CGER-REPORT

ISSN 2434-5679

CGER-I168-2024

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 4 年度

NIES Supercomputer Annual Report 2022

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

CGER-REPORT
ISSN 2434-5679
CGER-I168-2024

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 4 年度

NIES Supercomputer Annual Report 2022

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 4 年度に実施された利用研究の成果として、全 10 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 1 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

目　次

出版にあたって i

目次 iii

1. 雲・降水プロセスに着目した気候変動予測の不確実性に関する研究 1
   課題代表者：国立環境研究所地球システム領域　廣田渚郎

2. 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 7
   課題代表者：国立環境研究所地域環境保全領域　五藤大輔

3. 大気海洋結合化学気候モデルを用いたオゾン層変化とその気候変化への影響に関する研究 17
   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. 地球システムにおける陸域モデル開発による気候変動研究 27
   課題代表者：国立環境研究所地球システム領域　横畠徳太

5. 閉鎖性水域における水環境・生態系への気候変動影響の予測と適応策に関する研究 35
   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 43
   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 51
   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） 59
   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 69
   課題代表者：北海道大学大学院理学研究院　石渡正樹

10. 超高解像度モデルSCALEによる植生を考慮した都市域における二酸化炭素輸送計算 ……75
   課題代表者：東京大学大気海洋研究所　今須良一

国立環境研究所　スーパーコンピュータシステム概要 81

国立環境研究所環境情報部
日本電気株式会社

CGER'S SUPERCOMPUTER ACTIVITY REPORT
国立環境研究所スーパーコンピュータ利用研究年報（NIES Supercomputer Annual Report）
CGER'S SUPERCOMPUTER MONOGRAPH REPORT

既刊紹介 92

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：
雲・降水プロセスに着目した気候変動予測の不確実性に関する研究

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
国立環境研究所気候変動適応センター　石崎紀子
東京大学大気海洋研究所　渡部雅浩
東京大学生産技術研究所　金炯俊・日比野研志
岡山大学大学院自然科学研究科　野沢徹
茨城大学理工学研究科　若月泰孝
気象庁気象研究所　川瀬宏明
株式会社三菱総合研究所　井上剛
株式会社パスコ・中央事業部　姫木祐太郎
エム・アール・アイリサーチアソシエイツ株式会社　櫻木俊輔
東京海洋大学学術研究院　関口美保

1. 研究目的

気候変動予測には大きな不確実性がある。例えば、気候モデルの気候感度(二酸化炭素濃度倍増時の気温上昇量)には1.8~5.6 Kの幅がある。不確実性の最大の要因は、モデルの雲・降水プロセスにある。本研究課題では、気候モデルによる気候変動予測実験を行い、予測不確実性と雲・降水プロセスの関係を調査する。その理解に基づいて、予測不確実性の低減も目指す。また、気候変動予測実験の結果の解析から、温暖化の降水や降水に関わる台風などの気象現象への影響を調べる。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。

2. スーパーコンピュータ利用実績

2.1 計算機利用時間（2022年4月1日～2023年3月31日）

CPU時間	v_debug	:	53.7[VE・hours]
	v_normal	:	207,533.0[VE・hours]
	計	:	207,586.7[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the Model for Interdiciplinary Research on Climate（MIROC）を用いて、現実気候再現実験と温暖化実験を行った。モデルにおける雲・降水プロセスの表現や、そのパラメータを変更する感度実験を行い、それらの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 Regioanl Climate Model (NHRCM)も利用し、温暖化の台風への影響を調べるための実験も行った。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、気候モデルによる数値実験を行い、モデルの雲・降水プロセスの表現と気候変動予測の関係を調査した。気候モデルMIROCでは、雲・降水プロセスをより精緻に計算することで、上層雲量の表現が改善した。温暖化が進むと、その上層雲の高さが高くなることに伴い雲の温室効果が温暖化を加速することが分かった (正の雲フィードバック)。このフィードバックの値は、プロセス理解や過去のデータの研究に基づく推定値と整合的であり、将来予測の信頼性が向上したと考えられる。また、MIROCに加えて、NHRCMの実験結果を用いて、温暖化の降水や台風への影響を調べる研究を進め、様々な成果を発表した。更に、MIROC開発を進め、モデルの雲表現が関わる気候システムのエネルギー収支を改善した。

3.2 背景と目的

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)では、気候変動に関する科学的な知見がまとめられている。2021年8月に、IPCC第６次報告書が発表され、世界の研究機関で開発されている気候モデル(Coupled Model Intercomparison Project phase 6: CMIP6)による気候変動予測シミュレーションの結果が利用された。しかし、CMIP6モデルによる気候変動予測には大きな不確実性がある。例えば、CMIP6モデルにおける気候感度(二酸化炭素濃度倍増時の気温上昇量)には1.8~5.6℃の幅がある。予測不確実性の最大の要因は、温暖化に対する雲・降水プロセスの役割(フィードバック)がモデル間で異なることである。

本課題の研究目的は、気候モデルによる気候変動予測シミュレーションを行い、予測不確実性や気候変動への影響について、雲・降水プロセスに着目して調べることである。モデルは、主にMIROCを用いる。MIROCは、1990年代からCMIPに参加して、IPCCに貢献してきた気候モデルで、国立環境研究所を含む日本の研究グループで開発されている。近年は、次期CMIP7に向けて、特に雲・降水プロセスを中心に改良が進められている。例えば、これまで診断的に扱われていた雨と雪の降水粒子を予報変数として扱い、それらの雲やエアロゾル粒子との相互作用とその放射プロセスへの影響をより精密に表現できる様になった(予報型降水スキーム)。これらの改良が、モデルによる現在気候の再現性や、その気候変動予測にどの様に影響するのか調べる。また、課題代表者はMIROC開発のとりまとめを担当しており、本課題はその開発の重要な部分を担うものである。

3.3 計算方法

MIROCで、従来の診断型降水スキームと新しく実装された予報型降水スキームを用いた場合の比較を行う。それぞれで現在気候実験と温暖化実験を行い、温暖化時の雲による温暖化の加速/減速効果(雲フィードバック)を比較する。更に、モデルの雲フィードバックを、WCRPによる確からしい推定値と比較して、その妥当性を検証する(Sherwood et al. 2020)。この推定値は、プロセス理解や過去のデータの研究に基づく、気候モデル実験による推定とは独立した値である。

次に、AR6で利用したMIROC6を改良して、AR7で用いるMIROC7の開発を進める。ここでは、特に下記の改良について述べる:

1. 予報型降水スキームの導入
2. 放射スキームにおける水蒸気などの放射特性係数の更新
3. 層積雲スキームの導入(Kawai et al. 2019)

3.4 結果

本研究課題では、気候モデルのMIROCにおける雲・降水プロセスの精緻化が気候変動予測に与える影響を調べてきた。予報型降水の導入によって、MIROCの気候感度は20%増加(2.15→2.56K)した。その変化は長波の雲フィードバックが強化されたことによるものである。これまで、大気上層の雲の過少バイアスが改善された。温暖化が進むと、対流圏界面上昇に伴い、上層雲の高度が高くなる。雲は高度が高いほど、その温室効果が効率的に働くので、これは温暖化を加速する方向に働いた(正の雲フィードバック)。この内容はHirota et al. (2022)で発表した。

次に、MIROCの雲フィードバックのWCRPによる確からしい値との比較を図1に示す。雲の高さ・量・厚さの変化に伴う雲フィードバックと、全ての雲の変化に伴うトータルの雲フィードバックを示している。診断型降水のトータルの雲フィードバックが小さい値であり、WCRPの推定値の確からしい幅からも外れている。一方で、予報型降水のトータルの雲フィードバック+0.5W/m^2/K程度であり、WCRPの推定幅の中央値に近い。特に、診断型降水で小さかった雲の高さフィードバックや海上の下層雲フィードバックが大きくなった。雲の高さフィードバックが大きくなったことは前述の通りである (Hirota et al. 2022)。予報型降水では、雲の高さ・量・厚さのフィードバックのほとんどが、WCRPによる確からしい推定値と整合的になった。改良によって、将来予測の信頼性が向上したと考えることができる。

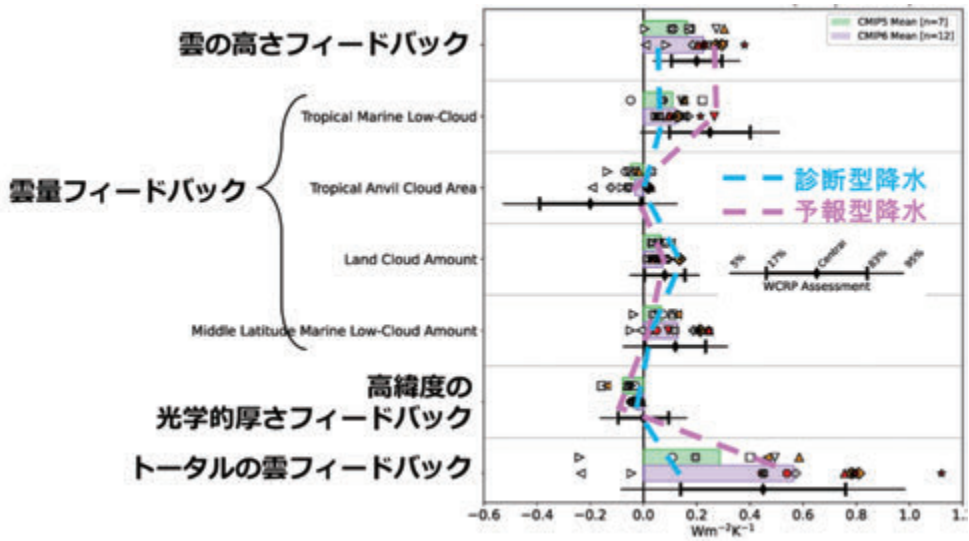

図1. 診断型降水と予報型降水スキームのMIROCの雲フィードバック。WCRPによる確からしい推定値との比較。WCRPの推定値は黒線のバーで、その幅が示されている。○、△、□などは、他のCMIP5/6モデルの雲フィードバックを示す。

MIROC7の開発では、予報型降水の導入に加えて、放射スキームの改良と層積雲スキームの導入を行った。MIROCの放射スキームでは、これまでHITRAN2004に基づく水蒸気などの放射特性パラメータが利用されてきた。それをCKDMIP2019に基づくものに更新した。図2に改良前のMIROC6とMIROC7の全球平均の太陽放射フラックスのバイアスを示す。MIROC6では、地表では+3.5W/m^{2}程度のバイアスがある。この地表のバイアスはMIROC7では、+0.5W/m^{2}程度まで改善されている。これは放射パラメータの更新によって、大気中の水蒸気による太陽放射の吸収が大きくなったためである。

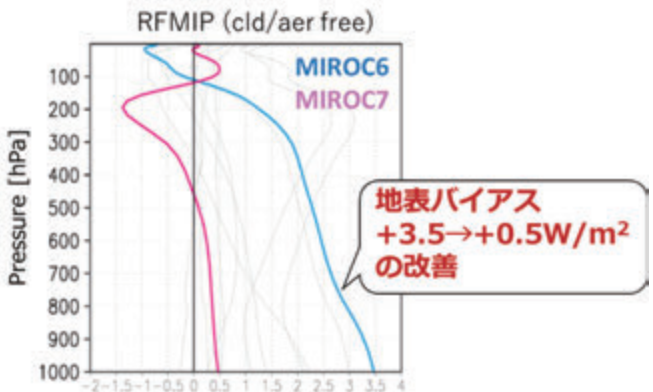

図2. MIROC6とMIROC7による太陽放射フラックス(W/m^2)のline-by-line計算によるレファレンスからのバイアス。

図3にMIROC7に導入した層積雲スキームの影響を示す。層積雲スキーム導入前は、アメリカ大陸西岸沖などで、下層雲が過小評価されているものが、導入後には改善されている。これらの地域は、逆転層が発達し、層積雲が卓越する地域であり、導入した層積雲スキームが適切に働いていると考えられる。

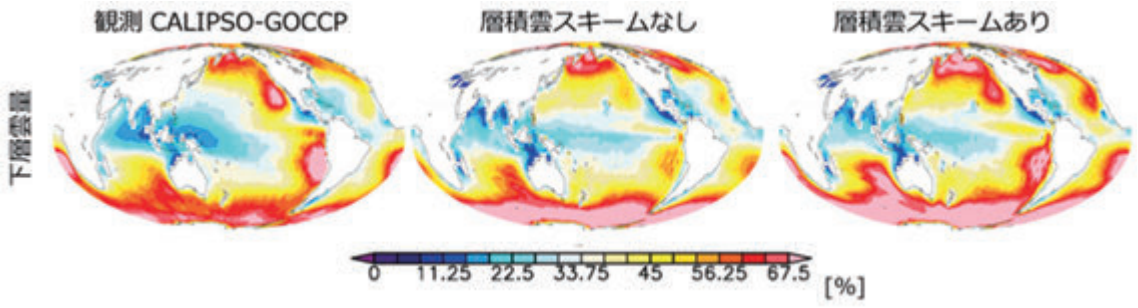

図3. 衛星観測(左)および層積雲スキーム導入前(中)と導入後(右)のMIROC7の下層雲量(%)。

予報型降水と層積雲スキームの導入、放射スキームの更新を行い、更に乱流・対流スキームなどの調整を行った試行版のMIROC7αのエネルギー収支のバイアスを調べる(図4)。全球平均値を見ると、MIROC6には、SW雲放射に-13W/m^{2}程度の負バイアスと晴天長波(LW)放射の+7.2W/m^{2}程度の正バイアスが見られる。それぞれ、過剰な水雲量の日傘効果と、過剰な水蒸気による温室効果が主要な原因であると考えられる。MIROC7では、水雲量と水蒸気量のバイアスが軽減しており、対応して、SW雲放射と晴天LW放射のバイアスが軽減されている。ただし、雲放射効果は、熱帯で過剰で、中高緯度で過小なバイアスがある。今後、雲放射効果の水平分布など改善していく必要がある。

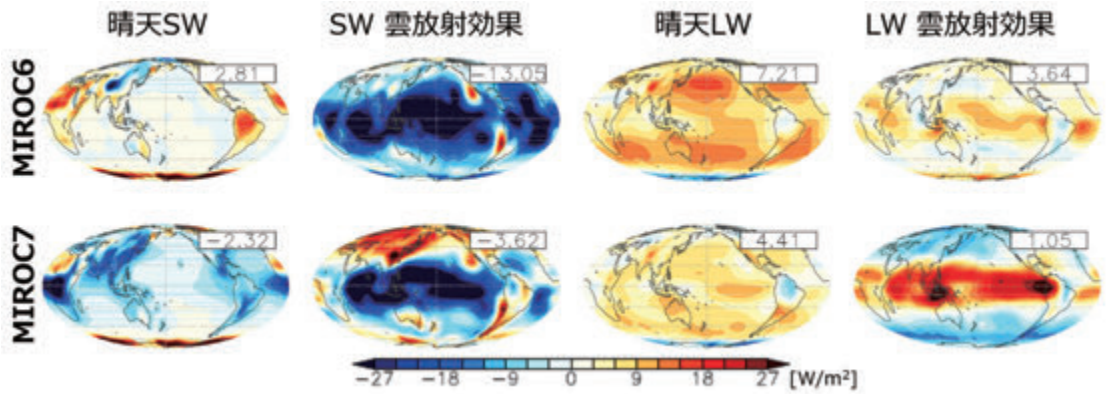

図4. MIROC6とMIROC7の大気上端のエネルギー収支。左から、晴天短波放射、短波雲放射、晴天長波放射、長波雲放射のバイアス(W/m^2)。全球平均値を図中右上に示す。

温暖化の影響を調べる研究では、例えば、シミュレーション結果を利用して、温暖化の台風への影響を調査し、パンフレット”勢力を増す台風”(環境省2020)にまとめた。Shiogama et al. (2021)は、気候変動の緩和がうまく進まないSSP5-8.5シナリオにおいて、祖父母世代が経験しないような大雨（1960～2040年で最大の日降水量を超えるもの）をその孫世代が生涯（2020～2100年）で3回程度経験すると推計した。Shiogama et al. (2022)では、モデルによる将来の降水量変化予測の制約に、世界で初めて成功した。

計算機資源のおおよその使用割合は、予報型降水スキームの気候変動予測への影響についての研究が2割程度、MIROC開発が6割程度、温暖化の影響を調べる研究が2割程度である。

参考文献

Sherwood, S. C., Webb, M. J., Annan, J. D., Armour, K. C., Forster, P. M., Hargreaves, J. C., ... & Zelinka, M. D. (2020). An assessment of Earth's climate sensitivity using multiple lines of evidence. Reviews of Geophysics, 58(4), e2019RG000678.

Kawai, H., Yukimoto, S., Koshiro, T., Oshima, N., Tanaka, T., Yoshimura, H., & Nagasawa, R. (2019). Significant improvement of cloud representation in the global climate model MRI-ESM2. Geoscientific Model Development, 12(7), 2875-2897, https://doi.org/10.5194/gmd-12-2875-2019.

Hirota, N., T. Michibata, H. Shiogama, T. Ogura, K. Suzuki (2022) Impacts of precipitation modeling on cloud feedback in MIROC6. Geophysical Research Letters, 49, https://doi.org/10.1029/2021GL096523.

環境省 (2020) 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/earth/tekiou/typhoon2020.pdf

Shiogama, H., Fujimori, S., Hasegawa, T., Takahashi, K., Kameyama, Y., Emori, S. (2021). How many hot days and heavy precipitation days will grandchildren experience that break the records set in their grandparents' lives?. Environmental Research Communications, 3(6), 061002. https://doi.org/10.1088/2515-7620/ac0395.

Shiogama H.,Watanabe M.,Kim H.,and Hirota N.(2022) Emergent constraints on future precipitation changes. Nature, 602, 612-616, https://doi.org/10.1038/s41586-021-04310-8.

4. まとめ

本研究課題では、雲・降水プロセスに着目して、気候変動予測の不確実性や気候変動の影響について調べた。まず、気候モデルMIROCによる数値実験を行い、モデルの雲・降水プロセスの表現と気候変動予測の関係の理解を進めた。気候モデルMIROCでは、雲・降水プロセスをより精緻に計算することで、上層雲量の表現が改善し、その高度が高くなることに伴う温暖化加速の効果(雲フィードバック)が大きくなることを示した。また、温暖化の降水や台風への影響の研究においては、全球気候モデルMIROCに加え、より高解像度の計算が可能な領域気候モデルNHRCMも利用して、様々な成果を発表した。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）

Andrews, T., A. Bodas-Salcedo, J. M. Gregory, Y. Dong, K. C. Armour, D. Paynter, P. Lin, A. Modak, T. Mauritsen, J. N. S. Cole, B. Medeiros, J. J. Benedict, H. Douville, R. Roehrig, T. Koshiro, H. Kawai, T. Ogura, J.-L. Dufresne, R. P. Allan, C. Liu (2022) On the effect of historical SST patterns on radiative feedback, J. Geophys. Res., 127, e2022JD036675, https://doi.org/10.1029/2022JD036675.

Konsta, D., J.-L. Dufresne, H. Chepfer, J. Vial, T. Koshiro, H. Kawai, A. Bodas-Salcedo, R. Roehrig, M. Watanabe, and T. Ogura (2022) Low-level marine tropical clouds in six CMIP6 models are too few, too bright but also too compact and too homogeneous, Geophys. Res. Lett., 49, e2021GL097593, https://doi.org/10.1029/2021GL097593.

Wehrli, K., Luo, F., Hauser, M., Shiogama, H., Tokuda, D., Kim, H., Coumou, D., May, W., Le Sager, P., Selten, F., Martius, O., Vautard, R., and Seneviratne, S. I. (2022) The ExtremeX global climate model experiment: investigating thermodynamic and dynamic processes contributing to weather and climate extremes, Earth Syst. Dynam., 13, 1167–1196, https://doi.org/10.5194/esd-13-1167-2022.

Luo, F., F. Selten, K. Wehrli, K. Kornhuber, P. Le Sager, W. May, T. Reerink, S. I. Seneviratne, H. Shiogama, D. Tokuda, H. Kim, D. Coumou (2022) Rossby waves in climate models: substantial biases in surface imprint associated with small biases in upper-level circulation. Weather and Climate Dynamics, 3, 905–935, https://doi.org/10.5194/wcd-3-905-2022.

5.2 誌上発表（査読なし）

該当なし

5.3 口頭発表

Ogura, T. and M. J. Webb (2022): Positive low cloud feedback primarily caused by increasing longwave radiation from the sea surface in a climate model MIROC6, 3rd Pan-GASS Meeting, Understanding and modeling atmospheric processes, 26 July, Monterey.

Hirota, N., T. Michibata, H. Shiogama, T. Ogura, and K. Suzuki (2022) Impacts of Precipitation Modeling on cloud response to global warming in MIROC6. CFMIP 2022, 21 July, Seattle.

廣田 渚郎, 道端 拓朗, 塩竈 秀夫, 小倉 知夫, 鈴木健太郎 (2022) MIROC6における降水過程精緻化による雲の温暖化応答への影響. JpGU 2022, 5月30日, 千葉.

廣田 渚郎, 道端 拓朗, 塩竈 秀夫, 小倉 知夫, 鈴木健太郎 (2022) MIROCにおける雲・降水プロセス高度化の雲フィードバックへの影響. 日本気象学会, 5月20日, オンライン.

5.4 その他（書籍等）

該当なし

6. 連絡先

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：
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
名古屋大学大学院環境学研究科　須藤健悟・Hossain Mohammed Syedul Hoque・Ha ThiMinh Phuc・何 彦峰・王 靖凌・鎌田友美・水野光一郎・正木悠斗・Hui Wei・Do Thi Nhu Ngoc
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・中尾穂乃香
Ulsan National Institute of Science and Technology　朴 祥緒
海洋研究開発機構地球表層システム研究センター　関谷高志

1. 研究目的

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

キーワード：大気汚染物質輸送モデル、短寿命気候汚染物質、モデル高度化

2. スーパーコンピュータ利用実績

2.1 計算機利用時間（2022年4月1日～2023年3月31日）

CPU時間　v_debug　：　136.2[VE・hours]
v_normal　：384,988.5[VE・hours]
計　：385,124.7[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、大気大循環モデル版および大気海洋結合版MIROCと大気化学モデルCHASERが結合した3次元全球規模大気汚染物質輸送モデル（MIROC-ESM）、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、それぞれについて並列計算を行った。今年度はMIROCの結果を中心に報告する。

3. 研究結果

3.1 概要

大気海洋結合モデル MIROC-SPRINTARS を用いて、環境省推進費 S-20 テーマ 1 の中で計画した SLCFs である二酸化硫黄（SO_2）、ブラックカーボン（Black Carbon: BC）、有機炭素エアロゾル（Organic Carbon: OC）に関する感度実験を実施した。具体的には、特定地域（本報告書では全球・中国・インド）の化石燃料燃焼起源の SO_2、BC、OC の排出量をゼロにしたシミュレーション

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。その結果、BC の削減は雲や水蒸気を介した複雑なフィードバックが発生するために大気が必ずしも冷えないことが示唆されていたが、中国あるいはインドのみで BC を削減すると地球の平均地上気温が下がることが示された。したがって、局所的な SLCFs の削減で効果的な温暖化抑制が実施できる可能性が示唆された。

不確実性が大きいモデルの雲の再現性評価として、MIROC に衛星シミュレータを利用したところ、雲量のモデル再現性が向上し、観測との誤差が全球年平均値で 5%以内になった。また、降水予報型スキームを導入した MIROC のモデル結果を詳しく調べたところ、降水予報型スキームでは、水雲の頻度、雲量、地表面での降雪フラックスがかなり改善されたが、降雪頻度が過大評価であり、降雪強度が弱いなどの依然として改善すべき点も明らかとなった。

また、全球化学輸送モデル MIROC-ESM の改良として、化学モジュール CHASER の高度化も実施した。HONO（亜硝酸）を CHASER に導入したところ、NO_x は 20%減少、O_3 は 5%減少、CO は 8%増加、メタン大気寿命は 13%増加した。また、NO_x の中部から上部対流圏における主要な発生源である雷活動で生成されるフラックスの定式化を改良したところ、発雷率の年変動率の再現性が向上し、地球温暖化によって雷や雷 NO_x が増加して、大気酸化能（OH 濃度）が上昇する可能性が示唆された。

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（BC、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きた。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並行して進めている。

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、OC、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、これら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 SO_2、BC、OC）排出量を特定地域（中国、インド、の他に、日本、インドネシア・タイ・ベトナム、その他のアジア、EU、その他のヨーロッパ・ロシア、北米、中南米、オセアニア、中央アジア、アフリカ、アジア全域、全球も対象としたが、本報告書では全球・中国・インドのみの結果を提示する）においてゼロにしたシミュレーションを実施し、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。放射場の影響を見るために、エアロゾルと放射相互作用（Aerosol-Radiation Interaction: ARI）による瞬時放射強制力（Instantaneous Radiative Forcing due to ARI: IRF_{ARI}）に注目した。これまでの研究（Takemura and Suzuki, 2019; Takemura, 2020）においては、SLCFs の前駆物質排出量を全球一律で変化させたことによる放射強制力及び地上気温の変化を調べたが、本研究では領域毎で排出量を変化させたことによる放射強制力及び地上気温の変化を調べる。

モデル水平分解能は 1.4 度、鉛直方向は 40 層で計算した。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 年間のスピンアップの後の 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 SO_2 の排出量は CEDS (Community Emissions Data System:

https://github.com/JGCRI/CEDS) を利用した。その他のシミュレーション設定の詳細に関しては、Takemura and Suzuki (2019)及び Takemura (2020) にも記載がある。

3.3.2 MIROC モデルの雲の評価手法改良

不確実性が大きいモデルの雲の評価として、衛星シミュレータを利用した。実際の衛星観測では降雪粒子の一部も雲として判定されるが、この効果はこれまでのモデル評価では考慮されていなかった。つまり、衛星で見ているものとモデルで計算されるものが同一ではなかった。そこでこの効果を衛星シミュレータ（COSP: Cloud feedback model inter-comparison project (CFMIP) Observation Simulator Package）でも考慮することで、MIROC の雲のより厳密な評価を実施した。

さらに、Imura and Michibata (2022)ではモデルが表現する降水が雨か雪か、そしてその強度がどのぐらいかを CloudSat 衛星観測の検出感度と同一条件で評価する方法（降水フラグ）を用いて、MIROC の降雨および降雪を評価した。

3.3.3 MIROC-CHASER における化学過程改良

本研究で用いた全球化学輸送モデルは、気候モデル MIROC に大気化学場を計算することができる CHASER（Sudo et al., 2002; Sudo and Akimoto, 2007）を結合した MIROC-ESM（Watanabe et al., 2011）である。用いた CHASER は Version 4 に対応しており、対流圏化学では O_x-NO_x-HO_x-CH_4-CO の基礎的な化学サイクルを考慮し、94 化学種、258 本の化学反応式を考慮している。本実験での水平解像度は 2.8°、鉛直方向は 36 層で計算した。気象場は、再解析データ（NCEP2 FNL reanalysis）をナッジングした。全ての実験において、大気海洋応答は加味せず、海洋温度及び海氷は外部境界データを与えた。

このようなモデルの基本設計に対して、Ha et al. (2023)では対流圏大気化学の NO_x と HO_x 循環への寄与が大きいとされている HONO（亜硝酸）を CHASER に新たに導入し、NO_x と HO_x への変化と、間接的に変化するオゾンに着目した。

また、He et al. (2022)では、NO_x の中部から上部対流圏における主要な発生源である雷活動で生成されるフラックス量を改良した。従来の方法では雲頂高度のみの関数で表していたが、新しい方法では ECMWF（European Centre for Medium-Range Weather Forecasts）で採用されている方法をベースに改良し、対流有効位置エネルギー（CAPE: Convective Available Potential Energy）や雲水や雲氷の質量フラックスに依存した関数で表現した（以後、ECMWF 方式と呼ぶ）。

3.4 結果

3.4.1 MIROC-SPRINTARS による S-20 感度実験

図 1 左に示したように、中国のみで化石燃料燃焼起源の物質排出量を変化させた場合、全球で変化させた場合と比べるとどの物質（硫酸塩エアロゾル、BC、OC）も 13%程度の IRF_{ARI} の差が生じていた。図 1 右には海洋応答も加味したシミュレーションによる気温変化分布図を提示したが、中国の人為起源 SO_2 削減で+0.063 K、BC 削減で-0.014 K、OC 削減で+0.011 K の地上気温変化（全球年平均値）が見積もられた。全球で人為起源排出量を削減した場合には、SO_2 削減で+0.510 K、BC 削減で+0.047 K、OC 削減で+0.089 K の地上気温変化（全球年平均値）が見積もられた。全球で変化させた場合と比べると SO_2 と OC は 12%程度の差で、IRFari と同程度の差であったが、BC は符号も異なり、SO_2 と OC とは大きく異なる変化であった。BC を全球規模で削減することで、雲や水蒸気を介した複雑なフィードバックが発生するために大気が必ずしも冷えない（Suzuki and Takemura, 2019; Takemura and Suzuki, 2019）が、中国のみで BC を削減した場合には地球の平均地上気温が下がることが示された。並行して実施したインドのみで削減したシミュレーションによっても、地球の平均地上気温が下がることが示された。したがって、局所的な SLCFs の削減で効果的な温暖化抑制が実施できる可能性が示唆された。

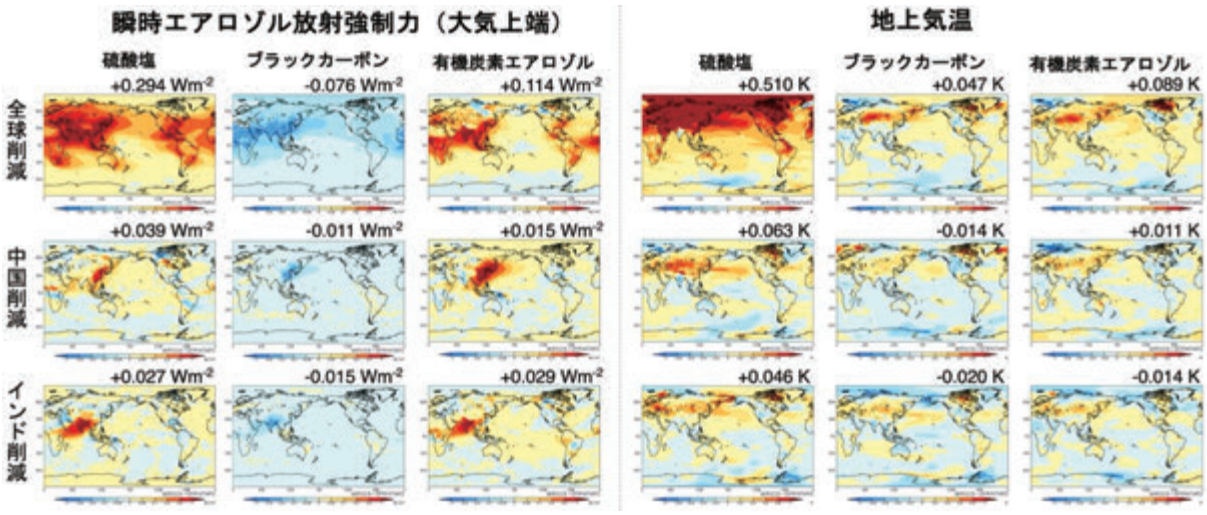

図1. 大気海洋結合モデルMIROC-SPRINTARSによる化石燃料燃焼起源のSLCFs（硫酸塩：硫酸塩エアロゾルの前駆気体SO_2、ブラックカーボン、有機炭素エアロゾル）排出量をゼロにしてシミュレーションした大気上端における瞬時エアロゾル放射強制力と地上気温の標準実験との差。上段は全球で削減した場合、中段は中国領域のみで削減した場合、下段はインド領域のみで削減した場合である。

3.4.2 MIROC モデルの雲の評価手法改良

モデルの評価手法を更新することで、より現実的な雲（衛星観測）との比較が厳密となり、その比較結果を図 2 に示した。これらから、衛星シミュレータ COSP で計算することによって、雲量の再現性が向上することがわかり、全雲量・高度毎雲量に関して、衛星観測との全球年平均値の誤差が 5%以内になることが計算された。

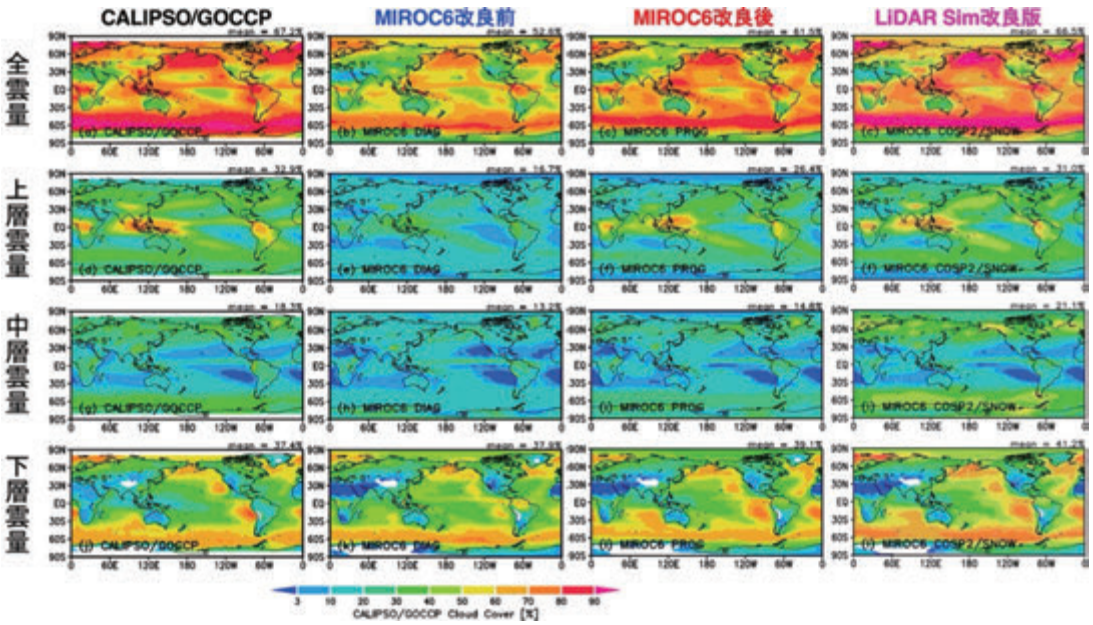

図2. 衛星観測CALIPSO/GOCCPと3種類のMIROCで計算された雲量。MIROC6改良前（従来の降水診断型スキーム）、MIROC6改良後（降水予報型スキーム）、LiDAR Sim改良版（衛星シミュレータCOSPで計算したもの）に対応。雲量は、全層・上層・中層・下層で比較をした。

図 3 には、降水予報型スキームを導入した MIROC で計算した降雨と降雪の頻度の水平分布図を示している。これらの結果から、改良型の MIROC であっても、降雪頻度を過大評価することがわかり、降雪強度を過小評価する誤差補償が存在することが明らかとなった。このことは、雲フェーズ診断だけでなく, 降水フェーズ診断も気候感度に重要である可能性が高い。降水予報型スキームは、水雲の頻度、雲量、地表面での降雪フラックスについては降水診断型スキームよりもかなり改善されたが、まだ改善すべき点も顕在化された。

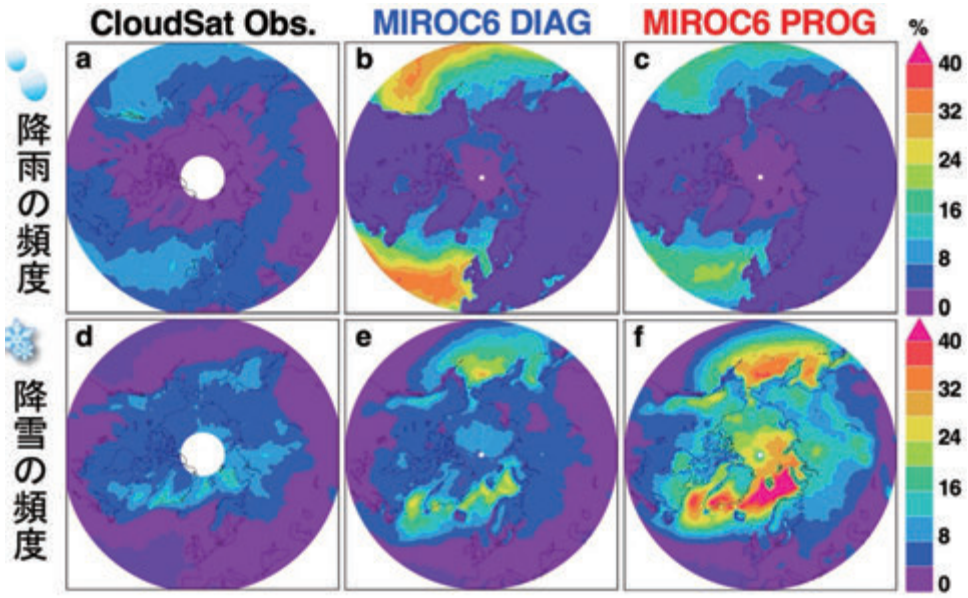

図3. CloudSat衛星観測、MIROC6 DIAG（MIROC6の従来版の降水診断型スキーム）、MIROC6 PROG（MIROC6に降水予報型スキームを導入した改良版）によって得られた降雨の頻度（a,b,c）と降雪の頻度（d,e,f）。分布図は中心が北極となっており、北緯40度よりも北側の場所を示す。

3.4.3 MIROC-CHASER における化学過程改良

図 4 には、HONO 導入による OH、NO_x、オゾン、CO の変化量に関して、地表面付近の全球分布と経度平均を示している。この結果から、OH、NO_x、O_3 が減少し、CO が増加したことが示された。特に、夏半球の高緯度海上での NO_x の減少が顕著であり、それらの場所では地表面 NO_x は 100%も減少した。この理由は、HONO が雲水や雲氷粒で不均一反応することによって、NO に変換され、HONO が大気中から除去される過程が効くためと考えられる。全体としては、HONO を導入する過程で考慮した、気相反応、エアロゾルや雲粒表面での不均一反応、HONO の排出量フラックス、によって、NO_x は 20%減少、O_3 は 5%減少、CO は 8%増加、そしてメタン大気寿命は 13%増加することが明らかとなった。

図 5 には、2001 年から 2020 年までの発雷率の年変動率の変化の全球分布を示している。この図から、東半球の北極地域では、従来の CHASER（改良前）と ECMWF 方式（改良後）の両方で雷が増加する傾向が示された。この傾向は、地球平均表面温度の上昇と同時に増加することが観測に基づいた解析によっても示されている（Holzworth et al., 2021）。また、南半球の高緯度地域（南緯 60 度から 70 度）では、従来の CHASER（改良前）と ECMWF 方式（改良後）の両方で雷が減少する傾向が示された。また北太平洋の一部の地域では、改良後の結果から雷の増加傾向が示されており、これは以前の研究で得られた結果と一致している (Petersen and Buechler, 2008)。以上の結果から、地球温暖化によって雷や雷 NO_x が増加して、大気酸化能（OH 濃度）が上昇する可能性が示唆された。

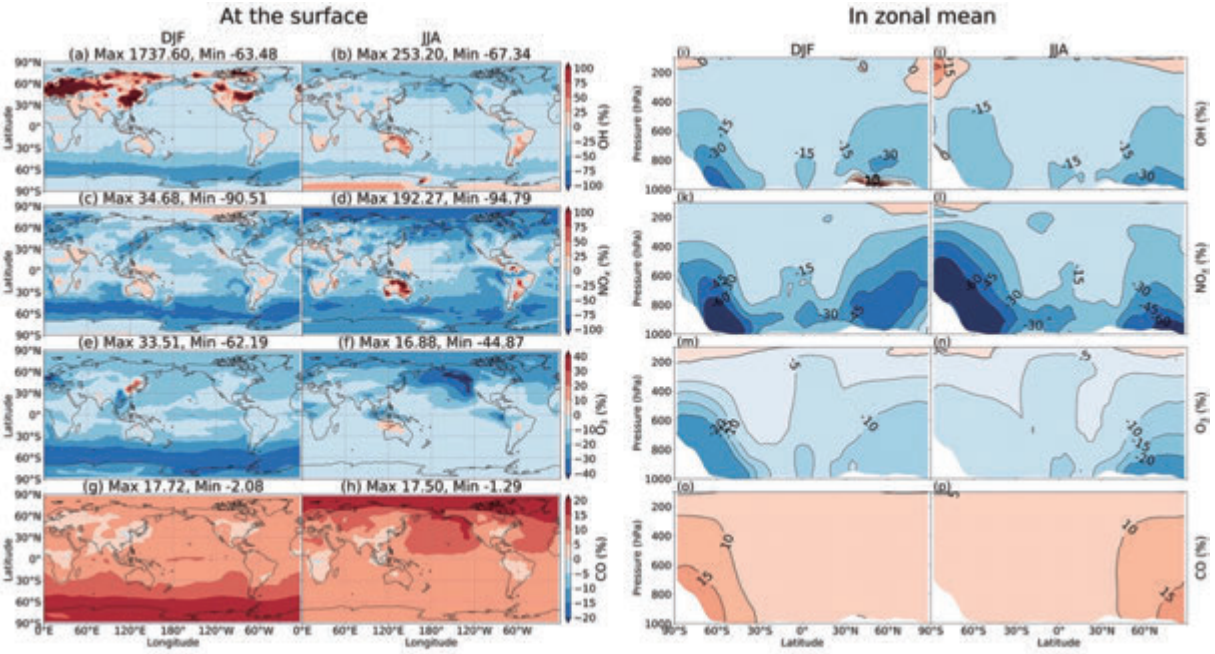

図 4.　HONO 光化学の導入による対流圏物質（OH, NOx, O_3, CO）変化量に関する地表面および帯状平均。それぞれ DJF（December-January-February）と JJA（June-July-August）の結果である。Ha et al. (2023) から引用している。

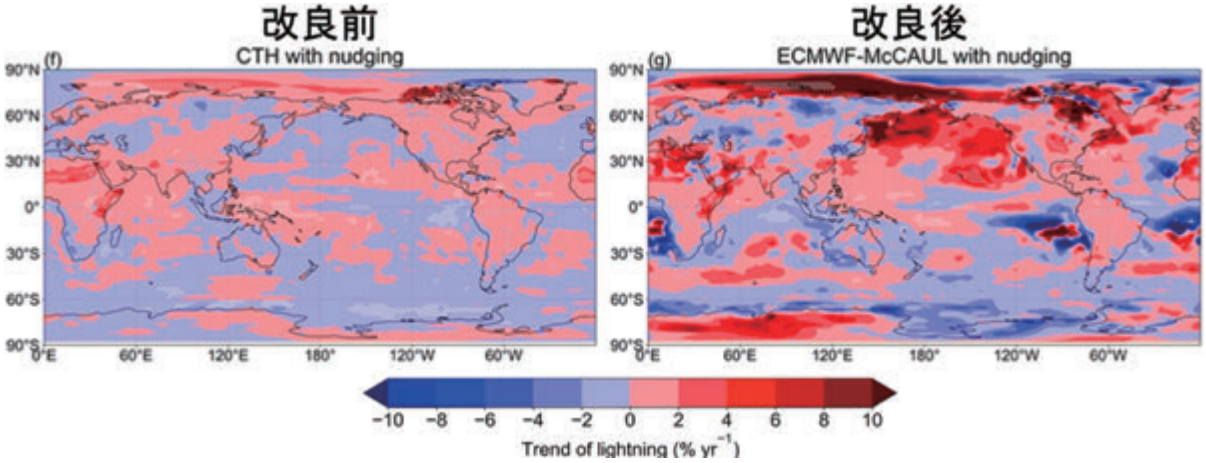

図 5.　（左）改良前（従来の CHASER）と（右）改良後（ECMWF 方式）で計算した 2001 年から 2020 年までの発雷率の年変動率（% yr^{-1}）の全球分布。He et al. (2022) の図 13 を引用している。

参考文献

Holzworth, R. H., Brundell, J. B., McCarthy, M. P., Jacobson, A. R., Rodger, C. J., Anderson, T. S. (2021) Lightning in the Arctic, *Geophys. Res. Lett*., 48, e2020GL091366, https://doi.org/10.1029/2020GL091366

Petersen, W. A., Buechler, D. (2008) Global tropical lightning trends: Has tropical lightning frequency responded to global climate change?, in: *Third Conference on Meteorological Applications of Lightning Data*, New Orleans, USA, 20–28 January 2008, 2.1

Sudo, K., Akimoto, H. (2007) Global source attribution of tropospheric ozone: Long-range transport from various source regions, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 112, D12302, https://doi.org/10.1029/2006JD007992

Sudo K. Takahashi M., Kurokawa J., Akimoto H. (2002) CHASER: A global chemical model of the troposphere:

1. Model description, *J. Geophys. Res*., 107(D17), 4586. https://doi.org/10.1029/2001JD001113
Suzuki K., Takemura T. (2019) Perturbations to global energy budget due to absorbing and scattering aerosols, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 124, 2194-2209. https://doi.org/10.1029/2018JD029808
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
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. Geophy. 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
Takemura T. (2020) Return to different climate states by reducing sulphate aerosols under future CO_2 concentrations. *Sci. Rep.*, 10, 21748, https://doi.org/10.1038/s41598-020-78805-1
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
Watanabe, S., Hajima, T., Sudo, K., Nagashima, T., Takemura, T., Okajima, H., Nozawa, T., Kawase, H., Abe, M., Yokohata, T., Ise, T., Sato, H., et al. (2011) MIROC-ESM 2010: model description and basic results of CMIP5-20c3m experiments, *Geosci. Model Dev*., 4, 845–872, https://doi.org/10.5194/gmd-4-845-2011

4. まとめ

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 SLCFs の変化が気候および地域環境に及ぼす影響を評価した。そのために、数値シミュレーションモデルが必要であり、評価の精度向上のために継続的なモデル精緻化が必須となる。本年度の取り組みによって、局所的な BC の削減で効果的な温暖化抑制が実施できる可能性が示された。また並行して、MIROC に衛星シミュレータを利用することでモデル検証方法がより厳密になり、降水予報型スキームの導入によって雲量の精度向上が確かめられた。また MIROC-ESM の改良として、HONO も導入し、雷由来の NO_x 生成フラックスも改良することで、モデル高度化を進めた。

5. 研究成果発表

5.1 誌上発表（査読あり）

Ha P. T. M., Kanaya Y., Taketani F., Hernández M. D. A., Schreiner B., Pfeilsticker, Sudo K. (2023) Implementation of HONO into the chemistry-climate model CHASER (V4.0): roles in tropospheric chemistry, *Geosci. Model Dev*., 16, 927-960, https://doi.org/10.5194/gmd-16-927-2023
He Y., Hoque H.M.S., 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
Hoque, H. M. S., Sudo, K., Irie, H., Damiani, A., Naja, M., Fatmi, A. M. (2022) Multi-axis differential optical absorption spectroscopy (MAX-DOAS) observations of formaldehyde and nitrogen dioxide at three sites in Asia and comparison with the global chemistry transport model CHASER, *Atmos. Chem. Phys*., 22 (18), 12559-12589, https://doi.org/10.5194/acp-22-12559-2022
Imura Y., Michibata T. (2022) Too Frequent and Too Light Arctic Snowfall With Incorrect Precipitation Phase Partitioning in the MIROC6 GCM, *J. Adv. Model Ear. Sys*., 14, e2022MS003046, https://doi.org/10.1029/2022MS003046
Kusakabe Y., Takemura T. (2023) Formation of the North Atlantic Warming Hole by reducing anthropogenic sulphate aerosols. *Sci. Rep.*, 13, 8, https://doi.org/10.1038/s41598-022-27315-3

Siswanto E, Sarker M. L. R., Peter B. N., Takemura T., Horii T., Matsumoto K., Taketani F., Honda M. C. (2023) Variations of phytoplankton chlorophyll in the Bay of Bengal: Impact of climate changes and nutrients from different sources. *Front. Mar. Sci.*, 10, 1052286, https://doi.org/10.3389/fmars.2023.1052286

Xie, X., Myhre G., Shindell D., Faluvegi G., Takemura T., Voulgarakis A., Shi Z., Li X., Xie X., Liu H., Liu X., Liu Y. (2022) Anthropogenic sulfate aerosol pollution in South and East Asia induces increased summer precipitation over arid Central Asia. *Commun. Earth Environ.*, 3, 328, https://doi.org/10.1038/s43247-022-00660-x

Zhong, Q., Schutgens N., van der Werf G. R., van Noije T., Bauer S. E., Tsigaridis K., Mielonen T., Checa-Garcia R., Neubauer D., Kipling Z., Kirkevåg A., Olivié D. J. L., Kokkola H., Matsui H., Ginoux P., Takemura T., Sager P. L., Rémy S., Bian H., Chin M. (2022) Using modelled relationships and satellite observations to attribute modelled aerosol biases over biomass burning regions. *Nat. Commun*., 13, 5914, https://doi.org/10.1038/s41467-022-33680-4

Zhong, Q., Schutgens N., van der Werf G., van Noije T., Tsigaridis K., Bauer S. E., Mielonen T., Kirkevåg A., Seland Ø., Kokkola H., Checa-Garcia R., Neubauer D., Kipling Z., Matsui H., Ginoux P., Takemura T., Sager P. L., Rémy S., Bian H., Chin M., Zhang K., Zhu J., Tsyro S. G., Curci G., Protonotariou A., Johnson B., Penner J. E., Bellouin N., Skeie R. B., Myhre G. (2022) Satellite-based evaluation of AeroCom model bias in biomass burning regions. *Atmos. Chem. Phys.*, 22, 11009–11032, https://doi.org/10.5194/acp-22-11009-2022

5.2 誌上発表（査読なし）

五藤大輔, 八代尚 (2022) 大気汚染と気候の複合問題への挑戦. 環境儀 85 号, 国立環境研究所.

五藤大輔 (2023) 日本スケールから地球スケールをシームレスに取り扱う大気汚染シミュレーション. 計算で挑む環境研究, 国立環境研究所地球環境研究センター, 33-40

Takemura, T. (2022) Radiative Forcing and Global Warming. In: Handbook of Air Quality and Climate Change, Akimoto H., Tanimoto H. (eds), Springer, Singapore, https://doi.org/10.1007/978-981-15-2527-8_28-1.

Takemura, T. (2023) Radiative Forcing of Particulate Matters. In: Handbook of Air Quality and Climate Change, Akimoto H., Tanimoto H. (eds), Springer, Singapore, https://doi.org/10.1007/978-981-15-2527-8_31-1.

5.3 口頭発表

Hirota, N., T. Michibata, H. Shiogama, T. Ogura, K. Suzuki (2022) Impacts of precipitation modeling on cloud response to global warming in MIROC6, *CFMIP Meeting 2022*, Seattle, USA.

Imura, Y., T. Michibata, K. Suzuki (2023) Evaluation of Arctic snowfall in MIROC with satellite observation and its link to cloud radiative effect, *ICCP-GSRA Workshop 2023 jointly with The 2nd EarthCARE Modeling Workshop*, Shizuoka, Japan.

Kusakabe, Y., Takemura, T. (2022) North Atlantic Warming Hole by reducing anthropogenic aerosols. 21th AeroCom Workshop, online.

Michibata, T., K. Suzuki (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*, Shizuoka, Japan.

Takemura, T., Sudo, K., Goto, D., Suzuki, K. (2023) Simulation of climate change due to reducing regional anthropogenic aerosol emissions using a coupled atmosphere-ocean model. Workshop on the regional climate response to anthropogenic aerosol changes, online.

Takemura, T. (2022) Simulation of aerosol-induced climate change due to emission change by composition using a coupled atmosphere-ocean model. Asian Aerosol Conference 2022, online. [invited]

Takemura, T., Sudo, K., Goto, D., Suzuki, K. (2022) Simulation of climate change due to reducing emission of each anthropogenic aerosol component by region using a coupled atmosphere-ocean model. EGU General Assembly 2022, online.

井村裕紀, 道端拓朗, 鈴木健太郎 (2022) 全球気候モデル MIROC6 における北極域の雲・降水・放射相互作用の解析, *日本気象学会 2022 年度秋季大会*, 北海道大学（札幌）.

鎌田友美, 須藤健悟 (2022) 台風が大気微量成分の分布に及ぼす影響, *日本気象学会 2022 年度秋季大会*, 北海道大学（札幌）.

五藤大輔 (2023) 全球・領域規模でのエアロゾルシミュレーションについて, 令和４年度化学物質環境実態調査 環境科学セミナー, ハイフレックス開催.

五藤大輔 (2022) 大気環境に関わるエアロゾル全球シミュレーション, 2022 年度シンポジウム富岳で見える気象の未来予想図, リモート開催.

須藤健悟 (2022) Global simulation of SO_2 and sulfate aerosol from the Hunga-Tonga eruption: Potential impacts

on atmospheric chemistry and climate, *JpGU 2022 annual meeting*.
須藤健悟, 伊藤昭彦, 中田裕太 (2022) 2000-2020 年のメタン変動要因の推定 : CHASER/VISIT による全球シミュレーション, *JpGU 2022 annual meeting*.
竹村俊彦, 安井良輔 (2022) 2022 年 1 月トンガ火山噴火に伴う気候変動のシミュレーション. 日本気象学会 2022 年度春季大会, オンライン.
廣田渚郎, 道端拓朗, 塩竈秀夫, 小倉知夫, 鈴木健太郎 (2022) MIROC6 における降水過程精緻化による雲の温暖化応答への影響, *JpGU Meeting 2022*, リモート開催.
廣田渚郎, 道端拓朗, 塩竈秀夫, 小倉知夫, 鈴木健太郎 (2022) MIROC における雲・降水プロセス高度化の雲フィードバックへの影響, *日本気象学会 2022 年度春季大会*, リモート開催.
水野光一郎, 須藤健悟 (2022) 代替フロン（HFC-134a・HFC-152a）の全球分布と経年変動 : 化学気候モデルによる評価, *日本気象学会 2022 年度秋季大会*, 北海道大学（札幌）.
道端拓朗 (2023) エアロゾル・雲の気候影響 : 数値モデリングと衛星観測, *日本気象学会関西支部 2022 年度第 3 回例会（中国地区）*, リモート開催.

5.4 その他（書籍等）

該当なし

6. 連絡先

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：
大気海洋結合化学気候モデルを用いたオゾン層変化とその気候変化への影響に関する研究

実施年度：
令和 2 年度～令和 4 年度

課題代表者：国立環境研究所地球環境研究センター　秋吉英治（R2－R3）、山下陽介（R4）
共同研究者：国立環境研究所地球環境研究センター　池田恒平・高橋正明

1. 研究目的

海洋を結合した MIROC 化学気候モデルを整備・高度化し、それを用いた数値実験を行うことにより、オゾンなどの大気微量成分濃度変動と、成層圏・対流圏・地表の気候変動との関係を明らかにする。それによって、今後地球温暖化が進む中でのフロン・ハロン対策に資することを目的とする。

キーワード：
大気海洋結合化学気候モデル、MIROC、オゾン層、ODS、GHG、HFC、成層圏、フロン対策

2. スーパーコンピュータ利用実績

2.1 計算機利用時間（2022年4月1日～2023年3月31日）

CPU時間　v_debug　：　48.6[VE・hours]
　　v_normal　：145,090.5[VE・hours]
　　計　：145,139.1[VE・hours]

2.2 利用概要

海洋オフラインの MIROC3.2 化学気候モデル、MIROC5 化学気候モデル、および海洋を結合した MIROC5 化学気候モデルを整備・高度化し、それらを用いた数値実験を行った。MIROC5 化学気候モデルでは、海洋オフラインと海洋オンラインの設定で Chemistry Climate Mode Initiative（CCMI）の推奨実験（オゾン層と気候の過去再現実験および将来予測実験）を行い、オゾン全量等を比較した。また、海洋オフラインの MIROC3.2、MIROC5 化学気候モデルで、将来予想される温室効果ガス（greenhouse gas：GHG）濃度とオゾン破壊物質（ozone-depleting substance：ODS）濃度にペアで設定した 500 アンサンブルメンバー実験を行った。さらに海洋オフラインの 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、海表面温度（Sea Surface Temperature：SST）の南半球成層圏力学場への影響を解析した。

3　研究結果

3.1 概要

モントリオール議定書によるフロン対策が功を奏しオゾン層は回復の兆しを見せている。オゾン層破壊は主に成層圏で起こることから、これまで対流圏や地表への影響についてはあまり重要視されていなかった。しかしながら近年、オゾンホールによって南極成層圏の西風が強化されその影響が対流圏へも及ぶこと等が指摘され、オゾン層変動と気候変動の関係が重視されるようになった。同時に温暖化とオゾン層変化の関係についても研究が活発になってきた。

本課題ではODSやGHG濃度の変化によるオゾン層の変動メカニズムの解明を通してフロン対策と温暖化対策に資することを目的とする。今年度は、海洋をオンラインとしたMIROC5化学気候モデルを用いて、Chemistry Climate Mode Initiative（CCMI）の推奨実験（オゾン層と気候の過去再現実験および将来予測実験）を行なった。また、MIROC3.2化学気候モデルとMIROC5化学気候モデル（どちらも海洋はオフライン設定）を用いて、将来予想されるGHG濃度とODS濃度にペアで設定した500アンサンブルメンバー実験を行い、オゾン層変化（特に大気の年々変動の影響を受けた極域の極端なオゾン量変化）と気候変化との関係を調べた。さらに、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、SSTの南半球成層圏力学場への影響を解析した。

3.2 背景と目的

オゾンホール発見後に採択され発効したモントリオール議定書によってフロン・ハロン規制が行われ、近年その効果が現れてオゾン層は回復の兆しを見せている。オゾン層破壊は主に成層圏で起こることから、これまで対流圏や地表への影響についてはあまり重視されていなかった。しかしながら、オゾンホールによって南極成層圏の西風が強化されその影響が対流圏へも及ぶこと（Son et al, 2008[1]; Son et al., 2010[2]）、オゾン層の破壊が南極の地表の気温の長期トレンドに影響していること（Thompson and Solomon, 2002[3]）が指摘され、また、地球温暖化に関連するオゾン層の影響として、CO_2濃度を工業化以前に比べて4倍増加させた実験（4×CO_2実験）による地表気温の変化が、オゾン量を工業化以前の値に固定したモデルと、オゾン化学過程をモデルに取り入れてCO_2増加の影響がオゾン量に反映されるモデルとの間で20%程度異なることが示された（Nowack et al., 2015[4]）。温暖化予測モデルに化学過程を取り入れたモデルが徐々に増えつつある中、一方で、これまで化学過程に重きを置いてきたオゾン層の将来予測に使われる化学気候モデルは、気候との相互作用を解明するため海洋を結合したモデルが徐々に増えてきている。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CCMIに貢献してきた。[5), 6), 7), 8), 9)] ただし、これらの国際研究活動に使われた化学気候モデルは海洋と結合されてはいなかった。今後は、気候変動を考慮に入れたフロン・ハロン対策に資することを目的に、最新の温暖化予測モデルに海洋を結合させた形で大気化学過程を導入し、地球温暖化が進む中でのオゾン層変動とその気候への影響、オゾン層変動と気候との相互作用を解明する必要がある。同時に、海洋を結合しないモデルによるシミュレーションとの比較によって、大気微量成分変化が大気海洋結合過程を介して気候へ影響を及ぼすメカニズムを明らかにする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の推奨実験（海洋オフラインとオンライン）

昨年度は、海洋をオフライン設定としているMIROC3.2化学気候モデルを使って、CCMIで推奨されたオゾン層と気候の過去再現実験および将来予測実験（1950〜2100年）を行った。今年度はまず、海洋をオフライン設定としているMIROC5化学気候モデルで同様の長期実験を進めた。SX-ACEからSX-Auroraへの更新時、事前のベンチマークテストでは、MIROC5化学気候モデルの1年分の実験が正常に走り結果も問題なかったが、後に長期実験を行うと、開始数年後にオゾン量が異常に減るという不測の事態が生じた。SX-ACEと同じ条件で長期実験できるようにするため、プログラムサポートにチューニングを依頼した。その結果、放射モデルコンパイル時に最適化レベルを-O1にすることで、計算中のエラーが解消しSX-ACEと同じ条件で実験できることがわかった。チューニング終了後のモデルを用いてCCMIの将来予測実験を行い、SX-ACEで行った結果と比較した。

3.3.2 MIROC3.2、5.0化学気候モデルによる将来予想されるGHG、ODS濃度にペアで設定した500アンサンブルメンバー実験（海洋オフライン）

MIROC3.2化学気候モデルとMIROC5化学気候モデル（どちらも海洋はオフライン設定）を用いて、将来予想されるGHG濃度とODS濃度にペアで設定した500アンサンブルメンバー実験を行った（表1）。

表 1. ODS 濃度、GHG 濃度を固定した実験設定。それぞれ、どの年代の濃度に固定したかを表す。

Reference years for the ODS and GHG concentrations used for CCM runs with 500-member ensembles.

GHG \ ODS	1960	1980	1985	1990	1995
2095	O	O	O	O	O
2050	O	O	O	O	O
2040	—	O	O	O	O
2030	O	O	O	O	O
2000	O	O	O	O	O

O indicates a pairing used for a CCM run, — indicates a pairing not used for a run.

3.3.3 MIROC3.2化学気候モデルによる海表面温度（SST）の南半球成層圏力学場への影響を解析するための大アンサンブル実験（1000アンサンブルメンバー実験、海洋オフライン）

MIROC3.2化学気候モデルを用いて、標準実験として2000年の気候条件に設定した実験を行った（以降CNTL）。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年分はスピン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。

CNTLに対して、2002年のSSTやSea iceを与えた実験（E2002）、2019年のものを与えた実験（E2019）を行った。海洋に起因しない対流圏の大気条件の影響を調べるため、対流圏の1000～300 hPaまでJRA-55客観解析の東西風、南北風をナッジングした実験（E2019Trop）も行った。

表 2. 1000 アンサンブル実験設定。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

3.4 結果

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

図1はチューニング終了後のモデルによる将来予測実験のオゾン全量を1995～2005年で平均した時間―緯度断面図を表す。左上は海水面温度分布・海氷分布を外から与えた実験結果、右上は海水面変化の影響を介したオゾン層変化と気候変化との関係も調べられるようにするため、海洋オンラインとしたモデルによる実験結果である。SX-Auroraで行った結果は以前にSX-ACEで行った結果（左下）と概ね一致しており、衛星観測（右下）で見られる南極オゾンホールも再現されている。オゾンホールの長期変化の再現性を比較するため、将来予測実験の1950～2100年についてオゾン全量年最低値の時系列図を作成した（図2）。黒で示した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。SX-ACE、SX-Auroraともに同様の時間変化が見られ、チューニング終了後のモデルはオゾンの気候値、年

々変動のどちらのシミュレーションにも用いることができるようになった。

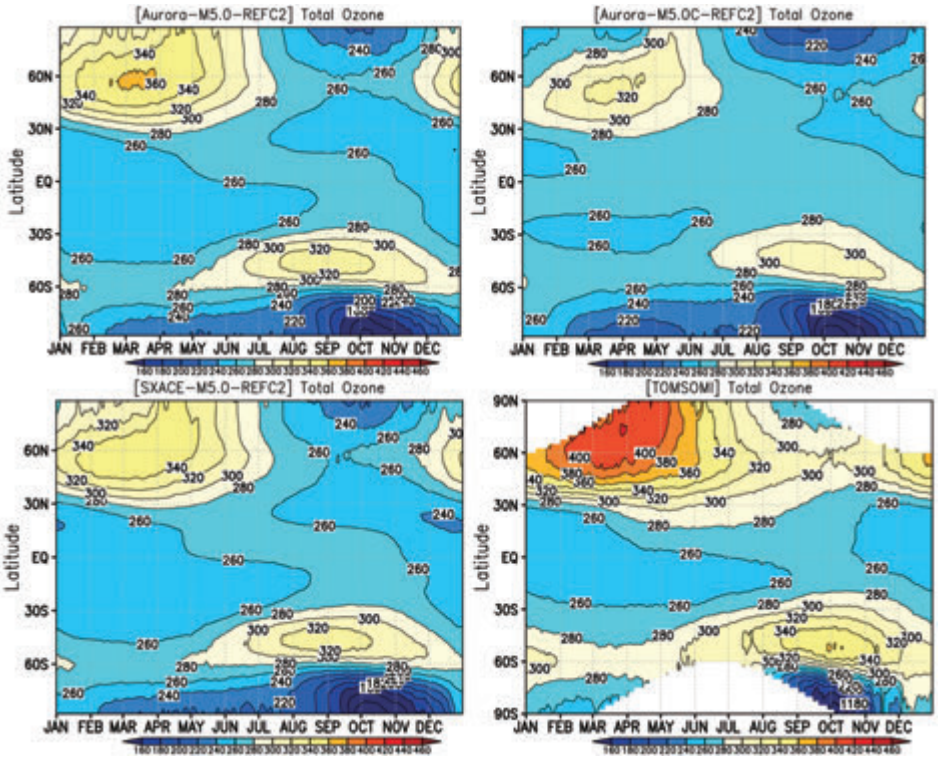

図 1.（左上）海洋オフライン設定と（右上）海洋オンライン設定とした MIROC5.0 化学気候モデルを SX-Aurora で動かした際の日平均オゾン全量の時間―緯度断面図（1995～2005 年）。CCMI 推奨の将来予測（REF-C2）実験結果。比較のため（左下）SX-ACE で行った海洋オフラインの結果と（右下）TOMS/OMI 衛星観測を示す。

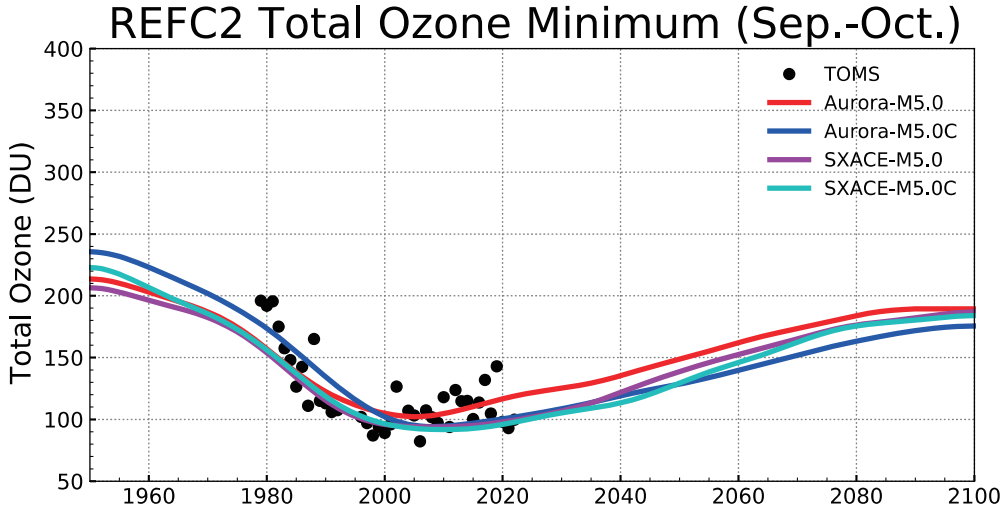

図 2. 海洋オフライン設定（赤線）と海洋オンライン設定（青線）とした MIROC5.0 化学気候モデルを SX-Aurora で動かした際のオゾン全量年最低値の時系列図（1950～2100 年）。CCMI 推奨の将来予測（REF-C2）実験結果。比較のため SX-ACE で海洋オフライン（紫）、海洋オンライン（水色）で行った結果と TOMS/OMI 衛星観測（黒丸）を示す。

3.4.2 MIROC3.2、5.0化学気候モデルによる将来予想されるGHG、ODS濃度にペアで設定した500アンサンブルメンバー実験（海洋オフライン）

図3はオゾン層破壊物質（ODS）濃度を1995年レベル、温室効果ガス（GHG）濃度を2000年レベルに設定した500アンサンブルメンバー実験に対して、（上）ODS-1960&GHG-2000、（中）ODS-1995&GHG-2095、（下）ODS-1960&GHG-2095に設定した実験の3月の経度平均気温を比較したものである。将来のODS濃度減少に相当する1995年から1960年レベルへの変化により、北極域下部・中部成層圏の気温が上昇する。将来のGHG濃度が2000年から2095年レベルに増加すると、北極域上部・中部成層圏気温が下降する。ODS濃度・GHG濃度ともに変化させると、北極域気温の変化は両者の足し合わせに近くなる（Akiyoshi et al., 2023[12]）。

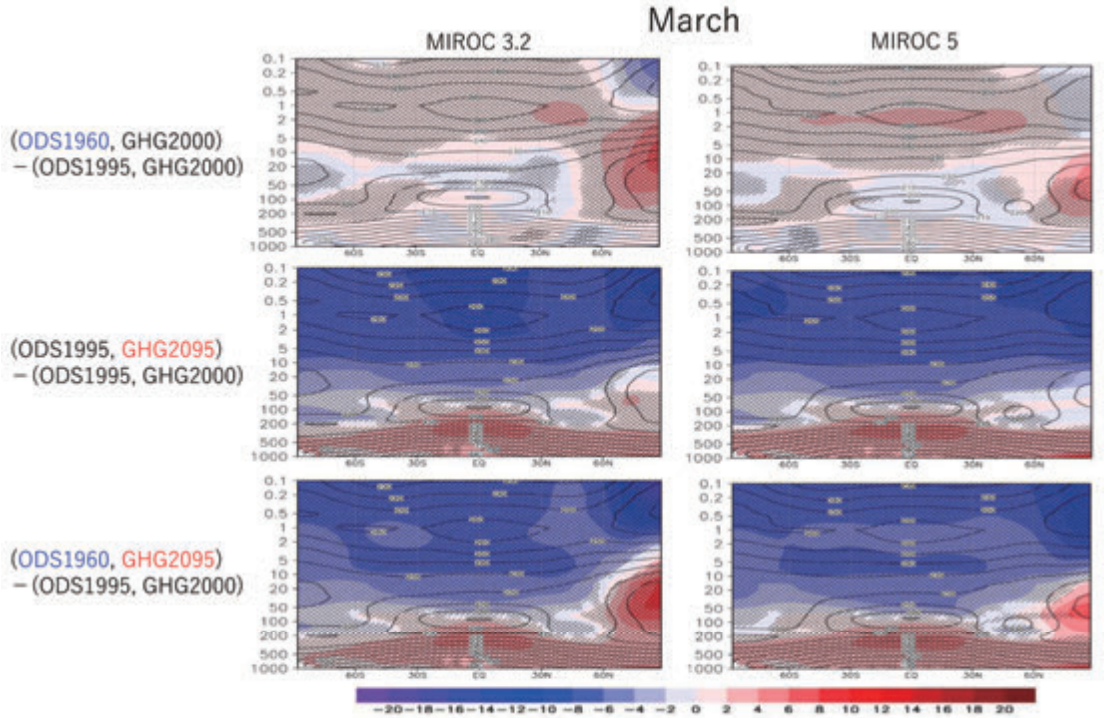

図 3. ODS 濃度、GHG 濃度を固定して行った実験同士で北極域オゾンが低い 50 メンバーを取り出した場合の 3 月の帯状平均気温偏差の比較。ODS-1995&GHG-2000 に対して、（上）ODS-1960&GHG-2000、（中）ODS-1995&GHG-2095、（下）ODS-1960&GHG-2095 を比較したもの。（左）MIROC3.2 化学気候モデルと（右）MIROC5.0 化学気候モデルの結果。

3.4.3 MIROC3.2化学気候モデルによる海表面温度（SST）の南半球成層圏力学場への影響を解析するための大アンサンブル実験（1000アンサンブルメンバー実験、海洋オフライン）

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、南半球では異例となる成層圏突然昇温（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。図4は60°S、10 hPaの東西風を指標とした南極渦の強度を箱ひげ図にしたもので、SSWが発生していた8〜9月頃や、最終昇温が早期化していた10〜12月頃ともに、2002年、2019年条件の実験で極渦強度の弱化や成層圏への波伝播の促進が見られていた。また、2002年実験では8月の東西波数2成分が、2019年実験では8〜11月にかけての波数1成分の強化が顕著で、2002年のSSWが波数2型であり、2019年のSSWが波数1型であったことと整合的であった。極渦の弱化と整合的に、南極域オゾン全量が増加する特徴が見られていた。これらの結果は、2002年、2019年のSST分布が成層圏への波伝播を促進して成層圏の極渦を弱め、南極域オゾン全量にも影響したことを示唆している（Yamashita et al., 査読中）。

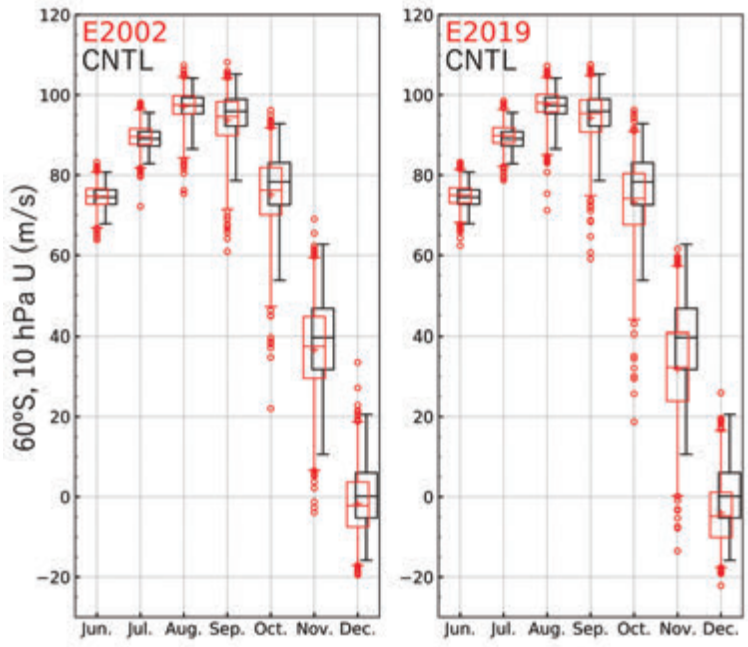

図 4. MIROC3.2 化学気候モデルによる 1000 アンサンブル実験から計算された南極渦強度の箱ひげ図。（左）2002 年、（右）2019 年の SST を与えた実験（赤色）。黒色の箱ひげは、比較のため気候値の SST を与えた実験結果を表す。ひげの範囲は 1〜99%、外れ値は丸、box は 25〜75%、中央値は横線、平均値は+で表示。

参考文献

1) 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

2) Son, S.-W. et al. (2010) Impact of stratospheric ozone on Southern Hemisphere circulation change: A multimodel assessment, *J. Geophys. Res.*, *115*, D00M07. https://doi.org/10.1029/2010JD014271

3) Thompson D. W. J., Solomon S. (2002) Interpretation of recent Southern Hemisphere climate change. *Science*, *296*, 895-899. https://doi.org/10.1126/science.1069270

4) Nowack P. J. et al. (2015) A large ozone-circulation feedback and its implications for global warming assessments. *Nature Climate Change*, *5*, 41-45. https://doi.org/10.1038/NCLIMATE2451

5) WMO (2007) *Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2006*, Global Ozone Research and Monitoring Project—Report No. 50. 572pp., Geneva, Switzerland.
6) WMO (2011) *Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2010*, Global Ozone Research and Monitoring Project Report No. 52. 516 pp., Geneva, Switzerland.
7) WMO (2014) *Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2014*, Global Ozone Research and Monitoring Project—Report No. 55. 416 pp., Geneva, Switzerland.
8) WMO (2018) *Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2018*, Global Ozone Research and Monitoring Project—Report No. 58. 588 pp., Geneva, Switzerland
9) SPARC CCMVal (2010) SPARC Report on the Evaluation of Chemistry-Climate Models, V. Eyring, T. G. Shepherd, D. W. Waugh (Eds.), SPARC Report No.5. WCRP-132, WMO/TD-No.1526.
10) Velders G. J. M., Solomon S., Daniel J. S. (2014) Growth of climate change commitments from HFC banks and emissions. *Atmos. Chem. Phys.*, *14*, 4563-4572. https://doi.org/10.5194/acp-14-4563-2014
11) Hurwitz M. M., Fleming E. L., Newman P. A., Li F., Mlawer E., Cady-Pereira K., Bailey R. (2015) Ozone depletion by hydrofluorocarbons. *Geophys. Res. Lett.*, *42*. https://doi.org/10.1002/2015GL065856
12) 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. *Sci. Rep.*, *13* (320). https://doi.org/10.1038/s41598-023-27635-y

4. まとめ

海洋オフラインと海洋オンラインに設定した MIROC5 化学気候モデルによる将来予測実験を行った。SX-Aurora で行った結果は、以前に SX-ACE で行った結果と概ね一致しており、衛星観測で見られる南極オゾンホールも再現されており、オゾンホールの長期変化の再現性にも問題なかった。また、MIROC3.2 化学気候モデルと MIROC5 化学気候モデルを用いて、将来予想される温室効果ガス濃度とオゾン破壊物質濃度に設定した 500 アンサンブルメンバー実験（海洋オフライン）を行い、オゾン層変化と気候変化との関係を調べた。さらに、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、海洋オフライン）を行い、海表面温度の南半球成層圏力学場への影響を解析した。

5. 研究成果発表

5.1 誌上発表（査読あり）

Hasebe, F., Kodera, S., Akiyoshi H. (2023) Theoretical Foundation of the Linear Relationship between the Midlatitude Eddy Heat Flux and Fall-to-Spring Polar Ozone Buildup. *J. Atmos. Sci.*, *80* (3), 889-908. https://doi.org/10.1175/JAS-D-22-0023.1

江口菜穂，山下陽介，秋吉英治，酒井哲，長濱智生，冨川喜弘，中島英彰，杉田考史，坂崎貴俊，斉藤拓也，水野亮 (2023) 成層圏・中間圏の大気化学の諸問題. *大気化学研究*, *48*.

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. *Sci. Rep.*, *13* (320). https://doi.org/10.1038/s41598-023-27635-y

Ikeda K., Tanimoto H., Kanaya Y., Taketani F. (2022) Evaluation of anthropogenic emissions of black carbon from East Asia in six inventories: constraints from model simulations and surface observations on Fukue Island, Japan. *Environmental Science: Atmospheres*. https://doi.org/10.1039/D1EA00051A

佐藤啓市，池田恒平，寺尾有希夫，山下陽介，町田敏暢，谷本浩志 (2022): 将来の地球観測への期待， *地球環境*, *26*(1&2)，89‐100.

5.2 誌上発表（査読なし）

山下陽介 (2023) 地球大気の化学・物質輸送・放射から惑星大気科学を展望する. *Proceedings of Symposium on Planetary Science 2023*.

山下陽介, 滝川雅之, 五藤大輔, 八代尚, 佐藤正樹, 金谷有剛, 竹谷文一, 宮川拓真 (2023): 発達した低気圧による北極域へのブラックカーボン輸送の解析, *月刊海洋*, *55*(4), 180‐187.

5.3 口頭発表

山下陽介 (2023) 地球大気の化学・物質輸送・放射から惑星大気科学を展望する, 第 24 回惑星圏研究会

Ikeda K., Tanimoto H., Kanaya Y., Taketani F., Matsuki A. (2023) Evaluation of black carbon simulations in CMIP6 with long-term observations in East Asia during 2009-2020. Seventh International Symposium on Arctic Research

山下陽介, 秋吉英治, 井上誠 (2022) 化学気候モデルを用いた海表面温度の南半球成層圏力学場への影響の解析（大アンサンブル実験）. 第 27 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 (2022) 東アジアにおけるブラックカーボンの長期観測を用いた CMIP6 シミュレーションと排出インベントリの検証. 第 27 回大気化学討論会, 同予稿集

Akiyoshi H., Dupuy E., Yamashita Y. (2022) Impact of unmitigated HFC emissions on stratospheric ozone at the end of the 21st century as simulated by chemistry climate models. 7th SPARC General Assembly

Plummer D., Akiyoshi H., Dennison F., Josse B., Keeble J., Kinnison D., Morgenstern O., Rozanov E. (2022) Assessment of transport in the latest Chemistry Climate Model Initiative (CCM-I2022) simulations. 7th SPARC General Assembly

Tourpali K., Akiyoshi H., Dennison F., Joeckel P., Josse B., Cheroux F., Kinnison D., Colarco P., Plummer D., Rozanov E., Egorova T., Sukhodolov T., Morgenstern O., Zeng G., Keeble J., Petropavlovskikh I., Godin-Beekmann S., Azouz N., Sofieva V., Vaskou E. (2022) CCMI-2022 Ref-D1 stratospheric ozone profiles: trends, natural variability and comparisons to observations and CCMI-1 Ref-C2. 7th SPARC General Assembly

Nakamura H., Hirooka T., Akiyoshi H. (2022) A CCM Forecast Experiments of the Ozone Reduction Event Over the Southern Tip of South America in November 2009 Using Ozone Assimilated Initial Data. 7th SPARC General Assembly

長谷部文雄, 小寺沙也加, 秋吉英治 (2022) 極域オゾンと中高緯度渦熱フラックスの線形関係に関する考察(2). 日本気象学会 2022 秋季大会, 同予稿集, 525

山下陽介, 滝川雅之, 五藤大輔, 八代尚, 佐藤正樹, 金谷有剛, 竹谷文一, 宮川拓真 (2022) 発達した低気圧による北極域へのブラックカーボン輸送の解析. 2022 年度大槌シンポジウム「多重階層結合系における対流圏大気現象の過去・現在・未来」

水野亮, 長浜智生, 江口菜穂, 秋吉英治, 斉藤拓也, 杉田考史, 山下陽介, 坂崎貴俊 (2022) 大気化学の将来構想：成層圏・中間圏の大気化学の諸問題(Future Vision for Atmospheric Chemistry: Key Issues for the Stratosphere and Mesosphere). 日本地球惑星科学連合 2022 年大会

Akiyoshi H., Dupuy E., Yamashita Y. (2022) Impact of unmitigated HFC emissions on stratospheric ozone at the end of the 21st century as simulated by chemistry-climate models. 日本地球惑星科学連合 2022 年大会

秋吉英治, 門脇正尚, 山下陽介, 長友利晴 (2022) 中高緯度オゾン全量・極気温・極夜ジェットの ODS・GHG 濃度依存性の 500 アンサンブル実験. 日本気象学会 2022 年度春季大会, 同予稿集, 105

山下陽介 (2022) 極渦の変動とその気候への影響. 第 75 回 気候影響･利用研究会, 同予稿集, 3-4

5.4 その他（書籍等）

山下陽介, 井上誠 (2022) I-2-3 成層圏準 2 年周期振動（QBO）とグローバル気候. 山川修治他編, 図説 世界の気候事典, 朝倉書店, 35-36

山下陽介 (2022) II-8-8 ハワイの気候特性. 山川修治他編, 図説 世界の気候事典, 朝倉書店, 225-226

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.1.0.0. Earth System Division, NIES. https://doi.org/10.17595/20221215.001

Akiyoshi H., Kadowaki M., Yamashita Y., Nagatomo T. (2022) 500-member ensemble simulation output from NIES Chemistry-Climate Models for investigating total ozone dependence on ODS and GHG concentrations, ver.1.0. Earth System Division, NIES. https://doi.org/10.17595/20221109.001

6. 連絡先

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：
地球システムにおける陸域モデル開発による気候変動研究

実施年度：
令和 2 年度～令和 4 年度

課題代表者：国立環境研究所地球環境研究センター　横畠徳太
共同研究者：国立環境研究所地球環境研究センター　伊藤昭彦・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　立入郁

1. 研究目的

本課題では、陸域における気候・生態系・水資源・農作物・土地利用などの将来予測を行うことのできるモデルや、大気・海洋・陸域の物理過程および自然生態系について記述する地球システムモデルを結合した陸域統合モデル（MIROC-INTEG-LAND）および地球システム統合モデル（MIROC-INTEG-ES）の開発を行う。開発した陸域および地球システム統合モデルや、様々な陸域モデルを利用して、スーパーコンピュータによるシミュレーションを行うことにより、将来起こり得る気候変動のメカニズムや、気候変動が自然環境、生態系、炭素循環、人間活動に及ぼす影響を評価する。また、様々な気候変動緩和策および適応策を考慮した数値シミュレーションを行うことにより、気候変動対策の有効性を検討することを目標とする。これにより、国立環境研究所低炭素研究プログラム「気候変動予測・影響・対策の統合評価を基にした地球規模の気候変動リスクに関する研究」および文部科学省気候変動予測先端研究プログラム「カーボンバジェット評価に向けた気候予測シミュレーション技術の研究開発（物質循環モデル）」などの研究プロジェクトに貢献することを目標とする。

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（2022 年 4 月 1 日～2023 年 3 月 31 日）

CPU 時間　v_debug　：　588.8[VE・hours]
v_normal：77,536.4[VE・hours]
計　：78,125.1[VE・hours]

2.2 利用概要

研究参画者が開発している陸域モデル（陸面モデル MATSIRO、水資源モデル HiGWMAT、作物モデル PRYSBI2、陸域生態系モデル VISIT、土地利用モデル TeLMO など）および陸域統合モデル MIROC-INTEG-LAND に関するモデル開発を行い、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。これらはベクトル機を用いて計算した。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 に実装するための準備を行なった。

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。

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）が図1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。

地球システム統合モデル MIROC-INTEG-ES は、ベクトル機 SX-ACE/Aurora を利用して計算を行う。地球システム統合モデルの陸面だけを計算させる場合には、CPU32コアを利用し、1年あたり10分程度で計算が可能である。また、地球システム統合モデルで大気・海洋・陸面の全てを計算させる場合には、CPU64コアを利用し、1年あたり 1 時間程度である。

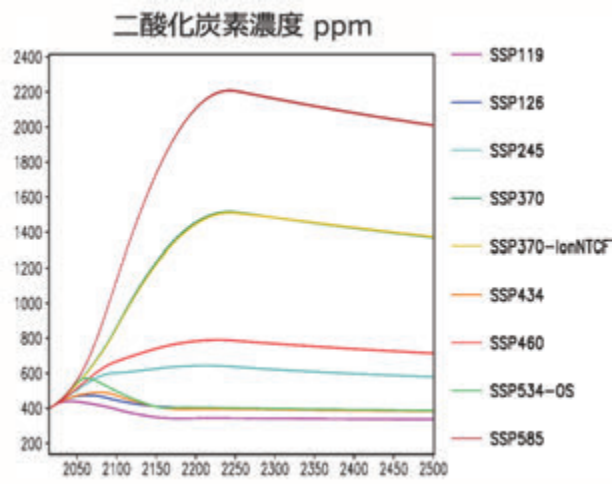

図1. 脱炭素社会の実現が2100年以降にずれ込む場合の社会経済シナリオ (Extended RCP, Meinhausen et al. 2020) に基づく二酸化炭素濃度シナリオ。色の違いはシナリオの違いを示す。

3.4 結果

地球システムモデルによる 2500 年までの長期シナリオ実験の結果を図 5 に示す。二酸化炭素濃度が 2200 ppm 程度まで上昇する SSP585 と, 1500 ppm 程度まで上昇する SSP370 では、それぞれ全球平均気温が 23℃、21℃程度まで上昇する（現在の全球平均地表気温は 15℃程度）。図 5 を見ると、人為起源温室効果ガス排出が正味ゼロとなる 2250 年頃に全球平均気温が安定化していることが分かる。気温の上昇に伴い、正味太陽放射（地球に入射する太陽放射と反射する太陽放射の差）が増加している。これは雪氷の融解による反射量の低下に関係すると考えられる。雲放射強制は、2150 年頃までは低下する（冷却が強化される）が、それ以降は増加する（冷却が弱まる）。海洋熱吸収は 2150 年頃をピークに減少が始まるが、2500 年の時点でまだ正の値をとり、地球に熱が流入し続けていること、平衡状態に達していないことを意味する。地表気温は 2150 年頃に安定化しているが、海洋深層の温度は上昇を続けていることが考えられる。生態系生産量は、2100 年頃までは増加するが、それ以降は低下する。2100 年頃までは、二酸化炭素濃度の増加による施肥効果が、気温上昇による生態系生産量の低下を上回るが、2100 年以降は、後者の効果が大きくなることを示す。

地球システムの変動を、全球平均気温変化 1 K あたりの変化として表現した場合の結果を図 6 に示す。全球平均気温変化 1 K あたりの変化を見ることで、全球平均気温の変化を加速するかどうか（フィードバック）を理解することができる。正味太陽放射によるフィードバックは、時間と共に弱まる。これは雪氷圏が高緯度側にシフトしていくことに関係するだろう。雲放射強制は徐々に大きくなり、負から正へと変化しており、シナリオ依存性も大きい。地球を加熱する効果が強まっていることが考えられる。海洋熱吸収に関しては、シナリオ依存性はなく、徐々に低下はしているものの、ゼロには達していない。生態系生産量は、2100 年頃までは SSP585/SSP370 の違いは少ないが、2100 年以降、SSP585 の方が大きく生産性が低下する。これも気温上昇をもたらす効果に相当する。長期的に非常に大きな地表気温の変化に伴い、地球システムに大きな変動が生じていることがわかる。今後は、大気・海洋・陸面における諸過程の変動に関して分析を進める。さらに、Extended RCP では 2250 年に正味温室効果ガス排出がゼロとなるシナリオであったが、今後は地球―人間システムを記述するモデル（統合評価モデルと簡易気候モデル）を活用することにより、独自の長期シナリオを作成することを計画している。

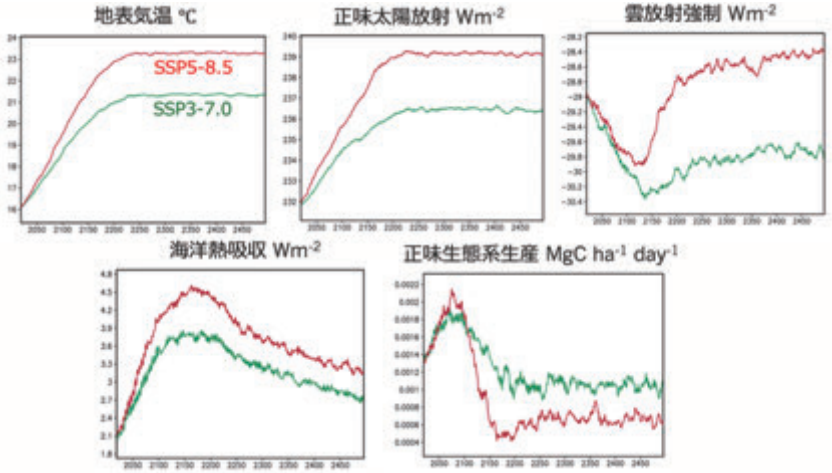

図 2. 地球システムモデルによる2500年までの長期シナリオ実験。Meinhausen et al. 2020 による Extended RCP シナリオを利用した。全球平均地表気温 [℃] と、全球平均正味太陽放射・雲放射強制・海洋熱吸収 [Wm^{-2}], 正味生態系生産 [MgC ha day^{-1}] の結果を示す。

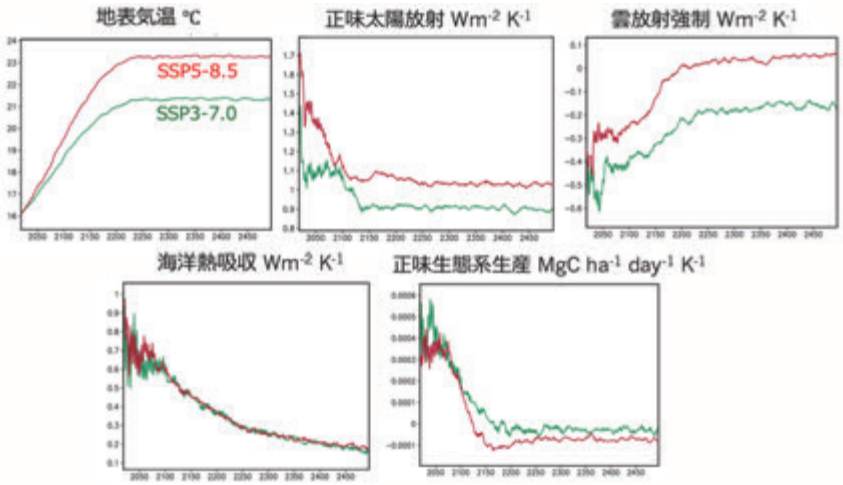

図 3. 地球システムモデルによる 2500 年までの長期シナリオ実験。Meinhausen et al. 2020 による Extended RCP シナリオを利用した。全球平均地表気温 [℃] と、全球平均気温変化 1K あたりの全球平均正味太陽放射・雲放射強制・海洋熱吸収 [Wm-2K-1], 正味生態系生産 [MgC ha day-1 K-1] の結果を示す。

参考文献

Fujimori, S., Hasegawa, T., Masui, T., Takahashi, K., Herran, D. S., Dai, H., Hijioka, Y., Kainuma, M. (2017) SSP3: AIM implementation of Shared Socioeconomic Pathways. *Global Environmental Change*, **42**, 268-283. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.06.009

Hajima, T., Watanabe, M., Yamamoto, A., Tatebe, H., Noguchi, M.A., Abe, M., Ohgaito, R., Ito, A., Yamazaki, D., Okajima, H., Ito, A., Takata, K., Ogochi, K., Watanabe, S., Kawamiya, M. (2020) Development of the MIROC-ES2L Earth system model and the evaluation of biogeochemical processes and feedbacks. Geosci Model Dev 13:2197-2244. https://doi.org/10.5194/gmd-13-2197-2020

Hanasaki, N., Kanae, S., Oki, T., Masuda, K., Motoya, K., Shirakawa, N., Shen, Y., and Tanaka, K. (2008) An integrated model for the assessment of global water resources – Part 1: Model description and input meteorological forcing. *Hydrology and Earth System Sciences*, **12**, 1007-1025. https://doi.org/10.5194/hess-12-1007-2008

Ito, A., Inatomi, M (2012) Use of a process-based model for assessing the methane budgets of global terrestrial ecosystems and evaluation of uncertaint. *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 CO_2 directly affected past soybean production? *Scientiric Repor*ts, **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 を完成させることができた。MIROC-INTEG-ES によって、これまで独立にモデル開発され分析されてきたプロセスに関し、様々な相互作用を考慮することが可能となった。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なうとともに、土地利用モデル TeLMO の改良を行なった。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）

Yokohata, T., Yokohata T, Iwahana G, Saito K, Ishizaki NN, Matsushita T, Sueyoshi T (2022) Assessing and projecting surface air temperature conditions required to sustain permafrost in Japan. Progress in Earth and Planetary Science 9:39.

Su, X., Tachiiri, K., Tanaka, K., Watanabe, M., & Kawamiya, M. (2022). Identifying crucial emission sources under low forcing scenarios by a comprehensive attribution analysis Identifying crucial emission sources under low forcing scenarios by a comprehensive attribution analysis. One Earth, 5(12):1-13. https://doi.org/10.1016/j.oneear.2022.10.009.

Satoh Y, Yoshimura K, Pokhrel Y, Kim H, Shiogama H, Yokohata T, Hanasaki N, Wada Y, Burek P, Byers E, Schmied H M, Gerten D, Ostberg S, Gosling S N, Boulange J E S and Oki T 2022 The timing of unprecedented hydrological drought under climate change. Nat. Commun. 13, 3287.

Khan Z, Abraham E, Aggarwal S, Ahmad Khan M, Arguello R, Babbar-Sebens M, Bereslawski JL, Bielicki JM, Campana PE, Silva Carrazzone ME, Castanier H, Chang F-J, Collins P, Conchado A, Dagani KR, Daher B, Dekker SC, Delgado R, Diuana FA, Doelman J, Elshorbagy AA, Fan C, Gaudioso R, Gebrechorkos SH, Geli HME, Grubert E, Huang D, Huang T, Ilyas A, Ivakhnenko A, … Yokohata T., … et al. (2022) Emerging

Themes and Future Directions of Multi-Sector Nexus Research and Implementation. Frontiers in Environmental Science 10
Elkouk A, Pokhrel Y, Satoh Y and Bouchaou L 2022 Implications of changes in climate and human development on 21st-century global drought risk. J. Environ. Manage. 317, 115378
Guo Q, Zhou X, Satoh Y and Oki T 2022 Irrigated cropland expansion exacerbates the urban moist heat stress in northern India. Environ. Res. Lett. 17, 05401
Allen MR, Peters GP, Shine KP, Azar C, Balcombe P, Boucher O, Cain M, Ciais P, Collins W, Forster PM, Frame DJ, Friedlingstein P, Fyson C, Gasser T, Hare B, Jenkins S, Hamburg SP, Johansson DJA, Lynch J, Macey A, Morfeldt J, Nauels A, Ocko I, Oppenheimer M, Pacala SW, Pierrehumbert R, Rogelj J, Schaeffer M, Schleussner CF, Shindell D, et al. (2022) Indicate separate contributions of long-lived and short-lived greenhouse gases in emission targets. npj Climate and Atmospheric Science 5:5.
Xiong W, Tanaka K, Ciais P, Yan L (2022) Evaluating China's Role in Achieving the 1.5 °C Target of the Paris Agreement. Energies 15:6002.

5.2 誌上発表（査読なし）

該当なし。

5.3 口頭発表

Yokohata T., Iwahana G., Saito K., Ishizaki N. N., Matsushita T., Sueyoshi T., Assessing and projecting surface air temperature conditions required to sustain permafrost in Japan. Symposium on Polar Science 2022.
横畠徳太，Su Xuangming，田中克政，高橋潔，伊藤昭彦，仁科一哉，高尾信太郎，佐藤雄亮，立入郁，羽島知洋，斉藤和之，河宮未知生，釜江陽一，松下大河，吉森正和，小林真，地球―人間システムの将来シナリオ分析，2022 年気象学会秋季大会
Yokohata T., Development of an earth system model with human water management, crop growth, and land use change: MIROC-INTEG-ES. AIM International Workshop 2022.
Yokohata T., Kinoshita T., Sakurai G., Fujimori S., Pokhrel Y., Ito A., Satoh Y., Kato E., Okada M., Tachiiri K., Matsumoto K., Emori S., Takahashi K., Impacts of socio-economic and climate changes on water, food, bioenergy, land use, and ecosystems: Implication for scenario development. Scenarios Forum 2022.
Yokohata T., Kinoshita T., Sakurai G., Fujimori S., Pokhrel Y., Ito A., Satoh Y., Kato E., Okada M., Tachiiri K., Matsumoto K., Emori S., Takahashi K., Future scenario assessment by an integrated land surface model: MIROC-INTEG-LAND. Japan Geoscience Union Meeting 2022.
横畠徳太，木下継基，櫻井玄，藤森真一郎，Yadu Pokhrel，伊藤昭彦，佐藤雄亮，加藤悦史，岡田将誌，立入郁，松本健一，江守正多，高橋潔，地球システム統合モデルによる将来シナリオ評価，2022 年気象学会春季大会
Melnikova I., Boucher O., Tanaka K., Vuichard N., and Ciais P. Impacts of afforestation and bioenergy crops on the global land carbon sink. Oral presentation. International Workshop C4 "Climate Change and Carbon Cycle", June 22-24, 2022, Pisa, Italy
Melnikova I., Boucher O., Cadule P., Tanaka K., Gasser T., Hajima T., Quilcaille Y., Shiogama H., Séférian R., Tachiiri K., Vuichard N., Yokohata T. and Ciais P. Impact of bioenergy crops expansion on climate-carbon cycle feedbacks. Poster presentation. 2nd International Conference on Negative CO2 Emissions 2022, June 14–17, 2022, Gothenburg, Sweden.
Su, X., Development of the Simple Climate Model for Optimization version 3.2 (SCM4OPT v3.2), June 20-22, 2022, online, Scenarios Forum 2022.
Satoh Y., Yoshimura K., Pokhrel Y., Kim H., Shiogama H., Yokohata T., Hanasaki N., Wada Y., Burek P., Byers E., Müller Schmied H., Garten D., Ostberg S., Gosling S., Boulange J., Oki T. (2022) The timing of unprecedented hydrological drought under climate change. JpGU-AGU joint meeting 2022.
Satoh Y., Yoshimura K., Pokhrel Y., Kim H., Shiogama H., Yokohata T., Hanasaki N., Wada Y., Burek P., Byers E., Müller Schmied H., Garten D., Ostberg S., Gosling S., Boulange J., Oki T. (2022) The timing of unprecedented hydrological drought under climate change. EGU General Assembly 2022.
Pokhrel Y., Satoh Y., and Elkouk A. (2022) Uncertainties in multi-model ensemble drought projections and implications on future drought risk. EGU General Assembly 2022.

Awais M., Vinca A., Byers E., Fricko O., Frank S., Satoh Y., Krey V., and Raihi K. (2022) Integrating climate impacts across energy, water, land systems within a global framework. EGU General Assembly 2022.
Vinca A., Awais M., Byers E., Fricko O., Frank S., Satoh Y., Krey V., and Raihi K. (2022) The role of multi-sector climate impacts in achieving water, energy, and land SDGs. EGU General Assembly 2022.

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：
閉鎖性水域における水環境・生態系への気候変動影響の予測と適応策に関する研究

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　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
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

1. 研究目的

閉鎖性水域の水環境・生態系への気候変動影響について、水温上昇に関する研究は多数行われているものの、それ以外の水質に関する影響は予測事例が乏しく、いまだ見解が定まっていない。本研究では、瀬戸内海を対象に先行開発した陸域淡水・汚濁負荷流出－海域流動・水質・底質モデルを活用し、国内各地の閉鎖性水域の水環境・生態系の気候変動影響予測を行うとともに、水域ごとの気候変動影響の解明ときめ細やかな水質管理に向けた適応策の提示を目的とする。

キーワード：
気候変動、閉鎖性水域、水環境、生態系、陸域－海域モデル

2. スーパーコンピュータ利用実績

2.1 計算機利用時間（2022 年 4 月 1 日～2023 年 3 月 31 日）

CPU 時間　v_debug　：　52.3[VE・hours]
v_normal　：63,275.0[VE・hours]
計　：63,327.3[VE・hours]

2.2 利用概要

瀬戸内海、伊勢・三河湾、東京湾の水環境・生態系への気候変動の影響と適応策を検討するため、各海域の陸域淡水・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、現在気候 20 世紀末と将来気候 21 世紀末のそれぞれ 20 年間の長期シミュレーション、および栄養塩類管理の効果評価シミュレーションをベクトル機で実施した。その他、気候変動影響予測に向けた有明海・八代海モデルの開発・検証、特定海域の栄養塩類管理の効果評価に向けた瀬戸内海－安芸灘－広湾のネスティングモデルの開発・検証、2021 年秋に発生した道東沖赤潮への対応研究として当該海域の流動解析を実施した。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。

3. 研究結果

3.1 概要

先行開発した水平解像度約 1 km の陸域淡水・汚濁負荷流出－海域流動・水質・底質モデル（東ら, 2020）を活用して、瀬戸内海、伊勢・三河湾、東京湾の気候変動影響予測を実施し、現在気候 20 世紀末と将来気候 21 世紀末における水質気候値の変化、および海域間に見られる気候変動影

響の共通性や地域性を解析した。また、瀬戸内海における冬期の栄養塩濃度の低下、および東京湾と伊勢・三河湾における貧酸素化への対応として、栄養塩類管理の効果評価を行った。

3.2 研究手法

3.2.1 予測モデルの概要

予測モデルは、先行開発（東ら, 2020）した水平解像度 1 km（3 次メッシュ）の陸域淡水・汚濁負荷流出－海域流動・水質・底質モデルを使用した。陸域モデルは、降水量と蒸発散位を駆動力とする分布型流出モデルであり、海域モデルの計算に必要な集水域からの淡水・汚濁負荷（SS, COD, TN, TP）流出量を予測する。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 1）で構成されている。水質・底質モデルの植物プランクトンは、珪藻 2 種と渦鞭毛藻 1 種の 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されている（図 2）。

3.2.2 気候変動影響予測の計算条件

気候変動の影響予測には、気象研究所（2015）の地域気候モデル NHRCM（Non-Hydrostatic Regional Climate Model）で予測された気候シナリオを使用した。現在気候の再現性を踏まえ、瀬戸内海には環境省の「地域気候変動予測データ」を、東京湾と伊勢・三河湾には「創生プログラム 2km 格子 NHRCM 日本域気候予測データセット」を採用し、現在気候 20 世紀末および RCP8.5 の将来気候 21 世紀末のそれぞれにおいて概ね 20 年間の連続計算を行った。外洋の境界条件・データ同化に用いる水温・塩分データついては、NHRCM から取得できないため、現在気候では同期間の FORA-WNP30 再解析データを用いた。これに MIROC5 で予測された現在気候と将来気候の気候値・線形トレンドの変化量を加えることで将来気候の水温・塩分を作成した。陸域モデルに入力する点源からの汚濁負荷発生負荷量には、水質総量削減の検討の基礎資料である 2014 年度の調査実績（環境省, 2016）を共通して使用した。

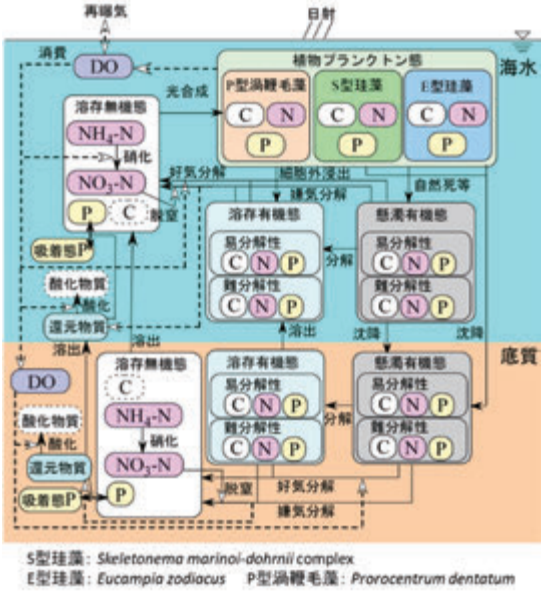

図1. 水質・底質モデルの構造。

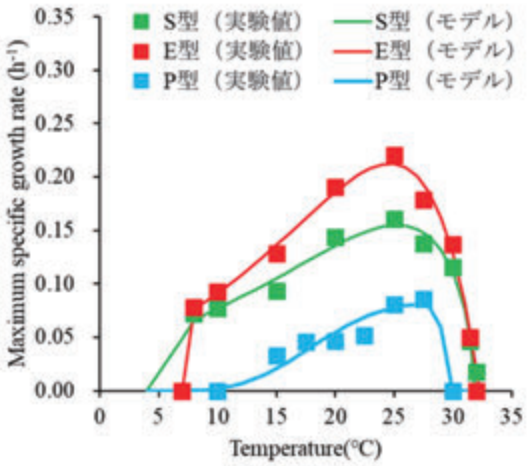

図 2. 植物プランクトンの最大比増殖速度と水温の関係。

3.2.3 栄養塩類管理

瀬戸内海における影響予測結果は、前報（平成 30 年度年報）のとおり、ノリの色落ちの原因と目されている冬～春の栄養塩濃度の低下が気候変動によって深刻化することを示唆した。本研究では、この気候変動影響を抑制するため、下水処理施設の季別調整運転による栄養塩類管理の効果評価を行った。具体的な計算条件は、陸域からの点源負荷において第 8 次水質総量削減で国が定めた海域別・産業別の上限濃度で排出したときに相当する COD、TN、TP 負荷量を 12～3 月（季別）に与えることとし、それを瀬戸内海の全湾灘と大阪湾を除いて適用したときの 2 ケースについて数値実験を行った。

東京湾と伊勢・三河湾における影響予測結果は、後述のとおり、貧酸素化が進む結果を示した。この気候変動への対応として、陸域の負荷削減を想定した栄養塩類管理を検討した。第 9 次水質総量削減の方針を踏まえ、生活系からの負荷のみを管理対象とし、次の 3 ケースの COD・TN・TP 削減方策を想定して計算条件を設定した。

Case A1: 通年（年間一律）12.5%削減
Case S1: 季別（4～9 月の半年間）25.0%削減
Case S2: 季別（4～9 月の半年間）50.0%削減

いずれの海域も栄養塩類管理の効果評価シミュレーションは RCP8.5 の気候条件下で行った。

3.3 結果と考察

3.3.1 東京湾および伊勢・三河湾の水質への気候変動影響

前報（平成30年度年報）で詳述した瀬戸内海の結果は割愛し、東京湾と伊勢・三河湾の予測結果のみを本報に記す。陸域モデルの予測結果は、瀬戸内海の予測結果と同様の傾向であり、RCP8.5では、現在気候に比べて流出変動の極端化が見られたものの、淡水やCOD・TN・TPの平均流出量には顕著な増減は見られなかった。海域表層の水温・Chl. *a*の予測結果についても、瀬戸内海の予測結果と同様の傾向となり、RCP8.5の表層水温は年間を通じて現在気候よりも3～4℃程度上昇し、表層Chl. *a*については、冬～春は温暖化による増加、夏～秋は高温化による減少が見られた（図3）。この夏～秋の表層Chl. *a*の減少は、植物プランクトンの増殖速度が概ね30℃付近を超えると急激に低下するためであり（図2）、RCP8.5の海域表層水温の高さに対応して、表層Chl. *a*の減少幅は東京湾奥部＜伊勢湾＜三河湾となった（図3）。

底層溶存酸素量の環境基準のうちDO < 4 mg/LとDO < 2 mg/Lの貧酸素水塊体積の月別気候値の変化を解析したところ、貧酸素水塊への気候変動の影響は海域ごとに大きく異なる予測結果となった（図3）。東京湾奥部では、現在気候に比べてRCP8.5の貧酸素水塊体積は、DO＜4 mg/L，2 mg/Lともに発達・衰退の時期が1～2ヶ月程度早くなり、体積も増加する傾向が見られた。この傾向は永野ら（2022）の大阪湾の予測結果と同じ傾向である。伊勢湾では、DO＜4 mg/Lの水塊体積は増加するが、DO＜2 mg/Lの水塊体積は比較的変化が小さく、どちらかと言えば減少の傾向となった（図3）。また三河湾では、DO < 4 mg/L，2 mg/Lの水塊体積はともに減少傾向となった（図3）。

上記の結果が得られた原因は，次の2つの気候変動の影響が重なったためと考えられる。1つ目は水温上昇に伴う飽和溶存酸素量の減少である。これは海面の再曝気の低下をもたらすため、年間を通して全体的なDOの減少傾向に繋がるものと考えられる。2つ目は上述の一次生産の変化であり、有機物の分解に伴うDOの消費量に影響を及ぼしたと考えられる。すなわち、気候変動・水温上昇によって一次生産が増加する冬～春はDOが低下し、一次生産が減少する夏～秋はDOが増加することに繋がるといえる。上述のとおり、夏～秋の一次生産の減少は海域ごとに異なるため、それが最も大きい三河湾では、貧酸素水塊が夏～秋に顕著に減少したと考えられる（図3）。

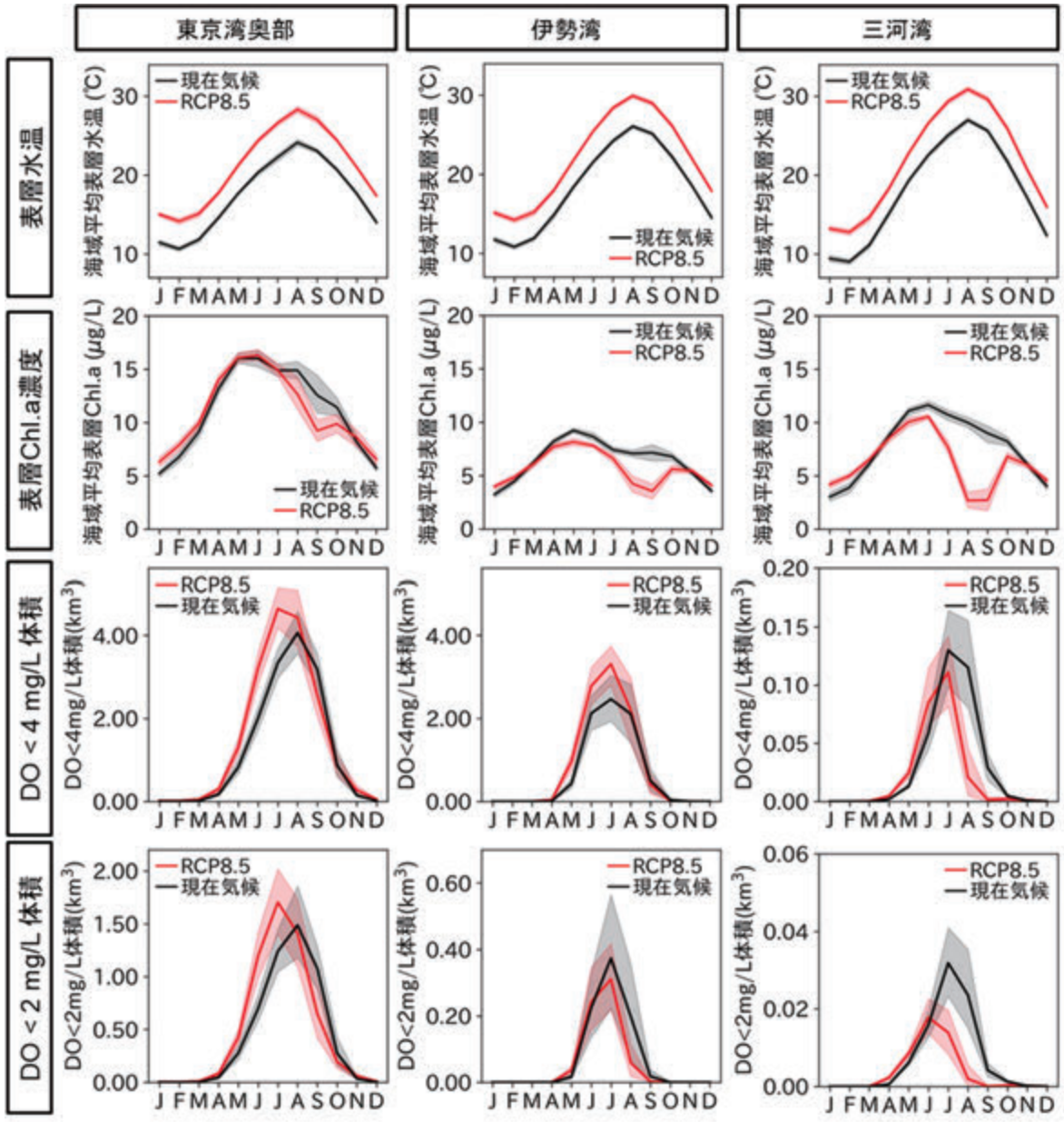

図 3. 現在気候および RCP8.5 の将来気候における表層水温，表層 Chl. a 濃度，および DO < 4 mg/L と DO < 2 mg/L の貧酸素水塊体積の月別気候値（変動幅は月平均値の 95%信頼区間）。

3.2.3 栄養塩類管理の効果・影響

(1) 瀬戸内海東部海域（播磨灘および大阪湾）

瀬戸内海における栄養塩類管理の効果を播磨灘に着目して解析したところ、負荷流入地点周辺の限られた範囲では表層 DIN 濃度の有意な上昇が見られ、一定の効果は認められる（図 4）ものの、灘全体では底層の方が DIN 濃度の上昇幅は大きく（図 5）、供給された栄養塩の多くが一次生産で消費（図 6）され、有機物となって沈降してしまう（下層で無機化される）ことが示された。また、隣接する大阪湾への影響も無視できず、大阪湾の負荷を増やさないケースにおいても貧酸素水塊の体積が有意に増加してしまうと予測された（図 7）。

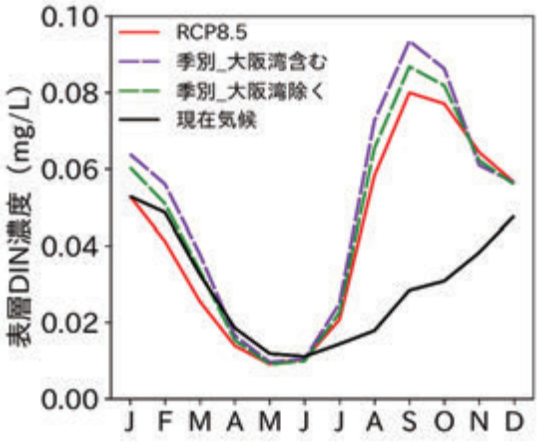

図4. 栄養塩類管理による播磨灘の表層DIN濃度の変化。

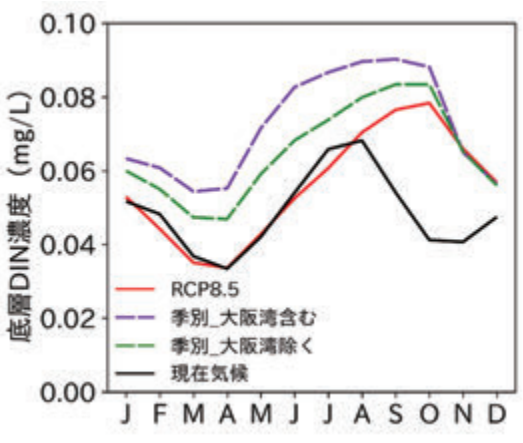

図 5. 栄養塩類管理による播磨灘の底層 DIN 濃度の変化。

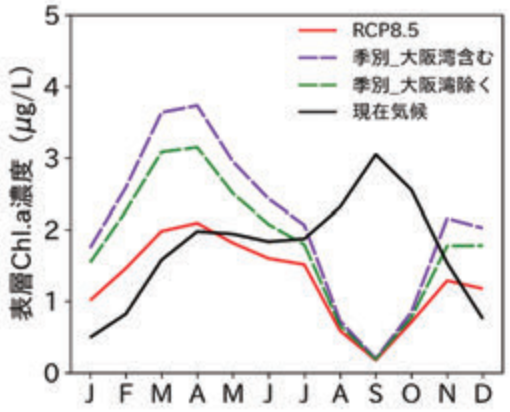

図6. 栄養塩類管理による播磨灘の表層Chl. *a*濃度の変化。

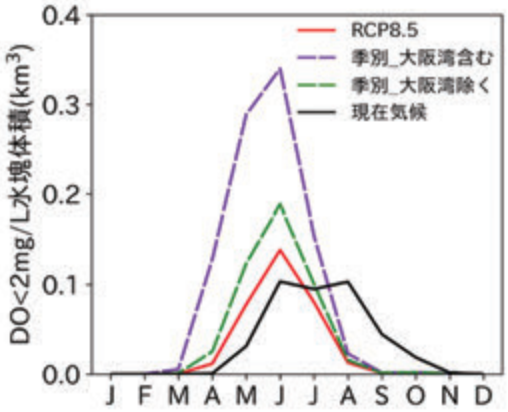

図 7. 栄養塩類管理による大阪湾の貧酸素(DO< 2mg/L)水塊体積の変化。

(2) 東京湾

負荷削減が最も大きい case S2 では、底層 DO＜3、2 mg/L の年間日数（図 8）は、湾奥のほぼ全域で大きく減少し、現在気候の年間日数よりも下回った。また、貧酸素水塊体積（図 9）の抑制にも有意な効果が認められた。これらの結果より、RCP8.5 の気候変動においても、生活系の負荷削減によって、東京湾奥部における DO＜3、2 mg/L の貧酸素水塊の抑制は可能であることが示唆された。一方、底層 DO＜4 mg/L の年間日数（図 8）については、湾奥北西部の広範囲において現在気候の年間日数を上回っており、負荷削減だけでは DO ＜ 4 mg/L の貧酸素水塊が抑制できない海域も存在する可能性が示唆された。

RCP8.5 の東京湾奥部において、現在気候と同じ規模まで貧酸素水塊体積を抑制するためには、case A1 と case S1 に相当する負荷削減、すなわち年間で生活系等の負荷を 1 割程度削減する必要があると考えられた（図 9）。また、年間の総負荷削減量が同じである case A1 と case S1 の貧酸素水塊体積の変化（図 9）を比較すると、年間一律削減の case A1 よりも、4～9 月に集中して削減する季別削減の case S1 の方が貧酸素化の抑制効果が大きいことが明らかになった。

(3) 伊勢・三河湾

RCP8.5 の伊勢・三河湾において貧酸素水塊体積に増加傾向が見られたのは DO＜4 mg/L のみである（図 5）。それに対しては負荷削減が最も大きい case S2 でも有意な抑制には繋がらなかった

（図 8・9）。東京湾奥部と比較して、伊勢湾の生活系等の負荷割合が小さいため、削減効果も小さくなることも原因であるが、伊勢湾の DO < 4 mg/L の貧酸素水塊の増加はもともと貧酸素化しやすい湾央で見られたことより、成層強化などの物理場の変化や海底地形の影響も疑われる。いずれにしろ、RCP8.5 の伊勢湾湾央における DO < 4 mg/L の貧酸素水塊は生活系等の負荷削減のみでは抑制が難しいと考えられ、それは現在にも当てはまる可能性が示唆された。

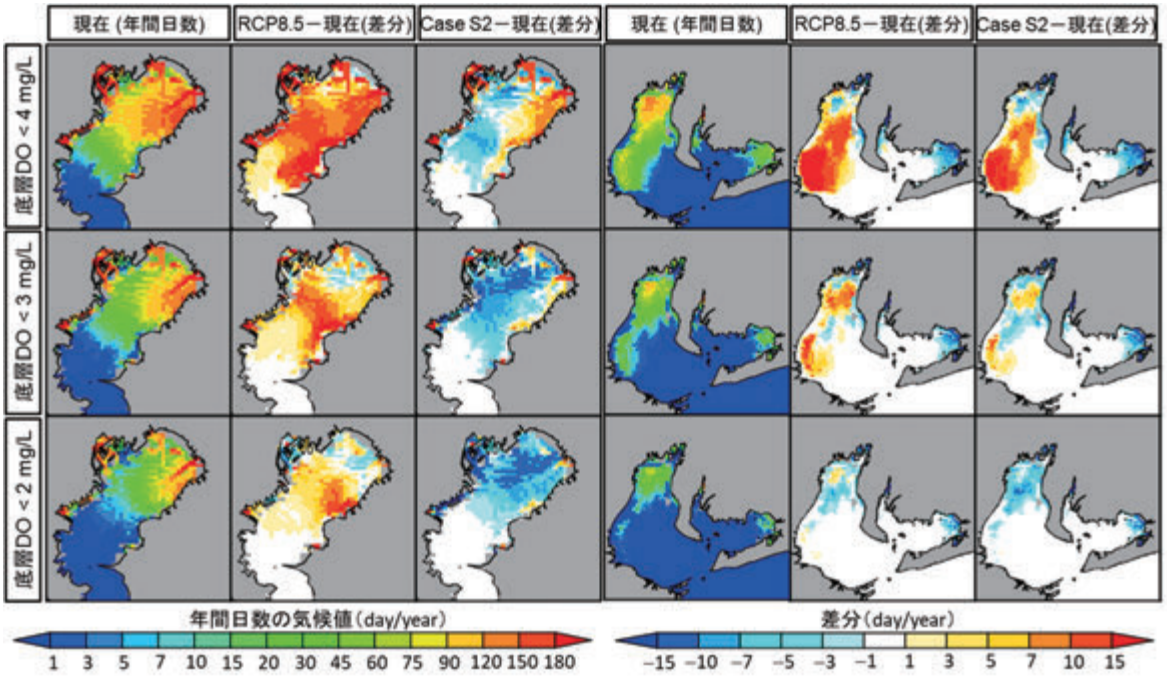

図8. 現在気候、RCP8.5の将来気候、case S2の栄養塩類管理実施時における底層DO < 4，3，2 mg/Lの年間日数（気候値）。

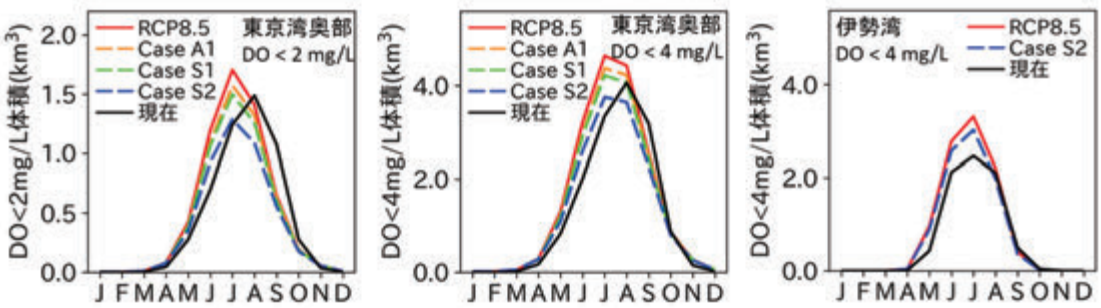

図9. 現在気候，RCP8. 5の将来気候，栄養塩類管理実施時の貧酸素水塊体積（月別気候値）の変化。

参考文献

環境省（2016）平成27年度水質総量削減に係る発生負荷量等算定調査及び汚濁負荷削減対策等の検討業務報告書. 1-200.

気象研究所（2015）気象研究所非静力学地域気候モデルによる日本付近の将来気候変化予測について. 気象研究所技術報告, 73, 1-95. https://doi.org/10.11483/mritechrepo.73

永野隆紀，入江政安，東博紀（2022）気候変動に伴う水温上昇が大阪湾の貧酸素水塊と酸素循環におよ

ぼす影響評価. 土木学会論文集B2(海岸工学), 78(2), I_841-I_846.
https://doi.org/10.2208/kaigan.78.2_I_841
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

4. まとめ

本研究では、陸域淡水・汚濁負荷流出ー海域流動・水質・底質モデルを用いて、瀬戸内海、伊勢・三河湾、東京湾の水質への気候変動の影響、並びに栄養塩類管理の効果を数値シミュレーションで予測した。気候変動影響を海域間で比較した結果、水温の上昇や一次生産の変化は 3 海域とも同じ傾向が見られるものの、貧酸素水塊については発生時期・期間や規模の変化、および栄養塩類管理に対する応答が海域によって異なることが示唆された。以上の結論はモデルの一次生産の温度依存性に強く支配されており、本モデルで考慮されていない生物の適応や生態系の変化などによって結果が大きく変わる可能性があり、今後の課題である。

5. 研究成果発表

5.1 誌上発表（査読あり）

東博紀, 中田聡史 (2022) 道東沖における2021年夏から秋の流動場・水塊構造の特異性と赤潮との関係. 土木学会論文集B2（海岸工学）, 78 (2), I_823-I_828. https://doi.org/10.2208/kaigan.78.2_I_823

5.2 誌上発表（査読なし）

なし。

5.3 口頭発表

東博紀, 越川海 (2022) 閉鎖性海域の水環境を対象とした気候変動の影響予測と栄養塩類管理について. 第 25 回日本水環境学会シンポジウム, 同予稿集, 147-148.
東博紀, 越川海 (2022) 気候変動・栄養塩類管理の影響評価に向けた陸域-海域統合水環境モデル. 2022 年度水圏生態系モデリングシンポジウム.
東博紀 (2023) 瀬戸内海・播磨灘における水環境への気候変動影響と栄養塩類管理. 令和 4 年度播磨灘等環境保全協議会幹事会.

5.4 その他（書籍等）

東博紀 (2022) 瀬戸内海の水環境に関する気候変動影響予測情報. 気候変動適応情報プラットフォーム（A-PLAT）https://adaptation-platform.nies.go.jp/map/setosea.html

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：
令和 3 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　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、GHG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。

キーワード：
大気輸送モデル、逆解析、温室効果ガス、GOSAT

2. スーパーコンピュータ利用実績

2.1 計算機利用時間（2022年4月1日～2023年3月31日）

CPU時間 v_debug　：　62.9 [VE・hours]
v_normal　：258,796.2 [VE・hours]
計　：258,859.1 [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（CO_2）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-CO_2（NICAM-based Inverse Simulation for Monitoring CO_2: 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 中国CO_2排出量変化の早期検出手法の開発

沖縄・八重山諸島において、国立環境研究所、気象庁がそれぞれ実施している波照間島、与那国島の大気GHG観測は、中国の風下に位置しており、中国という最大のGHG排出国のGHG排出量変動を捉えられることが期待されている。本研究では、これらの地上ステーションにおいて観測されたCO_2およびメタン（CH_4）の変動比（$\Delta CO_2/\Delta CH_4$）から、中国におけるCO_2放出量の変化率を推定する手法を開発した（Tohjima et al., 2023）。ここで、観測データに加えて、約112km

（glevel-6）の水平解像度のNICAM-TMを用いて再現した波照間島の変動比 $\Delta CO_2/\Delta CH_4$のデータを用いた。まず1999年からの変動比の長期的な増加傾向をモデルと観測で比較したところ、NICAM-TMが観測された増加傾向をよく再現していることがわかった。この長期間のデータに加え、さらに、中国におけるCO_2の放出量を55%―130%の間で変化させた感度実験のデータを用いて、中国におけるCO_2/CH_4放出量比と八重山諸島で観測される変動比 $\Delta CO_2/\Delta CH_4$の関係を調べたところ、ほぼ線形関係であることがわかった。この線形式を用いることで、観測データのみから準リアルタイムで中国におけるCO_2放出量の変化率を推定することが可能となった（図１）。

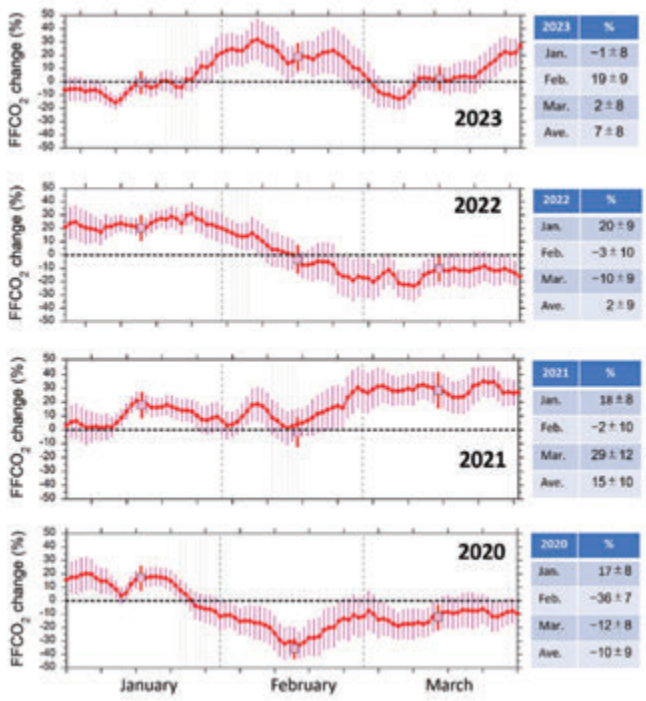

図１．環境研究総合推進費 SII-8 プロジェクト HP（https://www.nies.go.jp/sii8_project/index.html）に掲載された中国における CO_2 放出量変化率の推定結果（変化率は先行する 9 年間（2011-2019）の平均値に対する変化として計算される。）

3.2 NISMON-CO_2によるCO_2長期逆解析

昨年度に開発した精緻な格子変換スキームを導入したNISMON-CO_2（Niwa et al., 2022）を用いて1990年から2021年までの長期のCO_2逆解析を行った。その結果、化石燃料起源を除いた自然起源のCO_2フラックスでは、北米やユーラシアなどでCO_2の吸収源が分布していることが推定された（図2a）。一方、南アジアや東アジアも吸収と示されたが、当該地域は観測データも少ないため、放出を示す東南アジアと数値計算上の補償関係にある可能性もあり、今後、注意深く解析していく必要がある。全球では、先験値として用いたフラックスデータと同様に、海洋では吸収が強まる傾向が示されたが、陸域では2010-2011年頃をピークとして、近年は吸収が弱まっている可能性も示唆された（図2b）。この長期逆解析の結果は、国立環境研究所の地球環境データベースから公開（Niwa, 2020）されるとともに、Global Carbon Project (GCP)による世界炭素収支の統合解析（Friedlingstein et al., 2022）において、欧米中の研究機関による複数の逆解析とともに用いられた。

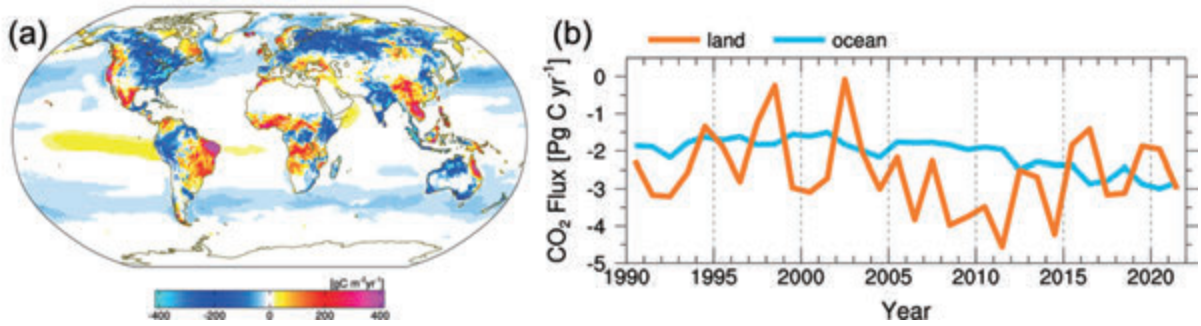

図2. NISMON-CO_2によって推定されたCO_2フラックス（化石燃料起源を除く）の2011–2020年の平均分布 (a)と1990–2021年間の全球の陸域・海洋の年間CO_2吸収量の推移 (b)。正の値は大気への放出、負の値は大気からの吸収を示す。

3.3 高解像度NICAM-TMによる東京CO_2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CO_2放出量を推定するため、高解像度（格子間隔約14 km）のNICAM-TMを用いたタグ付きトレーサー実験を実施した（図3a）。まず、TSTで観測されるCO_2濃度変動に対して、東アジア、日本、東京圏（東京を中心とした半径50km圏内）からの化石燃料起源CO_2排出がどの程度の影響を与えているかを推定した。その結果、81 %が東京圏からの人為起源排出によるものであることが明らかになった（図3bのオレンジ実線）。このことから、東京スカイツリーで観測される濃度変動データが、東京圏のCO_2放出量推定に対して有効であることがわかった。また、TSTの観測データとの比較において、風向・風速に分けた解析から、NICAM-TMに与えた化石燃料起源CO_2放出量データのTST南部周辺に過大評価が存在することが示唆された。

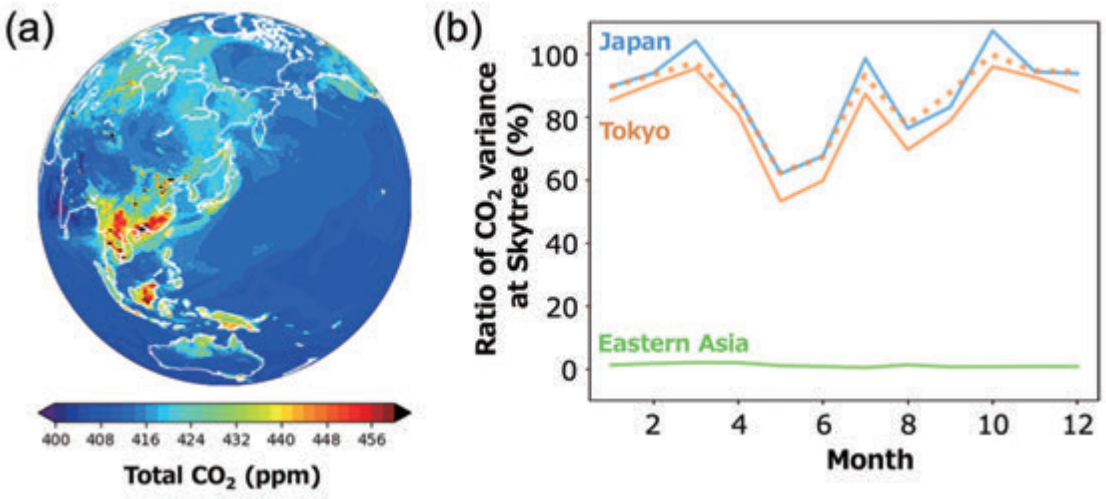

図3. NICAM-TMによる全球での大気CO_2濃度計算の例（地表面濃度分布、2019年1月16日00UTC）(a) と東京スカイツリーで観測される濃度変動に対する各地域から放出された化石燃料起源CO_2の分散の比の季節変化（実線）。Tokyoは全CO_2（植生起源含む）も示す（点線）。また、JapanはTokyoを含む。(b)

3.4 GOSAT-2 Level 4 CO_2プロダクトについて

温室効果ガス観測技術衛星2号（GOSAT-2）プロジェクトが公開する全球CO_2吸収排出量

（Level 4A）プロダクトおよび全球CO_2濃度（Level 4B）プロダクトの試験・作成を行った。本プロダクトは、GOSAT-2に搭載された主センサー・フーリエ変換分光計TANSO-FTS-2で測定した、地表面反射光の短波長赤外域における分光放射輝度から導出したCO_2カラム平均濃度データ（FTS-2 SWIR Level2 カラム平均気体濃度プロダクト Ver. 02.00）をモデル制約のための観測データとして使用し、全球のCO_2吸収排出量を推定する。逆解析システムにNISMON-CO_2を使用し、モデル空間解像度は約223 km（glevel-5）に設定した。地表面CO_2吸収排出量に関する先験情報には化石燃料消費、陸域生態系総一次生産量および呼吸量、土地利用変化、森林火災、海洋吸収・放出量の計６種類を使用した。解析対象期間は2019年10月から2020年10月の13ヶ月間とした。

衛星観測は全球を一様に網羅することが可能である一方で、衛星観測データから導出した温室効果ガス濃度データ1点あたりの精度は地上観測データよりも低くなる傾向がある。そこで本研究では、GOSAT-2 CO_2カラム平均濃度データの時空間分布に対応したカラム平均濃度を地上観測データを逆解析して導出したフラックスから算出し、両データの比較解析結果を元にGOSAT-2 CO_2カラム平均濃度データに含まれるバイアスを補正するとともに、このモデル計算値と観測間の差がGOSAT-2データの誤差を表すとして、逆解析における観測―モデル間誤差を定義した。以上の事前処理を行った上で、GOSAT-2 CO_2カラム平均濃度データにフィットするように最適化した事後フラックス（全球CO_2吸収排出量）と、事後フラックスを使用した全球大気CO_2濃度場シミュレーションを行った。

上記の処理結果を評価することを目的に、複数のデータとの比較解析を実施した。全球CO_2吸収排出量については、初期場濃度データ作成に使用した地上観測ステーションに加え、更に百数十点の地上観測ステーションデータを使用して全球CO_2吸収排出量を推定したNISMON-CO_2 ver. 2021.1 (Niwa, 2020) と比較した。解析対象期間にけるCO_2収支の両者の差は0.87%に収まり、緯度帯別CO_2収支の季節変動も類似の傾向を示すことを確認した。一方で、詳細な空間分布においては、東アジア沿岸域やメキシコ周辺で両者のCO_2収支に違いが見られることから、これらの地域の解析を現在重点的に実施している。次に、全球CO_2濃度についてはバックグラウンドに位置する地上観測ステーション４地点、および航空機観測データとの比較を行った。地上観測ステーションとの比較では、平均濃度差が-0.3から0.4 ppm、濃度差の標準偏差は1地点を除いて1.0 ppm以下に収まることを確認した。航空機観測データとの比較については鉛直層ごとに濃度差を比較した場合、-0.60から0.46 ppmの差に収まることを確認した。

3.5 全球大気環境の短期解析・予測システムの検討

GHG排出・吸収量を把握する上で、衛星観測との連携は欠かせない。GHG観測衛星のセンサーデータから大気中のGHG濃度を算出する処理（リトリーバル）では、モデルシミュレーションによって計算されたエアロゾル・GHG濃度を先験値として利用している。この先験値を計算するために、現在のGOSAT、GOSAT-2のリトリーバル処理では気象庁から提供頂いている大気再解析データの到着を待って、ナッジング輸送計算を行っており、これが衛星観測からリトリーバル、データ配布までの待ち時間を長くしている要因の一つとなっている。2024年に打ち上げを予定しているGOSAT-GW衛星では、リトリーバル結果の迅速な提供を目指している。この速報版プロダクトは速報性を重視しているためこれまでのプロダクトよりも精度が落ちるが、可能な限り精度を高めるための方策として、再解析データに頼らない全球エアロゾル・GHG輸送シミュレーションを実現するためのシステムについて検討し、実証実験としてプロトタイプシステムを構築し計算を行った。

プロトタイプシステムでは独自に気象場のデータ同化を実施し輸送計算を行うことで、現実の大気中トレーサー分布を再現することを目指した。全球大気モデルにはNICAMを用い、予報トレーサーには水物質、二酸化炭素とエアロゾル（鉱物ダスト、海塩、炭素性粒子、硫酸塩）を含めた。モデルでシミュレートする気象場の補正のため、局所アンサンブルカルマンフィルタ（LETKF）を用いたデータ同化を行った。大気観測データには米国国立環境予測センター

（National Centers for Environmental Prediction, NCEP）が収集・配布するラジオゾンデ等の一般的な観測データセット（PREPBUFR）を用いた。現状ではシステムの機能追加・改良に主眼を置き、水平解像度を全球224kmメッシュ、アンサンブルメンバー数を32に限定して計算を進めた。毎日の定時実行として、実施日(day N)の09UTC(18JST)にday N-1 18UTCまでの観測データを取得し、day N 18UTCまでに6時間ウィンドウの同化サイクルを４回進めた。これにより、実時間の概ね24時間前までの全球エアロゾル・GHG分布を得ることが可能であることが実証された。本システムは計算資源さえあれば高解像度化・大アンサンブル化することが容易であり、その際にはナッジング輸送シミュレーションの問題である、再解析データよりも高解像度の実験が困難であるという問題も打破することが可能である。

3.6 NICAM-ChemによるNO_2シミュレーション

NICAMに大気化学モデルモデルを結合したNICAM-Chemを用いて、全球56 kmの解像度でNO_2のシミュレーションを行った。気象条件は実際の年のものに合わせるため、東西風、南北風、気温のナッジングを行った。一方で、NO_2のエミッションは毎年同じものを与えた。図4はシミュレーションされたNO_2データから計算されたNO_2対流圏カラムで、上は2020年1月、下は2020年2月を表す。2020年1月に対して2月には、中国でのロックダウンの影響で衛星観測のNO_2は大きく低下しているのに対し、NICAM-Chemではあまり変化が見られない。モデルに入力するエミッション（排出量）は毎年同じものを与えているので、モデルのバイアス等を除けば、エミッションの変化分が衛星観測とモデルとの違いとして表れている。今後は、観測から排出量を修正するシステムの開発に取り組む予定である。

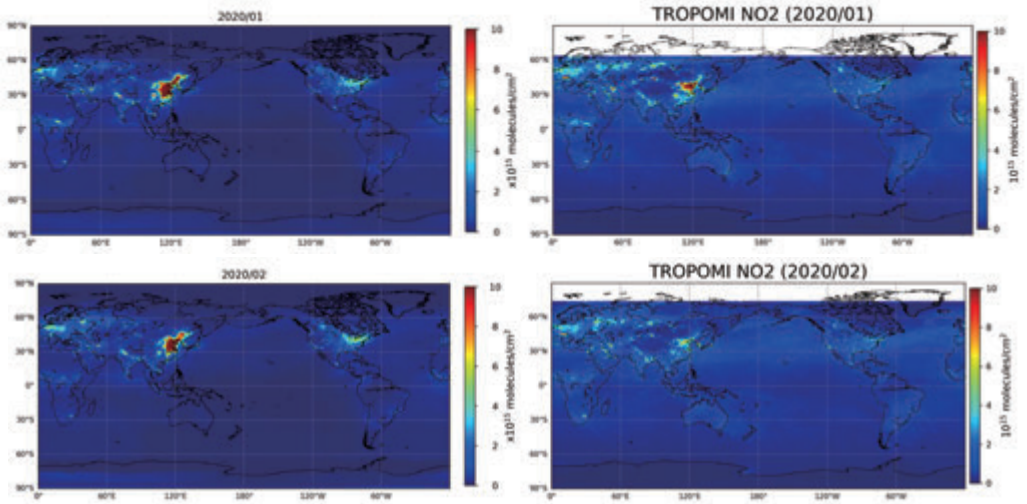

図 4. （左上）NICAM-Chem と（右上）TROPOMI 衛星観測の 2020 年 1 月の NO_2 対流圏カラム。
（下）2020 年 2 月の結果。

参考文献

Friedlingstein P., et al. (2022) Global Carbon Budget 2022, Earth Syst. Sci. Data, 14, 4811‐4900. https://doi.org/10.5194/essd-14-4811-2022

Niwa (2020) Long-term global CO_2 fluxes estimated by NICAM-based Inverse Simulation for Monitoring CO_2 (NISMON-CO_2), 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 CO_2 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 CO_2 inversion for elucidating natural carbon fluxes: technical notes of NISMON-CO_2 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

Tohjima Y., Niwa Y., Patra P. K., Mukai H., Machida T., Sasakawa M., Tsuboi K., Saito K., Ito A. (2023) Near-real-time estimation of fossil fuel CO_2 emissions from China based on atmospheric observations at Hateruma and Yonaguni Islands, Japan, Prog Earth Planet Sci 10, 10. https://doi.org/10.1186/s40645-023-00542-6

4. まとめ

本研究では観測データの解析における補助的な役割から、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に関する課題に取り組んだ。これらは都市、領域、全球と様々な空間スケールを対象としており、炭素循環メカニズムの解明や今後の人為起源CO_2排出の削減に資する研究である。高解像度実験では、大型計算機ならではの多数のプロセスを用いたMPI計算による大気CO_2シミュレーションを実施した。GOSATシリーズに関する課題では、GOSAT-2のL4プロダクト生成や、GOSAT-GWを見据えたモデル・システム開発を行った。

5. 研究成果発表

5.1 誌上発表（査読あり）

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. Sci. Rep., 13 (320). https://doi.org/10.1038/s41598-023-27635-y

Friedlingstein P., et al. (2022) Global Carbon Budget 2022, Earth Syst. Sci. Data, 14, 4811‐4900. https://doi.org/10.5194/essd-14-4811-2022

Ishidoya S., Tsuboi K., Niwa Y., Matsueda H., Murayama S., Ishijima K., Saito K. (2022) Spatiotemporal variations of the $\delta(O_2/N_2)$, CO_2 and δ(APO) in the troposphere over the western North Pacific, Atmos. Chem. Phys., 22, 6953–6970. https://doi.org/10.5194/acp-22-6953-2022

Niwa Y., Ishijima K., Ito A., Iida Y. (2022) Toward a long-term atmospheric CO_2 inversion for elucidating natural carbon fluxes: technical notes of NISMON-CO_2 v2021.1., Prog Earth Planet Sci 9, 42. https://doi.org/10.1186/s40645-022-00502-6

Remaud M., Ma J., Krol M., Abadie C., Cartwright M. P., Patra P., Niwa Y., Rödenbeck C., Belviso S., Kooijmans L.,Lennartz S., Maignan F., Chevallier F., Chipperfield M. P., Pope R. J., Harrison J. J., Vimont I., Wilson

C., Peylin P. (2023) Intercomparison of atmospheric carbonyl sulfide (TransCom-COS; part one): Evaluating the impact of transport and emissions on tropospheric variability using ground-based and aircraft data, Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 128, e2022JD037817. https://doi.org/10.1029/2022JD037817

Tohjima Y., Niwa Y., Patra P. K., Mukai H., Machida T., Sasakawa M., Tsuboi K., Saito K., Ito A. (2023) Near-real-time estimation of fossil fuel CO_2 emissions from China based on atmospheric observations at Hateruma and Yonaguni Islands, Japan, Prog Earth Planet Sci 10, 10. https://doi.org/10.1186/s40645-023-00542-6

佐藤啓市，池田恒平，寺尾有希夫，山下陽介，町田敏暢，谷本浩志 (2022) 将来の地球観測への期待，地球環境，26(1&2)，89‐100.

5.2 誌上発表（査読なし）

山下陽介 (2023) 地球大気の化学・物質輸送・放射から惑星大気科学を展望する. Proceedings of Symposium on Planetary Science 2023.

山下陽介, 滝川雅之, 五藤大輔, 八代尚, 佐藤正樹, 金谷有剛, 竹谷文一, 宮川拓真 (2023): 発達した低気圧による北極域へのブラックカーボン輸送の解析, 月刊海洋, 55(4), 180‐187. https://doi.org/10.15083/0002007329

5.3 口頭発表

八代尚, 五藤大輔, 丹羽洋介, 佐藤枝美子, 中野藤之, 照井弘, 松永恒雄 (2022) NIES-DE prototype: GHG/SLCF短期解析・予測システムの構築に向けて, 大気化学検討会

齊藤誠, 丹羽洋介, 高木宏志, 村上和隆, 亀井秋秀, 佐伯田鶴, 白石知弘, 野田響, 平田竜一, 森野勇, 八代尚, 吉田幸生, Shamil Maksyutov, 松永恒雄 (2023) GOSATシリーズによる全球炭素収支推定, 日本農業気象学会

Tohjima Y., Niwa Y., Patra P.K., Mukai H., Machida T., Sasakawa M., Tsuboi K., Saito K.,Ito A. (2022) Near-real-time estimation of fossil fuel CO2 emissions from China based on atmospheric observations at remote islands in Japan, AGU Fall Meeting 2022

遠嶋康徳, 丹羽洋介, Patra P.K., 向井人史, 笹川基樹, 町田敏暢, 坪井一寛, 齊藤和幸, 伊藤昭彦 (2022) 大気観測に基づく中国からの人為起源二酸化炭素排出量変化の準リアルタイム推定法, 第27回大気化学討論会

丹羽洋介 (2023) 温室効果ガスの逆解析研究, 第13回データ同化ワークショップ 【招待講演】

Niwa Y., Tohjima Y., Ishii M., Ito A., Yamada K., Terao Y., Machida T., Umezawa T., Nakaoka S., Tanimoto H., Iida Y., Tsujino H., Kosugi N., Maki T., Ishijima K., Tsuboi K., Fujita R. (2023) Multiple observation platforms and inverse/transport simulations for monitoring GHGs around Asia, WMO International Greenhouse Gas Monitoring Symposium 【Keynote】

Saito M., Niwa Y., Takagi H., Hirata R., Kamei A., Miyauchi T., Morino I., Murakami K., Saeki T., Shiraishi T., Yashiro H., Yoshida Y., Maksyutov S., Matsunaga T. (2023) Global CO_2 and CH_4 flux estimates based on GOSAT and GOSAT-2 satellite observations, iLEAPS–OzFlux Joint Conference 2023

Niwa Y. (2022) Multi-species inversion for better constraining Asian GHG emissions, JPGU2022

Saito M., Niwa Y., Saeki T., Hirata R., Kamei A., Miyauchi T., Morino I., Murakami K., Shiraishi T., Yoshida Y., Matsunaga T. (2022), Global carbon dioxide flux estimates based on GOSAT-2 observations, AGU Fall Meeting 2022

山田恭平, 丹羽洋介, 寺尾有希夫, 遠嶋康徳, 笹川基樹, 町田敏暢 (2022) 東京スカイツリーにお

ける二酸化炭素濃度観測とモデル計算値の比較解析，日本気象学会2022年度秋季大会
Saito M., Niwa Y., Takagi H., Hirata R., Kamei A., Miyauchi T., Morino I., Murakami K., Saeki T., Shiraishi T., Yoshida Y., Maksyutov S., Matsunaga T. (2022) GOSAT and GOSAT-2 Level4 global surface flux estimates, the 18th International Workshop on Greenhouse Gas Measurements from Space
Tohjima Y., Niwa Y., Mukai H., Sasakawa M., Machida T., Patra P. K., Tsuboi K., Saito K. (2022), Recovery of CO_2 emissions from China after COVID-19 lockdown estimated from the atmospheric observation at Yaeyama Islands, JPGU2022
山下陽介 (2023) 地球大気の化学・物質輸送・放射から惑星大気科学を展望する，第24回惑星圏研究会
山下陽介，秋吉英治，井上誠 (2022) 化学気候モデルを用いた海表面温度の南半球成層圏力学場への影響の解析（大アンサンブル実験）．第27回大気化学討論会，同予稿集
Akiyoshi H., Dupuy E., Yamashita Y. (2022) Impact of unmitigated HFC emissions on stratospheric ozone at the end of the 21st century as simulated by chemistry climate models, 7th SPARC General Assembly
山下陽介，滝川雅之，五藤大輔，八代尚，佐藤正樹，金谷有剛，竹谷文一，宮川拓真 (2022) 発達した低気圧による北極域へのブラックカーボン輸送の解析. 2022年度大槌シンポジウム「多重階層結合系における対流圏大気現象の過去・現在・未来」
水野亮，長浜智生，江口菜穂，秋吉英治，斉藤拓也，杉田考史，山下陽介，坂崎貴俊 (2022) 大気化学の将来構想：成層圏・中間圏の大気化学の諸問題(Future Vision for Atmospheric Chemistry: Key Issues for the Stratosphere and Mesosphere), JPGU2022
Akiyoshi H., Dupuy E., Yamashita Y. (2022) Impact of unmitigated HFC emissions on stratospheric ozone at the end of the 21st century as simulated by chemistry-climate models, JPGU2022
秋吉英治，門脇正尚，山下陽介，長友利晴 (2022) 中高緯度オゾン全量・極気温・極夜ジェットのODS・GHG濃度依存性の500アンサンブル実験．日本気象学会2022年度春季大会，同予稿集，105
山下陽介 (2022) 極渦の変動とその気候への影響．第75回 気候影響･利用研究会，同予稿集, 3-4

5.4 その他（書籍等）

プレスリリース「大気観測から中国の CO_2 排出量の準リアルタイム推定法を開発　−波照間島・与那国島で観測される CO_2/CH_4 変動比に基づき推定が可能に−」 遠嶋康徳，伊藤昭彦，丹羽洋介，町田敏暢，笹川基樹，向井人史，Prabir K. Patra（2023 年 3 月 23 日発表，https://www.nies.go.jp/whatsnew/2023/20230323-1/20230323-1.html）

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
Vrije Universiteit Amsterdam, Faculty of Earth and Life sciences　Nick Schutgens
九州大学応用力学研究所　弓本桂也
北海道大学大学院理学研究院　佐藤陽祐
近畿大学総合社会学部　中田真木子
気象庁気象研究所全球大気海洋研究部　梶野瑞王

1. 研究目的

本課題では、大気汚染物質の時空間分布を高精度で予測することを目的としており、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、LETKF、モデル改良、SCALE-Chem

2. スーパーコンピュータ利用実績

2.1 計算機利用時間（2022 年 4 月 1 日～2023 年 3 月 31 日）

CPU 時間　v_debug　：　0.0[VE・hours]
v_normal：28,119.8[VE・hours]
計　：28,119.8[VE・hours]

2.2 利用概要

本課題では、非静力学正 20 面体大気モデル NICAM で大気汚染物質の大気濃度を計算できる 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-Chem を用いる。

3. 研究結果

3.1 概要

本課題では NICAM-Chem モデルに対して、エアロゾルの観測データ及び局所アンサンブルカルマンフィルター（Localized Ensemble Transform Kalman Filter: LETKF）を適用することで、エアロゾルデータ同化を行ってきた。本年度は、異なる衛星センターから得られたエアロゾル光学的厚さ（Aerosol Optical Thickness: AOT）を用いることで、同化結果にどのような影響があるかを調べた。具体的には、AOT が高頻度で観測される静止衛星ひまわり/AHI（以後 Himawari-8）と中国の

静止衛星 Fengyun-4A/AGRI（以後 FY-4A）の AOT を用いた。その結果、単一の衛星の AOT 同化ではデータ欠損の影響で同化による精度向上効果があまりみられないこともあったが、2 つの衛星の AOT を同化することで特に RMSE は激減した。しかし、同化してもバイアスが目立った場所があり、これは衛星 AOT に誤差があることが示唆された。このことから、より高精度な大気汚染予測シミュレーションを実施するために、より高精度な衛星データが必要であることが示された。次に 2020-2022 年度に実施した所内公募課題 A（代表：五藤大輔）において、Himawari-8 と極軌道衛星 Aqua/MODIS を独自に補正して融合した 2 次元量の AOT を作成し、この新しい観測データを、NICAM-Chem の同化に適用した。ただし、同化手法は計算コストが軽い 2 次元変分法（2DVar）を用いた。同化に利用していない地上観測データを用いて検証したところ、バイアスや RMSE に関しては同化に用いた衛星結果よりも大きくなったが、相関関係は同化に用いた衛星結果よりも高くなった。これは衛星観測の不確実性が大きいグリッドで、モデル計算値の信頼性が高いためでもあり、同化によってモデル・観測の単独よりも結果が改善されることが示された。ただし、アジアの高濃度地域では、モデル再現性向上のために、モデル水平分解能を 56 km よりも細かくする必要が示唆された。

並行して、領域気象モデル SCALE とオフライン化学輸送モデルの結合モデルをベースとして、雷由来の窒素酸化物生成フラックスを計算できるモデルを導入したところ、2017 年 8 月 22 日に富士山で観測された窒素酸化物をモデルで概ね再現することに成功した。

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（Szopa et al., 2021）でも特筆されており、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ると認識されている。大気環境問題・健康問題・気候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、全球規模で化学物質の空間分布を推定できる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衛星成果物に加えて、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 NOx 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 NOx、2022 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 NOx 及びエアロゾル、2024 年に日本と ESA 共同で打ち上げられる予定の極軌道衛星 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 NOx など、これらの衛星データを大気汚染予測に利用することで、大気汚染予測を高精度化できる見込みが非常に高い。以上のような背景の下で、膨大な衛星データを利活用した大気汚染物質予測の高精度化が世界的にも進められており、国立環境研究所においても NICAM-Chem を用いたデータ同化手法の利用を始めたところである。

3.3 計算方法

3.3.1 LETKFによるエアロゾルデータ同化

非静力学正 20 面体格子大気モデル NICAM（e.g., Satoh et al., 2014）に搭載されたエアロゾルモデルに対して、LETKF（Hunt et al., 2007）を適用することで、エアロゾルデータ同化（e.g., Dai et

al., 2014）を行った（以後 NICAM-Chem/LETKF）。様々な衛星センサーから AOT が得られる時代の中で、それぞれのセンサーから得られた AOT を組み合わせ、より高精度な AOT の衛星成果物情報をデータ同化に利用したい。そこで本年度は、異なる衛星センターから得られた AOT の情報を用いることで、同化結果にどのような影響があるかを調べた。このため、AOT の情報が多く得られる Himawari-8 の AOT（Yoshida et al., 2018）と FY-4A の AOT（Zhang et al., 2019）を用いた。2021 年 3 月の東アジアを対象とし、水平解像度 56 km とした。なお、この成果は Cheng et al. (2022) として公表されている。図 1 には、FY-4A と Himawari-8 から得られた 2021 年 3 月における AOT 観測回数が示されている。観測回数を見ると、Himawari-8 は海上で多いが、陸上で非常に少ないことがわかった。したがって、両方の衛星の AOT 情報を用いると、中国大陸でのエアロゾル情報は主に FY-4A から得られ、東シナ海から日本海や太平洋においては Himawari-8 から得られることになる。また、図 2 でそれぞれの静止衛星の AOT を地上観測（ここではアジア域における AERONET（Aerosol Robotic Network by Holben et al., 1998）と中国での観測網 SONET（Sun-Sky Radiometer Observation Network by Li et al., 2018）と比較したところ、どちらの衛星も良い相関で低いバイアスを示しており、同化に利用できる高い精度を持っていることも確認できた。

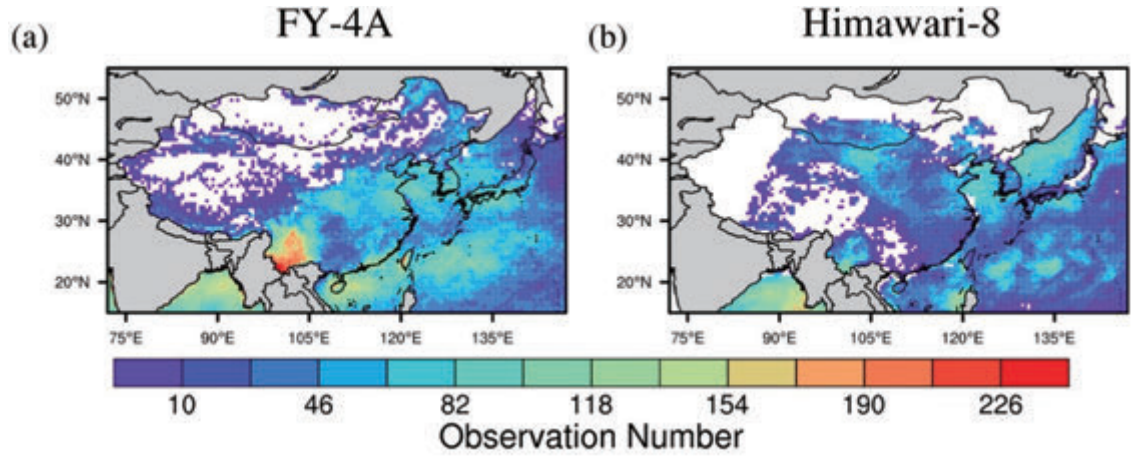

図 1. 2021 年 3 月において、(a) FY-4A と (b) Himawari-8 によって得られた AOT がリトリーバルされた観測回数の水平分布。Cheng et al. (2022) の図から抜粋した。

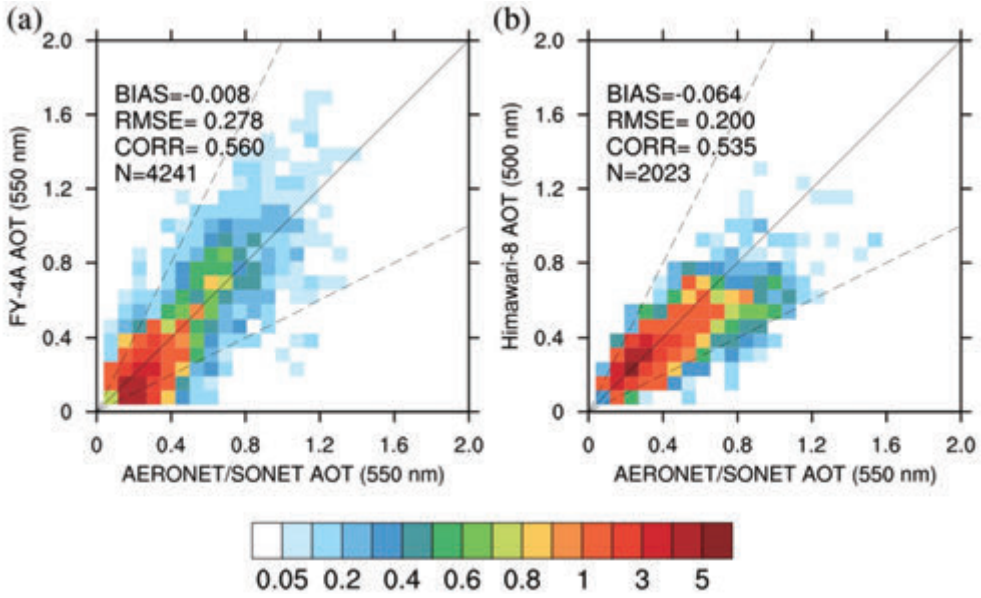

図 2. 2021 年 3 月において、(a) FY-4A と (b) Himawari-8 によって得られた AOT と地上観測（AERONET と SONET）から得られた AOT の頻度付き散布図。パネル内の数値は、バイアス（BIAS）、RMSE、相関係数（CORR）、サンプル数（N）を表す。Cheng et al. (2022) の図から抜粋した。

3.3.2 2DVarによるエアロゾル同化

本課題では、これまで NICAM-Chem と様々なエアロゾル衛星成果物を用いて、LETKF によるエアロゾルデータ同化を行ってきた。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 5 倍以上の計算資源を必要とする。そこで、2020-2022 年度で実施した所内公募課題 A（代表：五藤大輔）と連携して、計算コストが軽く、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）によるエアロゾル同化手法を NICAM-Chem に導入することを進めた（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、Himawari-8 と極軌道衛星 Aqua/MODIS を独自に補正して融合した 2 次元量の AOT である。この観測データの作成は所内公募課題 A の中で実施した。

3.3.3 SCALE-Chem

領域気象モデル SCALE（Nishizawa et al., 2015; Sato et al., 2015）とオフライン化学輸送モデル（Kajino et al., 2019）の結合モデルをベースとして、雷由来の窒素酸化物生成フラックス（LNOx: Lightning NOx flux）を計算できるモデルを導入し、窒素酸化物に関するシミュレーションを実施した。研究対象は富士山で窒素酸化物生成フラックス（LNOx）が観測された 2017 年 8 月 22 日とした（モデルスピンアップ期間は 1 日間）。モデル解像度は解析領域内で 1km とした（135-144ºE、32.5-37ºN）。この成果は Sato et al. (2023) によって公表されている。

3.4 結果

3.4.1 LETKFによるエアロゾルデータ同化

図 3 と図 4 には、NICAM-Chem で計算された AOT 水平分布と、FY-4A と Himawari-8 から得られた AOT を NICAM-Chem/LETKF で同化して計算された AOT 水平分布に対して、衛星データ MODIS の AOT との絶対値の差（バイアス）と RMSE を示した。これらの結果から、同化した結果は同化しない結果よりも低バイアスで低 RMSE であった。ひまわり AOT のみの同化では、海上では非常に良くなったが、中国大陸などの陸上での同化結果はあまり良くなかった。これは、ひまわり AOT が陸上ではあまり推定されていなかったことが原因である。そこで陸上での AOT 値も多く得られている FY-4A の AOT も同時に同化することで、中国大陸でのバイアスおよび RMSE が減少した。2 つの衛星の AOT を同化することによって、特に RMSE は激減した。ただし、同化してもバイアスが目立った場所では、MODIS と FY-4A および Himawari-8 とのリトリーバル差があることが示唆された。このことから、より高精度な大気汚染予測シミュレーションを実施するために、より高精度な衛星データを用いる必要があり、そのためには異なる衛星成果物のデータ統合方法の考案あるいはリトリーバルレベルでの異なる衛星データの統合が望まれる。

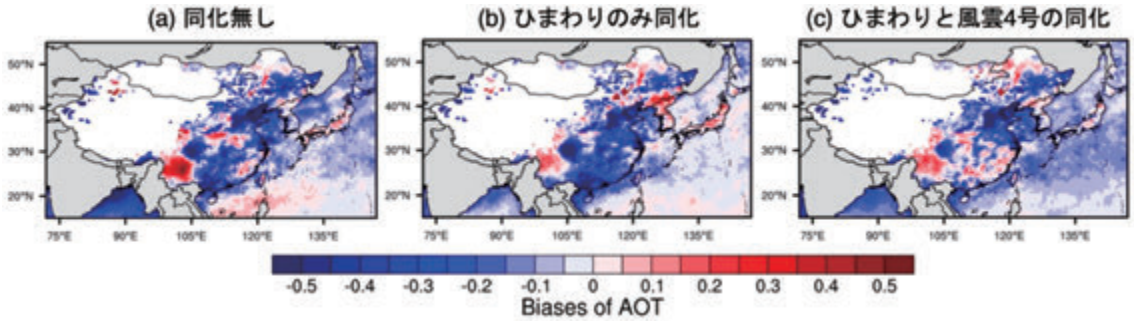

図 3. 2021 年 3 月において、NICAM で計算された AOT と MODIS によって得られた AOT との差。(a) は同化無しの NICAM の結果との差、(b) はひまわり AOT のみで同化した NICAM の結果との差、(c) はひまわりと風雲 4 号 (FY-4A) の両方の衛星から得られた AOT を同化した NICAM の結果との差を表す。

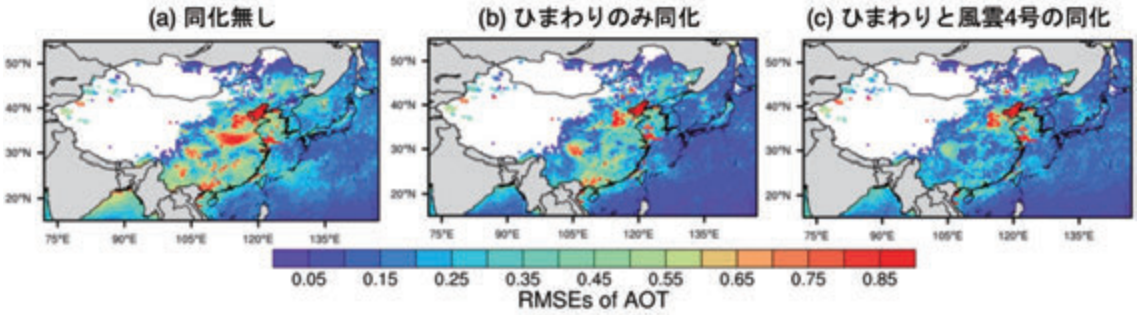

図 4. 図 3 と同じだが、RMSE の結果

3.4.2 2DVarによるエアロゾルデータ同化

NICAM-Chem/2DVar の結果は同化元の衛星データと概ね整合的となり、NICAM-Chem/2D-Var がうまく稼働していることが確かめられた（論文投稿中のため図は省略）。同化結果の検証には、同化に利用していない地上観測データ AERONET 及び SKYNET（A ground-based radiation observation network by a sky radiometer by Nakajima et al., 2020）の AOT を用いたところ、バイアスや RMSE に関しては衛星結果よりも大きくなったが、相関関係は衛星結果よりも高くなった。これは衛星観測の不確実性が大きいグリッドで、モデル計算値の信頼性が高いこともあり、同化によってモデル・観測の単独よりも結果が改善されることが示された。また、同化結果と地上観測データで AOT 値の差が大きい場所に注目すると、アジア（特にインドやバングラデシュ）の高濃度地域が多く、そもそも同化に用いた衛星観測結果も地上観測データとの差が大きかった。このことから、アジアの高濃度地域での再現性を向上するためには、水平分解能 56 km よりも細かい分解能であることが必要とわかった。

3.4.3 SCALE-Chem

図 5 で示したように、オレンジ色で囲まれた期間を見ると、LNOx を考慮していないモデル（図中の青線）では再現できなかった窒素酸化物 NOy が、LNOx を考慮した SCALE-Chem オフラインモデル（図中の黒線）ではうまく再現することができた。さらに解析をしたところ、2017 年 8 月 22 日の 06UTC～10UTC に若狭湾付近で雷が発生しており、そこで発生した NO とそこからできる NOy が徐々に西進し、富士山付近で NOy が高濃度となったと考えられた。

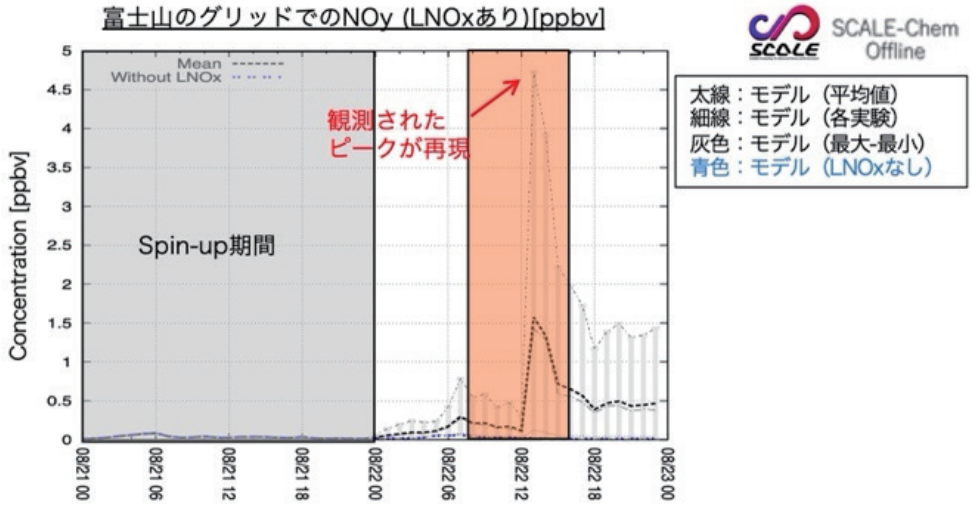

図 5. 富士山を含むグリッドにおける窒素酸化物（NOy）の時系列変動。オレンジ色の時間帯では、観測で見られた NOy のピークがモデルでも再現された。

参考文献

Cheng, Y., Dai, T., Cao, J., Chen, L., Goto, D., Yoshida, M., et al. (2022) Improvement of the aerosol forecast and analysis over East Asia with joint assimilation of two geostationary satellite observations. *Geophy. Res. Lett.*, *49*, e2022GL099908. https://doi.org/10.1029/2022GL099908

Dai T., Goto D., Schutgens N.A.J., Dong X., Shi G., Nakajima T. (2014) Simulated aerosol key optical properties over global scale using an aerosol transport model coupled with a new type of dynamic core. *Atmos. Environ.*, 82, 71-82. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.10.018

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

Kajino, M., Deushi, M., Sekiyama, T. T., Oshima, N., Yumimoto, K., Tanaka, T. Y., et al. (2019). NHM-Chem, the Japan meteorological agency's regional meteorology –chemistry model: Model evaluations toward the consistent predictions of the chemical, physical, and optical properties of aerosols. *J. Meteorol. Soc. Jpn.*, 97(2), 337–374. https://doi.org/10.2151/JMSJ.2019-020

Li, Z. Q., Xu, H., Li, K. T., Li, D. H., Xie, Y. S., et al. (2018). Comprehensive study of optical, physical, chemical, and radiative properties of total columnar atmospheric aerosols over China: An overview of sun–sky radiometer observation network (SONET) measurements. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, *99*(4), 739–755. https://doi.org/10.1175/BAMS-D-17-0133.10

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. Mea. 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

Satoh M., Tomita H., Yashiro H., Kodama C., Seiki T., Noda A. T., et al. (2014) The non-hydrostatic icosahedral atmospheric model: description and development. *Prog. Earth Planet. Sci.*, 1, 18. https://doi.org/10.1186/s40645-014-0018-1

Szopa, S., Naik, V., Adhikary, B., Artaxo, P., Berntsen, T., et al. (2021) Short-Lived Climate Forcers. In Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., et al. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 817–922, https://doi.org/0.1017/9781009157896.008

Yoshida M., Yumimoto K., Nagao T. M., Tanaka T. Y., Kikuchi M., Murakami H. (2021) Satellite retrieval of aerosol combined with assimilated forecast, *Atmos. Chem. Phys*., 21, 1797-1813. https://doi.org/10.5194/acp-21-1797-2021

Zhang, P., Zhu, L., Tang, S., Gao, L., Chen, L., Zheng, W., et al. (2019). General comparison of FY-4A/AGRI with other GEO/LEO instruments and its potential and challenges in non-meteorological applications. *Frontiers of Earth Science*, *6*, 224. https://doi.org/10.3389/feart.2018.00224

4. まとめ

本課題では、大気汚染物質の時空間分布を高精度で予測することを目的としており、この実現のために、NICAM-Chem の大気汚染物質データ同化手法を開発しており、同化計算にはスーパーコンピュータが必要となる。NICAM-Chem モデルに対して、Himawari-8 と FY-4A の 2 つの静止衛星から得られた AOT と LETKF を適用することで、エアロゾルデータ同化を行い、良好な結果を得た。さらに、NICAM-Chem に 2DVar を導入できた。並行して、領域気象モデル SCALE とオフライン化学輸送モデルの結合モデルをベースとして、雷由来の NOx 生成を計算し、観測された窒素酸化物を概ね再現することに成功した。

5. 研究成果発表

5.1 誌上発表（査読あり）

Cheng, Y., Dai, T., Cao, J., Chen, L., Goto, D., Yoshida, M., et al. (2022) Improvement of the aerosol forecast and analysis over East Asia with joint assimilation of two geostationary satellite observations. *Geophysical Research Letters*, *49*, e2022GL099908. https://doi.org/10.1029/2022GL099908

Sato Y., Kajino M., Hayashi S., Wada R. (2023) A numerical study of lightning-induced NOx and formation of NOy observed at the summit of Mt. Fuji using an explicit bulk lightning and photochemistry model, Atmospheric Environment X, 18, 100218, https://doi.org/10.1016/j.aeaoa.2023.100218

Zhuang S., Fang S., Goto D., Dong X. Xu Y., Sheng L. (2023) Model behavior regarding in- and below-cloud 137Cs wet scavenging following the Fukushima accident using 1-km-resolution meteorological field data, Science of the Total Environment, 872, 162165, https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162165.

5.2 誌上発表（査読なし）

五藤大輔, 八代尚 (2022) 大気汚染と気候の複合問題への挑戦. 環境儀 85 号, 国立環境研究所.

五藤大輔 (2023) 日本スケールから地球スケールをシームレスに取り扱う大気汚染シミュレーション. 計算で挑む環境研究, 国立環境研究所地球環境研究センター, 33-40

5.3 口頭発表

五藤大輔 (2023) 全球・領域規模でのエアロゾルシミュレーションについて, 令和４年度化学物質環境実態調査 環境科学セミナー, ハイフレックス開催

五藤大輔 (2022) 大気環境に関わるエアロゾル全球シミュレーション, 2022 年度シンポジウム富岳で見える気象の未来予想図, リモート開催

Goto D. (2022) Research on air pollution prediction by assimilating aerosol products retrieved from satellites, JAXA PI workshop, Tokyo (hybrid)

5.4 その他（書籍等）

該当なし

6. 連絡先

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
Shuhei Matsugishi, Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo

1. Research objectives

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

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

2. Record of supercomputer use

2.1 Devoted computing time (April 1, 2022 – March 31, 2023)

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

2.2 Details of supercomputer usage

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

3. Research progress and results

3.1 Outline

In this fiscal year, we introduced an evaluation method using a joint histogram between Doppler velocity and height using the 94 GHz Doppler cloud radar on the ground for the ULTra-sIte for Measuring Atmosphere of Tokyo metropolitan Environment (ULTIMATE) project. We examined the impact of vertical air motion and terminal velocity of hydrometeors on Doppler velocity using simulation results. The most of Doppler velocity is from the terminal velocity of hydrometeors. We evaluated two microphysics in NICAM using this method. Two microphysics shows the different characteristics of the Doppler velocity related to terminal velocity of ice and liquid hydrometeors.

3.2 Research background and purpose

One of the challenging satellite projects is the Earth Clouds, Aerosol and Radiation Explorer (EarthCARE, Illingworth et al. 2015) satellite, which is a joint mission of the European Space Agency (ESA) and the Japanese Aerospace Exploration Agency (JAXA). EarthCARE has several passive and active sensors in the same body to study clouds, aerosols, precipitation, and associated radiation budgets. It has Cloud Profiling Radar (CPR), ATmospheric LIDar (ATLID), Multi Spectral Imager (MSI), and Broad Band Radiometer (BBR). EarthCARE's CPR has the Doppler capability to provide information on the terminal velocity of rain and ice, as well as vertical air movement. And multiple sensors have the synergy to understand the interaction between clouds and aerosols, and give the new insight of evaluating global cloud resolving models (GCRMs) such as the Nonhydrostatic ICosahedral Atmospheric Model (NICAM, Satoh et al. 2014).

Satellite data is limited by the lack of active sensors and the difficulty of long-term observation in the specific area and tracking the precipitation systems. Ground observations are helpful in overcoming these limitations. The ground remote sensing observation data are relatively concentrated in the metropolitan area because of disaster prevention. The ULTra-sIte for Measuring Atmosphere of Tokyo metropolitan Environment (ULTIMATE, Satoh et al. 2022) project is proposed to use these intensive observation data in the Tokyo area together with satellite observations to evaluate and improve the cloud microphysics schemes of GCRMs and to validate the EarthCARE satellite. The merits of these projects are related to several active sensors to detect the vertical distribution of clouds and precipitation, and the detailed information about clouds and precipitation. For example, Doppler polarimetric radars provide more information about the size distributions, hydrometeor types, and terminal velocity of hydrometeors. The various radars are located in the Tokyo metropolitan areas, such as C-band, X-band polarimetric radars, and W-band cloud radar. The Wind profiler Network And Data acquisition System (WINDAS, Ishihara et al. 2006) data are available to observe the vertical profiles of the wind. The synergy of intensive ground-based remote sensing observations and satellite data would contribute to the understanding of microphysical processes and improvement of microphysics in GCRMs. Before the launch of the satellite, we need to understand the performance of the CPR with the CPR on the ground.

Hagihara et al. 2021 investigated the performance of the Doppler velocity using the JAXA EarthCARE synthetic data. They examined the unfolding correction and the increase in horizontal sampling. However, they did not evaluate their model using the ground observations. And they did a test using a microphysical scheme. Before the launch of the satellite, it is necessary to evaluate a numerical model using the ground observations with the similar setting of the EarthCARE CPR. The W-band cloud radar is available in the Tokyo metropolitan area. The previous studies used a single microphysical scheme.

In the previous fiscal year, we evaluated the riming process and the graupel size distribution in a single-moment microphysics scheme of NICAM by investigating the vertical profiles of Doppler velocity using a 94 GHz Doppler CPR on the ground.

In this fiscal year, we introduce an evaluation method using a joint histogram in terms of Doppler velocity and height using a ground CPR with two microphysics. And we evaluate the two microphysics schemes using this method.

3.3 Data and methodology

We evaluated the cloud and precipitation fields simulated by the NICAM using the ground observations. We followed the approach of Roh and Satoh (2014) to use NICAM as a regional model by transforming the grid to focus on the region of interest with high resolution (the stretched NICAM; Tomita 2008a). We simulated two types of resolutions such as NICAM GLevel 8 (GL8). The GL8 has a minimum resolution of 2.4 km. We evaluated two microphysical schemes in NICAM. We simulated three cases of rain events in September 2019. The first case (Case 1) is the tropical cyclone (TC) Faxai. The second is the Predecessor Rain Event (PRE) associated with a tropical cyclone. Case 1 of the integration time was from 00 UTC on 8 September to 00 UTC on 9 September 2019. Case 2 of the integration time was from 00 UTC on 20 September to 00 UTC on 21 September 2019. In this study, we focus mainly on the results of NICAM GL8.

The NICAM simulations were initialized with National Centers for Environmental Prediction (NECP) data with one degree resolution for wind, temperature, relative humidity and geopotential data. Sea surface temperature was fixed. We ran simulations with the NICAM single-moment water 6 categories (Tomita 2008b) with modifications by Roh and Satoh (2014) (hereafter referred to as NSW6), and the NICAM double-

moment water 6 categories (Seiki and Nakajima 2014).

We used the National Institute of Information and Communications Technology 94 GHz Cloud Profiling Radar (NICT CPR) located at NICT (N35.7°, E139.5°). This NICT CPR is a vertically pointing radar and has similar performance to the EarthCARE CPR with Doppler capability.

The EarthCARE Active Sensor Simulator (EASE, Okamoto et al. 2007, 2008; Nishizawa et al. 2008) was used to evaluate the NICT 94 GHz CPR. We make the same assumptions about the size distributions of hydrometeors for both the NICAM simulation and the Joint Simulator. For NSW6 cloud ice and cloud water, size distributions are not explicitly assumed in NICAM. For these categories, we used the mono size distributions for an effective radius of 40μm for cloud ice and 8μm for cloud water in the Joint Simulator.

Figure 3.1 shows the horizontal distribution of precipitation for Case 1 and Case 2. Case 1 has heavy precipitation in the Tokyo metropolitan area and the circular shapes of rain bands from the tropical cyclone (Fig. 3.1a). Case 2 shows weak precipitation in the analysis area, and the precipitation is slightly more scattered than in Case 1 (Fig. 3.1d). Two NICAM simulations capture the circular shapes of the rain bands as observed for Case 1 and the frontal system for Case 2. NICAM simulated the circular shape of rain bands as observed (Fig. 3.1b, c) and the track of the TC (not shown here). However, the simulated TC Faxai moves faster than the observations. For statistical analysis, we took the analysis area with 10 degrees by 10 degrees in the center of NICT.

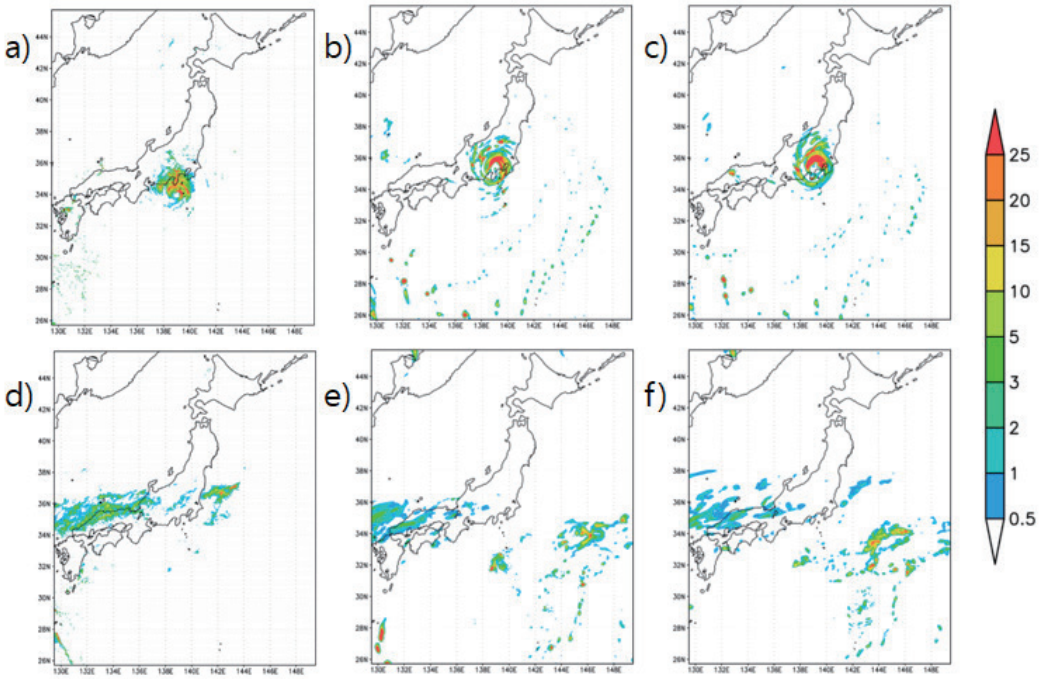

Fig. 3.1 The horizontal distributions of the precipitation among the observation (left), NSW6 (middle), and NDW6 (right) simulations for Case 1 (upper) and Case 2 (bottom). The unit of contour is mm/hr.

3.4 Observation results

Figure 3.2 shows the observed Contoured Frequency by Altitude Diagrams (CFADs) of radar reflectivity and Doppler velocity for two cases. Figure 3.2a shows the decrease in radar reflectivity from the ground up and at an altitude of 4 km in Case 1. The maximum radar reflectivity in Case 1 is less than 5 dBZ. The decrease in radar reflectivity is due to strong wet attenuation from rain and wet attenuation on the antenna. The attenuation is not dominant in Case 2 because the precipitation is weaker than in Case 1. The growth of the ice hydrometeors is more apparent in Case 2 with an increase in radar reflectivity than in Case 1. Ground observations are not free of rain attenuation and it is difficult to use the radar reflectivity of the ice hydrometeors. It is difficult to distinguish strong convection and large ice hydrometeors from the radar reflectivity information.

The advantage of the Doppler velocity is that it is free of attenuation. The Doppler velocity is the sum

of the terminal velocity of the hydrometeors and the vertical air motion. If we assume that the vertical air motion is relatively weaker than the terminal velocity of the hydrometeors, the Doppler velocity is mainly related to the terminal velocity of the hydrometeors. The negative Doppler velocity means falling to the ground and the positive Doppler velocity means upward air motion. The Doppler velocity has two high-frequency modes near the melting layer (Fig. 3.2c, d). These two modes are the fast terminal velocity of rain and the slow terminal velocity of ice hydrometeors. In the case of heavy precipitation, the riming process is dominant. It produces a larger fraction of large rimed ice such as graupel and hail with a Doppler velocity less than -2 m/s in Case 1. There is a high fraction above 2 m/s in Case 1. This is related to the aliasing effect with rain having a terminal velocity greater than 5.4 m/s. So these fractions are misleading the result like upward motion. There are more fractions of the large edge ice such as graupel and hail with a Doppler velocity less than -2 m/s in Case 1

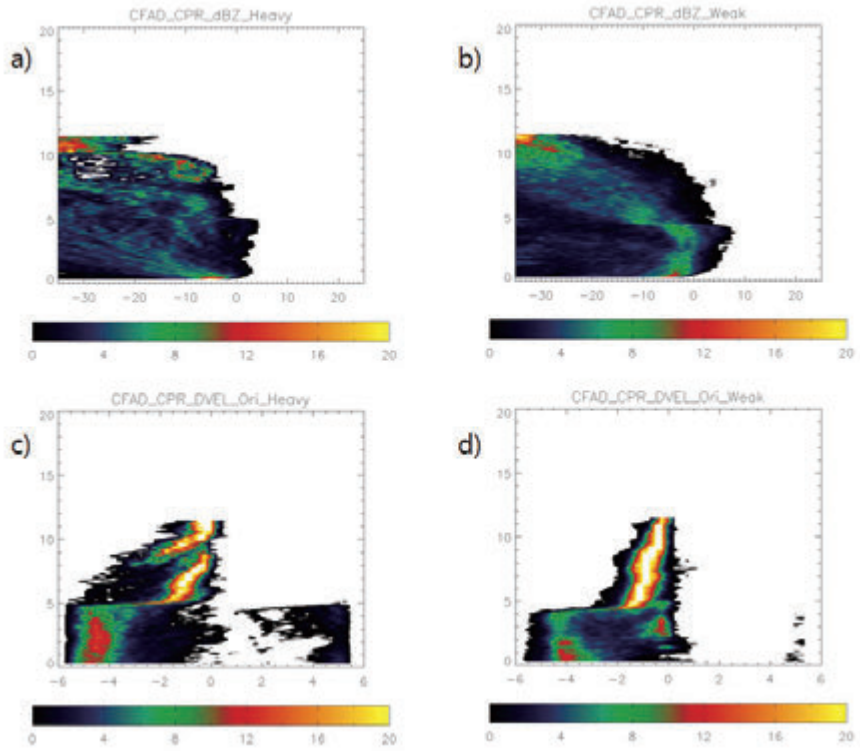

Fig. 3.2 The CFADs of the radar reflectivities (top) and Doppler velocities (bottom) between heavy (left) and weak (right) precipitation cases.

3.5 An introduction of an evaluation method

We introduced a new categorization method for hydrometeors using the normalized joint histogram between height and Doppler velocity (The CFAD is the joint histogram with each height level normalized.). We divided five regimes: 1 graupel/hail, 2 cloud ice/snow, 3 rain, 4 cloud water/drizzle, and 5 upward motion using the Doppler velocity threshold.

To reduce the aliasing effect, we use the unfolding method based on Hagihara et al. 2021. He applied the unfolding method to the Doppler velocity above 3 m/s.

Figure 3.3 shows the observed joint histogram between height and Doppler velocity. The results are similar to the CFADs of the Doppler velocity. We assume that the vertical air velocity is relatively small compared to the vertical air motion. The terminal velocity of cloud ice or snow is less than 2 m/s. The terminal velocity of graupel and hail is greater than 2 m/s. I used the same separation between rain and cloud water or drizzle.

We applied this method to two cases. The aliasing effect is reduced in Case 1. We found the characteristics of the precipitation systems between the two cases. The rain fraction is dominant in Case 1 and the cloud ice/snow fraction is dominant in Case 2. The upward motion fraction is larger in Case 1 than

in Case 2, but the total fraction is less than 6%. We can understand that the heavy precipitation cases are dominated by rain and the light precipitation cases are dominated by ice and water clouds. With this method, we can understand the quantitative analysis of the dominant hydrometeors for the precipitation

We have evaluated two microphysics schemes in NICAM using this method (Fig. 3.4). Two microphysical schemes reproduce two modes of the Doppler velocity of rain and ice hydrometeors as observed. And two simulations show similar case dependence as the observations. For example, the simulations reproduce a higher fraction of graupel/hail and rain in Case 1 than in Case 2.

There are different characteristics between the two microphysical schemes. NSW6 shows the underestimation of the graupel/hail fraction and NDW6 shows the overestimation of the graupel/hail fraction. NSW6 has a pattern of decreasing rain terminal velocity from the melting layer to the ground. NSW6 reproduces the more concentrated frequencies than the observation and NDW6. This is due to the limited representation of hydrometeor size distributions. NDW6 reproduced the similar distributions as observation data, however, the terminal velocity of ice hydrometeors are overestimated than observation data and it affected the overestimation of graupel/hail fraction.

We compared the relationship between terminal velocity and diameter for each hydrometeor (fig. 3.5). The graupel from NSW6 has a faster terminal velocity than the graupel from NDW6. And the terminal velocity of cloud ice and snow is slower in NSW6 than in NDW6 (The terminal velocity of cloud ice is 0 m/s in NSW6). The terminal velocity of rain is also different for each microphysics. This means that the definitions of ice hydrometeors are different. We need the same criterion to evaluate the hydrometeors. It is different from the categorization name and the actual category used in the microphysics.

We checked the vertical air motions using two types of simulation data. Figure 3.6 shows the cumulative normalized distribution of the absolute vertical velocity with 0.2 m/s bins for echoes with radar reflectivity greater than -40 dBZ. All simulations show that nearly 80% of the echoes have less than 0.2 m/s vertical air motion. This means that the vertical air motion effect is not stronger than the terminal velocity of the hydrometeors. The strong convection case like Case 1 has more uncertainty than the weak convection case. The microphysics schemes also have a dependence on the vertical air motion. NDW6 has more vertical air motion than NSW6.

We extended the simulation results such as the EarthCARE satellite. We calculated the EarthCARE signals from CPR using the instrument setting such as vertical resolution. The direction of attenuation and the sign of the Doppler velocity are reversed compared to the ground simulation. Figure 3.7 shows the results of the EarthCARE simulations using the categorization method. Note that we changed the sign of the Doppler velocity of EarthCARE like the ground observations and NICAM. The results are almost identical to the ground observations. The advantage of the EarthCARE satellite is the increase of the observation window from 12 km to 20 km. This increases the fraction of ice hydrometeors and decreases the fraction of water hydrometeors.

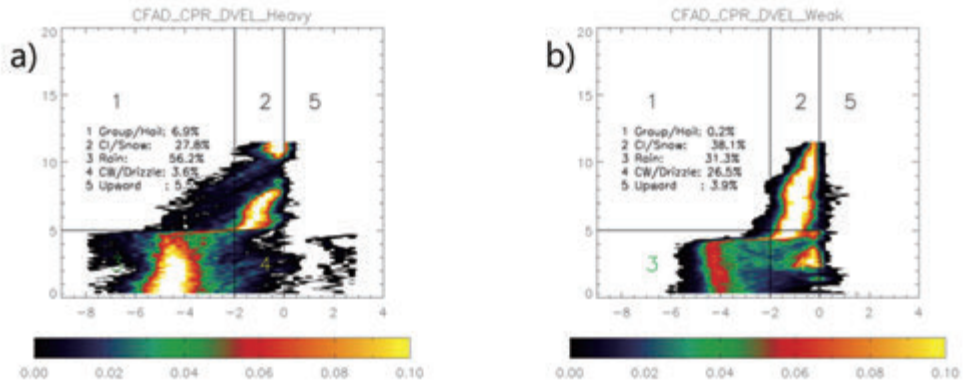

Fig. 3.3 The joint histograms between height and Doppler velocities for Case 1 and Case 2.

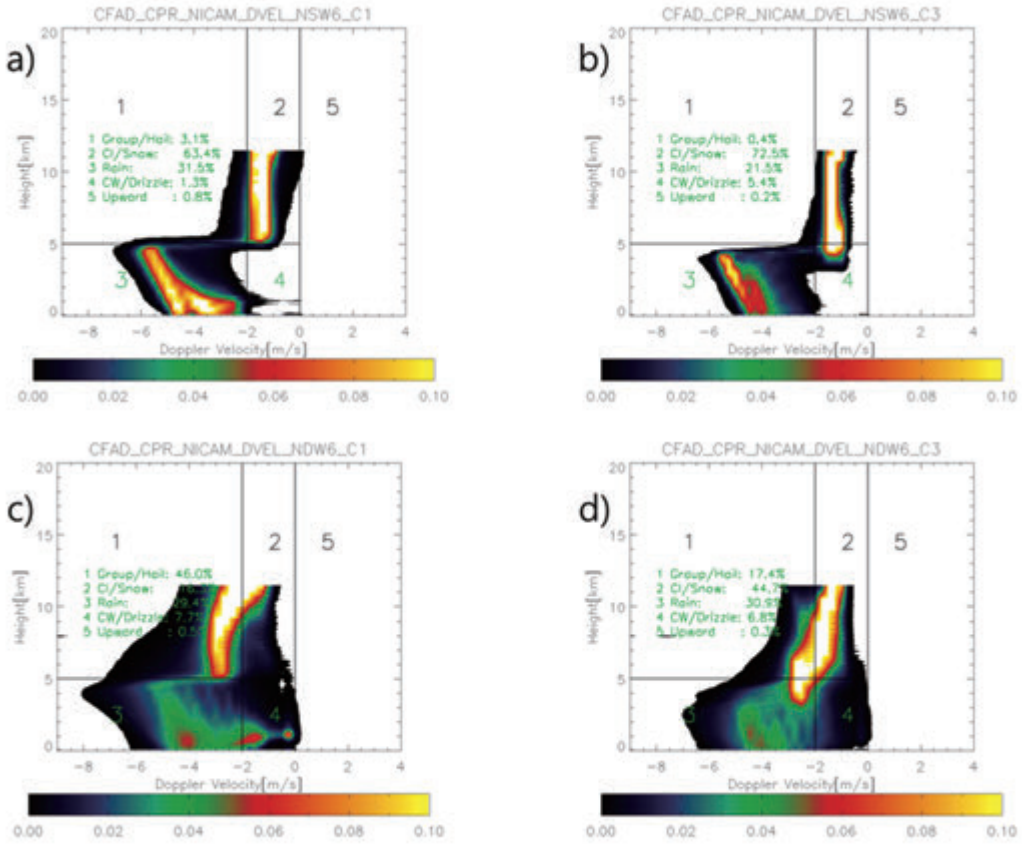

Fig. 3.4 The joint histograms between height and Doppler velocities in NICAM simulations for NSW6 (top) and NDW6 (bottom) in Case 1 (left) and Case 2 (right).

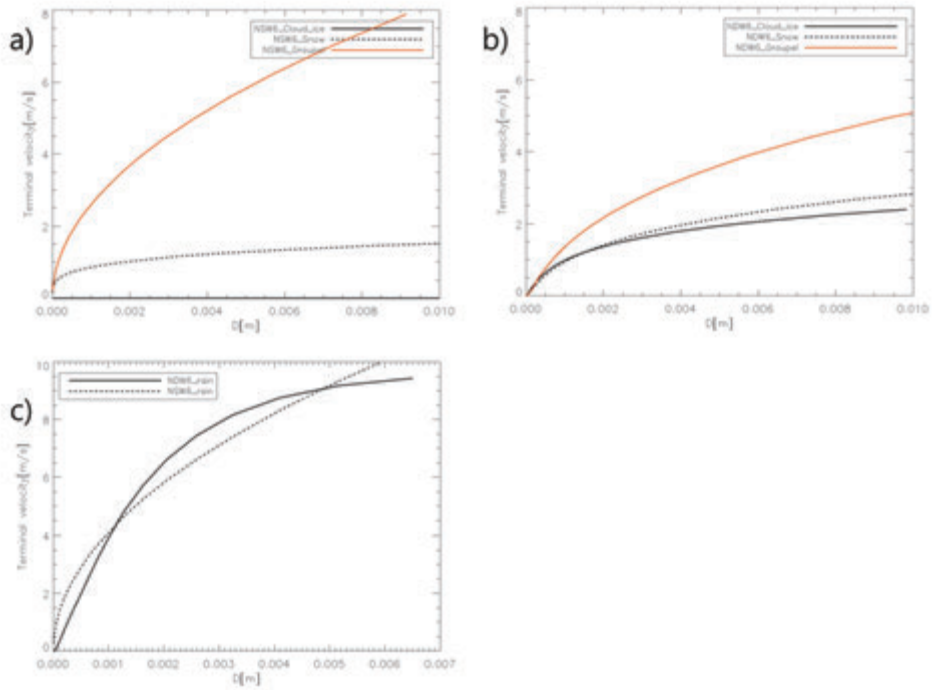

Fig. 3.5 The terminal velocity of ice hydrometeors in NSW6 (a) and NDW6 (b) and rain (c).

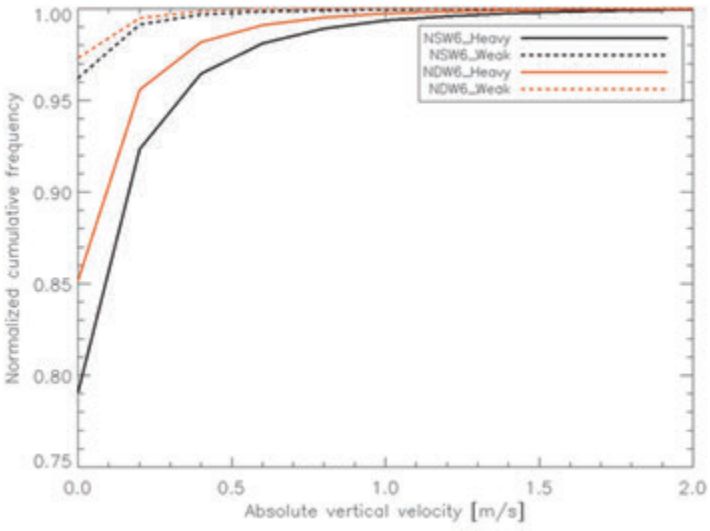

Fig. 3.6 The cumulative PDF of the absolute vertical velocity in sampling data with larger than -40 dBZ in NICAM.

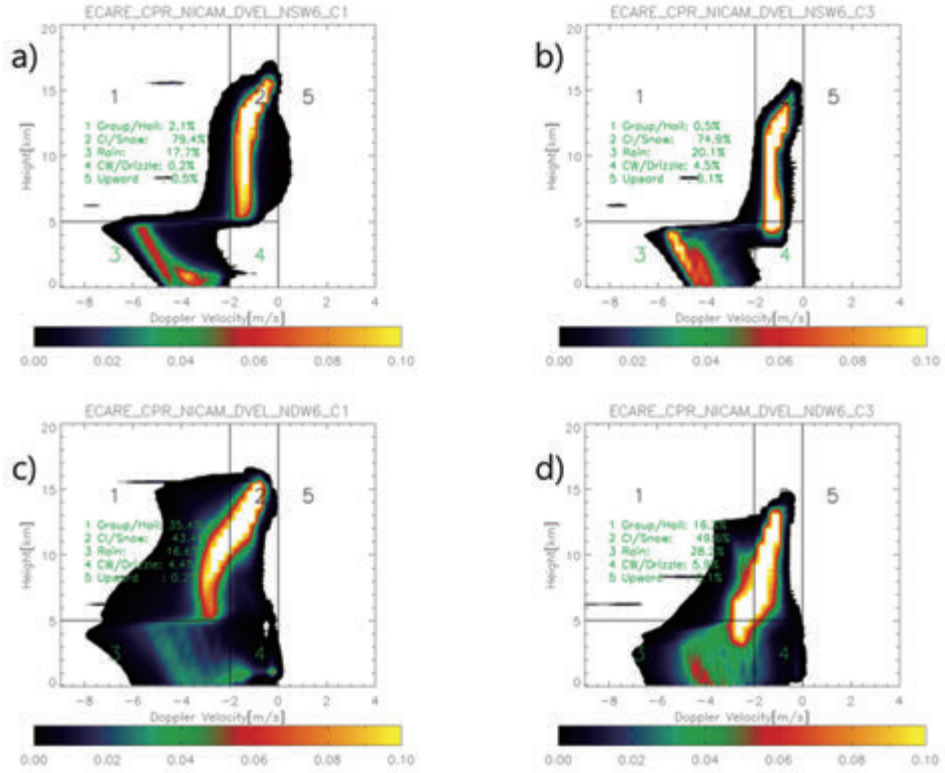

Fig. 3.7 The joint histograms between height and Doppler velocities using the EarthCARE-like simulations for NSW6 (top) and NDW6 (bottom) in Case 1 (left) and Case 2 (right).

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.

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, EGUsphere [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.
Seiki, T., and Nakajima, T. 2014: Aerosol effects of the condensation process on a convective cloud simulation. *Journal of the Atmospheric Sciences*, *71*(2), 833-853.
Tomita, H., 2008a: A stretched icosahedral grid by a new grid transformation. *J. Meteorol.l Soc. Jpn.*, **86,** 107−119.
Tomita, H., 2008b: 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 introduced a new evaluation method using a 94 GHz Cloud Profiling Radar (CPR) on the ground and a satellite simulator. This method can provide information about the characteristics of the microphysics. We evaluated two microphysics schemes in NICAM using this method and the Joint Simulator for two precipitation cases.

The merit of Doppler velocity is the less impact of rain attenuation and wet attenuation on the antenna. And Doppler velocity is related to the terminal velocity of hydrometeors, and the terminal velocity has information about the density and thermodynamic phases of hydrometeors. We found that there is a limitation of the ground CPR observation of the radar reflectivity for the precipitation case because of wet attenuation on the antenna. The Doppler velocity of the ground observation is more reliable than the radar reflectivity. And the microphysical schemes have stronger effects on the Doppler velocity than the precipitation case.

5. List of publications

5.1 Peer-reviewed articles

Satoh, M., Matsugishi, S., Roh, W., Ikuta, Y., Kuba, N., Seiki, T., Hashino, T., Okamoto, H. (2022) 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. Progress in Earth and Planetary Science, 9, 41. doi:10.1186/s40645-022-00511-5

Wang, M., Nakajima, T. Y., Roh, W., Satoh, M., Suzuki, K., Kubota, T., and Yoshida, M. (2023) Evaluation of the smile effect on the Earth Clouds, Aerosols and Radiation Explorer (EarthCARE)/Multi-Spectral Imager (MSI) cloud product. Atmospheric Measurement Techniques, 16, 603-623.

Hagihara, Y., Ohno, Y., Horie, H., Roh, W., Satoh, M., Kubota, T., (2023) Global evaluation of Doppler velocity errors of EarthCARE Cloud Profiling Radar using a global storm-resolving simulations. Atmospheric Measurement Techniques, 16, 3211-3219.

Roh, W., Satoh, M., Hashino, T., Matsugishi, S., Nasuno, T., Kubota, T. (2023) Introduction to EarthCARE synthetic data using a global storm-resolving simulation. Atmospheric Measurement Techniques, 16, 3331-3344.

Roh, W., Satoh, M., Hagihara, Y., Horie, H., Ohno, Y.,Kubota, T. (2023) An evaluation of microphysics in a numerical model using Doppler velocity measured by ground-based rader for application to the EarthCARE satellite. Atmospheric Measurement Techniques, under review.

5.2 Other publications

None.

5.3 Oral presentations

Roh, W., Satoh, M. (2022) An evaluation of microphysics in NICAM using the vertical pointing 94 GHz Doppler radar, JPGU 2022, 22-27^{h} May 2022

Roh, W., Satoh, M. (2022) Evaluations of microphysics in NICAM using a polarimetric radar and a 94 GHz Doppler radar in Japan, EGU 2022, 23-27th May 2022

Roh, W., Satoh, M. (2022) An evaluation of microphysics schemes in NICAM using observation data over the Tokyo metropolitan area in Japan, 3rd Pan GASS meeting, 25-29th Jul. 2022

Roh, W., Satoh, M. (2022) Evaluations of NICAM Using Intensive Observations and Joint Simulator Over the Tokyo Metropolitan Area, AOGS 2022, 1-5th Aug. 2022

Roh, W., Satoh, M. (2022) Evaluations of microphysics in NICAM using the cloud profiling radar on the ground, 日本気象学会2022年度秋季大会, 24-26th Oct. 2022

Roh, W., Satoh, M. (2022) Numerical study on cloud systems using NICAM: The recent progress of the ULTIMATE and the EarthCARE project, the NIES supercomputer workshop, 23 Dec. 2022

6. 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

Numerical study on cloud systems using NICAM
（NICAMによる雲降水システムの研究）

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 4 年度～令和 4 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気候多様性を理解する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における陸惑星気候を求める。ここ数年は完全蒸発状態が発生することを確認すること、そのモデル依存性を考察することを主要な目的としている。

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（2022 年 4 月 1 日～2023 年 3 月 31 日）

CPU時間　v_debug　：　0.0[VE・hours]
　　v_normal　: 47,671.4[VE・hours]
　　計　：47,671.4[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。地球大気に類似する設定に基づいた鉛直 1 次元モデルを用いた見積もりでは、それらの中には表面温度が液体 H_2O の存在可能な範囲にあるものも存在すると推定されている (Wit et al., 2018 など)。だが、実際には、これらの惑星では、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、水の存在条件は単純には決定されない。

多様な条件下に実現しうる多様な気候状態を数値的に調査し、生命存在可能な環境（表層に液体の水が存在しうる環境）の可能性を探ることを目的として、多くの気候計算が行われている (Kaspi and Showman, 2015; Way et al., 2017 など)。我々の研究グループにおいても AGCM の開発を行い（DCPAM、後述）、系外惑星の姿の探求を進めてきた（Noda et al., 2017 など）が、ここでは地球型系外惑星の一つとして考えられている陸惑星における気候の多様性を調査する数値計算を実施し、惑星表層における液体の水の存在可能条件に関する知見を得ることをめざしている。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の閾値（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ことを示しており、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。

以上の背景を念頭に置き、我々はまず Abe et al. (2011) と同様の設定を用いた追実験を行い、その結果を再現した上でパラメータ依存性の探求に進むことを計画していた（平成31年度～令和3年度スーパーコンピュータ利用研究課題）。ところが Abe et al. (2011) と異なり、太陽放射吸収量が 450W/m^2 を超えても彼らが得ていた完全蒸発状態は得られなかった。このため、多重解の可能性も想定し、時間発展の多様性を担保すべく、自転傾斜角変更実験などのパラメータ実験を試行してきた。その中で昨年度、太陽定数を大幅に増加させると徐々に土壌水分が減少していくという結果が得られた。これは我々のモデルでは Abe et al. (2011) が得たよりも完全蒸発状態を発生させる入射放射量の閾値が大きいことを示唆するものである。これを受けて本年度は太陽定数をさらに増加させ、完全蒸発状態の発生を探る実験を行うこととした。

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を継続しておこなっている惑星大気大循環モデル DCPAM5（http://www.gfd-dennou.org/library/dcpam, Noda et al., 2017）である。その力学過程は 3 次元球面プリミティブ方程式系から成る。水平離散化にはスペクトル法を用いる。鉛直座標には σ を採用し、Arakawa and Suarez（1983）の方法を用いて離散化を行なう。放射計算には、Chou et al.（1996）および Chou et al.（2001）の地球大気用スキームを使用する。積雲過程には、Relaxed Arakawa and Schubert スキーム（Moorthi and Suarez, 1992）を用いる。鉛直乱流拡散スキームとして Mellor and Yamada (1974) の level 2.5、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）を惑星表面全体に適用する。惑星表面における水として、バケツモデルで計算される土壌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。初期に与える土壌水分量は、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

4 通りの太陽定数を与えた場合において現在までに得られている大気水蒸気量と土壌水分の全球平均値の時間変化を図 1 に示す。図 1a は昨年度までに行っていた実験での太陽定数最大値 S=2400 W/m^2 (全球平均日射吸収量は 450 W/m^2) の場合で得られた結果の再掲である。積分開始後 32850 日 (90 年) には、水量の大部分が土壌水分として存在するようになる。大気中の水蒸気量は極めて少ない。S=2600 W/m^2 の場合 (図 1b)、実験を開始してから 2800 日 (およそ 8 年) までは土壌水分は減少し大気水蒸気量は増加する。しかし、それ以降土壌水分は増加に転じる。この変化傾向から、いずれ水分の大部分は土壌水分として存在するようになると予想される。この場合はまだ平衡状態が得られていないので積分を継続し、水分の大部分が土壌水分として存在する状態

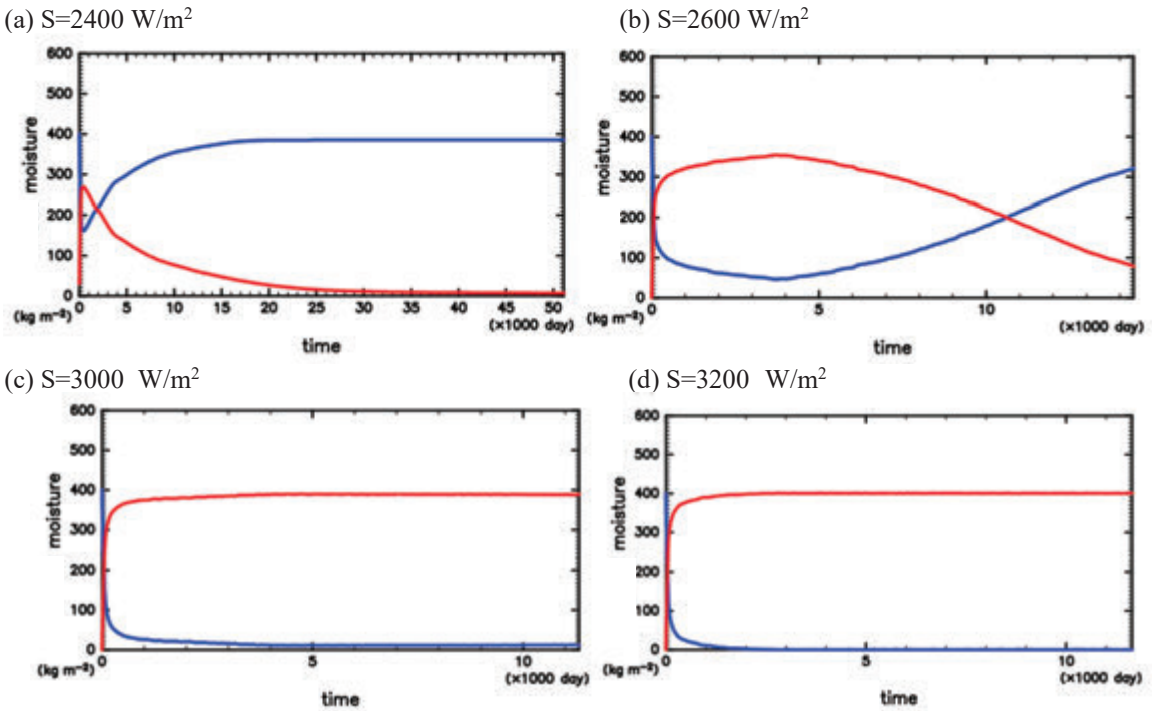

図 1. 全球平均水量の時間変化。大気水蒸気量[kg/m^2] (赤線) と土壌水分量 [kg/m^2] (青線)。(a) S=2400 W/m^2, (b) S= 2600 W/m^2, (b) S=3000 W/m^2, (d) S=3200 W/m^2。各実験で時間軸目盛は異なっている。

が得られることを確認する予定である。S=3000 W/m^{2}およびS=3200W/m^{2}の場合(図1c, d) では、ほとんど全ての水量は大気中に存在する状態が得られた。これらはAbe et al. (2011) で議論されている完全蒸発状態に対応するものだと考えられる。昨年まで実施していた我々の実験では土壌水分のほとんどが蒸発する状態を得るには太陽定数がまだ小さく、更に太陽定数を増加させる必要があったということが言える。ただし、S=3000 W/m^{2}の場合でもS=3200W/m^{2}の場合でもわずかに土壌水分が残っており、Abe et al. (2011)が議論した完全蒸発状態とは異なる。彼らの結果では、とある太陽定数閾値が存在し、その値を超えると土壌水分の消失が起こった。しかし、我々の実験で得られた最終状態 (図1の各図の右端の時刻) での全球平均土壌水分量はS=3000W/m^{2}の場合でおよそ10 kg/m^2、S=3200 W/m^{2}の場合ではおよそ0.05 kg/m^{2}であり、土壌水分は蒸発しきれていない。土壌水分がわずかに残る状態が維持されるというのはAbe et al. (2011) とは異なる結果である。彼らの場合閾値を挟んで土壌水分量は大きく変化し不連続な変化を示していた。今後、更に積分を継続し土壌水分量の動向を確認するとともに、土壌水分が完全には消失しない、という結果の信頼性を評価するべく、モデル中の水蒸気の振る舞いについて検討をおこなう予定である。

図 2 は S=3200 W/m^2 の場合で得られた、ほぼ土壌水分が消失した状態の大気構造を示したものである。図 2(a) は東西平均土壌水分の緯度分布である。土壌水分量は、赤道においては 0kg/m^2 となるが、極域で 10kg/m^2 程度、中緯度域では 0.01 kg/m^2 以下にはなっているがゼロとはならない。水の全量の 99.98%は大気水蒸気として維持されており、その大部分は低緯度領域に存在している (図 2b)。昨年度までに実施していた S=2400 W/m^2 の場合の実験では極域の表面温度は 230K となっており (図は示さない)、蒸発が起こらず大部分の土壌水分が極域地表に保持される状態となっていた。それに対して S=3200 W/m^2 の場合では、極域の東西平均表面温度 (図 2c) は 320K となっており、極域においても蒸発が起っている (図 2d の緑線)。しかし、赤道域を除く領域では降水も起っており、各緯度で降水 (図 2d の青線) により土壌に供給された水が蒸発するという水循環が存在する平衡状態が得られている。このバランスにより土壌水分量は完全にはゼロとはならず、極域地表には 10kg/m^2 程度の水が存在する状態が維持されている。

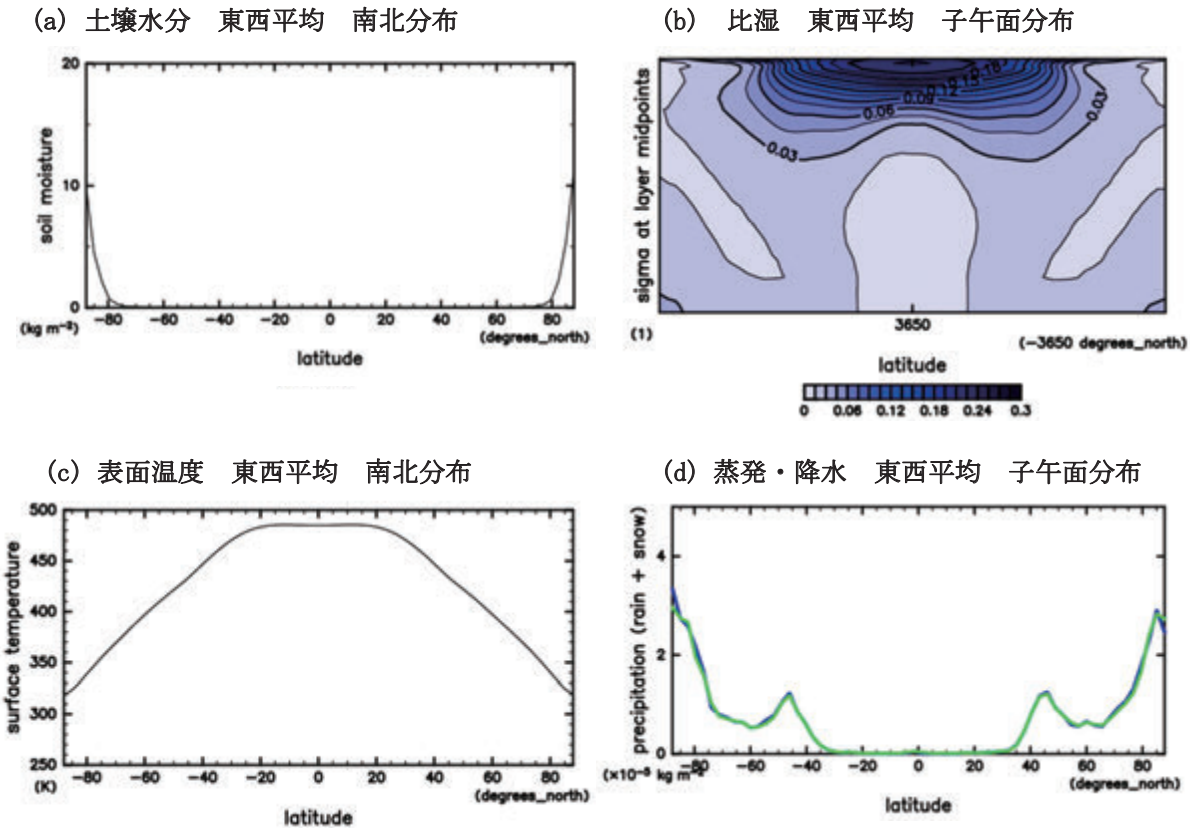

図 2.土壌水分がほぼ消失した状態 (a)：東西平均土壌水分量 [kg/m^2] の南北分布、(b) 東西平均比湿 [kg/kg]子午面分布、(c)東西平均表面温度[K] の南北分布、(d) 東西平均降水量(青線) [kg/m^2/sec]および東西平均蒸発フラックス(緑線) [kg/m^2/sec]の南北分布。S=3200W/m^2 の場合。計算を開始してから 11296 日目(およそ 31 年目)から 11660 日までの時間平均 (365 日平均) をとっている。

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 primitivy 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

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

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

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
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
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
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 実験を実施し太陽定数を 3200W/m^2 まで増加させたところ土壌水分がほとんど消失した状態を得ることはできた。土壌水分の概ねの消失が起こる太陽定数は Abe et al. (2011)が得た完全蒸発状態発生閾値よりも大きい値となった。しかし、Abe et al. (2011) の結果とは異なり、計算で用いた太陽定数と積分時間範囲では土壌水分の完全蒸発は起こらず、土壌水分が高緯度に残存し続ける解となっている。

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

研究課題名：
超高解像モデルSCALEによる植生を考慮した都市域における二酸化炭素輸送計算

実施年度：
令和 4 年度～令和 4 年度

課題代表者：東京大学大気海洋研究所　今須良一
共同研究者：国立環境研究所地球システム領域　伊藤昭彦
　　北海道大学大学院理学研究院　佐藤陽祐

1. 研究目的

観測された大気中CO_2濃度からCO_2排出量・吸収量を推定するいわゆるトップダウンアプローチでは、自然起源と人為起源の区別ができない。そのため、人為起源分の寄与を推定するためには、もう一方である自然起源分の推定精度が十分に高くなくてはならない(Imasu and Tanabe, 2018)。特に、短期間の解析においては、その時々の植物の状態を正確に反映した陸域生態系モデルが必要となる。この目的のために東京大学大気海洋研究所では、衛星データに基づく植生活動度を取り入れ、時間単位で光合成と呼吸量を評価できる陸域生態系モデル「BEAMS-diurnal」を開発した(Sasai et al., 2005; Wang et al., 2021)。このモデルと国立環境研究所の陸域生態系モデル「VISIT」との相互比較を通じて、高時空間分解が可能な陸域生態系モデルへと改良することを一つの目的とする。この改良されたモデルと、超高解像モデルSCALE-RM (Nishizawa et al., 2015)をベースとした大気輸送モデルとを組み合わせ、植生に囲まれた都市域などにおけるCO_2濃度分布を精度良く計算できるシステムを構築することを目標とする。

キーワード：
二酸化炭素、陸域生態系モデル、超高解像モデルSCALE-RM、BEAMS-diurnal

2. スーパーコンピュータ利用実績

2.1 計算機利用時間（2022年4月1日～2023年3月31日）

CPU時間　v_debug　：0.0[VE・hours]
　　v_normal　：0.2[VE・hours]
　　計　　：0.2[VE・hours]

2.2 利用概要

超高解像モデルSCALE-RMに新たなトレーサーとしてCO_2を追加することで、CO_2 輸送計算が可能となる改修を行った。SCALE-RMは、昨年度までの別課題において既に当該スーパーコンピュータ上で動作するよう改良が施されている。モデルは基本的にOpenMPによる並列化を行い実行した。この時、入力データとして使用する陸域生態系からのCO_2 フラックスについては、陸域生態系モデルBEAMS-diurnalを用いたオフライン計算により得られた結果をデータベース化し、時間ステップ毎にCO_2 輸送モデルに取り込む形で導入した。

3. 研究結果

3.1 概要

研究の第一段階として、次世代気象気候基盤ライブラリ「SCALE」について、サブ km スケールの空間分解能で CO_2 輸送計算を可能にする改修を行った。なお、SCALE については、本課

題参加者である北海道大学佐藤准教授により、既に国立環境研究所のスーパーコンピュータシステム上で動作できる環境が整えられていることに加え、大気化学コンポーネントの実装が進み、徐々に成果が出始めている（国立環境研究所スーパーコンピュータシステム利用研究、R1 年度：代表八代尚、R2、R3 年度：代表五藤大輔）。

一方、陸域生態系モデルについては、東京大学で開発した「BEAMS-diurnal」と国立環境研究所の「VISIT」とを、都市域の典型的な植生タイプや土壌タイプについて CO_2 フラックスベースで比較し、違いの原因を調べ、より良いパラメータ設定の導出を行った。この内容については、アジア行きに於ける複数の陸域生態系モデルの比較実験を行った結果(Ito and Ichi, 2021)を参考に比較パラメータの決定や、計算結果の比較を行った。

最終的にパラメータ等が最適化された「BEAMS-diurnal」と「SCALE-RM」とを組み合わせ、東京を含む関東地域を対象地域として CO_2 輸送計算を実施した。

3.2 SCALE-RMへのCO_2輸送計算コンポーネント追加

SCALE の領域モデルである SCALE-RM に、CO_2 輸送計算用コンポーネントを追加した。この時、CO_2 は熱力学場や放射スキームには影響を及ぼさない他のパッシブトレーサーと同様の扱いとし、移流・拡散過程を他のトレーサーと同様に計算している。気象場の初期値境界値は、NCEP_FNL を用いる。

人為起源 CO_2 の排出インベントリーは、EAGrid2000 をベースに、国全体の総エネルギー量の年変化に応じたスケーリングを施している。EAGrid2000 は、煙突高や航空機航路などを考慮し、高さ情報を含む 3 次元の外部データとしている。現時点での暫定的な措置として、空間解像度はオリジナルの 1 km のままとし、SCALE-RM 側で最近隣法によりモデルグリッド上での値として取り込んでいる。

陸域生態系による光合成と呼吸量については、それぞれ BEAMS-diurnal による計算をオフラインで実行した結果を外部ファイルとして用意した。これについても、BEAMS-diurnal のオリジナルグリッドに対し、最近隣法で得られた値を SCALE のグリッドデータとして取り込んでいる。

SCALE-RM の計算領域の外側の CO_2 濃度は、NICAM-TM による計算結果（環境研丹羽洋介氏提供）を用い、移流、拡散の境界条件としている。

以上の条件のもとで CO_2 輸送計算を行った結果の例を図 1 に示す。

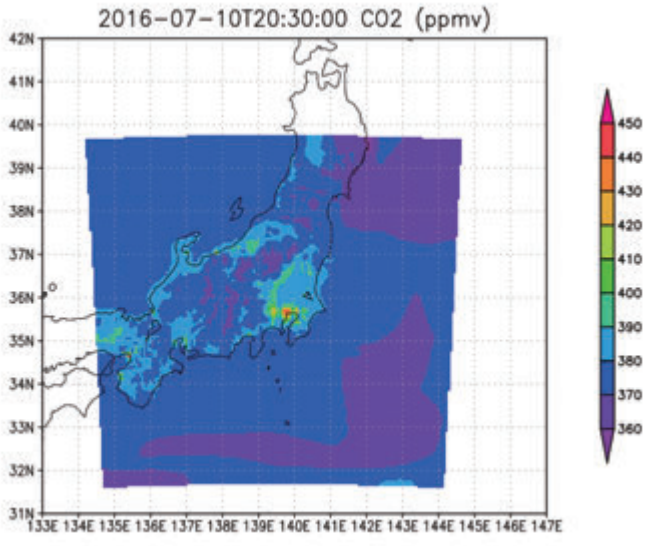

図 1. SCALE-RM をベースにした CO_2 輸送計算モデルによる CO_2 地表濃度の計算結果の例

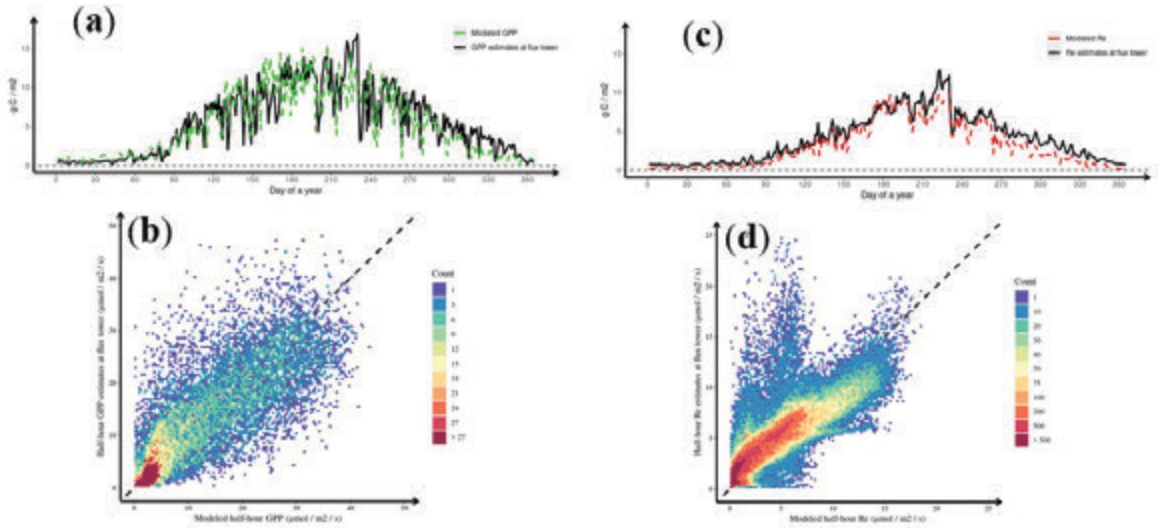

図２ (a) 2011 年の FFPRI 富士吉田サイト (東経 138.76225 度、北緯 35.45454 度) における GPP 日積算値 (g C m-2 day-1)のモデル計算値と実測値の比較。(b)同散布図（データは 2010 年から 2011 年の 30 分値 (μmol m^{-2} s^{-1})）。(c) (a)と同じ、ただし土壌呼吸を含む植物呼吸の総量 Re の日積算値(g C m-2 day-1)。(d) (b)と同じ、ただし Re の 30 分間値 (μ mol m^{-2} s^{-1})。実測データは森林総合研究所から提供を受けた。また、計算と作図は、東京大学大気海洋研究所の Dr. Wang Qiao 氏による。

3.3 BEAMS-diurnal と VISIT との比較

陸域生態系モデル BEAMS-diurnal と VISIT の比較のために、どのような計算条件で得られる結果を比較するべきかの検討を行った。基本的には、植生タイプごとに気象条件や光合成有効放射量、土壌水分量といった外部パラメータを同じにした場合の総一次生産量(GPP)、植生の呼吸量、土壌呼吸量を比較すべきであり、温度応答など、コンポーネントレベルでの比較が重要となる。しかし、BEAMS-diurnal が日内変動を再現すべく開発されたものである一方、VISIT は日平均値に重点をおいて開発されている。そのため、コンポーネントレベルでの直接比較が難しいことがわかった。そこで、東アジア地域において陸域生態系モデルの比較実験を行った結果 (Ito and Ichi, 2021) を参考に、GPP 等の年間積算値などの計算結果の比較を行うこととした。その結果、BEAMS-diurnal による計算が、他のモデルと比べて数 10%程度の過大評価であることが判明した。その理由としては、MODIS 衛星に基づく光合成有効放射量（PAR）の日平均値に基づく日内変動の推定過程に問題があることが判明した。そこで、PAR の日内変動をより直接的に計算するため、竹中らによる気象衛星「ひまわり」のデータに基づく直達光と散光のデータベース (ftp://amaterass.cr.chiba-u.ac.jp/quasi-realtime/himawari829/archived/JP) を利用できるよう BEAMS-diurnal を改良した。その結果得られた GPP と土壌呼吸を含む植物呼吸の総量 Re を、森林総合研究所のデータベース(http://www2.ffpri.affrc.go.jp/labs/flux/site_e.html)と比較した結果を図２に示す。この結果から、BEAMS-diurnal による GPP 等の日内変動が観測をよく再現するように改良されたことが分かる。

3.4 今後の課題

今回、開発されたモデルによる CO_2 濃度の計算結果を、気象庁の WDCGG が提供する観測データ等を用いて検証するまでには至らなかった。今後の最重要課題である。

現時点では、人為起源のエミッションインベントリー、および、陸域生態系による光合成と呼吸量は、SCALE-RM のモデルグリッドに合わせて作成されておらず、最近隣法で近いグリッドの値を用いる方法を用いている。そのため、領域全体での排出量、吸収量の保存性が保証されていない。また、SCALE の解像度を変更するたびに、SCALE-RM 本体のプログラムの修正が必要になる。したがって、SCALE-RM の解像度を決めた段階で、それに合わせた排出・吸収量データベースをコマンド一つで作成できるツールを作成する必要がある。また、人為起源のエミッションインベントリーデータは、モデルのすべてのグリッド点について CO_2 放出の可能性があるということで、これと同じサイズで、かつ、時間ステップごとのデータとして外部ファイルから読み込んでいる。そのため、モデルへの入力データのサイズが大きく、また、分散処理の足かせとなっている。今後、モデルの高速化のためには、この点の効率化も必要である。

当グループでは、既に産業技術総合研究所の輸送モデル AIST-MM をベースにした EnTKF システムにより、都市域からの CO_2 排出量推定などを行っている。このコンポーネントとスクリプトを本課題で作成した CO_2 輸送計算システムに適用し、CO_2 排出量推定を可能にすることを、今後、検討したい。これは、2023 年度打ち上げ予定の GOSAT-GW や米国 OCO-3 衛星などにより取得される CO_2 画像データの解析に利用することができ、都市域からの CO_2 排出量推定や大規模発生源の特定などの研究に資するものであると考えている。

参考文献

Imasu, R.; Tanabe, Y. (2018), Diurnal and seasonal variations of carbon dioxide (CO_2) concentration in urban, suburban, and rural areas around Tokyo. Atmosphere, 9, 367. http://doi.org/10.3390/atmos9100367

Sasai T., Ichii K., Yamaguchi Y., Nemani R. (2005), Simulating terrestrial carbon fluxes using the new biosphere model “biosphere model integrating eco-physiological and mechanistic approaches using satellite data” (BEAMS). J. Geophys. Res. Biogeosciences, 110. https://doi.org/10.1029/2005JG000045,

Wang Q., Imasu R., Arai Y., Ito S., Mizoguchi Y., Kondo H., Xiao J. (2021), Sub-Daily Natural CO_2 Flux Simulation Based on Satellite Data: Diurnal and Seasonal Pattern Comparisons to Anthropogenic CO_2 Emissions in the Greater Tokyo Area, Remote Sens., 13, 2037-2068. https://doi.org/10.3390/rs13112037

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, 3393-3419. https://doi.org/10.5194/gmd-8-3393-2015.

Ito A., Ichi K. (2021), Terrestrial ecosystem model studies and their contributions to AsiaFlux. J. Agric. Meteo., 77, 81-95. https://doi.org/10.2480/agrmet.D-20-00024

Forestry and Forest Products Research Institute FluxNet Database. Available online: http://www2.ffpri.affrc.go.jp/labs/flux/site_e.html (accessed on 30 June 2023).

Takenaka H. AMATERASS Database of Center for Environmental Remote Sensing (CEReS). Available online: ftp://amaterass.cr.chiba-u.ac.jp/quasi-realtime/himawari829/archived/JP (accessed on 30 June 2023).

4. まとめ

衛星データに基づく植生活動度を取り入れ、時間単位で光合成と呼吸量を評価できる陸域生態系モデル「BEAMS-diurnal」を東京大学において開発した。このモデルと国立環境研究所の陸域生態系モデル「VISIT」との相互比較を通じて、陸域生態系からのCO_2地表フラックス計算精度を向上することができた。また、超高解像モデルSCALE-RMに新たなトレーサーとしてCO_2を追加することで、CO_2 輸送計算が可能となった。この輸送モデルとBEAMS-diurnalと組み合わせることにより、関東域など植生に囲まれた大都市近傍におけるサブ km スケールの空間分解能で CO_2 輸送計算を高精度で行うことができるようになった。

5. 研究成果発表

5.1 誌上発表（査読あり）
該当なし。

5.2 誌上発表（査読なし）
該当なし。

5.3 口頭発表
胡其多, 新井豊, 今須良一, 石戸谷重之, 近藤裕昭, 菅原広史 (2022) OR を用いた都市域における CO2 排出源の特性解析. 日本気象学会 2022年度秋季大会

5.4 その他（書籍等）
該当なし。

6. 連絡先

今須良一
〒277-8568 千葉県柏市柏の葉 5-1-5
東京大学大気海洋研究所
Tel: 04-7136-4410 Fax: 04-7136-4375
E-mail: imasu@aori.u-tokyo.ac.jp

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

要旨：

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月より第6世代目となるスーパーコンピュータシステムの運用を行なっている。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）を中心に構成し、高速ネットワーク接続にはInfiniBandを採用している。ベクトル処理用計算機のピーク性能は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。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。ジョブキューには通常用（v_normal）とデバック用（v_debug）が用意されており、それぞれリクエスト可能な論理ホスト数の上限と経過時間の上限が異なる。令和4年度は、おおむね82%-100%のシステム稼働率を維持し、スーパーコンピュータ利用研究課題全体が利用した計算リソース使用率は期間内平均で55.8%（月平均で最小27%、最大81%、稼働中のv_normal用ノードを100%とした場合）であった。大容量ファイルシステムは総容量62TBの/homeと総容量22PBの/dataの2つの領域をもち、/home領域は自動バックアップ機能を有する。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。令和4年度の大容量ファイルシステム/data領域の年間平均使用率は32%であり、期間内に使用率は29%から36%に増加した。

キーワード：
スーパーコンピュータ、ベクトル処理、大容量ファイルシステム

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。

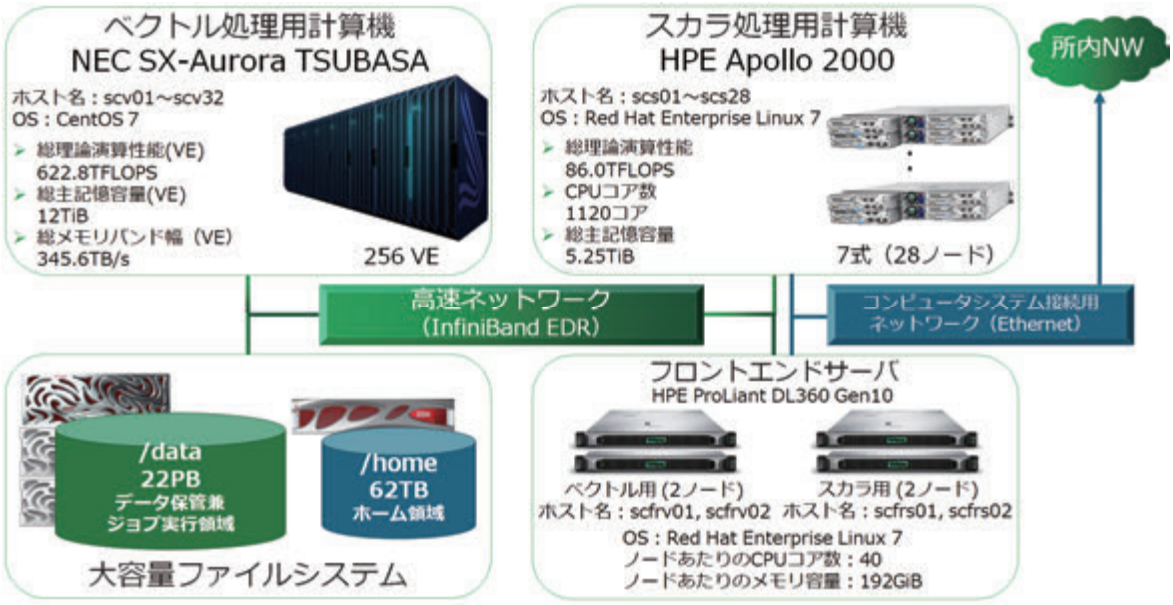

図 1. システム概要図（2020年3月～）

※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。2022年4月から2023年3月にかけての平均稼働率は96.0%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99.9%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（2021年4月から2022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95.7%、99.6%であった。

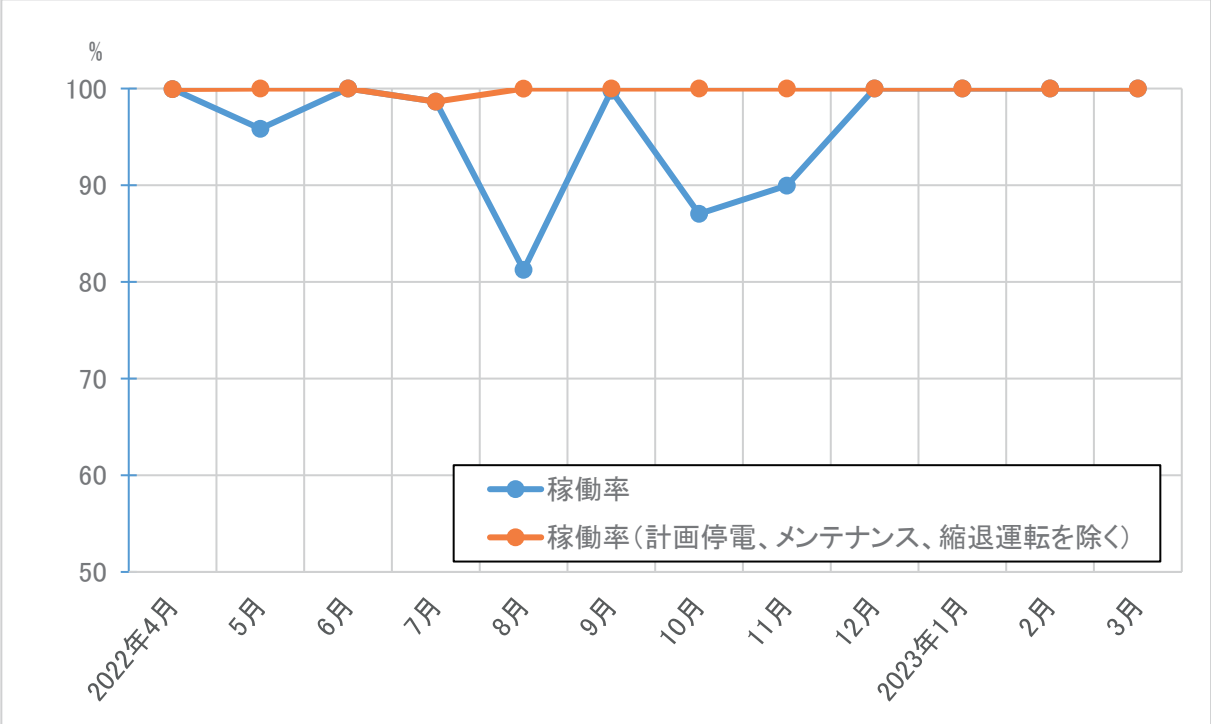

図3. 月ごとのベクトル処理用計算機の平均稼働率の推移（2022年4月1日～2023年3月31日）

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55.8%（前年度は65.6%）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する傾向にあり、また9月、12月頃に利用率がピークとなる傾向がある。2022年8月から2023年1月にかけて常に60%以上の高い利用率で推移しており、特に9月の利用率は80.9%に達した。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が、これはジョブが確保したVEとコア数よりも実際に利用したコア数が少ないケースや、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。

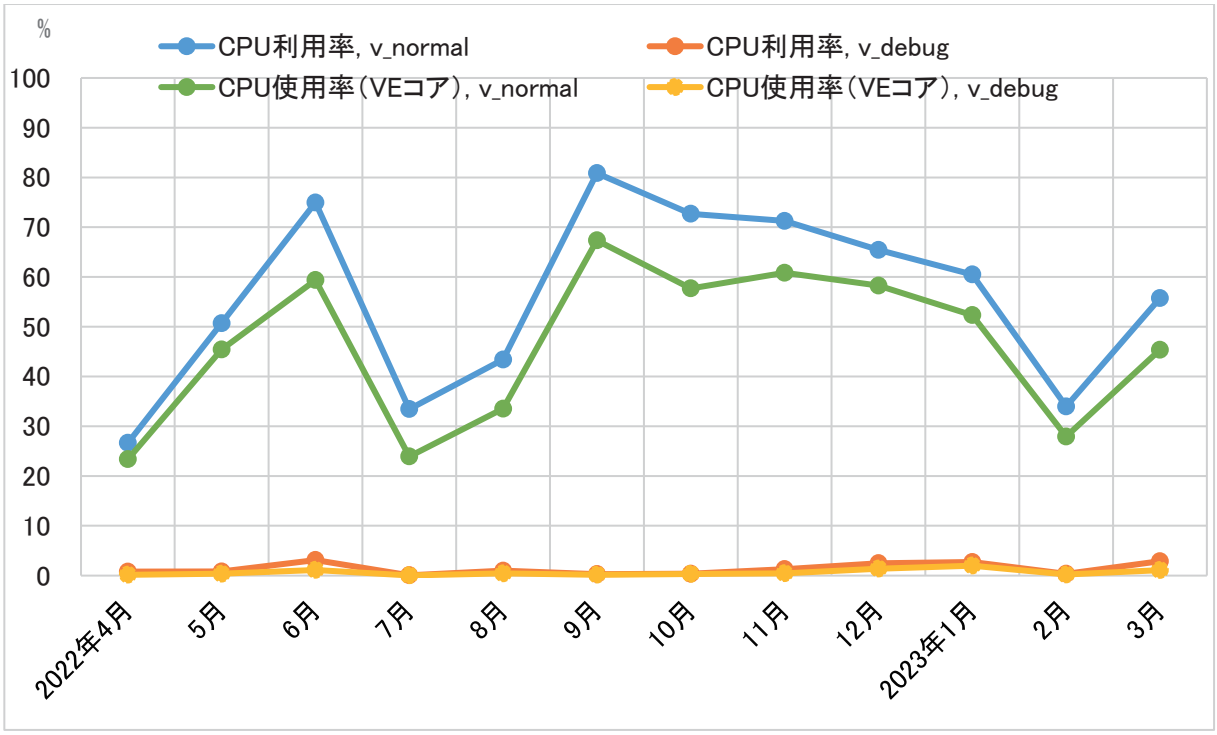

図4. 月ごとのベクトル処理用計算機の平均利用率の推移（2022年4月1日～2023年3月31日）

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・hour]			平均利用率 (v_normal)
		v_debug	v_normal	計	
所内課題	7	942	1,165,339	1,166,282	54.0%
所外課題	3	0	47,672	47,672	2.2%
合計	10	942	1,213,011	1,213,953	56.2%

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、5〜6月と3月に多くのジョブが投入されていたことがわかる。また、利用率の高かった9〜10月は、ジョブリクエスト数でみると年間の中で少ない時期であったが、待ち時間が最も長かったことがわかる。9〜10月は1リクエストあたりに利用されるVE数が多く、リソース不足により待たされるジョブも多かったと推察される。年度を通したジョブリクエスト総数は約54000であり、前年度（約41000）から3割増加した。実行までの待ち時間は年平均で0.9時間、月平均の最大で4.7時間と、前年度の値（それぞれ2.8時間、7.4時間）よりも減少している。

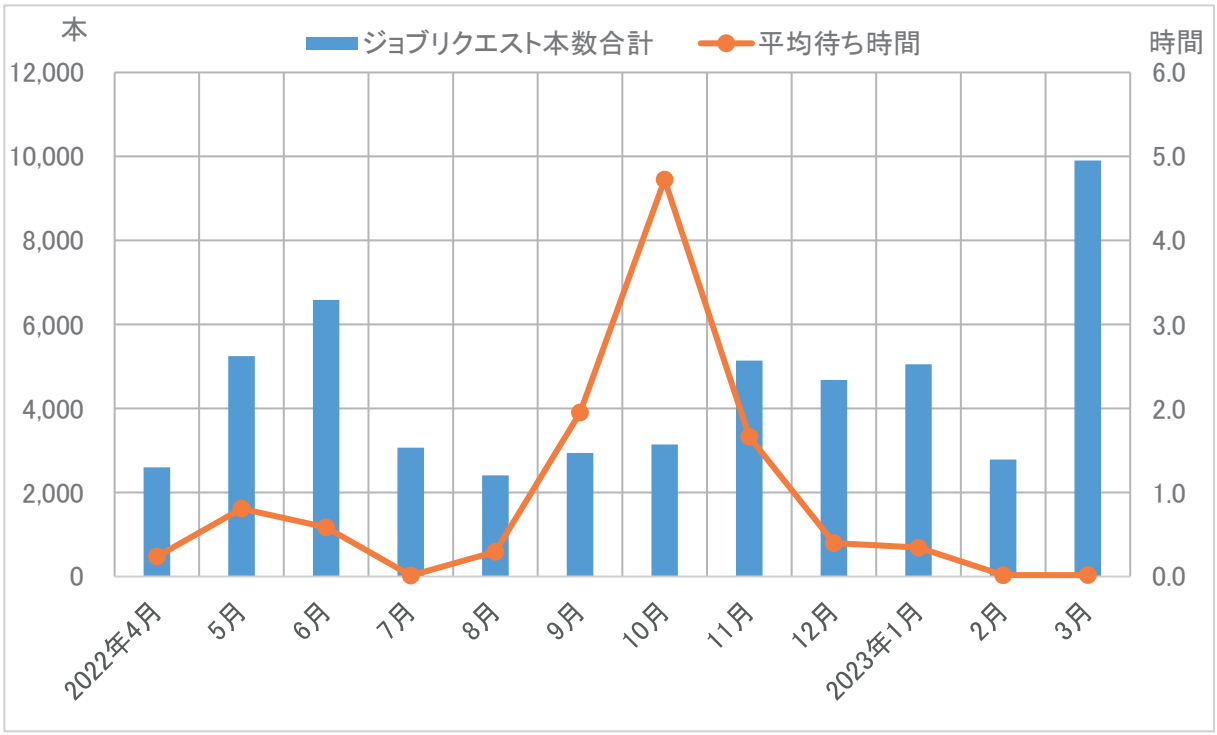

図5. ベクトル処理用計算機のジョブリクエスト数と平均待ち時間の推移（2022年4月1日〜2023年3月31日）

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2.0時間であり、前年度平均の3.2時間から1.2時間減少した。

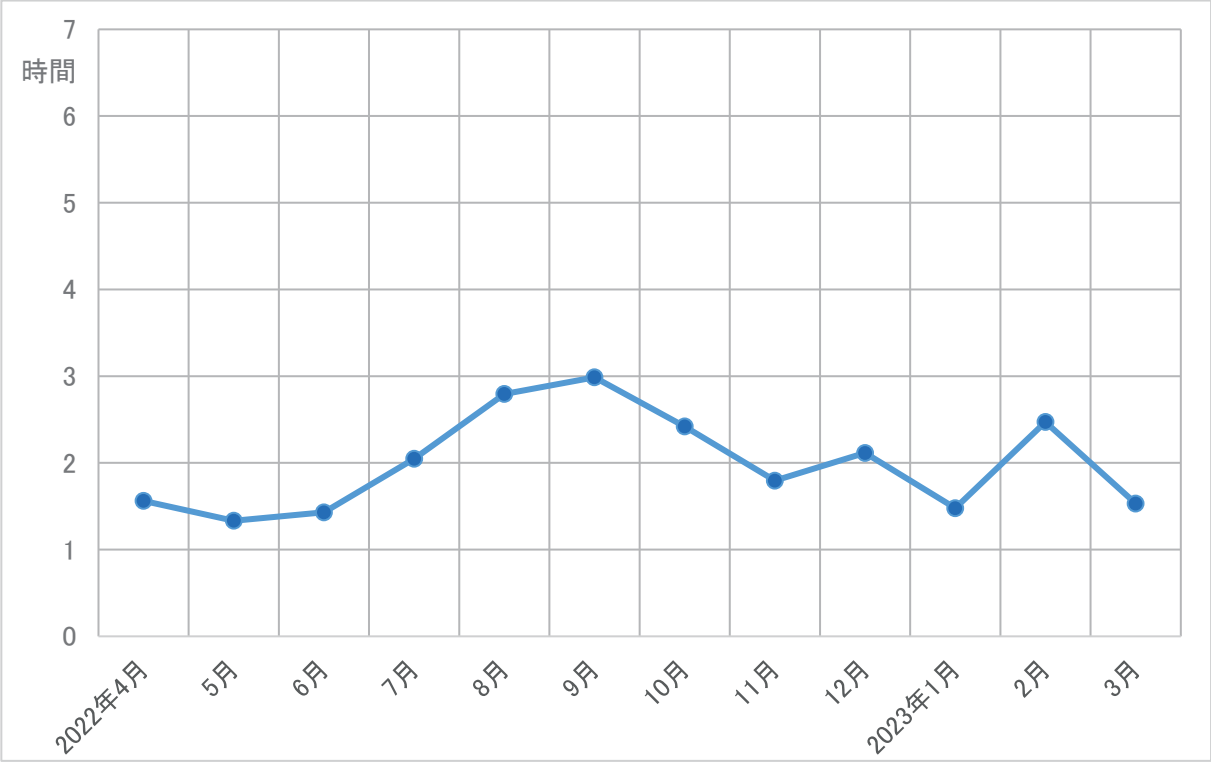

図6. 月ごとのベクトル処理用計算機の平均ジョブ実行時間の推移
（2022年4月1日～2023年3月31日）

3.3 利用実績（大容量ファイルシステム）

2022年4月から2023年3月にかけての大容量ファイルシステムの利用率は、28.7%から35.7%に推移しており、期間全体の平均で32.4%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点は解消されているといえる。

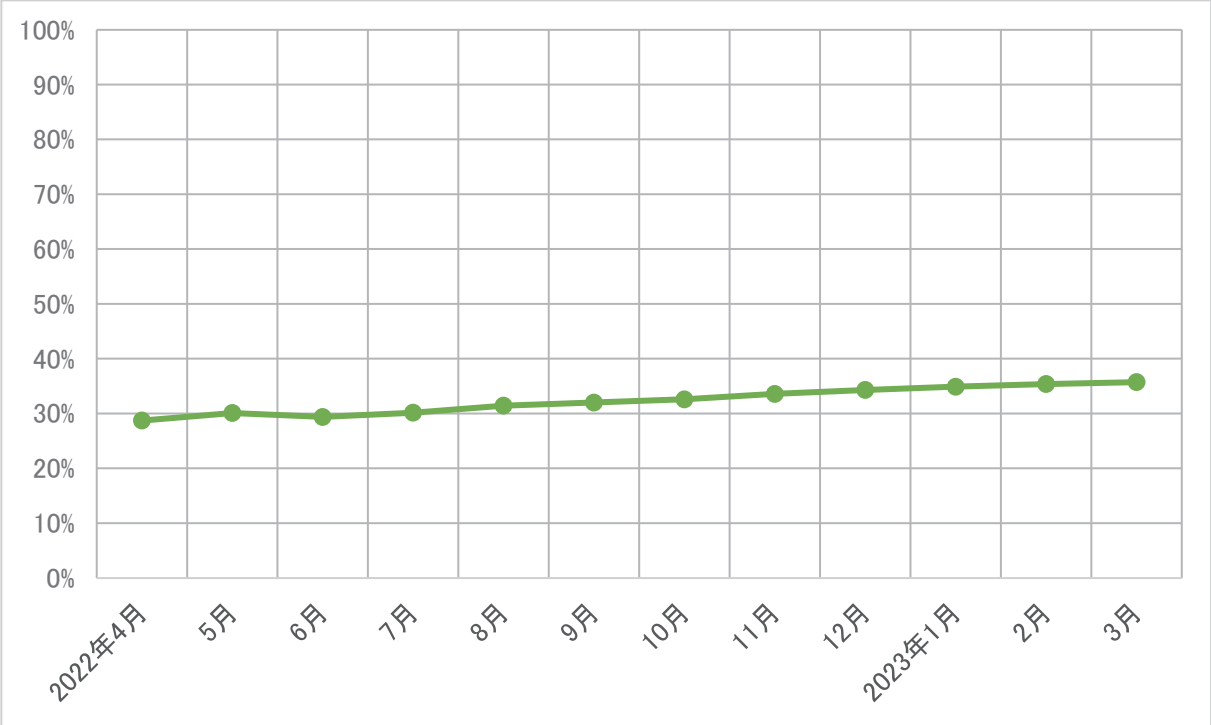

図7. 大容量ファイルシステム（/data領域）の使用率（2022年4月1日～2023年3月31日）

CGER'S SUPERCOMPUTER ACTIVITY REPORT

(Out of stock)

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

……

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

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

……

CGER'S SUPERCOMPUTER MONOGRAPH REPORT

Vol. 1 CGER-I021-'96 (Out of stock)
KOMORI S.: Turbulence Structure and CO_2 Transfer at the Air-Sea Interface and Turbulent Diffusion in Thermally-Stratified Flows

Vol. 2 CGER-I022-'96 (Out of stock)
TOKIOKA T., NODA A., KITOH A., NIKAIDOU Y., NAKAGAWA S., MOTOI T., YUKIMOTO S., TAKATA K.: A Transient CO_2 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
SATOH M., ROH, W., HASHINO, T.: Evaluations of Clouds and Precipitations in NICAM Using the Joint Simulator for Satellite Sensors

Vol. 23 CGER-I132-2017
GOTO D., SCHUTGENS, N.A.J., OIKAWA, E., TAKEMURA, T., NAKAJIMA, T.: Improvement of a global aerosol transport model through validation and implementation of a data assimilation system

Vol. 24 CGER-I138-2018
TAKEMURA T., AND SPRINTARS DEVELOPER TEAM : Development of a global aerosol climate model SPRINTARS

Vol. 25 CGER-I143-2019
MAKSYUTOV, S., ODA, T., SAITO, M., TAKAGI, H., BELIKOV, D., VALSALA, V.: Transport modeling algorithms for application of the GOSAT observations to the global carbon cycle modeling

Vol. 26 CGER-I148-2019
NAKAYAMA T.: Development of Process-based NICE Model and Simulation of Ecosystem Dynamics in the Catchment of East Asia (Part V)

Vol. 27 CGER-I153-2021
ISHIWATARI M., NAKAJIMA K., TAKEHIRO, S., KAWAI Y., TAKAHASHI Y. O., HASHIMOTO G. L., SASAKI Y., and HAYASHI Y.-Y.: Numerical studies on the variety of climates of exoplanets using idealistic configurations

Vol. 28 CGER-I158-2022
YOKOHATA T.: Development of an integrated land surface model with ecosystems, human water management, crop growth, and land-use change: MIROC-INTEG-LAND

Vol. 29 CGER-I167-2023
NAKAYAMA T.: Development of Process-based NICE Model and Simulation of Ecosystem Dynamics in the Catchment of East Asia (Part VI)

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 4 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
西前晶子　　国立研究開発法人国立環境研究所企画部
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 4 年度

NIES Supercomputer Annual Report 2022

国立環境研究所地球環境研究センター 編

[CGER-REPORT: ISSN 1341-4356 (printed version) , 2434- 5679 (online version)
CGER-I168-2024]

2024 年 1 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。