

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3年度

NIES Supercomputer Annual Report 2021

国立環境研究所地球環境研究センター 編

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



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



国立環境研究所スーパーコンピュータ利用研究年報

令和3年度

NIES Supercomputer Annual Report 2021

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さまざまな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3年度に実施された利用研究の成果として、全9課題の研究年次報告を収めました。あわせて、スーパーコンピュータシステム(SX-Aurora TSUBASA A511-64)の概要について紹介しています。

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

令和4(2022)年12月
国立研究開発法人国立環境研究所
地球システム領域
地球環境研究センター長
三枝信子

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.....	9
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.....	21
課題代表者：国立環境研究所地球システム領域 秋吉英治	
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.....	33
課題代表者：国立環境研究所地球システム領域 横島徳太	
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.....	43
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.....	51
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. エアロゾルデータ同化を活用した大気汚染予測システムの構築.....	61
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)	71
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:陸惑星設定を用いた 自動傾斜角依存性実験.....	85
課題代表者：北海道大学大学院理学研究院 石渡正樹	
スーパーコンピュータ利用研究終了課題の研究結果発表 (令和3年度)	93

国立環境研究所 スーパーコンピュータシステム概要 95

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 107



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・山上遥航

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

要旨：

気候モデルによる気候変動予測には大きな不確実性がある。たとえば、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ことが知られている。本研究課題では、気候モデル the Model for Interdisciplinary Research on Climate (MIROC) 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について調査した。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された。温暖化が進行すると、上層雲の高度が高くなることに伴い雲の温室効果がより効率的に働き、温暖化を加速させることが示された（正の雲フィードバック）。また、温暖化の影響評価研究においても、降水の将来変化の不確実性の制約に成功するなど、さまざまな成果が得られた。

キーワード：

気候モデル、気候変動予測、気候感度、雲・降水プロセス

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・山上遥航

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。たとえば、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、温暖化の影響評価も行う。特に生活に関わる降水の変化に着目する。研究成果は、国際学術誌で発表すると共に、一般にもわかりやすい形で発信する。

2. スーパーコンピュータ利用実績

2.1 計算機利用時間（2021年4月1日～2022年3月31日）

CPU時間 v_debug : 110.04 [VE・hours]

v_normal : 268,945.12 [VE・hours]

計 : 269,055.16 [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 Interdisciplinary 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 Regional Climate Model (NHRCM) も利用し、温暖化の影響評価の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わかった（正の雲フィードバック）。また、MIROC に加えて、NHRCM の実験結果を用いて、温暖化の影響評価についての研究も進め、さまざまな成果を発表した。

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の気候モデル (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。たとえば、CMIP6 モデルにおける気候感（二酸化炭素濃度倍増時の気温上昇量）には 1.8~5.6°C 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・降水プロセスの応答（フィードバック）がモデル間で異なることである (Zelinka et al., 2020)。

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。たとえば、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、放射プロセスへの影響をより精密に表現できるようになった。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よう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 (DIAG) と新しく実装された予報型降水スキーム (PROG) を用いた場合の比較を行う。DIAG と PROG の現在気候実験と温暖化実験を行う。モデルの大気部分のみを利用し、温暖化時の海洋の状態は、DIAG の MIROC 大気海洋結合モデルによって予測されたものを境界条件として与える (Shiogama et al., 2012)。大気モデルのみを利用した方法を用いるのは、PROG の MIROC の大気海洋結合モデルはまだ開発途中（後述）であるためである。この方法でも、雲・降水を含む大気プロセスの気候変動への役割を調べることは可能である。また、この方法は海洋循環（1000 年以上の時間スケール）の調整が不要であり、計算資源を大幅に節約できるなどのメリットがあり、これまでも多くの気候変動研究で利用されてきた。

DIAG と PROG の温暖化時の雲フィードバックを比較する。特に雲の日傘効果や温室効果に関わる、雲の量、高さ、厚さの温暖化への応答の違いを調べることで、フィードバックプロセスの理解を深めることができる。さらに、世界の CMIP モデルとの比較を行い、MIROC に見られたフィードバックプロセスの違いが、CMIP モデルの気候感度の不確実性をどの程度説明できるのかを調べる。

PROG の MIROC 大気海洋結合モデルの開発も行う。予報型降水スキームを導入すると、特に大気上層の雲量が増加し、これまで見られた上層雲量の過少バイアスが改善した (Michibata et al., 2019)。上層雲は温室効果が強く、地球を暖めるので、水蒸気量が増加し、その温室効果がさらに地球を暖める。このように、降水スキームの変更は、地球の水循環やエネルギー収支に大きく影響を与えるので、他の乱流、対流スキームなども合わせて調整する必要がある。

ここまで MIROC の予報型降水などの改良とそのモデルによる気候変動予測について述べてきたが、すでに開発が完了している診断型降水の MIROC や、より高解像度の計算ができる領域気

候モデル NHRCM を用いた影響評価研究も行う。特に生活との関りが大きい降水の変化に着目する。その成果は一般の方にもわかりやすい形で発表する。

3.4 結果

改良したPROGと従来のDIAGのMIROCにおける気候感度と雲放射フィードバックを図1に示す。改良によって、気候感度は20%増加 (2.15→2.56K) した。その変化は長波 (LW) 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。PROGでは、DIAGに見られた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く (正の雲フィードバック)。この上層雲量と雲フィードバックの関係を、CMIPモデルの数値実験結果についても調べた。図2に見られるように、上層雲量と雲の高度が高くなるフィードバックの強さの関係はCMIPモデルにも見られた。つまり、CMIPの多くのモデルも、DIAGの同じように上層雲量が観測に比べて不足しており、雲の高さフィードバックによる温暖化の加速効果が不足している可能性が指摘された。これは、モデルの雲・降水プロセスと温暖化予測の関係の理解に基づいて、予測不可確実性を低減した成果である。この内容はHirota et al., (2022)で発表した。

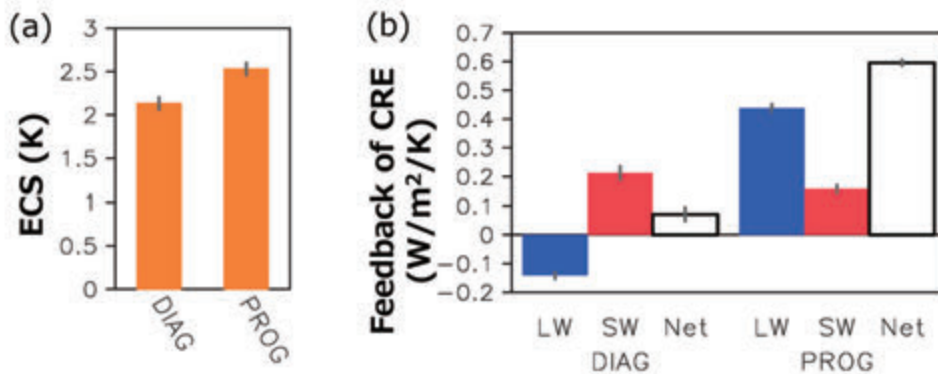


図 1. 予報型降水 (PROG) と診断型降水 (DIAG) のMIROCにおける(a)気候感度と(b)雲放射フィードバック。雲放射フィードバックは長波 (LW) 、短波 (SW) と正味 (Net) の成分について示している。

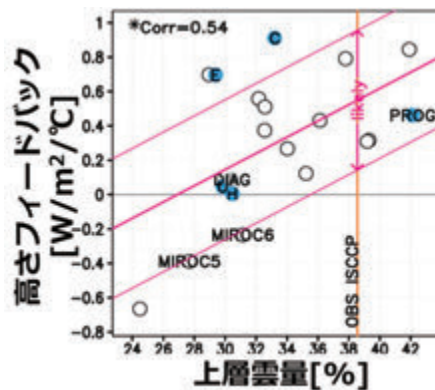


図 2. CMIPモデルにおける上層雲量とLWの雲の高さフィードバックの関係。各点が各CMIPモデル、オレンジ線が観測 (ISCCP) による上層雲量を示す。上層雲量と雲フィードバックの大きさは、観測の上層雲量が30%以上の領域平均の値。

MIROC大気海洋結合モデルの開発では、特に雲量の再現性の改善に取り組んだ。PROGの大気モデルに海洋を結合すると、雲水量が非常に大きくなるバイアスが発生した。前述の通り、PROGでは上層雲量が増加する。上層雲は温室効果が強く、地球を暖めるので、水蒸気量が増加し、その水蒸気の温室効果がさらに地球を暖めるというフィードバックプロセスが働いた可能性が考えられる。これは、海洋の温度を固定している大気モデルでは大きな問題にならないが、大気海洋結合モデルでは大きな雲量バイアスを生じさせる。よって、雲・降水プロセスを変更したことに応じて放射・乱流プロセスなどの他のパラメータを調整し、地球を冷却してバランスを取る必要がある。これらの調整を含め、新しいMIROCが過去の気候変動を適切に表現できるように開発する。実際に、モデルの雲、降水、対流スキームのパラメータを調整し、雲を雨として地面に落としやすくすると、このバイアスが改善された（図3）。

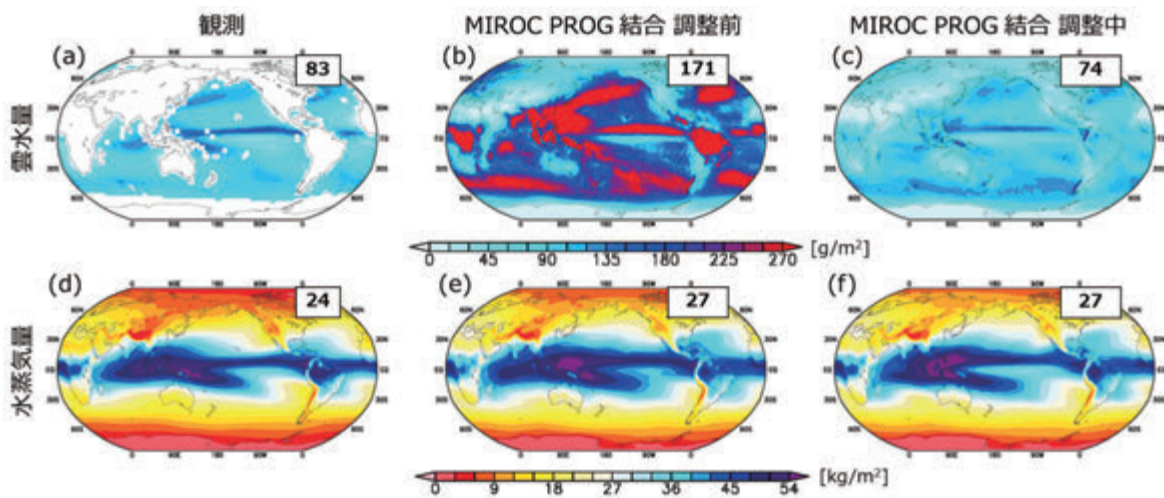


図 3. 観測、及び調整前と調整中のMIROC PROG大気海洋結合モデルの鉛直積算雲水量と水蒸気量。全球平均値を各図の右上に示す。

影響研究では、たとえば、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3割程度、MIROC開発が5割程度、影響評価研究が2割程度である。

参考文献

- 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>
- Michibata, T., Suzuki, K., Sekiguchi, M., & Takemura, T. (2019), Prognostic precipitation in the MIROC6-SPRINTARS GCM: description and evaluation against satellite observations. *J. Adv. Model. Earth Syst.*, 11(3), 839-860. <https://doi.org/10.1029/2018MS001596>

- Shiogama, H., Watanabe, M., Ogura, T., Yokohata, T., & Kimoto, M. (2014), Multi-Parameter Multi-Physics Ensemble (MPMPE): A new approach exploring the uncertainties of climate sensitivity. *Atmos. Sci. Lett.*, 15(2), 97-102. <https://doi.org/10.1002/asl2.472>
- 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>
- Zelinka, M. D., T. A. Myers, D. T. McCoy, S. Po-Chedley, P. M. Caldwell, P. Ceppi, S. A. Klein, K. E. Taylor (2020), Causes of higher climate sensitivity in CMIP6 models. *Geophysical Research Letters*, 47(1), <https://doi.org/10.1029/2019GL085782>

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、温暖化の影響評価研究においては、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、さまざまな成果を発表した。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やすい利用環境があつて、可能になったものである。

5. 今後の研究展望

課題計画時の目標はおおむね達成されている。MIROC を用いた、雲フィードバックの不確実性についての研究は、海外研究者からの反響もあり、今後の連携研究の計画に繋がっている。影響評価研究の中では、特に降水予測の不確実性の制約についての研究が *Nature* 誌に掲載されるなど、高く評価されている。

これまで、MIROC の大気モデルを用いて研究を進めてきたが、今後は大気海洋結合モデルを利用したい。そのために雲・降水プロセスを精緻化した MIROC の大気海洋結合モデルを開発する。開発にはスーパーコンピュータによる大規模計算が必須である。特に、モデル開発には多くの試行錯誤が必要となるため、計算速度のみならず、手軽に実験を行う環境、結果を解析する環境も重要である。

6. 研究成果発表

6.1 誌上発表（査読あり）

- 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>
- Shiogama H., Watanabe M., Kim H., Hirota N. (2022), Emergent constraints on future precipitation changes. *Nature*, 602, 612-616. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-04310-8>
- Hirota, N., Ogura, T., Shiogama, H., Caldwell, P., Watanabe, M., Kamae, Y., and Suzuki, K. (2021), Underestimated marine stratocumulus cloud feedback associated with overly active deep convection in models. *Environmental Research Letters*, 16(7), 074015. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abfb9e>
- 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>

6.2 誌上発表（査読なし）

なし。

6.3 口頭発表

廣田渚郎, 小倉知夫, 塩竈秀夫, Peter Caldwell, 渡部雅浩, 釜江陽一, 鈴木健太郎 (2021) CMIP5/6 における対流活動に着目した下層雲フィードバックの不確実性の制約. 日本気象学会 (三重県津市, 2021.12.8)

Nagio Hirota, T. Ogura, H. Shiogama, P. M. Caldwell, M. Watanabe, Y. Kamae, and K. Suzuki (2021) Underestimated marine stratocumulus cloud feedback associated with overly active deep convection in models. CFMIP 2021 (online, 9/14/2021)

6.4 その他 (書籍等)

廣田渚郎, 小倉知夫, 塩竈秀夫, 渡部雅浩, 釜江陽一, 鈴木健太郎 (2021) 地球温暖化予測において雲減少による温暖化の加速効果が過小評価—対流活動に着目して予測の不確かさを減らす—. 2021年6月29日 (プレスリリース)

塩竈秀夫, 藤森真一郎, 長谷川知子, 高橋 潔, 亀山康子, 江守正多 (2021) 孫は祖父母が遭遇しないような暑い日と大雨を何度経験するのか?—極端な気象現象の変化に関する世代間不公平性とその地域間不公平性の評価—. 2021年6月11日 (プレスリリース)

塩竈秀夫, 渡部雅浩, Hyungjun Kim, 廣田渚郎 (2022) 21世紀後半までの降水量変化予測の不確実性を低減することに初めて成功しました. 2022年2月24日 (プレスリリース)

環境省 (2020) 勢力を増す台風～我々はどう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>

7. 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

Project name:

Studies on uncertainties in climate predictions associated with cloud and precipitation processes

April 2020 – March 2023

Project leader:

Nagio Hirota, Earth System Division, National Institute for Environmental Studies

Project members:

Hideo Shiogama, Tomoo Ogura & Michiya Hayashi, Earth System Division, National Institute for Environmental Studies

Noriko Ishizaki, Center for Climate Change Adaptation, National Institute for Environmental Studies

Masahiro Watanabe & Yoko Yamagami, Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo

Hyungjun Kim & Kenshi Hibino, Institute of Industrial Science, The University of Tokyo

Toru Nozawa, Department of Earth System Sciences, Okayama University

Yasutaka Wakazuki, Graduate School of Science and Engineering, Ibaraki University

Hiroaki Kawase, Meteorological Research Institute

Tsuyohi Inoue, Mitsubishi Research Institute, Inc.

Yutaro Himeki, Central Operations Division, Pasco Corporation

Shunsuke Sakuragi, MRI Research Associates

Miho Sekiguchi, Tokyo University of Marine Science and Technology

Abstract:

Large uncertainties remain in climate projections by climate models. For example, the climate sensitivity (the temperature response to a doubling of atmospheric carbon dioxide) in climate models ranges from 1.8~5.6K. The most influential factor in the uncertainties is known to be the cloud/precipitation processes in models. Here, we performed climate projection experiments using the Model for Interdisciplinary Research on Climate (MIROC) and examined the relationship between the uncertainties and cloud/precipitation processes. In MIROC, a more sophisticated treatment of cloud/precipitation processes mitigated the underestimation of high-level clouds. As the climate warms, the height of high-level clouds gets elevated. Because the greenhouse effect of clouds is more effective at higher altitudes, this results in an acceleration of global warming (positive cloud feedback). In addition, we have obtained many interesting results in our research on impact assessments of global warming. For example, we successfully constrained the uncertainties in future precipitation changes.

Keywords:

climate model, climate prediction, climate sensitivity, cloud/precipitation processes

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・安井良輔

名古屋大学大学院環境学研究科 須藤健悟・Ha Thi Minh Phuc・松田涼樹・府中雄大・

Hossain Mohammed Syedul Hoque・中川裕太・何彦峰・王靖凌・鎌田友美・水野光一郎

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

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

東京大学大学院理学系研究科 堀田陽香

Ulsan National Institute of Science and Technology 朴祥緒

東京都市大学環境情報学研究科 Karkour Selim

要旨：

大気汚染物質、特に短寿命気候強制力因子（Short-lived Climate Forcers: SLCFs）には、PM_{2.5}などの微粒子（エアロゾル）や光化学オキシダントが含まれており、地球の放射収支・水循環に影響を与えている。本課題ではSLCFsの地域ごとでの気候・環境影響評価を目的として進めている環境省環境研究総合推進費 S-20 プロジェクトと連携している。本年度は、大気海洋結合モデル MIROC-SPRINTARS を用いて、CO₂濃度増加時の人為起源 SO₂ 排出量の削減に対する気候影響を評価したところ、CO₂濃度が高い方が同量の SO₂ 排出量減少での気温上昇が大きいことが明らかとなった。これは、雪氷・海氷アルベドと水蒸気フィードバックの影響が示唆される。また、領域高分解能シミュレーション可能な Diamond-NICAM を用いた、エアロゾル湿性沈着及び関連する過程に着目した全 13 通りのシミュレーションを実施し、モデル高度化に関する知見を得ることを目指した。その結果、湿性沈着の主要な過程である雲内除去式の違いは、その関連パラメータや雲降水に関わる式の違いよりも、エアロゾル時空間分布に大きな変動幅を与えることがわかった。

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

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・安井良輔

名古屋大学大学院環境学研究科 須藤健悟・Ha Thi Minh Phuc・松田涼樹・府中雄大・Hossain Mohammed Syedul Hoque・中川裕太・何彦峰・王靖凌・鎌田友美・水野光一郎

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

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

東京大学大学院理学系研究科 堀田陽香

Ulsan National Institute of Science and Technology 朴祥緒

東京都市大学環境情報学研究科 Karkour Selim

1. 研究目的

本課題では、大気中のPM2.5などの微粒子（エアロゾル）や光化学オキシダントであるオゾンのような地球の放射収支・水循環に影響を与え、その大気寿命が比較的短い大気汚染物質（特に短寿命気候強制力因子（Short-lived Climate Forcers: SLCFs）量の変化が気候および地域環境に及ぼす影響の評価を大きな目的とする。このために、全球・領域スケールを対象とした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。得られた知見は社会に発信し、SLCFs排出量を加味した緩和策検討に貢献することを目指す。また、本目的を達成するために、数値シミュレーションで用いる気候モデル（MIROC-SPRINTARS、MIROC-ESM、NICAM-Chem）の継続的な改良・検証も必要となることから、モデル改良を本課題の主目的に位置付ける。

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（2021年4月1日～2022年3月31日）

CPU 時間	v_debug	:400.76	[VE・hours]
	v_normal	:426,136.29	[VE・hours]
	計	:426,537.04	[VE・hours]

2.2 利用概要

大気海洋結合モデル MIROC とエアロゾルモデル SPRINTARS が結合した MIROC-SPRINTARS モデル、MIROC と結合した大気化学モデル CHASER (MIROC-ESM) の大気大循環モデル版および大気海洋結合版の3次元全球規模大気汚染物質輸送モデル、及び正二十面体全球大気格子モデル NICAM と SPRINTARS・CHASER が結合した大気汚染物質輸送モデル (NICAM-Chem) を用い、それぞれについて並列計算を行った。

3. 研究結果

3.1 概要

SLCFs に着目した地球温暖化に対する緩和策を検討するためには、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。そのためにも高精度の数値モデルが必要となり、数値モデルを用いた SLCFs の変化に対する気候影響評価を行う必要がある。そこで本研究では、大気海洋結合モデル MIROC-SPRINTARS を用いて、CO₂ 濃度増加時の人為起源 SO₂ 排出量の削減に対する気候影響を評価したところ、CO₂ 濃度が高い方が同量の SO₂ 排出量減少での気温上昇が大きいことが明らかとなった。これは、雪氷・海水アルベドと水蒸気フィードバックの影響が示唆される。また、領域高分解能シミュレーション可能な Diamond-NICAM を用いた、エアロゾル湿性沈着及び関連する過程に着目した全 13 通りのシミュレーションを実施し、モデル高度化に関する知見を得ることを目指した。その結果、湿性沈着の主要な過程である雲内除去式の違いは、その関連パラメータや雲降水に関わる式の違いよりも、エアロゾル時空間分布に大きな変動幅を与えることがわかった。

3.2 背景と目的

気温上昇を早急に抑制するためには、大気寿命の短い SLCFs の中でも正の放射強制力を示す物質（ブラックカーボン、対流圏オゾン等）を減らすことが必要であり、国際的にも広く認知されてきた。SLCFs に着目した緩和策を検討するためには、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。そのためにも高精度の数値モデルが必要となり、数値モデルを用いた SLCFs の変化に対する気候影響評価を行う必要がある。そこで本研究では、大気海洋結合モデル MIROC-SPRINTARS を用いて、SLCFs 中のブラックカーボンと硫酸塩エアロゾル（前駆物質は SO₂）の変化に対する気候応答を調べることを目的とした。並行して、不確実性が非常に高いエアロゾル湿性沈着過程に関するモデリング研究を行なうことで、モデル高度化に関する知見を得ることを目標とし、SLCFs を取り扱う数値モデル NICAM の高精度化を目的とした。

3.3 計算方法

3.3.1 MIROC-SPRINTARS

本研究で用いた大気海洋結合モデルは、気候モデル MIROC6 (Tatebe et al., 2019) であり、エアロゾルを計算することができる SPRINTARS モデルが結合されている。SPRINTARS は土壌粒子、海塩粒子、有機炭素エアロゾル、黒色炭素エアロゾル、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 (Takemura et al., 2000; 2002; 2005; 2009)。本シミュレーションでの水平分解能は 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。エアロゾル瞬時放射強制力は、1 シミュレーション内で計算されるエアロゾルの有無による 2 パターンに対して放射計算を実施し、この 2 パターンの差分をとることで計算される。結果で提示する標準シミュレーションと排出量を変化させた感度シミュレーションとのエアロゾル瞬時放射強制力の差は、それぞれのシミュレーションで得られたエアロゾル瞬時放射強制力の差として計算される。解析対象期間は、50 年間のスピニアップの後の 100 年間である。人為起源ブラックカーボン及び SO₂ の排出量は EDGAR-HTAP 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) に記載してある。

3.3.2 NICAM

全球雲解像モデル NICAM (e.g., Satoh et al., 2014) と結合した大気汚染物質輸送モデルである NICAM-Chem (Goto et al., 2018) を用いて、エアロゾル除去過程（特にエアロゾル雲内洗浄過程あるいは rainout）の不確実性を調べるために、2011 年 3 月福島第一原子力発電所事故に伴う放射性セシウム 137 (Cs-137) を事例にとり、領域高分解能シミュレーション可能な Diamond-NICAM (Uchida et al., 2017) で水平分解能 3km に設定し、東日本での Cs-137 エアロゾルシミュレーショ

ンを実施した (Goto and Uchida, 2022)。Diamond-NICAM に、他のエアロゾル輸送モデルで利用されている雲内除去スキームを導入すると共に、エアロゾル湿性沈着に深く関与する雲雨変換効率や雲微物理過程に関する複数のスキームを用いて、全 13 通りの設定で、Cs-137 の粒子動態に関するシミュレーションとその相互比較を実施した。Cs-137 エアロゾルは、吸湿性のある微小エアロゾルと仮定し、硫酸塩エアロゾルの除去過程に従うとした (Nakajima et al., 2017)。

実施した 13 シミュレーションのうちの 9 シミュレーションでは、4 つの異なる雲内洗浄スキーム (① GCM-Type : 単純なチューニング除去定数で決まる全球気候モデルで用いられるスキーム (Takemura et al., 2000) 、② CRM-Type : ①と同じだが、降水の予報変数化や現実的な鉛直輸送を考慮した雲解像モデルに最適化したスキーム (Goto et al., 2019) 、③ CONV-Type : 地表面降水フラックスを用いて擬一次近似の仮定で表現した伝統的なスキーム (Terada and Chino, 2005) 、④ CTM-Type : オフライン化学輸送モデル CMAQ (Byun and Schere, 2006) で用いられており、雲・降水フラックスや簡略化されたパラメータ分析アプローチを用いたスキーム) と、それぞれのスキームで用いられるチューニング変数を数パターン用いた。

さらに、雲・雨に関係する過程に注目するために、標準設定である 1 モーメントの雲微物理モジュール (Tomita, 2008) を、高度化された 2 モーメントの雲微物理モジュール (Seiki and Nakajima, 2014) に置き換えた。また、雲粒から雨粒への変換効率のスキームとして、CCN の数濃度の 1 乗に依存する Berry (1968) が標準設定として利用されるが、CCN の数濃度の 1.79 乗に依存する Khairoutdinov and Kogan (2000) を利用した。なお、これらの雲・雨モジュールに関するシミュレーションは、CRM-Type と CTM-Type のみに適用し、4 シミュレーションを追加した。

3.4 結果

3.4.1 MIROC-SPRINTARS

これまでの研究 (Takemura and Suzuki, 2019; Takemura, 2020) において、大気海洋結合モデルとしての MIROC-SPRINTARS を用いて、SLCFs であり大気汚染物質であるエアロゾル成分のブラックカーボンと硫酸塩エアロゾルに着目し、それぞれの前駆物質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てきた (図 1)。ブラックカーボンは太陽光を吸収することから正の放射強制力を持ち、ブラックカーボンが減少することで大気上端での放射強制力の正値も減少することが見込まれ、実際に図 1(a)の赤線でも予想通りの結果が得られた。一方、硫酸塩エアロゾルは太陽光を吸収せずに散乱するのみであることから、大気上端での負の放射強制力を持ち、硫酸塩エアロゾルの前駆物質である SO₂ の排出量が減少することで放射強制力の負値も減少することが見込まれ、実際に図 1(a)の青線でも予想通りの結果が得られた。これまでは大気上端での放射強制力と地上気温は線形性があると予想されていたが、本研究で得られた結果では、特にブラックカーボンに関してはこの関係性が正しくないことが明らかとなった。すなわち、図 1(b)で示すように、硫酸塩エアロゾルが減少することで大気上端での放射強制力の負値が減少し、地上気温も上昇していたが、ブラックカーボンが減少すると、大気上端での放射強制力の正値が減少するにもかかわらず、地上気温があまり変化していなかった。これは、ブラックカーボンの存在量に対して大気下層の暖まり具合が変化し、対流の起きやすさ及び雲生成具合が変化することで、ブラックカーボン削減による気温低下効果が抑制されたためである。さらに、このような関係性が、CO₂ 濃度が増えた場合にどのようなようになるのかを調べたところ、図 1(c)に示したように、硫酸塩エアロゾル増加によって気温上昇は確かめられたが、Takemura (2020) の重要な発見として、CO₂ 濃度が高い方が同量の SO₂ 排出量減少で気温上昇が大きいことが明らかとなった。この主要因を検討するために、図 2 のような CO₂ 濃度の違いによる気温変化の全球分布図を比較し、緯度に対して関連物理量である地上気温・地上放射収支・潜熱も比較した。その結果、地上気温の変化が激しい場所は極域であり、雪氷・海氷アルベドと水蒸気フィードバックの影響であることが示唆された。

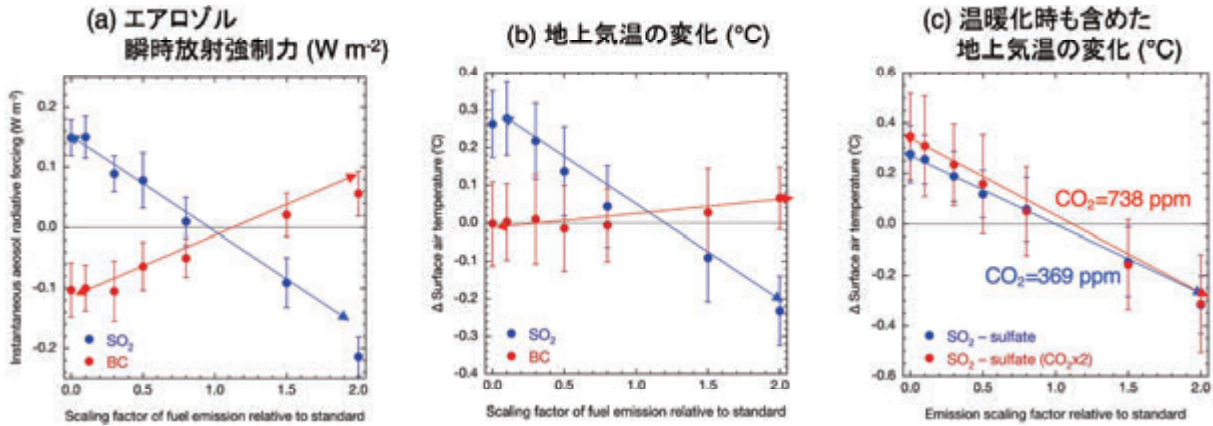


図 1. 大気海洋結合モデル MIROC-SPRINTARS による人為起源の SLCFs (BC: ブラックカーボンと SO₂: 硫酸塩エアロゾルの前駆気体) 排出量を変えてシミュレーションした(a)エアロゾル瞬時放射強制力、(b) 地上気温の変化、(c) 温暖化時 (CO₂濃度を 369 ppm と 738 ppm にした場合) も含めた地上気温の変化。横軸は人為起源排出量のスケーリング因子で、標準シミュレーションを 1 とした場合に、感度シミュレーションで設定した排出量の相対差を表す。また、(a)と(b)では、赤線がブラックカーボンを変えた結果で、青線が SO₂を変えた結果であり、(c)は全て SO₂を変えた結果であるが、CO₂濃度を 369 ppm と設定した結果は青線であり、CO₂濃度を 738 ppm と設定した結果は赤線で示してある。(a)と(b)は Takemura and Suzuki (2019)からの引用であり、(c)は Takemura (2020)からの引用である。

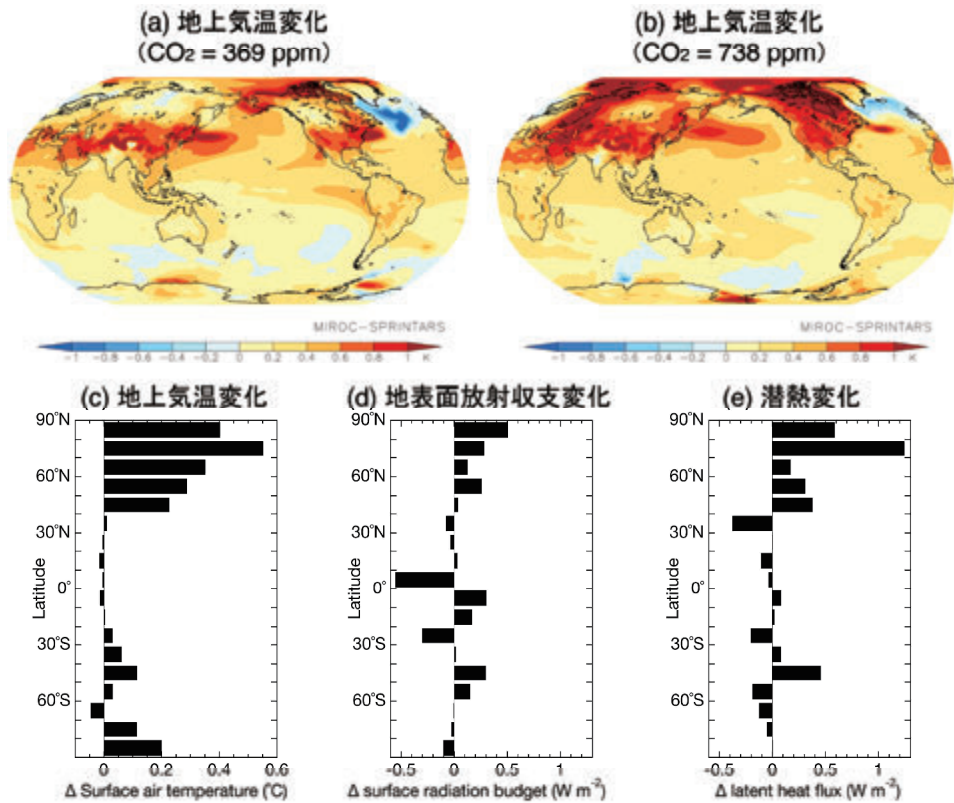


図 2. 大気海洋結合モデル MIROC-SPRINTARS を用いて、人為起源の SO₂ (硫酸塩エアロゾルの前駆気体) 排出量を 0 に削減したときの (a) 地上気温の変化、(b) 温暖化時 (CO₂濃度 738 ppm) での地上気温の変化、(c)地上気温変化に関して、温暖化時と現在気候 (CO₂濃度 369ppm) の 2 つのシミュレーションの差、つまり、(b)-(a)を帯状平均にして表したもの、(d) (c)と同じだが地表面放射収支変化、(e) (c)と同じだが潜熱変化。全ての図は Takemura (2020)からの引用である。

3.4.2 NICAM

領域高分解能シミュレーション可能な Diamond-NICAM によるエアロゾル (Cs-137) シミュレーションの結果を、観測結果 (Oura et al., 2015) と比較すると、 $\pm 30\%$ のバイアス、0.6-0.9 の相関係数、 $67-112 \text{ Bq m}^{-3}$ の不確実性 (RMSE)、 $< 40\%$ の精度 (1/10 から 10 倍の範囲に収まる値の割合) となった (図は省略)。その中でも、CRM-Type は最適な結果が得られたが、その結果を得るためにチューニング変数の下限値を用いる必要があった。GCM-Type と CONV-Type では適切なチューニング変数を設定すれば、適用可能なスキームであることもわかった。CTM-Type では相関が良く、不確実性が小さかったが、大きな負のバイアスが存在した。CTM-Type の結果から、NICAM で計算している雲粒から雨粒への変換効率が過大評価であることも示唆された。

そこで、雲・雨に関係する過程に注目し、NICAM に搭載された雲微物理モジュールや雲雨変換式を変えることで、Cs-137 の濃度場がどのように変わるのかを調べた。3 月 13 日の首都圏における高濃度 Cs-137 プリウムに関して、全 13 シミュレーションと観測結果を比較したところ、図 3 のような再現性が得られた。また、利用可能な全観測サイトにおいて、Rainout の違い、Rainout の式で用いられたパラメータの違い、及び雲微物理関係のモジュールの違いに対する Cs-137 濃度場の違いを、観測データを用いた統計指標ごとに評価した (図 4)。これらの結果から、雲微物理関係のモジュールの違いに対するエアロゾル濃度の変動幅は比較的小さく、Rainout の違いや Rainout 式のパラメータチューニングによる違いの方が、エアロゾル濃度の変動幅が大きかった。雲微物理関係のモジュールの違いに対するエアロゾル濃度の変動幅が小さかったのは、今回対象とした時空間が 3 月の東日本であるため、降水過程が微物理過程よりも力学過程によって強く支配されているからと推察される。まとめると、エアロゾルシミュレーションを改善するには雲内洗浄の定式化を現象の素過程に立ち返って精緻化することが重要であることがわかった。以上の結果は、Goto and Uchida (2022) にて公表している。

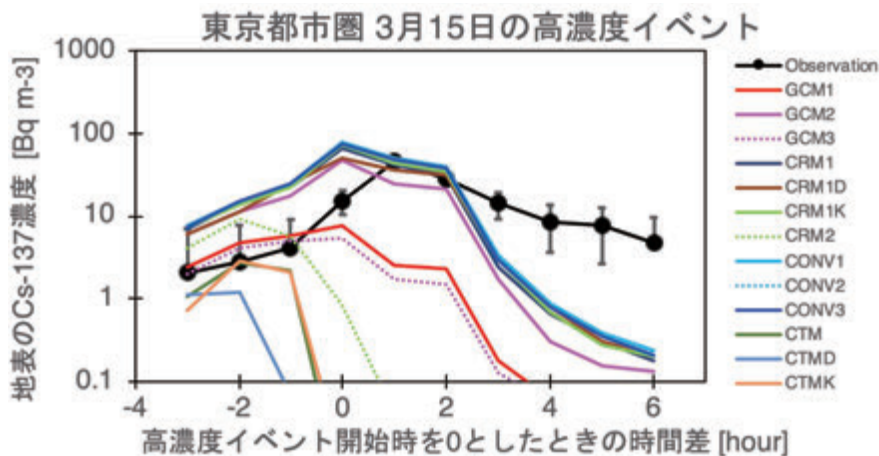


図 3. 2011 年 3 月 15 日に観測された東京都市圏での Cs-137 の高濃度事例に関して、NICAM の 13 個のシミュレーションで計算された Cs-137 濃度の時系列変化。黒線が観測結果を示し、他の線はシミュレーション結果を表す。“GCM”は GCM-Type の Rainout で、1-3 は異なるチューニング係数を設定した。“CRM”は CRM-Type の Rainout で、1 と 2 は異なるチューニング係数を設定し、“D”は標準シミュレーションとは異なる雲微物理モジュール NDW6 を利用、“K”は標準シミュレーションとは異なる雲雨変換効率の式 (Khairoutdinov and Kogan, 2000) を利用した。“CONV”は CONV-Type の Rainout で、1-3 は異なるチューニング係数を設定した。“CTM”は CTM-Type の Rainout で、1 と 2 は異なるチューニング係数を設定し、“D”は標準シミュレーションとは異なる雲微物理モジュール NDW6 を利用、“K”は標準シミュレーションとは異なる雲雨変換効率の式 (Khairoutdinov and Kogan, 2000) を利用した。この図は Goto and Uchida (2022) から引用したものを日本語にしている。

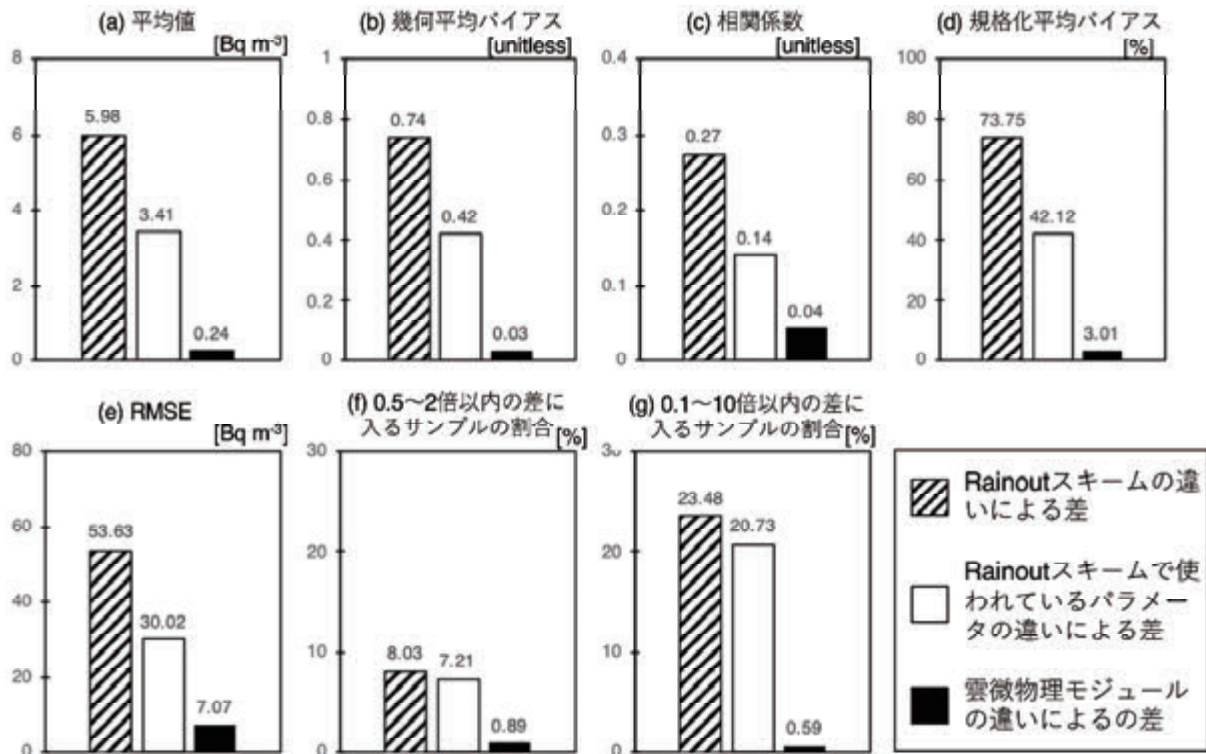


図 4. 2011 年 3 月の東日本を対象に NICAM で計算した Cs-137 と観測との統計的指標に関する不確実性。統計的指標は、(a) 平均値 [Bq m⁻³]、(b) 幾何平均バイアス、(c) 相関係数、(d) 規格化平均バイアス [%]、(e) RMSE [Bq m⁻³]、(f) 0.5 から 2 倍以内の差に入るサンプル数 [%]、(g) 0.1 から 10 倍以内の差に入るサンプル数 [%] である。不確実性はカテゴリーに分類された中での結果のばらつきで表現しており、カテゴリーは図右下の枠に書かれた 3 つとした。なお、この図は Goto and Uchida (2022) の図 11 を引用している。

参考文献

- Berry E. X. (1968), Modification of the Warm Rain Process. *Proceedings first conference on weather modification*, Albany, NY, 81–85.
- Byun D., Schere K. L. (2006), Review of the governing equations, computational algorithms, and other components of the Model-3 Community Multiscale Air Quality (CMAQ) modeling system. *Appl. Mech. Rev.*, 59, 51–77.
- Goto D., Kikuchi M., Suzuki K., Hayasaki M., Yoshida M., Nagao T.M., Choi M., Kim J., Sugimoto N., Shimizu A., Oikawa E., Nakajima T. (2019), Aerosol model evaluation using two geostationary satellites over East Asia in May 2016. *Atmos. Res.*, 217, 93–113.
- Goto D., Nakajima T., Dai T., Yashiro H., Sato Y., Suzuki K., Uchida J., et al. (2018), Multi-scale Simulations of Atmospheric Pollutants Using a Non-hydrostatic Icosahedral Atmospheric Model. In: Vadrevu K., Ohara T., Justice C. (eds) *Land-Atmospheric Research Applications in South and Southeast Asia*. Springer Remote Sensing/Photogrammetry. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-67474-2_14
- Goto D., Uchida J. (2022) Uncertainty in Aerosol Rainout Processes Through the Case of the Radioactive Materials Emitted by the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant in March 2011. *J. Meteorol. Soc. Japan*, 100(1), 197–217. <https://doi.org/10.2151/JMSJ.2022-010>
- Khairoutdinov M., Kogan Y. (2000), A new cloud physics parameterization in a large-eddy simulation model of marine stratocumulus. *Mon. Wea. Rev.*, 128, 229–243.
- Nakajima T., Misawa S., Morino Y., Tsuruta H., Goto D., Uchida J., Takemura T., Ohara T., Oura Y., Ebihara M., Satoh M. (2017), Model depiction of the atmospheric flows of radioactive cesium emitted from the

- Fukushima Daiichi Nuclear Power Station accident. *Prog. Earth Planet. Sci.*, 4, 2. <https://doi.org/10.1186/s40645-017-0117-x>
- Oura Y., Ebihara M., Tsuruta H., Nakajima T., Ohara T., Ishimoto M., et al. (2015), A database of hourly atmospheric concentrations of radiocesium (¹³⁴Cs and ¹³⁷Cs) in suspended particulate matter collected in March 2011 at 99 air pollution monitoring stations in eastern Japan. *J. Nucl. Radiochem. Sci.*, 15, 2_1–2_12.
- Satoh, M., Tomita H., Yashiro H., Miura H., Kodama C., Seiki T., Noda A., Y. 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>
- Seiki T., Nakajima T. (2014), Aerosol effects of the condensation process on a convective cloud simulation. *J. Atmos. Sci.*, 71, 833–853.
- 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](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2002)015<0333:SSAARF>2.0.CO;2)
- Takemura T., Nozawa T., Emori S., Nakajima T. Y., Nakajima T. (2005), Simulation of climate response to aerosol direct and indirect effects with aerosol transport-radiation model. *J. Geophys. Res.*, 110, D02202. <https://doi.org/10.1029/2004JD005029>
- Takemura T., Egashira M., Matsuzawa K., Ichijo H., O'ishi R., Abe-Ouchi A. (2009), A simulation of the global distribution and radiative forcing of soil dust aerosols at the Last Glacial Maximum. *Atmos. Chem. Phys.*, 9, 3061–3073. <https://doi.org/10.5194/acp-9-3061-2009>
- Takemura T., Suzuki K. (2019), Weak global warming mitigation by reducing black carbon emissions. *Sci. Rep.*, 9, 4419. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-41181-6>
- Takemura T. (2020), Return to different climate states by reducing sulphate aerosols under future CO₂ 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>
- Terada H., Chino M. (2005), Improvement of Worldwide version of System for Prediction of Environmental Emergency Dose Information (WSPEEDI), (II) Evaluation of numerical models by ¹³⁷Cs deposition due to the Chernobyl nuclear accident. *J. Nucl. Sci. Technol.*, 42, 651–660.
- Tomita H. (2008) New microphysics with five and six categories with diagnostic generation of cloud ice. *J. Meteorol. Soc. Jpn.*, 86A, 121–142. <https://doi.org/10.2151/jmsj.86A.121>
- Uchida J., Mori M., Hara M., Satoh M., Goto D., Kataoka T., Suzuki K., Nakajima T. (2017) Impact of lateral boundary errors on the simulation of clouds with a nonhydrostatic regional climate model. *Mon. Wea. Rev.*, 145, 5059–5082.

4. まとめ

大気海洋結合モデルとしての MIROC-SPRINTARS を用いて、特に CO₂ 濃度増加時での人為起源 SO₂ の排出量削減に対する気候影響を評価したところ、CO₂ 濃度が高い方が同量の SO₂ 排出量減少でも気温上昇が大きいことが明らかとなった。これは、雪氷・海氷アルベドと水蒸気フィードバックの影響が示唆される。領域高分解能シミュレーション可能な Diamond-NICAM を用いて、異なる 4 つのエアロゾル湿性沈着の雲内除去 (Rainout) 式、Rainout 式の関連パラメータのばらつき、雲降水に関わる式、を変えた全 13 通りの感度シミュレーションを実施した。その結果、湿性沈着の主要な過程である雲内除去式の違いは、その関連パラメータや雲降水に関わる式の違いよりも、エアロゾル時空間分布に大きな変動幅を与えることがわかった。

5. 今後の研究展望

環境省 S-20 プロジェクトで計画された SLCFs 関連排出量減少による感度シミュレーションを、大気海洋結合モデルである MIROC-SPRINTARS および MIROC-ESM と、全球雲解像モデル NICAM-Chem を用いて実施する。この感度シミュレーションでは、特定の地域（日本・中国・インド等の全 19 地域）・組成（SO₂, ブラックカーボン、有機炭素エアロゾル、NO_x, CO、非メタン炭化水素化合物、アンモニア、メタン）・部門（人為起源・森林火災起源）の SLCFs の排出量をゼロにして気象場変化を解析し、得られた結果は S-20 プロジェクト内での共有により他の影響評価（水循環・健康・農業）や最適緩和シナリオ作成のためにも利用する。S-20 プロジェクトの感度シミュレーションと並行して、各モデルの高度化も継続的に実施する。

6. 研究成果発表

6.1 誌上発表（査読あり）

- Fang S., Zhuang S., Goto D., Hu X., Sheng L., Huang S. (2022), Coupled modeling of in- and below-cloud wet deposition for atmospheric 137Cs transport following the Fukushima Daiichi accident using WRF-Chem: A self-consistent evaluation of 25 scheme combinations. *Environ. Int.*, 158, 106882. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.106882>
- Goto D., Uchida J. (2022), Uncertainty in Aerosol Rainout Processes Through the Case of the Radioactive Materials Emitted by the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant in March 2011. *J. Meteorol. Soc. Japan*, 100(1), 197-217. <https://doi.org/10.2151/jmsj.2022-010>
- Ha P. T. M., Matsuda R., Kanaya Y., Taketani F., Sudo K. (2021), Effects of heterogeneous reactions on tropospheric chemistry: a global simulation with the chemistry-climate model CHASER V4.0. *Geosci. Model Dev.*, 14, 3813–3841. <https://doi.org/10.5194/gmd-14-3813-2021>
- Hirota N., Michibata T., Shiogama H., Ogura T., Suzuki K. (2022), Impacts of precipitation modeling on cloud feedback in MIROC6. *Geophys. Res. Lett.*, 49, e2021GL096523. <https://doi.org/10.1029/2021GL096523>
- Michibata, T. (2022), Aerosol-Cloud Interactions in the Climate System. In: Akimoto H., Tanimoto H. (eds) *Handbook of Air Quality and Climate Change*. Springer, Singapore, 1-42. https://doi.org/10.1007/978-981-15-2527-8_35-3
- Miyazaki K., Bowman K., Sekiya T., Takigawa M., Neu J. L., Sudo K., Osterman G., Eskes H. (2021), Global tropospheric ozone responses to reduced Nox emissions linked to the COVID-19 worldwide lockdowns. *Sci. Adv.*, 7, eabf7460. <https://doi.org/10.1126/sciadv.abf7460>
- Sand M., Samset B. H., Myhre G., Gliß J., Bauer S. E., Bian H., Chin M., Checa-Garcia R., Ginoux P., Kipling Z., Kirkevåg A., Kokkola H., Sager P. L., Lund M. T., Matsui H., van Noije T., Olivie D. J. L., Remy S., Schulz M., Stier P., Stjern C. W., Takemura T., Tsigaridis K., Tsyro S. G., Watson-Parris D. (2021), Aerosol absorption in global models from AeroCom Phase III. *Atmos. Chem. Phys.*, 21, 15929–15947. <https://doi.org/10.5194/acp-21-15929-2021>
- Sekiya T., Miyazaki K., Eskes H., Sudo K., Takigawa M., Kanaya Y. (2022), A comparison of the impact of TROPOMI and OMI tropospheric NO₂ on global chemical data assimilation. *Atmos. Meas. Tech.*, 15, 1703–1728. <https://doi.org/10.5194/amt-15-1703-2022>
- Su W., Liang L., Myhre G., Thorsen T. J., Loeb N. G., Schuster G. L., Ginoux P., Paulot F., Neubauer D., Checa-Garcia R., Matsui H., Tsigaridis K., Skeie R. B., Takemura T., Bauer S. E., Schulz M. (2021), Understanding top-of-atmosphere flux bias in the AeroCom Phase III models: a clear-sky perspective. *J. Adv. Model. Earth Syst.*, 13, e2021MS002584. <https://doi.org/10.1029/2021MS002584>
- Tang T., Shindell D., Zhang Y., Voulgarakis A., Lamarque J.-F., Myhre G., Faluvegi G., Samset B., Andrews T., Olivie D., Takemura T., Lee X. (2021), Distinct surface response to black carbon aerosols. *Atmos. Chem. Phys.*, 21, 13797–13809. <https://doi.org/10.5194/acp-21-13797-2021>
- Zhao N., Dong X., Huang K., Fu J. S., Lund M. T., Sudo K., Henze D., Kucsera T., Lam Y. F., Chin M., Tilmes S. (2021), Responses of Arctic black carbon and surface temperature to multi-region emission reductions: a Hemispheric Transport of Air Pollution Phase 2 (HTAP2) ensemble modeling study. *Atmos. Chem. Phys.*, 21, 8637–8654. <https://doi.org/10.5194/acp-21-8637-2021>
- Zhao S., Suzuki K. (2021), Exploring the impacts of aerosols on ITCZ position through altering different auto-conversion schemes and cumulus parameterizations. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 126, e2021JD034803. <https://doi.org/10.1029/2021JD034803>

6.2 誌上発表（査読なし）

- 道端拓朗 (2021) 数値気候モデルと衛星観測の複合利用によるエアロゾル・雲・降水相互作用に関する研究 -2019年度山本賞受賞記念講演-. 天気, 68, 277-290.
- MIROC6 AGCM document writing team (T. Ando, T. Higuchi, H. Hotta, T. Iwakiri, T. Jinno, K. Kino, Y. Takano, M. Toda, and K. Yamazaki, M. Chikira, T. Kodama, T. Michibata, H. Miura, T. Nitta, T. Ogura, F. Saito, M. Sekiguchi, T. Suzuki, K. Suzuki, H. Tatebe, M. Watanabe, S. Watanabe, and K. Yoshimura), *UTokyo Repository*, pp. 136 (2021), Technical Report: Description of MIROC6 AGCM. <https://doi.org/10.15083/0002000180>

6.3 口頭発表

- He Y., Sudo K., Hoque H. M. S. (2021), Introducing New Lightning Schemes To A Chemistry Climate Model CHASER (MIROC). Ozone Chemistry, *Quadrennial Ozone Symposium 2021*, Online
- Michibata T. Imura Y. (2021), Revisiting an apples-to-apples comparison between model and observations using satellite simulator. *CFMIP Meeting*, Online
- Michibata T., Imura Y., Nakao H., Suzuki K. (2021), How does the treatment of precipitation in a climate model improve the representation of aerosol-cloud interactions? *Tri-MIPathlon-3 Workshop*, Online
- Michibata T., Imura Y., Nakao H., Suzuki K. (2022), Evaluation of cloud micro- and macrophysical properties in the MIROC6 with A-Train observations and COSP simulator. *EarthCARE Workshop*, Online
- Sudo K., Ha T. M. P., Andrés Hernández L., Benjamin S. (2021), Simulating HONO chemistry in a chemistry climate/transport model CHASER (MIROC). *EMeRGe zoom Workshop TEAM-5*, Online
- Sudo K., Matsuda R. (2021), A Modeling Study on the Roles of Cloud Distribution in Global Ozone Chemistry. *Quadrennial Ozone Symposium 2021*, Online
- Sudo K., Shiratsuchi H., Onishi T., Iizuka S. (2021), Can a global chemistry climate model reproduce interannual variabilities and trends of depositions of sulfate, nitrate, and ammonium preserved in the Southeastern Greenland Dome ice core? *the 16th IGAC Conference, Atmospheric Chemistry at a Distance: Real Progress through Virtual Interaction*, Online
- Suzuki K. (2022), Use of satellite observations for constraining aerosol-cloud-precipitation processes in climate models. *EarthCARE Modeling Workshop*, Online
- Suzuki K., Takahashi H., Michibata T., Bodas-Salcedo A., Guo H., Zhang H., Wang M., Goto D., Koshiro T., Jing X. (2021), Process-oriented evaluation of warm rain in multiple global models: Early results from GEWEX PROES-WR. *AGU Fall Meeting*, Online
- Suzuki K., Takahashi H., Michibata T., Goto D., Co-authors (2021), Multi-model evaluations of the warm rain process: Early results from GEWEX PROES-WR. *Aerosol-Cloud-Precipitation-Climate Workshop*, Online
- Takemura T. (2021), Simulation of aerosol-induced climate change due to emission change by region and composition using a coupled atmosphere-ocean model. *Tri-MIPathlon-3*, Online
- 井村裕紀, 道端拓朗 (2021) 全球気候モデル MIROC6 における北極域の雲・降水過程の診断. 日本気象学会関西支部 2021 年度中国地区第3 回例会, リモート開催
- 井村裕紀, 道端拓朗 (2022) 衛星シミュレータを用いた北極域の雲・降水過程の解析. エアロゾル・雲・降水の相互作用に関する研究集会, リモート開催
- 何彦峰, 須藤健悟 (2021) Introducing new lightning schemes to a chemistry climate model CHASER (MIROC). 日本地球惑星科学連合大会, リモート開催
- 竹村俊彦 (2021) エアロゾル濃度変化に伴う地上気温変化の温室効果気体濃度依存性. 日本気象学会 2021 年度春季大会, リモート開催
- 竹村俊彦 (2021) 気候モデルを用いたエアロゾルによる気候変化の定量的理解の進展. 第38 回エアロゾル科学・技術研究討論会, リモート開催
- Nakata, Y., Ito A., Sudo K. (2021), Global simulation of atmospheric methane by coupling the terrestrial ecosystem model VISIT and the global chemistry model CHASER. *iLEAPS-Japan 研究集会 2021 「大気-陸域プロセス研究の進展: 観測とモデルによる統合的理解」*
- 永島達也, 清水厚, 河野なつ美 (2021) 気候変動が日本の大気質に与える影響. 令和2 年度大気環境学会関東支部講演会『最近の気になる大気環境問題』, 同予稿集
- 永島達也, 清水厚, 河野なつ美 (2021) 気候と排出量の将来シナリオにもとづく日本の大気質将来評価. 自動車技術会 No.09-21 シンポジウム「2050 年カーボンニュートラルへの挑戦と大気質予測」

永島達也, 黒川純一 (2021) 化学輸送モデルによる日本の大気質の長期再現と過去の排出削減策の影響評価実験. 第62回大気環境学会年会, 講演要旨集, 370.

Hoque, H. M. S., Sudo K., Irie H., Sekiya T. (2021), Evaluation of the global chemistry transport model CHASER utilizing TROPOMI formaldehyde measurements. 日本地球惑星科学連合大会, リモート開催

道端拓朗 (2021) 数値気候モデル MIROC に適用する新しい雲・降水パラメタリゼーションの開発. 日本気象学会関西支部 2021 年度中国地区第3回例会, リモート開催

6.4 その他（書籍等）

該当なし。

7. 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: 029-858-2580

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

Project name:

Assessment of the impact of short-lived climate forcers on climate and regional environment

April 2020 – March 2023

Project leader:

Daisuke Goto, Regional Environment Conservation Division, National Institute for Environmental Studies

Project members:

Tatsuya Nagashima & Junya Uchida, Regional Environment Conservation Division, National Institute for Environmental Studies

Toshihiko Takemura & Ryosuke Yasui, Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University
Kengo Sudo, Ha Thi Minh Phuc, Ryoki Matsuda, Takahiro Fuchu, Hossain Mohammed Syedul Hoque, Yuta Nakagawa, Genhou Ka, Jingling Wang, Tomomi Kamata & Koichiro Mizuno, Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University

Kentaroh Suzuki, Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo

Takuro Michibata & Honoka Nakano, Faculty of Natural Science and Technology, Okayama University

Takashi Sekiya, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

Haruka Hotta, School of Science, The University of Tokyo

Sang-Seo Park, Ulsan National Institute of Science and Technology

Karkour Selim, Graduate School of Environmental and Information Studies, Tokyo City University

Abstract:

Atmospheric pollutants, especially short-lived climate forcers or SLCFs, include tiny particles (aerosols) like PM_{2.5} and oxidants, affect radiative fluxes and the water cycle on the earth, and have relatively short lifetimes in the atmosphere. The objective of this project is to evaluate the impacts of the change in SLCFs on the change in the climate and regional environment by linking it with the S-20 project of the Ministry of the Environment, Japan. This year, we performed simulations using an atmosphere-ocean coupling global model, MIROC-SPRINTARS, with reduced anthropogenic SO₂ emission fluxes under high CO₂ levels. The results showed that by reducing anthropogenic SO₂ emissions, the increase in the global surface temperature under a high CO₂ level was larger than that under the present CO₂ level. This is probably caused by a change in the snow-ice and sea-ice albedo and feedback of water vapor. In parallel, to gain knowledge about model development, we performed 13 sensitivity simulations of aerosols for different wet deposition schemes and relevant parameters and processes using a limited-area model, Diamond-NICAM. The results showed that the impacts of the difference in the rainout process of the wet deposition on the spatial and temporal distribution of aerosols were larger than those of the differences in the relevant parameters and different cloud-precipitation schemes.

Keywords:

atmospheric pollution transport model, short-lived climate forcers (SLCFs), model development

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システム領域 秋吉英治

共同研究者：国立環境研究所地球システム領域 山下陽介

国立環境研究所地球システム領域 池田恒平

国立環境研究所地球システム領域 高橋正明

要旨：

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考慮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進んでいる。

本課題ではオゾン層破壊物質や温室効果ガスの濃度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、WMO オゾンアセスメントレポート2022用のCCMI2022推奨実験のうち、オゾン層破壊物質(ODS)・温室効果ガス(GHG)濃度の将来シナリオに基づいたオゾン層と気候の将来予測実験、およびODS・GHGの将来濃度とオゾン全量、気温、極夜ジェットの変化の間の関係を解析するための500アンサンブル実験を中心に行った。

MIROC3.2化学気候モデルを使って、国際プロジェクトChemistry Climate Model Initiative(CCMI)推奨の将来予測実験を行った。入力データとして、ODS濃度、GHG濃度、赤道成層圏の東西風速(QBO)、太陽11年周期データ、成層圏硫酸エアロゾルデータ、海表面温度・海氷密接度のデータを用意し、1950年～2100年の151年間の計算を行った。使用した温室効果ガスの将来シナリオはCMIP6と同じで、SSP1-2.6、SSP2-4.5、SSP3-7.0の3つである。南半球中高緯度のオゾン全量最低値は、2000年頃の最低値から将来に向けて増加し、1980年レベルにまで回復するのは2060年を過ぎた頃であった。GHG濃度の高いシナリオほど将来のオゾン全量最低値は高くなるが、どのシナリオでも21世紀中に1960年レベルに達することはなかった。

次に、MIROC3.2化学気候モデルとMIROC5化学気候モデルを用いたODS濃度とGHG濃度を指定した500アンサンブルメンバー実験の解析を行った。一昨年に行った解析から、北半球中高緯度のオゾン全量の少ない50アンサンブルメンバーでは、オゾン全量のODS濃度依存性が明確に見られたが、今年度の解析により、そのアンサンブルメンバーでは、オゾン全量に最も影響を及ぼす下部成層圏の気温や極夜ジェット強度にもODS濃度依存性が明確に見られることがわかった。年々変動の激しい北極域では、各年の経年変化をそのまま見ていると大気的年々変動によりオゾン量のODS濃度依存性が見えにくいのが、オゾン全量の少ない年のアンサンブルメンバーを見ると、南極と同様に明確なオゾン全量のODS濃度依存性が見え、かつ気温と極夜ジェット依存性が見えた。つまり、オゾン全量の少ない年は、極渦が安定し(強く)、気温が低く、ODS濃度が増えるとオゾン全量が減少していくことが示された。オゾン量が比較的多く年々変動の激しい北半球のオゾン層にとってもODS対策は重要である。

キーワード：

化学気候モデル、MIROC、オゾン層、ODS、GHG、成層圏、フロン対策

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システム領域 秋吉英治

共同研究者：国立環境研究所地球システム領域 山下陽介

国立環境研究所地球システム領域 池田恒平

国立環境研究所地球システム領域 高橋正明

1. 研究目的

MIROC5 および MIROC6 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：

化学気候モデル、MIROC、オゾン層、ODS、GHG、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（2021年4月1日～2022年3月31日）

CPU 時間	v_debug	: 0.00 [VE・hours]
	v_normal	: 9,113.60 [VE・hours]
	計	: 9,113.60 [VE・hours]

2.2 利用概要

MIROC3.2 化学気候モデルを使った国際プロジェクト Chemistry Climate Model Initiative (CCMI) 推奨のオゾン層の将来予測実験を行った。また、MIROC3.2 化学気候モデルおよび MIROC5 化学気候モデルを用いたオゾン層破壊物質 (ODS) ・温室効果ガス (GHG) 濃度を指定した 500 アンサンブル実験の追加実験を行った。

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考慮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進んでいる。

本課題ではオゾン層破壊物質や温室効果ガスの濃度変化によるオゾン層の変動メカニズムの解明をとお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、WMO オゾンアセスメントレポート 2022 用の CCMI2022 推奨実験のうち、ODS・GHG 濃度の将来シナリオに基づいたオゾン層と気候の将来予測実験、および ODS・GHG の将来濃度とオゾン全量、気温、極夜ジェットの変化の間の関係を解析するための 500 アンサンブル実験を中心に行った。

MIROC3.2 化学気候モデルを使って、CCMI 推奨の将来予測実験を行った。入力データとして、ODS 濃度、GHG 濃度、赤道成層圏の東西風速 (QBO)、太陽 11 年周期データ、成層圏硫酸エアロゾルデータ、海表面温度・海氷密接度のデータを用意し、1950 年–2100 年の 151 年間の計算を行った。使用した温室効果ガスの将来シナリオは CMIP6 と同じで、SSP1-2.6、SSP2-4.5、SSP3-7.0 の 3 つである。南半球中高緯度のオゾン全量最低値は、2000 年頃の最低値から将来に向けて増加し、1980 年レベルにまで回復するのは 2060 年を過ぎた頃であった。GHG 濃度の高いシナリオほど将来のオゾン全量最低値は高くなるが、どのシナリオでも 21 世紀中に 1960 年レベルに達することはなかった。今後、他の緯度帯での解析も進める。

MIROC3.2 化学気候モデルと MIROC5 化学気候モデルを用いた ODS 濃度と GHG 濃度を指定した 500 アンサンブルメンバー実験の解析を行った。一昨年に行った解析から、北半球中高緯度のオゾン全量の少ない 50 アンサンブルメンバーでは、オゾン全量の ODS 濃度依存性が明確に見られたが、今年度の解析により、そのアンサンブルメンバーでは、オゾン全量に最も影響を及ぼす下部成層圏の気温や極夜ジェット強度にも ODS 濃度依存性が明確に見られることがわかった。年々変動の激しい北極域では、各年の経年変化をそのまま見ていると大気の変動によりオゾン量の ODS 濃度依存性が見えにくい、アンサンブル集団からオゾン全量の少ない年のアンサンブルメンバーを抽出すると、南極と同様に明確なオゾン全量の ODS 濃度依存性が見え、かつ気温と極夜ジェット依存性が見えた。

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, 2008¹⁾; Son et al., 2010²⁾)、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, 2002³⁾) 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、CO₂ 濃度を工業化以前に比べて 4 倍増加させた実験 (4×CO₂ 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 CO₂ 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., 2015⁴⁾)。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 CCSRNIES 大気大循環モデルや MIROC モデルに大気化学過程を導入して化学気候モデルを開発し、オゾン層の将来予測を行い、UNEP/WMO オゾンアセスメントレポートや国際プロジェクト Chemistry Climate Model Validation (CCMVal) およびその後継の Chemistry Climate Model Initiative (CCMI) に貢献してきた。^{5),6),7),8),9)} ただし、これらの国際研究活動に使われた国環研の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。

3.3 計算方法

3.3.1 海洋オフラインMIROC3.2化学気候モデルを用いたオゾン層と気候の将来予測実験 (CCMI2022推奨実験、実験名REF-D2)

オゾン層の将来予測実験を行った国環研のモデルはMIROC3.2化学気候モデルで、CCSRNIES-MIROC32という名称でCCMIに登録されている。

将来予測実験を行うための入力データとして、ODS濃度、GHG濃度、赤道成層圏の東西風速（QBO）、太陽11年周期データ、成層圏硫酸エアロゾルデータ、海表面温度・海水密接度のデータが用意された。以下、それぞれについて説明する。

(1) ODS濃度

WMO2018の全球平均の地表面濃度データを使用する。WMO2018のデータは1955年–2100年の期間であるが、過去に遡って1949年、未来に延長して2101年まで外挿したデータがCCMIより配布された。MIROC3.2化学気候モデルでは、 CCl_4 、CFC11、CFC12、CFC113、HCFC22、 CH_3CCl_3 、 CH_3Cl 、 CH_3Br 、Halon1211、Halon1301のデータを使う。また、観測との対応から、成層圏でのBry濃度を6 ppmvほど増加させるため、 CHBr_3 と CH_2Br_2 の地表面濃度をそれぞれ1.2 pptvに設定した。これらは各年1月1日のデータ（1年ごとのデータ）であるが、モデルの時間分解能に応じて時間に関して線形内挿される。

(2) GHG濃度

CO_2 、 CH_4 、 N_2O の全球平均濃度はCMIP6で使われているシナリオを使う。2014年まではCMIP6 historical database¹⁰⁾を、それ以降2015年–2100年まではSSP2-4.5シナリオ¹¹⁾を使う。 CO_2 は全高度において地表濃度と同じ値に設定する。 CH_4 と N_2O は地表面濃度として与える。ODSと同様、これらは1年ごとのデータであるが、モデルの時間分解能に応じて時間に関して線形内挿される。GHG濃度に関する感度実験として、2015年–2100年の期間をSSP1-2.6シナリオに代えた実験およびSSP3-7.0シナリオに代えた実験を1つずつ行う。

(3) 赤道成層圏の東西風速（QBO）

CCMIより配布された将来部分も含まれたQBOデータは以下のようにして作成されている。2019年2月までは3地点での観測データを元に作成された月平均のデータ¹²⁾：Canton Island（2.46°S, 171.43°W；1953年1月–1967年8月）、Gan/Maledives（0.41°S, 73.09°E；1967年9月–1975年12月）、Singapore（1.22°N, 103.55°E；1976年1月–2019年2月）。2019年3月以降は、1978年–2011年のデータをそのまま使って継ぎ足して2053年初期までつなぎ、その後さらに1963年–2010年のデータを継ぎ足して2100年までのデータが作成された。継ぎ目となる2019年と2053年では風速の時間–高度断面が滑らかに繋がっている。

(4) 太陽放射

2019年まではSOLARIS-HEPPA プロジェクトによるCMIP6用の観測に基づく太陽放射照度（irradiance）のスペクトルデータ、その後2100年まではCMIP6用の将来用太陽照度スペクトルデータ¹³⁾（version 3.2）を用いる。1850年–2299年の期間に対してこのように合成して作成されたCMIP6用のデータを、REF-D2計算用に必要な期間（1950年–2100年）に対して、CCSRNIES-MIROC32 CCMの放射スキームのスペクトル分割（32個の放射スペクトル）に合わせて内挿し、時間分解能1日のCCM用データを作成した。

(5) 成層圏硫酸エアロゾル

成層圏硫酸エアロゾルデータには、モデルの放射計算に関係する放射特性データと、不均一化学反応に関係する表面積データとがある。

(5-1) 放射特性データ

硫酸エアロゾルの消散断面積（extinction cross section）、単一散乱アルベド（single scattering albedo）、非対称性因子（asymmetric factor）の月平均・経度平均データ（緯度87.5°S–87.5°N、緯度分解能 5°；高度5 km–39.5 km、高度分解能 500 m）を、CCSRNIES-MIROC32 CCMの32放射スペクトル帯に合わせて内挿したものをCCMIから提供された。それをCCMの高度・緯度グリッドに内挿した。

(5-2) 表面積データ

月平均・経度平均データ（緯度87.5°S–87.5°N、緯度分解能 5°；高度5 km–39.5 km、高度分解能 500 m）が提供された。それをCCMの高度・緯度グリッドに内挿した。

これらのデータは、過去再現実験（REF-D1）用の、観測に基づいたデータである。将来用データは、CCMIからの指示に従って以下のように作成した。

- ・2014年12月まではREF-D1用のデータと同じ。
- ・2025年以降は、1850年–2014年の各月の月平均値を繰り返すようにデータ作成。
- ・2015年1月–2024年12月までの期間は、2014年の月平均値と2025年の月平均値の間で、年に関して線形補間し前後の期間を滑らかに繋ぐ。

(6) 海表面温度・海氷密度度

MIROC6大気海洋結合モデルによるCMIP6実験のアウトプットデータを用いる。SSP1-2.6、SSP2-4.5、SSP3-7.0シナリオによる実験の中から、1アンサンブルメンバーのデータを使用した。

REF-D2計算では1950年–2100年の151年積分を行った。最初の10年間はスピニアップ期間として解析には用いない。解析には1960年以降の出力データを使用した。

3.3.2 MIROC3.2 化学気候モデルおよび MIROC5 化学気候モデルを用いた ODS・GHG 濃度とオゾン全量、気温、極夜ジェットの変化の間の関係の解析（500 アンサンブル実験）

一昨年度は、春季極域のオゾン全量のODS濃度およびGHG濃度依存性を、500アンサンブルメンバー平均、オゾン全量の少ない50アンサンブルメンバー平均、オゾン全量の多い50アンサンブルメンバー平均、の3つのグループに分類し解析した。これは、北極渦の激しい年々変動の下ではODS濃度依存性やGHG濃度依存性が見えにくいことを考慮し、オゾン全量の少ない年（アンサンブルメンバー）は北極渦が比較的安定している、および、オゾン全量の多い年（アンサンブルメンバー）は北極渦が不安定である、という仮定に基づいた分類であった。今年度は、これらの分類の根拠となるオゾン全量と極域下部成層圏気温、極夜ジェット強度との関係や、極域下部成層圏気温と極夜ジェット強度のODS濃度およびGHG濃度依存性を調べた。

3.4 結果**3.4.1 海洋オフライン MIROC3.2 化学気候モデルを用いたオゾン層と気候の将来予測実験**

図1に、REF-D2 実験による45°S–90°Sの領域、9月–11月の期間におけるオゾン全量最低値の1960年から2100年の期間における経年変化を示す。この結果から、将来に向けてオゾン全量は回復に向かうことがわかる。南極域ではSSP2-4.5シナリオ（赤）ではオゾン全量最低値が1980年レベルにまで回復するのは2060年を過ぎた頃であるが、1960年レベルには今世紀末になっても達しないことがわかる。温室効果ガスの放出が少ないSSP1-2.6シナリオ実験では回復はさらに遅くなり、一方、温室効果ガスの放出が多いSSP3-7.0シナリオ実験では回復が早くなる。北半球では子午面循環が強いのでこれよりも回復が早まることが予想される。

CCMIで行われた各研究機関の計算結果は、英国の Centre for Environmental Data Analysis (CEDA) に保存されており (https://blogs.reading.ac.uk/ccmi/ccmi-2022_archive/)、登録を行えば利用することができる。

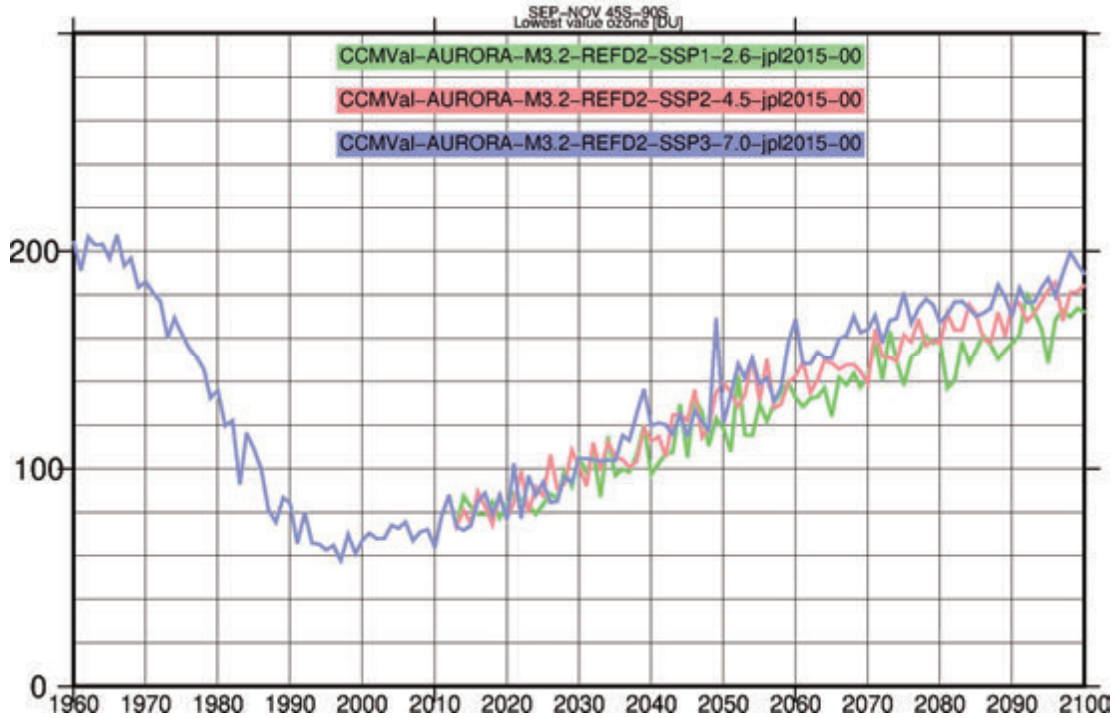


図 1. CCM2022 推奨の将来予測実験 REF-D2 およびその感度実験による 45–90°S の領域で 9 月–11 月の期間のオゾン全量最低値の経年変化。縦軸はオゾン全量で単位はドブソンユニット、横軸は年を表す。(赤) REF-D2 実験。GHG シナリオは SSP2-4.5。(緑) REF-D2 の感度実験。GHG シナリオは SSP1-2.6。(紫) REF-D2 の感度実験。GHG シナリオは SSP3-7.0。ODS シナリオはすべて WMO-2018 を使用している。

3.4.2 MIROC3.2 化学気候モデルおよび MIROC5 化学気候モデルを用いた ODS・GHG 濃度とオゾン全量、気温、極夜ジェットの変化の間の関係の解析 (500 アンサンブル実験)

一昨年度の報告書¹⁴⁾で、中高緯度オゾン全量の ODS・GHG 濃度依存性を示した。それによれば、北半球中高緯度 (45–90°N) では、オゾン全量の多い 50 アンサンブルメンバーではそのオゾン全量の ODS 濃度依存性は小さいが、オゾン全量の少ない 50 アンサンブルメンバーでは明確な依存性が確認できた。理由は、オゾン全量の少ないアンサンブルメンバーでは、極渦が強く気温が低いので、ODS 濃度が大きいほど極成層圏雲 (PSC) を介したオゾン破壊が進むことにより、明確なオゾン量の減少が生じたと考えられる。

今年度は、気温や極渦との関係を明らかにするため、これらの量の ODS 濃度・GHG 濃度依存性の解析を行ったのでその結果を示す。図 2 には、3 月の北極域下部成層圏気温 (63–90°N, 50 hPa) および極夜ジェット強度 (60–70°N, 50 hPa) の ODS 濃度・GHG 濃度依存性を示す。オゾン全量の ODS 濃度依存性と同様に、オゾン全量の少ない 50 アンサンブルメンバーの ODS 濃度依存性が明確に表れている。すなわち、将来に向けて ODS 濃度が減少すると (図で左方向)、気温が上昇して極夜ジェットは弱くなる。GHG 濃度が増加すると (図で上方向)、極夜ジェットが弱くなる。これらの特徴は MIROC3.2 化学気候モデルと MIROC5 化学気候モデルに共通に見られる。また、GHG 濃度の増加によって、MIROC5 化学気候モデルでは気温の上昇が見られるが、MIROC3.2 化学気候モデルではその影響はほんのわずかしか見られない。

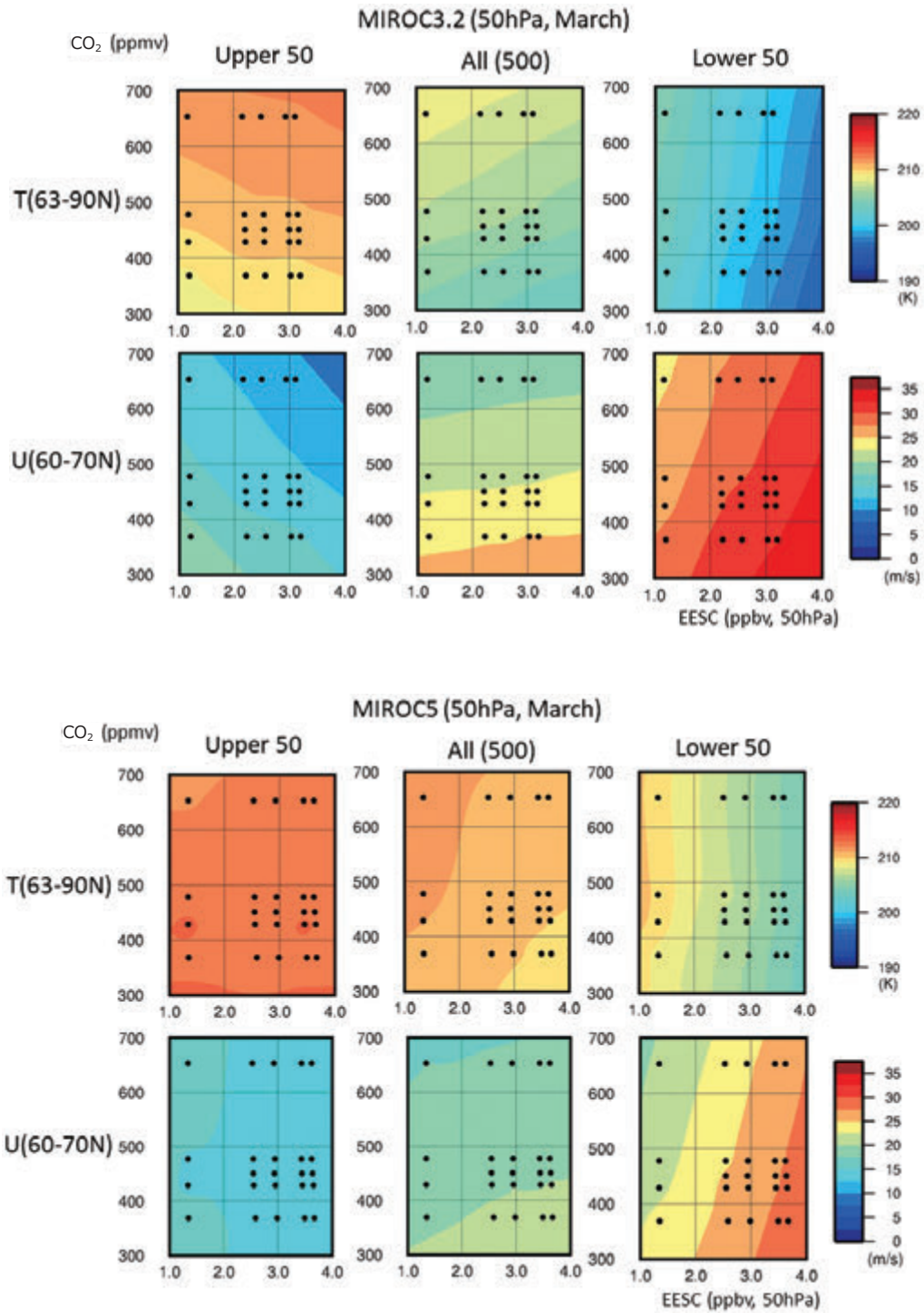


図 2. MIROC3.2 化学気候モデル（上）MIROC5 化学気候モデル（下）による、3月の北極域下部成層圏気温（63–90°N, 50 hPa）および極夜ジェット（60–70°N, 50 hPa）の ODS 濃度および GHG 濃度依存性（500 アンサンブルメンバー平均）。色で気温と西風風速を表す。縦軸は CO₂ 濃度（ppmv）、横軸は 45–90°N、3月–5月平均の等価実効成層圏塩素濃度（EESC、ppbv）。黒丸で、ODS 濃度と GHG 濃度を指定した 29 ケースの実験の EESC 濃度と CO₂ 濃度を表す。

以上では、中高緯度の下部成層圏だけを見てきたので、次に子午面全体で東西風速分布のODS濃度およびGHG濃度依存性を見る。ただし、29ケースのすべての実験について結果を一覧として示すことは難しいので、一例として、ODS濃度が1995年レベル（ほぼ最大、成層圏では1995年-2000年頃のレベル）、GHG濃度が2000年レベルに設定した場合の東西風速分布から、ODS濃度が1960年レベルに減少、GHG濃度が2095年レベルに増加した場合との差を示すことにする。図3は、3月のオゾン全量の少ない50アンサンブルメンバー平均の東西風速とその変化を示す。北半球のみ（春季）を見ると、1段目の図より、将来期待されるODS濃度の減少により、北半球高緯度の極夜ジェットが弱くなることがわかる。また、2段目の図より、将来期待されるGHG濃度の増加により、北半球高緯度の極夜ジェットは少し弱くなる一方、亜熱帯ジェットは強化されていることがわかる。3段目の図より、ODS濃度が減少し、GHG濃度が増加した場合は、上の2つの効果が合わさった変化となっている。図2で示された東西風速の60°N, 50 hPaの変化は図3の極域成層圏全体での変化と整合的である。

以上の結果から、北半球中高緯度のオゾン全量の少ない50アンサンブルメンバーでは、オゾン全量のODS濃度依存性が明確に見られ、それに伴って、オゾン全量に最も影響を及ぼす下部成層圏の気温や極夜ジェット強度にもODS濃度依存性が明確に見られることがわかった。

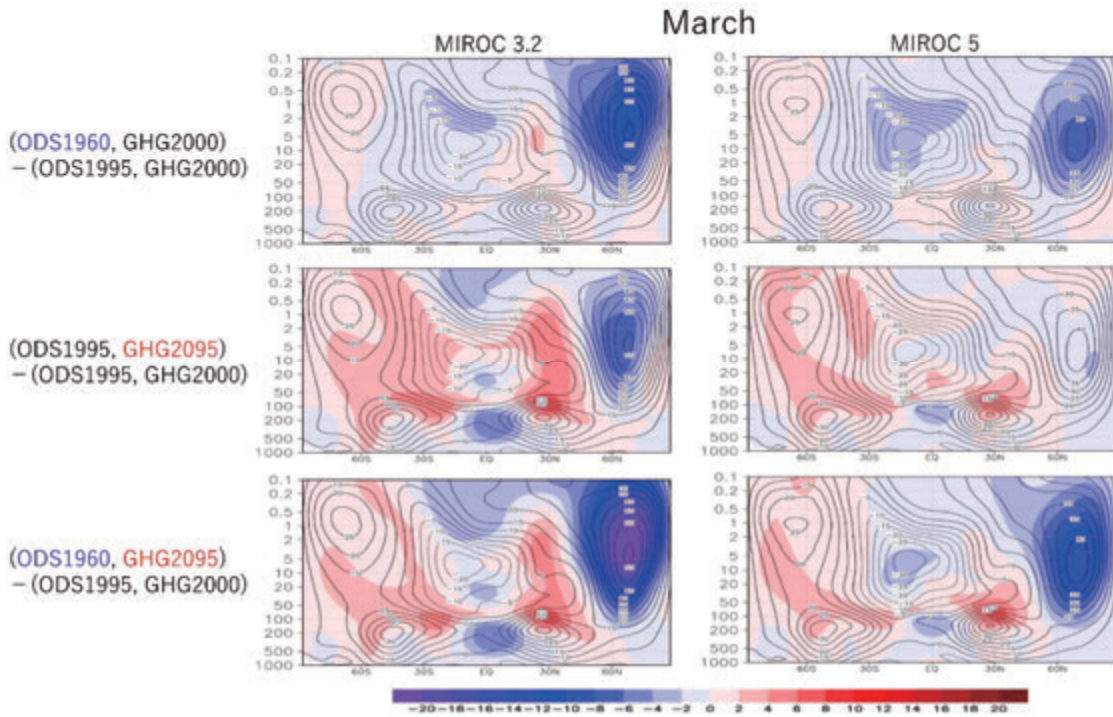


図3. MIROC3.2 化学気候モデル (左) MIROC5 化学気候モデル (右) による、将来期待される ODS 濃度および GHG 濃度の変化に伴う 3 月の東西風速の変化の子午面分布 (オゾン全量最低値の低い 50 アンサンブルメンバー平均)。一段目: ODS 濃度が 1995 年レベル (ほぼ最大) から 1960 年レベルに減少した時の変化。二段目: GHG 濃度が 2000 年レベルから RCP6.0 シナリオの 2095 年レベルに増加した時の変化。三段目: ODS 濃度が 1995 年レベル→1960 年レベルかつ GHG 濃度が 2000 年レベル→2095 年レベルに変化したときの変化。青色が西風減速 (東風加速)、赤色が西風加速 (東風減速) を表す。等値線は ODS 濃度を 1995 年レベル、GHG 濃度を 2000 年レベルに設定した実験の東西風速分布を表す。

参考文献

- 1) Son, S.-W., L. M. Polvani, D. W. Waugh, H. Akiyoshi, R. Garcia, D. Kinnison, S. Pawson, E. Rozanov, T. G. Shepherd, and K. Shibata (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. and S. Solomon (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) Meinshausen et al. (2017), Historical greenhouse gas concentrations for climate modelling (CMIP6). *Geosci. Model Dev.*, 10, 2057–2116. <https://doi.org/10.5194/gmd-10-2057-2017>
- 11) Meinshausen et al. (2020), The shared socio-economic pathway (SSP) greenhouse gas concentrations and their extensions to 2500. *Geosci. Model Dev.*, 13, 3571–3605. <https://doi.org/10.5194/gmd-13-3571-2020>
- 12) Naujokat, B. (1986), An update of the observed quasi-biennial oscillation of the stratospheric winds over the tropics. *J. Atmos. Sci.*, 43, 1873-1877. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1986\)043<1873:AUOTOQ>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1986)043<1873:AUOTOQ>2.0.CO;2)
- 13) Matthes, K. et al. (2017), Solar forcing for CMIP6 (v3.2). *Geosci. Model Dev.*, 10, 2247–2302. <https://doi.org/10.5194/gmd-10-2247-2017>
- 14) NIES Supercomputer Annual Report 2019 (2020), *CGER-REPORT*, ISSN 1341-4356, CGER-I151-2020. <https://www.cger.nies.go.jp/publications/report/i151/>

4. まとめ

海洋オフラインのMIROC3.2化学気候モデルを使って、CCMI推奨の将来予測実験を行った。入力データとして、ODS濃度、GHG濃度、赤道成層圏の東西風速(QBO)、太陽11年周期データ、成層圏硫酸エアロゾルデータ、海表面温度・海氷密接度のデータを用意し、1950年–2100年の151年間の計算を行った。使用した温室効果ガスの将来シナリオはCMIP6と同じで、SSP1-2.6、SSP2-4.5、SSP3-7.0の3つである。南半球中高緯度のオゾン全量最低値は、2000年頃の最低値から将来に向けて増加し、GHG濃度の高いシナリオほど将来のオゾン全量最低値は高くなるが、21世紀中に1960年レベルに達することはなかった。なお、南極でオゾンホールが発生する直前の1980年レベルにまで回復するのは2060年を過ぎた頃であった。

海洋オフラインのMIROC3.2化学気候モデルとMIROC5化学気候モデルを用いたODS濃度とGHG濃度を指定した500アンサンブルメンバー実験の解析を行った。一昨年に行った解析から、北半球中高緯度のオゾン全量の少ない50アンサンブルメンバーでは、オゾン全量のODS濃度依存性が明確に見られたが、今年度の解析により、そのアンサンブルメンバーでは、オゾン全量に最も影響を及ぼす下部成層圏の気温や極夜ジェット強度にもODS濃度依存性が明確に見られることがわかった。年々変動の激しい北極域では、各年の経年変化をそのまま見ていると大気的年々変動によりオゾン量のODS濃度依存性が見えにくいのが、オゾン全量の少ない年のアンサンブルメンバーを見ると、南極と同様に明確なオゾン全量のODS濃度依存性が見え、かつ気温と極夜ジェット依存性が見える。つまり、北極域でオゾン全量の少ない年は、極渦が安定し(強く)、気温が低く、ODS濃度が増えるとオゾン全量が減少していくことが示された。年々変動の激しい北半球のオゾンにとってもODS対策を今後も続けていく必要がある。

5. 今後の研究展望

海洋結合化学気候モデルを用いた CCM1 推奨の将来予測実験を行い、海洋オフラインの結果と比較して、オゾン層変動と気候変動との関係、海洋の役割について理解を深める。

6. 研究成果発表

6.1 誌上発表（査読あり）

Kusano, K., K. Ichimoto, M. Ishii, Y. Miyoshi, S. Yoden, H. Akiyoshi, A. Asai, Y. Ebihara, H. Fujiwara, T. Goto, Y. Hanaoka, H. Hayakawa, K. Hosokawa, H. Hotta, K. Hozumi, S. Imada, K. Iwai, T. Iyemori, H. Jin, R. Kataoka, Y. Katoh, T. Kikuchi, Y. Kubo, S. Kurita, H. Matsumoto, T. Mitani, H. Miyahara, Y. Miyoshi, T. Nagatsuma, A. Nakamizo, S. Nakamura, H. Nakata, N. Nishizuka, Y. Otsuka, S. Saito, S. Saito, T. Sakurai, T. Sato, T. Shimizu, H. Shinagawa, K. Shiokawa, D. Shiota, T. Takashima, C. Tao, S. Toriumi, S. Ueno, K. Watanabe, S. Watari, S. Yashiro, K. Yoshida and A. Yoshikawa (2021), PSTEP: project for solar-terrestrial environment prediction, *Earth, Planets and Space*. 73:159(1-29). <https://doi.org/10.1186/s40623-021-01486-1>

Dupuy, E., *H. Akiyoshi, and Y. Yamashita (2021), Impact of unmitigated HFC emissions on stratospheric ozone at the end of the 21st century as simulated by chemistry-climate models. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 126, e2021JD035307. <https://doi.org/10.1029/2021JD035307> (*Corresponding Author)

6.2 誌上発表（査読なし）

なし。

6.3 口頭発表

Dupuy, E., H. Akiyoshi, Y. Yamashita (2021), Impact of unmitigated HFC emissions on stratospheric ozone at the end of the 21st century as simulated by chemistry-climate models. Quadrennial Ozone Symposium 2021, 3-9 October 2021 (Poster, 5 October), Seoul, Korea (online meeting)

Yamashita, Y., H. Akiyoshi, M. Takahashi (2021), Analysis of Arctic spring ozone anomaly in the phases of QBO and 11-Year solar cycle for 1979-2017. Quadrennial Ozone Symposium 2021, 3-9 October 2021 (Poster, 3 October), Seoul, Korea (online meeting)

Hasebe, F., S. Kodera, H. Akiyoshi (2021), Insights into the linear relationship between extratropical eddy heat flux and polar ozone build-up. Quadrennial Ozone Symposium 2021, 3-9 October 2021 (Poster, 3 October), Seoul, Korea (online meeting)

Nakamura, H., T. Hirooka, H. Akiyoshi, T. Sugita, A. Mizuno (2021), A CCM forecast experiments of the ozone reduction event over the southern tip of south America in November 2009 using ozone assimilated initial data. Quadrennial Ozone Symposium 2021, 3-9 October 2021 (Poster, 3 October), Seoul, Korea (online meeting)

Murata, I., Y. Tomikawa, I. Morino, H. Nakajima, H. Akiyoshi, T. Nagahama (2021), Short-term variations of HCl and HF trends observed with FTIR at Tsukuba and Rikubetsu, Japan. Quadrennial Ozone Symposium 2021, 3-9 October 2021 (Poster, 5 October), Seoul, Korea (online meeting)

中村東奈, 廣岡俊彦, 秋吉英治 (2021) オゾンと同化した初期値を用いた化学気候モデルによる春季南半球オゾン場および力学場の予測可能性について. 異常気象研究会2021・第9回観測システム・予測可能性研究連絡会, 2021年11月25日, 京都大学防災研究所

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春季大会, 2022年5月18日-21日(オンラインポスター発表コアタイム2022年5月20日), 東京(気象庁, ハイブリッド), ID:MC-11(P4L), 同予稿集 p.105

秋吉英治, Eric Dupuy, 山下陽介 (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、千葉(幕張メッセ国際会議場 + オンライン), 2022年5月22日-6月3日(オンラインポスター発表2022年6月3日), AAS10-P05

6.4 その他（書籍等）

なし。

7. 連絡先

秋吉英治

〒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: 029-850-2393 Fax: 029-850-4732

E-mail: hakiyosi@nies.go.jp

Project name:

A study on ozone layer change and its effect on climate change using atmosphere-ocean coupled chemistry-climate models

April 2020 – March 2023

Project leader:

Hideharu Akiyoshi, Earth System Division, National Institute for Environmental Studies

Project members:

Yousuke Yamashita, Earth System Division, National Institute for Environmental Studies

Kohei Ikeda, Earth System Division, National Institute for Environmental Studies

Masaaki Takahashi, Earth System Division, National Institute for Environmental Studies

Abstract:

Previous research found that westerly winds in the Arctic spring stratosphere are strengthened by an ozone hole and the influence extends to the troposphere. This suggests the importance of ozone change for the surface climate. Also, research on the relationship between global warming and changes in the ozone layer has recently become more active.

The objective of this project is to contribute to measures for curbing chlorofluorocarbons (CFCs) and global warming through understanding the mechanism of the ozone layer change caused by changes in the concentrations of ozone-depleting substances (ODSs) and greenhouse gases (GHGs). For this purpose, this year, we performed numerical projections of the ozone layer and climate for the future proposed by the Chemistry Climate Model Initiative (CCMI), using ocean off-line chemistry-climate models (CCMs) constructed based on the MIROC3.2 general circulation model. We also advanced the analysis of 500-ensemble-member simulations with the ODS and GHG concentrations fixed to the values expected in the future.

To perform numerical projections of the ozone layer and climate for the future, we prepared the input data: ODS and GHG concentrations at the surface, stratospheric zonal wind over the equator, solar spectrum, radiation parameters and the surface area of stratospheric sulfuric acid, sea surface temperature, and sea ice density. These data included future projection data as well as past observational data. For example, the GHG data for the future were taken from the SSP1-2.6, SSP2-4.5, and SSP3-7.0 scenarios for CMIP6. We performed a model calculation for 151 years from 1950 to 2100. The minimum total ozone between 45°S and 90°S for September–November showed an increase from the minimum around the year 2000 to the future. The minimum total ozone reached the 1980 level around the year 2060, however, it did not reach the 1960 level by the end of this century, even when the highest GHG concentration scenario (SSP3-7.0) was used.

We also performed analyses of the Arctic lower stratospheric temperature and polar-night jet strength and investigated the relationship between these quantities and the total ozone amount. The analyses showed that for the ensemble members with low total ozone, the Arctic lower stratospheric temperature became lower and the Arctic polar-night jet became stronger as ODS concentrations increased. This behavior is different from that for the 500-ensemble-member mean but similar to that for the Antarctic. The results suggest that ODS regulation is important for recovery from ozone depletion not only in the Antarctic but also at the mid- and high latitudes in the Northern Hemisphere, where the year-to-year variation of the polar vortex is large, causing a large year-to-year variation in the ozone amount and hence masking the ODS dependence of ozone.

Keywords:

chemistry-climate model, MIROC, ozone layer, ODS, GHG, stratosphere, CFC regulation

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システム領域 横島徳太
共同研究者：国立環境研究所地球システム領域 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

要旨：

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の高度化を行うと同時に、これらの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。開発した様々なモデルを利用して、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い、気候変動対策の有効性を検討する。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」、文部科学省統合的気候モデル高度化研究プログラム「炭素循環・気候感度・ティッピングエレメント等の解明」などの研究プロジェクトに貢献することを目標とする。令和3年度には、MIROC-INTEG-LANDによって過去および将来のシミュレーションを行い、将来の社会経済と気候の変化が、水資源・生態系・作物生産・土地利用に与える複合的な影響と、地球-人間システムの相互作用に関する分析を行なった。また、将来の気候変動による干ばつの変化に関する分析を行い、過去最大を継続的に超える時期に関する分析を行なった。これと並行して、MIROC-INTEG-ESの開発を進めた。

キーワード：
気候変動、モデル統合化、リスク管理

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システム領域 横島徳太

共同研究者：国立環境研究所地球システム領域 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」および文部科学省統合的気候モデル高度化研究プログラム「炭素循環・気候感度・ティッピングエレメント等の解明」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、モデル統合化、リスク管理

2. スーパーコンピュータ利用実績

2.1 計算機利用時間（2021年4月1日～2022年3月31日）

CPU 時間 v_debug : 903.46 [VE・hours]

v_normal : 27,023.05 [VE・hours]

計 : 27,926.51 [VE・hours]

2.2 利用概要

研究参加者が開発している陸域モデル（陸面モデル MATSIRO、水資源モデル HiGWMAT、作物モデル PRYSBI2、陸域生態系モデル VISIT、土地利用モデル TeLMO など）および陸域統合モデル 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。特に令和3年度は、MIROC-INTEG-LAND を利用して、様々な社会経済シナリオ（Shared Socio-economic Pathways, SSP）および気候シナリオ（Representative Concentration Pathways, RCP）の下で、地球システムにおいて陸面物理・水資源・作物・陸域生態系・土地利用が果たす役割を分析するための実験を行った。また、MIROC-INTEG-LAND を利用して将来の水資源予測実験を行い、過去最大の干ばつを継続して超える時期に関する分析を行なった。陸域モデルおよび陸域統合モデルの計算は主としてスカラー機を利用して計算を行った。さらに、陸域統合モデルに対

して、大気・海洋の気候状態と物質循環過程を結合させた地球システム統合モデル MIROC-INTEG-ES の開発を行い、MIROC-INTEG-ES は、ベクトル機を利用した計算を行った。

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、これによる過去再現および将来予測実験を行なった。将来予測実験においては、複数の社会経済・気候シナリオを利用した。モデルシミュレーションによって得られた結果を、分野横断影響評価研究プロジェクト (Inter-Sectoral Model Inter-comparison Project, ISIMIP) に提出し、さらに ISIMIP で得られた複数のモデル結果と合わせて利用し、水文干ばつの将来予測に関する分析を行った。さらに、陸域統合モデル MIROC-INTEG-LAND に大気-海洋での気候状態と物質循環過程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) の開発を行った。

3.2 背景と目的

将来の気候変動は自然生態系や人間社会に大きな影響を与える。気候変動によって影響を受ける部門は非常に幅広く、ある部門への影響が別の部門への影響を引き起こすといった「影響の連鎖」が存在する。さらに、気候変動によって自然生態系や人間活動に生じた影響が、地球システムにおける炭素循環や放射収支に影響を与えることを通して、さらに気候変動を加速させる「フィードバック作用」が存在することが指摘されている。気候変動に対応するための効果的な方策を立案するためには、気候変動によって生じる様々な影響について明らかにすると同時に、気候変動に対する緩和・適応策の有効性を評価することが重要である。このため私たちは、陸域における物理過程・水資源・陸域生態系・作物成長・土地利用を記述するモデルと、これらを結合した陸域統合モデル MIROC-INTEG-LAND、さらに大気・海洋過程を結合した地球システム統合モデル MIROC-INTEG-ES を開発し、様々な境界条件のもとで将来予測のシミュレーションを行う。

今年度は、MIROC-INTEG-LAND による将来シミュレーションに加えて、分野横断影響評価研究プロジェクト ISIMIP によって得られたマルチモデル・マルチシナリオデータセットを用い、気候変動下における干ばつの将来変化に関する研究を進めた。本研究は特に、地球温暖化に伴う干ばつの激化により“これまでの異常が常態化してしまうのはいつ頃か”という問いに定量的な知見を示すことを目的とする。これまでの水資源インフラやその運用は過去の水文統計や経験に基づくため、危惧される干ばつの深刻化や水文レジームの変化に社会が対応するためには、そのような時期の把握は重要課題である。気温や降水に関しては“気候変動の影響が表面化する時期 (ToE: Time of Emergence of climate change)”と呼ばれるこのような時期を推定する研究例はあるが、水文旱魃^{すいもんかんばつ}について全球的解析によりこのような時期を特定した先行研究はこれまでなかった。

3.3 数値シミュレーション

陸域物理過程・水資源・陸域生態系・作物成長・土地利用モデルを結合した陸域統合モデル MIROC-INTEG-LAND (Yokohata et al., 2020) による将来予測シミュレーションにおいては、社会経済データとして、統合評価モデルAIMによって計算された Shared Socio-economic Pathways (SSP) シナリオ (Fujimori et al., 2017) を利用した。さらに、将来予測実験における気候シナリオとして、Representative Concentration Pathways (RCP) シナリオを利用した。陸域統合モデル MIROC-INTEG-LAND は、スカラー機 (CPU10コア) を利用し、1年あたり40分程度で計算が完了する。分野横断影響評価研究プロジェクト ISIMIP に向けた計算では、提供された気候フォーシング・社会経済デ

ータを活用し、MIROC-INTEG-LAND によって、灌漑などの人間活動を考慮して、過去再現と将来予測実験を行った。

陸域統合モデルに大気・海洋モデルを結合させた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。

3.4 結果

本研究では“領域平均干ばつ頻度の時系列が140年間の参照期間（1865-2005年）の最大値を連続して何年も超過するようになるタイミング（TFE：Time of first Emergence of consecutive unprecedented drought）”を定義し、全球の59地域に対しTFEを推計した。例えば、5年以上連続して参照期間140年に1回の極値を超える場合のTFEをTFE5と呼ぶこととする。ここでは水資源への影響を念頭に河川旱魃^{かきせんかんぼつ}の頻度（干ばつ日数）に着目している。解析には分野横断影響評価モデル比較プロジェクト（<https://www.isimip.org/>）で得られたデータセットから、期間1865-2099年の全球流量データを用いた。4つの気候モデルの将来気象予測を強制にした5つの全球水モデルの将来予測（計20アンサンブルメンバー）を、低位安定化シナリオ（RCP2.6）と高位参照シナリオ（RCP8.5）の2種類の温暖化シナリオについて調べている。研究では低流量期・高流量期・年スケールについて同様の解析をしているが、ここでは低流量期についての結果のみを示す。

TFEの推計に際しては、内部変動による不確実性を考慮するためにブロックブートストラップ法を用いたリサンプリングを行った。1つのアンサンブルメンバー時系列をトレンドと変動に分解し、リサンプリングした変動成分を再度トレンドにのせることで1本の時系列から10000パターンの時系列を用意している。トレンドは2次関数でフィッティングされている。したがって20アンサンブルメンバーの将来予測から得られる合計200000本の時系列に対してTFE解析をおこなった。

リサンプリングした大規模アンサンブルから得られるTFEの中央値を代表値とした場合、RCP2.6およびRCP8.5シナリオにおいて、59地域中それぞれ11地域と18地域でTFE5が検出された（図1a。ここでは2100年までにTFE5を迎えることが5-95%信頼区間で有意である地域のみを表示している）。特に、4地域（RCP2.6）と13地域（RCP8.5）では21世紀中にTFE5を迎える可能性は66%以上に達しており、気候変動に関する政府間パネルの定義に沿えば、これらの地域が21世紀中に過去に例を見ない干ばつの激化を経験する”可能性が高い（Likely）”と言える。さらに、5地域（RCP2.6）と7地域（RCP8.5）が30年程度以内にTFE5に達する予測となった。特に南米南西部、地中海ヨーロッパおよび北アフリカではどちらのシナリオでも特に早めのTFE5が検出されている。RCP8.5の場合、TFE5のアンサンブル中央値はそれぞれ2020、2035、2040年頃を示す。また、これら3地域で2050年までにTFE5に達する確率は98%、93%、67%と高い確率をとっており、後者2地域、地中海ヨーロッパと北アフリカも、2050年と2080年頃にはその確率が95%以上に達する（図1b）。南米南西部については、RCP2.6でも21世紀中のTFE5は95%を超えて非常に高い確率を示す。

TFE5の累積確率分布に見るシナリオ間の違いは、緩和シナリオの選択が未曾有の干ばつ状態の発生を防ぐ、もしくは遅らせるために重要であることを示唆している（図1b）。南米南西部のように両シナリオでTFE5が早期の場合は例外的だが、概してシナリオ間のTFE5の差は小さくなく、中央値の不確実性範囲が重複しない、もしくはRCP8.5シナリオでのみ21世紀中盤から後半にかけてTFE5が検出されるというケースが多い。そうした地域では、RCP8.5の場合はTFE5の確率が高止まるまで増加を続けるが、RCP2.6ではTFE5の累積確率の増加がもともと穏やか、もしくは2050年頃に落ち着くことで21世紀後半にその確率がRCP8.5ほどは高くならなかった。

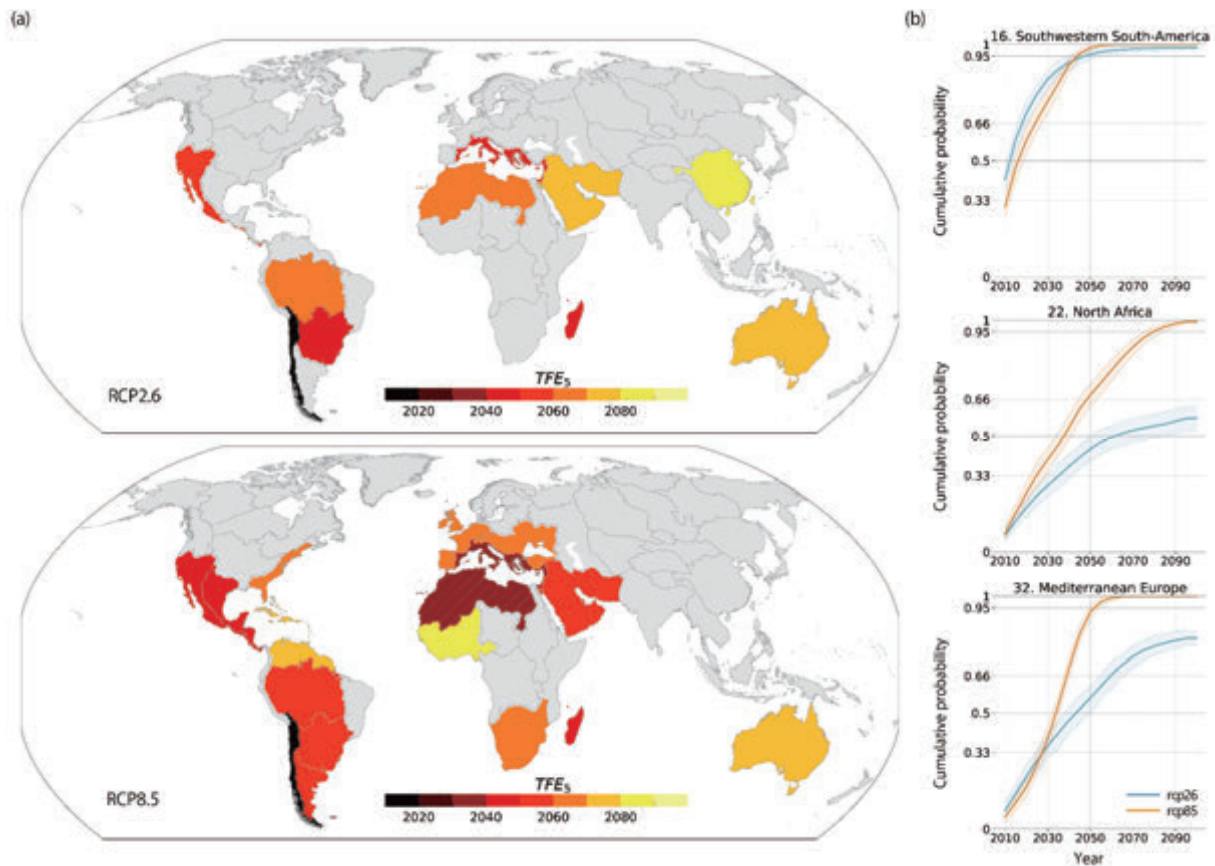


図 1. 気候変動に伴う干ばつの高頻度化および長期化により、領域の干ばつ頻度が数年単位で継続的に異常値をとり始める時期（TFE: Time of first emergence of consecutive unprecedented regional drought conditions）(a) 領域平均干ばつ頻度の時系列が、過去140年に1度の最大値を5年以上連続して超え続ける状態が予測される時期。RCP2.6およびRCP8.5をそれぞれ上・下段に示す。ブートストラップ法を用いた大規模リサンプリングアンサンブルデータを用い、個々のサンプル毎に推定されるTFEの中央値を代表値としている。不確実性を考慮し、大規模サンプルデータの結果をもとに±5%の有意範囲で21世紀末までにTFEを迎える可能性がある地域についてのみ時期を色で示している。(b) TFEの時系列累積確率（CDF）。例として、特にTFEの時期が早く確信度が早い3地域を選択的に示す：南米南西部、地中海ヨーロッパ、北アフリカ。CDFは大規模サンプルデータから求められており、シェードは不確実性を表す。RCP2.6およびRCP8.5をそれぞれ青と赤で示す。

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

- Ito, A., Inatomi, M (2012), Use of a process-based model for assessing the methane budgets of global terrestrial ecosystems and evaluation of uncertainty. *Biogeosciences*, **9**, 759-773. <https://doi.org/10.5194/bg-9-759-2012>
- Nitta, T, Yoshimura, K., Takata, K., O'ishi, R., Sueyoshi, T., Kanae, S., Oki, T., Abe-Ouchi, A., and Liston, G.E. (2014), Representing variability in subgrid snow cover and snow depth in a global land model: Offline validation. *J. Clim.*, **27**, 3318–3330. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-13-00310.1>
- Pokhrel, Y., Hanasaki, N., Koirala, S., Cho, J., Kim, H., Yeh, P.J.-F., Kanae, S., and Oki, T. (2012), Incorporating anthropogenic water regulation modules into a land surface model. *Journal of Hydrometeorology*, **13**, 255–269. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-11-013.1>
- Sakurai, G, Iizumi, T, Nishimori, M, Yokozawa, M (2014), How much has the increase in atmospheric CO₂ directly affected past soybean production? *Scientific Reports*, **4** : 4978. <https://doi.org/10.1038/srep04978>
- Watanabe, M., Suzuki, T., O'ishi, R., Komuro, Y., Watanabe, S., Emori, S., Takemura, T., Chikira, M., Ogura, T., Sekiguchi, M., Takata, K., Yamazaki, D., Yokohata, T., Nozawa, T., Hasumi, H., Tatebe, H., and Kimoto, M. (2010), Improved climate simulation by MIROC5: Mean states, variability, and climate sensitivity. *J. Climate*, **23**, 6312-6335. <https://doi.org/10.1175/2010JCLI3679.1>

4. まとめ

気候・生態系・水資源・作物・土地利用のモデルを結合した陸域統合モデル MIROC-INTEG-LAND の開発によって、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、特に陸面物理過程の将来予測結果に着目することにより、将来の干ばつ変化に関する新たな知見を得ることができた。また、これまでの地球システムモデルでは簡略化されていた永久凍土過程を改良し、永久凍土融解による温室効果ガス放出を記述するモデルを開発することができた。水資源・作物・土地利用モデルを地球システムに結合する MIROC-INTEG-ES の開発を継続し、地球—人間システムの相互作用を分析するための準備を行なった。

5. 今後の研究展望

MIROC-INTEG-LAND を利用して、陸域における水資源・作物・土地利用に関する人間活動と気候システムの相互作用の評価を行いつつ、これに大気海洋モデルを結合することにより、地球—人間システムの相互作用の分析を行う。地球システム統合モデルを動作させるための様々な技術的な問題を解決し、様々な社会経済シナリオのもとで実験を行うことにより、地球—人間システムに関する総合的な分析を行うことを計画している。

6. 研究成果発表

6.1 誌上発表（査読あり）

- Satoh Y, H. Shiogama, N. Hanasaki, Y. Pokhrel, A. Koutroulis, H. Müller Schmied, W. Thiery and T. Yokohata (2021), A quantitative evaluation of the issue of drought definition : a source of disagreement in future drought assessments. *Environ. Res. Lett*, **16**, 104001. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac2348>
- Boulangé, J., N. Hanasaki, Y. Satoh, T. Yokohata, H. Shiogama, P. Burek, W. Thiery, D. Gerten, H. Müller Schmied, Y. Wada, S. N. Gosling, Y. Pokhrel and N. Wanders (2021), Validity of estimating flood and drought characteristics under equilibrium climates from transient simulations. *Environ. Res. Lett.* **16**, 104028. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac27cc>
- Gudmundsson L, J. Boulangé, H. X. Do, S. N. Gosling, M. G. Grillakis, A. G. Koutroulis, M. Leonard, J. Liu, H. M. Schmied, L. Papadimitriou, Y. Pokhrel, S. I. Seneviratne, Y. Satoh, W. Thiery, S. Westra, X. Zhang and F. Zhao (2021), Globally observed trends in mean and extreme river flow attributed to climate change. *Science* (80-.). 371 1159–62. <https://doi.org/10.1126/science.aba3996>
- Pokhrel Y, F. Felfelani, Y. Satoh, J. Boulangé, P. Burek, A. Gädeke, D. Gerten, S. N. Gosling, M. Grillakis, L. Gudmundsson, N. Hanasaki, H. Kim, A. Koutroulis, J. Liu, L. Papadimitriou, J. Schewe, H. Müller Schmied, T. Stacke, C. E. Telteu, W. Thiery, T. Veldkamp, F. Zhao and Y. Wada (2021), Global terrestrial water

storage and drought severity under climate change. *Nat. Clim. Chang.*, 11, 226-233.
<https://doi.org/10.1038/s41558-020-00972-w>

Telteu C. E., H. Müller Schmied, W. Thiery, G. Leng, P. Burek, X. Liu, J. E. S. Boulange, L. A. Seaby, M. Grillakis, S. N. Gosling, Y. Satoh, O. Rakovec, T. Stacke, J. Chang, N. Wanders, H. L. Shah, T. Trautmann, G. Mao, N. Hanasaki, A. Koutroulis, Y. Pokhrel, L. Samaniego, Y. Wada, V. Mishra, J. Liu, P. Döll, F. Zhao, A. Gädeke, S. Rabin and F. Herz (2021), Understanding each other's models: a standard representation of global water models to support improvement, intercomparison, and communication. *Geosci. Model Dev.*, 14, 3843–3878. <https://doi.org/10.5194/gmd-14-3843-2021>

6.2 誌上発表（査読なし）

該当なし。

6.3 口頭発表

Yokohata T., Kinoshita T., Sakurai G., Satoh Y., Pokhrel, Y., Ito A., Okada M., Kato E., Fujimori S., Tachiiri K., Matsumoto K., Emori S., Takahashi K. (2021), Future projection for the impacts of socio-economic and climate changes on water, food, bioenergy, ecosystems and land use. Fourteenth IAMC Annual Meeting 2021

Satoh Y., Yoshimura K., Pokhrel Y., Kim H., Shiogama H., Yokohata T., Hanasaki N., Wada Y., Burek P., Byers E., Müller Schmied H., Gerten D., Ostberg S., Gosling S.N., Boulange J.E.S., and Oki T. (2021), The timing of unprecedented hydrological drought under climate change. American Geophysics Union Fall meeting 2021

Satoh Y., Shiogama H., Hanasaki N., Pokhrel Y., Boulange J., Burek P., Gosling S.N., Grillakis M.G, Koutroulis A.G., Muller Schmied H., Thiery W., Yokohata T. (2021), Decomposing the uncertainties in global drought projection. The General Assembly 2021 of the European Geosciences Union

Yokohata T., Kinoshita T., Sakurai G., Ito A., Satoh Y., Pokhrel, Y., Okada M., Kato E., Takahashi K., Hanasaki N., Fujimori S., Emori S. (2021), Future projection of water, ecosystem and land use due to socio-economic and climate changes investigated with an integrated land surface model (MIROC-INTEG-LAND). Japan Geoscience Union Meeting 2021, Abstract

横島徳太, 齊藤和之, 岩花 剛, 田中克政 (2021) 全球陸面モデルによる永久凍土融解による温室効果ガス放出の将来予測. Japan Geoscience Union Meeting 2021

Satoh Y., Shiogama H., Hanasaki N., Pokhrel Y., Boulange J., Burek P., Gosling S.N., Grillakis M.G, Koutroulis A.G., Muller Schmied H., Thiery W., Yokohata T. (2021), Decomposing the uncertainties in global drought projections. Japan Geoscience Union Meeting 2021

Tachiiri K., Su X., Matsumoto K., Hajima T., Yokohata T. (2021), Development of a coupled Earth and socio-economic system model. Japan Geoscience Union Meeting 2021

Boulange J., Hanasaki N., Satoh Y., Yokohata T., Shiogama H., Burek P., Wim T., Dieter G., Schmied H.M., Wada Y., Gosling S., Pokhrel Y., Wanders N. (2021), Validity of substituting flood and drought characteristics obtained from transient simulations to represent an equilibrium climate. Japan Geoscience Union Meeting 2021

Kawamiya M., Tachiiri K., Hajima T., Yokohata T., Tsutsui J., Arakawa T., Inoue T. (2021), Future directions of Earth system modeling: outcome of the discussion forum under TOUGOU program. Japan Geoscience Union Meeting 2021

羽島知洋, 阿部 学, 伊藤彰記, 伊藤昭彦, 大垣内るみ, 齊藤和之, 須藤健悟, 河宮未知生, 野口真希, Patra Prabir, 山本彬友, 横島徳太, 渡辺真吾, 渡辺路生 (2021) 生態系-大気化学相互作用と地球システムモデル. Japan Geoscience Union Meeting 2021

Satoh Y., Shiogama H., Hanasaki N., Pokhrel Y., Boulange J., Burek P., Gosling S.N., Grillakis M.G, Koutroulis A.G., Muller Schmied H., Thiery W., Yokohata T. (2021), Decomposing the uncertainties in global drought projection. The General Assembly 2021 of the European Geosciences Union

Guo Q., T. Oki, X. Zhou, and Y. Satoh (2021), Irrigated cropland expansion exacerbated the urban moist heat stress in northern India. Japan Hydrology Meeting 2021, 15-18 Sep 2021, Online

Pokhrel Y., F. Felfelani, Y. Satoh, J. Boulange, P. Burek, A. Gädeke, D. Gerten, S. N. Gosling, M. Grillakis, L. Gudmundsson, N. Hanasaki, H. Kim, A. Koutroulis, J. Liu, L. Papadimitriou, J. Schewe, H. Müller Schmied, T. Stacke, C. Telteu, W. Thiery, T. Veldkamp, F. Zhao, and Y. Wada (2021), Terrestrial water storage under changing climate and implications on future droughts. EGU General Assembly 2021, 19-30 April, Online

Elkouk A., Pokhrel Y., Satoh Y., and Bouchaou L. (2021), Implications of climate and socioeconomic change for future drought risk. American Geophysics Union Fall meeting 2021, 13-17 Dec 2021, New Orleans, LA and Online

6.4 その他（書籍等）

該当なし。

7. 連絡先

横島徳太

〒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

Project name:
Climate change studies by development of land models in Earth System

April 2020 – March 2023

Project leader:
Tokuta Yokohata, Earth System Division, National Institute for Environmental Studies

Project members:
Akihiko Ito, Yusuke Satoh, Earth System Division, National Institute for Environmental Studies
Tomohito Yamada, Faculty of Engineering, Hokkaido University
Etsushi Kato, Global Environment Group, The Institute of Applied Energy
Tsuguki Kinoshita, Faculty of Agriculture, Ibaraki University
Kaoru Tachiiri, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

Abstract:

Future climate changes possibly affect ecosystem services, water resources, food production, energy supply, etc. It is important to understand the interaction between the changes in these complicated factors. In the present study, we have developed an integrated terrestrial model (MIROC-INTEG-LAND: MIROC INTEGrated LAND surface model (Yokohata et al., 2020) that describes the natural biogeophysical environment as well as human activities. In MIROC-INTEG-LAND, a global vegetation model, VISIT (Ito et al., 2012), water-resource model, H08 (Hanasaki et al., 2008, Pokhrel et al., 2012), crop-growth model, PRYSBI2 (Sakurai et al., 2014), and land-use model, TeLMO (Yokohata et al., 2020) were coupled to a land-surface model, MATSIRO (Nitta et al., 2014), which is a component of the global climate model MIROC (Watanabe et al., 2010). This year, we performed historical and future projection simulations by using MIROC-INTEG-LAND to evaluate the combined impacts of future socio-economic and climate changes on water resources, ecosystems, crop production, and land use. We also analyzed the effects of future climate change and human activity on extremely strong droughts. We investigated the changes in the frequency of hydrological drought (abnormally low river discharge) under high and low greenhouse gas concentration scenarios with present water resource management and estimated the time for the first emergence of unprecedented regional drought conditions. Such extreme drought conditions were detected for several subcontinental-scale regions, and three regions, namely Southwestern South America, Mediterranean Europe, and Northern Africa, exhibited particularly robust results in the high-emission scenario. These three regions would face unprecedented conditions within the next 30 years with a high likelihood regardless of the emission scenario. In parallel with this, we proceeded with the development of MIROC-INTEG-ES, where atmosphere and ocean models are coupled to MIROC-INTEG-LAND.

Keywords:
climate change, integration, risk management

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

国立環境研究所地域環境保全領域 吉成浩志

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

要旨：

閉鎖性水域の水環境への気候変動影響について、水温上昇とそれに伴う生物影響に関する研究は多数行われているものの、陸域からの流出に強く支配される一次生産や栄養塩など水質への影響はいまだ解明されていない。本研究課題では、先行研究において瀬戸内海を対象に開発した陸域淡水・汚濁負荷流出－海域流動・水質・底質モデルを活用して、国内各地の閉鎖性水域の水環境・生態系を対象とした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水質管理に向けた適応策の提示を目的とする。

瀬戸内海の播磨灘における窒素動態への気候変動影響を明らかにするため、陸域淡水・汚濁負荷流出－海域流動・水質・底質モデルを用いて、現在気候 20 世紀末と RCP8.5 の将来気候 21 世紀末のそれぞれ 20 年間の予測計算を行うとともに、水と窒素のフロー解析を実施した。水のフローには現在気候と将来気候で顕著な違いが見られなかったが、TN と DIN については、夏～秋の高温化によって一次生産が低下し、海底への堆積が減少するため、将来気候の海域間フローが全体的に現在気候より増加し、播磨灘から流出しやすくなると予測された。冬～春では、水温上昇に伴う一次生産の活性化によって将来気候の DIN 消費量は現在気候の約 2 倍に増え、季節変動として見られる海水中の DIN の減少が気候変動によって加速すると予測された。

キーワード：

気候変動、窒素フロー、一次生産、陸域－海域統合モデル、瀬戸内海

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

国立環境研究所地域環境保全領域 吉成浩志

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

気候変動適応法の施行により、国や地方に気候変動影響の評価と適応計画の策定が求められることとなった。しかし、沿岸域・閉鎖性海域の水環境・生態系においては、水温上昇とその生物影響に関する研究は多数行われているものの、栄養塩など水温以外の水質項目についてはいまだ予測の不確実性が多く残されている。とくに問題となるのは、沿岸域・閉鎖性海域の水環境を大きく左右する陸域からの淡水・汚濁負荷流出であるが、これが気候変動によってどのように変化するかが定量的に明らかにされておらず、水環境分野における適応策検討の支障になっている。この問題は、陸域の湖沼や貯水池など閉鎖性水域全てにおいて共通するものといえる。本研究課題では、先行研究において瀬戸内海を対象に開発した陸域淡水・汚濁負荷流出－海域流動・水質・底質モデルを活用して、国内各地の閉鎖性水域の水環境・生態系を対象とした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。

上記の一研究として、本報では、現在気候とRCP8.5の将来気候におけるシミュレーション結果を解析し、気候変動が瀬戸内海の播磨灘における窒素フローへの影響について考察した。

キーワード：

気候変動、窒素フロー、一次生産、陸域－海域統合モデル、瀬戸内海

2. スーパーコンピュータ利用実績

2.1 計算機利用時間（2021年4月1日～2022年3月31日）

CPU時間 v_debug : 94.67 [VE・hours]

v_normal : 564,187.40 [VE・hours]

計 : 564,282.07 [VE・hours]

2.2 利用概要

瀬戸内海およびその集水域を対象とした水平解像度約1kmの陸域淡水・汚濁負荷流出－海域流動・水質・底質モデルを構築し、現在気候20世紀末と将来気候（RCP2.6、4.5、6.0、8.5）21世紀末のそれぞれ20年間のシミュレーションを実施した。また、東京湾、伊勢湾、琵琶湖など、気候変動影響予測を他の閉鎖性水域に展開した。その他、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。モデルのプログラムコードにはMPIとOpenMPのハイブリッド並列を使用し、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v_debおよびスカラー機を活用した。

3.2 結果

3.2.1 現在気候と RCP8.5 の将来気候における播磨灘の水質

播磨灘内の表層（海面～1 m深）、全層（海面～海底）で空間平均した現在気候と将来気候の水溫、Chl. a、TN、DINの月別値（19年平均値）を図2に示す。なお、各グラフの横軸は4月から始まっており、右端と左端の4月には同じ値をプロットしてある。現在気候に比べてRCP8.5の将来気候では、年間を通じて水溫が3～4℃上昇し、夏～秋は高温化によってChl. aが顕著に減少、冬～春は温暖化によってChl. aが増加すると予測されている。DINの将来変化はこのChl. aの変化に対応して、夏～秋は顕著に増加、冬～春は、有意な差ではないものの、どちらかといえば減少傾向を示している。TNについては、年間を通じて2割ほどの増加する予測となっている。以上の表層水質の将来変化は全層平均の水質についても同様に見られる。

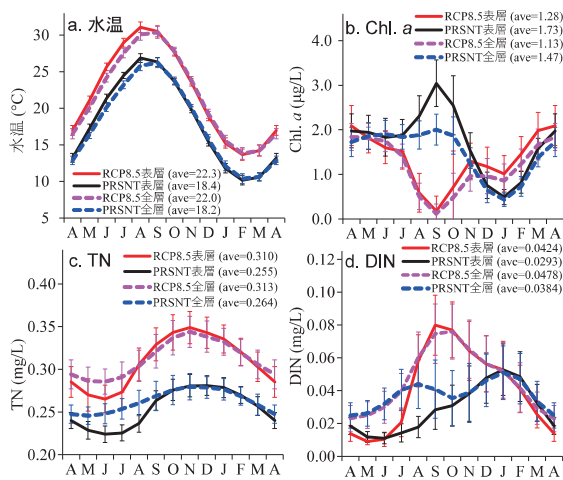


図 2. 現在気候 (PRCNT) と将来気候 (RCP8.5) の播磨灘における海域平均の水溫, Chl. a, TN, DINの19年平均月別値 (エラーバーは19年間の月別値の標準偏差)。

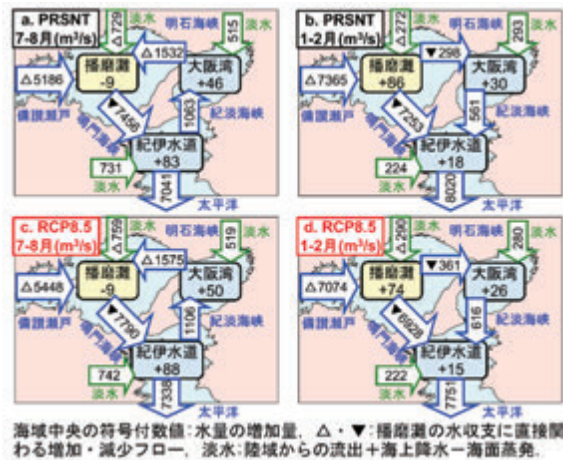


図 3. 現在気候 (PRCNT) と将来気候 (RCP8.5) の7～8月と1～2月における瀬戸内海東部海域の水フロー (19年平均値)。

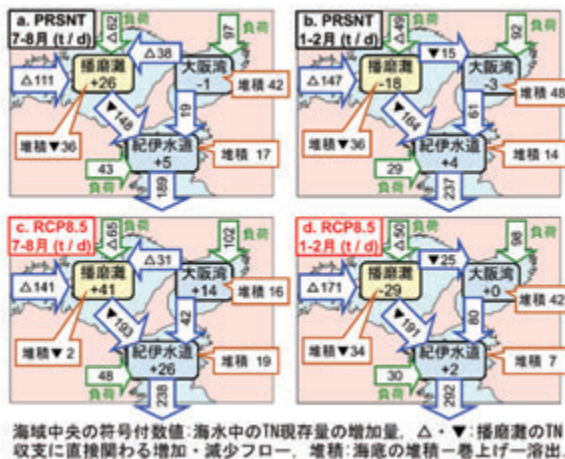


図 4. 現在気候 (PRCNT) と将来気候 (RCP8.5) の7～8月と1～2月における瀬戸内海東部海域のTNフロー (19年平均値)。

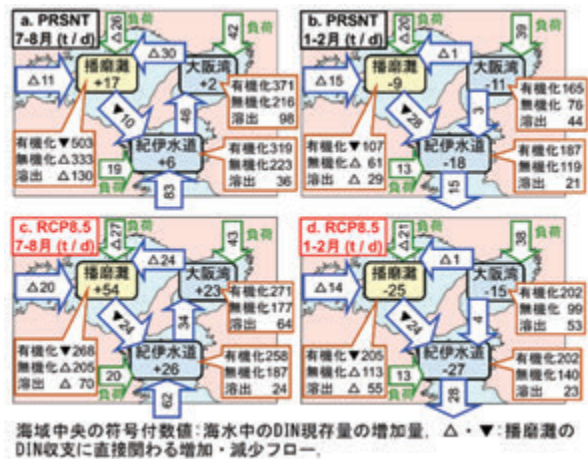


図 5. 現在気候 (PRCNT) と将来気候 (RCP8.5) の7～8月と1～2月における瀬戸内海東部海域のDINフロー (19年平均値)。

3.2.3 現在気候と将来気候の水・窒素フロー

夏の7～8月と冬の1～2月の瀬戸内海東部海域における現在気候と将来気候の水、TN、DINのフローをそれぞれ図3、4、5に示す。

(1) 水のフロー

図3を見ると、瀬戸内海全体の通過流が西の備讃瀬戸より播磨灘に流入し、鳴門海峡から紀伊水道を経て太平洋に流出する大きなフローがすべての結果に共通している。瀬戸内海の全体的な流れとして、豊後水道から流入して紀伊水道から流出する東向きの通過流がある。この通過流は、黒潮の影響を強く受けるが、19年の長期平均ではそれが平滑化され、代わりに淡水流入や海上風を要因とする、夏に弱く、冬に強い季節変動が表れる。明石海峡と紀淡海峡のフローは季節によって方向が異なっており、播磨灘から見ると、7～8月は大阪湾から流入、1～2月は大阪湾に流出するフローとなっている。

現在気候と将来気候の水フロー（図3）には、1～2月の明石海峡で2割ほどの流量差があるが、それ以外は1割以下で顕著な変化は見られない。海域間の流量（19年間の時系列）の標準偏差はいずれも $10^3 \text{ m}^3/\text{s}$ のオーダーであり、明石海峡の変化も有意とはいえない。

(2) TNのフロー

現在気候のTNフローを通年で集計すると、播磨灘へのTNの流入は、備讃瀬戸からが6割、陸域からが3割、大阪湾からが1割で構成され、備讃瀬戸からの流入が卓越する。播磨灘に流入したTNの2割は海底に堆積するが、残りの8割は鳴門海峡から流出する。7～8月（図4a, c）は、季節的に陸域からの負荷が多く、明石海峡の流れも西向きであるため、播磨灘の流入は流出を上回っている。一方、瀬戸内海全体の東向きの通過流が強まる1～2月（図4b, d）は、備讃瀬戸からの流入と鳴門海峡からの流出が増加するとともに、明石海峡のフローが流出に転じ、結果的に播磨灘では流出が卓越している。

(3) DINのフロー

DIN（図5）では、陸域からの負荷や海域間のフローよりも海域内部での生成・消滅フローが卓越している。現在気候と将来気候の7～8月のフロー（図5a, c）を比較すると、将来気候の播磨灘では、高温化による一次生産の低下の影響を受けて、有機化によるDINの消滅フローが現在気候よりも大きく減少している。それに伴い、海水中の有機物分解による無機化と海底からの溶出の生成フローも減少している。一方、現在気候と将来気候の1～2月のDINのフロー（図5b, d）を比較すると、将来気候の播磨灘では、水温上昇によって一次生産が活発化するため、有機化の消滅フローが現在気候の約2倍に増加している。それに伴い、無機化と溶出の生成フローも増加している。以上の将来変化は、大阪湾、紀伊水道でも見られるが、3海域の中では播磨灘が最も顕著である。

海域間のフローで特徴的なものは、7～8月の外洋から紀伊水道と大阪湾を経て播磨灘に流入する流れである。このとき、紀淡海峡のDINのフロー（図5a）はTNのフロー（図4a）とは逆向きであるが、この現象の観測事例は複数報告されている（中辻ら, 2002）。将来気候の7～8月では、この外洋から播磨灘に至るDINのフローが現在気候よりも2割ほど減少するとともに、鳴門海峡を通じた播磨灘から流出が現在気候の2.4倍に増加している。

3.3 考察

海域間の水のフロー（図3）には現在気候と将来気候で顕著な違いは見られないが、TN（図4）とDIN（図5）については、将来気候では現在気候よりも全体的に時計回りのフローが強まり（反時計回りのフローは弱まり）、瀬戸内海東部海域から外洋への流出が増加（外洋からの流入は減少）する傾向が見られる。また、備讃瀬戸からのTNとDINの流入量も増加し（図4, 5）、播磨灘の海水中におけるTNとDINの現存量も通年の平均値では増加する（図2c, d）が、将来気候における冬～春の播磨灘の海水中のDIN現存量は現在気候を下回っている。ここでは、その原因とプロセスについて考察する。

夏～秋の一次生産の低下は、主に瀬戸内海中央部で顕著であり、海底への TN 堆積量を大きく減少させる。堆積が減少した分は海水中に留まり、瀬戸内海全体の通過流に伴って東に輸送されるため、備讃瀬戸からの TN 流入量の増加と播磨灘の TN の上昇 (図 4c) に繋がると考えられる。なお、現在気候と将来気候において瀬戸内海全体の陸域からの TN 負荷量 (345 と 347 ton/day) に差はないこと、同様に太平洋から豊後水道への TN の流入量にも変化はない (61 と 60 ton/day) ことを確認している。

上述のように、7～8 月の播磨灘は TN の流入が流出を上回る季節であり、海水中の TN が増加する (図 4)。この傾向は DIN にも当てはまる (図 5)。加えて、将来気候では、夏～秋の一次生産が顕著に低下し、DIN の消費 (有機化) が減少するため、海水中の DIN が急激に増加する (図 2d)。その後、10 月頃から減少が始まり、1 月以降は現在気候の DIN を下回るまでに至っている。

この秋の DIN の減少については、鳴門海峡からの流出の増加が強く関与している。7～8 月 (図 5a, c) の時点でも、将来気候の鳴門海峡からの DIN 流出量は現在気候の 2.4 倍に増加しているが、この傾向は 1 月頃まで続く。現在気候の 9～12 月では、鳴門海峡からの流出 (15 ton/day) よりも播磨灘内部の正味の消滅量 (有機化－無機化－溶出 = 24 ton/day) が卓越するが、将来気候では逆転し、前者の流出 (41 ton/day) が後者 (20 ton/day) を上回るほど増加している。鳴門海峡の DIN フローが増える原因は、TN と同様、海水中の DIN が増加するためである。その後の 1～2 月 (図 5b, d) では、DIN の海域間フローに現在気候と将来気候で差が見られないものの、播磨灘の海水中における DIN の 1 日当たりの減少量は将来気候が現在気候の 2.8 倍に増加している。この原因は水温上昇に伴う一次生産の増加と特定できる。冬の播磨灘は、現在気候においても海水中の DIN が減少する季節である (小林ら, 2007) が、気候変動はそれを加速させることを示している。

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>
- 小林志保, 藤原建紀, 原島 省 (2007) 瀬戸内海における溶存態無機窒素の季節・計年変動とその要因. 沿岸海洋研究, 44 (2), 165-175. https://doi.org/10.32142/engankaiyo.44.2_165
- 中辻啓二, 西田修三, 金 漢九, 山中亮一 (2002) 紀淡海峡における残差流と物質輸送の現地観測. 海岸工学論文集, 49, 1071-1075. <https://doi.org/10.2208/proce1989.49.1071>
- 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－海域流動・水質・底質モデルを用いて瀬戸内海の水質への気候変動影響を予測するとともに、播磨灘に着目して現在気候と RCP8.5 の将来気候の水と窒素のフローを解析した。将来気候の播磨灘では、水のフローは現在気候との違いが見られないが、夏～秋の高温化によって一次生産が顕著に低下し、DIN の有機化、沈降、海底への堆積が大きく減少するため、現在気候よりも紀伊水道・外洋に窒素が流出しやすくなることが示された。これに冬～春の水温上昇に伴う一次生産の活発化・DIN 消費量の増加が加わり、将来気候の冬～春の播磨灘の DIN は現在気候よりも急速に減少することが明らかになった。

以上の結論はモデルの一次生産の温度依存性に強く左右されるものであり、より高温の耐性を有する種の追加などによって結果が大きく変わる可能性があることに留意が必要である。

5. 今後の研究展望

本報では19年間の平均値に基づいて考察を進めたが、19年間の中にも無視できない水温上昇、窒素減少のトレンドがあり、黒潮との関連性も含めて今後詳細に解析していきたい。また、本研究を他の閉鎖性水域にも展開し、気候変動が水環境に及ぼす影響の共通性や地域性を明らかにするとともに、海域の特性を踏まえた適応策について検討を進める。

6. 研究成果発表

6.1 誌上発表（査読あり）

東 博紀, 吉成浩志, 中田聡史, 横山亜紀子, 越川 海 (2021) RCP8.5の気候変動が播磨灘の窒素フローに及ぼす影響. 土木学会論文集B1 (水工学), 77(2), I_1099-I_1104.
https://doi.org/10.2208/jscejhe.77.2_I_1099

6.2 誌上発表（査読なし）

東 博紀 (2021) 瀬戸内海における水環境への気候変動の影響と適応策, In 特集「海域の多様化した課題に対応するための栄養塩マネジメント」水環境学会誌, 44(5), 142-146.

6.3 口頭発表

東 博紀, 中田聡史, 秋山千亜紀 (2021) 東京湾流域圏における河川流量への人為的な導水の影響～瀬戸内海, 伊勢・三河湾, 東京湾流域圏の流出解析を通じて～. 水文・水資源学会/日本水文科学会 2021年度研究発表会, 同予稿集, OP-P1-03.

東 博紀, 吉成浩志, 中田聡史, 横山亜紀子, 越川 海 (2021) RCP8.5の気候変動が播磨灘の窒素フローに及ぼす影響. 第66回水工学講演会

東 博紀 (2021) 瀬戸内海の水環境への気候変動影響予測. 生態系工学研究会 2021年度第1回 RACES セミナー

東 博紀 (2021) 瀬戸内海の水環境を対象とした気候変動の影響予測と適応策. 土木学会水工学委員会 環境水理部会第2回温暖化適応 WG セミナー

東 博紀, 中田聡史 (2021) 北海道東部太平洋における2021年夏・秋期の流動場の特異性. 第56回日本水環境学会年会, 同予稿集, 416.

7. 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

Project name :

Prediction of climate change impacts and adaptation for water environment and ecosystem in enclosed water areas

April 2020 – March 2023

Project leader:

Hironori Higashi, Regional Environment Conservation Division, National Institute for Environmental Studies

Project member:

Satoshi Nakada, Regional Environment Conservation Division, National Institute for Environmental Studies
Hiroshi Yoshinari, Regional Environment Conservation Division, National Institute for Environmental Studies

Wataru Nishijima, Environmental Research and Management Center, Hiroshima University

Masayasu Irie, Division of Global Architecture, Graduate School of Engineering, Osaka University

Shiho Kobayashi, Field Science Education and Research Center, Kyoto University

Abstract:

Climate change impacts on the water environment, especially water quality governed strongly by river discharge in enclosed water areas, have not yet been elucidated, although research on rising water temperatures has been conducted. Our primary objective is to predict and assess climate change impacts on the water environment and ecosystem in coastal bays and lakes in Japan (e.g., Seto Inland Sea, Ise Bay, Tokyo Bay, Lake Biwa) using our integrated river-ocean hydro-environment assessment model under the Representative Concentration Pathway climate scenarios. Based on numerical simulations, nutrient management as a means of climate change adaptation for each water area is discussed.

In FY 2021, to clarify climate change impacts on nutrient behavior in Harima Nada located in the eastern part of the Seto Inland Sea, we performed flow analyses of water and nitrogen based on numerical simulations under the present (the end of the 20th century) and the RCP8.5 future (the end of the 21st century) climate conditions using an integrated river basin – coastal ocean hydro-environment assessment model. There was no significant difference in water flow between the present and the future climates. However, the horizontal flow of nitrogen during summer and autumn under the future climate became higher than that under the present climate because rising sea temperatures reduced primary production and subsequent sedimentation. During winter and spring, a seasonal decrease in the amount of nitrogen in the future Harima Nada was enhanced by higher primary production because of sea warming.

Keywords:

climate change impact, nitrogen flow, primary production, integrated river-ocean hydro-environment assessment model, Seto Inland Sea

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・佐伯田鶴・村上和隆・
亀井秋秀

要旨：

温室効果ガス（GHG）の吸収・排出量を正確に把握することは、地球温暖化予測の精度向上のために必要不可欠である。また、近年のGHG排出削減に対する世界的な関心の高まりにより、効果的な削減施策に結びつくGHGの科学的な知見が求められるようになってきた。地上ステーションにおける観測や航空機、船舶といった移動体プラットフォームでの観測、また、衛星観測などによる大気中のGHG観測データから地表面のGHGの吸収・排出量を定量的に評価するうえで、大気輸送モデルは有力なツールである。本研究では、大気輸送モデルを用いて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。本研究では、大気輸送モデルとしてNICAM-TMを、大気観測から地表面の二酸化炭素（CO₂）フラックスの時空間分布を推定する逆解析では、NICAM-TMをベースとしたシステムNISMON-CO₂を用いた。また、一酸化炭素（CO）を用いた森林火災起源GHG排出プロダクトの評価では、簡易的な化学反応プロセスを組み込んだNICAM-TMを用いた。NICAM-TMと波照間島におけるCO₂とCH₄観測データを用いた解析から、中国における2021年のCO₂排出量は過去9年間（2011–2019年）と比較して0~20%程度の増加となり、COVID-19の感染拡大以前のレベルに戻っていることが示唆された。NISMON-CO₂を用いた逆解析では、NICAMの正20面体格子ではなく、任意の緯度経度格子上でのフラックス最適化スキームを新たに開発した。これにより、初期フラックスデータが本来もっている詳細な空間情報（例えば1°×1°の分布）を維持して解析を行うことが可能となった。また、NICAM-TMのCOのシミュレーションを使った解析では、地上バイオマス量のデータが森林火災放出量の変動に強く寄与していることがわかった。さらに、NISMON-CO₂を用いた逆解析により、GOSAT・GOSAT-2 XCO₂間に濃度差が存在することが確認され、とりわけアフリカ南部におけるGOSAT-2 XCO₂データに大きなバイアスが見られた。

キーワード：
大気輸送モデル、逆解析、温室効果ガス、GOSAT

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・佐伯田鶴・村上和隆・
亀井秋秀

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、衛星観測データの質向上、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（2021年4月1日～2022年3月31日）

CPU 時間	v_debug	: 132.10 [VE・hours]
	v_normal	: 15,359.34 [VE・hours]
	計	: 15,491.44 [VE・hours]

2.2 利用概要

本研究では大気輸送モデルとして、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 (NICAM-based Transport Model) を用いた。また、二酸化炭素 (CO₂) の逆解析には NICAM-TM (Niwa et al., 2011) のフォワード及びアジョイント・モデルと準ニュートン法を組み合わせた4次元変分法システム NISMON-CO₂ (NICAM-based Inverse Simulation for Monitoring CO₂: Niwa et al., 2017a,b) を用いた。

3. 研究結果

3.1 中国CO₂排出量の2021年の増加

パリ協定などによる世界的な排出削減の取り組み・意識の向上により、近年、国や地域といったスケールでのCO₂排出・吸収量推定が求められるようになってきた。国立環境研究所が実施している波照間島の大気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。実際、2020年2月には、波照間島で観測されたCO₂およびメタン (CH₄) の変動比 ($\Delta \text{CO}_2 / \Delta \text{CH}_4$) から、新型コロナウイルス感染症 (COVID-19) の流行に対して実施された中国の大規模なロックダウンによるCO₂排出量の低下が推定された (Tohjima et al., 2020)。この解析では、波照間島の観測データに加え、大気輸送モデルNICAM-TM

による計算値を用いることで、排出量減少を定量的に評価している。今年度は、同様の手法を用いて、2021年における中国の排出量変化を推定し、2020年との比較を行った。その結果を図1に示す。この図から2021年は過去9年間（2011–2019年）と比較して0~20%程度の増加となり、COVID-19の感染拡大以前のレベルに戻っている（もしくは若干上回っている）ことが示唆された。

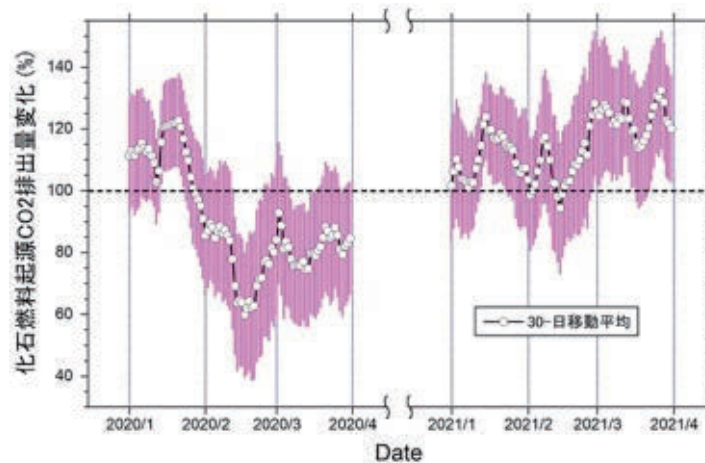


図 1. NICAM-TMと観測値の比較から推定された中国の化石燃料起源CO₂排出量の変化。過去9年間（2011–2019年）の平均を100%とする。白丸は30日間移動平均値による推定結果を、縦棒は誤差範囲を表す。

3.2 NISMON-CO₂の開発とCO₂長期逆解析

本年度は、逆解析システムNISMON-CO₂の高度化を行った。ここでは、緯度経度格子とNICAMの正20面体格子間の精緻な変換ツールを新たに導入し、さらに、その変換のアジョイント・モデルを開発・導入することで、正20面体格子ではなく緯度経度格子上でフラックスの最適化を行うことを可能とした。これにより図2に示す通り、低解像度の気輸送モデルを用いても、初期フラックスデータが本来もっている詳細な空間情報（例えば1°×1°の分布）を維持して解析を行うことが可能となった。

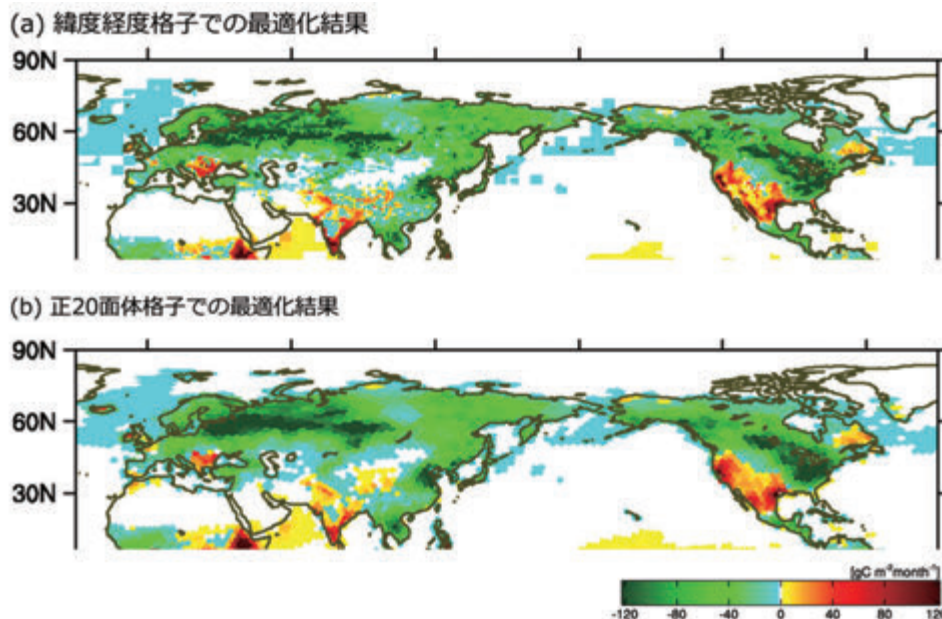


図 2. NISMON-CO₂で最適化された2010年7月のCO₂フラックス分布。負が大気からの吸収を表す。緯度経度格子 (1°×1°) 上 (a) と正20面格子 (~223 km) 上 (b) で最適化した結果。

上記のスキーム導入の後、1990年から2020年までの期間におけるCO₂逆解析を行った。この結果は、Global Carbon Project (GCP) による世界炭素収支の統合解析 (Friedlingstein et al., 2022) に用いられ、独立の航空機観測などとの比較から、他の逆解析と大きな差異がないことが確認された。また昨年度と同様に、この逆解析データを国立環境研究所の地球環境データベースから公開した。このデータベースからの公開によってデータの普及率が高まり、世界の研究者に広く利用されるようになっている (例えば、Tang et al., 2022)。

3.3 森林火災起源放出量プロダクト解析

森林火災は、バイオマスの燃焼過程でCO₂やCH₄等のGHGを大気中へ放出し、全球炭素収支や気候変動に影響を及ぼす現象である。森林火災の発生原因は人間活動と自然現象の双方にあり、また、森林火災の強度や頻度、発生場所や時期は現地の気象条件や陸面状態に強く依存する。このため、森林火災起源のGHG放出量は時空間方向で大きく変動する。森林火災起源のGHG放出量の推定精度を高めることは、全球炭素収支及び気候変動予測の精度向上に寄与する。

温室効果ガス観測技術衛星2号 (GOSAT-2) プロジェクトでは、全球炭素収支推定精度の向上を目指し、森林火災起源放出量プロダクトの新規作成を試みた (Shiraishi et al., 2021)。このプロダクトでは土地被覆区分 (LCC)、地上バイオマス量 (AGB)、および燃焼面積 (BA) を入力データとして、空間解像度約500 m、時間解像度1月の森林火災起源放出量 (CO₂、CH₄、および一酸化炭素 (CO)) を推定する。Shiraishi et al. (2021) はLCCおよびAGBにそれぞれ2種類の異なるデータ、BAには同一衛星データで信頼度が異なる2つのデータを使用することにより、合計8パターンの森林火災起源放出量を推定し、その結果を異なる機関が公開する森林火災起源放出量プロダクトとの比較を行った。本研究ではこれらのプロダクトの検証作業の更なる前進を目指し、CO₂やCH₄に比べて寿命が短いCOを検証対象気体を使用し、大気濃度場において観測データとの比較を通してどのプロダクトがより現実的な森林火災起源放出量を再現できているのか、また、プロダクト間の違いが何に起因するのかについて考察した。

大気CO濃度場のシミュレーションには、地表面からのCO放出量として森林火災の他に、人間活動による化石燃料消費、および植物起源の放出量を使用し、また大気中でのOHラジカルとの酸

化反応によるCOの消滅を考慮したNICAM-TMを用いることで、空間解像度約2.5度、鉛直40層の全球大気CO濃度場を再現した。このシミュレーション結果を地上および衛星観測によるCO濃度変動と比較した。

図3は、衛星観測データ（図3a）と、BAを固定した状態でLCCおよびAGBを組み合わせた4パターン（図3c-f）、およびそれらを平均した（図3b）COカラム平均濃度（XCO₂; ppb）の空間分布を示す（Saito et al., 2022）。衛星データはアフリカ中央、北米沿岸、シベリア、東アジアおよび東南アジア域でXCO₂が高い値を示す。これらの地域のうち、東アジアを除く地域は森林火災起源放出量が大きく、全てのシミュレーション結果が衛星データと類似の空間分布を示す結果を得た。しかし、森林火災CO放出量はプロダクト間で大きく異なり、それがXCO₂の値の違いとなって表れている。本研究の解析では、AGBデータが森林火災CO放出量の変動に強く寄与していることがわかった。今後、衛星データを用いた詳細なAGBデータを構築することが、森林火災放出量や全球炭素収支の精度向上に繋がると考えられる。

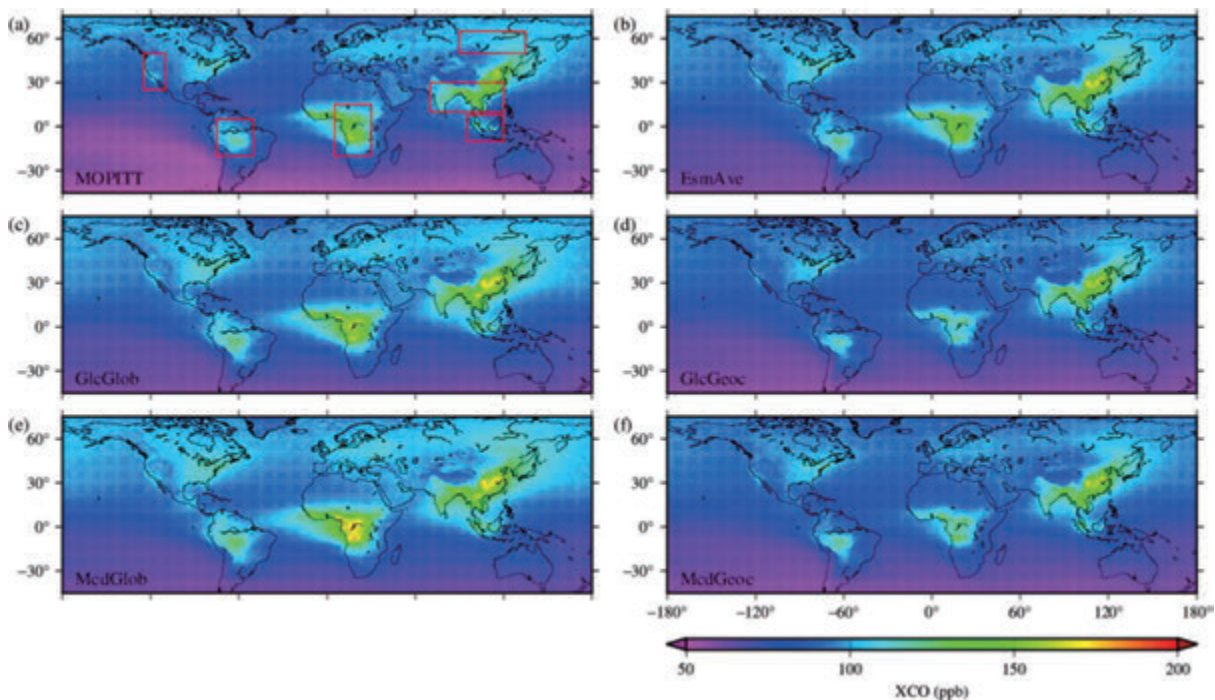


図 3. 2013年から2015年におけるXCO₂ (ppb) 平均濃度分布

3.4 GOSAT-2データに基づく全球CO₂吸排出推定

温室効果ガス観測技術衛星（GOSAT）の後継機として2018年に打ち上げられたGOSAT-2は全球のGHG濃度分布の時空間変動を観測することを主目的としている。昨年度はGOSAT-2観測データから導出したCO₂カラム平均濃度（XCO₂; ppm）を使用して、全球CO₂吸排出量を推定する試験を実施した。大気輸送モデルおよび逆解析にはNISMOM-CO₂（Niwa et al., 2017a）を使用し、空間解像度約2.5度、時間解像度1月のCO₂吸排出量を推定した。試験の結果、アフリカ中央域などの複数の領域においてCO₂吸収量・放出量ともに過大評価をする傾向が確認された。今年度はこの問題の原因を特定し、より現実的な値を推定する手法について検討を行った。

初めに、GOSAT-2 XCO₂データ（V01.04/07）に内在すると推定されるバイアスが時空間方向でどのように変動しているかを確認するために、GOSAT XCO₂（V02.97/98）との比較を行った。解

析期間は両データが存在する2019年3月から2020年12月までの22ヶ月間である。陸域におけるGOSATおよびGOSAT-2観測点の時空間方向でのマッチアップをとった結果が図4である。両衛星の観測点が空間方向10 km、時間方向で10分以内に収まる観測データは全期間を通して29点に限定され、60 km・60分で1,896点、90 km・90分で3,440点である（図4a）。両衛星データの時間方向における違いが5分以内の場合は、それ以上に時間差があるデータに比べて平均絶対誤差が小さくなる結果が見られるが（約1.6 ppm）、これは平均絶対誤差が小さい特定の観測点が偶然位置した結果であり、時空間方向と平均絶対誤差の間に有意な傾向は見られなかった（図4b）。全体としてGOSATとGOSAT-2 XCO₂データには約3 ppmの平均絶対誤差が存在することが確認された。

両衛星のマッチアップデータを十分な数で取得することが出来るアフリカ北部および南部の領域に注目し、GOSATとGOSAT-2 XCO₂データの空間分布の違いを確認した。この解析からは、両領域ともGOSAT・GOSAT-2 XCO₂間に濃度差が存在することが確認され、とりわけアフリカ南部におけるGOSAT-2 XCO₂データに大きなバイアスが見られた。この領域では、GOSATに比べGOSAT-2 XCO₂データの濃度が5–10 ppm程度低くなる領域が存在し、この濃度差が時空間方向に変動することがわかった。一方で、GOSATに比べてGOSAT-2 XCO₂データの濃度の方が高くなる領域も存在する。この結果から、全球で均一なオフセットをGOSAT-2 XCO₂データに与えてバイアス補正をするといった簡単な補正方法ではGOSAT-2 XCO₂データのバイアス修正は不十分であり、また、より現実的な吸排出量を推定するためには何らかの補正を行うことが必要であることがわかった。現在は、地上観測データを大気濃度場の参照として使用し、GOSAT-2 XCO₂データ毎の観測誤差を推定することで全球吸排出量を計算する手法を試験中である。

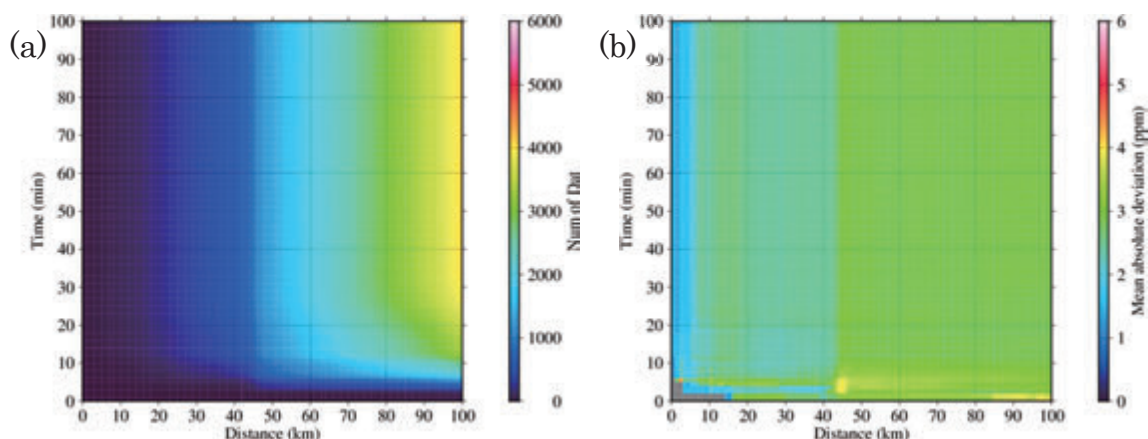


図 4. GOSATおよびGOSAT-2 XCO₂観測データも時空間方向でのマッチアップ結果。(a)観測点数と(b)平均絶対誤差 (ppm) を示す。

参考文献

- Friedlingstein, P., Jones, M. W., O'Sullivan, M., Andrew, R. M., Bakker, D. C. E., Hauck, J., Le Quéré, C., Peters, G. P., Peters, W., Pongratz, J., et al. (2022), Global Carbon Budget 2021. *Earth Syst. Sci. Data*, 14, 1917–2005. <https://doi.org/10.5194/essd-14-1917-2022>
- Niwa Y., Tomita H., Satoh M., Imasu R. (2011), A three-dimensional icosahedral grid advection scheme preserving monotonicity and consistency with continuity for atmospheric tracer transport. *J. Meteorol. Soc. Jpn.*, 89, 255–268, <https://doi.org/10.2151/jmsj.2011-306>
- Niwa Y., Fujii Y., Sawa Y., Iida Y., Ito A., Satoh M., Imasu R., Tsuboi K., Matsueda H., Saigusa N. (2017a), A 4D-Var inversion system based on the icosahedral grid model (NICAM-TM 4D-Var v1.0) – Part 2: Optimization scheme and identical twin experiment of atmospheric CO₂ inversion. *Geosci. Model Dev.*, 10,

- 2201–2219. <https://doi.org/10.5194/gmd-10-2201-2017>
- Niwa Y., Tomita H., Satoh M., Imasu R., Sawa Y., Tsuboi K., Matsueda H., Machida T., Sasakawa M., Belan B., Saigusa N. (2017b), A 4D-Var inversion system based on the icosahedral grid model (NICAM-TM 4D-Var v1.0) – Part 1: Offline forward and adjoint transport models. *Geosci. Model Dev.*, 10, 1157–1174. <https://doi.org/10.5194/gmd-10-1157-2017>
- Saito M., Shiraishi T., Hirata R., Niwa Y., Saito K., Steinbacher M., Worthy D., Matsunaga T. (2022), Sensitivity of biomass burning emissions estimates to land surface information. *Biogeosciences*, 19, 2059–2078. <https://doi.org/10.5194/bg-19-2059-2022>
- 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>
- Shiraishi, T., Hirata, R., and Hirano, T. (2021), New inventories of global carbon dioxide emissions through biomass burning in 2001–2020. *Remote Sensing*, 13(10), 1914. <https://doi.org/10.3390/rs13101914>
- Tang, R., He, B., Chen, H.W., Chen D., Chen, Y., Fu, Y. H., Yuan W., Li, B., Li, Z. Guo, L., et al. (2022), Increasing terrestrial ecosystem carbon release in response to autumn cooling and warming. *Nat. Clim. Chang.* 12, 380–385. <https://doi.org/10.1038/s41558-022-01304-w>
- Tohjima, Y., Patra, P. K., Niwa, Y., Mukai, H., Sasakawa, M., Machida, T. (2020), Detection of fossil-fuel CO₂ plummets in China due to COVID-19 by observation at Hateruma. *Sci. Rep.*, 10, 18688. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-75763-6>

4. まとめ

本課題では大気輸送モデルNICAM-TMとそのNICAM-TMをベースとした逆解析システムNISMOM-CO₂を用いたCO₂の大気濃度、地表面フラックスに関する解析を実施した。グリッド変換スキームを新たに組み込むことでNISMOM-CO₂の高度化を図り、従来よりも高解像度で扱いやすい緯度経度でのフラックス最適化が可能となった。また、NICAM-TMを用いたCOの大気輸送計算を利用して、森林火災起源放出量プロダクトの評価を行った。さらに、GOSAT-2データを用いた逆解析を実施し、GOSATデータなどとの比較を通して、GOSAT-2のバイアスに関する考察を行った。

5. 今後の研究展望

今後はNICAM-TMの高解像度実験を行い、大都市などといったより小スケールにおけるGHGの動態解析およびフラックス推定に取り組む。炭素収支研究のランドマークとなっているGCPの炭素収支解析は、今後も継続的に参加していく予定である。なお、今年度、GCPで用いられた逆解析のプロダクトは6つあったが、そのうちNISMOM-CO₂は日本からの唯一のプロダクトであった。また、より高解像度の逆解析実施にむけて、NICAM-TMのオフライン計算についてさらなる高速化を目指す。

6. 研究成果発表

6.1 誌上発表（査読あり）

- Niwa Y., Sawa Y., Nara H., Machida T., Matsueda H., Umezawa T., Ito A., Nakaoka S.-I., Tanimoto H., Tohjima Y. (2021), Estimation of fire-induced carbon emission from Equatorial Asia in 2015 by using in situ aircraft and ship observations. *Atmos. Chem. Phys.*, 21, 9455–9473. <http://doi.org/10.5194/acp-21-9455-2021>
- Saito M., Shiraishi T., Hirata R., Niwa Y., Saito K., Steinbacher M., Worthy D., Matsunaga T. (2022), Sensitivity of biomass burning emissions estimates to land surface information. *Biogeosciences*, 19, 2059–2078. <https://doi.org/10.5194/bg-19-2059-2022>
- Friedlingstein, P., Jones, M. W., O'Sullivan, M., Andrew, R. M., Bakker, D. C. E., Hauck, J., Le Quéré, C., Peters, G. P., Peters, W., Pongratz, J., et al. (2022), Global Carbon Budget 2021. *Earth Syst. Sci. Data*, 14, 1917–2005. <https://doi.org/10.5194/essd-14-1917-2022>

6.2 誌上発表（査読なし）

なし。

6.3 口頭発表

Niwa Y., Sawa Y., Nara H., Machida T., Matsueda H., Umezawa T., Ito A., Nakaoka S.-I., Tanimoto H. Tohjima Y. (2021), Inverse analysis of fire-induced carbon emission from Equatorial Asia in 2015 with CONTTRAIL and NIES-VOS data. EGU General Assembly 2021

Niwa Y., Sawa Y., Nara H., Machida T., Matsueda H., Umezawa T., Ito A., Nakaoka S.-I., Tanimoto H. Tohjima Y. (2021), Inverse analysis with aircraft and ship observations for estimating CO₂ fluxes in Equatorial Asia. the 10th Asia-Pacific GAW Workshop on Greenhouse Gases

Niwa Y., Machida T., Umezawa T., Tsuboi K., Ishijima K., Fujita R., Matsueda H., and Saito, T. (2021), Asian methane outflow captured by the CONTRAIL flask air samplings. JpGU Meeting 2021

丹羽洋介, 石島健太郎 (2021) NISMON-CO₂の逆解析における任意緯度経度格子での最適化. 第26回大気化学討論会

6.4 その他（書籍等）

遠嶋康徳, 町田敏暢, 伊藤昭彦, 丹羽洋介, 笹川基樹, 向井人史, Prabir K. Patra (2021) プレスリリース「大気観測が捉えた新型ウイルスによる中国の二酸化炭素放出量の変動～ロックダウン解除後は前年レベルに～」2021年11月9日

7. 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

Project name:
Multi-scale modeling of atmospheric greenhouse gases

April 2021 – March 2024

Project leader:
Yosuke Niwa, Earth System Division, National Institute for Environmental Studies

Project members:
Makoto Saito, Hisashi Yashiro, Tazu Saeki, Kazutaka Murakami, Akihide Kamei, Earth System Division, National Institute for Environmental Studies

Abstract:
Understanding the sources and sinks of greenhouse gases (GHGs) is imperative for improving the prediction of global warming. Furthermore, the recent increase in worldwide interest requires science-based information on GHGs to efficiently reduce their emissions. An atmospheric transport model is one prominent tool for evaluating GHG sources and sinks at the earth's surface using data from atmospheric observations of GHGs obtained from ground-based stations, mobile platforms such as aircraft and ships, and satellites. This study utilizes an atmospheric transport model to investigate atmospheric GHGs and estimate their sources and sinks at the surface to provide science-based information for better global warming prediction and effective emissions reduction. We used the atmospheric transport model NICAM-TM and the inverse analysis system named NISMOM-CO₂, which is based on NICAM-TM, to estimate surface carbon dioxide (CO₂) fluxes. Furthermore, NICAM-TM was used with a simplified chemistry module to evaluate biomass burning emissions data by using carbon monoxide (CO) as a proxy for biomass burning. Using atmospheric simulations and CO₂ and CH₄ observations at the Hateruma station, we estimated a 0–20% increase in CO₂ emissions in China for 2021 compared to the previous 9-year average (2011–2019). For the inverse analysis of NISMOM-CO₂, we newly developed a scheme that optimizes fluxes at arbitrary latitude-longitude grids (e.g., 1°×1°) instead of the NICAM's icosahedral grids. Furthermore, the CO simulation revealed that above-ground biomass data have a significant role in the estimates of biomass burning emissions. The inverse analysis with NISMOM-CO₂ revealed significant differences in column-averaged CO₂ mole fractions (XCO₂) between GOSAT and GOSAT-2, indicating biases of GOSAT-2 XCO₂ in the southern part of Africa.

Keywords:
atmospheric transport model, inverse analysis, greenhouse gas, GOSAT

研究課題名：
エアロゾルデータ同化を活用した大気汚染予測システムの構築

実施年度：
令和元年度～令和3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・安井良輔
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
埼玉県環境科学国際センター 原 政之

要旨：

環境問題と気候問題の鍵となる大気汚染物質の時空間分布を高精度で予報するには、観測データを生かしたデータ同化手法を利用することが不可欠であり、本課題ではエアロゾルデータ同化手法を採用した次世代型大気汚染予測システムを構築することを目的とする。これまで大気汚染物質輸送モデル NICAM-Chem に対して、局所アンサンブルカルマンフィルタ（Localized Ensemble Transform Kalman Filter: LETKF）を用いて、衛星から得られたエアロゾル光学的厚さ（Aerosol Optical Thickness: AOT）を同化することで、より高精度なエアロゾル場を計算してきた。本年度は、同化システムの利用を解析して、NICAM-Chem の問題点を抽出し、モデルで改良すべき点を検討した。具体的には、LETKF による2次元量の AOT を同化することで、地表面の PM_{2.5} 濃度がどの程度改善したのかを調べた。その結果、エアロゾル鉛直分布のバイアスと、モデルで計算されたエアロゾル粒径分布のバイアスの可能性が明らかとなった。その他、NICAM-Chem で計算された NO₂ を人工衛星 TROPOMI の結果と比較することで、全球規模でのモデル検証を行った。また、NICAM-Chem とは異なる領域スケールを高分解能で計算することができる SCALE-Chem を用いて、日本アルプスのある長野県を対象としたモデル分解能 5 km のエアロゾルシミュレーションも実現でき、論文を公表できた。

キーワード：
大気汚染物質、同化、LETKF、PM_{2.5}、NO₂、モデル改良、NICAM-Chem、SCALE-Chem

研究課題名：

エアロゾルデータ同化を活用した大気汚染予測システムの構築

実施年度：

令和元年度～令和3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・安井良輔

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

埼玉県環境科学国際センター 原 政之

1. 研究目的

環境問題と気候問題の鍵となる大気汚染物質は、時空間変動が非常に大きい。そのため、大気汚染物質の時空間分布を高精度で予報するには、観測データを生かしたデータ同化手法を利用することが不可欠であり、データ同化手法の導入に対してスーパーコンピュータが必須となるため、エアロゾルデータ同化手法を採用した次世代型大気汚染予測システムの構築を目指す。

キーワード：

大気汚染物質、同化、LETKF、PM_{2.5}、NO₂、モデル改良、NICAM-Chem、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（2021年4月1日～2022年3月31日）

CPU 時間 v_debug :0.00 [VE・hours]

v_normal :101,447.20 [VE・hours]

計 :101,447.20 [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 で大気汚染物質を計算することができる 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

環境問題と気候問題の鍵となる大気汚染物質を高精度で予測するには、観測データを生かしたデータ同化手法を利用することが不可欠である。同化の利点を最大限発揮するためには、同化に用いる観測データの精査と品質管理や、母体となる数値モデルの再現性向上のためのモデル改良は欠かせない。本年度は、同化システム構築によって、母体モデルの問題点を抽出することでモデル改良の指針を検討した。同化システムはスーパーコンピュータを利用しないと計算負荷が大きい LETKF を用いた。LETKF による 2 次元量の AOT を同化することで、地表面の PM_{2.5} 濃度がどの程度改善したのかを調べたところ、エアロゾル鉛直分布のバイアスと、モデルで計算されたエアロゾル粒径分布のバイアスの可能性が明らかとなった。その他、NICAM-Chem で計算された NO₂ を人工衛星 TROPOMI の結果と比較することで、全球規模でのモデル検証を行なった。また、NICAM-Chem とは異なる領域スケールを高分解能で計算することができる SCALE-Chem を用いて、長野県を対象としたエアロゾルシミュレーションも実現でき、論文を公表できた。

3.2 背景と目的

大気汚染は環境問題として 1970 年頃から注目されており、2013 年の PM_{2.5} 騒動を機に、日本では大きな社会問題にもなってきた。その一方で、大気汚染物質の代表的なものであるエアロゾルは、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を与えている。国際的には、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 (Short-Lived Climate Forcers: SLCFs) が注目されている。環境問題と気候問題の鍵となる大気汚染物質は、その時空間変動が非常に大きい。このため、大気汚染物質の時空間分布を高精度で予測するには、観測データを生かしたデータ同化手法を利用することが不可欠である。データ同化手法は一般的にはアンサンブル計算を必要とするため、単一の予測シミュレーションの実行よりも多くの計算量を必要とし、スーパーコンピュータの利用が不可欠となる。

そこで本研究は、エアロゾルデータ同化手法を採用した次世代型大気汚染予測システムのスーパーコンピュータ上での構築を目的とする。その他の目的として、NICAM-Chem のモデル改良を継続的に行うことを挙げる。母体モデルの再現性がデータ同化結果のパフォーマンスに大きく影響することから、より高精度に大気汚染を予測するための継続的なモデル改良は必須である。加えて、予測の高精度化に向けた別のアプローチとしてマルチモデルアンサンブル法の導入を目指し、NICAM-Chem とは異なる領域スケールモデルである SCALE-Chem をスパコン上でも効率的に稼働させ、その精度向上を図る。

3.3 計算方法

3.3.1 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、局所アンサンブルカルマンフィルター (Localized Ensemble Transform Kalman Filter: 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。同化に用いた観測データは、気候変動観測衛星であるしきさい (GCOM-C) に搭載された SGLI センサーから得られた AOT Version 2 (Yoshida et al., 2021) である。昨年度も同様の計算を実施し、論文 (Cheng et al., 2021) として公表することができたが、本年度は積分対象期間を 1 週間延長すると共に、同化に用いていない観測データ (NASA による AERONET による AOT (Holben et al., 1998) と環境省大気汚染物質広域監視システムによる地上 PM_{2.5} 濃度) との比較を新たに行うことで、エアロゾル時空間分布のモデル再現性を詳細に検証した。モデル分解能は 56km、実施した数値実験はエアロゾル同化ありと同化なしの 2 種類である。実験対象期間は 2018 年 3 月 23 日から 4 月 9 日までの 18 日間とした。風の場合は NCEP-FNL データをナッジングした。エアロゾルの排出量インベントリは、人為起源は HTAP v2 (Janssens-Maenhout et al., 2015)、森林火災起源は GFEDv3.1 (van der Werf et al., 2006) を外部データとして与え、土壌粒子および海塩粒子はモデ

ル内部で発生させる。

3.3.2 微量気体シミュレーション

2020年度より開始した所内公募課題A（代表：五藤大輔）と連携して、SLCFにある微量気体に関してもNICAM-Chemで計算を開始した。NICAM-Chemで計算する微量気体の計算モジュールはMIROC-CHASER（Sudo et al., 2002）をベースとしている。NICAM-Chemで計算された微量気体はまだ検証が不十分であるため、昨年度に引き続き、NICAM-Chemを全球解像度56 kmの計算結果を用いた検証を実施した。特に今年度は、2019年を対象とし、人工衛星Sentinel-5Pに搭載されたTROPOMIセンサーによって得られたNO₂の鉛直積算量に関する比較を実施した。排出量インベントリは、人為起源のものはHTAP v2（Janssens-Maenhout et al., 2015）、森林火災起源はGFEDv3.1（van der Werf et al., 2006）である。

3.3.3 SCALE-Chem

NASA/AERONETはDRAGON（Distributed Regional Aerosol Gridded Observation Networks）と呼ばれる放射計を密に設置した大規模大気集中観測を世界中で実施している。2020年春季から、長野県の日本アルプスにおいて、放射計や大気汚染物質濃度測定機器などを用いた集中観測（DRAGON-JALPS）が進められている。2020年3月には伊那盆地にて携帯放射計やPM_{2.5}計測器、シーロメータを用いた現地観測を実施した。得られた観測データと領域エアロゾル輸送モデル（SCALE-Chem）を用いた比較検証や山岳や盆地など地形のエアロゾルへの影響把握を行った。SCALE-Chemのモデル解像度は5 kmとし、ネスト境界にはNHM-Chemの結果を利用した。モデル検証は、2020年3月1日から23日を対象とし、長野県伊那盆地を対象として行われたDRAGON JALPS集中観測で得られたエアロゾル観測情報を利用した。排出量インベントリは、人為起源のものはREASv2（Kurokawa et al., 2013）である。エアロゾル及び長野周辺の山岳の効果を調べるために、3種類の実験（E1：標準実験、E2：地形データを用いず山岳のない状態の感度実験、E3：長野県内の人為起源エアロゾルの排出がない状態の感度実験）を実施した。山岳の効果（Mt. Effect）は（E1-E2）/E1の相対比で、長野県内の排出の効果（Local effect）は（E1-E3）/E3の相対比を計算し、地表面PM_{2.5}濃度の評価を行なった。なお本研究成果は、Nakata et al., (2021)として公表している。

3.4 結果

3.4.1 エアロゾルデータ同化

NICAM-Chemで計算されたAOTの同化した結果が観測結果に近づいたかを調べるために、同化には用いていない、地上観測AERONETのAOTを検証データとして利用した。複数の地点での比較を実施したが、ここでの議論は福岡と大阪の2地点とする。図1の結果から、福岡では3月31日から4月1日にかけてAOT高値がAERONETで観測されたが、この高値は同化ありのシミュレーションでしか再現されていなかった。また大阪でも同期間にAOT高値がAERONETで観測され、同化ありのシミュレーション結果がやや過大評価ながらも比較的よく再現できた。AOTはエアロゾル鉛直積算量であるため、人間生活により影響が大きい地上付近でのエアロゾル濃度がどうなっていたのかははっきりわからない。そこで地上付近のPM_{2.5}濃度の観測データを用いて、モデル結果の検証を実施した。

図2は、関西地方と北九州地方における地上付近のPM_{2.5}濃度の時系列変化を示している。3月29日の北九州や4月2日の関西において見られるAOT高値の結果をよく見ると、同化ありのPM_{2.5}濃度が観測結果に近づいているが、かなり過小評価であった。さらにモデルで計算されたPM₁₀（粒径10 μm以下のエアロゾル）濃度は、モデルで計算されたPM_{2.5}濃度よりも観測されたPM_{2.5}濃度に近かった。AOTで同化したので、モデルのAOTが正しいと仮定すると、地上付近のPM_{2.5}濃度の過小評価は、次の2つの要因が考えられる。1つは、エアロゾル濃度が高い層の存在によるエアロゾル鉛直分布のバイアスである。もう1つは、モデルで計算されたエアロゾル粒径分布の再現性にバイアスがあり、特に粗大粒子に対して微小粒子が過小評価である可能性もある。また、同化結果のAOTが過大評価の場合である場合でも上記の要因が該当する。問題点が明らか

かとなってきたが、全体としては、2次元量である AOT を同化することで、エアロゾルの 3 次元分布の再現性も向上し、地上付近 PM_{2.5} 濃度の再現性も概ね向上することが示された。

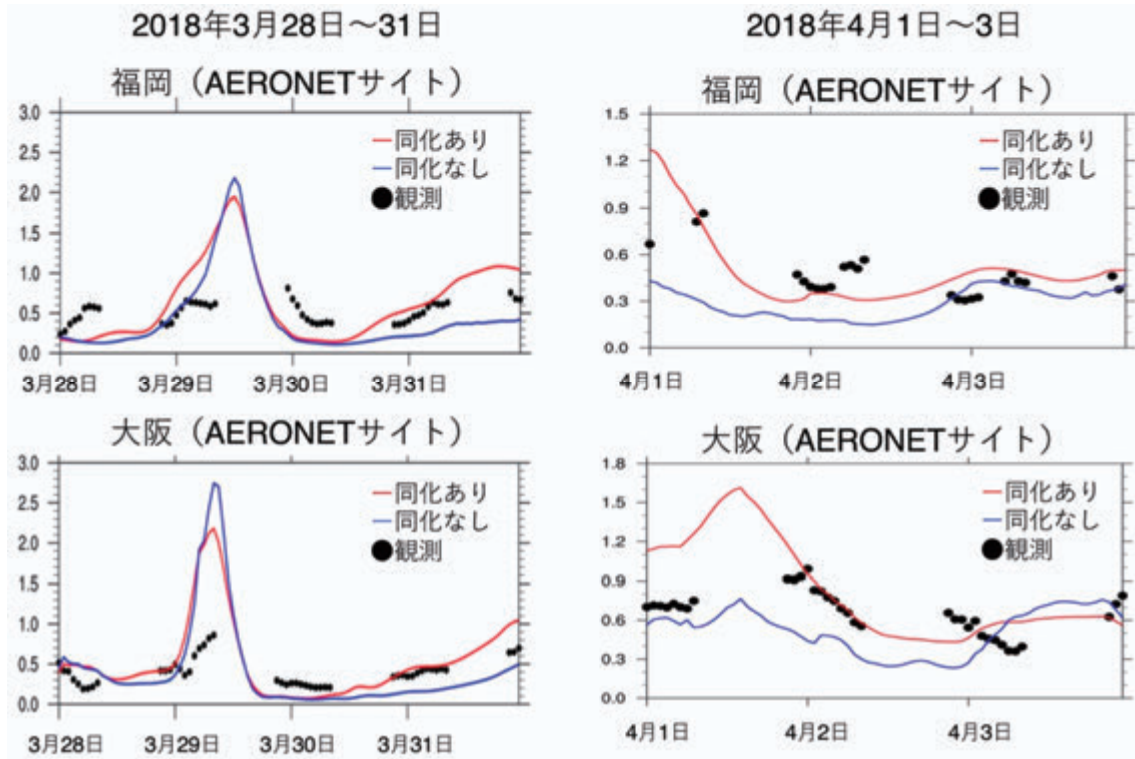


図 1. NICAM-Chem で計算した AOT の時系列変化。比較場所は、福岡と大阪にある AERONET サイトである。対象期間は 2018 年 3 月 28 日～31 日と 2018 年 4 月 1 日～3 日である。なお、2018 年 3 月 28 日～31 日の結果は、Cheng et al. (2021)の図 6 を引用し、日本語表記とした。

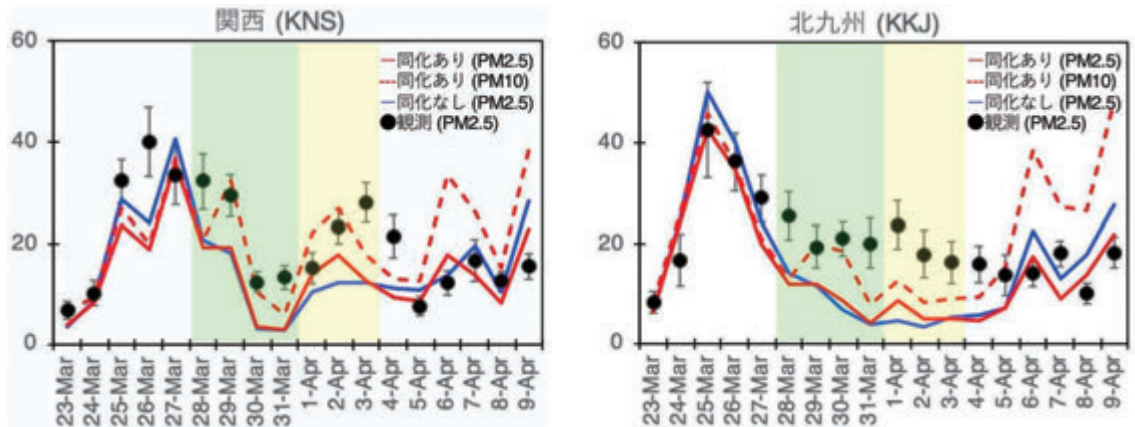


図 2. 地上付近の PM_{2.5} 濃度の時系列分布。比較場所は、気象庁の天気予報で区分された全国 10 地方のうちの関西と北九州である。シミュレーション結果は 3 つ示しており、同化ありの PM_{2.5} 濃度、同化ありの PM₁₀ 濃度、同化なしの PM_{2.5} 濃度である。観測結果は環境省大気汚染物質広域監視システムによって観測されたものである。緑の背景部分の期間が図 2 の前半部分の期間（2018 年 3 月 28 日～31 日）、黄色の背景部分の期間が図 2 の後半部分の期間（2018 年 4 月 1 日～3 日）である。

3.4.2 微量気体シミュレーション

NICAM-Chem で計算された NO₂ の鉛直積算量のモデル結果の検証を行った。この NO₂ は、TROPOMI のリトリバルで用いられたアベレージングカーネルを利用して導出した。図 3(a) と (b) には NO₂ の年平均全球分図を示しており、図 3(c)には TROPOMI と NICAM-Chem の関係性をプロットしたものである。全球分布を見ると、都市部での極大と、海洋での極小といった不均一分布はよく再現されていた。しかし、図 3(c)からわかるように、NO₂ が多いところ（つまり都市部）で過大評価傾向があり、NO₂ が少ないところ（つまり海洋や陸上の非都市部）で過小評価傾向が見られた。統計指標は、相対誤差が 1.16、相関係数が 0.82、RMSE が 4.85×10^{14} molecule cm⁻²（平均値に対して 10%程度の不確実性）であることがわかった。モデル再現性には改善の余地はあるものの、概ね良好な結果であるといえる。

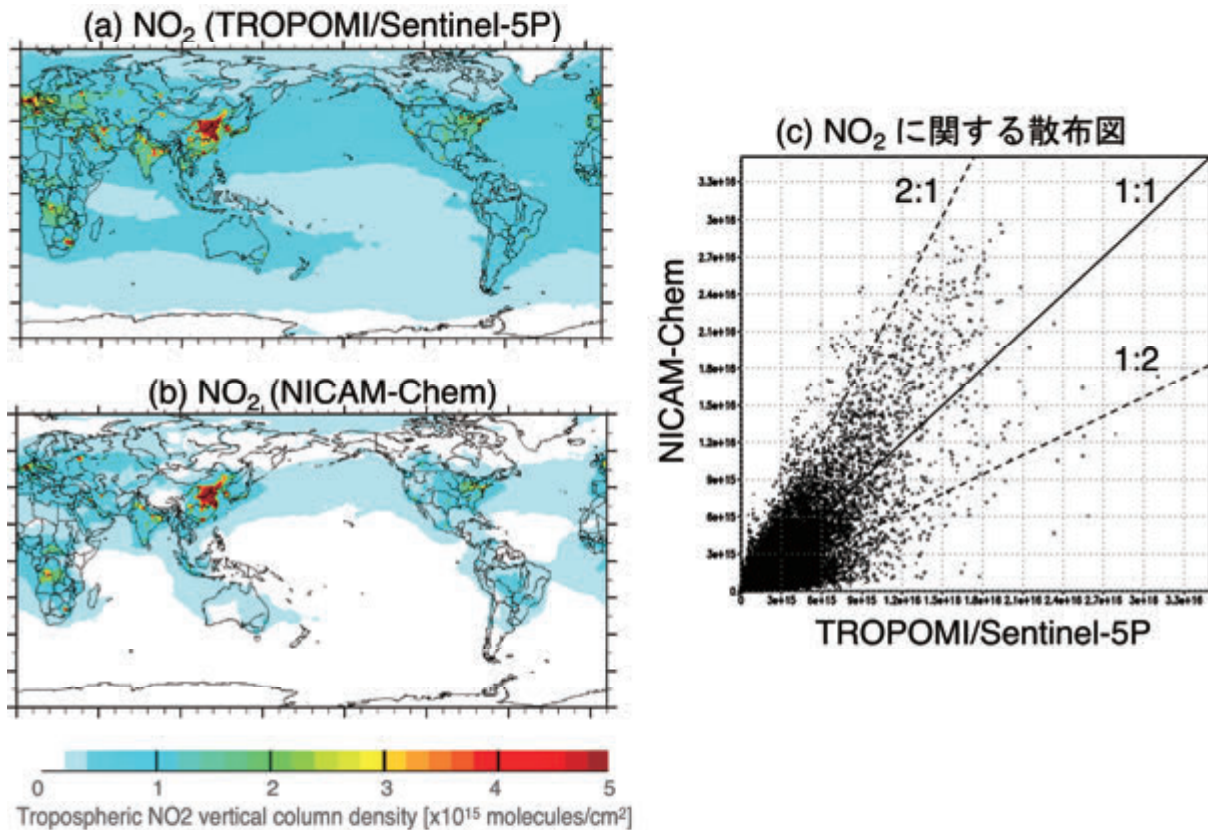


図 3. (a) Sentinel-5P に搭載された TROPOMI センサーで観測された NO₂ 鉛直積算量の年平均分布、(b) NICAM-Chem で計算された NO₂ 鉛直積算量の年平均分布、(c) NO₂ に関する TROPOMI と NICAM-Chem の散布図。

3.4.3 SCALE-Chem

SCALE-Chemの3種類のPM_{2.5}シミュレーションから、山岳効果 (Mt effect) と長野県内の排出の効果 (Local effect) を見積もった。図4には、J-ALPSサイトで平均した日平均のMt effectとLocal effectを示している。Mt effectはマイナスの日もあれば、プラスの日もあり、プラスになる日はLocal effectも大きいことが多い。図5に Mt effectがマイナスとなる日の例として2020年3月20日、Mt effectがプラスとなる日の例として2020年3月9日のPM_{2.5}濃度分布を示した。2020年3月の結果から、山岳がエアロゾルの流入を抑えている場合もあれば、長野県内の排出により山間部の盆地にエアロゾルが溜まりやすい日には、山岳がエアロゾルの滞留に寄与している場合もあることがわかった。

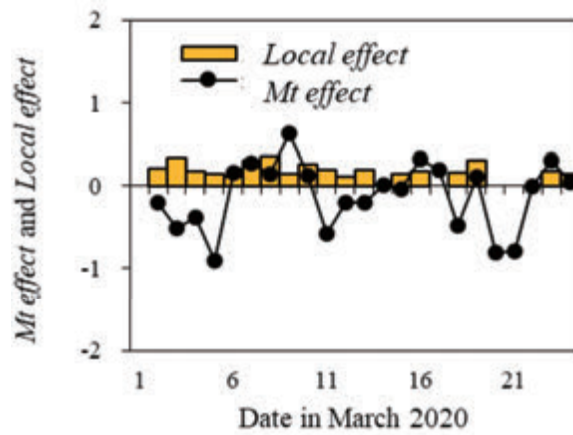


図 4. J-ALPS サイトで平均した Mt effect と Local effect の日平均値。Mt effect は線グラフ、Local effect は 0.1 以上の値を棒グラフで示している。図は Nakata et al., (2021)から引用している。

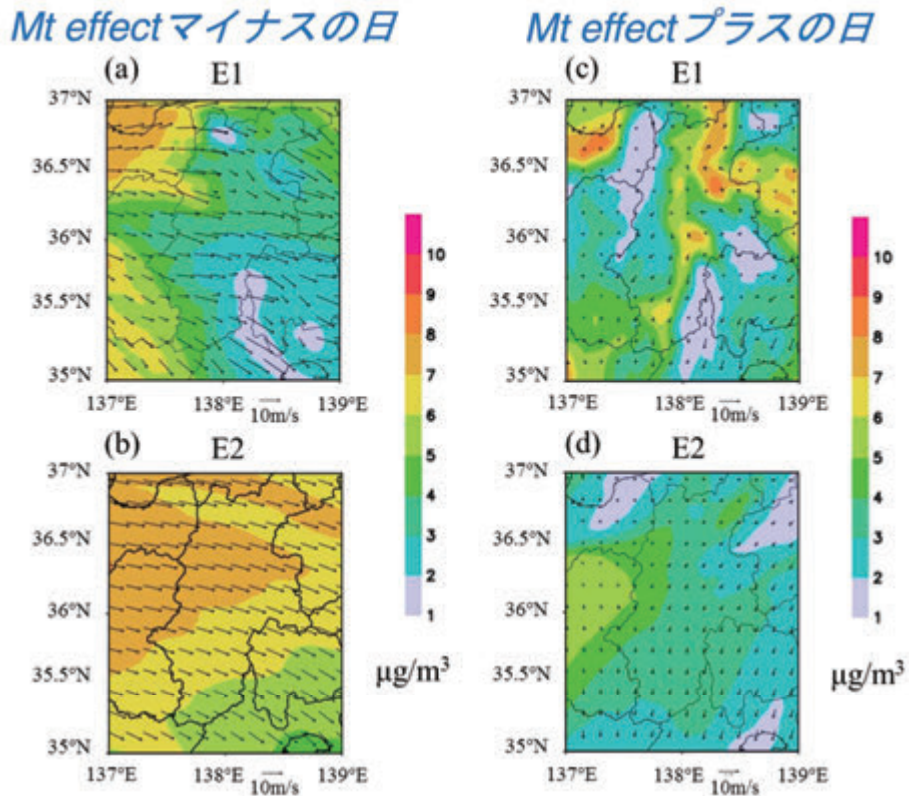


図 5. SCALE-Chem で計算した PM_{2.5} 濃度分布と地上付近の風。(a), (b) E1 と E2 の 2020 年 3 月 20 日 6:00-10:00 (日本時間) 平均で、(c), (d) E1 と E2 の 2020 年 3 月 9 日 6:00-10:00 (日本時間) 平均である。図は Nakata et al., (2021)から引用している。

参考文献

- Cheng, Y., Dai T., Goto D., Murakami H., Yoshida M., Shi G., Nakajima T. (2021), Enhanced simulation of an Asian dust storm by assimilating GCOM-C observations. *Remote Sensing*, 13(15), 3020. <https://doi.org/10.3390/rs13153020>
- 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., Kaufman Y., Nakajima T., Lavenu F., Jankowiak I., and Smirnov A. (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>
- Janssens-Maenhout G., Crippa M., Guizzardi D., Dentener F., Muntean M., et al. (2015), HTAP_v2.2: A mosaic of regional and global emission grid maps for 2008 and 2010 to study hemispheric transport of air pollution. *Atmos. Chem. Phys.*, 15(19), 11411-11432. <https://doi.org/10.5194/acp-15-11411-2015>
- Kurokawa J., Ohara T., Morikawa T., Hanayama S., et al. (2013), Emissions of air pollutants and greenhouse gases over Asian regions during 2000-2008: Regional Emission inventory in Asia (REAS) version 2. *Atmos. Chem. Phys.*, 13, 11019-11058. <https://doi.org/10.5194/acp-13/11019-2013>
- Satoh M., Tomita H., Yashiro H., Kodama C., Seiki T., Noda A. T., Yamada Y., Goto D., Sawada M., Miyoshi 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>
- 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>
- van der Werf, G. R., Randerson J. T., Giglio L., Collatz G. J., Kasibhatla P. S., Arellano Jr. A. F. (2006), Interannual variability in global biomass burning emissions from 1997 to 2004. *Atmos. Chem. Phys.*, 6(11), 3423-3441. <https://doi.org/10.5194/acp-6-3423-2006>
- 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>

4. まとめ

本年度は、同化システム構築によって、母体モデルの問題点を抽出することでモデル改良の指針を検討した。具体的には、LETKFによる2次元量であるエアロゾル光学的厚さの同化によって、地表面のPM_{2.5}濃度がどの程度改善したのかを調べた。その結果、エアロゾル鉛直分布のバイアスと、モデルで計算されたエアロゾル粒径分布のバイアスの可能性が明らかとなった。その他、NICAM-Chemで計算されたNO₂を人工衛星TROPOMIの結果と比較することで、全球規模でのモデル検証を行なった。また、NICAM-Chemとは異なる領域スケールを高分解能で計算することができるSCALE-Chemを用いて、長野県を対象としたエアロゾルシミュレーションも実現でき、論文を公表できた。

5. 今後の研究展望

本年度は最終年度であるので、課題開始前からの進展をまとめたい。まず、大気汚染予測の母体モデルであるNICAM-Chemに関しては、O (10km)の領域高分解能でも良い再現性が得られることを示すことができた。微量気体に関しては、全球56km分解能で10年近くの長期積分を初めて実施することができ、その基本的な大気化学場の検証を行うことができた。モデル改善のための問題点を抽出することもできたので、今後も継続してモデル改良を行いたい。同化に関しては、LETKFを用いたエアロゾル同化の開発に関して、新しいエアロゾル衛星成果物(GCOM-C/SGLI, ひまわり/AHI, CALIPSO/CALIOP等)を複数用いた同化を実施することができた。今後は、GOSATシリーズを含めた別の衛星や、複数同時のエアロゾル成果物を用いた同化を進めてい

きたい。SCALE-Chem を用いたエアロゾルシミュレーションも実現できるようになり、大気汚染予測に役立てられるように、今後も検討を重ねていきたい。

6. 研究成果発表

6.1 誌上発表(査読あり)

Goto D., Uchida J. (2022), Uncertainty in Aerosol Rainout Processes Through the Case of the Radioactive Materials Emitted by the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant in March 2011. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 100(1), 197-217. <https://doi.org/10.2151/jmsj.2022-010>

Fang S., Zhuang S., Goto D., Hu X., Sheng L., Huang S. (2022), Coupled modeling of in- and below-cloud wet deposition for atmospheric ¹³⁷Cs transport following the Fukushima Daiichi accident using WRF-Chem: A self-consistent evaluation of 25 scheme combinations. *Environment International*, 158, 106882. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.106882>

Nakata M., Kajino M., Sato Y. (2021), Effects of mountains on aerosols determined by AERONET/DRAGON/JALPS measurements and regional model simulations. *Earth and Space Science*, 8, e2021EA001972. <https://doi.org/10.1029/2021EA001972>

6.2 誌上発表 (査読なし)

該当なし。

6.3 口頭発表

該当なし。

6.4 その他 (書籍等)

該当なし。

7. 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: 029-858-2580
E-mail: goto.daisuke@nies.go.jp

Project name:

Aerosol model simulation for analysis of GOSAT and GOSAT-2 data

April 2019 – March 2022

Project leader:

Daisuke Goto, Regional Environment Conservation Division, National Institute for Environmental Studies

Project members:

Seiji Sugata, Regional Environment Conservation Division, National Institute for Environmental Studies

Hisashi Yashiro, Earth System Division, National Institute for Environmental Studies

Tie Dai & Yueming Cheng, State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics (LASG), Institute of Atmospheric Physics (IAP), Chinese Academy of Sciences (CAS)

Nick Schutgens, Faculty of Science, Earth and Climate, Vrije Universiteit Amsterdam

Keiya Yumimoto & Ryosuke Yasui, Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University

Yousuke Sato, Faculty of Science, Hokkaido University

Makiko Nakata, Faculty of Applied Sociology, Kindai University

Mizuo Kajino, Meteorological Research Institute

Masayuki Hara, Center for Environmental Science in Saitama

Abstract:

Air pollution is the key to environmental and climate issues. To forecast its spatio-temporal distribution more accurately, a data assimilation technique using measurements is required. The purpose of this project is to develop a system for atmospheric forecasting using the data assimilation in an air pollution transport model (NICAM-Chem) as the next-generation system. So far, the Localized Ensemble Transform Kalman Filter (LETKF), which is one of the data assimilation techniques, has been applied to NICAM-Chem using Aerosol Optical Thickness (AOT) to reproduce the realistic spatio-temporal distribution of air pollution. This year, we analyzed the assimilation results, extracted the problems of the NICAM-Chem simulation, and examined the points that should be improved in NICAM-Chem. Specifically, we examined how the surface PM_{2.5} mass concentrations improved by assimilating 2-dimensional AOT using LETKF. We found possible model biases of both the vertical aerosol profile and the aerosol size distribution of the model. We also validated the global NICAM-Chem simulation by comparing the simulated NO₂ with TROPOMI (TROPOspheric Monitoring Instrument)-retrieved results. In parallel, we performed simulations using the SCALE-Chem model, which can simulate aerosols on a regional scale, with 5 km grid spacing in the Japan Alps, Nagano prefecture, and published the results in the literature.

Keywords:

atmospheric pollution, assimilation, LETKF, PM_{2.5}, NO₂, model development, NICAM-Chem, SCALE-Chem

Project name:
Numerical study on cloud systems using NICAM

April 2021 – March 2022

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
Tempei Hashino, School of Environmental Science and Engineering, Kochi University of Technology

Abstract:

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

This year, we 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 cloud profiling radar on the ground. We examined the results of the EarthCARE CPR, which were simulated by NICAM and the Joint Simulator before the launch of the EarthCARE satellite.

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

Project name:
Numerical study on cloud systems using NICAM

April 2021 – March 2022

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
Tempei Hashino, School of Environmental Science and Engineering, Kochi University of Technology

1. Research objectives

It is important to reproduce realistic cloud precipitation systems of numerical models to improve the prediction skills of climate models and data assimilation of satellite data. The global non-hydrostatic model NICAM (Non-hydrostatic ICosahedral Atmospheric Model) can 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 hydrological cycles. This research aims at evaluating the cloud precipitation systems of NICAM using satellite data and a satellite simulator to understand the physical processes of clouds and precipitation.

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

2. Record of supercomputer use

2.1 Devoted computing time (April 1, 2020 – March 31, 2021)

CPU hours	v_debug	: 0.00 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 statistics 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 evaluated the riming process and the graupel size distribution in a single-moment microphysics scheme in NICAM using a 94 GHz Doppler cloud profiling radar (CPR) on the ground for the ULTra-sIte for Measuring the Atmosphere of the Tokyo metropolitan Environment (ULTIMATE) project. We investigated the effect on the vertical profiles of Doppler velocity by sensitivity tests related to graupel. We also discussed how to apply these evaluation results related to different observation window settings of the EarthCARE CPR using the Joint Simulator.

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 by the European Space Agency (ESA) and Japanese Aerospace Exploration Agency (JAXA). The EarthCARE has multiple passive and

active sensors in the same body to investigate clouds, aerosols, precipitation, and associated radiation budgets. It has a Cloud Profiling Radar (CPR), ATmospheric LIDar (ATLID), Multi-Spectral Imager (MSI), and Broad Band Radiometer (BBR). The CPR of EarthCARE has Doppler capability to provide information on the terminal velocity of rain and ice and convective motions. Furthermore, multiple sensors have synergy to understand the interaction between clouds and aerosols and provide new insights into the evaluation of Global cloud-resolving models (GCRMs) such as the Nonhydrostatic ICosahedral Atmospheric Model (NICAM, Satoh et al., 2014).

The GCRMs also help the satellite group to provide information about the tests of plausible data and the evaluation of retrieval algorithms in the planning stages and before the launch of a satellite. These kinds of satellite simulations using GCRMs or GCMs are called the Observing System Simulation Experiments (OSSE). For example, the EarthCARE-like radiances are simulated by NICAM and a joint simulator for satellite sensors (Joint Simulator, Hashino et al., 2013), and they have been used to develop the retrieval algorithm of the EarthCARE satellite.

Satellite data have limitations due to the lack of active sensors and the difficulty in long-term observation in a specific area and in tracking the precipitation systems. Ground observations are helpful to overcome these limitations. The ground remote-sensing observational data are relatively concentrated in metropolitan areas because they are used for preventing disasters. The ULTra-sIte for Measuring the Atmosphere of the Tokyo metropolitan Environment (ULTIMATE) project is proposed to use these intensive observational 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 that detect the vertical distributions of clouds and precipitation and provide 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. Several radars are used in the Tokyo Metropolitan Areas like c-band, x-band polarimetric radars, and w-band cloud radars. The Wind profiler Network and Data Acquisition System (WINDAS, Ishihara et al., 2006) data are available to analyze the vertical profiles of wind. The synergy of intensive ground remote sensing observations and satellite data contributes to the understanding of microphysical processes and improvements in microphysics in the GCRMs.

In the previous year, we introduced the preliminary evaluation results of NICAM using a 94 GHz Doppler CPR in NICT and 5.3 GHz polarimetric radars at Narita and Haneda airports.

In this fiscal year, we introduced the results of the sensitivity tests of microphysics related to graupel and investigated the effect on the vertical profiles of Doppler velocity using the NICT CPR. We examined the results of the EarthCARE CPR, which were simulated by NICAM and the Joint Simulator before the launch of the EarthCARE satellite.

3.3 Data and methodology

We evaluated the clouds and precipitation fields simulated by the NICAM. We followed the approach by 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 kinds of resolutions: NICAM GLevel 8 (GL8) and NICAM GLevel 10 (GL10). The GL8 has a minimum resolution of 2.4 km for all the results except that in Fig. 3.5, and the NICAM GLevel 10 (GL10) has a minimum resolution of 700 m for the snapshot of the cross-section in Fig.3.5. We simulated three cases of rain events in September 2019. The first case (Case 1) was the tropical cyclone (TC) Faxai. The second case (Case 2) was the extratropical cyclone with comma precipitation. The third was a Predecessor Rain Event (PRE) related to a tropical cyclone. The integration time for Case 1 was from 00 UTC on 8 September to 00 UTC on 11th September 2019. The integration time for Case 2 was from 06 UTC on 15 September to 06 UTC on 18th September 2019. Finally, the integration time for Case 3 was from 00 UTC on 20 September to 00 UTC on 23rd September 2019. In this study, we mainly focused on the results of NICAM GL8.

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

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

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

3.4 Sensitivity tests

In the previous fiscal year, we compared the evaluation results of the Contoured Frequency by Altitude Diagrams (CFADs) of radar reflectivity and Doppler velocity between observations and NICAM for Case 1. We found several issues related to the CFADs of the Doppler velocity, such as the riming process from 5 km to 8 km in the observations. The observations showed a high fraction with a Doppler velocity lower than 2 m/s from the riming process. NICAM does not show this characteristic. The other issue was the increase in the Doppler velocity from 4 km to the ground in NICAM. The observations do not show this pattern. We speculate that this bias is from the evaporation and coalescence processes of rain. In this report, we mainly focus on improving the riming process related to graupel.

We expanded the three cases using the CFADs of Doppler velocity (Fig. 3.1). Case 1 shows a dominant riming process related to the square in Fig. 3.1 a, but Case 2 and Case 3 do not show high frequencies of the square area like Case 1. The NICAM simulation shows an underestimation of the riming process for Case 1, but good agreement with the observations for Case 2 and Case 3.

First, we aimed at improving the riming process for Case 1. We prepared two kinds of experiments: increases in graupel size and increases in the graupel amount. The particle size of graupel followed the negative exponential distribution:

$$N(D) = N_{0G} \exp[-\lambda D]$$

where N_{0G} is the intercept parameter of graupel, D is the diameter, and λ is a slope parameter. The first changed parameter is N_{0G} . We decreased the N_{0G} from 4×10^8 (4.E8) to 4×10^6 (4.E6) every 10 times. It affected the increase in large-sized graupel as a decrease in N_{0G} .

The collection of snow by graupel (PGACS) is described as

$$P_{GACS} = E_{GS} \frac{1}{\rho} \int_0^{\infty} \frac{\pi}{4} (D_S + D_G)^2 |V_S(D_S) - V_G(D_G)| \times m_S(D_S) n_S(D_S) m_G(D_G) n_G(D_G) dD_S dD_G$$

where E_{GS} is the collection efficiency, and the subscripts s and g denote snow and graupel. V , $m(D)$, and $n(D)$ are the terminal velocity, mass, and number concentration of each particle, respectively. The second parameter is the maximum of E_{GS} called the collection efficiency of snow by graupel. The default value is 0, which was optimized for the open ocean. We increased the maximum E_{GS} to 0.1 and 1 as shown in Fig. 3.2 (the solid line means $ME_{GS} = 0.1$ and the dotted line means $ME_{GS} = 1$ in Fig. 3.2).

Figure 3.3 shows the results of the sensitivity tests. When we increased the ME_{GS} , ME_{GS} controlled the fraction of graupel and the top height of the riming areas. The upper figures in Fig. 3.3 show the increase of the top height from 8 km to 10 km in the riming areas with a Doppler velocity lower than -2 m/s. The frequencies of the riming areas also increased with the increase in ME_{GS} .

The decrease in N_{0G} was related to the increase in large graupel in the fixed ice water content of graupel. The decrease in N_{0G} reduced the minimum Doppler velocity, which means an increase in the terminal velocity of ice hydrometeors (the right figures in Fig. 3.3). It affected the decrease in the top height of the riming areas. This implies that an increase in large graupel induces a shorter lifetime for ice hydrometeors from the fast terminal velocity than the smaller N_{0G} .

We expanded the experiment with 4.E7 for N_{0G} and 0.1 for ME_{GS} to Cases 2 and 3 (Fig. 3.4). The setting related to the increase in the graupel fraction also affected Case 1. These settings overestimated the graupel fraction for Cases 2 and 3. We think it is necessary to determine a universal setting related to the riming process for weak precipitation cases. We will use the vertical velocity data to optimize N_{0G} and ME_{GS} to avoid the case dependencies.

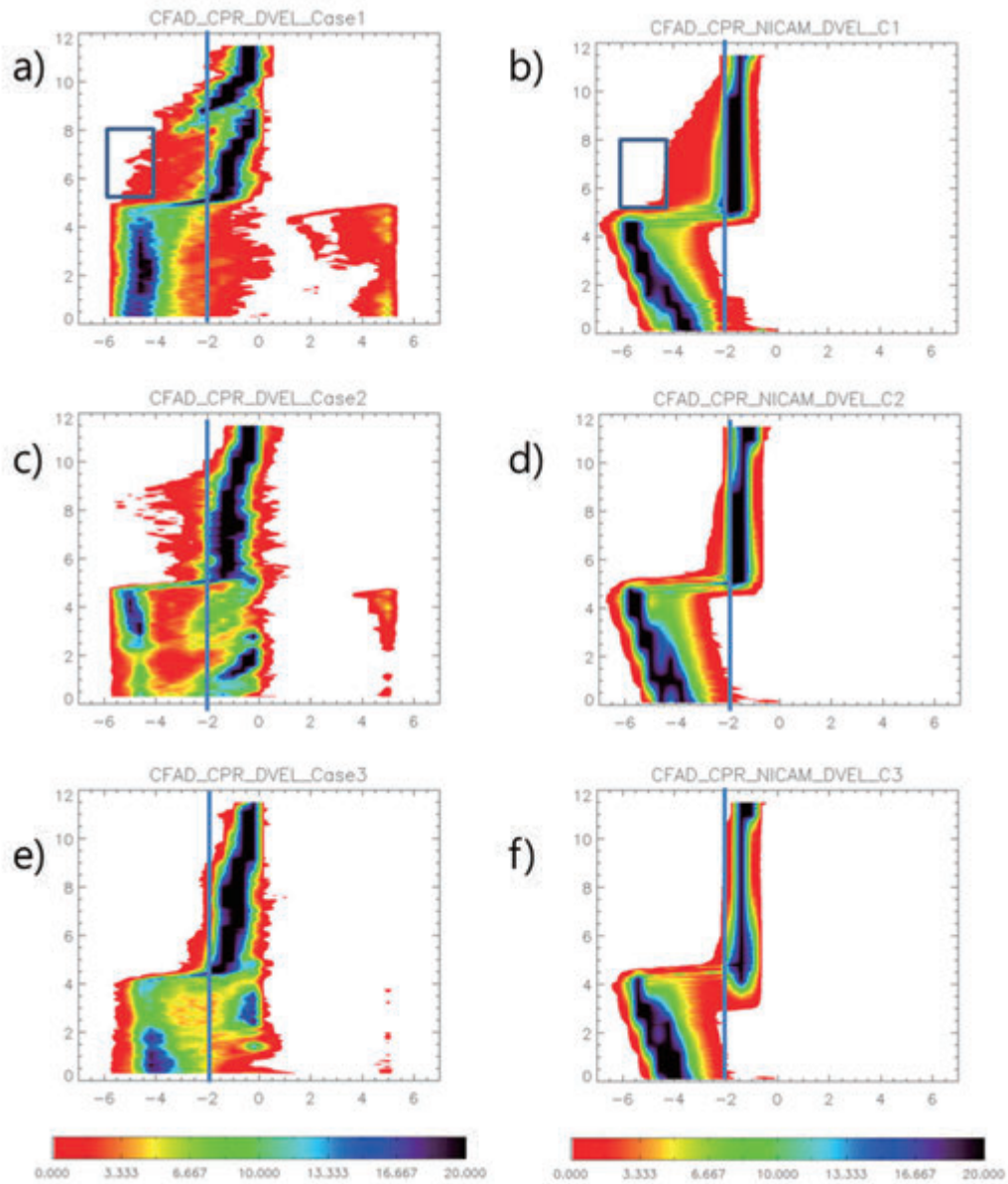


Fig. 3.1 Contoured Frequency by Altitude Diagrams (CFADs) of Doppler velocity between NICT CPR (left) and NICAM GL8 (right) for Case 1 (top), Case 2 (middle), and Case 3 (bottom). The unit of the y-axis is km. The unit of the x-axis is m/s (Doppler velocity).

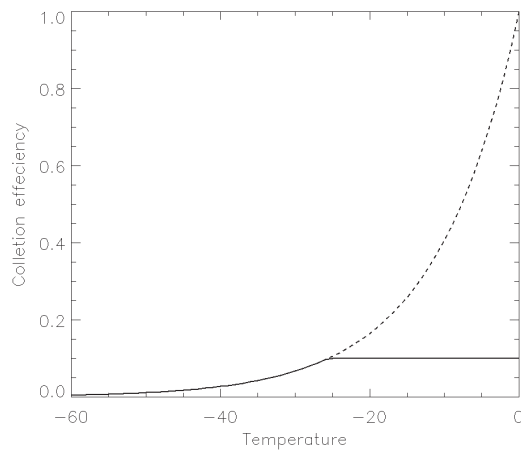


Fig. 3.2 Collection efficiency of snow by graupel in terms of temperature for the sensitivity test. The solid line is when the maximum collection efficiency (ME_{GS}) is set to 0.1, and the dotted line is when the ME_{GS} is set to 1.

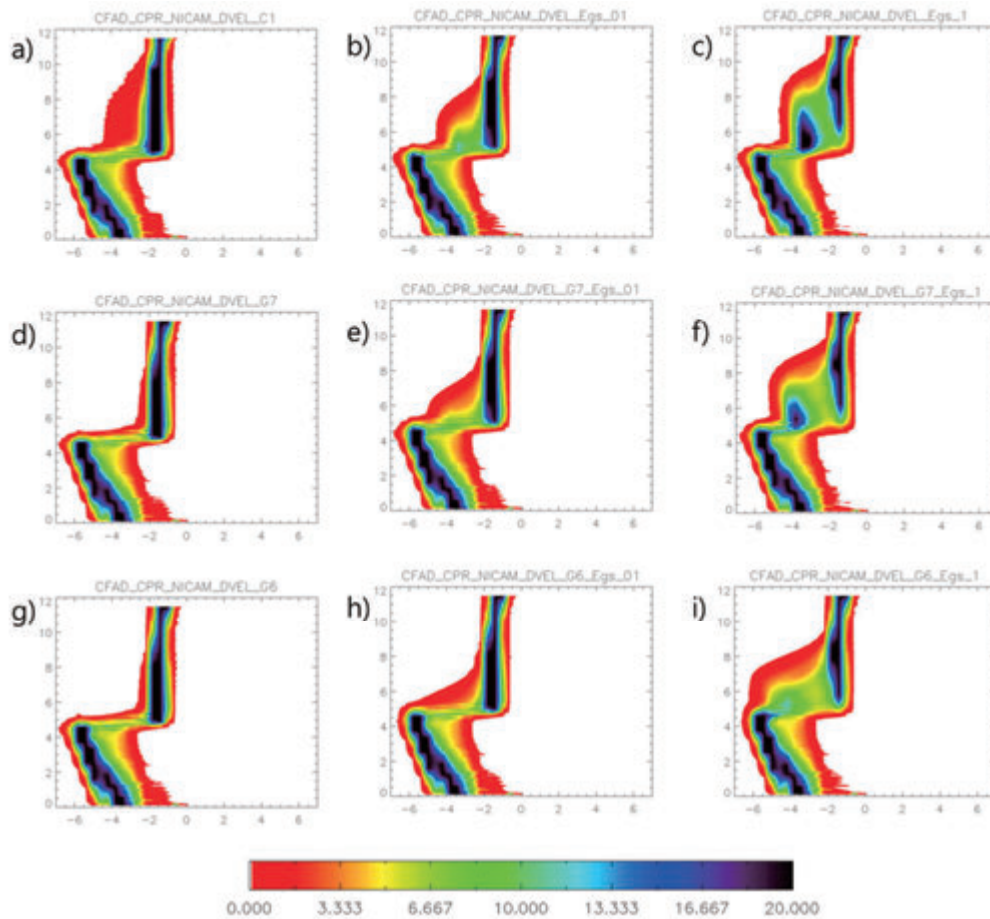


Fig. 3.3 CFADs of Doppler velocity depending on N_{0G} and ME_{GS} for Case 1. Top: $N_{0G} = 4.E8$, middle: $N_{0G} = 4.E7$, and bottom: $N_{0G} = 4.E6$. Left: $ME_{GS} = 0$, center: the solid line in Fig. 3.2, $ME_{GS} = 0.1$, and right: the dotted line in Fig. 3.2, $ME_{GS} = 1.0$. The unit of the y-axis is km. The unit of the x-axis is m/s (Doppler velocity).

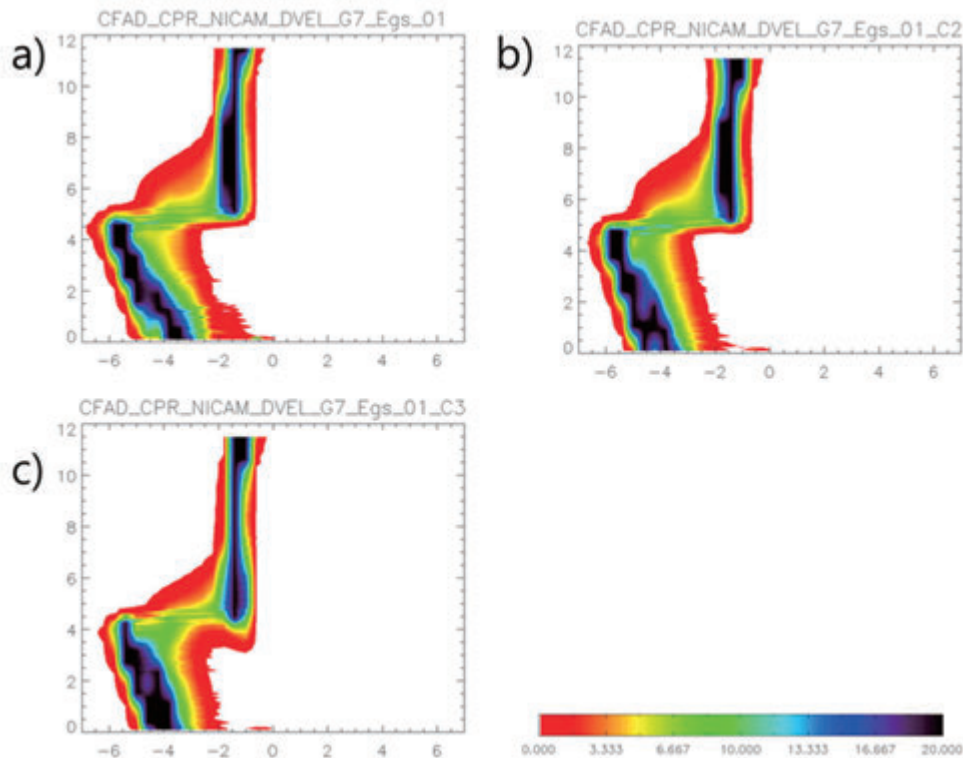


Fig. 3.4 CFADs of Doppler velocity with $N_{0G} = 4.E7$ and $ME_{GS} = 0.1$ for Case 1 (a), Case 2 (b), and Case 3 (c).

3.5 Applications to the EarthCARE CPR

The Joint Simulator can simulate a realistic signal like the EarthCARE CPR with possible random errors (Hagihara et al., 2021). There are two modes of the observation window: high mode and low mode. The high mode has a 20 km observation window but lower PRFs than the low mode. The low mode has a 16 km observation window but a better accuracy of Doppler velocity from the higher PRFs than the high mode. Figure 3.5 shows examples of the Doppler velocities with no errors, errors of the high mode, and errors of the low mode. The results of the low mode show a better performance of Doppler velocity resembling a true Doppler velocity than the results of the high mode. The range between the maximum and minimum Doppler velocities is larger than that in the high mode. However, the low mode can observe clouds below 16 km, but it has a critical issue in the low-latitude areas.

We prepared two experimental sets, a control set and an increase of the graupel fraction from the previous sensitivity tests for Case 1. The control experiment (CON) had $N_{0G} = 4.E8$ and $ME_{GS} = 0$, and the modified experiment (MODI) had $N_{0G} = 4.E7$ and $ME_{GS} = 0.1$. The MODI showed more frequencies related to graupel and riming areas at 5-10 km altitude and a Doppler velocity lower than -2 m/s than CON (Fig. 3.3a, e). These results also are similar to the results from simulations of the EarthCARE CPR (Fig. 3.6a, b). For realistic results, we applied possible random errors based on the low mode. These random errors broadened the variances in Doppler velocity, therefore, it was difficult to see the difference in riming fractions (Fig. 3.6c, d). However, when we focused only on areas of a radar reflectivity (ZH) larger than -15 dBZ, the CFADs converged, and we could notice a change in the sensitivity tests, i.e., results without errors. According to Hagihara et al., 2021, the standard deviation is almost 1 m/s in this case (the low mode and $ZH > -15$ dBZ).

We also applied the errors of the high mode, but the variances in Doppler velocity were large and the change in parameters did not affect the CFADs of Doppler velocity. However, we did not consider the integration effect on these results. According to Hagihara et al., 2021, when a 10 km integration and $ZH > -15$ dBZ were applied in the high mode, the standard deviation was less than 0.5 m/s. Thus, we can expect better results using the integration method.

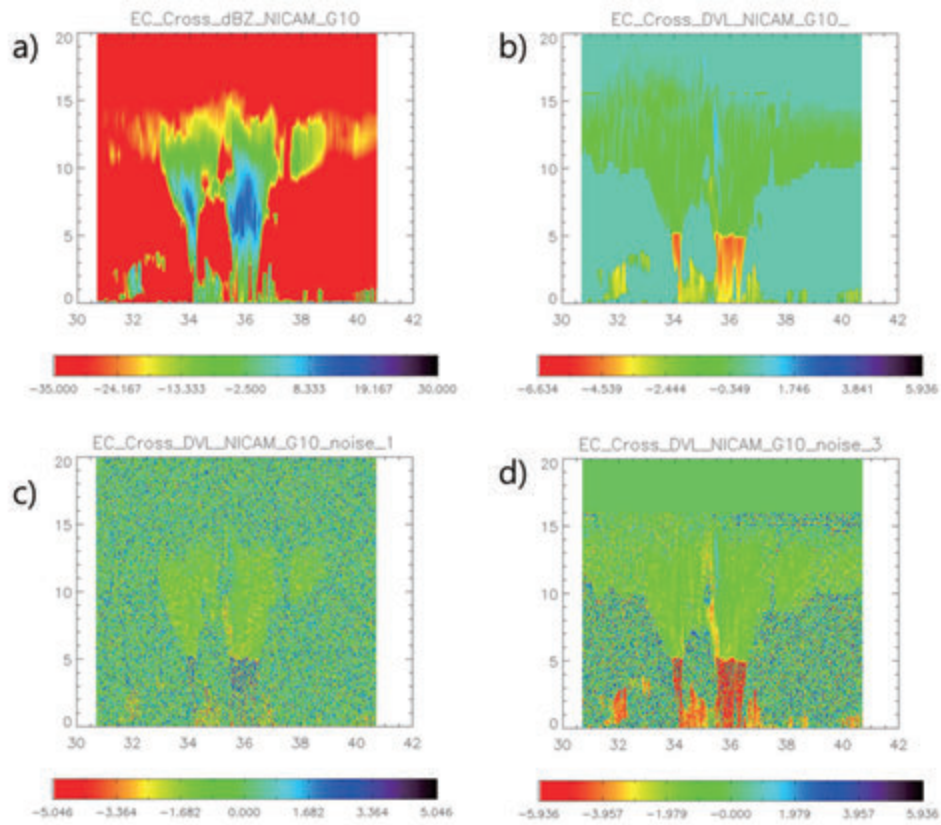


Fig. 3.5 Cross-section of radar reflectivity (a), raw data of Doppler velocity (b), Doppler velocity with random errors of the high mode (c), and Doppler velocity with random errors of the low mode (d) for the Tropical Cyclone Faxai in NICAM GL10.

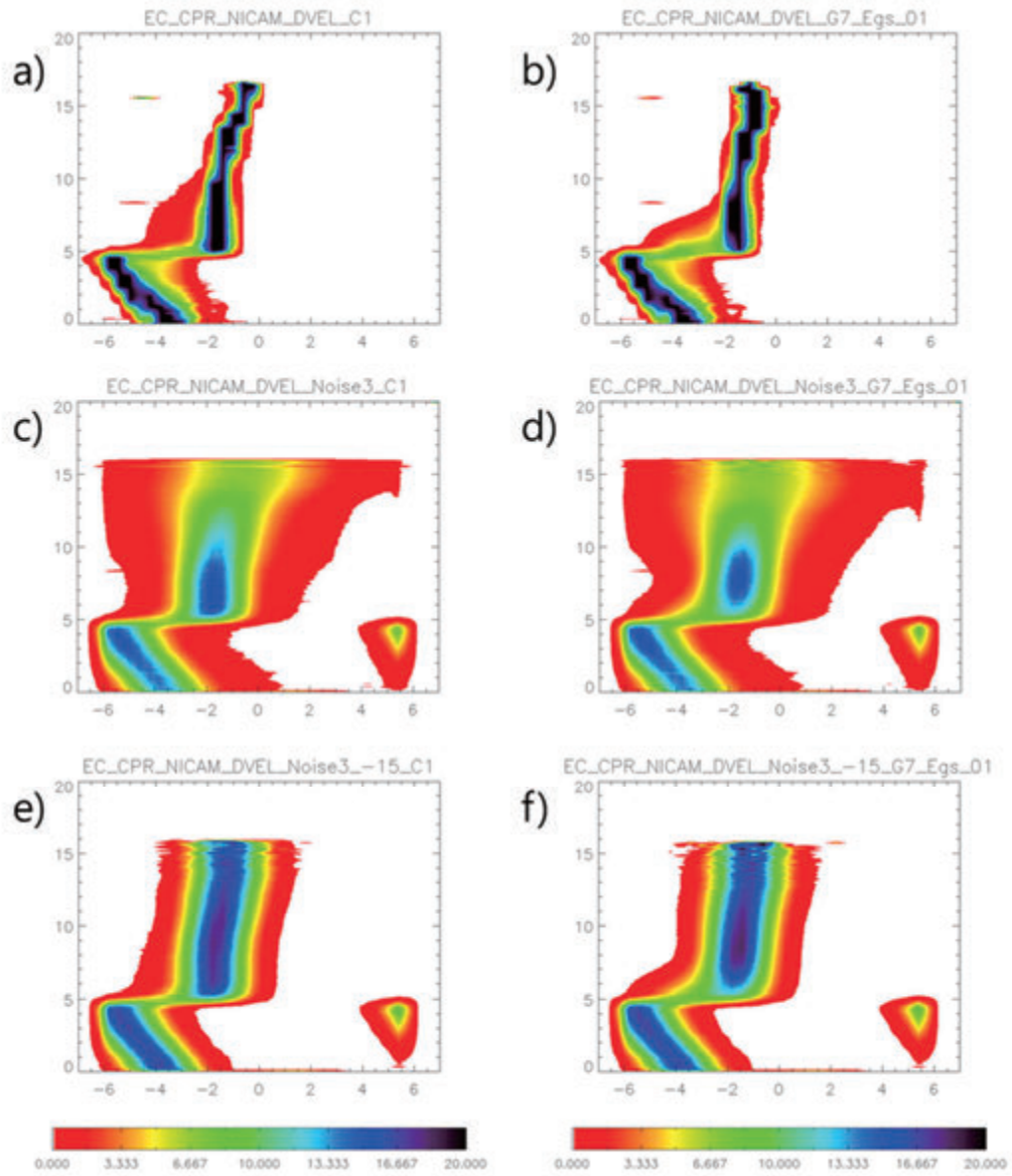


Fig. 3.6 CFADs of Doppler velocity with $N_{0G} = 4.E8$ and $ME_{GS} = 0$ (left), and $N_{0G} = 4.E7$ and $ME_{GS} = 0.1$ (right) with no errors (top), errors of the low mode (middle), and errors of the low mode larger than -15 dBZ of ZH (bottom) for Case 1.

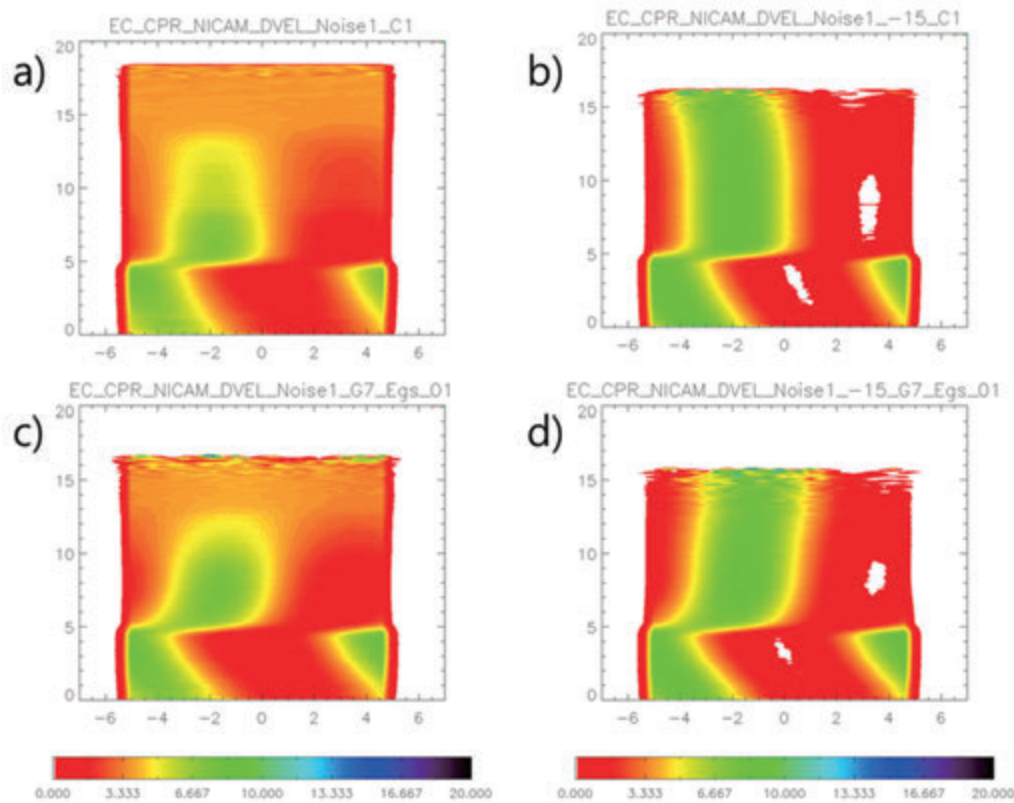


Fig. 3.7 CFADs of Doppler velocity with $N_{0G} = 4.E8$ and $ME_{GS} = 0$ (left), and $N_{0G} = 4.E7$ and $ME_{GS} = 0.1$ (right) with errors of the high mode (top), and errors of the high mode larger than -15 dBZ of ZH (bottom) for Case 1.

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
- 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. <https://doi.org/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. <https://doi.org/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. <https://doi.org/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. <https://doi.org/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.
- Tomita, H., (2008a), A stretched icosahedral grid by a new grid transformation. *J. Meteorol. 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.

4. Summary

In this report, we continued to evaluate NICAM using NICT CPR and the Joint Simulator. We found an underestimation of the graupel fraction for the tropical cyclone Faxai last fiscal year. We performed sensitivity tests to increase the fraction of graupel related to the size distribution and the collection process of snow by graupel. We found that the minimum Doppler velocity was related to the interceptor parameter of graupel and that the frequencies of graupel were related to the collection process of snow by graupel. We selected suitable parameters for graupel for Case 1 and we expanded the modified parameters to two other cases. We found an overestimation of the graupel fraction for the precipitation cases weaker than Case 1. Finally, we compared these results with the EarthCARE to find possible random errors. When we applied the low mode of the EarthCARE with a radar reflectivity larger than -15 dBZ, we found an increase in graupel frequencies similar to the evaluation results of the ground CPR observation. However, the evaluation results are not consistent for the high mode because of large errors. We think the large errors could be reduced by the integration method.

5. Future perspective

We found that the riming process of graupel and the graupel size distribution affected the vertical profiles of Doppler velocity over the melting layer. However, the frequencies of graupel depended on the case. Ground observations have limitations on spatial representation. We expect that the EarthCARE satellite will give more information about graupel with large spatial and long temporal scales than the ground observational data. These evaluation results are also useful to understand the performance and the application of satellite observations before launch.

6. List of publications

6.1 Peer-reviewed articles

- Hagihara, Y., Ohno, Y., Horie, H., Roh, W., Satoh, M., Kubota, T., Oki, R. (2021), Assessments of Doppler velocity error of EarthCARE Cloud Profiling Radar using global cloud system resolving simulation: Effects of Doppler broadening and folding. *The IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* (accepted: 17 Feb. 2021). <https://doi.org/10.1109/TGRS.2021.3060828>
- Roh, W., Satoh, M., Hohenegger, C. (2021), Intercomparison of cloud properties in DYAMOND simulations over the Atlantic Ocean. *J. Meteorol. Soc. Japan.*, **99** (accepted 2021/07/28). <https://doi.org/10.2151/jmsj.2021-070>
- Seiki, T., Roh, W., Satoh, M. (2021), Cloud Microphysics in Global Cloud Resolving Models. AGU Books, Earth's Climate and Weather: Dominant Variability and Disastrous Extremes. (accepted 2021/07/10). preprint: Earth and Space Science Open Archive. <https://doi.org/10.1002/essoar.10509052.2>

- Noda, A. T., Seiki, T., Roh, W., Satoh, M. and Ohno, T. (2021), Improved representation of low-level mixed-phase clouds in a global cloud-system-resolving simulation. *J. Geophys. Res.: Atmosphere*, 126, e2021JD035223 (first published 2021/08/17; accepted 2021/08/11). <https://doi.org/10.1029/2021JD035223>
- 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*, 9:51. <https://doi.org/10.1186/s40645-022-00511-5>

6.2 Other publications

None.

6.3 Oral presentations

- Roh, W., Satoh, M. (2021), An introduction to the ULTIMATE project in Japan. vEGU 2021, 19 - 30 April 2021
- Roh, W., Satoh, M. (2021), Observations and simulations of Typhoon Faxai over the Kanto. JpGU 2021, 30 May - 6 June 2021
- Roh, W., Satoh, M. (2021), Evaluations of cloud microphysics in NICAM using intensive observation data over the Kanto area. ICCP 2021, 2 - 6 Aug. 2021
- Roh, W., Satoh, M. (2021). Observations and simulations of Typhoon Faxai over Japan. CFMIP 2021, 14 - 16 Sep. 2021
- Roh, W., Satoh, M. (2021), Evaluations of microphysics in NICAM over the Kanto area using intensive observation data. NHM workshop 2021, 28 - 29 Oct. 2021
- Roh, W., Satoh, M. (2021), Numerical study on cloud systems using NICAM: the recent progress of the ULTIMATE project. the NIES supercomputer workshop, 23 Dec. 2021
- Roh, W., Satoh, M. Hagihara, Y., Ohno, Y. (2022), An evaluation of NICAM using a ground-based 94 GHz Doppler radar over Tokyo. the EarthCARE modeling workshop, 16 - 18 Feb. 2022

7. Contact person

Woosub Roh

Department of Marine Electronics and Mechanical Engineering, Tokyo University of Marine Science and Technology

2-1-6 Ecchujima, Koto Ward, Tokyo, 135-8533, Japan

Tel: 03-5245-7463

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

研究課題名：
NICAM による雲降水システムの研究

実施年度：
令和 3 年度～令和 3 年度

課題代表者：東京大学大気海洋研究所 佐藤正樹
共同研究者：東京大学大気海洋研究所 Woosub Roh
高知工科大学環境理工学群 端野典平

要旨：

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

今年度は地上 94GHz ドップラー雲レーダーを用いて NICAM のシングルモーメント雲物理スキームにおけるアーミングプロセスと霰サイズ分布を評価した。予想されるエラー 考慮した EarthCARE 衛星の 94GHz ドップラー雲レーダーのような現実的なシミュレーション結果について議論した。

キーワード：
雲解像モデル、雲降水システム、衛星データシミュレータ

研究課題名：

系外惑星も含めた惑星気候多様性に関する数値計算：陸惑星設定を用いた自転傾斜角依存性実験

実施年度：

令和3年度～令和3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

要旨：

大気大循環モデルを用いて全球表面にバケツモデルを適用した陸惑星設定を用いた実験をおこなった。陸惑星とは、表層における水量が地球の海洋に比べて非常に少ない惑星であり、系外惑星の1形態であると考えられている。陸惑星は表層の水量が少ないにもかかわらず、全球が水で覆われた水惑星よりも広い太陽定数の範囲にわたって表層に液体の水が存在しうると議論されており（Abe et al.,2011）、系外惑星の生命存在可能性を考える上で重要な研究対象となっている。昨年度までに我々が実施した自転傾斜角として0を与えた計算では、過去の研究で得られていた完全蒸発状態発生の入射放射量臨界値を超えても極域の土壤中に大部分の水分が蓄積されている状態が得られていた。今年度は、自転傾斜角として23.4度を与えた実験をおこない、極域に太陽放射が入射する季節がある場合に極域の土壤水分の蒸発が起こるかどうかを調べた。その結果、土壤水分の減少は起こったが、完全蒸発までには至らなかった。夏季に蒸発が起きて土壤水分が減少しても冬季になり極域の日射がなくなると再び凝結が起こり土壤水分量は回復するということが起こり完全蒸発には至らなかった。今後は、我々の陸惑星における熱・水蒸気循環の基礎解析を徹底し計算の物理的正当性を担保するとともに、その掌握を基として完全蒸発状態発生の可能性を再検討し、太陽定数変更実験を継続し陸惑星の気候レジームダイアグラムの掌握に努める予定である。

キーワード：

系外惑星、陸惑星、大気大循環モデル、完全蒸発

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：陸惑星設定を用いた自転傾斜角依存性実験

実施年度：

令和3年度～令和3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において完全蒸発状態が発生することを確認することを目的とした大気大循環モデル実験を実施する。全球表面にバケツモデルを適用し自転傾斜角として地球の値を与えた場合の数値実験をおこなう。

キーワード：

系外惑星、陸惑星、大気大循環モデル、完全蒸発

2. スーパーコンピュータ利用実績

2.1 計算機利用時間（2021年4月1日～2022年3月31日）

CPU時間	v_debug	:0.53	[VE・hours]
	v_normal	:4,405.94	[VE・hours]
	計	:4,406.48	[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。そのうちの20個程度は、表面温度が液体 H₂O の存在可能な範囲にあり、生命存在を可能とする気候を有していると予想されている (Wit et al., 2018 など)。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、それらの気候は多様な様相を呈していると想像される。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、数多くの気候計算がなされるようになってきた (Kaspi and Showman, 2015)。本研究は系外惑星の1つの姿であると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 のオーダーの惑星である。ちなみに予備的な 1 次元放射平衡モデル計算によれば、地球大気と同様な放射特性をもつ雲・エアロゾルなしの飽和水蒸気大気では、外向き赤外放射量の上限値 320W/m^2 に達する際には水蒸気量が約 10m となっている。Abe et al. (2011) は陸惑星設定を用いた GCM 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 415W/m^2 を超えるまでは惑星表面に液体の水が保持され、 415W/m^2 を超えると土壤水分が全て蒸発する完全蒸発状態が発生するという結果を得た。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で惑星表面に液体の水を保持するというを示す。このため、系外惑星の生命存在可能性を考える上で陸惑星は重要な調査対象であるといえる。

我々の研究グループにおいても陸惑星の気候状態の多様性の理解を得ること、完全蒸発状態の発生条件に関する考察を行うことを目的として陸惑星設定を用いた GCM 実験を実施してきた。しかし、Abe et al. (2011) と同様に自転傾斜角を 0 とした実験では、Abe et al. (2011) とは異なり、太陽放射吸収量が 450W/m^2 (与えた太陽定数は 2400W/m^2) を超えても完全蒸発状態の発生を認めることができないという結果が得られた(平成 31 年度～令和 2 年度スーパーコンピュータ利用研究課題)。このため陸惑星における液体の水の存在条件に関する検討を継続しておこなっているのが現在の状況である。

昨年度までに我々がおこなってきた実験では自転傾斜角として 0 を与えており極域が低温になり蒸発が進まないという結果が得られていた。ここでは我々のモデルでも完全蒸発状態が発生することを確認するために極域を「強制的に」加熱する場合について考察することにした。自転傾斜角として 0 でない値を与えれば、極にも太陽放射が入射するので高緯度領域の土壤水分の蒸発が促進される可能性がある。この予想のもとに、現在地球の自転傾斜角を与えた場合について GCM 陸惑星実験を行い、完全蒸発状態が発生するかどうかを調べた。

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)、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。乱流過程の評価には Mellor and Yamada (1974) の level 2.5 の方法に従って決めた鉛直拡散係数を用いる。地表面フラックスの計算には Louis et al. (1982) の方法を用いる。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。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壤水分と降雪過程によって生じる雪層の 2 種を考える。太陽定数の値は 2400W/m^2 とする。自転角速度は地球の値を用いる。初期に与える土壤水分量は、水の深さにして 40 cm とする。解像度は T21L26 を用いる。自転傾斜角の値としては 23.4 度を用い、軌道要素としては離心率 0 の円軌道とした。初期条件として、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、24 年の積分を行った。

3.3 結果

実験で得られた全球平均値の時間変化を図 1 に示す。図 1(a)は日射吸収量と OLR の全球平均の時間変化を示す。ともに長期的な変化傾向はあらわれておらず熱的に統計平衡状態に達しているように見える。日射吸収量(及び OLR も)おおよそ 450W/m^2 になっており、Abe et al. (2011) が得た完全蒸発状態発生閾値を超えるものとなっている。

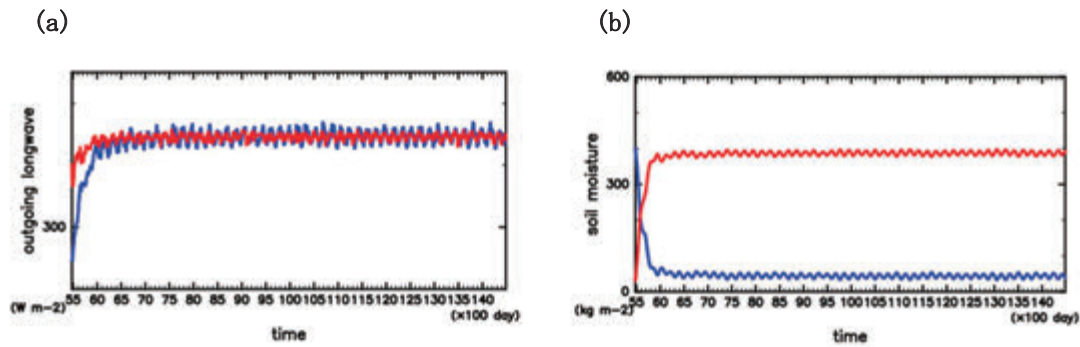


図 1. 全球平均値の時間変化。(a) OLR [W/m²] (青線) と日射吸収量 [W/m²] (赤線)。(b)大気水蒸気量[kg/m²] (赤線) と土壌水分量 [kg/m²] (青線)。

大気水蒸気量と土壌水分の時間変化は図 2 に示すようになっている。実験を開始してから 5000 日までは土壌水分の全球平均値は減少し大気水蒸気量の全球平均値は増加する (図 1b)。初期に置いた水の大部分は大気中に水蒸気として存在するようになる。これは自転傾斜を 0 とした場合の結果 (令和 2 年度スーパーコンピュータ利用研究年報) とは異なる。自転傾斜角を 0 とした場合には極域の温度は年平均値で 230K と低温になっており土壌水分の蒸発が起こらず水の大部分は土壌中に存在していた。ここで示した自転傾斜角を 23.4 度とした場合には極域の年平均表面表面温度は 320K まで上昇し (図 2b)、対流圏内の大気温度も 300K 以上になっている (図 2a)。このため極域での蒸発が起こるようになり土壌水分の減少が起こった。しかし、この場合でも土壌水分が完全に蒸発するには至らなかった。計算開始から 5000 日以降の土壌水分量は季節変化の変動を除けばほとんど一定 (およそ 400kg/m²=40cm) となっている。

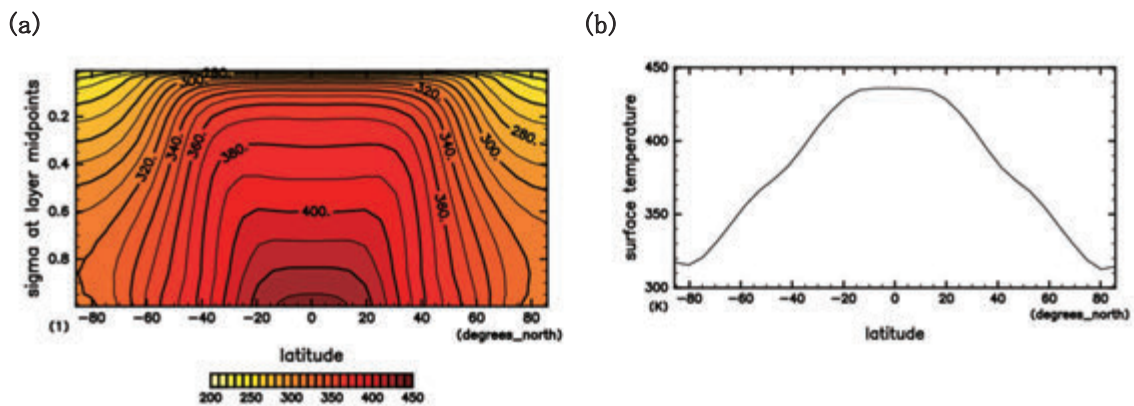


図 2. 温度分布。(a) 東西平均大気温度 [K]、(b) 東西平均表面温度 [K]。計算を開始してから 22 年目の北半球の夏至から 24 年目の北半球の夏至までの時間平均を示す。

図 3 は 2 年分の水に関する量の東西平均値の時間変化を示したものである。大気水蒸気の大部分は低緯度に存在しており (図 3a)、土壌水分は極域に残っている (図 3b)。極域における土壌水分の変化は以下に述べるようになっている。冬至を過ぎる時期から夏至に至るまでの期間 (北半球の場合、図 3 に示された範囲では 13860 日から 14040 日) では降水が減少し蒸発が起こるので土壌水分が減少する。高緯度における日射量が増加するにしたがい、蒸発がより高緯度で起こるようになり低緯度側から順次土壌水分が減っていく。秋分の少し前 (北半球の場合、14130 日) に

なると土壌水分量が最小となるが、その後極夜の降水が起こり始め土壌水分量が再び増加する。日射量が減少し温度が低下するにしたがい、降水が増加していく。蒸発はほとんど起こらないため土壌水分量は増加し冬至（14220日）において最大となる。この季節変化を繰り返すため極域における土壌水分が完全に消失することは起こらない。

以前より我々がおこなってきた実験を含め、Abe et al. (2011) が示した完全蒸発状態を得ることができなかった。想像される状況としては、極域に水分が溜まっている解と大気中に水蒸気が保持される解との2種類の統計的安定状態が存在している可能性がある。今後は、我々の求めた解の物理的構造を詳細に解析しその正当性を確認するとともに、これが物理的に良好な解である場合には、解の多重性の可能性の検討を進めていきたい。多重性の検討には、より広い太陽定数範囲、多様な初期状態を用いた実験を実施することを考えている。

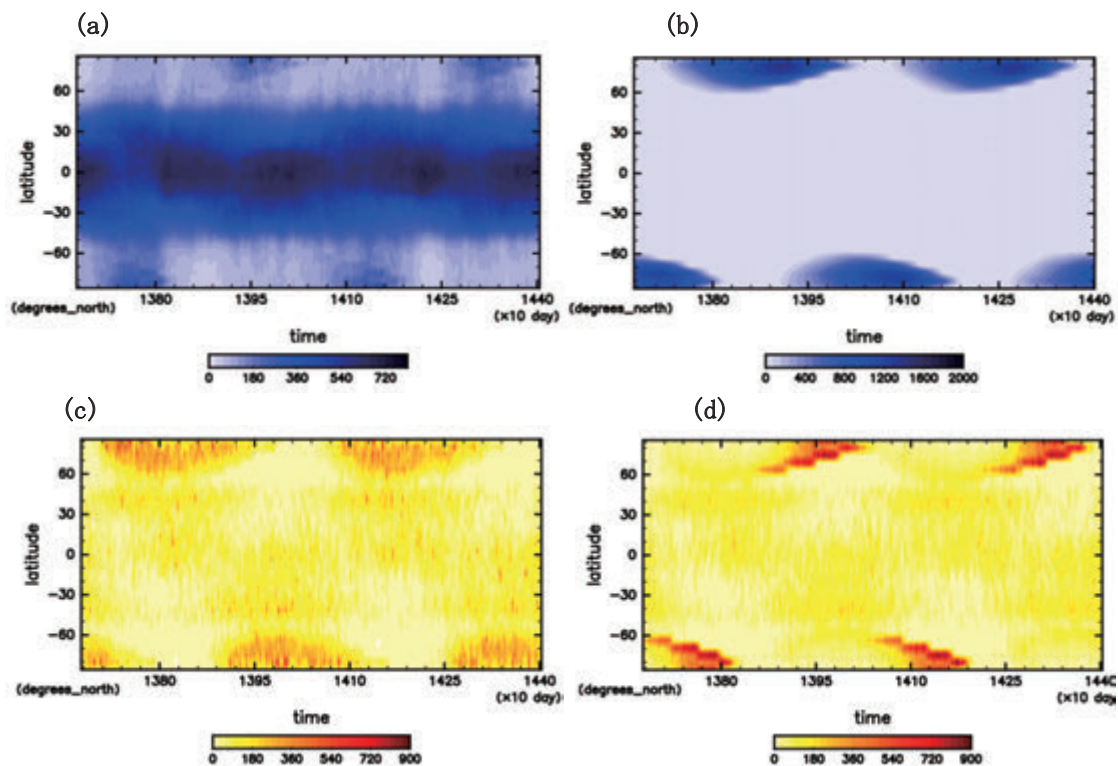


図 3. 水に関する量の東西平均南北分布の時間変化。(a) : 鉛直積分水蒸気量 [kg/m^2]、(b)土壌水分 [kg/m^2]、(c) : 降水 [W/m^2]、(d) : 蒸発 [W/m^2]。計算を開始してから 22 年目の北半球の夏至から 24 年目の北半球の夏至までの期間を示す。

参考文献

- Abe Y., Numaguti, A., Komatsu, G., Kobayashi, Y. (2005), Four climate regimes on a land planet with wet surface: Effects of obliquity change and implications for ancient Mars. *Icarus*, **178**, 27-39. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2005.03.009>
- Abe Y., A. Abe-Ouchi, N. H. Sleep, K. J. Zahnle (2011), Habitable zone limits for dry planets. *Astrobiology*, **11**, 443-460. <https://doi.org/10.1089/ast.2010.0545>
- Arakawa A., Suarez M. J. (1983), Vertical differencing of the primitivity equations in sigma coordinates. *Mon. Weather Rev.*, **111**, 34-45. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1983\)111<0034:VDOTPE>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1983)111<0034:VDOTPE>2.0.CO;2)
- Chou M.-D., Lee K.-T. (1996), Parameterizations for the absorption of solar radiation by water vapor and ozone. *J. Atmos. Sci.*, **53**, 1203-1208. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1996\)053<1203:PFTAOS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1996)053<1203:PFTAOS>2.0.CO;2)

- Chou M.-D., Suarez M.J., Liang X.-Z., Yan M.M.-H. (2001), A thermal infrared radiation parameterization for atmospheric studies. 19, NASA/TM-2001-104606.
- Ishiwatari M., Takehiro S., Nakajima K., Hayashi Y.-Y. (2002), A numerical study on appearance of the runaway greenhouse state of a three-dimensional gray atmosphere. *J. Atmos. Sci.*, **59**, 3223-3238. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(2002\)059<3223:ANSOAO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(2002)059<3223:ANSOAO>2.0.CO;2)
- Ishiwatari M., Nakajima K., Takehiro S., Hayashi Y.-Y. (2007), Dependence of climate states of gray atmosphere on solar constant: from the runaway greenhouse to the snowball states. *J. Geophys. Res.*, **112**, D13120. <https://doi.org/10.1029/2006JD007386>
- Kashimura H., Enomoto T., Takahashi Y.O. (2013), Non-negative filter using arcsine transformation for tracer advection with semi-Lagrangian scheme. *SOLA*, **9**, 125-128. <https://doi.org/10.2151/sola.2013-028>
- Kaspi, Y., Showman, P. (2015), Atmospheric dynamics of terrestrial exoplanets over a wide range of orbital and atmospheric parameters. *Astrophysical Journal*, 804:60.
- Louis, J-F., M. Tiedtke, and J-F. Geleyn (1982), A short history of the PBL parameterization at ECMWF. Workshop on Planetary Boundary Layer Parameterization, 59-80, ECMWF, Reading, U.K..
- Manabe, S. (1969), Climate and the ocean circulation I. The atmospheric circulation and the hydrology of the Earth's surface. *Mon. Weather Rev.*, **97**, 739-774. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1969\)097<0739:CATOC>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1969)097<0739:CATOC>2.3.CO;2)
- Mellor G.L., Yamada T. (1974), A Hierarchy of turbulence closure models for planetary boundary layers. *J. Atmos. Sci.*, **31**, 1791-1806. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1974\)031<1791:AHOTCM>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1974)031<1791:AHOTCM>2.0.CO;2)
- Moorthi S., Suarez M. J. (1992), Relaxed Arakawa-Schubert: A parameterization of moist convection for general circulation models. *Mon. Wea. Rev.*, **120**, 978-1002. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1992\)120<0978:RASAPO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1992)120<0978:RASAPO>2.0.CO;2)
- Noda, S., Ishiwatari, M., Nakajima, K., Takahashi, Y. O., Takehiro, S., Onishi, M., Hashimoto, G. L., Kuramoto, K., Hayashi Y.-Y. (2017), The circulation pattern and day-night heat transport in the atmosphere of a synchronously rotating aquaplanet: Dependence on planetary rotation rate. *Icarus*, **282**, 1-18. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2016.09.004>
- 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 実験を実施した。自転傾斜角として 0 度とした場合にも 23.4 度を与えた場合においても、過去の研究で得られていた完全蒸発状態を得ることができなかった。自転傾斜角を 23.4 度とした場合には土壌水分が減少するものの、冬季極域において降水が起こり、土壌水分が完全消失することはなかった。

5. 今後の研究展望

今後も完全蒸発状態の発生可能性を探る継続する。その後、太陽定数を減少させた場合についての実験も実施し広い太陽定数範囲にわたって気候状態を求め陸惑星の気候多様性をあらわす気候レジーム図の作成に進む予定である。

6. 研究成果発表

6.1 誌上発表 (査読あり)

なし。

6.2 誌上発表 (査読なし)

なし。

6.3 口頭発表

河合佑太, 高橋芳幸, 石渡正樹, 中島健介, 竹広真一, 檜村博基, 富田浩文, 林 祥介 (2021) 大気吸収係数が海惑星の気候レジーム図に与える影響. 2021 年日本気象学会秋季大会. 2021 年 12 月 6 日

6.4 その他 (書籍等)

なし。

7. 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

Project name:

A numerical experiment on varieties of climates of terrestrial planets with taking exoplanets into consideration: an experiment on obliquity dependence with land planet configuration

April 2021 – March 2022

Project leader:

Masaki Ishiwatari, Faculty of Science, Hokkaido University

Project members:

Kensuke Nakajima, Faculty of Science, Kyushu University

Yoshi-Yuki Hayashi, Graduate School of Science, Kobe University

Abstract:

Using an atmospheric general circulation model (AGCM), we performed a numerical experiment for a land planet configuration: a bucket model was applied to the whole surface. A land planet possesses much less water than the ocean of the Earth and is considered as a possible kind of exoplanets. It has been discussed (Abe et al., 2005) that a land planet can maintain liquid water on its surface despite a less amount of surface water for a wider range of solar constant than an aquaplanet whose entire surface is covered with the ocean. Therefore, a land planet is an important example for considering the habitability of exoplanets. The results of our experiment performed with 0 degree of obliquity last year showed that most of the water on planetary surface exist in the form of soil moisture in the polar region with solar constants larger than the critical value of the occurrence of complete evaporation found in Abe et al. (2011). In this study, in order to examine whether complete evaporation occurs or not for cases in which incoming solar radiation comes into the polar region in the summer season, we performed a numerical experiment with an obliquity of 23.4 degrees. The results showed that soil water in the polar region decreased in the summer season due to evaporation but recovered again in the winter season due to precipitation. Therefore, complete evaporation did not occur. We will ensure the physical validity of our results by thoroughly analyzing heat transport and water circulation and, based on the analyses, will reexamine the possibility of the occurrence of complete evaporation under our land planet configuration. In addition to that, we will continue to perform experiments on solar constant dependence and will attempt to comprehend the climate regime diagram of land planets.

Keywords:

exoplanets, land planet, atmospheric general circulation model, complete evaporation

スーパーコンピュータ利用研究終了課題の研究成果発表

令和2年度以前に終了となったスーパーコンピュータ利用研究課題に関して、令和3年度に行われた研究成果発表については、次のとおりである。

1. 誌上発表（査読あり）

Shibata, K. (2021) Simulations of Ozone Feedback Effects on the Equatorial Quasi-Biennial Oscillation with a Chemistry–Climate Model. *Climate* 2021, 9(8), 123; <https://doi.org/10.3390/cli9080123>

Shibata, K. (2022) Studies of the Effect of Seasonal Cycle on the Equatorial Quasi-Biennial Oscillation with a Chemistry–Climate Model. *Climate* 2022, 10(7), 99; <https://doi.org/10.3390/cli10070099>

（研究課題名：季節変化が熱帯準二年振動（QBO）に及ぼす影響

実施年度：平成31年度～令和元年度

課題代表者：高知工科大学環境理工学群 柴田清孝）

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、2015（平成27）年6月から2019（令和元）年11月末にかけて運用されたスーパーコンピュータシステム（ベクトル処理用計算機：NEC製SX-ACE、スカラ処理用計算機：SGI製UV-20およびUV-30）を全面更新し、2020（令和2）年3月より新システムの運用を開始した。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。SX-Aurora TSUBASA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）とデバッグ用（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3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65.6%（月平均で最小21%、最大90%、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3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28%であり、期間内に使用率は23%から29%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

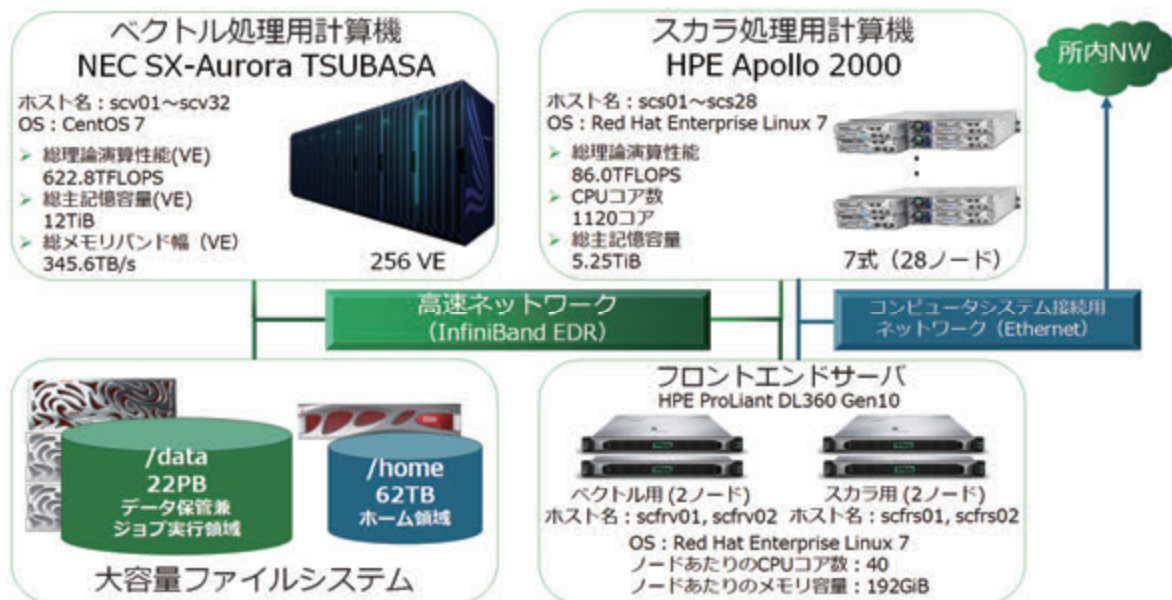
国立環境研究所環境情報部

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、2015（平成27）年6月から2019（令和元）年11月末にかけて運用されたスーパーコンピュータシステム（ベクトル処理用計算機：NEC製SX-ACE、スカラ処理用計算機：SGI製UV-20およびUV-30）を全面更新し、2020（令和2）年3月より新システムの運用を開始した。現行のシステムは、ベクトル処理用計算機、スカラ処理用計算機、大容量ファイルシステムを中心に構成し、高速ネットワーク接続にはInfiniBandを採用している。機器構成の概念図を図1に示す。



※令和3年度より、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た。

図 1. システム概要図（2020年3月～）

1.2 ベクトル処理用計算機

ベクトル処理用計算機にはNEC製SX-Aurora TSUBASA A511-64を採用した。このシステムは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。SX-Aurora TSUBASA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（図2を参照）。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。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を表1に示す。また、現行システムと旧システムとの比較を表2に示す。

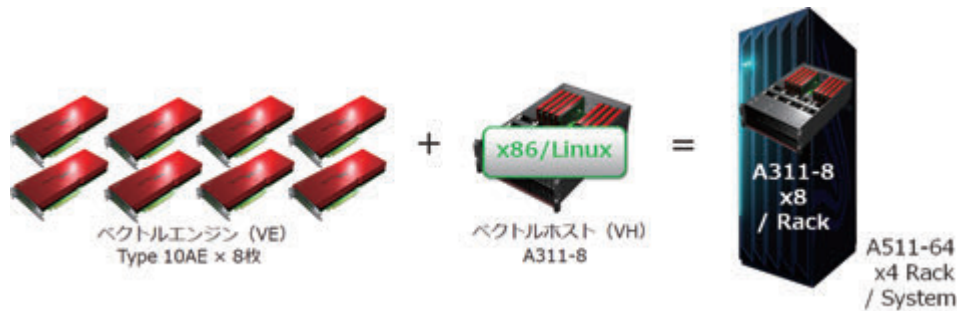


図 2. ベクトル処理用計算機（SX-Aurora TSUBASA A511-64）の主要な構成

表 1. ベクトル処理用計算機の性能

NEC SX-Aurora TSUBASA		
プロセッサ (VE)	VE タイプ	Type 10AE
	コアあたりの FLOPS	304GFLOPS
	コア数	8
	FLOPS	2.43TFLOPS
	メモリサイズ	48GiB
	メモリバンド幅	1.35TB/s
ノード間転送性能 ※		12.5GB/s (双方向) x2
システム	総 VE 数	256
	総コア数	2048
	総 FLOPS	622.8TFLOPS
	総メモリサイズ	12.0TiB
	総メモリバンド幅	345.6TB/s

※VH 1基あたりに搭載されているVE 8基で共有

表 2. ベクトル処理用計算機の新旧システムの性能比較

		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にはHPE製 Apollo 2000を採用した。スカラ処理用計算機は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 3に示す。

表 3. 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 4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 5に示す。

表 4. 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 5. 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、旧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3年度のベクトル処理用計算機のジョブキュー構成を表6に示す。

表 6. 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。2021年4月から2022年3月にかけての平均稼働率は95.7%であった。この値は、8月に実施した節電対策のための縮退運転、計画停電、定期メンテナンスのための停止時間を含む。これらを除いた平均稼働率は99.6%であり、トラブルなくユーザに計算資源を提供できていたといえる。参考として、前年度（2020年4月から2021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95.4%、99.7%であった。

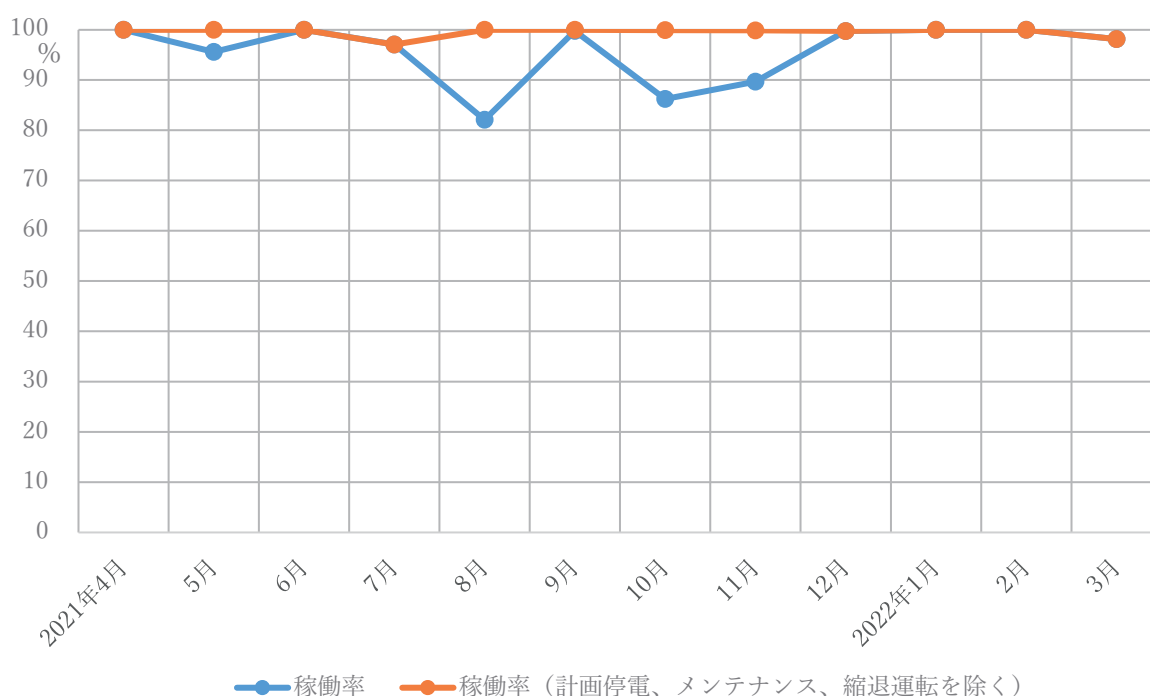


図 3. 月ごとのベクトル処理用計算機の平均稼働率の推移（2021年4月1日～2022年3月31日）

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。2021年4月から2022年3月の期間でのv_normalの平均利用率は65.6%（前年度は61.7%）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。2021年6月から2022年2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90.2%、12月は89.0%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ことがあるが、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7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。

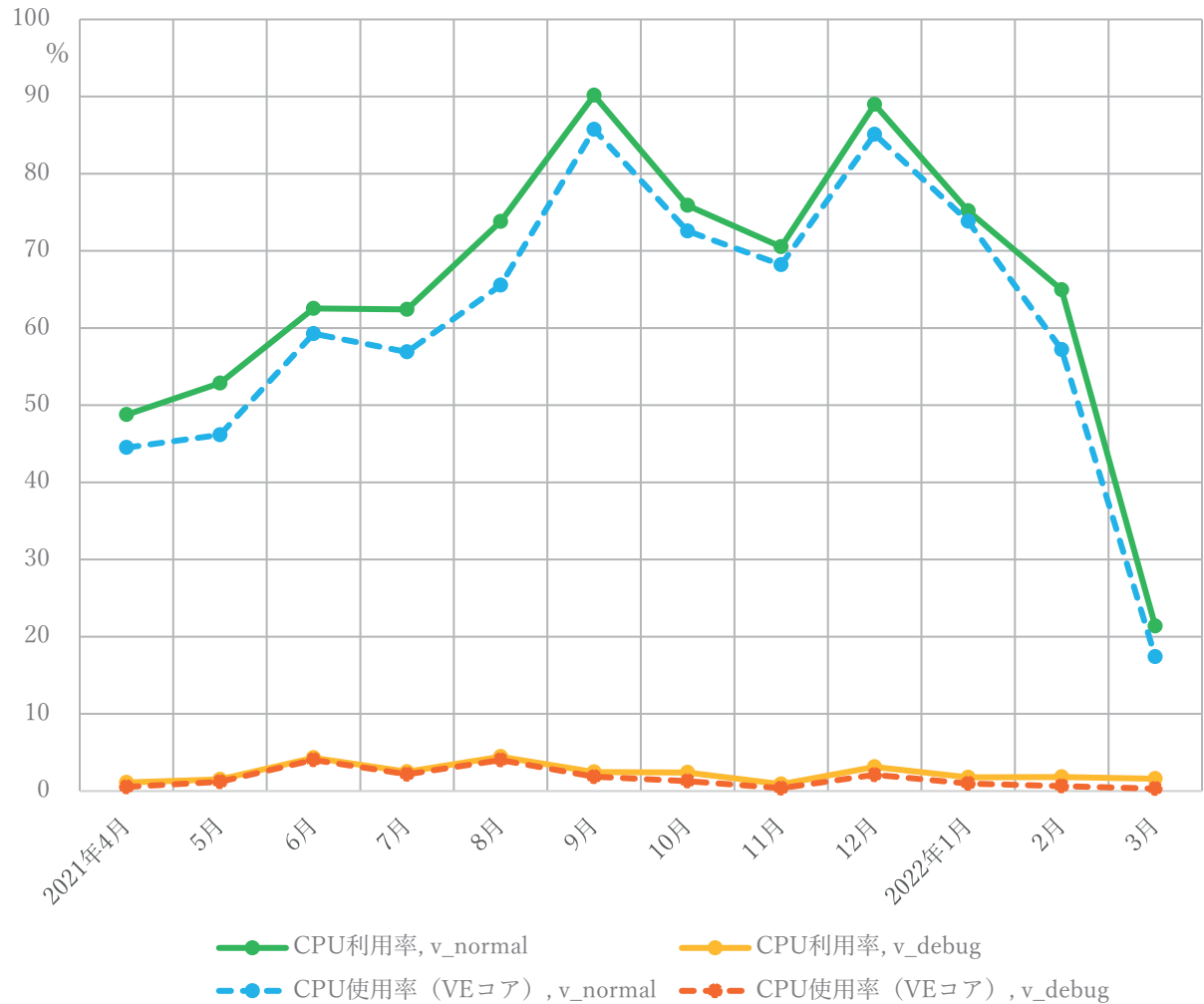


図 4. 月ごとのベクトル処理用計算機の平均利用率の推移 (2021年4月1日～2022年3月31日)

表 7.ベクトル処理用計算機の利用状況 (2021年4月1日～2022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	1641.03	1,412,211	1,413,852	60.82%
所外課題	2	0.53	4,406	4,407	0.20%
合計	9	1,641.56	1,416,617	1,418,259	61.02%

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、特に利用率の高かった9月から10月にかけてジョブリクエスト数は減少傾向となる一方、待ち時間は増大傾向であったことがわかる。この現象について、後述する図6の傾向と併せて考えると、9月頃より1リクエスト当たりの実行時間が長いジョブの投入が増えていたことが原因と推察される。多くのジョブはジョブ投入後2時間以内でジョブが開始されているが、10時間以上待たされるジョブも少なからず存在し、複数のVHを利用するジョブで待ち時間が長くなる傾向にあった。年度を通したジョブリクエスト数は約41000であり、前年度（約44000）から1割弱減少した。実行までの待ち時間は年平均で0.7時間、月平均の最大で1.8時間と、前年度の値（それぞれ0.5時間、1.5時間）よりも多少増加している。

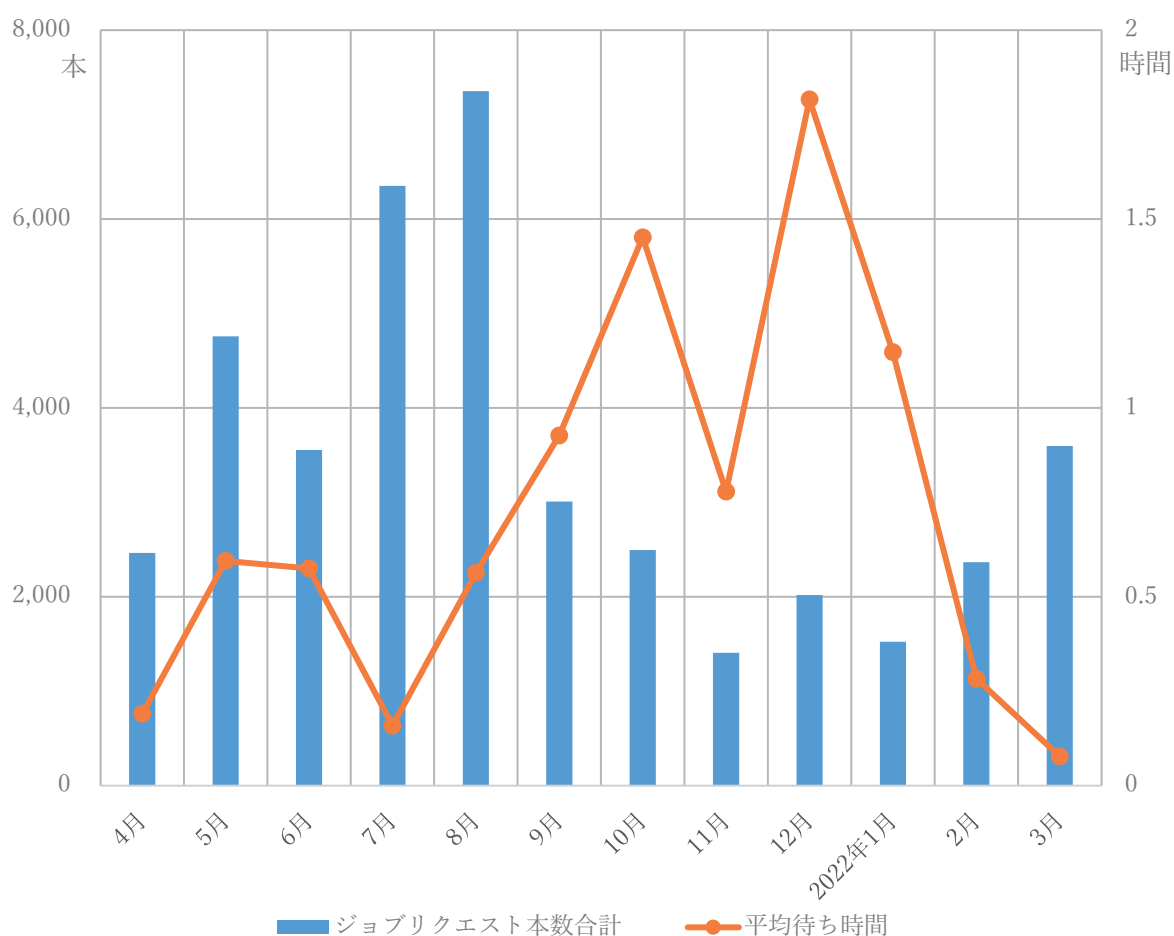


図 5. ベクトル処理用計算機のジョブリクエスト数と平均待ち時間の推移
(2021年4月1日～2022年3月31日)

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3.2時間であり、前年度平均の2.7時間から0.5時間増加した。

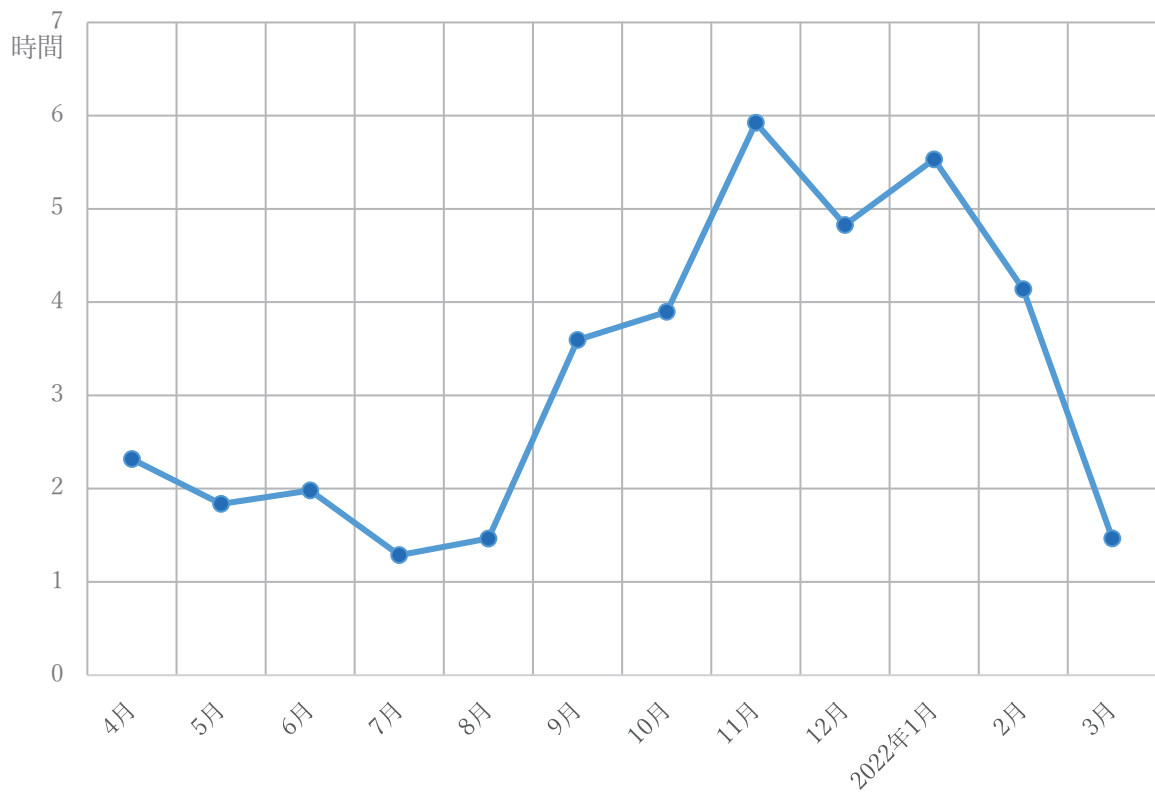


図 6. 月ごとのベクトル処理用計算機の平均ジョブ実行時間の推移
(2021年4月1日～2022年3月31日)

3.3 利用実績（大容量ファイルシステム）

2021年4月から2022年3月にかけての大容量ファイルシステムの利用率は、22.5%から29.25%に推移しており、期間全体の平均で27.95%であった。11月にピークとなる32.0%に達したが、その後わずかずつ減少する傾向となった。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、旧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。

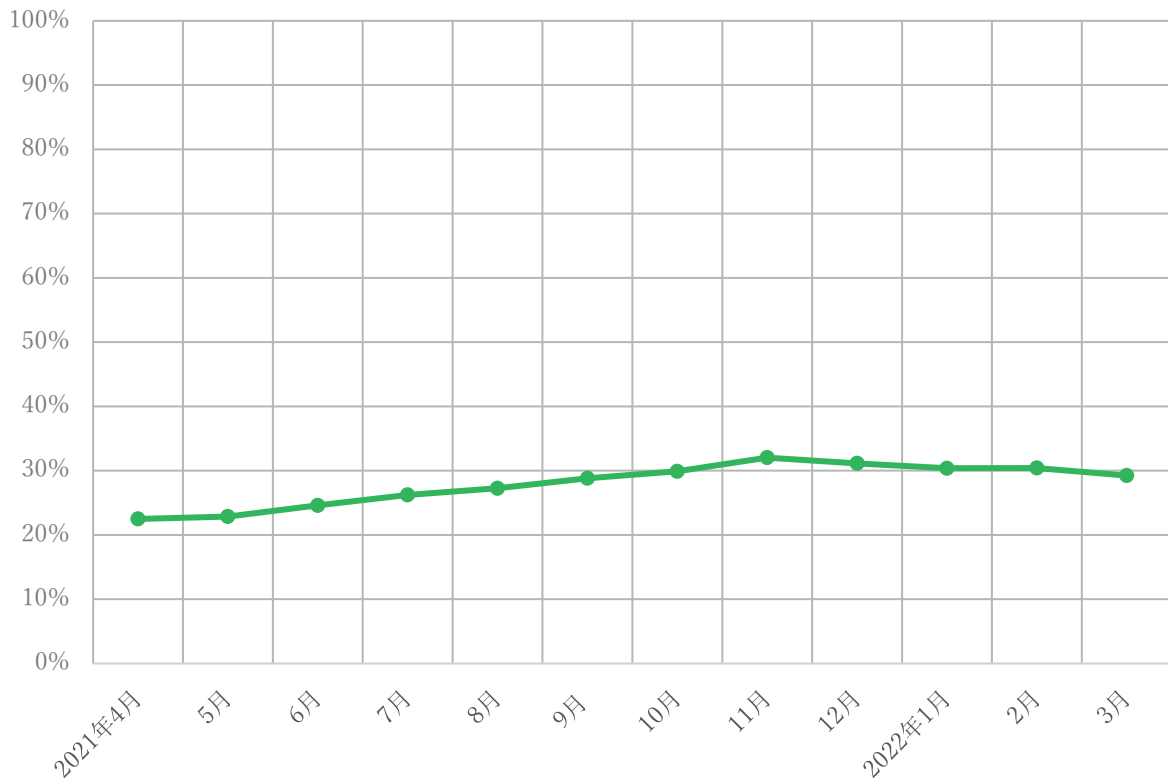


図 7. 大容量ファイルシステム（/data領域）の使用率（2021年4月1日～2022年3月31日）

Overview of the NIES Supercomputer System

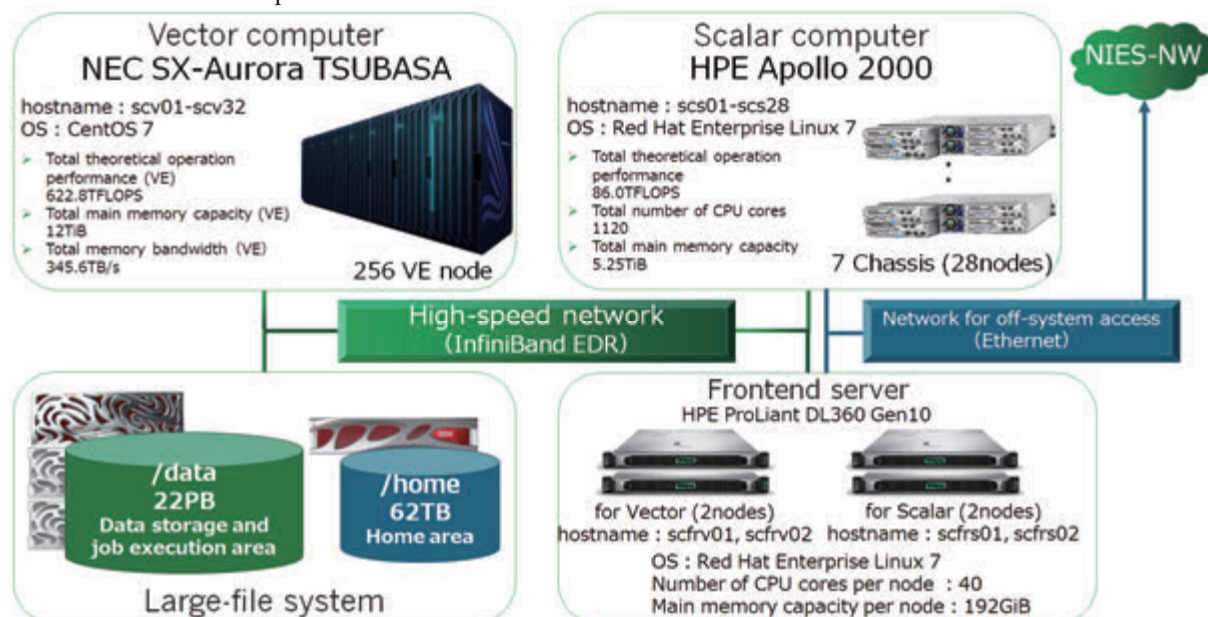
Environmental Information Division, National Institute for Environmental Studies
 NEC Corporation

Abstract:

The National Institute for Environmental Studies operated a supercomputer system (vector processing computer: NEC SX-ACE, scalar processing computer: SGI UV-20 and UV-30) from June 2015 to November 2019. In March 2020, the system was completely updated and a new system started operation. The current system is comprised of a vector processing computer (NEC SX-Aurora TSUBASA A511-64), a scalar processing computer (HPE Apollo 2000), and a large-capacity file system (DDN SFA200NV, ES18KE, SS9012). InfiniBand is used for high-speed network connection. The vector processing computer has a peak performance of 622.8TFLOPS, the total memory bandwidth is 345.6TB/s, and the total memory size is 12.0TiB. SX-Aurora TSUBASA consists of vector engines (VEs) that perform vector processing and vector hosts (VHs) that control the VEs and the OS functions. One VH has eight VEs and one VE has eight cores.

The supercomputer has job queues for regular (v_normal) and debug (v_debug) jobs. They differ in the maximum number of VHs that can be requested and the maximum elapsed time. In FY2021, the system utilization rate was maintained at approximately 82%-100%, and the computational resource utilization rate by research projects was 65.6%, ranging from a monthly average of 21% to 90%.

The large file system has two areas, '/home' with a total capacity of 62TB and '/data' with a total capacity of 22PB. The /home is automatically backed up. In this system, a quota limit has been introduced for the available data capacity and the number of files that each user or research project can use. The average annual usage rate of the file system of the '/data' area in FY2021 was 28%, and the usage rate increased from 23% to 29% within the period.



* Changed the unit notation of main memory capacity from SI prefix to binary prefix from FY2021.

System overview (March 2020 -)

Keywords :

supercomputer, vector processing computer, large-capacity file system

CGER'S SUPERCOMPUTER ACTIVITY REPORT
(Out of stock)

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

.....

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

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

.....

CGER'S SUPERCOMPUTER MONOGRAPH REPORT

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

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

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

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3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
吉口進朗	国立研究開発法人国立環境研究所企画部
富坂隆史	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
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
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
江守正多	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3年度

NIES Supercomputer Annual Report 2021

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-I161-2022]

2022年12月発行

発行元

国立研究開発法人国立環境研究所地球環境研究センター

〒305-8506 茨城県つくば市小野川 16-2

電話 : 029-850-2384

Fax : 029-858-2645

E-mail : www-cger@nies.go.jp

<http://www.cger.nies.go.jp/>

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

