 Hunga Tonga eruption, JpGU 2023 Annual Meeting
- 永島達也, 秋元肇, 池田恒平, 谷本浩志 (2023) SLCP削減による気候変動緩和に向けた経験的アプローチのCMIP6気候モデルデータによる検証. 第28回大気化学討論会, 同予稿集

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	中田聡史
国立環境研究所地域環境保全領域	赤星 怜
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
いであ株式会社情報システム事業本部	春山恭之
いであ株式会社情報システム事業本部	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（2023年4月1日～2024年3月31日）

CPU時間	v_debug	:	1,049.1 [VE・hours]
	v_normal	:	712,287.5 [VE・hours]
	計	:	713,336.6 [VE・hours]

2.2 利用概要

有明海・八代海を対象とした陸域－海域モデルを開発するとともに、2010年代の再現計算を実施し、モデルの検証と改良を行った。また、地方自治体の職員でも利用可能な栄養塩類管理の影響評価モデルを開発するため、水質・生態系モデルのパラメータ自動調整の技術的検討とGUIの開発を進めた。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の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

線状降水帯による記録的な豪雨災害が頻発化し、その影響と今後の予測が求められている有明海・八代海等を対象として気候変動の影響予測を実施するため、有明海・八代海等の陸域淡水・汚濁負荷流出－海域流動・水質・底質モデルを開発するとともに、2010年代の再現計算を通じて

モデルの検証と改良を行った。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 の開発を行った。

3.2 有明海・八代海等を対象とした陸域－海域モデルの開発

3.2.1 背景と目的

瀬戸内海、伊勢湾、東京湾の先行研究を通じて、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、先行研究の瀬戸内海、伊勢湾、東京湾と比較して近年の豪雨の頻発化が顕著な有明海・八代海等を対象とし、気候変動影響予測の実施に向けた陸域－海域モデルの開発と再現性の検討を行うことを目的とする。

3.2.2 研究手法

予測モデルは、瀬戸内海、伊勢湾、東京湾の先行研究で使用した陸域淡水・汚濁負荷流出－海域流動・水質・底質モデル（東ら, 2020; 東ら, 2021; 東ら, 2024）を有明海・八代海等に適用した（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を環境省（2021）の調査データを用いて整備した（図 1）。

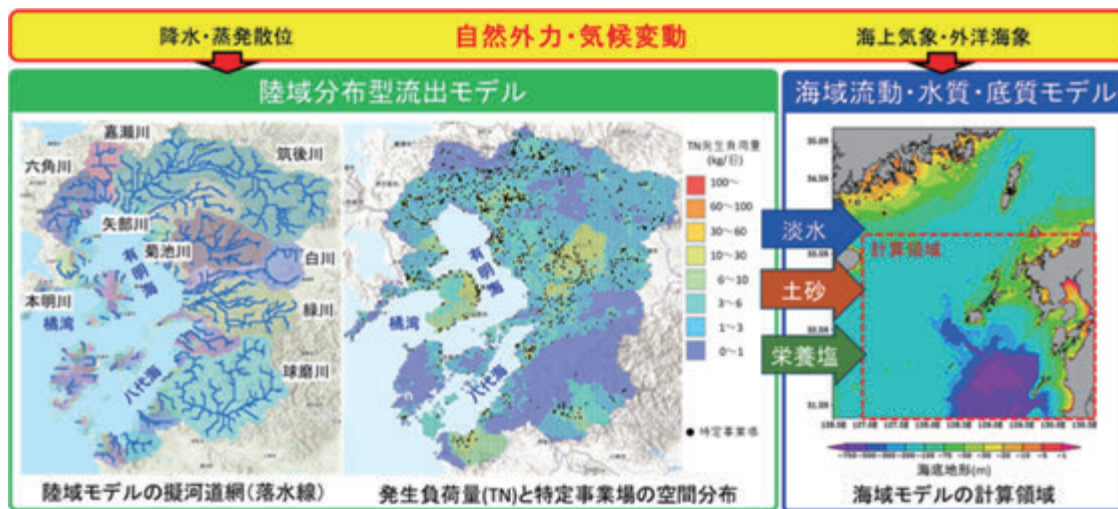


図 1. 有明海・八代海等の陸域－海域モデルの概要。

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（*Eucampia zodiacus* と *Skeletonema marinoi-dohrnii* complex）と渦鞭毛藻 1 種（*Prorocentrum dentatum*）の 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。

陸域-海域モデルの検証と改良を行うため、2009~2020年の12年間を対象に再現計算を実施した。陸上・海上の気象条件には気象庁の解析雨量やメソ数値予報モデルGPV(MSM)、外洋の海象条件には海洋研究開発機構のJCOPE2M等の観測・再解析データを使用した。河川からの流出量、海域の水温・塩分、有機物・栄養塩類の濃度など、得られた計算値と観測値を比較し、モデルの再現性を検討した。

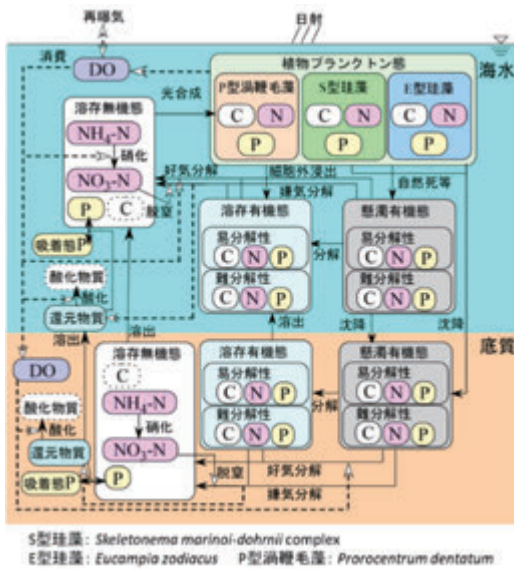


図2. 水質・底質モデルの構造(東ら, 2024)。

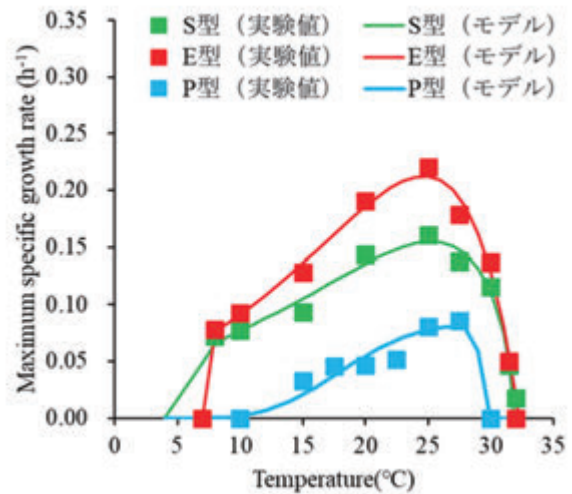


図3. 植物プランクトンの最大比増殖速度と水温の関係(東ら, 2024)。

3.2.3 結果と考察

陸域モデルについては、国土交通省「水文水質データベース」で公開されている一級河川の流量・水質の観測値を用いて再現性を検討した。河川流量の計算値は、出水時のピーク流量をやや過小評価する傾向が見られるものの、全体的には観測値を良好に再現した(図4)。表1に9一級河川の2009~2020年の観測値と計算値の平均流量、および流出波形の再現性の評価指標であるNash-Sutcliffe係数(NS)を示す。NSは一般的に0.5が再現性の閾値とされ、0.7~1.0は再現性が高く、負値は再現性が低いと評価される。白川と嘉瀬川ではNSが0.5を下回っているが、他の7一級河川ではNSが0.7程度以上となっており、本モデルの河川流量の再現性は十分高いことが確認される。白川と嘉瀬川において再現性が低くなった原因については、白川は上流域が広大な緩勾配の阿蘇カルデラであり、そこでの地下水流出をモデルが取扱えていないため、嘉瀬川は流量観測所より上流の6割がダムが集水域となっており、河川流量が貯水池操作の影響を強く受けているためと考えられた。

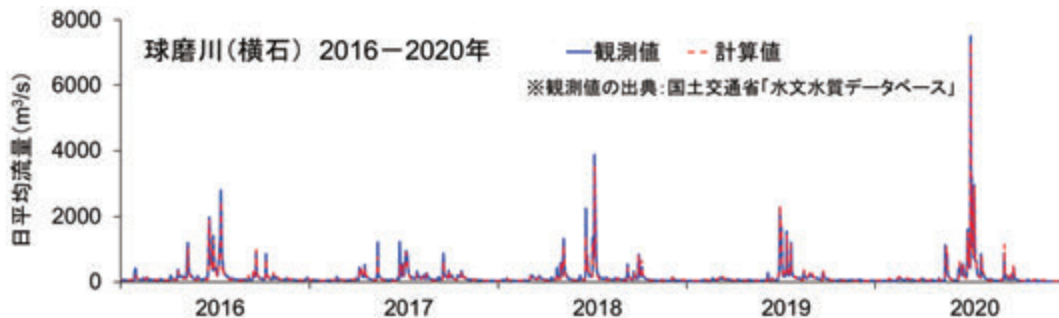


図4. 球磨川(横石)における日流量の計算値と観測値の比較。

表 1. 有明海・八代海等の9一級河川における2009～2020年の日流量の再現性。

一級河川	球磨川	緑川	白川	菊池川	矢部川	筑後川	嘉瀬川	六角川	本明川	9河川
観測所(評価地点)	横石	城南	代継橋	山鹿	船小屋	瀬ノ下	川上	妙見橋	裏山	平均
観測平均流量 (m ³ /s)	143.0	37.3	26.9	30.9	22.5	121.6	14.8	4.6	2.4	44.9
計算平均流量 (m ³ /s)	136.6	43.1	32.7	34.3	25.5	114.2	13.2	4.3	2.0	45.1
Nash-Sutcliffe係数	0.97	0.87	0.29	0.68	0.96	0.95	0.23	0.90	0.90	—

表 2. 2009～2020年における9一級河川のTN流出量の観測値と計算値の比較。

河川名	観測所		平均TN流出量(g/s)				
	流量	水質	観測値*	計算値		差	
				調整前	調整後		
球磨川	横石	横石	45.9	57.8	+11.9	40.9	-5.0
緑川	城南	城南	16.9	19.7	+2.9	15.8	-1.0
白川	代継橋	代継橋	20.8	34.6	+13.8	25.7	+4.9
菊池川	山鹿	山鹿	38.2	74.3	+36.0	45.7	+7.5
矢部川	船小屋	船小屋	15.3	16.3	+1.0	13.3	-2.0
筑後川	瀬ノ下	瀬ノ下	90.7	112.0	+21.3	88.6	-2.1
嘉瀬川	川上	官人橋	7.1	6.1	-1.0	4.7	-2.4
六角川	妙見橋	羽佐間堰	2.6	6.7	+4.1	5.3	+2.7
本明川	裏山	鉄道橋	1.0	1.9	+0.9	1.5	+0.5
9一級河川合計			238.4	329.3	+90.9	241.5	+3.1

*観測値(TN濃度×測定日の日流量)の由来: 国土交通省「水文水質データベース」

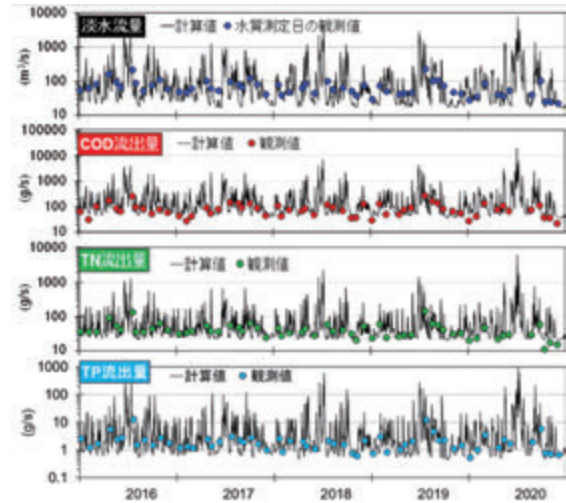


図 5. 2016～2020年における球磨川(横石)の淡水・COD・TN・TP流出量の再現性。

汚濁負荷流出の再現性については、9一級河川合計のTN流出量の計算値が観測値(流量×濃度)の1.4倍と過大に評価される問題が生じた(表2)。発生源別にTN発生負荷量を精査したところ、有明海・八代海等では、畜産系の負荷が生活系+産業系を上回り、全体の35%を占めていたが、TN流出量が過大評価された河川流域は畜産系の負荷が多い傾向が見られた。畜産系の負荷は小規模畜舎が99%を占めていたが、その発生負荷量は家畜頭数をもとに原単位法で求められているため、不確実性が高いと考えられた。試算の結果、小規模畜舎の負荷を50%削減すると、TN流出量の計算値と観測値が概ね一致し、モデルの再現精度向上が確認された(表2、図5)。

海域モデルについては、有明海・八代海等は他の閉鎖性海域に比べて潮位差が大きいことが特長であるため、気象庁より公開されている潮位の観測値と計算値の比較を行った(図6)。本モデルの潮位の計算値は、観測値に見られる地点間の傾向、すなわち外洋(荅北)及び有明海湾口(口之津)では潮位差が小さく、有明海の湾奥(大浦、熊本、大牟田)に向かうにつれて潮位差が大きくなる傾向をうまく再現した。

図7の6断面における正味の通過流量を解析した結果、全体的には時計回りの流れの傾向を示し、有明海湾口では外洋・橘湾から有明海への流入、八代海の八代海湾口と黒之瀬戸では八代海から外洋への流出、両海の接続部では有明海から八代海への流れが卓越した(図8)。有明海と八代海を繋ぐ三角ノ瀬戸では、2024年1月24日10～11時(大潮の下げ潮時)に曳航式ADCPによる断面流速観測を実施しており、有明海から八代海に向かう流量 $4.0 \times 10^3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ($=1.0 \times 10^{10} \text{ m}^3 \text{ month}^{-1}$) の流れが計測された。短時間かつ1回限りの観測ではあるが、モデルの計算と矛盾のない結果が得られた。

海域モデルの水質の再現性については、地方自治体(福岡県、佐賀県、長崎県、熊本県)の水産研究機関の水質観測データを用いて再現性を検討したところ、有明海の冬から春にかけて植物プランクトンのChl. a(クロロフィルa)濃度を過小に、栄養塩のDIN・DIP(無機溶存態窒素・リ

ン) 濃度と底層 DO (溶存酸素量) を過大に評価する問題が生じた。東京湾・伊勢湾・瀬戸内海と異なり、干潮時と満潮時の潮位差が大きい有明海は広大な干潟を有しており、そこでの物質動態、特に植物プランクトンの干満に伴う着底・巻上げや干出・着底時の海底表面における基礎生産の過程をモデルが表現できていないことが原因と考えられた。上記過程を組み込むモデルの改良を行ったところ、水質の再現性が飛躍的に向上することが確認され、有明海全体の物質循環は奥部の干潟域における基礎生産・栄養塩動態が支配的であることが示唆された。



気象庁の潮位観測地点 (気象庁ホームページ潮位表より)

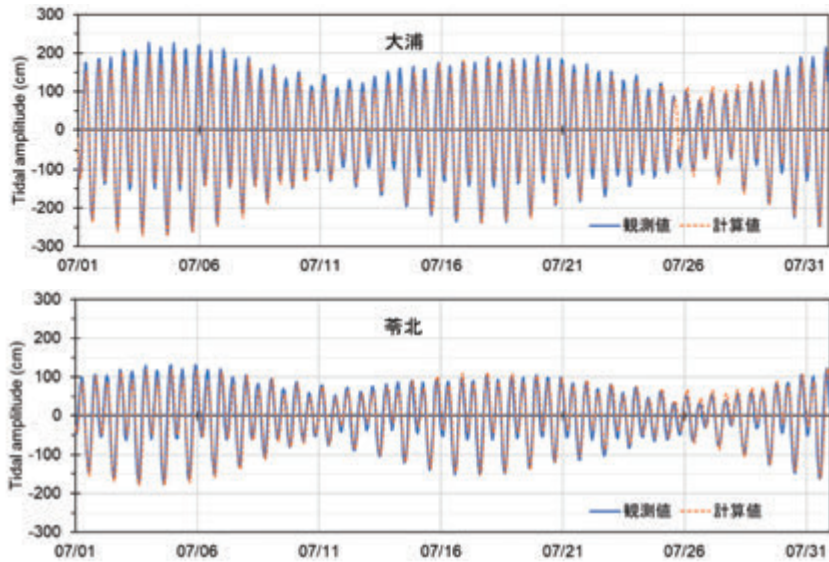


図 6. 有明海とその周辺における2019年7月の毎時潮位の観測値と計算値の比較。

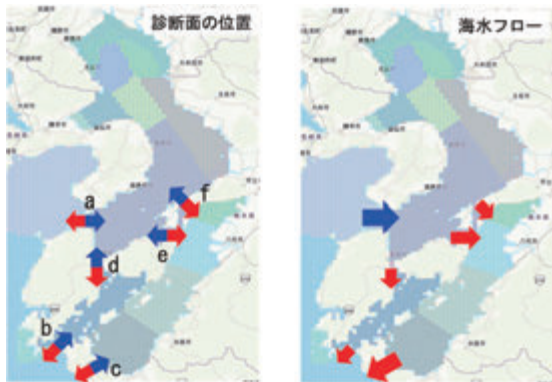


図 7. 海水交換の診断面の位置 (左) と解析結果に見られる平均的流れ (右)。

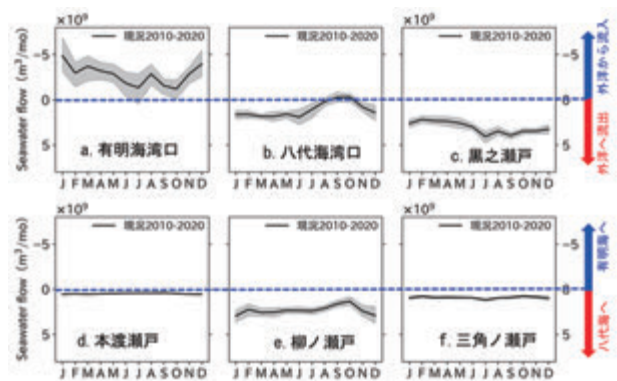


図 8. 2010~2020年の各診断面の正味月別平均流量 (変動幅: 最大-最小区間)。

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、その実施にはいまだ高度な専門的知識・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）を開発することを目的とする。

本研究の GUI は、実際に下水処理場の季別調整運転による栄養塩類管理の現場実証試験を行う特定海域（広島県呉市の広湾等）を具体的事例を対象として、先行開発した瀬戸内海モデルからネスティング影響評価シミュレーションを実施することを想定して設計されており、計算ドメインや栄養塩供給条件の指定、海上気象条件や側方境界条件などの切り出し、シミュレーションの実行、出力結果の可視化といった地方自治体等のユーザーの作業を支援・自動化するツールとなっている。

2023 年度に構築した GUI を含むシステムの全体構成は図 7 に示すとおりであり、一連のユーザー作業に必要な GUI のうち計算領域・地形条件を整備する部分を作成し、動作確認を終了した。ユーザーはクライアント PC からデータ活用社会創成プラットフォーム mdx 上のユーザーインターフェースサーバー（Web サーバー）にアクセスしてブラウザアプリ（GUI）を操作（図 8）する構成となっている。数値シミュレーションについては、mdx 上の GUI 操作・実行命令を通じて国立環境研究所のベクトル機で実施されるが、不測の事態に備えてジョブ投入数・実行数を制限した専用キュー `v_setogui` で行われるように設定されている。

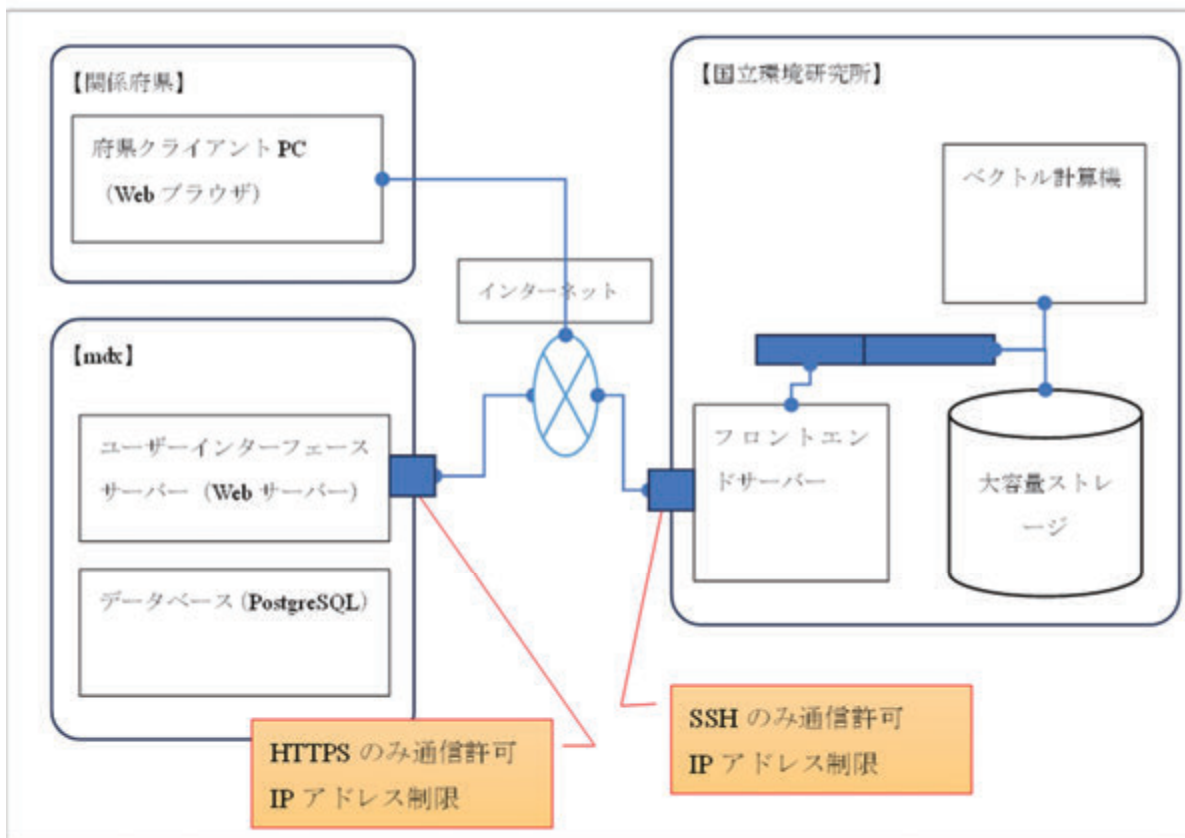


図 7. 地方自治体クライアント PC、ユーザーインターフェースサーバー（mdx）、計算機サーバ（ベクトル機）の接続構成（環境省（2024）令和 5 年度栄養塩類管理計画の水質予測支援に係るユーザーインターフェース構築業務報告書より）。

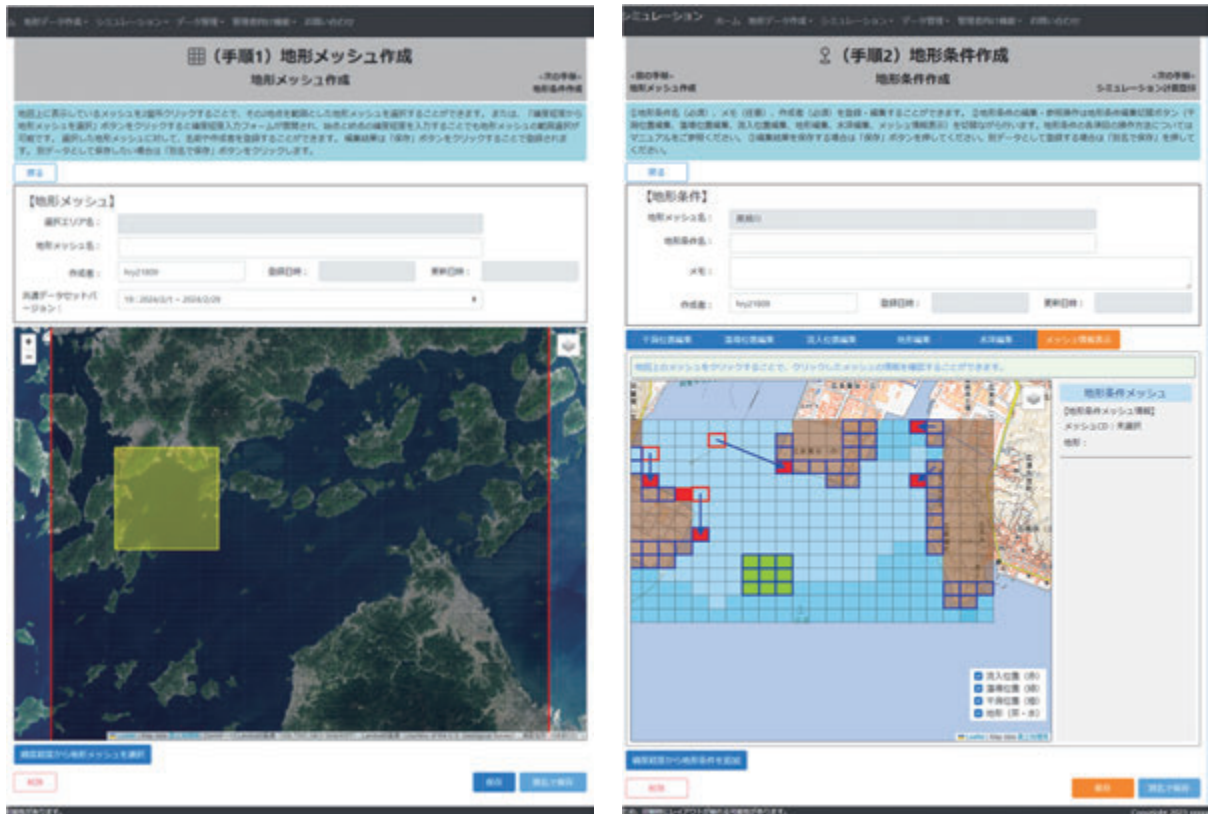


図 8. GUI操作画面の例（環境省（2024）令和5年度栄養塩類管理計画の水質予測支援に係るユーザーインターフェース構築業務報告書より）。

参考文献

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(2024) 令和5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, 中田聡史, 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, 中田聡史, 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/jscej.23-16137>

4. まとめ

有明海・八代海等の陸域淡水・汚濁負荷流出ー海域流動・水質・底質モデルの開発については、畜産業が盛んな九州地方特有の TN 発生負荷量の過大評価や、有明海特有の広大な干潟域を原因とする水質の再現性の低下等の問題が発生したが、収集した過去の調査資料や長年現地の調査研究に携わってきた方々からの助言・知見を得て一定の問題解決に至った。今後、気候変動の影響予測シミュレーションを実施することで、予測事例を拡充するとともに、気候変動影響の海域間

の共通性・相違性等を考究していきたい。GUI 開発については、2024 年度中にプロトタイプ of 構築を完了し、実証試験を進める予定である。

5. 研究成果発表

5.1 誌上発表（査読あり）

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/jscej.23-16137>

5.2 誌上発表（査読なし）

小林志保, 渕真輝, 林美鶴, 東博紀 (2024) 河口部汽水域における難分解性有機窒素の増加と栄養塩フラックスの変化. 月刊海洋, 56 (3), 187-193.

5.3 口頭発表

東博紀 (2023) テーマ 1 : 過去及び現在の気候と海 瀬戸内海の水環境・生態系への気候変動の影響は? 日本地球化学会市民講演会.

東博紀 (2023) 瀬戸内海の窒素循環への気候変動・大気環境変動の影響. 日本水環境学会地域水環境行政研究委員会・大気環境学会地方環境研究所等委員会合同「水・大気環境連携セミナー」.

東博紀 (2023) 気候変動が瀬戸内海の水質・一次生産に及ぼす影響について. 令和 5 年度ひろしま気候変動適応セミナー.

越川海, 東博紀, 河地正伸, 西嶋渉 (2023) 沿岸植物プランクトンの NO₃ 半飽和濃度の再評価. 日本海洋学会 2023 年度秋季大会, 同予稿集, 269.

鬼塚剛, 吉田吾郎, 島袋寛盛, 竹中彰一, 田村稔治, 笥茂穂, 瀬藤聡, 郭新宇, 東博紀 (2024) 瀬戸内海におけるワカメ養殖業の将来予測と適応策. 令和 6 年度春季日本水産学会水産環境保全委員会企画シンポジウム「農林水産業の気候変動影響評価手法と水産分野における将来予測・適応策—水産分野における課題と展望—」, 同予稿集.

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： 温室効果ガスのマルチスケールモデリング

実施年度：
2021年度 ～ 2023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・山下 陽介・佐伯 田鶴・
村上 和隆・亀井 秋秀・山田 恭平

1. 研究目的

本研究では、大気輸送モデルを用いて温室効果ガス（GHG）の大気中の動態解明や吸収・排出量の推定を行い、温暖化予測の不確定性低減やGHG排出削減施策に資する知見を創出することを目的とする。特に、都市・国スケールから地球規模に至る空間的に幅広いスケールのGHGの動態を把握するため、高解像度モデリングおよび高度な逆解析・同化技術の開発を行う。併せて、温室効果ガス観測技術衛星プロジェクト（GOSATシリーズ）に必要なモデル開発も行い、衛星観測のデータ質向上、また、衛星観測データを利用した研究も行う。

2. スーパーコンピュータ利用実績

1.1.2.1 計算機利用時間（2023年4月1日～2024年3月31日）

CPU 時間	v_debug	:	204.2 [VE・hours]
	v_normal	:	791,157.8 [VE・hours]
	計	:	791,362.0 [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）を用いた。NICAM-TMを用いた全球14 km格子の高解像度計算では8つの論理ホストを用いて320プロセスのMPI計算を行ない、2年間の積分を行った（1ヶ月積分におよそ24時間を要する）。

3. 研究結果

3.1 NISMON-CO₂/CH₄によるCO₂とCH₄の長期逆解析

GHG逆解析システムNISMON-CO₂の最新の設定（Niwa et al., 2022）を用いて1990年から2022年までの長期のCO₂逆解析を行い、その長期逆解析の結果を、国立環境研究所の地球環境データベースから公開（Niwa, 2020）するとともに、Global Carbon Project (GCP)による世界炭素収支の統合解析（GCB2023: Friedlingstein et al., 2023）に提出した。GCPでは、欧米中の研究機関による複数の逆解析との比較のほか、ボトムアップ手法から得られたCO₂収支結果との比較が行われた（図1）。

また本研究では、NISMON-CO₂をCH₄にも適用した逆解析システムNISMON-CH₄を新たに開発し、2020年から大気濃度の上昇速度が全球的に増加したイベントに着目してCH₄の逆解析を行った。ここでは、地上観測を用いた場合、地上観測と航空機観測を用いた場合、また、GOSAT NIES L2プロダクト（v2.95/2.96）を用いた場合の3通りの逆解析を実施した。これらの3つの逆解析が

ら得られたCH₄放出変動の傾向は概ね一致しており、2020–2022年の3年間で、平均して、熱帯地域（15°S–10°N）で10–18 Tg CH₄ yr⁻¹、北半球低緯度（10–35°N）でおよそ20 Tg CH₄ yr⁻¹の放出増加が起きたこと推定された。また、この2つの緯度帯のうち北半球低緯度の放出増加が全球規模で観測された濃度の急上昇に寄与しており、具体的には南アジアやインドシナ半島の地域などが寄与していたことが示唆された（図2）。また、この傾向は、3つの逆解析で共通してみられた。さらに、放出の起源別の推定値から、これらの放出増加は微生物起源（湿地、水田を含む農業、埋立地など）が大きな割合を占めていることがわかった。

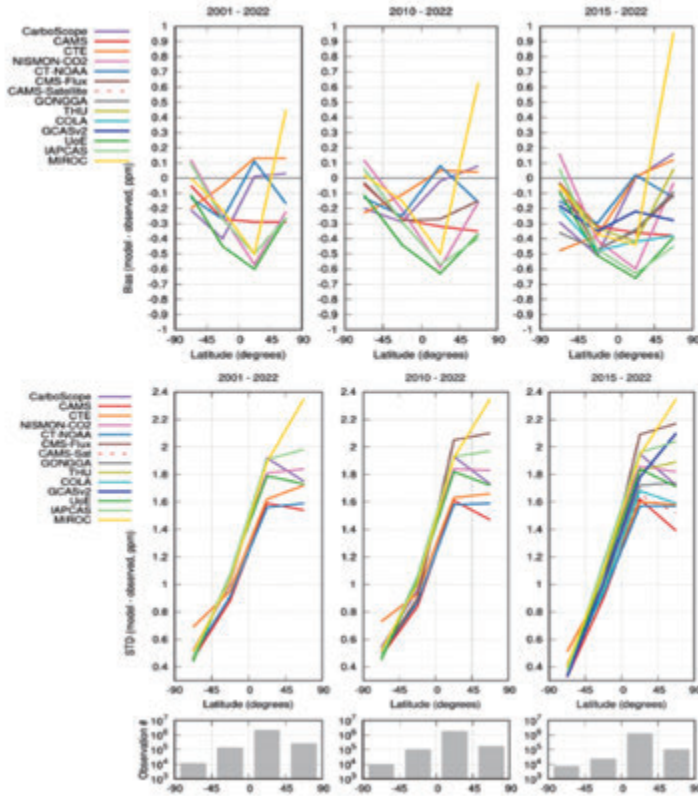


図1. GCB2023で行われた複数の逆解析の比較解析。逆解析で得られた大気CO₂濃度値と飛行機観測との比較（緯度帯毎、年代毎）。上段は観測からの系統的なずれ、下段は観測との差の標準偏差を示す。NISMON-CO₂の結果はマゼンタで示す。

（Friedlingstein et al., 2023のFigure S4より引用）

3.2 高解像度NICAM-TMによる東京CO₂放出量推定

東京スカイツリー（TST）における大気観測データを用いて、東京圏からのCO₂放出量を推定するため、高解像度（格子間隔約14km）のNICAM-TMを用いたタグ付きトレーサー実験を実施した。NICAM-TMによるCO₂濃度の計算は南鳥島や波照間島といった人為起源CO₂の影響の小さいサイトによく観測を再現したが、NICAM-TMによるバックグラウンド濃度を用いて求めた東京圏（東京を中心とした半径50km圏内）から排出されたCO₂濃度（CO₂tk）に関してはおおむね観測を再現するものの、過大評価を示す場合があった（図3b）。この過大評価傾向は低風速において顕著である一方（図3c）、風速の中央値である5.5ms⁻¹以上の高風速時のみを抜き出すと過大評価は非常に少なく、NICAM-TMのCO₂tkは観測をよく再現していた（図3d、赤線）。特に再現性が良い風速7ms⁻¹以上でのNICAM-TMと観測の一次近似直線の傾きは0.93 ± 0.08であり、NICAM-TMのCO₂フラックスに用いた化石燃料排出データインベントリGridded Fossil Emissions Dataset（GridFED）による排出が東京圏のCO₂を若干過小評価していることがわかった。この傾きを用いて補正した東京圏CO₂放出量は、79.5 ± 6.6 Tg C/yearであった。この値は似た領域での排出量を推定した先行研究と比較しても矛盾しない（図3e）。以上の結果からTSTで観測される濃度変動データと高解像度のタグ付きトレーサーによるモデル計算が東京圏のCO₂放出量推定に対して有効であることを示すと同時に、定量的に放出量を見積もることができた。

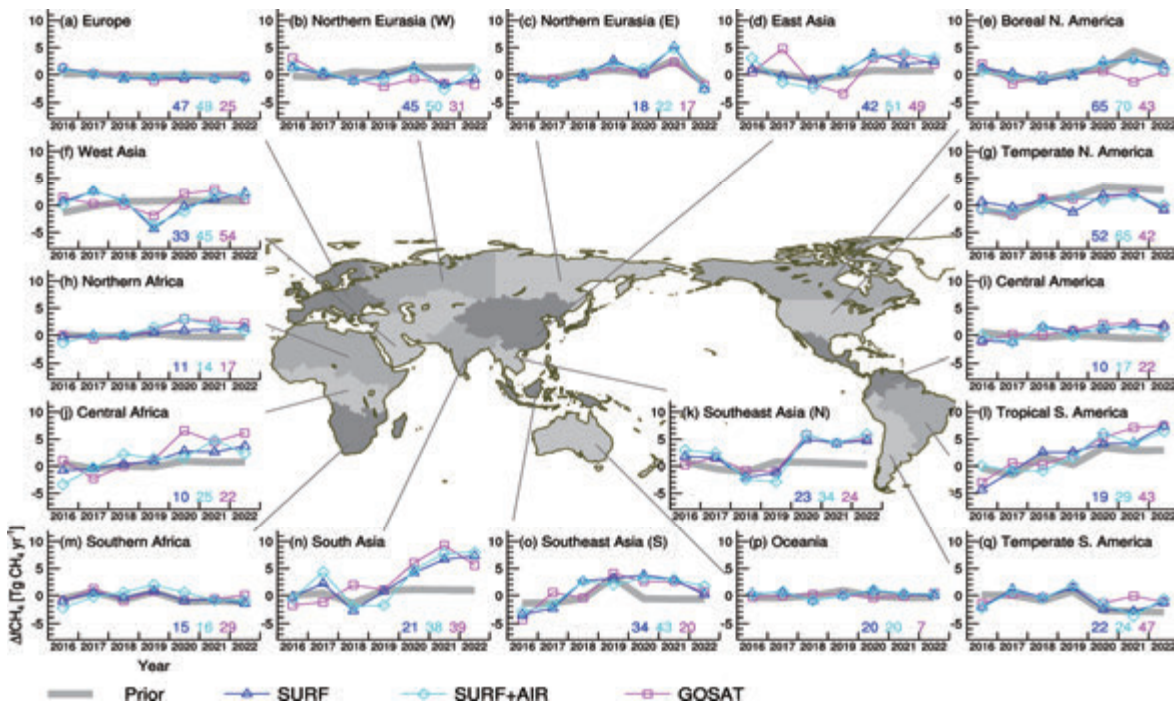


図2. NISMOM-CH₄によるCH₄逆解析の結果。各地域についてCH₄放出量の時系列（2016–2019年間の平均値からの偏差）を示す。初期値（Prior: 灰色太線）、地上観測のみを用いた場合（SURF: 青三角）、地上観測と航空機観測を用いた場合（SURF+AIR: 水色ダイヤ）、GOSATを用いた場合（マゼンタ四角）。

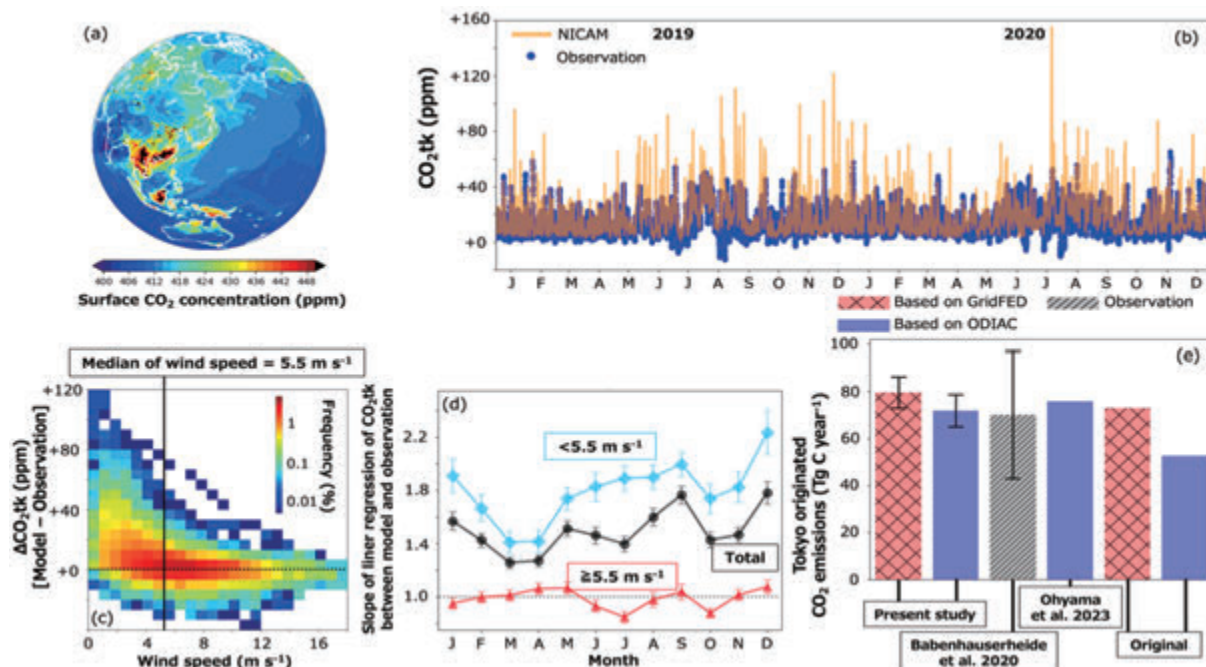


図3. NICAM-TMによる全球での大気CO₂濃度計算の例（地表面濃度分布、2019年1月16日00UTC）。
 (a) 2019-2020年の東京圏から排出されたCO₂濃度（CO₂tk）。
 (b) 風速とCO₂tkのモデル観測差の二次元頻度分布。
 (c) 風速の中央値である5.5ms⁻¹で分類した観測とモデルのCO₂tkの近似直線の傾き。
 (d) 本研究で推定した東京圏のCO₂排出フラックスと似た領域での先行研究の値の比較。
 (e)

3.3 GOSAT-2 Level 4プロダクトについて

昨年度まで取り組んできた温室効果ガス観測技術衛星2号(GOSAT-2)全球CO₂吸収排出量(Level 4A)および全球CO₂濃度(Level 4B)プロダクト(V01.02)の一般公開・提供が2024年3月に始まった。このプロダクトは、GOSAT-2主センサー・フーリエ変換分光計TANSO-FTS-2で測定した分光放射輝度から導出したCO₂カラム平均濃度(FTS-2 SWIR Level2 カラム平均気体濃度プロダクト Ver. 02.00)を観測データに使用し、逆解析システムNISMOM-CO₂を用いて全球CO₂吸収排出量および大気CO₂濃度場を推定したものである。本プロダクトは、GOSAT L4プロダクトで行われた地上観測データによる衛星観測データの誤差補正等を敢えて行わず、FTS-2 SWIR Level2プロダクトのみを使用して全球CO₂吸収排出量推定を行っている。このため、異なる衛星観測データおよび/または地上観測データに基づく全球CO₂吸収排出量推定結果とGOSAT-2 Level4プロダクトを比較することにより、FTS-2 SWIR Level2プロダクトが全球CO₂吸収排出量をどの程度制約し得るのかについての情報を提供することが可能であると考えられる。

GOSAT-2 Level4プロダクトとの比較には、GOSAT CO₂カラム平均濃度および地上観測データから全球CO₂吸収排出量を推定したGOSAT Level4プロダクトと、地上観測データのみで推定を行ったNISMOM-CO₂ ver. 2021.1を使用した。この比較解析からは、サハラ砂漠やゴビ砂漠等、低中緯度帯に位置する地表面反射率が高い領域ではGOSAT-2 Level4プロダクトはCO₂放出量を高め、一方で北半球高緯度帯の陸域ではCO₂吸収量を高め、推定している傾向が示されている。これはつまり、同領域上におけるFTS-2 SWIR Level2プロダクトに大きな誤差が含まれている可能性が高いことを示唆している。現在は、FTS-2 SWIR Level2プロダクトの誤差解析を進めるとともに、同プロダクトの問題解決に向けた原因究明に取り組んでいる。また、全球CO₂吸収排出量推定のみならず、全球CH₄吸収排出量プロダクト公開に向けた準備を進めている。

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

現在、2024年度の打ち上げに向けて、温室効果ガスを観測する衛星として国内3機目となるGOSAT-GWに関する準備を行っている。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には、先験情報として高精度なGHG・エアロゾルの全球濃度分布が必要となる。本研究で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・予測システムの開発を進めた。今年度は解析・予測精度の向上を目指し、プログラム最適化による高速化と結果検証の重点化を行なった。結果検証では、GHG解析・予測結果のより詳細な比較を実施するために、温室効果ガス世界資料センター(WDCGG)からの定期的なデータダウンロードとシミュレーション結果との視覚的な比較の実施を可能にした。また、予測データの比較対象として、再解析データだけでなく、AI気象予測モデルであるFourCastNetを用いた予測を実行した。その結果、一週間以内程度の予測範囲であれば、いくつかの主要な変数に対して再解析データに匹敵する予測性能を発揮することが明らかになった。このデータ駆動型予測モデルを用いることにより、再解析データがまだ提供されていない期間の比較が可能になるため、定期的な予測計算実行を今後予定している。今後は、解像度向上による予測性能の向上を行ない、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、昨年度は全球56 kmの解像度で二酸化窒素(NO₂)のシミュレーションを行った。本年度は、NICAM-Chemと衛星観測を組み合わせ、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(図4)。ここでは、気象条件は実際の年のものに合わせている一方、NO₂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。月別に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。今後、メガシティなど都市域を中心に、NO₂排出量推定の自動化に取り組む。

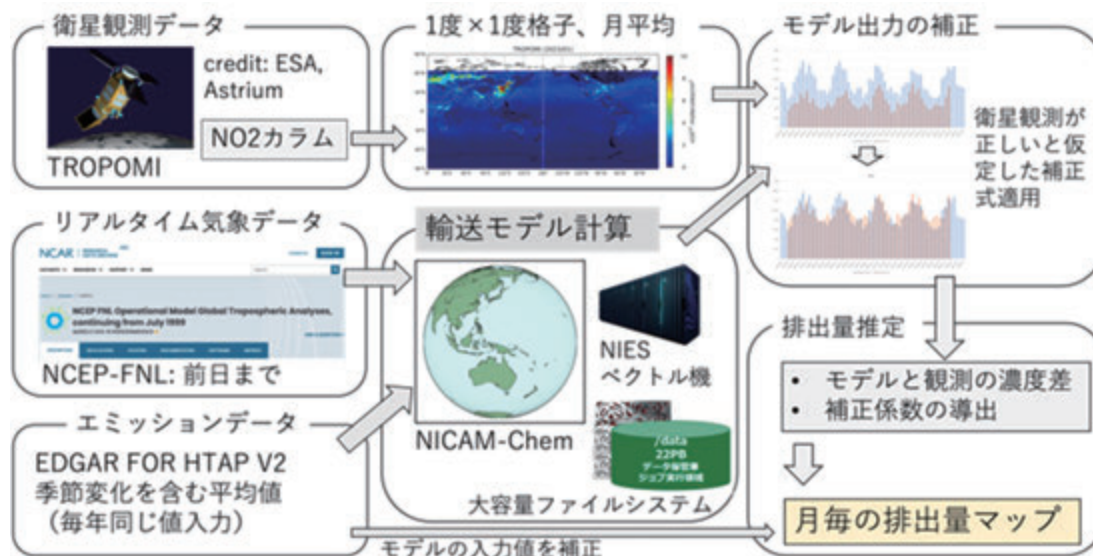


図4. 簡易的なNO₂排出量推定手法の概念図

参考文献

- Niwa (2020) Long-term global CO₂ fluxes estimated by NICAM-based Inverse Simulation for Monitoring CO₂ (NISMON-CO₂), ver.2021.1, Earth System Division, NIES, <http://doi.org/10.17595/20201127.001>
- 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>

4. まとめ

本研究では高解像度シミュレーション、逆解析・同化などモデル中心としたものまで、幅広い形で大気モデルNICAMを用いてGHG/SLCFに関する課題に取り組んだ。東京圏からのCO₂放出量推定の際に行った高解像度NICAMのシミュレーション実験は、320プロセスを用いる大規模なMPI計算によるものであり、大型計算機ならではのものである。また、GOSATに関してプロダクト作成や定常解析のためのシステム開発に取り組んだ。これらは、衛星データの精度向上、また高度なプロダクトの生成に資するものである。

5. 研究成果発表

5.1 誌上発表(査読あり)

- Friedlingstein P., et al. (2023) Global Carbon Budget 2023, *Earth Syst. Sci. Data*, 15, 5301-5369. <https://doi.org/10.5194/essd-15-5301-2023>
- Kodama C., Yashiro H., Arakawa T., Takasuka D., Matsugishi S., Tomita H., (2024). Parallelized Remapping Algorithms for km-scale Global Weather and Climate Simulations with Icosahedral Grid System. In *Proceedings of the International Conference on High Performance Computing in Asia-Pacific Region (HPCAsia '24)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 35–46. <https://doi.org/10.1145/3635035.3635040>
- Ma J., Remaud M., Peylin P., Patra P., Niwa Y., Rodenbeck C., et al. (2023), Intercomparison of atmospheric carbonyl sulfide (TransCom-COS): 2. Evaluation of optimized fluxes using ground-based and aircraft observations, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 128, e2023JD039198, <https://doi.org/10.1029/2023JD039198>
- Takasuka D., Kodama C., Suematsu T., Ohno T., Yamada Y., Seiki T., Yashiro H. et al. (2024). How can we improve the seamless representation of climatological statistics and weather toward reliable global K-scale climate simulations? *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 16, e2023MS003701. <https://doi.org/10.1029/2023MS003701>
- Yamashita Y., Akiyoshi H., Inoue M. (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>

5.2 誌上発表(査読なし)

- 山下陽介, 秋吉英治, 井上誠 (2024) 大アンサンブル実験による海表面条件の南極渦や波伝播への影響の解析, *月刊海洋*, 56(4), 229–236. <https://doi.org/10.15083/0002009834>

5.3 口頭発表

- 山田恭平, 丹羽洋介, 寺尾有希夫, 遠嶋康徳, 坪井一寛, 村山昌平, 石島健太郎 (2023) 東京スカイツリー観測を用いた東京圏二酸化炭素排出推定, 日本気象学会2023年度秋季大会
- 丹羽洋介, 五藤大輔, 八代尚, 池田恒平, 山下陽介, 打田純也, 山田恭平, 照井健志, GHG-SLCF統合解析のためのモデリング共通基盤の構築にむけて, 第28回大気化学討論会, 長崎 (2023年11月)
- 佐伯田鶴, 吉田幸生, 河添史絵, 亀井秋秀, 八代尚, 菊地聡, 松永恒雄 (2023) GOSATシリーズの衛星データ定常処理用地上システムの開発・運用. 第28回大気化学討論会, 同予稿集
- 山下陽介, 秋吉英治, 井上誠 (2023) 大アンサンブル実験による海表面条件の南極渦や波伝播への影響の解析. 東京大学大気海洋研究所大槌沿岸センター共同利用研究集会
- 山下陽介 (2024) NICAM-Chemをベースとした簡易NO₂排出量推定手法の開発. 2023年度NICAM開発者会議
- 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 (2023) 衛星観測と化学輸送モデルによる簡易的なNO₂排出量推定手法の開発. 第28回大気化学討論会, 同予稿集
- Akiyoshi H., Kadowaki M., Yamashita Y., Nagatomo T. (2023) Dependence of column ozone on future ODSs and GHGs in the variability of 500-ensemble members. *CCMI 2023 Science Workshop*
- Yamashita Y., Akiyoshi H., M. Inoue (2023) The role of sea-surface conditions in Antarctic polar-vortex and associated wave forcing with a multi-member ensemble simulation of the CCSR/NIES-MIROC3.2 CCM. *CCMI 2023 Science Workshop*

- Tanimoto H., Matsunaga T., Sugita T., Yashiro H., Morino I., Saito M., Ohyama H., Inomata S., Ikeda K., Someya Y., Fujinawa T., Yoshida Y., Yamashita Y., Mueller A., Frey M., Lim H., Xu H., Saeki T., Saigusa N., Kanaya Y., Sekiya T., Patra P., Takigawa M., Yamaguchi M., Bisht J., Kasai Y., Sato T., Nakamura A. (2023) The GOSAT-GW satellite mission: Potential roles in quantifying greenhouse gases and air pollutants emissions from local to global scales. The 28th IUGG General Assembly
- 山下陽介, 秋吉英治, 井上誠 (2023) The CCSRNIES CCM simulations for the variations of wave propagation and Antarctic polar vortex strength responded to the sea surface conditions. 日本地球惑星科学連合2023年大会, 同予稿集
- 齊藤誠, 丹羽洋介, 吉田幸生, 亀井秋秀, 村上和隆, 佐伯田鶴, 八代尚, 松永恒雄 (2024) GOSAT-2 衛星観測による全球CO₂・CH₄収支推定. 日本農業気象学会2024年全国大会
- 八代尚 (2023) 地球デジタルツイン要素技術の開発, 衛星地球観測コンソーシアム (CONSEO) 地球デジタルツイン勉強会, 東京, 2023年9月14日
- Yashiro, H., (2023) Model simulation and data science ^[1]to understand the global greenhouse gas cycle, EURECOM seminar, Antibes, Jun. 30, 2023
- Yashiro, H., (2023) Development strategy of NICAM, GSRM mini workshop, Yamanakako, May. 11-12, 2023
- Yashiro H., Fujinawa T., Goto D., Ikeda K., Inomata S., Kamei A., Kawazoe F., Kikuchi S., Morino I., Murakami K., Niwa Y., Noda H., Ohyama H., Saeki T., Saito M., Someya Y., Sugita T., Tanimoto H., Yamashita Y., Yoshida Y., Zeng J., Matsunaga T. (2023) Observation of global CO₂ and CH₄ by GOSAT series satellites and our efforts toward observation by GOSAT-GW. The Workshop on Observations within the Global Greenhouse Gas Watch (GGGW), Geneva, Oct. 3-5, 2023 (Poster)
- Yashiro H., Niwa Y., Goto D., Someya Y., Saeki T., Matsunaga T. (2023) Development of short-term prediction system for greenhouse gases and SLCFs linked with GOSAT-GW TANSO-3 observations. 19th International Workshop on Greenhouse Gas Measurements from Space (IWGGMS-19), Paris, Jul. 4-6, 2023 (Poster)
- Yashiro H., Terasaki K., Kawai Y., Kudo S., Miyoshi T., Imamura T., Nakano M., Kodama C., Satoh M., Tomita H. (2023) Application Optimization and Scalability of NICAM-LETKF on Fugaku. The Platform for Advanced Scientific Computing (PASC) 2023 Conference, Davos, Jun. 26-28, 2023 (Oral)
- Matsunaga, T., Saito, M., Saeki, T., Takagi, H., Murakami, K., Maksyutov, S., Niwa, Y., Tanimoto, H., Yashiro, H., and Yamashita, Y. (2023) "Global and regional CO₂ and CH₄ flux distributions derived from the inversion analyses of GOSAT series data and their temporal variations", Proc. SPIE 12729, Sensors, Systems, and Next-Generation Satellites XXVII, 127290F (19 October 2023); <https://doi.org/10.1117/12.2680378>

5.4 その他(書籍等)

- Yamashita Y., Akiyoshi H., Inoue M. (2022) 1000-member ensemble simulation output from NIES Chemistry-Climate Models for investigating Southern Hemisphere Stratospheric response to the sea surface temperature. ver.1.1.0, Earth System Division, NIES. <https://doi.org/10.17595/20221215.001> (2023.10.18 Version 1.1.0 was released)

6. 連絡先

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4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

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、SCALE-Chem

2. スーパーコンピュータ利用実績

1.1 2.1 計算機利用時間 (2023年4月1日～2024年3月31日)

CPU 時間	v_debug	:	9.4 [VE・hours]
	v_normal	:	217,591.2 [VE・hours]
	計	:	217,600.6 [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、全球及び領域スケールを対象に並列計算を行なっている。また、都市や地域の細かい空間スケールの大気汚染物質シミュレーションに関してはSCALEを用いる。

3. 研究結果

3.1 概要

昨年度までに開発したNICAM-Chemに2次元変分法(2DVar)を導入したNICAM/Chem-2DVarを用いて、エアロゾル同化を実施した。複数の衛星データに加えて、地上観測AERONETおよびSKYNETから得られたエアロゾル情報も統合した2次元量のエアロゾル光学的厚さ(Aerosol Optical Thickness: AOT)も同化した。その結果、衛星観測データだけではなく地上観測データも利用することで、比較対象と

した日本でのPM_{2.5}濃度再現性が向上することが示された。これは、世界的に利用されているNASAのMERRA-2やECMWFのCAM5といったエアロゾル再解析データにも匹敵するものであった。並行して、近年開発されたSCALE-SPRINTARS（領域気象モデルSCALEとオンライン結合したエアロゾルモデルSPRINTARSの結合モデル）を用いて、日本の長野県におけるエアロゾル再現性を調べた。その結果、AOTとPM_{2.5}濃度を概ね再現できることが確かめられた。

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は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って、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えず、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2024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 2DVarによるエアロゾル同化

本課題では、これまでNICAM-Chem (e.g., 本年度誌上発表論文であるGoto et al., 2024) と様々なエアロゾル衛星成果物を用いて、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）によるエアロゾルデータ同化を行ってきた（Dai et al., 2019; Cheng et al., 2019）。しかし、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10倍近くの計算資源を必要とする。そこで、2020-2022年度で実施した国立環境研究所所内公募課題A（代表：五藤大輔）と連携して、計算コストが数%程度しか増加しない、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）によるエアロゾル同化手法をNICAM-Chemに導入した（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、昨年度までは、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であった。今年度は、これに加えて、地上観測AERONET (Holben et al., 1998) およびSKYNET (Nakajima et al., 2020) から得られたエアロゾル情報も統合したAOTを用いた。利用可能なAOTを同時に同化すると、地表面付近でのPM_{2.5}濃度の再現性がどの程度向上するかを調べた。比較対象は、静止気象衛星ひまわりのAOTの恩恵を最大限受けられる領域で、観測データが利用しやすい日本とした。地表面付近でのPM_{2.5}濃度データは、環境省大気汚染物質広域監視システム (AEROS) のデータを用いたが、モデル評価のために0.25度格子にデータ変換したものをを用いた。そして比較対象場所は、日本の全国5地域 (札幌付近、仙台付近、東京・埼玉付近、大阪・京都付近、福岡付近) とした。詳細は論文 (本年度誌上発表論文であるGoto et al., 2024b) に記載がある。

3.3.2 SCALE

領域気象モデルSCALE (Nishizawa et al., 2015; Sato et al., 2015) とオンラインエアロゾル輸送モデルSPRINTARS (Takemura et al., 2005) の結合モデル (SCALE-SPRINTARS) を用いて、エアロゾルシミュレーションを実施した。対象は2020年春季 (2020年3月1日から23日) の長野県とした。この選定理由は集中観測 (DRAGON-JALPS) が実施され、利用可能なエアロゾル観測データが豊富であるためである。SCALE-SPRINTARSのモデル解像度は5 kmとした。本研究ではSCALE-SPRINTARSの基本的なモデル性能を調べることを主目的である。

3.4 結果

3.4.1 2DVarによるエアロゾルデータ同化

AOT同化によって地表面付近のPM_{2.5}濃度がどの程度再現されるかを調べた。図1は、3月30日から31日の強い高濃度ピークを含む、2021年3月28日から4月1日までの期間において、日本の5つの選択された地域における地表面PM_{2.5}濃度の時間的変化を示している。北日本と東日本では、AOT同化後によって地表面PM_{2.5}濃度の再現性が悪化したが、特に福岡付近ではAOT同化によって地表面PM_{2.5}濃度の再現性が改善したことがわかった。参考データであるNASA/MERRA-2、ECMWF/CAMS、領域モデルWRF-CMAQの結果は概ね良好な結果を示したが、CAMSは過大評価傾向、WRF-CMAQは過小評価傾向が見られた。3月末の過大評価傾向は、モンゴルや中国ゴビ砂漠で発生したダストが日本に運ばれたのだが、そのダストが稀に見る大規模なダストであったため、モデルでそのダストをうまく再現することができなかったからだと考えている。

次に、衛星と地上の両方のAOT観測結果をデータ同化したNICAM/2DVarの結果 (NICAM/2DVar+Fullと記載) および地上AOTのみをデータ同化したNICAM/2DVarの結果 (NICAM/2DVar+OnlyG) も用いて、地上PM_{2.5}濃度の観測結果とシミュレーション結果を比較検証した (図2)。この結果から、地上観測のみのAOTを同化すると、福岡付近以外では衛星のみのAOTの同化よりも、相関係数 (CORR) 値が増加し、RMSE値が減少し、規格化平均バイアス (NMB) 値が減少したことがわかった。これは、図1で見られるように、衛星で得られたAOTを同化しても地上PM_{2.5}濃度の再現性が向上しなかったことも一因である。福岡付近は、地上AOT観測のみの同化よりも、衛星と地上の両方のAOT観測を利用した同化の方が、地上PM_{2.5}濃度再現性は良かった。特に、NICAM/2DVar+Fullの結果は、福岡付近では少なくとも相関は非常に良く、他の地域では相関が非常に良く、RMSEもNMBも小さかった。NICAM/2DVar+FullあるいはNICAM/2DVar+OnlyGの相関係数はMERRA-2およびCAMS値より劣っていたが、NICAM/2DVar+Full結果のRMSEおよびNMB値はMERRA-2およびCAMSよりも優れていた。この理由としては、各モデル間ではエアロゾルを外部混合していると仮定をしているのに対して、NICAMでは一部の有機炭素エアロゾルと一部の黒色炭素エアロゾルが内部混合していると仮

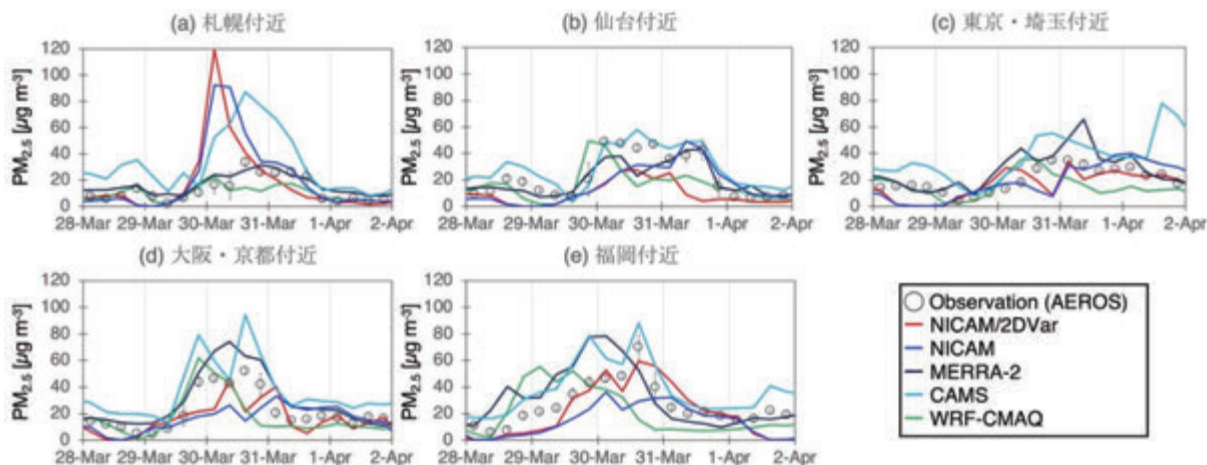


図1. (a) 札幌付近、(b) 仙台付近、(c) 東京・埼玉付近、(d) 大阪・京都付近、(e) 福岡付近における各種推定による地表PM_{2.5}質量濃度 [$\mu\text{g m}^{-3}$] の時間変化。2021年3月28日から4月1日までの期間である。この推定には、地上観測 (AEROS)、NICAM/2DVar、NICAM、および3つのモデル参照結果 (MERRA-2、CAMS、WRF-CMAQ)。この元データはGoto et al. (2024b) からの引用である。

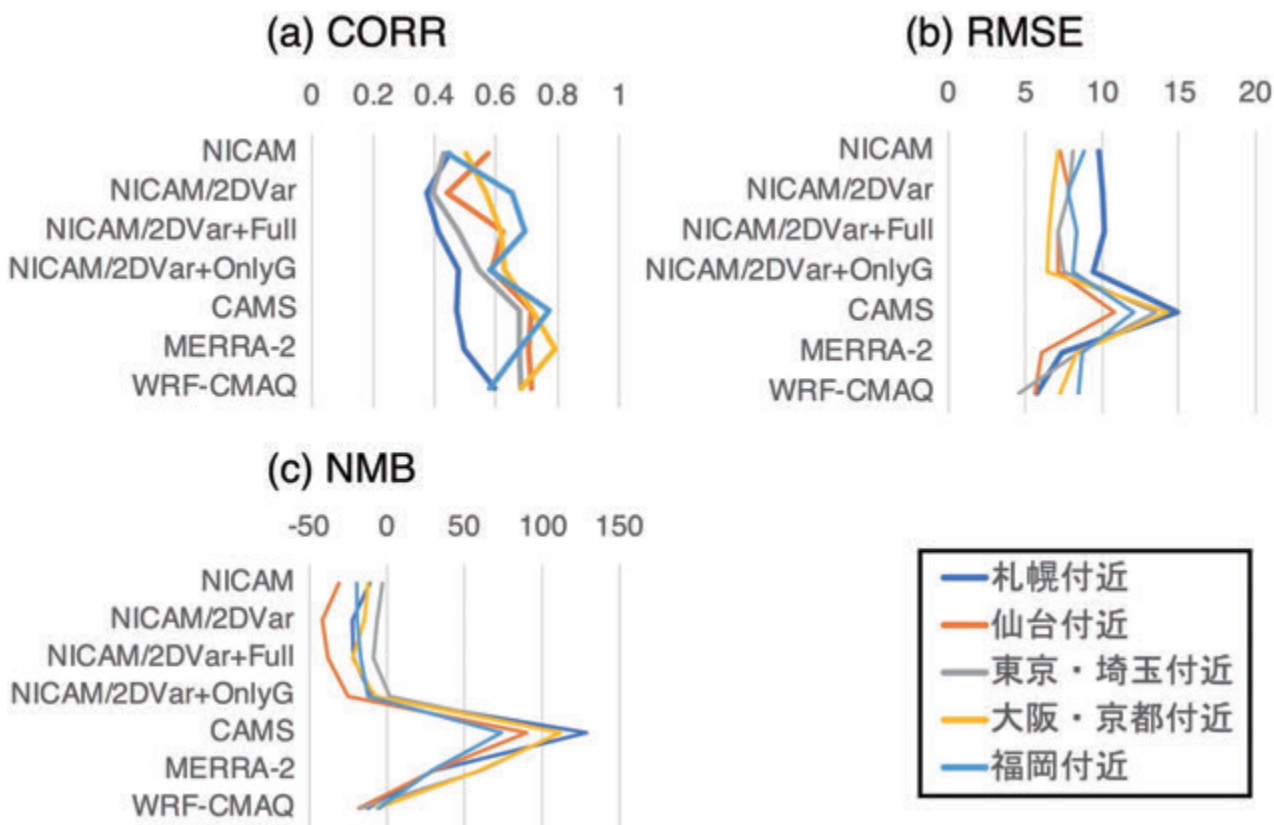


図 2. 日本の AEROS サイトを含んだ5つの地域 (約 $1^\circ \times 1^\circ$) における地表面 PM_{2.5} 質量濃度 [$\mu\text{g m}^{-3}$] の統計変数 ((a)CORR、(b)RMSE、(c)NMB) の値。対象期間は2021年3月1日から4月30日までの2ヶ月間。この元データはGoto et al. (2024b) からの引用である。

定していることである。これは、黒色炭素の一部を内部混合であると仮定することによって、粒子の光学特性が大きく変化し、同じ質量の場合に消散係数の値が大きくなることから、AOTが同程度である場合にはPM_{2.5}質量濃度はNICAMの方が小さくなる傾向が出ることになる。差が生じるその他の要因としては、気象場再現性の違い、同化に用いた観測データの違い、エアロゾル鉛直分布再現性の違い、用いたエアロゾル排出インベントリの違いが複雑に関係している。以上のことから、衛星と地上の両方のAOTを使用した2DVar法でNICAMによって計算されたエアロゾルシミュレーション結果は観測結果と非常に近い結果が得られ、既存のエアロゾル再解析(MERRA-2 および CAMS) データセットと同等であることが示唆された。

3.4.2 SCALE

図は省略するが、AOTと地表面付近のPM_{2.5}濃度の日別変動は、SCALE-SPRINTARSが観測結果を概ね再現できた。このことからSCALE-SPRINTARSがエアロゾル輸送モデルとして十分に利用できる状態であることがわかった。しかし、日によっては過大評価傾向も見られ、AOTとPM_{2.5}濃度が共に過大評価していた。このようなモデルと観測の差が大きい事例に注目し、モデル改善を進めていきたい。

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. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 19, 13445-13467, [doi:10.5194/acp-19-13445-2019](https://doi.org/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. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 11(3), 680-711, [doi:10.1029/2018MS001475](https://doi.org/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>
- Nakajima, T., Campanelli, M., Che, H., Estellés, V., Irie, H., Kim, S.-W., Kim, J., Liu, D., Nishizawa, T., et al. (2020). An overview of and issues with sky radiometer technology and SKYNET, *Atmos. Meas. Tech.*, 13, 4195-4218, <https://doi.org/10.5194/amt-13-4195-2020>
- Nishizawa, S., Yashiro, H., Sato, Y., Miyamoto, Y., Tomita, H. (2015). Influence of grid aspect ratio on planetary boundary layer turbulence in large-eddy simulations. *Geosci. Model Dev.*, 8(10), 3393-3419. <https://doi.org/10.5194/gmd-8-3393-2015>
- Sato, Y., Nishizawa, S., Yashiro, H., Miyamoto, Y., Kajikawa, Y., Tomita, H. (2015). Impacts of cloud microphysics on trade wind cumulus: which cloud microphysics processes contribute to the diversity in a large eddy simulation? *Prog. Earth Planet. Sci.*, 2(1), 23. <https://doi.org/10.1186/s40645-015-0053-6>
- 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>
- Yumimoto, K., Tanaka, T. Y., Oshima, N., Maki, T. (2017) JRAero: the Japanese Reanalysis for Aerosol v1.0, *Geoscientific Model Development*, 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、昨年度までに開発したNICAM/Chem-2DVarを用いて、全球エアロゾル同化を実施した。複数の衛星データを統合したものに、地上観測から得られたエアロゾル情報も統合した2次元量のAOTも同化した。その結果、比較対象とした日本でのPM_{2.5}濃度再現性は、世界的に利用されているNASAのMERRA-2やECMWFのCAM5といったエアロゾル再解析データにも匹敵するものであった。したがって、NICAM/Chem-2DVarで利用可能な様々なエアロゾル観測データの同化によって、新たなエアロゾル再解析データの作製につながることを期待できる。並行して、近年開発されたSCALE-SPRINTARSも利用可能となってきた。

5. 研究成果発表

5.1 誌上発表(査読あり)

Cheng, Y., Dai, T., Goto, D., Chen, L., Si, Y., Murakami, H., Yoshida, M., Zhang, P., Cao, J., Nakajima, T., Shi, G. (2024) Improved hourly estimate of aerosol optical thickness over Asian land by fusing geostationary satellites Fengyun-4B and Himawari-9, *Science of the Total Environment*, 923, 171541, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.171541>.

Goto, D., Seiki, T., Suzuki, K., Yashiro, H., Takemura, T. (2024a) Impacts of a double-moment bulk cloud microphysics scheme (NDW6-G23) on aerosol fields in NICAM.19 with a global 14 km grid resolution. *Geoscientific Model Development*, 17, 651–684, doi:10.5194/gmd-17-651-2024

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. (2024b) Development of aerosol assimilation system using global non-hydrostatic model, 2-dimensional variation method, and multiple satellite-based aerosol products, *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 16(9), e2023MS004046, <https://doi.org/10.1029/2023MS004046>.

Zhao, M., Dai, T., Goto, D., Wang, H., Shi, G. (2024) Assessing the assimilation of Himawari-8 observations on aerosol forecasts and radiative effects during pollution transport from South Asia to the Tibetan Plateau, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 24(1), 235-258, doi:10.5194/acp-24-235-2024.

Zhuang, S., Fang, S., Xu, Y., Goto, D., Dong, X. (2024) Wet scavenging of multi-mode 137Cs aerosols following the Fukushima accident: size-resolved microphysics modeling with observed diameters, *Science of the Total Environment*, 917, 170287, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.170287>.

5.2 誌上発表(査読なし)

Goto, D., Dai, T., Cheng, Y., Sugata, S. (2023) Research on air pollution predicted by assimilating aerosol products retrieved from satellites, JAXA PI workshop, Tokyo, November 2023.

5.3 口頭発表

五藤大輔 (2024) 高時空間分解能観測データの同化による全球大気汚染物質予測手法の構築 (所内公募型提案研究)、国立環境研究所研究プロジェクト報告、第147号、SR-147-2024, ISSN (online) 2187-9508.

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 2022 – March 2023

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
Shuheii 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, 2020 – March 31, 2021)

CPU hours	v_debug	: 0.0 [VE · hours]
	v_normal	: 0.0 [VE · hours]
	Total	: 0.0 [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 studied global radar reflectivity and Doppler velocity distributions using the Nonhydrostatic Icosahedral Atmospheric Model (NICAM) at resolutions GL11 (3.5 km) and GL13(870 m). Our analysis showed significant radar reflectivity and higher cloud fractions in the tropics, with greater cloud presence at the finer GL13 resolution. Antarctica exhibited lower radar reflectivity due to prevalent ice clouds in winter. At higher altitudes, stronger radar reflectivity in the tropics was linked to graupel and hail presence and reduced rainfall attenuation, while at 9 km, hydrometeors were primarily ice particles. Doppler velocity provided insights into hydrometeor size and density, with graupel/hail detected at 6 km and less frequently at 9 km, and supported riming processes in strong convection areas.

3.2 Research background and purpose

The Earth Cloud Aerosol and Radiation Explorer (EarthCARE, Illingworth et al. 2015) satellite, a collaborative mission between the European Space Agency (ESA) and the Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA), stands at the forefront of atmospheric science. Its mission is to unravel the complex interplay among clouds, aerosols, and radiative processes that govern the Earth's atmosphere. This satellite is pivotal in enhancing our understanding of atmospheric dynamics and improving the accuracy of climate and meteorological predictions. EarthCARE's comprehensive multidimensional observations are designed to shed light on the fundamental ways in which clouds and aerosols influence the planet's energy balance by reflecting solar energy and absorbing infrared radiation from the Earth's surface.

To fulfill its scientific objectives, EarthCARE hosts a sophisticated ensemble of instruments, including a Cloud Profiling Radar (CPR), Atmospheric Lidar, Multi-Spectral Imager, and Broad-Band Radiometer. Together, they gather extensive data on the spatial and compositional attributes of clouds and aerosols and measure radiative fluxes. This rich dataset allows for an in-depth understanding of the forces shaping our climate system.

Global circulation models (GCMs) have long leveraged satellite data to refine their representations of clouds and precipitation. Recently, the advent of global storm-resolving models (GSRMs) has brought about a paradigm shift. With their km-scale resolutions, these models depict mesoscale convective systems in unprecedented detail, surpassing the granularity of traditional GCMs. GSRMs aim to diminish the uncertainties associated with cumulus parameterization in GCMs by incorporating sophisticated cloud microphysics schemes. These schemes consider the intricate microphysical behaviors of hydrometeors, such as nucleation and coalescence, facilitating highly accurate simulations of cloud and precipitation processes.

The resolution of GSRMs aligns closely with the along-track sampling of active satellite sensors, typically less than 5 km, enabling direct comparison between satellite observations and GSRM outputs without the need for subgrid-scale assumptions. Pioneering studies have utilized satellite active sensor data to assess and enhance the accuracy of microphysical representations within these models (e.g., Roh and Satoh 2014; Roh et al. 2017; Ikuta et al. 2021).

To bridge the gap before the satellite's deployment, satellite simulators like the Joint-Simulator for Satellite Sensors (hereafter Joint Simulator, Hashino et al. 2013) have been employed to produce EarthCARE-like signals from GSRMs, creating what is known as EarthCARE synthetic data. This synthetic data has been instrumental in the development and testing of EarthCARE's retrieval algorithms, leading to significant advancements in our comprehension of atmospheric measurements (Hagihara et al., 2021; Wang et al., 2022; Hagihara et al., 2023).

In the preceding fiscal year, we refined our evaluation techniques by introducing a joint histogram analysis of Doppler velocity and altitude based on ground CPR data across two microphysical schemes. This approach allowed us to assess the performance of the schemes within EarthCARE-like simulations and contributed insights regarding the satellite's observational capabilities.

In this fiscal year, we introduced the global distributions of simulated radar reflectivity and Doppler velocity using two different horizontal resolutions. We investigate how to use global storm-resolving simulations to understand the observed convection from the EarthCARE CPR after the launch.

3.3 Data and methodology

Our numerical experiments encompassed simulations at two distinct resolutions using the Nonhydrostatic Icosahedral Atmospheric Model (NICAM): GLevel 11 (GL11) with a 3.5 km horizontal resolution and GLevel 13 (GL13) with a finer 870 m horizontal resolution. The JAXA EarthCARE CPR dataset was generated from the NICAM 3.5 km simulation data. The actual CPR data consists of orbit data with 800 footprints, but in this study, we simulated the global distribution of radar reflectivity and Doppler velocity using the native grid in NICAM. The GL11 simulation was initialized at 00 UTC on August 1, 2016, while the higher-resolution GL13 simulation commenced at 00 UTC on August 4, 2016, leveraging the GL11 simulation data as initial conditions. Our analysis focused on the data snapshot from 08 UTC on August 5, 2016.

For these simulations, we utilized the NICAM single-moment water 6 categories (NSW6) cloud scheme

as delineated by Tomita (2008b) and subsequently modified by Roh and Satoh (2014). In addition, we implemented the Mellor-Yamada Level 2 (MYNN2) turbulence scheme, originally described by Nakanishi & Nino (2004).

To evaluate the simulation data against real-world observations, we employed the EarthCARE Active Sensor Simulator (EASE), developed by Okamoto et al. (2007, 2008) and Nishizawa et al. (2008). We used the EASE simulator to evaluate NICAM using the National Institute of Information and Communications Technology (NICT) 94 GHz Cloud Profiling Radar (CPR) simulations in the previous fiscal year. We maintained consistency in our assumptions regarding the size distributions of hydrometeors for both the NICAM simulation and the Joint Simulator processing. While the NSW6 cloud ice and cloud water categories do not explicitly define size distributions within NICAM, we adopted monodisperse size distributions in the Joint Simulator, utilizing an effective radius of 40 μm for cloud ice and 8 μm for cloud water.

3.4 Results

Figure 3.1 shows the global distributions of radar reflectivity between GL11 and GL13 at 3 km. The simulations indicate a high cloud fraction and relatively large radar reflectivity near the tropics. Radar reflectivity is low in Antarctica, likely due to the presence of ice clouds in winter. Comparing the two horizontal resolution experiments, the cloud fraction appears to increase for the higher-resolution experiment.

Figure 3.2 and 3.3 compare radar reflectivity at 6 km and 9 km heights. The global radar reflectivity at 6 km shows stronger signals in the tropics compared to the 3 km height (Figure 3.2). This suggests that signal attenuation by rain is less at 6 km. At this height in the tropics, graupel and hail can be present, which would presumably increase radar reflectivity. At 9 km height, it is assumed that all hydrometeors are ice particles, resulting in smaller radar reflectivity compared to 6 km. Comparing GL11 and GL13, the overall distribution of clouds is similar, but GL13 has a higher cloud fraction (Figure 3.1).

Figure 3.4 shows the global distributions of radar reflectivity and Doppler velocity between GL11 and GL13 at 3 km. The advantage of Doppler velocity is that it is free of attenuation. Doppler velocity is the product of the vertical air velocity and the terminal velocity of the hydrometeors. Assuming the vertical air velocity is small, Doppler velocity can be used to estimate hydrometeor size and density. For Doppler velocity, there is an increase around 30 degrees south latitude due to the conversion of hydrometeors from rain to ice particles, which decreases the terminal velocity. However, clouds around 30 degrees south latitude and 120 degrees west longitude show dark blue, indicating small Doppler velocity because it is rain, not ice particles, and the terminal velocity is different. From Figure 3.1, the thermodynamic phase cannot be determined from radar reflectivity alone, but Doppler velocity can provide this information.

Figures 3.5 and 3.6 compare Doppler velocity at 6 km and 9 km heights to radar reflectivity. Doppler velocities of 2 m/s and 5 km above the ground were categorized as graupel/hail according to Roh et al. (2024). We applied this criterion to the 6 km height, but the fraction was very small, making it difficult to visualize in the figure. Therefore, blue circles were added to indicate the approximate location and fraction of graupel/hail, which is roughly less than 1%. Graupel/hail is concentrated in the tropics and distributed up to 45 degrees north latitude, but it is less common in the southern hemisphere due to seasonal reasons, as it is winter there and convection is weaker. The GL13 experiments show a higher distribution of graupel/hail compared to GL11. Graupel is also present at 9 km height, but the frequency is lower than at 6 km (Figure 3.6).

To confirm the presence of direct convection, we replaced the blue circles with red circles where the positive Doppler velocity was greater than 1 m/s (Figures 3.7 and 3.8). The fraction of red circles is roughly less than 0.1%. If the simulation results are valid, it indicates that upward Doppler velocities above 1 m/s are not easy to observe. The global distribution of these velocities is similar to the graupel/hail distribution, consistent with previous studies showing active riming where convection is strong.

Comparing the frequency of upward motion between GL11 and GL13, GL13 shows a higher frequency, likely due to its more detailed representation of convection. The 9 km height case has a smaller fraction than the 6 km height distribution, similar to the graupel/hail results. We will further study how to infer signals of low-frequency upward motion in real observations with random errors.

Finally, we compared the Global Contoured Frequency by Temperature Diagram (CFED) and Global Contoured Frequency by Altitude Diagram (CFAD) of GL11 and GL13. CFED provides a better understanding of microphysical processes as a function of temperature, clearly showing thermodynamic

phases using Doppler velocity differences at 0 degrees. GL11 and GL13 results are almost identical, with a more common frequency of graupel/hail velocities smaller than -2 m/s at -10 degrees, relevant for riming, in GL13. For CFADs, comparison by height rather than temperature is more dynamically informative. Two discrete frequencies at heights of 10 to 15 km likely result from aggregating frequencies from different regions. GL13 shows more frequencies for variances of Doppler velocities at 20 km height compared to GL11.

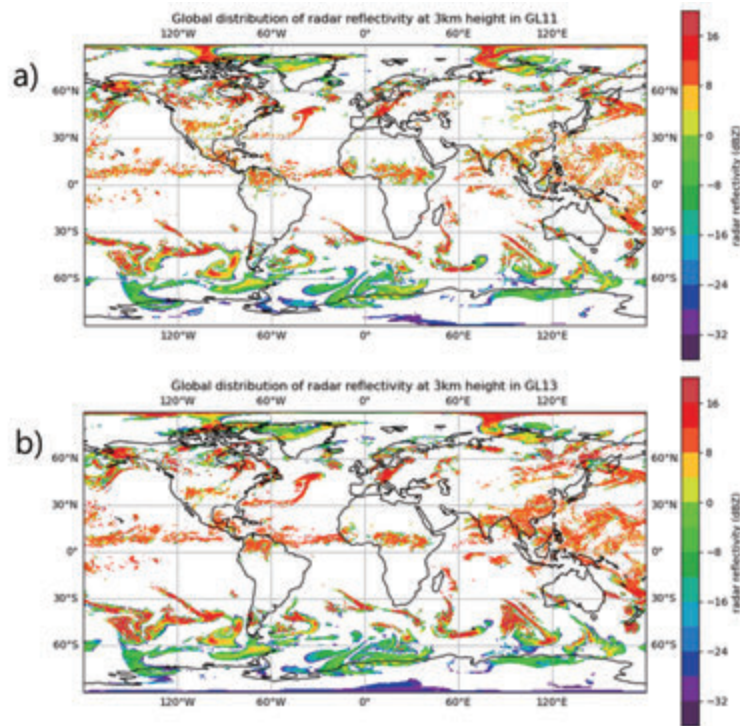


Fig. 3.1 The horizontal distributions of the radar reflectivity at 3 km in GL11 (a) and GL13 (b). Contour unit: dBZ.

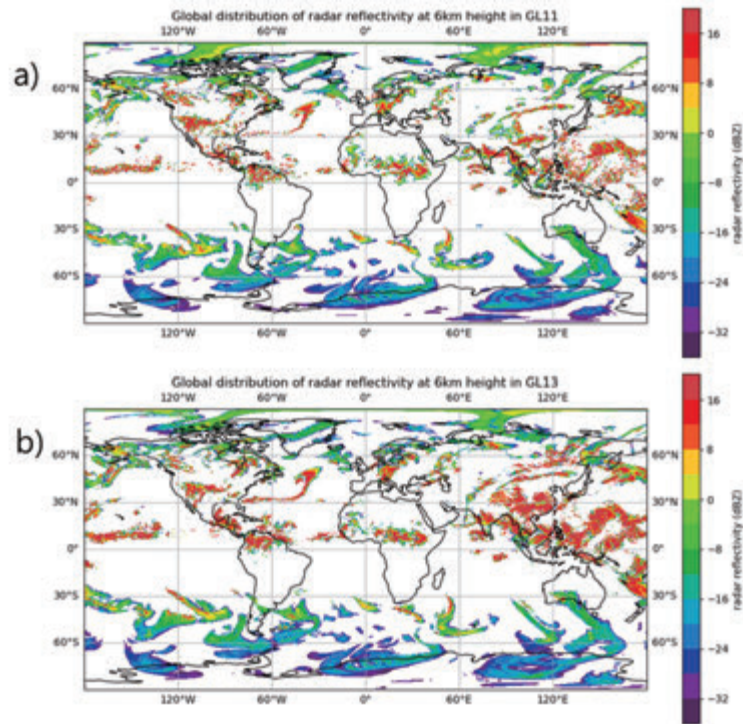


Fig. 3.2 The horizontal distributions of the radar reflectivity at 6 km in GL11 (a) and GL13 (b). Contour unit: dBZ.

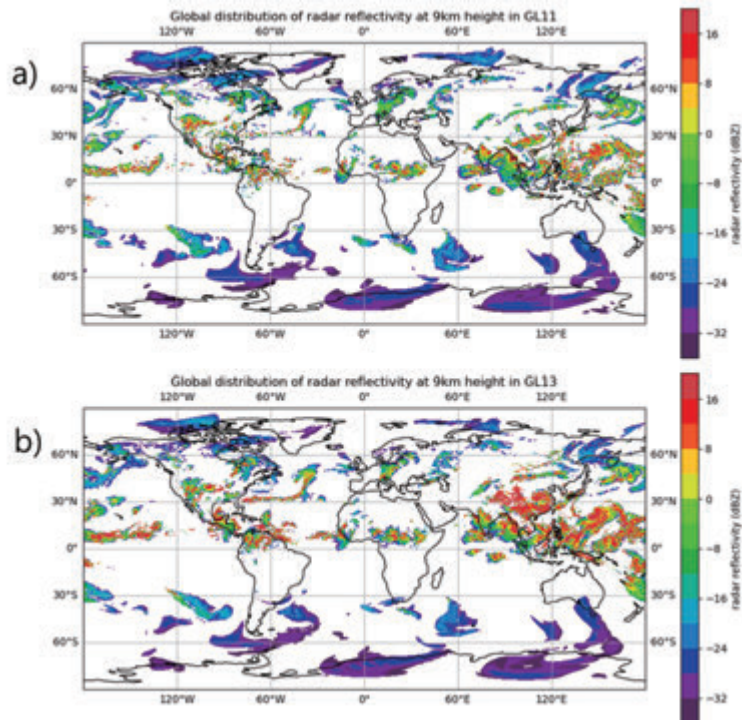


Fig. 3.3 The horizontal distributions of the radar reflectivity at 9 km in GL11 (a) and GL13 (b). Contour unit: dBZ.

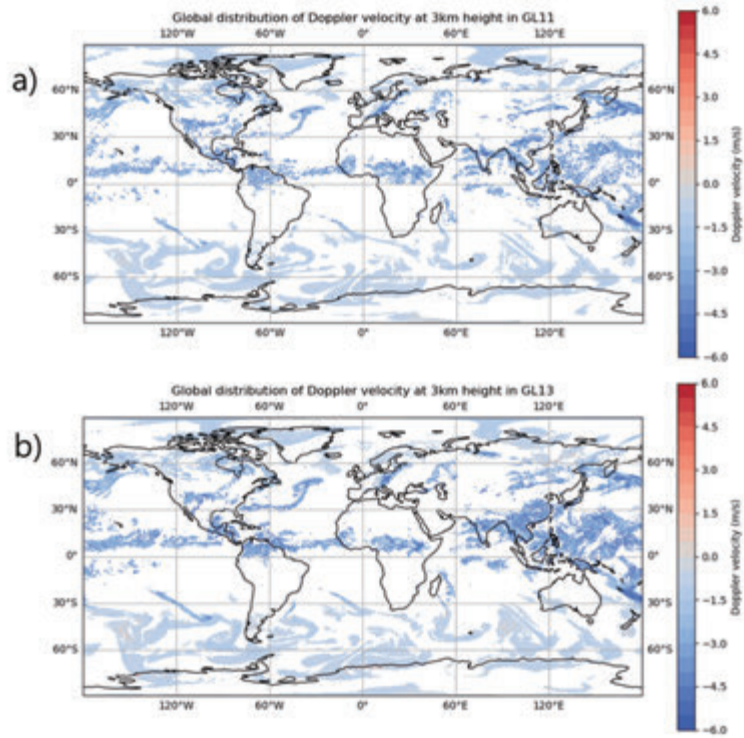


Fig. 3.4 Horizontal distributions of Doppler velocity at 3 km in GL11 (a) and GL13 (b). Contour unit: m/s.

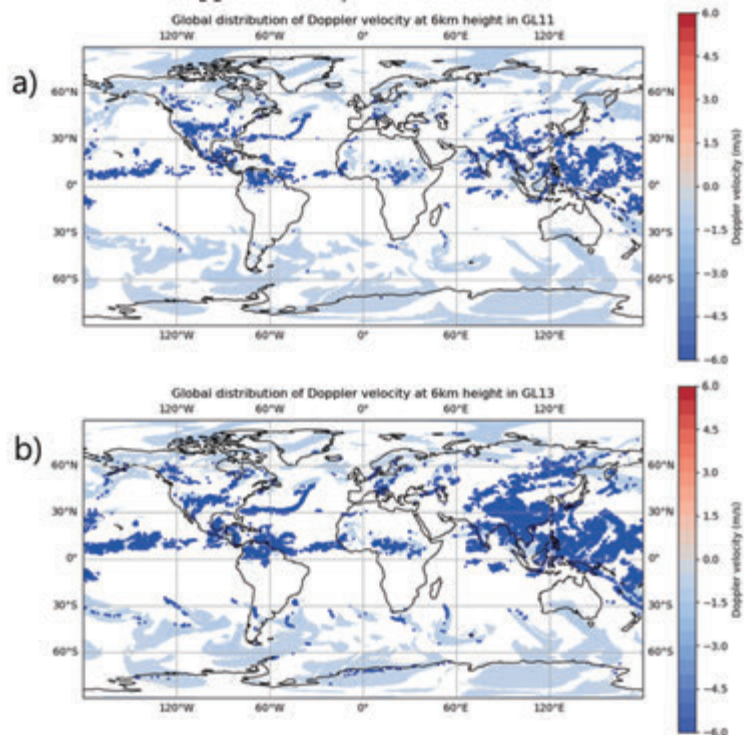


Fig. 3.5 Horizontal distributions of Doppler velocity at 6 km in GL11 (a) and GL13 (b). Contour unit: m/s. Deep blue circles indicate velocities less than -2 m/s (fraction <1%).

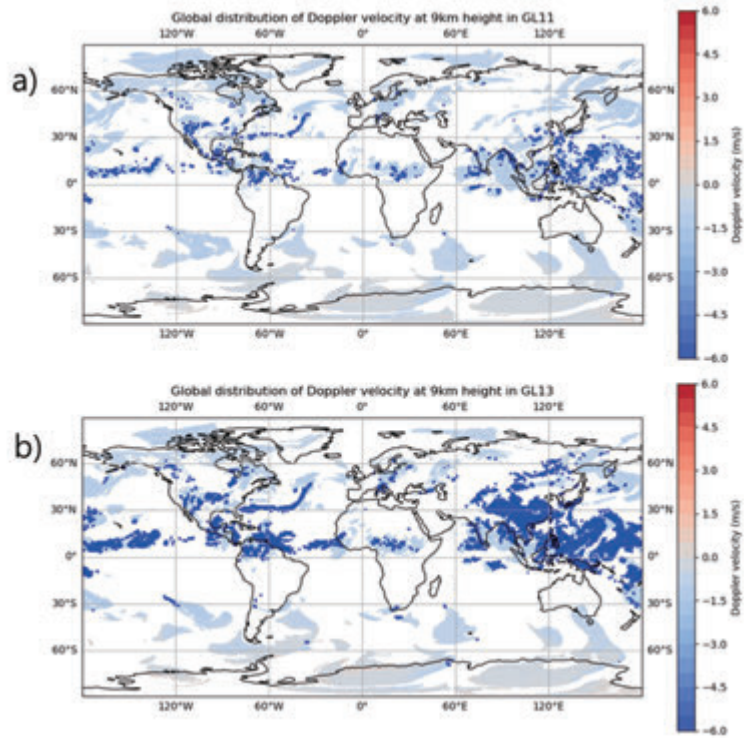


Fig. 3.6 Horizontal distributions of Doppler velocity at 9 km in GL11 (a) and GL13 (b). Contour unit: m/s. Deep blue circles indicate velocities less than -2 m/s (fraction <1%).

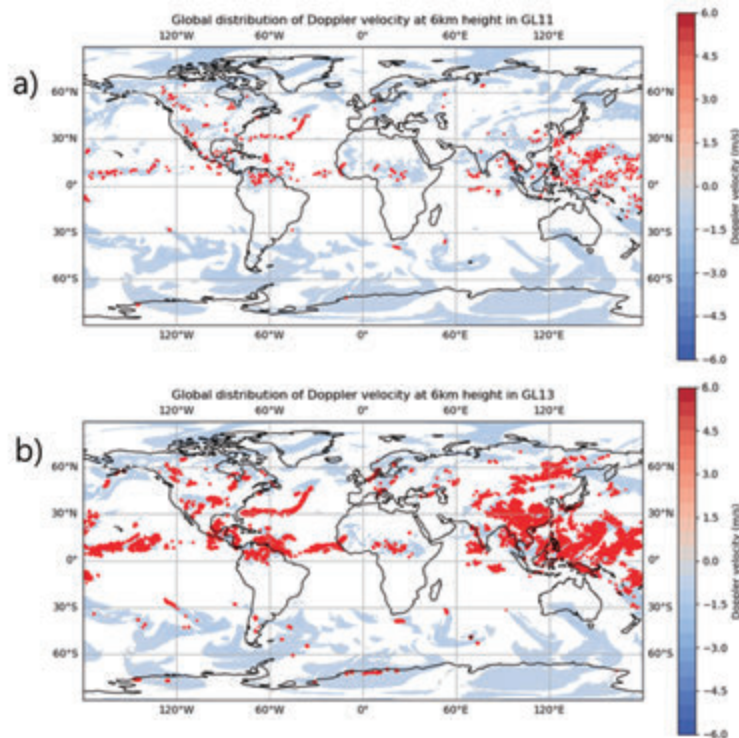


Fig. 3.7 Horizontal distributions of Doppler velocity at 6 km in GL11 (a) and GL13 (b). Contour unit: m/s. Deep red circles indicate upward motion with velocities greater than 2 m/s (fraction <0.1%).

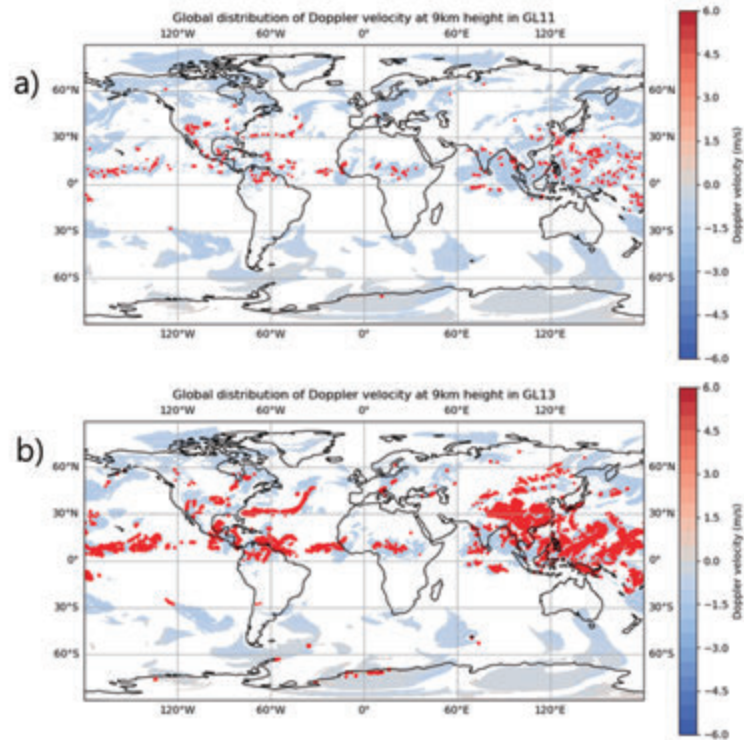


Fig. 3.8 Horizontal distributions of Doppler velocity at 9 km in GL11 (a) and GL13 (b). Contour unit: m/s. Deep red circles indicate upward motion with velocities greater than 2 m/s (fraction <0.1%).

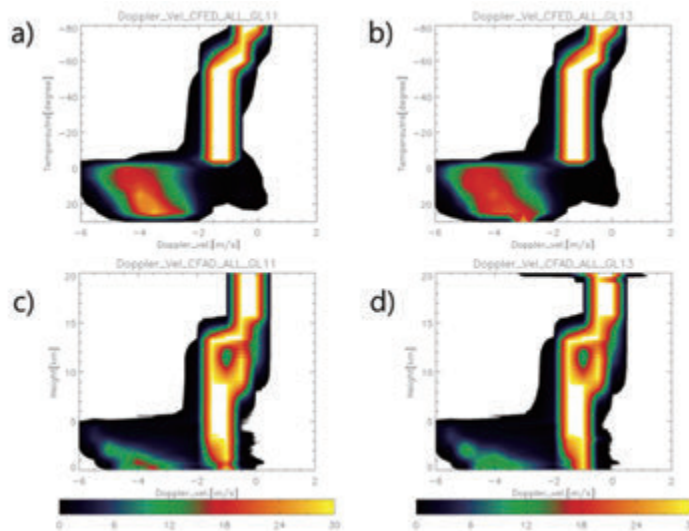


Fig. 3.9 The Global Contoured Frequency by tEmperature Diagram (CFED, upper) and the Global Contoured Frequency by Altitude Diagram (CFAD, bottom) between GL11 (left) and GL13 (right).

3.5 Discussion

Before the launch of the EarthCARE satellite, we investigated the global distributions of radar reflectivity and Doppler velocity. Our study utilized two distinct resolutions of the Nonhydrostatic Icosahedral Atmospheric Model (NICAM) to generate comparative datasets. GL11, with a 3.5 km resolution, and GL13, with a finer 870 m resolution, provided snapshots of atmospheric conditions that we analyzed to

understand cloud distribution and radar reflectivity dynamics.

Our results reveal significant radar reflectivity and a higher cloud fraction in the tropics, with a marked increase in cloud presence at the higher GL13 resolution. Conversely, Antarctica exhibited lower radar reflectivity, associated with the prevalence of ice clouds in winter. At higher altitudes, radar reflectivity was stronger in the tropics, potentially due to the presence of graupel and hail, and less attenuation from rainfall compared to lower altitudes. It was inferred that at 9 km, hydrometeors were primarily ice particles, as evidenced by the smaller radar reflectivity.

A notable finding was that Doppler velocity, unimpeded by attenuation, provided insights into hydrometeor size and density. At 6 km and 9 km altitudes, we identified Doppler velocities indicative of graupel/hail, though less frequently at 9 km. Direct convection signals were less common, but when present, they corroborated the riming processes active in strong convection areas.

Finally, a comparison of the Global Contoured Frequency by Temperature Diagram (CFED) and Global Contoured Frequency by Altitude Diagram (CFAD) between GL11 and GL13 suggested that the resolution dependency is not significant statistically, but GL13 reproduced more diverged Doppler velocities at 20 km height.

We acknowledge that actual Doppler velocity data may contain many random errors. Further research is needed to analyze these results to improve the accuracy of convection observations.

References

- Illingworth, A. J., Barker, H. W., Beljaars, A., Ceccaldi, M., Chepfer, H., Clerbaux, N., ... & Van Zadelhoff, G. J. (2015). The EarthCARE satellite: The next step forward in global measurements of clouds, aerosols, precipitation, and radiation. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 96(8), 1311-1332.
- Ikuta, Y., Sawada, M., Satoh, M.: Determining the impact of boundary layer schemes on the secondary circulation of Typhoon FAXAI using radar observations in the gray zone. *J. Atmos. Sci.*, 81, 961-981. <https://doi.org/10.1175/JAS-D-22-0169.1>, 2022.
- Ishihara, M., Kato, Y., Abo, T., Kobayashi, K., & Izumikawa, Y. (2006). Characteristics and performance of the operational wind profiler network of the Japan Meteorological Agency. *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II*, 84(6), 1085-1096.
- Hagihara, Y., Ohno, Y., Horie, H., Roh, W., Satoh, M., Kubota, T., & Oki, R. (2021). Assessments of Doppler Velocity Errors of EarthCARE Cloud Profiling Radar Using Global Cloud System Resolving Simulations: Effects of Doppler Broadening and Folding. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 60, 1-9.
- Hagihara, Y., Ohno, Y., Horie, H., Roh, W., Satoh, M., and Kubota, T.: Global evaluation of Doppler velocity errors of EarthCARE Cloud Profiling Radar using global storm-resolving simulation, EGU sphere [preprint], <https://doi.org/10.5194/egusphere-2022-1255>, 2022.
- Hashino, T., M. Satoh, Y. Hagihara, T. Kubota, T. Matsui, T. Nasuno, and H. Okamoto, 2013: Evaluating cloud microphysics from NICAM against CloudSat and CALIPSO. *J. Geophys. Res.*, 118, 1-20, doi:10.1002/jgrd.50564.
- Nishizawa, T., H. Okamoto, T. Takemura, N. Sugimoto, I. Matsui, and A. Shimizu, 2008: Aerosol retrieval from two-wavelength backscatter and one-wavelength polarization lidar measurement taken during the MR01K02 cruise of the R/V Mirai and evaluation of a global aerosol transport model, *J. Geophys. Res.*, 113, D21201, doi:10.1029/2007JD009640.
- Okamoto, H., T. Nishizawa, T. Takemura, H. Kumagai, H. Kuroiwa, N. Sugimoto, I. Matsui, A. Shimizu, A. Kamei, S. Emori, and T. Nakajima, 2007: Vertical cloud structure observed from shipborne radar and lidar, mid-latitude case study during the MR01/K02 cruise of the R/V Mirai, *J. Geophys. Res.*, 112, D08216, doi:10.1029/2006JD007628.
- Okamoto, H., T. Nishizawa, T. Takemura, K. Sato, H. Kumagai, Y. Ohno, N. Sugimoto, A. Shimizu, I. Matsui, and T. Nakajima, 2008: Vertical cloud properties in the tropical western Pacific Ocean: Validation of the CCSR/NIES/FRCGC GCM by shipborne radar and lidar, *J. Geophys. Res.*, 113, D24213, doi:10.1029/2008JD009812.
- Roh, W., and M. Satoh, 2014: Evaluation of Precipitating Hydrometeor Parameterizations in a Single-Moment

- Bulk Microphysics Scheme for Deep Convective Systems over the Tropical Central Pacific. *J. Atmos. Sci.*, **71**, 2654-2673.
- 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.
- Satoh, M., Matsugishi, S., Roh, W., Ikuta, Y., Kuba, N., Seiki, T., Hashino, T., and Okamoto, H.: Evaluation of cloud and precipitation processes in regional and global models with ULTIMATE (ULTRa-sIte for Measuring Atmosphere of Tokyo metropolitan Environment): A case study using the dual-polarization Doppler weather radars. *Prog. Earth. Planet. Sci.*, **9**, 41, doi:10.1186/s40645-022-00511-5, 2022.
- Tomita, H., 2008: New microphysical schemes with five and six categories by diagnostic generation of cloud ice. *J. Meteorol. Soc. Jpn.*, **86**, 121–142.
- Wang, M., Nakajima, T. Y., Roh, W., Satoh, M., Suzuki, K., Kubota, T., and Yoshida, M.: Evaluation of the smile effect on the Earth Clouds, Aerosols and Radiation Explorer (EarthCARE)/Multi-Spectral Imager (MSI) cloud product, EGUsphere [preprint], <https://doi.org/10.5194/egusphere-2022-736>, 2022.

4. Summary

In this report, we conducted a study to investigate the global distributions of radar reflectivity and Doppler velocity using the Nonhydrostatic Icosahedral Atmospheric Model (NICAM) at two distinct resolutions: GL11 (3.5 km) and GL13 (870 m) before the launch of the EarthCARE satellite. Our analysis revealed significant radar reflectivity and higher cloud fractions in the tropics, with an increased cloud presence at the finer GL13 resolution. In contrast, Antarctica showed lower radar reflectivity, likely due to ice clouds prevalent in winter. At higher altitudes, radar reflectivity was stronger in the tropics, attributed to graupel and hail presence and reduced rainfall attenuation, while at 9 km, hydrometeors were primarily ice particles, as indicated by lower radar reflectivity.

A key finding was that Doppler velocity, unaffected by attenuation, provided valuable insights into hydrometeor size and density. At 6 km and 9 km altitudes, Doppler velocities indicative of graupel/hail were identified, though less frequently at 9 km. Direct convection signals were less common but supported the active riming processes in strong convection areas. Comparing the Global Contoured Frequency by Temperature Diagram (CFED) and Global Contoured Frequency by Altitude Diagram (CFAD) between GL11 and GL13, we found that GL13 captured more instances of smaller Doppler velocities at higher altitudes, suggesting more detailed microphysical processes. Further research is needed to address the potential random errors in actual Doppler velocity data and to enhance the accuracy of convection observations.

5. Future perspective

The EarthCARE satellite was launched in May 2024. The data will be available in the end of 2024. This study is helpful to evaluate our global distribution of radar reflectivity and Doppler velocity in NICAM using the EarthCARE data. And we will consider how to interpret the vertical upward motion from Doppler velocity of the EarthCARE by Joint simulator and NICAM.

6. List of publications

6.1 Peer-reviewed articles

- Wang, M., Nakajima, T. Y., Roh, W., Satoh, M., Suzuki, K., Kubota, T., and Yoshida, M. (2023) Evaluation of the spectral misalignment on the Earth Clouds, Aerosols and Radiation Explorer/multi-spectral imager cloud product. *Atmos. Meas. Tech.*, **16**, 603–623, <https://doi.org/10.5194/amt-16-603-2023>
- Hagihara, Y., Ohno, Y., Horie, H., Roh, W., Satoh, M. and Kubota, T. (2023) Global evaluation of Doppler

- velocity errors of EarthCARE Cloud Profiling Radar using global storm-resolving simulation. *Atmos. Meas. Tech.* 16, 3211–3219, <https://doi.org/10.5194/amt-16-3211-2023>
- 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>.
- 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>.

6.2 Other publications

None.

6.3 Oral presentations

- Roh, W., Satoh, M. (2023) Observation and modeling collaboration, Global Storm-Resolving Modeling Mini Workshop, 11-12nd May 2023
- Roh, W., Satoh, M. (2023) Investigation of the microphysics in NICAM using the vertical pointing 94 GHz Doppler radar, JpGU 2023, 21-26th May 2023
- Roh, W., Satoh, M. (2023) Applications of a global non-hydrostatic model to test retrieval algorithms for the EarthCARE satellite, NHM workshop, 31 Aug. -2nd Sep. 2023
- Roh, W., Satoh, M. (2023) Evaluations of a microphysics scheme using the ground observation data and EarthCARE-like data, EarthCARE Cal/Val and Science Workshop, 13 -17 Nov. 2023.

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5年度～令和6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。

本年度は、3.5 km (GL11) および 870 m (GL13) の解像度で NICAM を使用して、全球のレーダー反射強度およびドップラー速度分布を調査した。解析の結果、特に高解像度の GL13 において、熱帯地域でのレーダー反射強度および雲の割合が高いことが明らかになった。一方、南極では冬季の氷雲のため、レーダー反射強度が低いことが示された。高高度では、熱帯地域でのレーダー反射強度が霰や雹の存在と関連して強く、9 km の高度では主に氷粒子が含まれていることが示唆された。ドップラー速度の解析からは、6 km および 9 km の高度で霰や雹を示す速度が検出され、9 km では頻度が低いことが確認された。これらの結果は、強い対流領域での着氷過程を支持している。ドップラー速度データには多くのランダムエラーが含まれている可能性があり、対流観測の精度を向上させるためにはさらなる研究が必要である。

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：陸惑星気候の太陽定数依存性

実施年度：

令和5年度～令和5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。本年は完全蒸発状態が発生する太陽放射入射量閾値を決定することをめざした。

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（2023年4月1日～2024年3月31日）

CPU時間	v_debug	:	0.0 [VE・hours]
	v_normal	:	200,549.6 [VE・hours]
	計	:	200,549.6 [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、そこで解析を行った。

3. 研究結果

3.1 背景と目的

系外惑星探査により、地球と同程度の質量を持つ系外惑星が多数発見されている。これらの系外惑星は軌道要素・日射分布・表面水量などの緒量が地球とは大きく異なる状況にあり、系外惑星表面における水の存在条件に関する考察が進められている。そのうちの1つに陸惑星に関するものがある。陸惑星とは惑星大気表層系の水の量が平均水深にして 10m のオーダーの惑星を指す。Abe et al. (2011) は陸惑星設定を用いた AGCM 実験を行い、惑星の自転傾斜角を 0 とした場合に、太陽放射吸収量が水惑星における暴走温室状態発生閾値（我々の予備的な 1 次元放射対流平衡モデル計算によれば、地表面アルベドを 0.2 とした場合における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 となる）を超えても惑星表面に液体の水が保持され、 415 W/m^2 を超えると土壌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。この結果は、地球のように水を豊富に持つ惑星よりも少量の水しか存在しない陸惑星の方が広い太陽定数範囲で惑星表面に液体の水を保持するというを示しており、陸惑星は系外惑星の生命存在可能性を考える上で重要な調査対象であると言える。

これまで我々は、上記の背景を念頭に置き、陸惑星気候のパラメータ依存性の探求を目的として大気大循環モデルを用いた数値実験を行ってきた。令和元年度スーパーコンピュータ利用研究課題では、Abe et al. (2011) の追実験をおこないAbe et al. (2011)と同様の結果が得られることを確認しようとした。ところがAbe et al. (2011) の結果とは異なり、太陽放射吸収量が 450 W/m^2 となる場合で完全蒸発状態の発生は認められなかった。その段階では系が統計的定常状態に到達していなかったため、その後さらに実験を継続し、昨年度において Abe et al. (2011) が得た完全蒸発状態発生の入射吸収量閾値を超えた場合で、地表面に液体の水が保持された平衡状態を得ることができた。また太陽定数を増加させた場合で土壤水分が大きく減少する状態も得られた。今年度は実験を継続し完全蒸発状態が得られることを確認するために継続実験を実施する。

3.2 モデルと実験設定

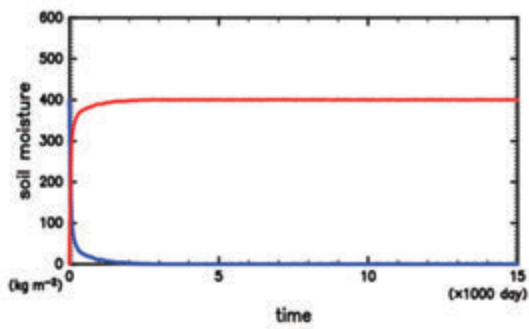
用いるモデルは、我々の研究グループで開発している惑星大気大循環モデル DCPAM5 (<http://www.gfd-dennou.org/library/dcpam>, Noda et al., 2017) である。その力学過程は 3 次元球面ブリミティブ方程式系から成る。水平離散化にはスペクトル法を用いる。鉛直座標には σ を採用し、Arakawa and Suarez (1983) の方法を用いて離散化を行なう。放射計算には、Chou et al. (1996) および Chou et al. (2001) の地球大気用スキームを使用する。積雲過程には、Relaxed Arakawa and 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、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。太陽定数 S の値として 2400 W/m^2 , 2600 W/m^2 , 3000 W/m^2 , 3200 W/m^2 の4通りを用いる。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。初期条件として、地球と同じ太陽定数と自転傾斜角等の天体力学要素パラメータ下での水惑星実験で得られた統計的平衡状態を用い、 10000 日 (およそ27 年) 以上の積分を行った。

3.3 結果

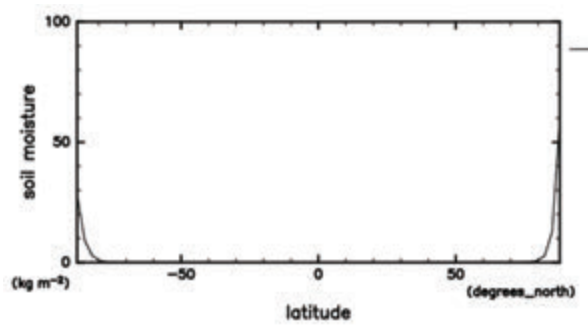
昨年度において太陽定数 S として 3200 W/m^2 を与えた場合 (全球平均入射吸収量は 630 W/m^2) において土壤水分が大きく減少するという結果が得られていた。今回は更に実験を継続することにより土壤水分のほぼすべてが蒸発した状態が得られることが確認された。図1にほぼ完全蒸発が起こった状態の様子を示す。土壤水分は時間とともに減少し、 15000 日の段階では惑星表面に存在する水の大部分は大気中の水蒸気となっており、土壤水分がほぼ消失した状態が維持されている (図1a)。しかし土壤水分が完全に 0 にはなっておらず極域におよそ 50 kg/m^2 の土壤水分が残存している (図1b)。蒸発した水蒸気の大部分は赤道上空に存在している (図1c)。一昨年度までに実施していた、完全蒸発が起こらない $S=2600 \text{ W/m}^2$ の場合 (全球平均入射吸収量は 450 W/m^2) では極域の表面温度は 273 K 未満で維持されていたが、この場合では極域でも 273 K を超えており (図1d)、極域においても蒸発が起こることができている。

ほぼ完全蒸発が起こる入射吸収量閾値を確認するためにこれまでに本研究で行った実験の結果を図2に示す。太陽定数が 2600 W/m^2 となるまでは土壤水分がほぼ蒸発することは起こらない。 $S=2600 \text{ W/m}^2$ の場合 (全球平均入射吸収量は 540 W/m^2) はまだ統計的平衡状態に達してはいないが土壤水分が増加を続けている状態にあり、この場合では土壤水分の蒸発は起こらないものと考えられる。これより本研究でおこなった実験ではほぼ完全蒸発が起こる入射吸収量閾値は 540 W/m^2 以上となっておりAbe et al (2011) が得た閾値を超えるものとなっている。

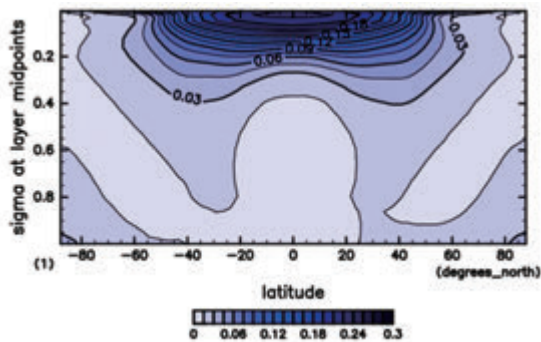
(a) 土壌水分・大気水蒸気量時間変化



(b) 東西平均土壌水分量



(c) 東西平均比湿子午面分布



(d) 東西平均表面温度

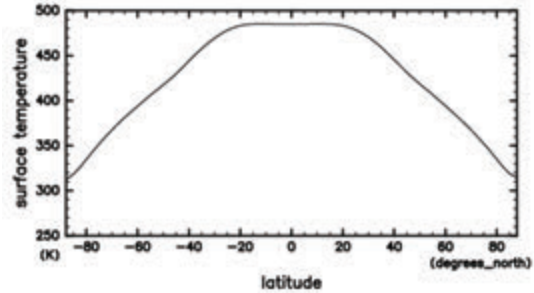


図 1. ほぼ完全蒸発が起きた状態。(a) 全球平均大気水蒸気量 $[\text{kg}/\text{m}^2]$ (赤線) と全球平均土壌水分量 $[\text{kg}/\text{m}^2]$ (青線)。(b) 東西平均土壌水分量 $[\text{kg}/\text{m}^2]$, (c) 東西平均比湿 $[\text{kg}/\text{kg}]$ 子午面分布, (d) 東西平均表面温度 $[\text{K}]$ 。(b), (c), (d) では 365 日平均場を示す。

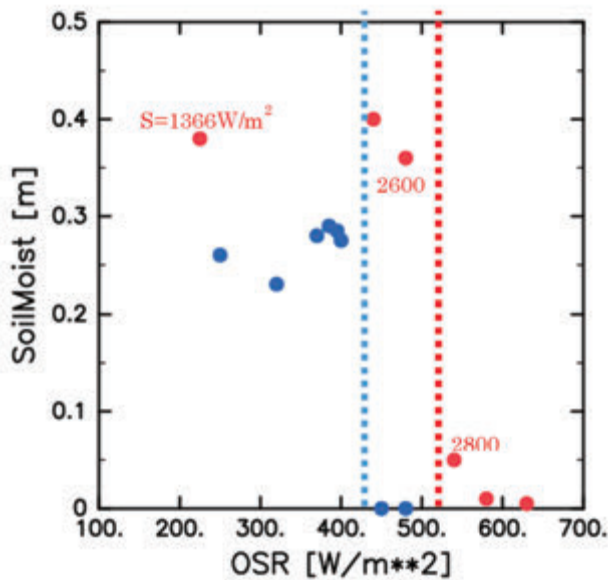


図 2. 全球平均日射吸収量 OSR と全球平均土壌水分量の関係 赤点は本研究で得られた結果を、青点は Abe et al. (2011) で得られている結果を示す。赤字の数字は実験で与えた太陽定数の値である。S=2600 W/m^2 の場合、S=2800 W/m^2 の場合はまだ統計的平衡状態に達しておらず 15020 日の段階での結果を示してある。初期水量が 40cm の場合。365 日平均の値を示している。

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 primitivity 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. *Astrophysical Journal*, 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/10.3847/1538-4365/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 実験を実施し太陽放射吸収量が $630\text{W}/\text{m}^2$ となる場合でようやく土壌水分のほぼ全てが蒸発する状態を得ることができた。しかしながら、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た。今後は、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まず確認する必要がある。

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、河合佑太、高橋芳幸、中島健介、竹広真一、樫村博基、富田浩文、林祥介(神戸大・理)、吉田哲治 (2023) 惑星気候の多様性: 水惑星の場合と陸惑星の場合. CPS & ABC ワークショップ「地球型惑星の気候を地球古気候研究から考える」

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）年末あたり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。

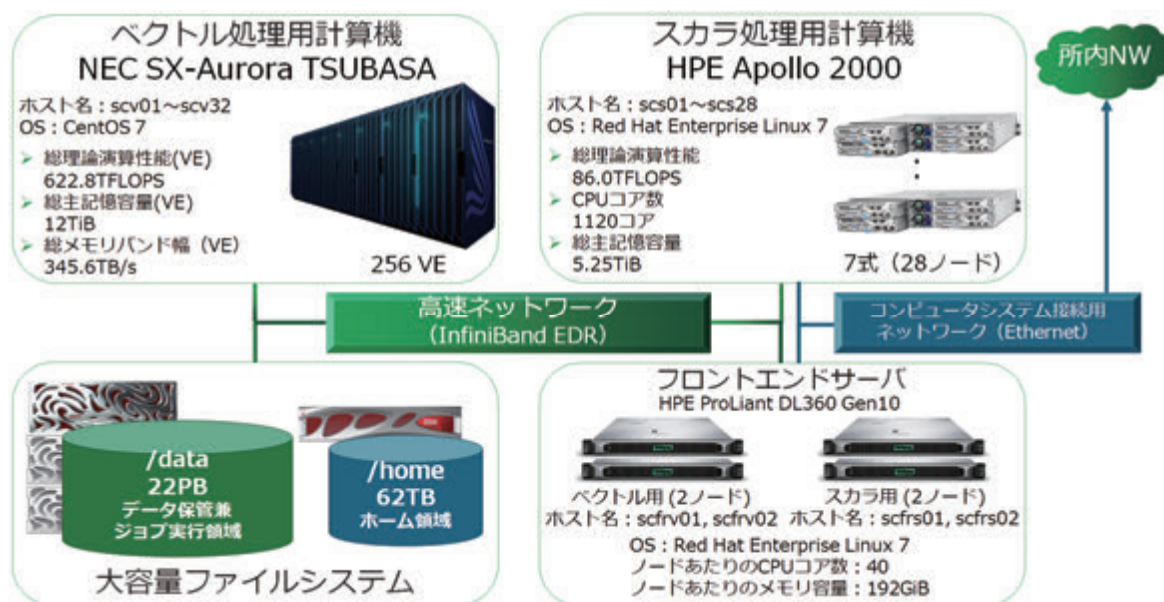


図 1. システム概要図（2020年3月～）

※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。

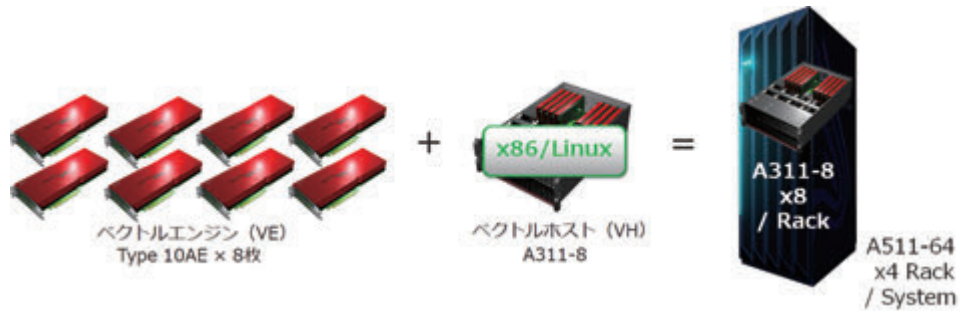


図 2. ベクトル処理用計算機（SX-Aurora TSUBASA A511-64）の主要な構成

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)	304GFLOPS (コア)
		256GFLOPS (CPU)	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	1
	下限値	1	1
	無指定	1	1
論理ホストあたりのVE数	上限値	8	8
	下限値	1	1
	無指定	1	1
リクエストあたりの経過時間	上限値	24時間	0.5時間
	無指定	24時間	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。2023年4月から2024年3月にかけての平均稼働率は94.5%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99.6%であり、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（2022年4月から2023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96.0%、99.9%であった。

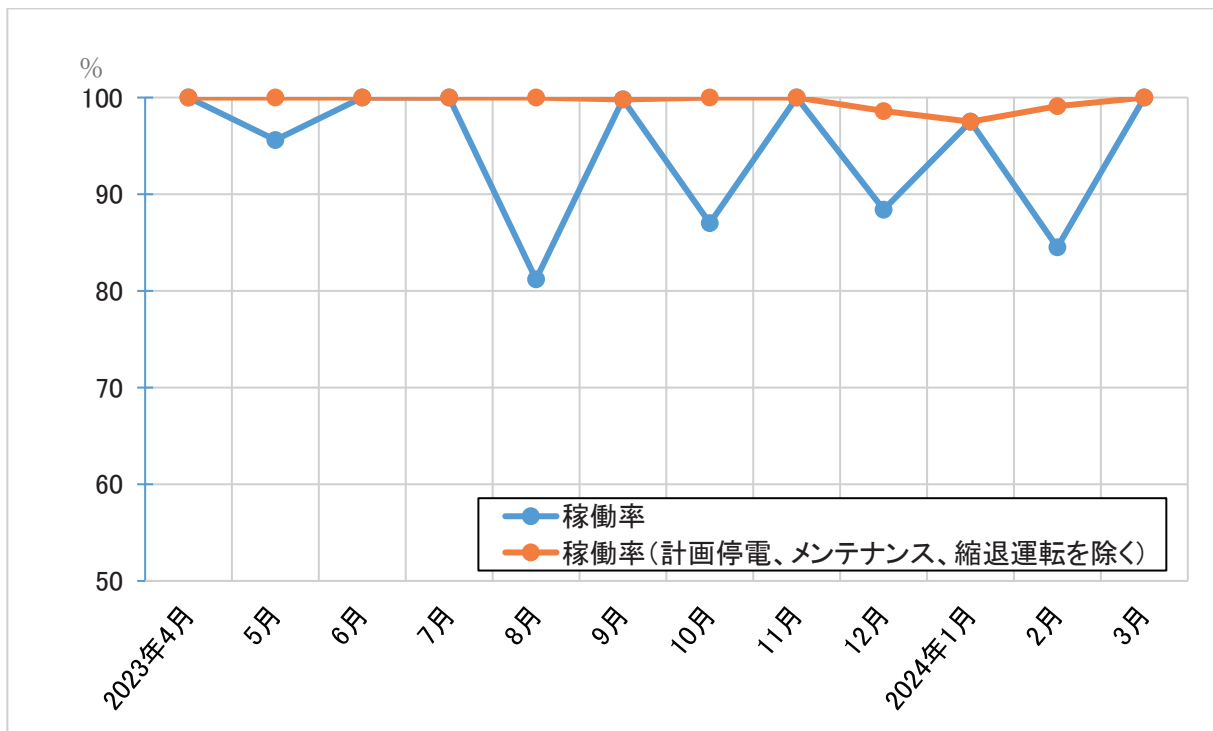


図3. 月ごとのベクトル処理用計算機の平均稼働率の推移（2023年4月1日～2024年3月31日）

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。v_normalキューとv_debugキューそれぞれについての、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。2022年4月から2023年3月の期間でのv_normalの平均利用率は82.1%（前年度は55.8%）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、2023年度は6月以降ずっと利用率が高いままで推移した。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低い、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。

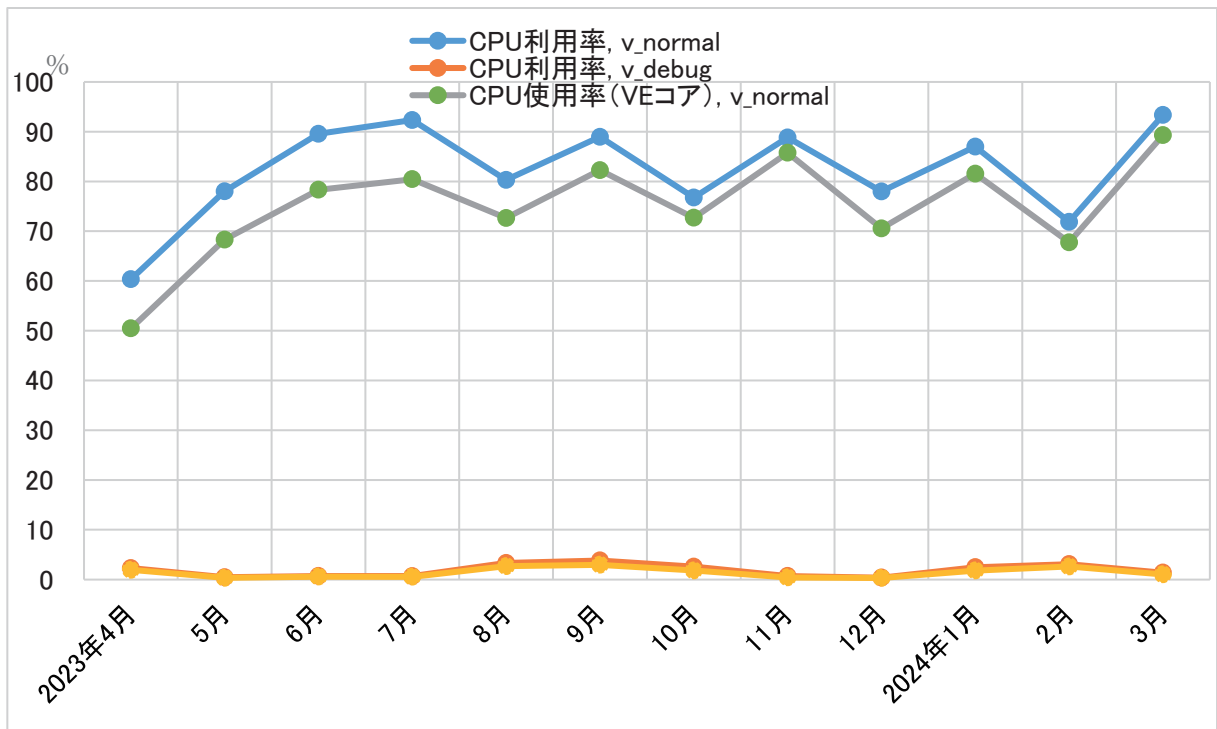


図4. 月ごとのベクトル処理用計算機の平均利用率の推移 (2023年4月1日～2024年3月31日)

表6. ベクトル処理用計算機の利用状況 (2022年4月1日～2023年3月31日)

所内/所外	課題数	CPU時間 [VEコア・hour]			平均利用率 (v_normal)
		v_debug	v_normal	計	
所内課題	7	1,271	1,047,815	1,049,086	74.5%
所外課題	2	0	21,280	21,280	1.2%
合計	9	1,271	1,069,095	1,070,366	75.7%

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。図5より、7月と9月に多くのジョブが投入されていたことがわかる。一方で2024年に入ってから、ジョブリクエスト数がかなり少なくなっている。年度を通したジョブリクエスト総数は約68000であり、前年度、前々年度（約54000, 41000）からそれぞれ3割、7割増加した。実行までの待ち時間は年平均で5.0時間、月平均の最大で11.7時間と、前年度の値（それぞれ0.9時間、4.7時間）から大幅に増加しており、現行システムの導入以来最も長くなっている。特に2～3月はジョブリクエスト数が少ないにもかかわらず平均待ち時間が9時間を超えており、多くの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るものと推察される。

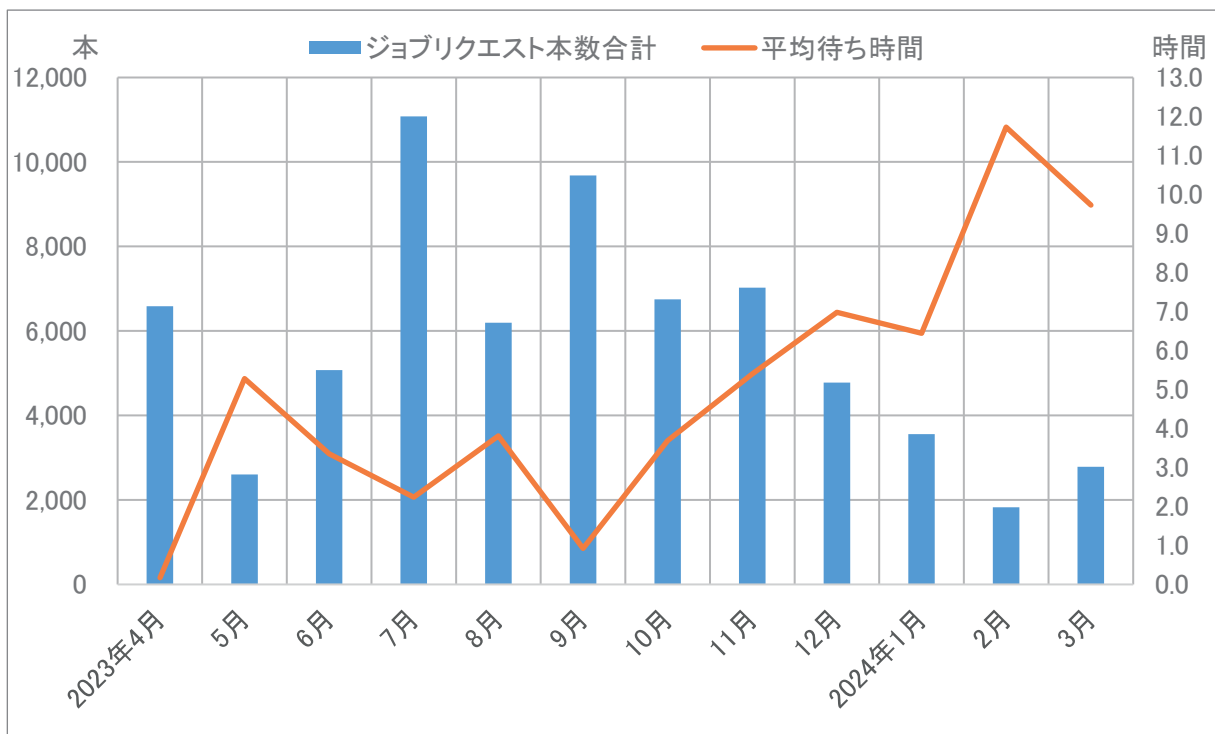


図5. ベクトル処理用計算機のジョブリクエスト数と平均待ち時間の推移
(2023年4月1日～2024年3月31日)

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2.5時間であり、前年度平均の2.0時間から0.5時間増加した。特に2～3月に入ってから、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。

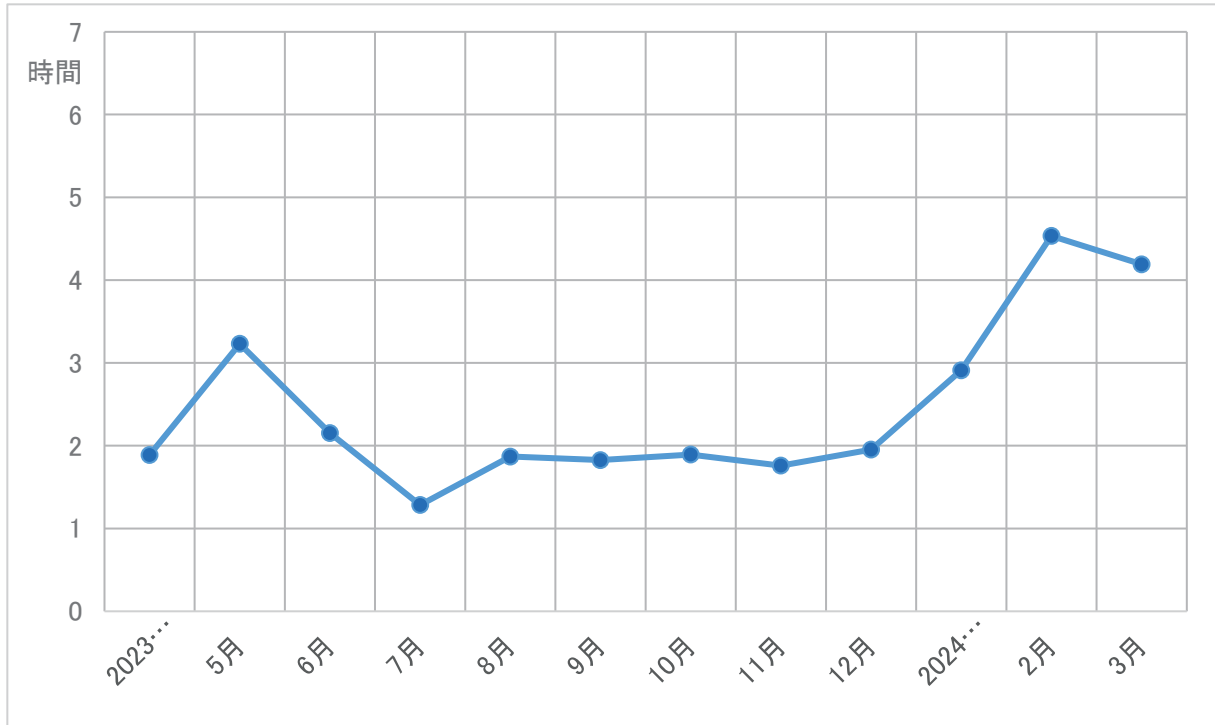


図6. 月ごとのベクトル処理用計算機の平均ジョブ実行時間の推移
(2023年4月1日～2024年3月31日)

3.3 利用実績（大容量ファイルシステム）

2023年4月から2024年3月にかけての大容量ファイルシステムの利用率は、37.3%から49.7%に推移しており、期間全体の平均で43.4%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は解消されているといえる。図8には、2020年4月からの4年間の大容量ファイルシステムの利用率の推移を示す。

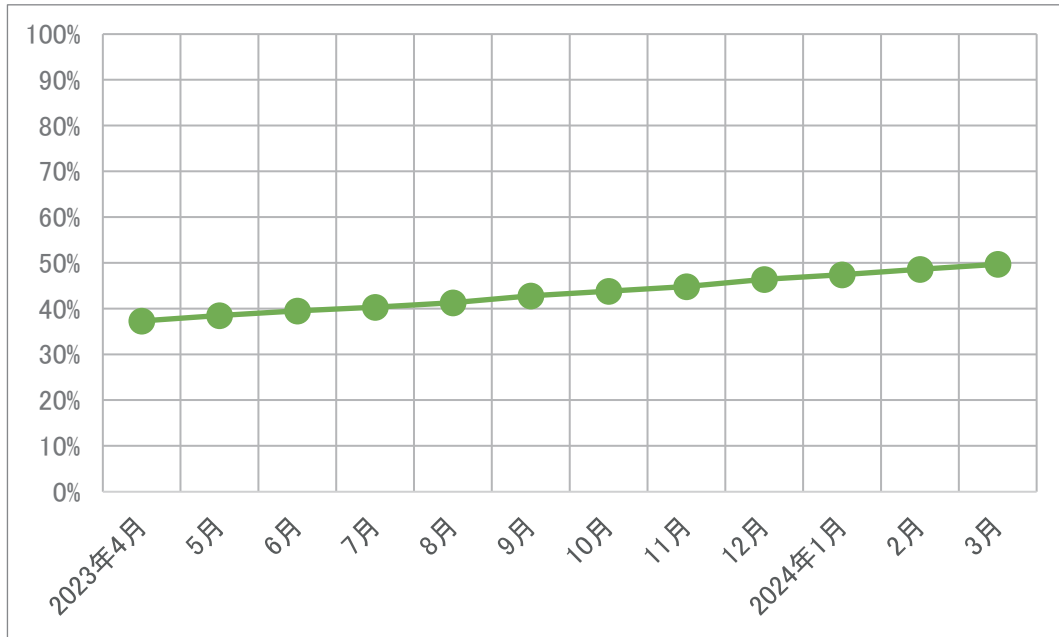


図7. 大容量ファイルシステム（/data領域）の使用率（2023年4月1日～2024年3月31日）

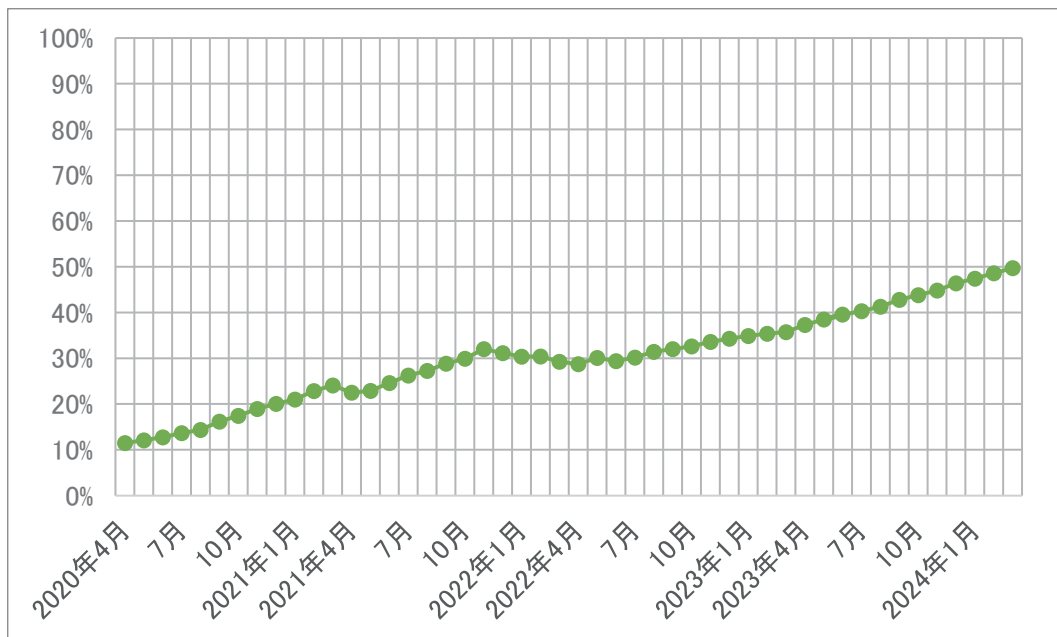


図8. 大容量ファイルシステム（/data領域）の使用率（2020年4月1日～2024年3月31日）

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) Out of stock
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)

.....

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., KITO 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)
MAKSYUTOV, 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
SATO 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5年度スーパーコンピュータ研究利用専門委員会

石井正好	国土交通省気象庁気象研究所
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
日置潤一	国立研究開発法人国立環境研究所環境情報部
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5年度

NIES Supercomputer Annual Report 2023

国立環境研究所地球環境研究センター 編

[CGER-REPORT: ISSN 2434-5679
CGER-I173-2024]

2024年11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。

