

国立環境研究所スーパーコンピュータ利用研究年報

令和元年度

NIES Supercomputer Annual Report 2019

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

令和元年度

NIES Supercomputer Annual Report 2019

国立環境研究所地球環境研究センター 編

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



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



出版にあたって

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

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

今回の年報には令和元年度に実施された利用研究の成果として、全11課題の研究年次報告を収めました。あわせて、令和元年11月まで運用されていたスーパーコンピュータシステム(SX-ACE)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2(2020)年12月
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長
三枝信子

目次

出版にあたって.....	i
目次.....	iii
1. 気候感度の外部因子依存性に関する研究.....	3
課題代表者：国立環境研究所地球環境研究センター 塩竈秀夫	
2. 大気汚染物質による環境・気候への影響評価.....	9
課題代表者：国立環境研究所地域環境研究センター 五藤大輔	
3. MIROC5 モデルをベースにした海洋結合化学気候モデルの開発.....	23
課題代表者：国立環境研究所地球環境研究センター 秋吉英治	
4. 全球スケールの陸域モデル開発による気候変動研究.....	35
課題代表者：国立環境研究所地球環境研究センター 横畠徳太	
5. 懸濁粒子の動態および環境負荷物質との相互作用を考慮した沿岸海洋長期環境予測 モデルの開発.....	45
課題代表者：国立環境研究所地域環境研究センター 東 博紀	
6. GOSAT-2 全球炭素循環モデルシステム開発.....	55
課題代表者：国立環境研究所地球環境研究センター 齊藤 誠	
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.....	67
課題代表者：国立環境研究所地域環境研究センター 五藤大輔	
8. 大陸から都市スケールでの大気質予測システムの開発と雲・エアロゾル相互作用研究.....	79
課題代表者：国立環境研究所地球環境研究センター 八代 尚	
9. Numerical study on cloud systems using NICAM (NICAM による雲降水システムの研究)	89
課題代表者：東京大学大気海洋研究所 佐藤正樹	
10. 季節変化が熱帯準二年振動 (QBO) に及ぼす影響.....	103
課題代表者：高知工科大学環境理工学群 柴田清孝	

11. 系外惑星も含めた惑星気候多様性に関する数値計算：陸惑星のハビタビリティに関する考察.....	113
課題代表者：北海道大学大学院理学研究院 石渡正樹	
国立環境研究所 スーパーコンピュータシステム概要	123
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	135



NEC SX-ACE (運用期間：2015年6月～2019年11月)

研究課題名：
気候感度の外部因子依存性に関する研究

実施年度：
平成 28 年度～令和元年度

課題代表者：国立環境研究所地球環境研究センター 塩竈秀夫
共同研究者：国立環境研究所地球環境研究センター 小倉知夫・廣田渚郎・石崎紀子
東京大学大気海洋研究所 渡部雅浩・羽角博康
岡山大学大学院自然科学研究科 野沢 徹
東京大学生産技術研究所 金 炯俊

要旨：

気候感度が、外部因子によってどのように異なるのかを調べるために、MIROC6 を用いて、外部因子切り分け実験を行った。これらの実験データを分析したところ、CO₂ とエアロゾルの間で気候感度が異なるだけでなく、過渡実験では気候感度が時間変化することがわかった。CanESM5 の実験結果と比較することで、気候感度の外部因子依存性および時間変化に大きなモデル間不確実性があることもわかった。

キーワード：

気候モデル、気候変動予測、気候感度

研究課題名：
気候感度の外部因子依存性に関する研究

実施年度：
平成 28 年度～令和元年度

課題代表者：国立環境研究所地球環境研究センター 塩竈秀夫
共同研究者：国立環境研究所地球環境研究センター 小倉知夫・廣田渚郎・石崎紀子
東京大学大気海洋研究所 渡部雅浩・羽角博康
岡山大学大学院自然科学研究科 野沢 徹
東京大学生産技術研究所 金 炯俊

1. 研究目的

これまでの課題（気候変動予測における不確実性伝播過程に関する研究）においては、我々が開発・運用に貢献している最先端の気候モデル MIROC を用いて、数多くの数値実験を行うことで、CO₂ に対する気候感度の不確実性要因を調べてきた。本課題では、これまでの研究を発展させ、CO₂ とほかの外部強制因子に対する気候感度の違いとその時間変化に関する研究を行う。

キーワード：
気候モデル、気候変動予測、気候感度

2. スーパーコンピュータ利用実績

2.1 計算機利用時間（2019 年 4 月 1 日～11 月 30 日）

CPU 時間	v_deb	（デバック用）	: 0.00 hours
	v_32cpu	（最大 32CPU コア）	: 16,120.73 hours
	v_96cpu	（最大 96CPU コア）	: 109,986.75 hours
	v_160cpu	（最大 160CPU コア）	: 0.00 hours
		計	: 126,107.48 hours

2.2 利用概要

気候モデル MIROC6 を用いて、全外部因子、温室効果ガス、人為起源エアロゾルに対する気候感度を調べる実験を行い、CanESM5 の実験結果と比較した。モデル計算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

気候感度が、外部因子によってどのように異なるのかを調べるために、MIROC6 を用いて、外部因子切り分け実験を行った。これらの実験データを分析したところ、CO₂ とエアロゾルの間で気候感度が異なるだけでなく、過渡実験では気候感度が時間変化することがわかった。CanESM5 でも CO₂ とエアロゾルの間で気候感度が異なるが、その時間変化の仕方が MIROC6 モデルと大きく異なることがわかった。

3.2 背景と目的

温暖化の緩和コストなどを計算する際には、エアロゾル、オゾン、太陽活動等の外部要因に対する気候感度はCO₂に対する気候感度と同じと仮定する場合が多い。しかし、GCMを用いた先行研究によって、気候感度は外部要因の種類によって大きく異なる可能性が指摘されている(Yoshimori and Broccoli 2008; Shindell 2014)。本研究では、我々が開発・運用に貢献している最先端の気候モデルMIROC6を用いて、数多くの数値実験を行うことで、外部強制要因に対する気候感度の依存性を明らかにする。またCanESM5を用いてEnvironment Canadaで実施された同様の実験結果と比較することで、モデル依存性を議論する。

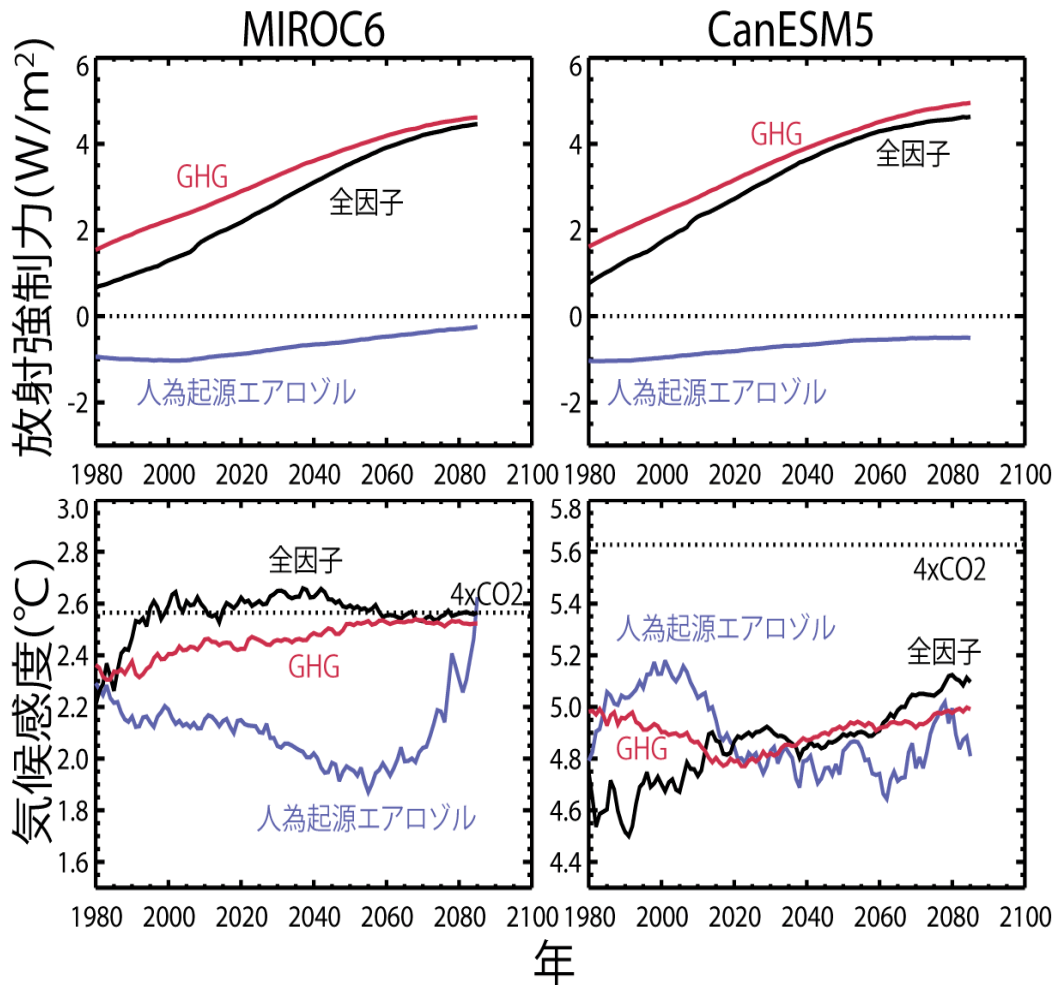


図 1. MIROC6とCanESM5における複数の外部因子に対する放射強制力(上図, W/m²)と気候感度推定値(下図, °C)の時間発展の比較。黒実線は全外部因子実験。赤線は温室効果ガスのみ実験。青線は、人為起源エアロゾル(硫酸性、黒色炭素、有機炭素)のみ実験。下図の黒点線は、4xCO₂実験から求めたCO₂濃度2倍増に対する気候感度。31年移動平均をかけている。(Shiogama et al., in preparation)

3.3 数値シミュレーション

本課題では、MIROC6 を用いて、全外部因子、温室効果ガス、人為起源エアロゾルに対する気候感度を調べる実験を行った。具体的には、MIROC6 の大気コンポーネント (AGCM) と、海洋コンポーネントを含むフルモデル (AOGCM) を用いて、以下の実験を行っている。

- AGCM 実験： 温暖化が進む前の 19 世紀半ばの海面水温と海氷を AGCM の境界条件として与えた上で、1850 年から 2100 年までの個々の外部因子の時間変化を与えた。将来の外部因子の変化は、IPCC AR6 で用いられる SSP2-4.5 シナリオを用いる。これらの実験の大気上端の放射収支変化を解析することで放射強制力の時間変化を求めることができる。
- AOGCM 実験： AOGCM に 1850 年から 2100 年までの個々の外部強制因子の時間変化を与えた。この実験結果を解析することで、海洋を含むフルの気候システムの各外部強制因子に対する応答を調べることができる。

AGCM 実験と AOGCM 実験を併せて解析することで、各外部因子に対する気候感度を求める。

3.4 結果

MIROC6 と CanESM5 では、放射強制力の時間変化はよく似ている (図 1)。温室効果ガスの加熱効果を人為起源エアロゾルの冷却効果が一部打ち消している。温室効果ガスの放射強制力は増加しつつづけるが、人為起源エアロゾルの冷却効果は、徐々にゼロに近づいていく。

全外部因子、温室効果ガス、人為起源エアロゾルの気候感度は全て時間変化するが、その変化の仕方は因子間およびモデル間で全く異なることが分かった。温室効果ガスに対する気候感度は、MIROC6 では時間経過と共に増加するが、CanESM5 では 2020 年頃までは低下し、その後は増加する。人為起源エアロゾルに対する気候感度は、MIROC6 では 2060 年頃までは低下するが、その後は急速に増加する。一方、CanESM5 では 2010 年頃まで増加、2060 年頃までは低下、その後は増加する。全外部因子に対する気候感度は、MIROC6 では 2000 年頃までは増加するが、その後はほぼ一定値になる。ところが、CanESM5 では時間経過と共に増加し続ける。

4. まとめ

気候感度が、外部因子およびモデルによってどのように異なるのかを調べるために、MIROC6 を用いて、外部因子切り分け実験を行った。その結果、過渡応答では気候感度は時間変化し、その性質は外部因子の種類によって異なることが分かった。さらに、CanESM5 の実験結果と比較することで、大きなモデル間不確実性があることを示した。

5. 今後の研究展望

気候感度の外部因子依存性を調べる実験は、「第 6 次結合モデル相互比較計画 (CMIP6)」の実験として課題代表者の塩竈が中心となって提案したものである (Gillett et al. 2016, Pincus et al. 2016)。まだ 2 つのモデル実験結果しか分析できていないが、今後は他機関に実験の実施とデータ提出を求めながら、より多くのモデルの実験結果を比較することで、気候感度の外部因子依存性のモデル間不確実性に関する理解を深めていく。

参考文献

- Gillett, N. P., Shiogama, H., Funke, B., Hegerl, G., Knutti, R., Matthes, K., Santer, B. D., Stone, D., and Tebaldi, C. (2016) The Detection and Attribution Model Intercomparison Project (DAMIP v1.0) contribution to CMIP6. *Geosci. Model Dev.*, **9**, 3685-3697. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-3685-2016>
- Pincus, R., Forster, P. M., and Stevens, B.: The Radiative Forcing Model Intercomparison Project (RFMIP): experimental protocol for CMIP6. *Geosci. Model Dev.*, **9**, 3447–3460. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-3447-2016>
- Shindell, D. T. (2014) Inhomogeneous forcing and transient climate sensitivity. *Nature Climate Change*, **4**, 274–277. <https://doi.org/10.1038/nclimate2136>
- Yoshimori, M. and A. J. Broccoli (2008): Equilibrium response of an atmosphere-mixed layer ocean model to different radiative forcing agents: global and zonal mean response. *J. Climate*, **21**(17), 4399-4423. <https://doi.org/10.1175/2008JCLI2172.1>

6. 研究成果発表

6.1 誌上発表（査読あり）

- Shiogama, H, T Hasegawa, S Fujimori, D Murakami, K Takahashi, K Tanaka, S Emori, I Kubota, M Abe, Y Imada, M Watanabe, D Mitchell, N Schaller, J Sillmann, E Fischer, J. F. Scinocca, I. Bethke, L Lierhammer Jun'ya Takakura, Tim Trautmann, Petra Döll, Sebastian Ostberg, Hannes Müller Schmied, Fahad Saeed, Carl-Friedrich Schleussner (2019) Limiting global warming to 1.5°C will lower increases in inequalities of four hazard indicators of climate change. *Environ. Res. Lett.*, **14**, 124022. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab5256>

6.2 誌上発表（査読なし）

なし。

6.3 口頭発表

- Shiogama H. (2019) Uneven distributions of four hazard indicators of climate change with the Paris Agreement's goals. *Japan Geoscience Union Meeting (JpGU) 2019*, Makuhari, 29 May 2019.
- Hirota, N., T. Ogura, H. Shiogama, P. M. Caldwell, M. Watanabe, Y. Kamae, and K. Suzuki, (2019) Differences in convection over warmer and cooler tropical oceans associated with climate sensitivity in CMIP5. *CFMIP2019*, Mykonos, Greece, Oct 1, 2019.

7. 連絡先

塩竈秀夫

〒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環境研究センター

Tel: 029-850-2252 Fax: 029-858-2645

E-mail: shiogama.hideo@nies.go.jp

Project name:

Studies on dependencies of climate sensitivity to different external factors

April 2018 – March 2020

Project leader:

Hideo Shiogama, Center for Global Environmental Research, National Institute for Environmental Studies

Project members:

Tomoo Ogura, Nagio Hirota, Noriko Ishizaki, Center for Global Environmental Research, National Institute for Environmental Studies

Masahiro Watanabe, Hiroyasu Hasumi, Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo

Toru Nozawa, Department of Earth System Sciences, Okayama University

Hyungjun Kim, Institute of Industrial Science, The University of Tokyo

Abstract:

To investigate the dependencies of climate sensitivity to different external factors, we performed several sensitivity experiments using the MIROC6 model. We found that climate sensitivities are significantly different between CO₂ and aerosols and vary with the time in the transient simulations. We also compared these results with those of CanESM5 and found that there are large uncertainties in the forcing dependencies of climate sensitivity between the models.

Keywords:

climate models, climate projections, climate sensitivity

研究課題名： 大気汚染物質による環境・気候への影響評価

実施年度：
平成 28 年度～令和元年度

課題代表者：国立環境研究所地域環境研究センター 五藤大輔
共同研究者：国立環境研究所地域環境研究センター 永島達也
九州大学応用力学研究所 竹村俊彦・道端拓朗
名古屋大学大学院環境学研究科 須藤健悟・大西貴都・HA Thi Minh Phuc・松田涼樹・府中雄大
海洋研究開発機構ビッグデータ活用予測プロジェクトチーム 関谷高志
近畿大学総合社会学部 中田真木子
株式会社中電シーティーアイ解析エンジニアリング部 長谷川晃一
ソウル大学校自然科学大学および蔚山科学技術大学校 朴 祥緒
東京都市大学環境情報学研究科 Karkour Selim

要旨：

本課題では、全球規模の大気汚染物質輸送モデルと様々な排出シナリオを用いて、大気海洋応答を通じた大気汚染物質の環境・気候影響を評価し、各シナリオに対する大気汚染の三次元構造に関する定量的な理解を向上させ、マルチモデル比較による大気汚染物質の分布の再現性を検証することを目的とした。昨年度まででシナリオ実験が終了し、今年度は、気候モデル MIROC が特に苦手としている雲・降水過程の改良に重点的に取り組んだ。昨年度までに降水を陽に予報する新しいパラメタリゼーションの構築は概ね完了していたものの、過冷却水滴の割合の気温依存性のバイアスが顕著であり、それにより雲量を過小評価するなど、依然として課題点が残ったままになっていた。こうしたバイアスの改善を目指し、特に氷晶・降雪過程に係る微物理スキームの見直しを行ったほか、複数の衛星観測データを活用することでパラメータ調整を実施した。その結果、CALIPSO-GOCCP 衛星観測と整合的な過冷却水滴の割合が表現できるようになり、雲量の水平分布・鉛直分布についても従来型モデルと比較し大幅に再現性が向上した。こうした雲・降水過程の更新に伴い、従来型モデルで過大評価傾向 (-1.42 Wm^{-2}) であるエアロゾル・雲相互作用に伴う有効放射強制力 (ERFaci) が大幅に減少し、観測による推定値 (-0.63 Wm^{-2}) に近い ERFaci (-0.80 Wm^{-2}) を得ることが可能になった。さらに、新スキームの導入に伴う降水の素過程表現への寄与を考察するために、雲のライフサイクルを可視化する独自の評価手法を衛星観測シミュレータ COSP (CFMIP Observational Simulator Package) に導入した。そのツールを用いたモデルの微物理過程の診断により、降水予報型スキームは衛星観測により示唆される雲水から雨水への成長時間スケールを精度よく表現できていることが明らかになった。これは、国内外の多くの気候モデルが抱えている、降水頻度の過大評価・降水強度の過小評価バイアスを、降水予報型の取り扱いによって本質的に解消することができることを示す結果であり、数値モデルの共通バイアスの改善に対して極めて有益な成果が得られた。

キーワード：

降水予報型スキーム、衛星観測シミュレータ、大気汚染物質輸送モデル、短寿命気候汚染物質 (short-lived climate pollutant: SLCP)、エアロゾル・雲相互作用、エアロゾル有効放射強制力

研究課題名：
大気汚染物質による環境・気候への影響評価

実施年度：
平成 28 年度～令和元年度

課題代表者：国立環境研究所地域環境研究センター 五藤大輔
共同研究者：国立環境研究所地域環境研究センター 永島達也
九州大学応用力学研究所 竹村俊彦・道端拓朗
名古屋大学大学院環境学研究科 須藤健悟・大西貴都・HA Thi Minh Phuc・松田涼樹・府中雄大
海洋研究開発機構ビッグデータ活用予測プロジェクトチーム 関谷高志
近畿大学総合社会学部 中田真木子
株式会社中電シーティーアイ解析エンジニアリング部 長谷川晃一
ソウル大学校自然科学大学および蔚山科学技術大学校 朴 祥緒
東京都市大学 環境情報学研究科 Karkour Selim

1. 研究目的

大気汚染は発生源付近に限らず、国境を越えて広域的に分布するため、世界的な問題となっている。また大気汚染物質は、大気環境と共に気候にも影響を与えることが知られており、大気汚染物質の排出量を効率的に制御し気候影響を緩和するために、近年では気候と大気清浄化国際枠組み (CCAC: Climate and Clean Air Coalition) や Future Earth といった国際的な取り組みも立ち上っている。我が国ではこれらの取り組みに対応した研究プロジェクトとして、環境省戦略推進費 S-12 が平成 26 年度に開始され、独自の排出シナリオを構築し、そのシナリオによる環境・気候影響評価を数値モデルで行ってきた。このような背景の下で本課題では、S-12 プロジェクトの数値計算を担う研究者の大部分が本申請課題に参加し、全球規模の大気汚染物質輸送モデルと様々な排出シナリオを用いて、大気海洋応答を通じた大気汚染物質の環境・気候影響を評価し、各シナリオに対する大気汚染の三次元構造に関する定量的な理解を向上させ、マルチモデル比較による大気汚染物質の分布の再現性を検証することを目的としてきた。特に今年度は、これまでの計算結果を鑑みて、気候モデルが苦手としている雲・降水過程を改良することを目的とする。

キーワード：

降水予報型スキーム、衛星観測シミュレータ、大気汚染物質輸送モデル、短寿命気候汚染物質 (short-lived climate pollutant: SLCP)、エアロゾル・雲相互作用、エアロゾル有効放射強制力

2. スーパーコンピュータ利用実績

2.1 計算機利用時間 (2019 年 4 月 1 日～11 月 30 日)

CPU 時間	v_deb (デバック用)	: 357.57 hours
	v_32cpu (最大 32CPU コア)	: 62,534.28 hours
	v_96cpu (最大 96CPU コア)	: 1,384,304.38 hours
	v_160cpu (最大 160CPU コア)	: 364,769.78 hours
	計	: 1,811,966.01 hours

2.2 利用概要

本研究課題では、衛星観測シミュレータ COSP が搭載された大気大循環モデル MIROCversion 6 (MIROC6) とエアロゾルモデル SPRINTARS が結合した MIROC6-SPRINTARS モデルを主に用いて、並列計算を行った。

3. 研究結果

3.1 概要

数値気候モデルには、観測統計量と比較して雲量が過小評価であるほか、降水の頻度・強度の再現性、およびエアロゾル・雲相互作用の強さなどに系統的なバイアスが報告されている (Quaas et al., 2009; Suzuki et al., 2015)。これは、雲・降水に関する基礎的な知見が不足していた時代に開発されたモデリング手法が用いられていることに起因する。しかし現在では、雲・降水に関する知見が蓄積されてきているため、モデル内で表現する雲・降水の取り扱いおよびそれらに伴う放射効果を含めた表現手法を本質的に高度化することが可能となり、本研究課題においても新しい雲・降水スキームの開発を推進してきた。また、気候モデルの不確実性の検証材料となる衛星観測データの特性を有効に利用するため、衛星観測シミュレータ (COSP: CFMIP Observational Simulator Package) に雲・降水の素過程を診断する独自の評価メトリックを組み込むことで、モデル・観測間の矛盾を紐解く研究を推進した。

3.2 背景と目的

エアロゾルがトリガーとなって引き起こされる雲・降水の微物理過程の調整プロセス (エアロゾル・雲・降水相互作用) は、非線形性が強く過程が複雑であるため、全球気候モデル (GCM) における最大の不確実性要素の一つとなっている (Quaas et al., 2009)。その本質的な原因の一つに、降水を予報変数ではなく、診断変数として取り扱っている点が挙げられる。そこで本研究では、降水を予報し、その放射効果も陽に計算する新しいパラメタリゼーションを開発し、国内外多くの GCM が抱える共通バイアスを改善することを第一の目的とする。モデルの評価にあたっては、全球衛星観測データを活用することで数値モデルの不確実なプロセスに制約を与えることで、素過程レベルでの高度化を目指す。その際に有効になるのが、数値モデル内で衛星観測と同様のリトリーバルを再現する、衛星観測シミュレータ COSP (Bodas-Salcedo et al., 2011) というツールである。しかし、雲・降水の素過程を診断するためには、雲ピクセルスケールにダウンスケーリングを行うほか、高時間分解能の出力が要求されるなど、多数の感度実験を実施・解析する上でのボトルネックとなっていた。この問題を本質的に解消するため、あらかじめターゲットとなる素過程の診断メトリックを COSP に組み込むことで、数値モデル評価効率の向上とモデル開発の加速を目的とした、各国のモデリングセンターで共同利用可能なツールとしてのユニバーサルデザインを提供する取り組みを実施した。

3.3 結果

(1) MIROC6-SPRINTARSにおける新しい雲・降水スキームの開発と調整

降雨・降雪を予報変数として導入したことで、水蒸気・雲水・雲氷に加え、降雨・降雪粒子を介した水循環の時間発展や相変化をより詳細に表現することが可能になった。雲・降水パラメタリゼーションの定式化を再構築し、より物理ベースなプロセス表現が可能になった一方、いくつかの指標ではバイアスが悪化したことが昨年度までの調査で判明していた。例えば、過冷却水滴の割合 (SLF: Super-cooled Liquid Fraction) の気温依存性のバイアスと、それに起因する雲量の再現性のバイアスである。

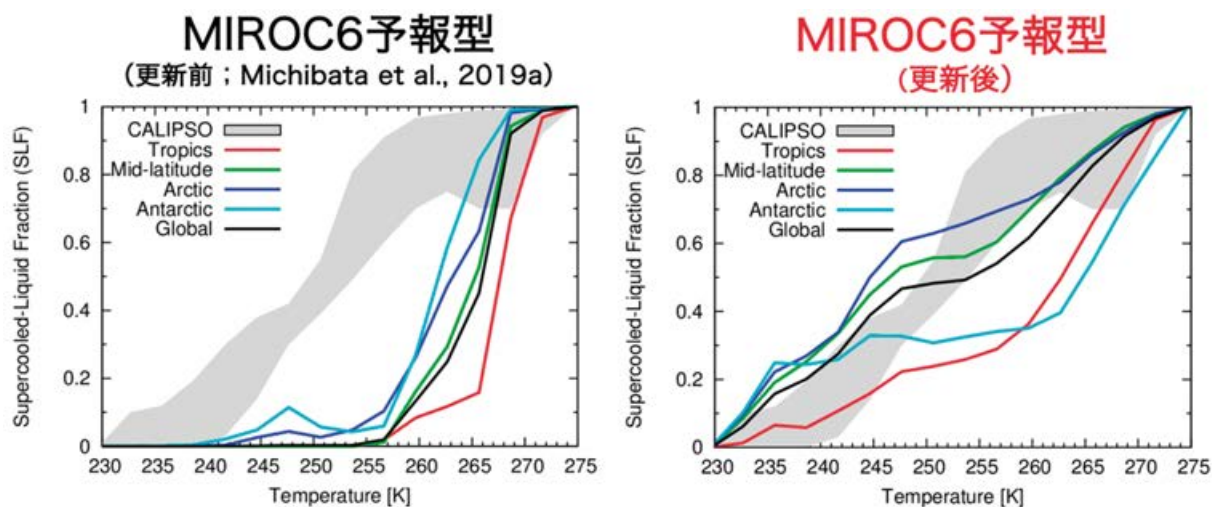


図 1. (左) 改良前の降水予報型スキームおよび (右) 氷晶・降雪の微物理過程の改良後の降水予報型スキームによってシミュレートされた過冷却水滴の割合の気温依存性。グレーのシェードは、衛星観測データを用いた複数の先行研究によるリトリーバル (Choi et al., 2010; McCoy et al., 2015)、色付きの線は COSP によるモデル診断の緯度別の統計結果。

開発当初のバージョンの降水予報型スキーム (Michibata et al., 2019a) では、衛星観測と比較して SLF を顕著に過小評価していた (図 1 左)。モデルが SLF を過小評価すると、地球が温暖化した際に雲氷から雲水にフェーズが変化することによる負の雲フィードバックを過大に表現することにつながるものが指摘されている (Tan et al., 2016)。こうした SLF のバイアスが生じる原因は、雲水と雲氷が共存する混合相雲において、液体と固体に対する飽和水蒸気圧の違いにより雲氷が早く成長する Bergeron-Findeisen プロセスを過大に表現しているためであると考えられる。

そこで、先行研究での気候モデルの改良例 (Lawson and Gettelman, 2014) を参考にして、水蒸気拡散効率のスケール依存性を考慮に入れて調整を行なった。また、開発当初のバージョンでは雲氷から降雪への変換効率を計算する際に気温および質量に依存する恣意的な閾値を設定しており、雲氷から降雪への成長の連続性が保証されていなかったため、これらの閾値の撤廃も併せて行なった。さらに、エアロゾルモジュールとの整合性も担保するため、SPRINTARS で従来計算していた均一核形成過程などを雲微物理ルーチンで考慮するよう計算順序を複数変更した。

上記の調整により、SLF の気温依存性を衛星観測によるリトリーバルと整合的に表現することが可能となった (図 1 右)。SLF の気温依存性のバイアスは、多くの GCM が抱える共通バイアスの一つであるため (McCoy et al., 2015)、降水予報型スキームによるモデルの基盤の高度化を達成できたことは、将来気候予測に対する不確実性の理解に大きな進展をもたらすことが期待される。

また、開発初期バージョンの降水予報型スキームおよび従来の診断型スキームは雲量のバイアスも顕著であり、GCM の共通バイアスの一つでもある。下層雲量の再現性は良い一方で、特に上層雲が全球で過小評価であり、また中・高緯度での雲の過小評価バイアスが明らかとなっていた。これは先述の通り、SLF のバイアスおよび雲氷から降雪への成長が早すぎる問題と直結していると考えられる。雲・降水過程の一連の調整の結果、熱帯上空での上層雲が観測と整合的に表現できるようになったほか、中緯度、特に南大洋の雲量が増加し、全雲量の全球平均値としては従来の診断型モデルよりも 8% 近く改善することができた (図 2)。

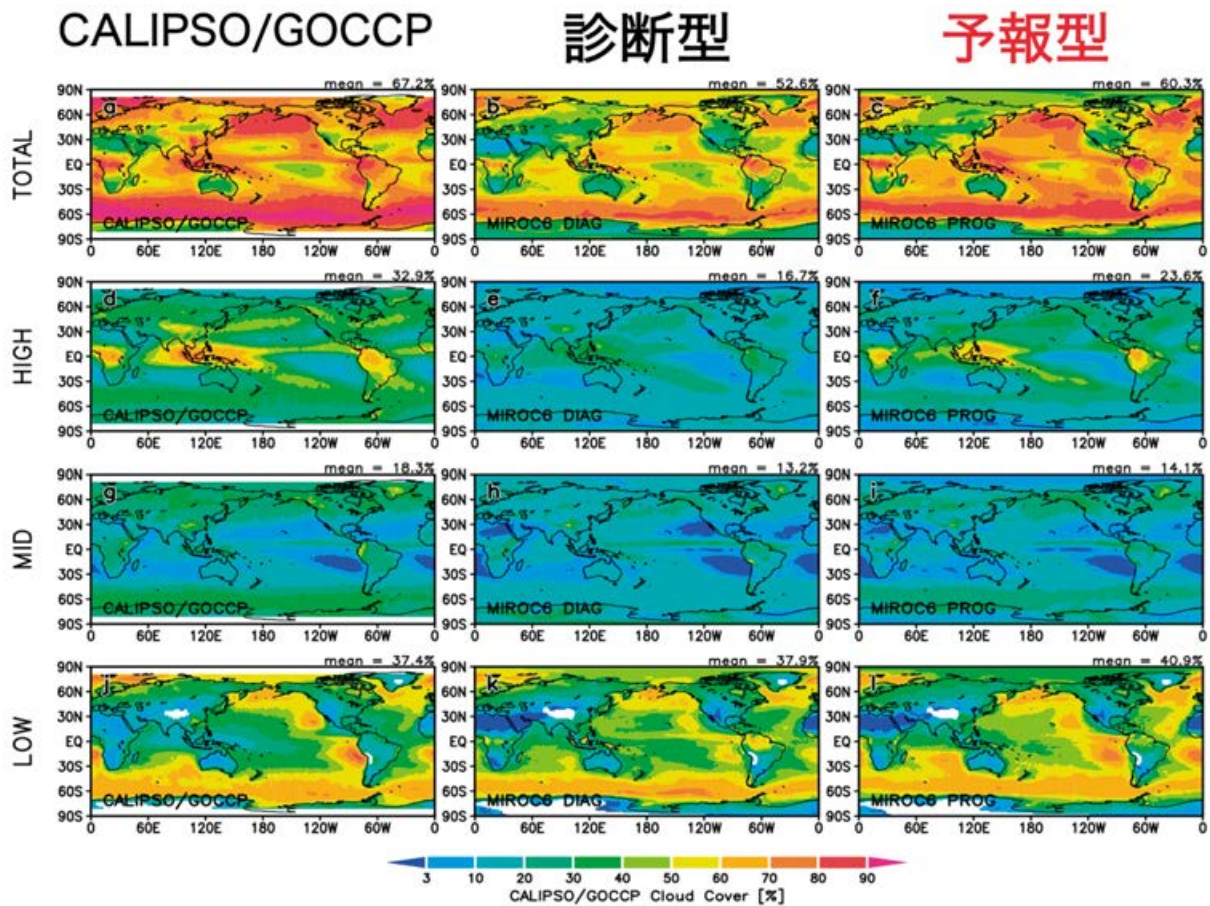


図 2. (左) CALIPSO-GOCCP 衛星観測, (中) MIROC6 降水診断型スキーム, (右) MIROC6 降水予報型スキームによる雲量の水平分布。上段から下段に向かいそれぞれ全雲量、上層雲量、中層雲量、下層雲量を示す。MIROC6 の雲量は衛星観測シミュレータ COSP により診断。

さらに、降水予報型スキームの特徴として、エアロゾルが雲寿命の変化を引き起こす感度の大きさ（エアロゾル・雲相互作用）についても、より現実的にシミュレートすることができる利点があることも明らかになった。図 3 は、エアロゾル・雲相互作用による有効放射強制力（ERFaci: Effective Radiative Forcing due to Aerosol-Cloud Interactions）について、降水を診断的・予報的に取り扱う MIROC6 モデルの結果を衛星観測による推定と比較したものである。診断型降水スキームは、ERFaci を負に過大評価（ -1.42 Wm^{-2} ）しているのに対して、降水予報型スキーム（ -0.80 Wm^{-2} ）は衛星観測による推定値（ -0.63 Wm^{-2} ）を良く再現しており、GCM における共通バイアスの一つであるエアロゾルへの感度が大きすぎる問題（Jing et al., 2019）を解消する方向に働くことを示す結果である。

その原因としては、雲内部で生じる accretion（降水粒子による雲粒の捕捉成長）が雲の成長ステージに応じて表現できることと、降雪の放射効果に起因する長波成分の温室効果の寄与を表現可能になったことが主因と考えられる。

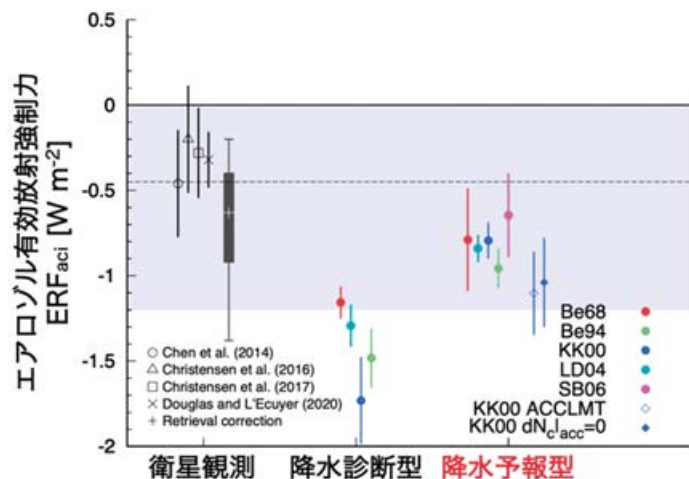


図 3. エアロゾル・雲相互作用に伴う有効放射強制力 (ERFaci) の全球年平均値。(左) 衛星観測による推定値とそれらのリトリーバル補正後 (箱ひげ) の ERFaci、MIROC6 による (中央) 降水診断型および (右) 降水予報型モデルによる複数の autoconversion スキームを用いた実験結果。モデルで使用した autoconversion スキームをカラーのプロットで凡例に示す (BE68; Berry (1968), BE94; Beheng (1994), KK00; Khairoutdinov and Kogan (2000), LD04; Liu and Daum (2004); SB06; Seifert and Beheng (2006))。KK00 スキームを用いたさらなる追加実験 (ACCLMT および $dN_{c|acc=0}$) については本報告書ではこれ以上言及しない (Michibata and Suzuki, 2020 の図 2 より引用)。

(2) 衛星観測シミュレータ COSP2 に適用する降水素過程の評価ツールの開発

気候モデルの不確実性の理解および性能検証のための貴重な比較材料となるのが、全球規模で高時空間分解能の観測を行なっている衛星観測データである。しかし、衛星センサーから導出された物理量は逆問題を解くことで推定された、いわゆる“リトリーバル”であり、数値モデルが示す物理解と整合的な比較を行うためには、モデルの出力に衛星センサーと同一のリトリーバルを通して順問題を解いた物理量と比較を行う必要がある (Masunaga et al., 2010)。それを可能にするツールが衛星観測シミュレータで、気候モデルコミュニティでは Cloud Feedback Model Intercomparison Project (CFMIP) が中心となって開発・提供している、CFMIP Observational Simulator Package (COSP) が広く利用されている (Bodas-Salcedo et al., 2011)。COSP は現在、ISCCP, MODIS, MISR, CloudSat, CALIPSO 衛星のシグナルシミュレータを生成するコード群で構成されており、衛星観測と数値モデルの整合的な比較を実施するための“雲の共通言語”として機能するツールとして位置づけられている (Swales et al., 2018)。

数値気候モデルが特に苦手としている雲・降水の素過程の取り扱いを、COSP を用いて診断する場合、例えば能動型センサーである CloudSat を用いた鉛直構造の理解が不可欠である。その際、雲ピクセルスケールでのリトリーバルを作成するため、数値モデルのグリッドスケール (~100 km 程度) の出力に対して COSP 内で雲スケール (~数 km 程度) のサブカラムに分解して処理を行うため (図 4)、COSP 出力変数の容量が膨大となり、多数の感度実験や解析を行う際のボトルネックとなっていた。そこで、COSP 本体に解析スクリプトそのものを埋め込むことで、レーダーやライダーによるサブカラムの情報を含んだ変数を出力することなく高次の統計情報が得られるような解析ルーチンの開発に取り組んだ。それにより、COSP ユーザーは出力容量が増大する問題を回避することができ、かつ解析効率を最大化する、ツールとしてのユニバーサルデザインの構築を目指した。

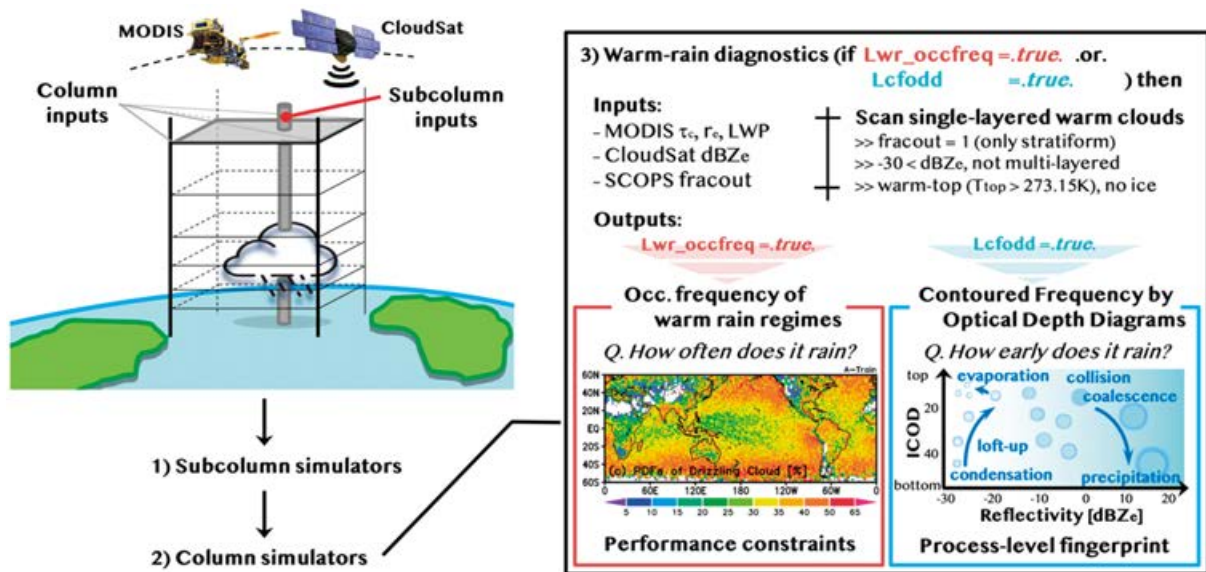


図 4. COSPに実装した暖かい雨のインライン診断ツールの計算手順の模式図。COSPの出力ネームリストのLwr_occfreqもしくはLcfoddを.true.に設定することで、該当の素過程診断メトリックが自動的に計算される。その場合、MODISおよびCloudSatシミュレータの両方が自動的にONになる。MODISおよびCloudSatの情報から一層の水雲のみを解析対象として抽出し、それらの積算サンプル数が出力される。ユーザーは後処理のスクリプトを用いて目的の診断メトリックが得られる(Michibata et al., 2019b)の図1より引用)。

図4に、実装したインライン診断ツールの概要を示す。COSPの出力ネームリストでLwr_occfreqフラグもしくはLcfoddフラグのいずれかが.true.として指定された場合、MODISおよびCloudSatシミュレータが自動的に起動し、それぞれのフラグに従い、降水発生頻度の水平分布診断および、雲水から雨水への成長ライフサイクルを鉛直方向に可視化したダイアグラムがインライン診断される。統計解析ルーチンの入力データとして受け取ったMODISおよびCloudSatシミュレータの情報を元に、単相の水雲のみを診断の対象として抽出し、ターゲットとなる診断のサンプル数を積算する。出力される積算サンプル数に対して後処理スクリプトを適用することで、ユーザーは目的とする頻度分布の情報が得られる。インライン診断ツールは、すでに最新版のCOSP2のソースコードに反映され、世界中のモデリングセンターで利用可能な状態である(Michibata et al., 2019b)。また利用促進のため、モデルの評価を行うための参照データとなるCloudSatおよびMODIS観測による統計データおよび後処理スクリプト等も併せて公開している(Michibata et al., 2019c,d)。インライン計算の導入に伴う計算コストの増加は0.8%程度であり(国立環境研究所SX-ACEスーパーコンピュータシステム上で調査)、他のインターフェース上においても実用上の問題はないと予想される。

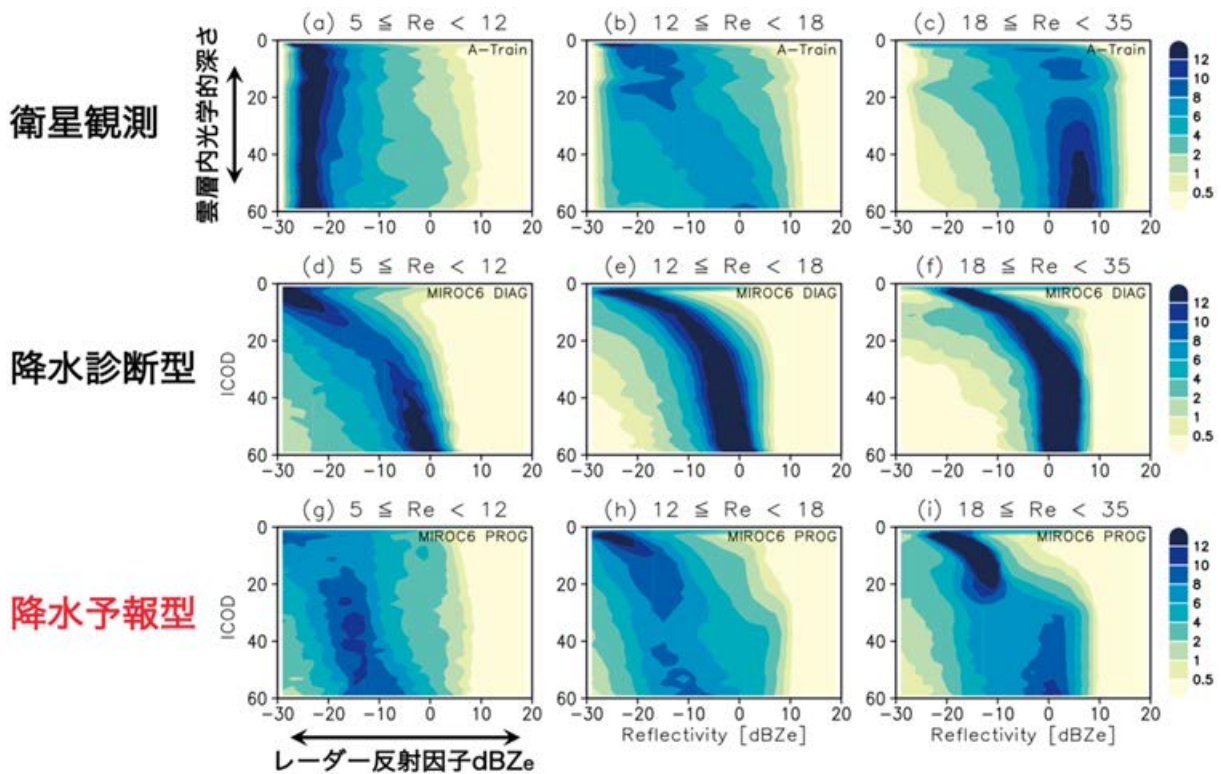


図 5. (上段) CloudSatおよびMODIS衛星観測、(中段) 降水診断型スキーム、および(下段) 降水予報型スキームによって得られたCFODD。レーダー反射因子が < -15 dBZe は非降水性、 $-15 < \text{dBZe} < 0$ はドリズル（霧雨）、 $0 < \text{dBZe}$ は降水性のレジームと判別される。

診断ツールを用いた解析への適用例を図5に示す。図5は、レーダー反射率の鉛直プロファイルの頻度分布図で、鉛直軸は雲頂から潜った雲光学的厚さで規格化しているため、雲頂から雲底に至る雲の鉛直構造を可視化した図である (Nakajima et al., 2010; Suzuki et al., 2011)。これは、Contoured Frequency by Optical Depth Diagram (CFODD) と呼ばれる可視化手法で、MODISから得られた雲粒有効粒径 (R_e) の増加に従って、非降水性レジームからドリズル・降水性のレジームへと成長する、雲のライフサイクルを映し出している (図5a-c)。

一方で降水診断型のMIROC6によって得られたCFODDは、観測では非降水レジームを示している最も小さい R_e レンジにおいても降水への変換が開始している様子を示しており (図5d)、気候モデルにおける共通バイアスの一つである“too early too frequent rain” (Jing et al., 2017) の傾向を示唆する結果である。降水予報型スキームによるシミュレーションでは、降水診断型と比較してバイアスが軽減されていることがCFODDから明瞭に判断でき (図5g-i)、従来型モデルでの共通バイアスであった降水の頻度・強度の問題と、図3で示したエアロゾル・雲相互作用の問題の両方について、より現実的なシミュレーションが可能になった。これは、降水の素過程と全球エネルギー収支の間の誤差補償 (Jing et al., 2019) に対して、降水を予報することが一つの解決策になることを意味する。

このような診断メトリックを用いて数値モデルの評価を実施することで、不確実性の大きい雲・降水プロセスを観測から素過程レベルで拘束し、より現実的なパラメタリゼーションの構築やモデル間相互比較による統一的な理解に貢献するものと期待される。

参考文献

- Beheng K. D. (1994) A parameterization of warm cloud microphysical conversion processes. *Atmos. Res.*, **33**, 193–206. [https://doi.org/10.1016/0169-8095\(94\)90020-5](https://doi.org/10.1016/0169-8095(94)90020-5)
- Berry E. X. (1968) Modification of the Warm Rain Process, in: Proc. First Conf. on Weather Modification, pp. 81–85, Albany, NY. Amer. Meteor. Soc, paper presented at *1st National Conf. on Weather Modification*, April 28–May 1, 1968.
- Bodas-Salcedo A., et al. (2011) COSP: Satellite simulation software for model assessment. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **92**, 1023–1043. <https://doi.org/10.1175/2011BAMS2856.1>
- Choi Y., Ho C. H., Kim S. W., Lindzen R. S. (2010) Observational diagnosis of cloud phase in the winter Antarctic atmosphere for parameterizations in climate models. *Adv. Atmos. Sci.*, **27**, 1233–1245. <https://doi.org/10.1007/s00376-010-9175-3>
- Jing X., Suzuki K., Guo H., Goto D., Ogura T., Koshiro T., Mülmenstädt J. (2017) A multimodel study on warm precipitation biases in global models compared to satellite observations. *J. Geophys. Res. -Atmos.*, **122**, 11806–11824. <https://doi.org/10.1002/2017JD027310>
- Jing X., Suzuki K., Michibata T. (2019) The key role of warm rain parameterization in determining the aerosol indirect effect in a global climate model. *J. Climate*, **32**, 4409–4430. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-18-0789.1>
- 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. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(2000\)128<0229:ANCPPI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(2000)128<0229:ANCPPI>2.0.CO;2)
- Lawson R. P., Gettelman A. (2014) Impact of Antarctic mixed-phase clouds on climate. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, **111**, 18156–18161. <https://doi.org/10.1073/pnas.1418197111>
- Liu Y., Daum P. H. (2004) Parameterization of the autoconversion process. Part I: Analytical formulation of the Kessler-type parameterizations. *J. Atmos. Sci.*, **61**, 1539–1548. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(2004\)061<1539:POTAPI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(2004)061<1539:POTAPI>2.0.CO;2)
- Masunaga H., Matsui T., Tao W.-K., Hou A. Y., Kummerow C. D., Nakajima T., Bauer P., Olson W. S., Sekiguchi M., Nakajima T. Y. (2010) Satellite Data Simulator Unit A multisensor, multispectral Satellite Simulator Package. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **91**, 1625–1632. <https://doi.org/10.1175/2010BAMS2809.1>
- McCoy D. T., Hartmann D. L., Zelinka M. D., Ceppi P., Grosvenor D. P. (2015) Mixed-phase cloud physics and Southern Ocean cloud feedback in climate models. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **120**, 9539–9554. <https://doi.org/10.1002/2015JD023603>
- Michibata T., Suzuki K., Sekiguchi M., Takemura T. (2019a) Prognostic precipitation in the MIROC6-SPRINTARS GCM: Description and evaluation against satellite observations. *J. Adv. Model. Earth Syst.*, **11**, 839–860. <https://doi.org/10.1029/2018MS001596>
- Michibata T., Suzuki K., Ogura T., Jing X. (2019b) Incorporation of inline warm rain diagnostics into the COSP2 satellite simulator for process-oriented model evaluation. *Geosci. Model Dev.*, **12**, 4297–4307. <https://doi.org/10.5194/gmd-12-4297-2019>
- Michibata T., Suzuki K., Ogura T., Jing X. (2019c) Scripts for the publication “Incorporation of inline warm rain diagnostics into the COSP2 satellite simulator for process-oriented model evaluation” (Version 1.0.0). *Zenodo*. <https://doi.org/10.5281/zenodo.1442468>
- Michibata T., Suzuki K., Ogura T., Jing X. (2019d) Data for the publication “Incorporation of inline warm rain diagnostics into the COSP2 satellite simulator for process-oriented model evaluation” (Version 1.0.0), *Zenodo*. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3370823>
- Michibata T., Suzuki K. (2020) Reconciling compensating errors between precipitation constraints and the energy budget in a climate model. *Geophys. Res. Lett.*, **47**, e2020GL088340. <https://doi.org/10.1029/2020GL088340>
- Nakajima T. Y., Suzuki K., Stephens G. L. (2010) Droplet Growth in Warm Water Clouds Observed by the A-Train. Part II: A Multisensor View, *J. Atmos. Sci.*, **67**, 1897–1907. <https://doi.org/10.1175/2010JAS3276.1>
- Quaas J., et al. (2009) Aerosol indirect effects – general circulation model intercomparison and evaluation with satellite data. *Atmos. Chem. Phys.*, **9**, 8697–8717. <https://doi.org/10.5194/acp-9-8697-2009>
- Seifert A., Beheng K. D. (2006) A two-moment cloud microphysics parameterization for mixed-phase clouds. Part 1: Model description. *Meteorol. Atmos. Phys.*, **92**, 45–66. <https://doi.org/10.1007/s00703-005-0112-4>
- Suzuki K., Stephens G. L., van den Heever S. C., Nakajima T. Y. (2011) Diagnosis of the Warm Rain Process in Cloud-Resolving Models Using Joint CloudSat and MODIS Observations. *J. Atmos. Sci.*, **68**, 2655–2670. <https://doi.org/10.1175/JAS-D-10-05026.1>
- Suzuki K., Stephens G. L., Bodas-Salcedo A., Wang M., Golaz J.-C., Yokohata T., Koshiro T. (2015) Evaluation of the Warm Rain Formation Process in Global Models with Satellite Observations. *J. Atmos. Sci.*, **72**, 3996–4014. <https://doi.org/10.1175/JAS-D-14-0265.1>

- Swales D. J., Pincus R., Bodas-Salcedo A. (2018) The cloud feedback model intercomparison project observational simulator package: Version 2. *Geosci. Model Dev.*, **11**, 77–81. <https://doi.org/10.5194/gmd-11-77-2018>
- Tan I, Storelvmo T, Zelinka M. D. (2016) Observational constraints on mixed-phase clouds imply higher climate sensitivity. *Science*, **352**:224–227. <https://doi.org/10.1126/science.aad5300>

4. まとめ

前年度までに開発を推進してきた、MIROC6-SPRINTARS に適用する降水予報型スキームの性能向上を目指し、特に氷晶微物理過程の高度化を実施した。その結果、開発初期のバージョン (Michibata et al., 2019a) での課題となっていた、SLF の気温依存性や雲量バイアスを大幅に改善することができた。また、GCM における雲・降水の素過程をより効率的に診断する統計解析パッケージを開発し、COSM 公式版パッケージに実装した。診断される降水素過程の情報から、降水予報型スキームは降水の頻度・強度のバイアスについても従来型モデルと比較し精度よくシミュレートできていることが示唆された。この解析ツールにより、各国のモデリングセンターが同一アルゴリズムでモデルの診断を行うことができるようになるため、より統合的なモデル間相互比較に役立つものと期待される。コード一式はリポジトリ (Zenodo) 上で公開しているほか、モデル検証を実施するための参照データとなる衛星観測データの統計解析結果についても併せて公開し、利用の促進と成果の発信にも努めた。

5. 今後の研究展望

本課題で継続的に開発を推進してきた降水予報型スキームは、降雨・降雪の質量及び数濃度をそれぞれ予報する 2moment 法で、さらにそれらの放射効果についても陽に取り扱っており、GCM の中では世界最高水準の仕様である。さらなる性能向上のために、雲・降水のサブグリッドスケールの不均一性も考慮に入れたスキームを導入することで、より物理過程に則したモデルの高度化を目指す。また、より詳細な素過程の診断を継続して実施し、エアロゾル・雲相互作用に伴う有効放射強制力や気候感度、温暖化に伴う雲フィードバックとの結びつきを明らかにすることで、気候予測の不確実性の理解に結びつける研究を推進する。

6. 研究成果発表

6.1 誌上発表 (査読あり)

- Chang, K.-L., Cooper, O. R., West, J. J., Serre, M. L., Schultz, M. G., Lin, M., Marécal, V., Josse, B., Deushi, M., Sudo, K., Liu, J., and Keller, C. A. (2019) A new method (M3Fusion v1) for combining observations and multiple model output for an improved estimate of the global surface ozone distribution. *Geosci. Model Dev.*, **12**, 955–978. <https://doi.org/10.5194/gmd-12-955-2019>
- Gryspeerd, E., Mulmenstadt, J., Gettelman, A., Malavelle, F. F., Morrison, H., Neubauer, D., Partridge, D. G., Stier, P., Takemura, T., Wang, H., Wang, M., and Zhang, K. (2020) Surprising similarities in model and observational aerosol radiative forcing estimates. *Atmos. Chem. Phys.*, **20**, 613–623. <https://doi.org/10.5194/acp-20-613-2020>
- Hakim, Z. Q., Archer-Nicholls, S., Beig, G., Folberth, G. A., Sudo, K., Abraham, N. L., Ghude, S., Henze, D. K., and Archibald, A. T. (2019) Evaluation of tropospheric ozone and ozone precursors in simulations from the HTAPII and CCMII model intercomparisons – a focus on the Indian subcontinent. *Atmos. Chem. Phys.*, **19**, 6437–6458. <https://doi.org/10.5194/acp-19-6437-2019>
- Hara, K., Sudo, K., Ohnishi, T., Osada, K., Yabuki, M., Shiobara, M., and Yamanouchi, T. (2019) Seasonal features and origins of carbonaceous aerosols at Syowa Station, coastal Antarctica. *Atmos. Chem. Phys.*, **19**, 7817–7837. <https://doi.org/10.5194/acp-19-7817-2019>
- Hodnebrog, O., Myhre, G., Samset, B. H., Alterskjar, K., Andrews, T., Boucher, O., Faluvegi, G., Flaschner, D., Forster, P. M., Kasoar, M., Kirkevåg, A., Lamarque, J.-F., Olivie, D., Richardson, T. B., Shawki, D., Shindell, D., Shine, K. P., Stier, P., Takemura, T., Voulgarakis, A., and Watson-Parris, D. (2019) Water vapour adjustments and responses differ between climate drivers. *Atmos. Chem. Phys.*, **19**, 12887–12899. <https://doi.org/10.5194/acp-19-12887-2019>

- Hotta, H., Suzuki, K., Goto, D., and Lebsock, M. (2020) Climate impact of cloud water inhomogeneity through microphysical processes in a global climate model. *J. Clim.*, **33**, 5195-5212. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-19-0772.1>
- Jing, X., Suzuki, K., and Michibata, T. (2019) The key role of warm rain parameterization in determining the aerosol indirect effect in a global climate model, *J. Clim.*, **32**, 4409-4430. <https://doi.org/10.1175/jcli-d-18-0789.1>
- Kanaya, Y., Miyazaki, K., Taketani, F., Miyakawa, T., Takashima, H., Komazaki, Y., Pan, X., Kato, S., Sudo, K., Sekiya, T., Inoue, J., Sato, K., and Oshima, K. (2019) Ozone and carbon monoxide observations over open oceans on R/V Mirai from 67° S to 75° N during 2012 to 2017: testing global chemical reanalysis in terms of Arctic processes, low ozone levels at low latitudes, and pollution transport, *Atmos. Chem. Phys.*, **19**, 7233–7254. <https://doi.org/10.5194/acp-19-7233-2019>
- Kim D., Chin, M., Yu, H., Pan, X., Bian, H., Tan, Q., Kahn, R. A., Tsigaridis, K., Bauer, S. E., Takemura, T., Pozzoli, L., Bellouin, N., and Schulz, M. (2019) Asian and trans-Pacific Dust: A multi-model and multi-remote sensing observation analysis. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **124**, 13534-13559. <https://doi.org/10.1029/2019JD030822>
- Lamy, K., Portafaix, T., Josse, B., Brogniez, C., Godin-Beekmann, S., Bencherif, H., Revell, L., Akiyoshi, H., Bekki, S., Hegglin, M. I., Jöckel, P., Kirner, O., Liley, B., Marecal, V., Morgenstern, O., Stenke, A., Zeng, G., Abraham, N. L., Archibald, A. T., Butchart, N., Chipperfield, M. P., Di Genova, G., Deushi, M., Dhomse, S. S., Hu, R.-M., Kinnison, D., Kotkamp, M., McKenzie, R., Michou, M., O'Connor, F. M., Oman, L. D., Pitari, G., Plummer, D. A., Pyle, J. A., Rozanov, E., Saint-Martin, D., Sudo, K., Tanaka, T. Y., Visionsi, D., and Yoshida, K. (2019) Clear-sky ultraviolet radiation modelling using output from the Chemistry Climate Model Initiative. *Atmos. Chem. Phys.*, **19**, 10087–10110. <https://doi.org/10.5194/acp-19-10087-2019>
- Li J., Nagashima, T., Kong, L., Ge, B., Yamaji, K., Fu, J. S., Wang, X., Fan, Q., Itahashi, S., Lee, S., Kim, C.-H., Lin, C.-Y., Zhang, M., Tao, Z., Kajino, M., Liao, H., Li, M., Woo, J.-H., Kurokawa, J., Wang, Z., Wu, Q., Akimoto, H., Carmichael, G. R., and Wang, Z. (2019) Model evaluation and intercomparison of surface-level ozone and relevant species in East Asia in the context of MICS-Asia Phase III -Part 1: Overview. *Atmos. Chem. Phys.*, **19**, 12993-13015. <https://doi.org/10.5194/acp-19-12993-2019>
- Michibata T., Suzuki, K., Ogura, T., and Jing, X. (2019) Incorporation of inline warm rain diagnostics into the COSP2 satellite simulator for process-oriented model evaluation. *Geosci. Model Dev.*, **12**, 4297-4307. <https://doi.org/10.5194/gmd-12-4297-2019>
- Michibata T., Suzuki, X., Sekiguchi, M., and Takemura, T. (2019) Prognostic precipitation in the MIROC6-SPRINTARS GCM: Description and evaluation against satellite observations. *J. Adv. Model. Earth Sys.*, **11**, 839-860. <https://doi.org/10.1029/2018MS001596>
- Michibata T., Suzuki K. (2020) Reconciling compensating errors between precipitation constraints and the energy budget in a climate model. *Geophys. Res. Lett.*, **47**, e2020GL88340. <https://doi.org/10.1029/2020GL088340>
- Miyazaki, K., Sekiya, T., Fu, D., Bowman, K. W., Kulawik, S. S., Sudo, K., Walker, T., Kanaya, Y., Takigawa, M., Oguchi, K., Eskes, H., Boersma, K. F., Thompson, A. M., Gaubert, B., Barre, J., and Emmons, L. K. (2019) Balance of emission and dynamical controls on ozone during the Korea-United States Air Quality campaign from multiconstituent satellite data assimilation. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **124**, 387–413. <https://doi.org/10.1029/2018JD028912>
- Patel, N. P., Gautam, R., Michibata, T., and Gadhavi, H. (2019) Strengthened Indian summer monsoon precipitation susceptibility linked to dust-induced ice cloud modification. *Geophys. Res. Lett.*, **46**, 8431-8441. <https://doi.org/10.1029/2018GL081634>
- Richardson, T. B., Forster, P. M., Smith, C. J., Maycock, A. C., Wood, T., Andrews, T., Boucher, O., Faluvegi, G., Flaschner, G., Hodnebrog, O., Kasoar, M., Kirkevåg, A., Lamarque, J.-F., Mülmenstadt, J., Myhre, G., Olivie, D., Portmann, R. W., Samset, B. H., Shawki, D., Shindell, D., Stier, P., Takemura, T., Voulgarakis, T., and Watson-Parris, D. (2019) Efficacy of climate forcings in PDRMIP models. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **124**, 12824-12844. <https://doi.org/10.1029/2019JD030581>
- Seposo, X., Ueda, K., Park, S. S., Sudo, K., Takemura, T., and Nakajima, T. (2019) Effect of global atmospheric aerosol emission change on PM2.5-related health impacts. *Global Health Action*, **12**, 1664130. <https://doi.org/10.1080/16549716.2019.1664130>
- Sillmann, J., Stjern, C. W., Myhre, G., Samset, B., Hodnebrog, O., Boucher, O., Forster, P., Kirkevåg, A., Lamarque, J.-F., Olivie, D., Shindell, D., Voulgarakis, A., Zwiers, F., Andrews, T., Faluvegi, G., Kasoar, M., Richardson, T., Takemura, T., and Khari, V. (2019) Extreme wet and dry conditions affected differently by greenhouse gases and aerosols. *npj Climate and Atmospheric Science*, **2**, 24. <https://doi.org/10.1038/s41612-019-0079-3>
- Stjern, C. W., Lund, M. T., Samset, B. H., Myhre, G., Forster, P. M., Andrews, P. M., Boucher, O., Faluvegi, G., Flaschner, D., Iversen, T., Kasoar, M., Khari, V., Kirkevåg, A., Lamarque, J.-F., Olivie, D., Richardson, T., Sand, M., Shawki, D., Shindell, D., Smith, C. J., Takemura, T., and Voulgarakis, A. (2019) Arctic

amplification response to individual climate drivers. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **124**, 6698-6717. <https://doi.org/10.1029/2018JD029726>

Tang, T., Shindell, D., Faluvegi, G., Myhre, G., Olivie, D., Voulgarakis, A., Kasoar, M., Andrews, T., Boucher, O., Forster, P. M., Hodnebrog, O., Iversen, T., Kirkevag, A., Lamarque, J.-F., Richardson, T., Samset, B. H., Stjern, B. H., Takemura, T., and Smith, C. (2019) Comparison of effective radiative forcing calculations using multiple methods, drivers, and models. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **124**, 4382-4394. <https://doi.org/10.1029/2018JD030188>

Tatebe, H., Ogura, T., Nitta, T., Komuro, Y., Ogochi, K., Takemura, T., Sudo, K., Sekiguchi, M., Abe, M., Saito, F., Chikira, M., Watanabe, S., Mori, S., Hirota, N., Kawatani, Y., Mochizuki, T., Yoshimura, K., Takata, K., O'ishi, R., Yamazaki, D., Suzuki, T., Kurogi, T., Kataoka, T., Watanabe, M., and Kimoto, M. (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>

6.2 誌上発表（査読なし）

該当なし。

6.3 口頭発表

(Invited)

Michibata T., Suzuki, K., and Takemura, T. (2020) Constraining responses of cloud and precipitation to aerosol perturbations: Satellite observations and global climate models, *100th AMS Annual Meeting 2020*, Boston, USA.

Takemura, T. (2019) Numerical simulation of air pollutants for analyzing climate change. *Forum "Math-for-Industry" 2019*, Auckland, New Zealand.

(Others)

Goto D., (2019) Global aerosol simulations with a cloud-system resolving model, *8th International EarthCARE Science Workshop*, Fukuoka, Japan.

Kawano N., and T. Nagashima (2019) Long-term changes in tropospheric ozone in remote sites. *The Chemistry Climate Model Initiative (CCMI) Science Workshop 2019*, Hong Kong, China.

Michibata T., Suzuki K., Sekiguchi M., Takemura T. (2019) Prognostic Precipitation in the MIROC6-SPRINTARS GCM: Improvements in Aerosol-Cloud-Precipitation Interactions, *AGU Fall Meeting 2019*, San Francisco, USA.

Michibata T., Suzuki, K., and Takemura, T. (2019) Reconciling a compensating error between precipitation process constraint and energy budget requirement, *Earth CARE Workshop 2019*, Fukuoka, Japan.

Michibata T., Suzuki, K., and Takemura, T. (2019) Prognostic precipitation in the MIROC6-SPRINTARS GCM: Improvements in precipitation and radiative properties, *Aerosols, Clouds, Precipitation and Climate (ACPC) Workshop*, Nanjing, China.

Nakata, M. (2019) Variation in climate change as a result of reductions in short-lived climate pollutants, *SPIE Remote sensing*, Strasbourg, France.

Nagashima T. (2019) Impact of climate change on air quality: a CTMs perspective. *ISEE-ISES AC 2019*, Daegu, Korea.

Takemura, T. (2019) Toward better representation of aerosols and clouds in climate models: Current status and problems to be addressed. *8th International EarthCARE Science Workshop*, Fukuoka, Japan.

Takemura, T., and Suzuki, K., (2019) Difference in sensitivities to climate change between black carbon and sulfate aerosols. *18th AeroCom Workshop*, Barcelona, Spain.

大西貴都, 須藤健悟, 金谷有剛, 竹谷文一, 原圭一郎, Yougwon KIM, 小林秀樹, 加藤 咲 (2019) 化学気候モデルによる北太平洋及び北極海における黒色炭素の起源推定と混合状態の考察, *地球惑星科学連合大会 (JpGU)*, 千葉県千葉市。

大西貴都, 須藤健悟, 金谷有剛, 竹谷文一 (2019) 極域黒色炭素の起源と沈着除去過程の評価, 第24回大気化学討論会, 愛知県蒲郡市。

五藤大輔 (2019) 全球高解像度エアロゾルシミュレーションを対象としたモデル解像度の影響評価, *日本気象学会2019年度秋季大会*, 福岡県福岡市。

須藤健悟, Xin Li (2019) 成層圏・対流圏オゾン交換の全球分布と経年変動の推定: 気候場変動の影響, *地球惑星科学連合大会 (JpGU)*, 千葉県千葉市。

須藤健悟, 阿部 学, Drew Shindell (2019) メタン削減による大気汚染・温暖化抑制効果の評価, 第24回大気化学討論会, 愛知県蒲郡市。

- 関谷高志, 宮崎和幸, 大越智幸司, 須藤健悟, 滝川雅之 (2019) 多成分衛星データ同化から得られた上部対流圏・下部成層圏オゾンの評価, *地球惑星科学連合大会 (JpGU)*, 千葉県千葉市.
- 関谷高志, 宮崎和幸, 大越智幸司, 須藤健悟, 滝川雅之 (2019) Global data assimilation of multi-species satellite measurements for atmospheric chemistry analysis, *地球惑星科学連合大会 (JpGU)*, 千葉県千葉市.
- 関谷高志, 宮崎和幸, Henk Eskes, Folkert Boersma, 大越智幸司, 須藤健悟, 滝川雅之 (2019) メガシティ規模の大気汚染解析に向けた TROPOMI NO₂ データを含む複数衛星観測の全球高解像度データ同化, *地球惑星科学連合大会 (JpGU)*, 千葉県千葉市.
- 竹村俊彦, 村瀬蓮一, C. Di Biagio (2019) 発生領域別複素屈折率データを用いたダスト放射強制力の見積もり. *日本気象学会2019年秋季大会*, 福岡県福岡市.
- 中田真木子 (2019) 人為起源エアロゾル漸減時の東アジアにおける気候変動, *日本エアロゾル学会*, 広島県東広島市.
- 永島達也, 高見昭憲, 菅田誠治, 清水 厚, 河野なつ美, 茶谷 聡, 青野光子, KIM Satbyul, 向井人史, 谷本浩志, 寺尾有希夫, 奈良英樹, 池田恒平, 西橋政秀, 野村渉平, 橋本 茂 (2019) 気候変動が日本の大気汚染にもたらす影響とその健康・植生へのインパクト評価. *第 60 回大気環境学会年会*, 東京都府中市.
- Phuc Thi Minh Ha, Fumikazu Taketani, Yugo Kanaya, Kengo Sudo (2019) Roles of heterogeneous reactions in the tropospheric chemistry: a global modeling study, *地球惑星科学連合大会 (JpGU)*, 千葉県千葉市.
- 松田涼樹, 須藤健悟 (2019) 全球大気光化学場における雲分布の役割, *地球惑星科学連合大会 (JpGU)*, 千葉県千葉市.
- 松田涼樹, 須藤健悟 (2019) 全球大気光化学場における雲分布の役割, *第 24 回大気化学討論会*, 愛知県蒲郡市.
- 道端拓朗, 鈴木健太郎, 竹村俊彦 (2019) 降水予報型MIROCにおけるエアロゾル・雲・降水相互作用プロセスの誤差補償の緩和, *日本気象学会2019年度秋季大会*, 福岡県福岡市.

6.4 その他 (書籍等、表彰)

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研究センター

Tel: 029-850-2899 Fax: 029-858-2580

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

Project name:
Impact assessment of air pollutants on environment and climate

April 2016 – March 2020

Project leader:
Daisuke Goto, Center for Regional Environmental Research, National Institute for Environmental Studies

Project members:
Tatsuya Nagashima, National Institute for Environmental Studies
Toshihiko Takemura & Takuro Michibata, Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University
Kengo Sudo, Takato Onishi, Ha Thi Minh Phuc, Ryoki Matsuda & Takahiro Fuchu, Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University
Takashi Sekiya, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology
Makiko Nakata, Faculty of Applied Sociology, Kindai University
Koichi Hasegawa, Chuden CTI Co., Ltd.
Sang-Seo Park, Seoul National University & Ulsan National Institute of Science and Technology
Karkour Selim, Graduate School of Environmental and Information Studies, Tokyo City University

Abstract:

In this project, one of our purposes was to estimate the impacts of air pollutants on the environment and climate through air-ocean response using an atmosphere-ocean coupled model based on MIROC and various emission scenarios. Since these scenario experiments were performed until last year, in this year we have improved the cloud and precipitation components in an advanced version of the MIROC6-SPRINTARS global aerosol-climate model. The new parameterization features prognostic precipitation. In the previous scheme, there were critical biases in the dependence of the super-cooled liquid fraction upon air temperature and the consequent cloud fraction. To this end, we have reconstructed the formulation of ice and snow microphysics and optimized some tunable knobs based on the satellite constraints. These efforts led to significant improvements in both the super-cooled liquid fraction and cloud cover distribution, which are in good agreement with CALIPSO-GOCCP satellite observations. The new prognostic precipitation scheme also well simulated the magnitude (-0.80 W m^{-2}) of the effective radiative forcing due to aerosol-cloud interactions (ERF_{aci}) relative to satellite retrievals (-0.63 W m^{-2}), whereas the traditional diagnostic precipitation showed more negative ERF_{aci} (-1.42 W m^{-2}). Furthermore, we incorporated warm rain diagnostics based on the CloudSat and MODIS satellite simulators into the CFMIP Observational Simulator Package (COSP) to evaluate the representation of cloud-to-rain microphysical processes in GCMs using satellite observations. The tool suggested that the prognostic precipitation well captured the onset of precipitation, which is consistent with satellite observations. These results emphasize that the prognostic precipitation scheme makes an indispensable contribution to the improvement of the reliability of climate modeling in a manner that reconciles common biases among climate models at a fundamental process level.

Keywords:
prognostic precipitation, satellite simulator, air pollutant transport model, short-lived climate pollutant (SLCP), aerosol-cloud interactions, aerosol effective radiative forcing

研究課題名：

MIROC5 モデルをベースにした海洋結合化学気候モデルの開発

実施年度：

平成 28 年度～令和元年度

課題代表者：国立環境研究所地球環境研究センター 秋吉英治

共同研究者：国立環境研究所地域環境研究センター 菅田誠治

国立環境研究所地球環境研究センター 池田恒平

海洋研究開発機構北極環境変動総合研究センター北極化学物質循環研究グループ

山下陽介

要旨：

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

本課題では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、大気海洋結合 MIROC5 化学気候モデルを用いたシナリオ実験によるオゾン層と気候の将来予測実験と、海洋オフライン MIROC5 化学気候モデルを用いたオゾン量の ODS 濃度依存性および GHG 濃度依存性を明らかにするための 500 アンサンブル実験を行った。

MIROC5 大気海洋結合化学気候モデルを用い温室効果ガスの RCP6.0 シナリオにもとづく将来予測実験では、2m 気温は 1960 年–2100 年の期間で約 3°C 上昇した。海洋結合モデルの 2m 気温は海洋オフラインモデルに比べて 3°C ほど低いバイアスがあり、また、2100 年までの上昇の仕方が僅かに小さかった。南極 9 月–10 月のオゾン全量最低値は両方のモデルで同様な推移を示した。

海洋オフライン化学気候モデルを用いた極域オゾン全量の ODS 濃度および GHG 濃度依存性に関する 500 アンサンブル実験では、北極春季のオゾン全量最低値は、500 アンサンブル平均では ODS 濃度依存性も GHG 濃度依存性も両方見えるが、オゾン全量最低値が最も高い 50 アンサンブルメンバー平均では、ODS 濃度依存性も GHG 濃度依存性も小さかった。また北極渦が弱く気温が高かった。一方、オゾン全量最低値が最も低い 50 アンサンブルメンバー平均では、ODS 濃度依存性が大きくなり、GHG 濃度依存性はあまり見られず、南極春季のオゾン全量最低値と似たような特性を示した。また北極渦は強く気温は低かった。北極域では極渦の年々変動とそれに伴うオゾン全量の年々変動が大きく、年毎に北極渦の強い年と弱い年が入り乱れて複雑なオゾン量の年々変動を示すが、北極渦の強いアンサンブルメンバーは明瞭な ODS 濃度依存性を示していることから、北極域においても極端なオゾン破壊を起こらないようにするために ODS 濃度レベルを下げる必要があることがわかった。

キーワード：

大気海洋結合化学気候モデル、オゾン層、成層圏、MIROC5、フロン対策

研究課題名：

MIROC5 モデルをベースにした海洋結合化学気候モデルの開発

実施年度：

平成 28 年度～令和元年度

課題代表者：国立環境研究所地球環境研究センター 秋吉英治

共同研究者：国立環境研究所地域環境研究センター 菅田誠治

国立環境研究所地球環境研究センター 池田恒平

海洋研究開発機構北極環境変動総合研究センター北極化学物質循環研究グループ

山下陽介

1. 研究目的

海洋を結合した MIROC5 および MIROC6 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フロン・ハロン対策に資することを目的とする。

キーワード：

大気海洋結合化学気候モデル、オゾン層、成層圏、MIROC5、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（2019 年 4 月 1 日～11 月 30 日）

CPU 時間 v_deb	（デバック用）	：0.00 hours
v_32cpu	（最大 32CPU コア）	：1,808,756.69 hours
v_96cpu	（最大 96CPU コア）	：0.00 hours
v_160cpu	（最大 160CPU コア）	：0.00 hours
計		：1,808,756.69 hours

2.2 利用概要

MIROC5 大気海洋結合化学気候モデルを用いた 1950–2100 年の期間についてのオゾン層の将来予測実験を行った。また、MIROC5 海洋オフライン型化学気候モデルを用いて、オゾン層破壊物質（ODS）濃度と温室効果ガス（GHG）濃度を複数の値に指定した 29 ケースの 500 アンサンブル実験を行った。

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重視されるようになった。同時に温暖化とオゾン層変化の関係についても研究が活発になってきた。

本課題では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、大気海洋結合 MIROC5 化学気候モデルを用いたシナリオ実験によるオゾン層と気候の将来予測実験と、海洋オフライン

MIROC5 化学気候モデルを用いたオゾン量の ODS 濃度依存性および GHG 濃度依存性を明らかにするための 500 アンサンブル実験を行った。

MIROC5 大気海洋結合化学気候モデルを用い温室効果ガスの RCP6.0 シナリオにもとづく将来予測実験では、2m 気温は 1960 年–2100 年の期間で約 3°C 上昇した。海洋結合モデルの 2m 気温は海洋オフラインモデルに比べて 3°C ほど低いバイアスがあり、また、2100 年までの上昇の仕方が僅かに小さかった。南極 9 月–10 月のオゾン全量最低値は両方のモデルで同様な推移を示した。

海洋オフライン化学気候モデルを用いた極域オゾン全量の ODS 濃度および GHG 濃度依存性に関する 500 アンサンブル実験では、北極春季のオゾン全量最低値は、500 アンサンブル平均では ODS 濃度依存性も GHG 濃度依存性も両方見えるが、オゾン全量最低値が最も高い 50 アンサンブルメンバー平均では、ODS 濃度依存性も GHG 濃度依存性も小さかった。また北極渦が弱く気温が高かった。一方、オゾン全量最低値が最も低い 50 アンサンブルメンバー平均では、ODS 濃度依存性が大きくなり、GHG 濃度依存性はあまり見られず、南極春季のオゾン全量最低値と似たような特性を示した。また北極渦は強く気温は低かった。北極域では極渦の年々変動とそれに伴うオゾン全量の年々変動が大きく、年毎に北極渦の強い年と弱い年が入り乱れて複雑なオゾン量の年々変動を示すが、北極渦の強いアンサンブルメンバーは明瞭な ODS 濃度依存性を示していることから、北極域においても極端なオゾン破壊を起こらないようにするために ODS 濃度レベルを下げる必要があることがわかった。

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, 2002)³⁾ が指摘され、また、地球温暖化に関連するオゾン層の影響として、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., 2015)⁴⁾。温暖化予測モデルに化学過程を取り入れたモデルが徐々に増えつつある中、一方で、これまで化学過程に重きを置いてきたオゾン層の将来予測に使われる化学気候モデルは、気候との相互作用を解明するため海洋を結合したモデルが徐々に増えてきている。国立環境研究所では、これまで CCSR/NIES 大気大循環モデルや MIROC モデルに大気化学過程を導入して化学気候モデルを開発し、オゾン層の将来予測を行い、UNEP/WMO オゾンアセスメントレポートや国際プロジェクト Chemistry Climate Model Validation (CCMVal) およびその後継の 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、従来の海洋を結合しないモデルによるシミュレーションも行うことによって、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 大気海洋結合 MIROC5 化学気候モデルを用いたシナリオ実験

大気と海洋を結合した MIROC5 化学気候モデルを使った将来予測実験では、ODS 濃度は WMO-A1 シナリオ、GHG 濃度は RCP6.0 シナリオ (図 1 の黒実線) を使った。計算期間は 1950 年–2100 年であるが、最初の 10 年間はスピニングアップ期間と考えて、解析は 1960 年–2100 年の期間で行った。

3.3.2 海洋オフラインMIROC3.2およびMIROC5化学気候モデルを用いたオゾン全量のODS濃度およびGHG濃度依存性に関する500アンサンブル実験

オゾン全量のODS濃度およびGHG濃度依存性を調べる500アンサンブル実験では、MIROC3.2化学気候モデルおよびMIROC5化学気候モデルを用いた。どちらのモデルも海洋はオフラインになっていて、海水面温度を与えて計算を行う。表1および表2にそれぞれのモデルで行ったアンサンブル実験の解析に使われたアンサンブルメンバー数を示す。横方向にODS濃度レベル(当該年の)縦方向にGHG濃度レベルを表している、1つの実験はこれらのODS濃度とGHG濃度に固定して行われる。例えば、MIROC3.2モデルでは、ODS濃度2000年レベルかつGHG濃度2000年レベルの実験は、アンサンブル数500で解析されたことを示す。ODS濃度レベルはWMOのA1シナリオの年の濃度レベルに対応し(1995年あたりがピーク)、GHG濃度レベルはRCP6.0シナリオの年の濃度レベルに対応している(図1の黒実線)。なお、解析に使ったアンサンブル数が500というのは、実際には、ODS濃度とGHG濃度を指定して510年の連続計算を行い、最初の10年分を除いた残りの500年について解析を行ったことを意味する。最初の10年は、指定されたODS濃度・GHG濃度の下にモデルの中の大気やオゾン量が落ち着くまでの遷移期間と見なし、解析には使用しない。

表 1. MIROC3.2化学気候モデルによるODS/GHG濃度を指定した実験のアンサンブル数。

GHG	ODS	1960	1980	1985	1990	1995	2000
2095		500	500	500	500	—	500
2050		500	500	500	500	—	500
2040		—	500	500	500	—	500
2030		500	500	500	500	—	500
2000		500	500	500	500	—	500

表 2. MIROC5化学気候モデルによるODS/GHG濃度を指定した実験のアンサンブル数。

GHG	ODS	1960	1980	1985	1990	1995	2000
2095		500	500	500	500	500	500
2050		500	500	500	500	500	500
2040		—	500	500	500	500	500
2030		500	500	500	500	500	500
2000		500	500	500	500	500	500

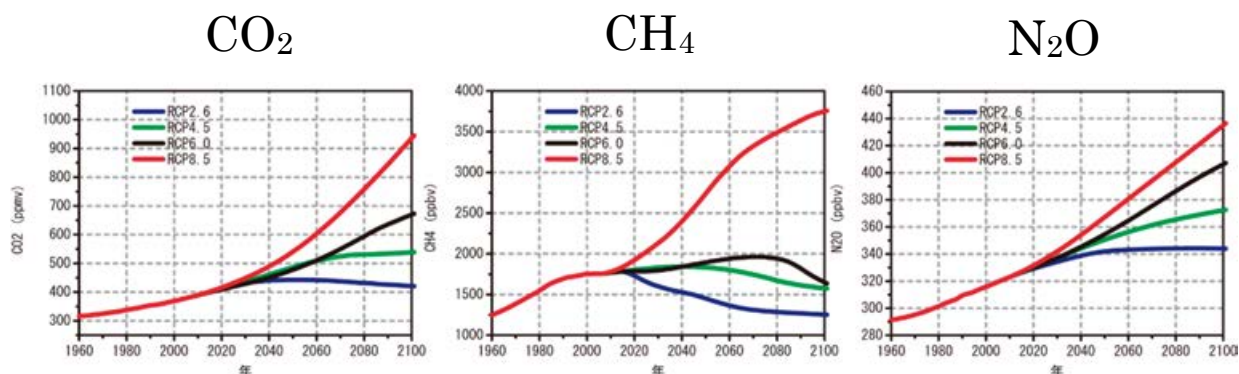


図 1. CO₂, CH₄, N₂O の RCP シナリオによる地表面濃度の経年変化。本報告書中の“GHG 濃度の○○年レベル”は、RCP6.0 シナリオ上での○○年の濃度(黒実線)を表す。

3.4 結果

3.4.1 大気海洋結合 MIROC5 化学気候モデルを用いたシナリオ実験

図2に、MIROC5 海洋オフライン化学気候モデルと MIROC5 海洋結合化学気候モデルによる全球平均の 2m 気温と南緯 60–90 度の領域における 9–10 月のオゾン全量最低値の経年変化を示す。海洋結合モデルの 2m 気温は、海洋オフラインモデルと同様に温室効果ガスの増加による気温の上昇が見られるが（1960 年–2100 年の期間で約 3°C）、海洋オフラインモデルに比べて 3°C ほど低く、また、2100 年までの上昇の仕方が僅かに小さい。

南極域の 9 月–10 月の期間におけるオゾン全量の最低値の長期的な変化はどちらのモデルもほぼ同じ長期変化が得られた。すなわち、フロン・ハロンの大気中への放出によって、1960 年くらいから減少し始め、成層圏の塩素・臭素濃度がピークになる 2000 年頃に極小となり、その後 2100 年頃には 1960 年とほぼ同じレベルまで回復している。

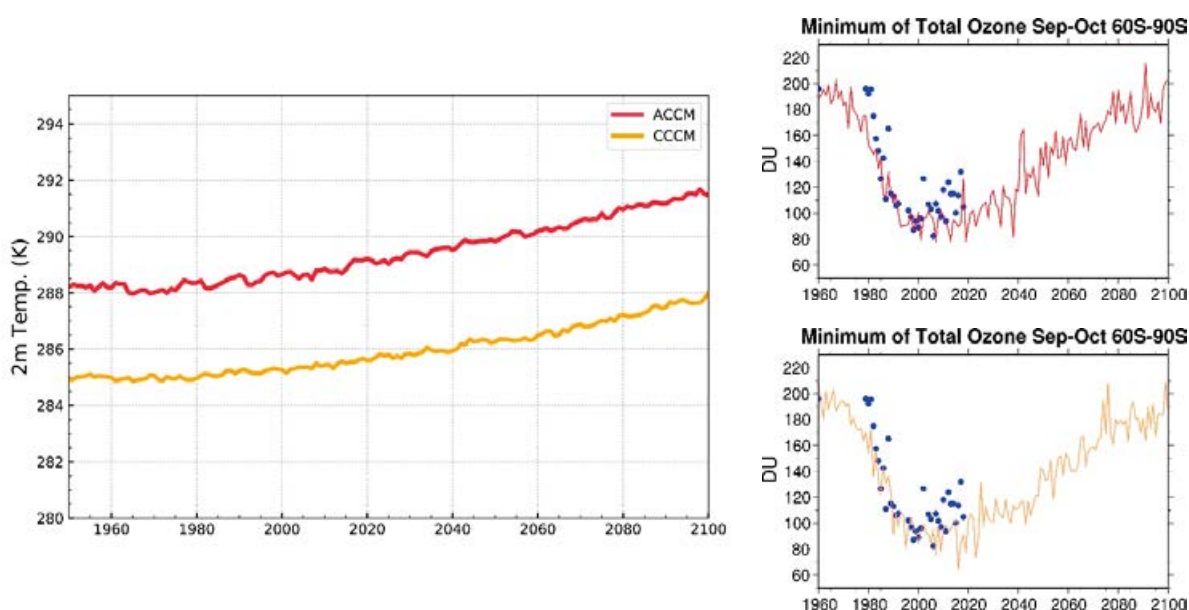


図 2. MIROC5 海洋オフライン化学気候モデル（赤実線）と MIROC5 海洋結合化学気候モデル（橙実線）の全球平均 2m 気温の経年変化（左）、南緯 60–90 度の領域における 9–10 月のオゾン全量最低値の経年変化。右上図と右下図中の●は、TOMS/OMI による観測値を表す。

3.4.2 海洋オフライン MIROC3.2 および MIROC5 化学気候モデルを用いた極域オゾン全量の ODS 濃度および GHG 濃度依存性の 500 アンサンブル解析

海洋オフライン MIROC3.2 および MIROC5 化学気候モデルを用いた ODS 濃度および GHG 濃度依存性に関する 500 アンサンブル実験の解析を行った。オゾン全量最低値のアンサンブル分布の極端なところに位置する、オゾン全量最低値が最も大きい 50 のアンサンブルメンバー平均と、オゾン全量最低値が最も小さい 50 のアンサンブルメンバー平均の ODS 濃度依存性・GHG 濃度依存性に注目し、アンサンブル平均の依存性との比較を行った。上位・下位 50 のアンサンブルメンバーであれば 500 アンサンブルの 1/10 程度、つまり、10 年に 1 度程度の頻度で起こる極端な事象、ODS 濃度が減少してしまうまでの間に 10 回程度起こると考えられる事象の平均的な性質を見ることになる。

図3に、MIROC3.2 化学気候モデルの実験によって極端なオゾン全量最低値を示したアンサンブルメンバーのオゾン全量最低値の平均（500 アンサンブルメンバーのうち、上位 50 メンバーの平均

および下位50メンバーの平均) およびオゾン全量最低値の500アンサンブル平均について、そのODS濃度・GHG濃度依存性を示す。上段が北半球中高緯度春季(45-90N, 3月-5月)、下段が南半球中高緯度春季(45-90S, 9月-11月)についての結果である。縦軸はそれぞれの実験で設定されたGHG濃度、横軸はODS濃度である。ただし、ODSは成層圏に入ると分解されて無機塩素化合物や無機臭素化合物に変化するので、オゾン破壊によってオゾン全量に最も影響を与えられとされる下部成層圏の高度50hPa, 45-90N(南半球は45-90S), 3月-5月(南半球は9月-11月)における等価実効成層圏塩素(Equivalent Effective Stratospheric Chlorine)濃度によって表した。極域におけるEESCは全無機塩素(Cly)濃度と全無機臭素(Bry)濃度によって、

$$EESC = Cly + 60Bry$$

で近似される。

MIROC3.2化学気候モデルのオゾン全量最低値の上位・下位50アンサンブルメンバーの全体の分布の中での位置は、標準偏差の1.1倍~1.4倍以上のところに位置している。図3からわかるとおり、北半球中高緯度では、オゾン全量最低値はODS濃度とGHG濃度の両方に依存する。ODS濃度が高くなるほどオゾン全量最低値は少なくなり、GHG濃度が高くなるほどオゾン全量最低値は高くなる。これは、ODS濃度の増加によって極域におけるPSCを介したオゾン破壊化学反応が促進され、GHG濃度の増加によって大気大循環が強化されて極域へのオゾン輸送が増加し、同時に熱輸送も増加して極域下部成層圏の気温が上昇し、PSCが生成されにくくなり、オゾン破壊反応が起きにくくなるためであると解釈できる。

また、このODS濃度・GHG濃度依存性は、アンサンブルメンバーの取り方によって大きく異なることもわかる。図の真ん中に示される500アンサンブル平均では、ODS濃度依存性もGHG濃度依存性も両方見えるが、左側に示されたオゾン全量最低値が最も高い50アンサンブルメンバー平均では、ODS濃度依存性もGHG濃度依存性も小さい。一方、右側に示されたオゾン全量最低値が最も低い50アンサンブルメンバー平均では、ODS濃度依存性が大きくなり、GHG濃度依存性はあまり見られない。

下段のパネルで示される南半球中高緯度については、どのアンサンブルメンバー平均もODS濃度依存性が大きく、GHG濃度依存性はほとんど見られない。このモデルでは、GHG濃度が増加しても南極オゾンホールにあまり変化がないことを示している。また、上段に示された北半球中高緯度と異なり、南半球中高緯度では500アンサンブル平均とオゾン全量最低値が最も高い50アンサンブルメンバー平均、500アンサンブル平均とオゾン全量最低値が最も低い50アンサンブルメンバー平均の間のODS濃度依存性・GHG濃度依存性(図で上下および左右方向の濃度勾配)の違いが小さい。このことは、南半球中高緯度ではオゾン全量最低値のアンサンブルメンバー間のばらつきが小さいことに起因している。

この結果は、500のアンサンブルメンバーが北半球中高緯度大気の毎年の変動の中で起こり得る一つひとつの事象だと考えれば、オゾン全量が少ない年ばかりを集めるとそのオゾン全量のODS濃度依存性は大きく、南半球中高緯度ほどではないにしても、ODS濃度の増加に伴いオゾン全量は大きく減少するということを意味している。北極渦が安定して春季に大きなオゾン破壊が起こった1997年、2011年、2020年は、図3の右端のオゾン全量の少ないアンサンブルメンバーに相当すると考えられる。これらの年はODS濃度が高い状態になっており、極渦が安定すれば、オゾン全量はかなり低くなり得るということである。例えば2011年の場合、その前年の2010年の北半球中高緯度春季のオゾン全量が高かったが、それは、図3の左上に相当すると考えられる。つまり、極渦が不安定な年は、ODS濃度が高くてもオゾン全量は高くなる。

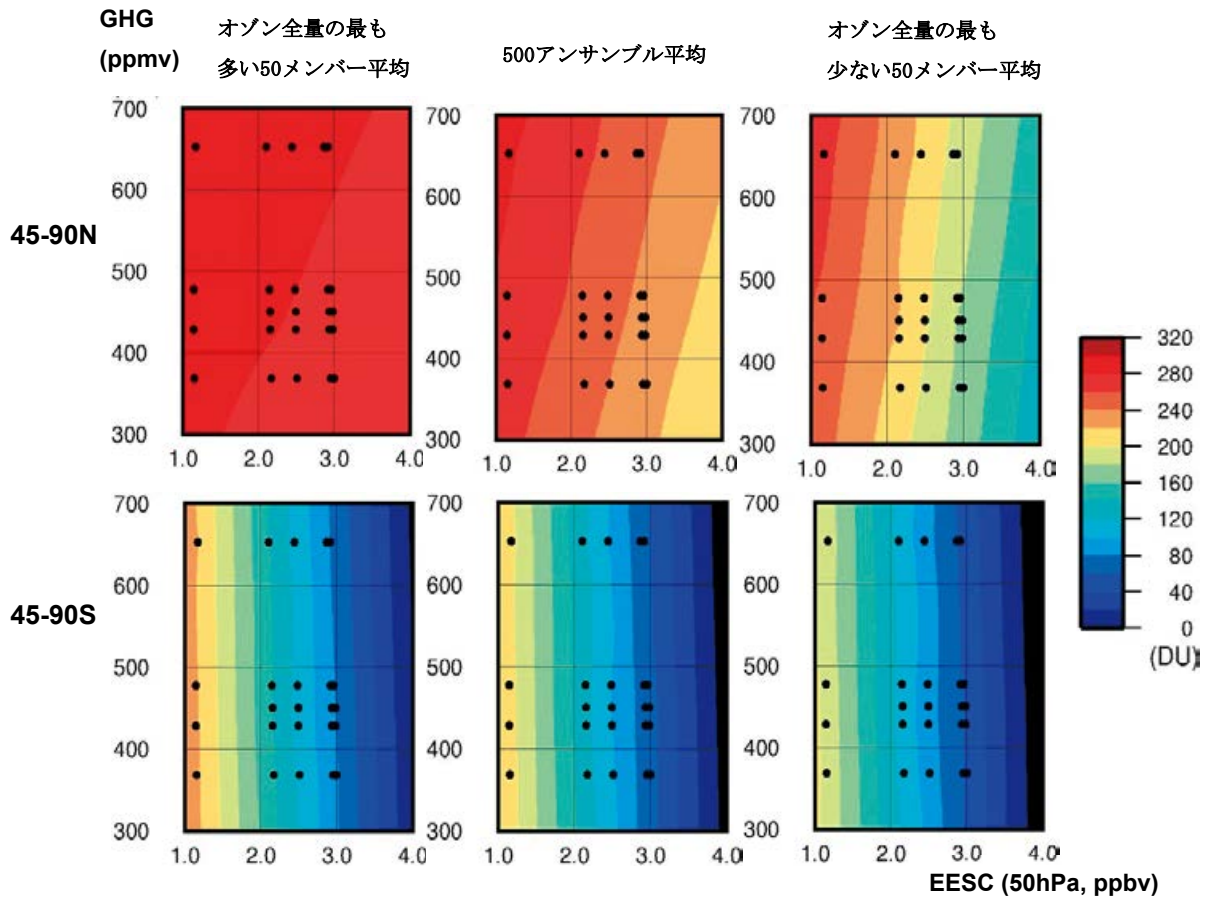


図3. 表1に示されたMIROC3.2化学気候モデル実験によるオゾン全量最低値のODS濃度(EESCで表す)およびGHG濃度依存性。上段のパネルは45-90N,3月-5月の最低値、下段のパネルは45-90S,9月-11月の最低値。(左)オゾン全量最低値が最も高い50のアンサンブルメンバー平均、(中)500アンサンブル平均、(右)オゾン全量最低値が最も低い50のアンサンブルメンバー平均。縦軸はGHG濃度(ppmv)、横軸は下部成層圏の高度50hPaにおけるEESC濃度(ppbv)の45-90N,3月-5月の平均値(北半球、上段)および45-90S,9月-11月の平均値(南半球、下段)。表1のそれぞれの実験のGHG濃度およびODS濃度に対応する点を黒丸で示す。オゾン全量最低値は色で表され、その大きさは右側のカラースケールで示されている。黒丸で表された点のオゾン全量の値を2次元平面内で内挿および外挿したもの。

これらのオゾン全量最低値が最も高い50アンサンブルメンバー、オゾン全量最低値が最も低い50アンサンブルメンバーについて、45-90Nの北半球中高緯度域について気温と平均東西風のODS濃度依存性、GHG濃度依存性を同様に調べたところ、オゾン全量最低値が最も低い50アンサンブルメンバーについては、明瞭なODS濃度依存性が見られた(ODS濃度が高くなると、気温が低下し、西風が強くなる。オゾン全量も低くなる、図は省略)。これらは、オゾン全量最低値が最も低い50アンサンブルメンバーでは、北極渦が強くとオゾン全量が低いことを意味している。

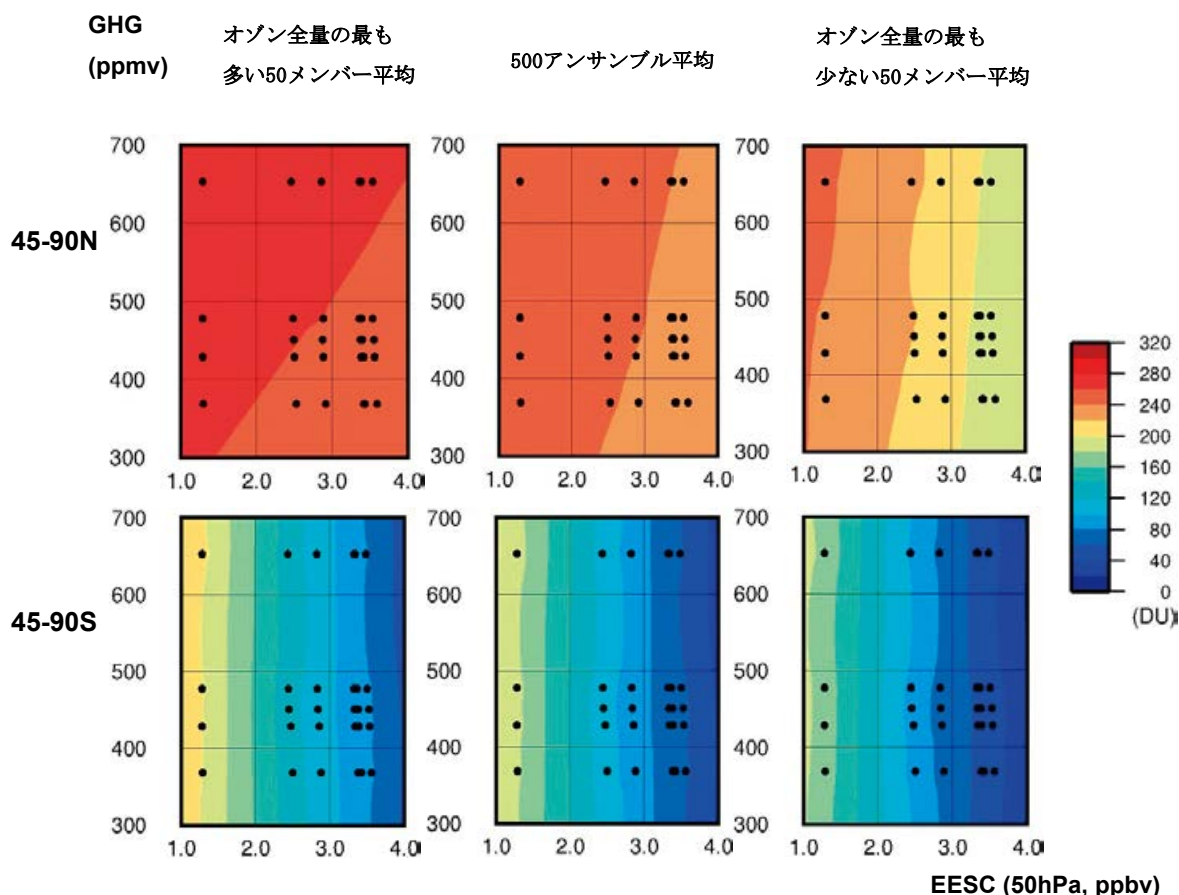


図4. 図3と同じ。ただし、表2に示されたMIROC5化学気候モデル実験による結果。

図4に、同様なMIROC5化学気候モデルによる結果を示す。MIROC3.2化学気候モデルによる結果と比べると、北半球中高緯度春季、南半球中高緯度春季ともにODS濃度依存性・GHG濃度依存性が若干小さいという違いはあるが、MIROC3.2モデルによる結果で見られたODS濃度依存性・GHG濃度依存性は、MIROC5モデルでも同様に見られる。MIROC5の方がMIROC3.2に比べてアンサンブル全体で見れば低緯度から北半球中高緯度への大気大循環が強いことによって生じた違いと考えられる。なお、MIROC5化学気候モデルのオゾン全量最低値の上位・下位50アンサンブルメンバーの全体の分布の中での位置は、標準偏差の1.0倍～1.4倍以上のところに位置し、MIROC3.2モデルの上位・下位50アンサンブルメンバーの位置とあまり違いはない。

参考文献

- 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>
- 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>
- 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>

- 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>
- WMO (2007) *Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2006*, Global Ozone Research and Monitoring Project—Report No. 50, 572pp., Geneva, Switzerland.
- WMO (2011) *Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2010*, Global Ozone Research and Monitoring Project Report No. 52, 516 pp., Geneva, Switzerland
- WMO (2014) *Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2014*, Global Ozone Research and Monitoring Project—Report No. 55, 416 pp., Geneva, Switzerland
- WMO (2018) *Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2018*, Global Ozone Research and Monitoring Project—Report No. 58, 588 pp., Geneva, Switzerland
- 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.

4. まとめ

大気海洋結合 MIROC5 化学気候モデルを ODS 濃度 WMO-A1 シナリオと GHG 濃度 RCP6.0 シナリオのもとに 1950 年–2100 年の期間走らせた。その結果、2m 気温は温室効果ガスの増加によって 1960 年–2100 年の期間で約 3°C 上昇した。南極 9 月–10 月のオゾン全量最低値は両方のモデルで同様な推移を示した。

海洋オフライン MIROC3.2 および MIROC5 化学気候モデルを用いた極域オゾン全量の ODS 濃度および GHG 濃度依存性に関する 29 ケースの 500 アンサンブル実験を行った。解析の結果、オゾン全量最低値が最も低い 50 アンサンブルメンバー平均では、ODS 濃度依存性が大きくなり、GHG 濃度依存性はあまり見られず、南極春季のオゾン全量最低値と似たような特性を示した。北極域においても極端なオゾン破壊を起こらないようにするために ODS 濃度レベルを下げる必要があることがわかった。

5. 今後の研究展望

海洋結合化学気候モデルおよび海洋オフライン化学気候モデルを用いたシナリオ実験およびその感度実験を複数行い、両者の結果と比較して、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）

- Lamy, K., T. Portafaix, B. Josse, C. Brogniez, S. Godin-Beckmann, H. Bencherif, L. Revell, H. Akiyoshi, S. Bekki, M. I. Hegglin, P. Jöckel, O. Kirner, B. Liley, V. Marecal, O. Morgenstern, A. Stenke, G. Zeng, N. L. Abraham, A. T. Archibald, N. Butchart, M. P. Chipperfield, G. D. Genova, M. Deushi, S. S. Dhomse, R.-M. Hu, D. Kinnison, M. Kotkamp, R. McKenzie, M. Michou, F. M. O'Connor, L. D. Oman, G. Pitari, D. A. Plummer, J. A. Pyle, E. Rozanov, D. Saint-Martin, K. Sudo, T. Y. Tanaka, D. Visoni, and K. Yoshida (2019), Clear-sky ultraviolet radiation modelling using output from the Chemistry Climate Model Initiative. *Atmos. Chem. Phys.*, **19**, 10087–10110. <https://doi.org/10.5194/acp-19-10087-2019>
- Chrysanthou, A., A. C. Maycock, M. P. Chipperfield, S. Dhomse, H. Garny, D. Kinnison, H. Akiyoshi, M. Deushi, R. R. Garcia, P. Jöckel, O. Kirner, G. Pitari, D. A. Plummer, L. Revell, E. Rozanov, A. Stenke, T. Y. Tanaka, D. Visoni, and Y. Yamashita (2019), The effect of atmospheric nudging on the stratospheric residual circulation in chemistry-climate models. *Atmos. Chem. Phys.*, **19**, 11559–11586. <https://doi.org/10.5194/acp-19-11559-2019>
- Ohyama, H., T. Sugita, H. Akiyoshi, T. Nagahama, and A. Mizuno, Interannual variation of upper stratospheric ozone in the northern midlatitudes in early winter caused by planetary waves (2019), *J. Geophys. Res. : Atmospheres*, **124**, 14347–14361, <https://doi.org/10.1029/2019JD030824>

Nakajima, H., I. Murata, Y. Nagahama, H. Akiyoshi, K. Saeki, T. Kinase, M. Takeda, Y. Tomikawa, E. Dupuy, and N. B. Jones (2020) Chlorine partitioning near the polar vortex edge observed with ground-based FTIR and satellites at Syowa Station, Antarctica, in 2007 and 2011. *Atmos. Chem. Phys.*, **20**, 1043-1074. <https://doi.org/10.5194/acp-20-1043-2020>

6.2 誌上発表（査読なし）

なし。

6.3 口頭発表

Murata I., Y. Tomikawa, I. Morino, H. Nakajima, H. Akiyoshi, Y. Dai (2019) Temporal variation of HCl and HF at Tsukuba related to the change of the meridional circulation in the northern lower stratosphere. *2019 Joint NDACC-IRWG and TCCON Meeting*, 20-24 May 2019.

Akiyoshi, H., M. Kadowaki, H. Nakamura, T. Sugita, T. Hirooka, Y. Harada, A. Mizuno (2019) Analysis of the ozone reduction event over the southern tip of South America in November 2009. (秋吉英治, 門脇正尚, 中村東奈, 杉田考史, 廣岡俊彦, 原田やよい, 水野 亮 (2019) 2009年11月の南米南端におけるオゾン量低下イベントに関する解析) *日本地球惑星科学連合2019年大会*, 千葉 (幕張メッセ国際会議場), 2019年5月26日-30日 (ポスター発表2019年5月29日), AAS05-P11.

Yamashita, Y., H. Akiyoshi, M. Takahashi (2019) Analysis of relatively low ozone in Arctic spring during the QBO-westerly and solar-minimum years, *日本地球惑星科学連合2019年大会*, 千葉 (幕張メッセ国際会議場), 2019年5月26日-30日 (ポスター発表2019年5月29日), AAS05-P12.

Yamashita, Y., *H. Akiyoshi, M. Takahashi (2019) An indication of low ozone anomaly in Arctic spring in the QBO-westerly and solar-minimum years. *CCMI 2019 Science Workshop*, 7-9 August 2019 (poster presentation, 8 August 2019), Hong Kong, Abstract No. 1.030.

Yamashita, Y., M. Takigawa, D. Goto, H. Yashiro, M. Sato, H. Akiyoshi (2019) The analysis of the Non-hydrostatic ICosahedral Atmospheric Model (NICAM)-Chem outputs and future plans for the CCMI-2. *CCMI 2019 Science Workshop*, 7-9 August 2019 (poster presentation, 7 August 2019), Hong Kong, Abstract No. 1.025.

秋吉英治, 門脇正尚, 山下陽介, 長友正晴 (2019) 500アンサンブル実験による低中高緯度オゾン全量のODS・GHG濃度依存性. *日本気象学会2019秋季大会*, 2019年10月28日-31日 (ポスター発表2019年10月30日) 福岡 (福岡国際会議場), ID:P373, 同予稿集 p.238.

Dupuy, E., H. Akiyoshi, Y. Yamashita (2019) Impact of hydrofluorocarbons on stratospheric ozone recovery. *日本気象学会2019秋季大会*, 2019年10月28日-31日 (ポスター発表2019年10月30日) 福岡 (福岡国際会議場), ID:P372, 同予稿集 p.237.

中村東奈, 秋吉英治, 杉田考史, 水野 亮 (2019) オゾンを同化した化学気候モデルによる初期値を用いた南米春季のオゾン予測の試み その2, *日本気象学会2019秋季大会*, 2019年10月28日-31日 (ポスター発表2019年10月31日) 福岡 (福岡国際会議場), ID:P472, 同予稿集 p.418.

Akiyoshi, H., Y. Nakai, Y. Motizuki, T. Imamura, Y. Yamashita (2020) Ozone change simulations of Halloween event and Carrington event using MIROC3.2 chemistry-climate model. *WCRP/SPARC SATIO-TCS joint workshop on Stratosphere-Troposphere Dynamical Coupling in the Tropics*, 21 - 25 February (poster presentation on 24 February), Kyoto University, ID:B-2, ebooklet 39.

Yamashita, Y., H. Akiyoshi, M. Takahashi (2020), An indication of low ozone anomaly in Arctic spring in the QBO westerly and solar minimum years, *WCRP/SPARC SATIO-TCS joint workshop on Stratosphere-Troposphere Dynamical Coupling in the Tropics*, 21 - 25 February (oral presentation on 24 February), Kyoto University, ID:C-10, ebooklet 29.

6.4 その他（書籍等）

秋吉英治 (2019) 6-3 オゾン層の破壊：メカニズムと変化. 286-287, 大気環境の事典 (大気環境学会編), 464p.p., 朝倉書店, 分担執筆.

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環境研究センター

Tel: 029-850-2393 Fax: 029-850-4732

E-mail: hakiyosi@nies.go.jp

Project name:

Development of an ocean coupled chemistry-climate model based on the MIROC5 general circulation model

April 2016 – March 2020

Project leader:

Hideharu Akiyoshi, Center for Global Environmental Research, National Institute for Environmental Studies

Project members:

Seiji Sugata, Center for Regional Environmental Research, National Institute for Environmental Studies

Kohei Ikeda, Masaaki Takahashi, Center for Global Environmental Research, National Institute for Environmental Studies

Yosuke Yamashita, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

Abstract:

The ozone layer shows signs of recovery. Because ozone depletion occurs mainly in the stratosphere, ozone change has not been regarded as an important influence on the troposphere and the surface of the earth. Recently, however, it has been pointed out that westerly winds in the Arctic spring stratosphere were strengthened by an ozone hole, and the influence extended 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 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, we performed numerical experiments with the RCP6.0 scenario for GHGs and WMO-A1 scenarios for ODSs using the atmosphere-ocean coupled MIROC5 chemistry-climate model (CCM), and also 29 cases of 500-ensemble experiments to clarify the dependence of the ozone amount on ODS and GHG concentrations using the ocean off-line MIROC5 CCM.

The temperature at 2 m altitude rises about 3 degrees Celsius in the period from 1960 to 2100 in the scenario experiment using the MIROC5 atmosphere-ocean-coupled CCM based on the RCP6.0 scenario of the GHGs. As for the temperature at 2 m altitude of the ocean-coupled model, there is a low bias of approximately 3 degrees Celsius in comparison with the ocean off-line model, and the temperature rise until 2100 is slightly small. The spring total ozone minimum in the Antarctic during September-October shows a similar change from 1960 to 2100 in both models.

In the 500-ensemble experiments using the ocean off-line CCM, the 500-ensemble member mean of the total ozone minimum in the Arctic spring indicates a dependence of both ODS and GHG concentrations. However, the 50-ensemble member that has the highest total ozone minimum indicates a small dependence of ODS and GHG concentrations. In addition, the westerly wind of the Arctic polar vortex is weaker and the temperature in the polar vortex is higher than the 500-ensemble member mean. On the other hand, the 50-ensemble member that has the lowest total ozone minimum indicates a large ODS concentration dependence and a small GHG concentration dependence, such as those for Antarctica. Also, the westerly wind of the Arctic polar vortex is stronger and the temperature in the polar vortex is lower than the 500-ensemble member mean.

These results suggest that ODS concentrations should be lowered for not only the Antarctic ozone but also the Arctic and Northern Hemisphere high latitude ozone, where total ozone shows a large interannual variation and little ODS concentration dependence in weak polar vortex years.

Keywords:

ocean coupled chemistry-climate model, ozone layer, stratosphere, MIROC5, CFC measures

研究課題名：
全球スケールの陸域モデル開発による気候変動研究

実施年度：
平成 28 年度～令和元年度

課題代表者：国立環境研究所地球環境研究センター 横畠徳太
共同研究者：国立環境研究所地球環境研究センター 伊藤昭彦・佐藤雄亮
北海道大学工学部 山田朋人
エネルギー総合工学研究所地球環境グループ 加藤悦史

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を高度化すると同時に、それらのモデルを結合した陸域統合モデル MIROC-INTEG-LAND の開発を行う。開発したさまざまなモデルを利用して、全球スケールのシミュレーションを行い、気候変動がもたらすリスクや気候変動対策の有効性についての解析研究を行う。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」、環境省環境研究総合推進費「永久凍土大規模融解による温室効果ガス放出量の現状評価と将来予測」などの研究プロジェクトに貢献することを目標とする。令和元年度には、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、作物生産や土地利用などの様々な人間活動と、気候・生態系・水資源との相互作用の評価を行なった。具体的には、将来の人間活動によって生じる気候変動が、非常に強い干ばつに及ぼす影響、土地利用変化に及ぼす影響、そして永久凍土融解によって生じる温室効果ガスが気候システムに及ぼす影響について分析を行った。

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：
全球スケールの陸域モデル開発による気候変動研究

実施年度：
平成 28 年度～令和元年度

課題代表者：国立環境研究所地球環境研究センター 横畠徳太
共同研究者：国立環境研究所地球環境研究センター 伊藤昭彦・佐藤雄亮
国立環境研究所地球環境研究センター 仁科一哉
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

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を高度化すると同時に、それらのモデルを結合した陸域統合モデル MIROC-INTEG-LAND の開発を行う。開発した様々なモデルを利用して、全球スケールのシミュレーションを行い、気候変動がもたらすリスクや気候変動対策の有効性についての解析研究を行う。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」、環境省環境研究総合推進費「永久凍土大規模融解による温室効果ガス放出量の現状評価と将来予測」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（2019 年 4 月 1 日～11 月 30 日）

CPU 時間 v_deb	（デバック用）	: 1,009.89 hours
v_32cpu	（最大 32CPU コア）	: 13,736.06 hours
v_96cpu	（最大 96CPU コア）	: 0.00 hours
v_160cpu	（最大 160CPU コア）	: 0.00 hours
計		: 14,745.94 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、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 を利用したモデル開発を行い、スーパーコンピュータ上で動作させるためのコード改変やチューニング、入力データの整備を実施した。これらのモデルを利用し、過去再現実験および将来予測実験を行うことにより、気候変動リスクに関する様々な分析を行った。特に令和元年度（平成 31 年度）は、MIROC-INTEG-LAND を利用して、分野横断モデル相互比較プロジェクト（Inter-Sectoral Model Intercomparison Project, ISIMIP）にデータを提供するための数値実験を行なった。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 の開発を継続した。地球システム統合モデル MIROC-INTEG-ES は、ベクトル機を利用した計算も行った。

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 PRYSB12 (Sakurai et al. 2014) 土地利用モデル TeLMO (Yokohata et al. 2020) を高度化するとともに、これら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、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、複数の社会経済シナリオをモデルに与えるとともに、複数の全球気候モデルによって得られた将来予測実験の結果を、モデルの境界条件として与えることにより、社会経済と気候予測の不確実性を考慮した。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) に提供し、ISIMIP で得られた複数のモデル結果を利用して、将来の水文干ばつに関する予測を行った。また、陸面物理過程モデル MATSIRO における永久凍土プロセスの改良を行い、永久凍土融解による温室効果ガス放出量と、それにとまう地表気温の変化についての分析を行った。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

これまでの研究で、気候変動に伴う将来の水資源・土地利用・生態系間のつながり (nexus) について評価することの重要性が指摘されてきた。具体的には、気候変動が、穀物生産や土地利用などの様々な人間活動に与える影響について評価する研究が、数多くなされてきた。この一方で、土地利用などの人間活動の変化が、二酸化炭素排出吸収のバランスや地表面状態を変えることを通して、気候変動に与える影響についても、気候・地球システムモデルなどを用いて、様々な研究がなされてきた。このような人間活動と自然環境の変化を同時に考慮し、その相互作用を評価することの必要性が指摘されてきたが、自然環境と人間活動のモデルを結合して、この問題に取り組んだ研究は少ない。そこで本研究では、生態系・水資源・土地利用・作物成長を評価できるモデルを結合することで、気候変動影響下における土地・水・生態系間の相互作用を、不確実性を含めて定量的に評価するグローバルな陸域統合モデルを開発し、各種シナリオについてシミュレーション分析を行う。

3.3 数値シミュレーション

MIROC-INTEG-LAND (Yokohata et al. 2020) の特徴は、最新の全球気候モデル MIROC に、自然生態系と人間活動モデルが統合されている点である。MIROC は モデル相互比較プロジェクト (CMIP) に貢献をしてきた、大気・海洋・陸面結合モデルである。MIROC-INTEG の目的は、気候システムと人間活動の相互作用を表現することである。このため、統合モデルの第一バージョンでは、人間活動の主要な場である陸域のみを対象とした計算を行う。本研究では、CMIP5 にデータ提供を行った MIROC5.0 (Watanabe et al. 2010) において、陸面モデル MATSIRO だけを実行させる (Nitta et al. 2014)。この MIROC 陸面モデルに、陸域生態系モデル (VISIT, Ito and Inatomi, 2012) を結合させる。MIROC をベースに、陸域における自然環境と人間活動モデルを統合したため、このモデルを 陸域統合モデル MIROC INTEGrated LAND surface model (MIROC-INTEG-LAND) と名付けた。

MIROC-INTEG-LAND における人間活動モデルとしては、これまでに共著者らが開発してきた全球陸面-水資源モデル (HiGWMAT, Pokhrel et al. 2012)、作物モデル (PRYSB12, Sakurai et al. 2014) を利用する。HiGW-MAT は、MIROC で用いられている全球陸面モデル MATSIRO に、河川からの取水などによる灌漑や貯水池操作などの人間活動 (Hanasaki et al. 2008a, 2008b) を結合したモデルである。また、PRYSB12 では、4穀物 (wheat, maize, soybean, rice) の収量を計算することができる。さらに、本研究では人間による土地利用を記述する土地利用モデル (Terrestrial

Landuse MOdel, TeLMO, Yokohata et al. 2020) を開発し、これを MIROC-INTEG-LAND に結合する。TeLMO では、グリッドにおける農地（穀物およびバイオ燃料作物）、牧草地、森林（管理および非管理）面積と、これらの土地利用の間の transition を計算する。将来の都市面積を与え、農地、牧草地、森林、その他の間の土地利用の変化を、5 x 5の Transition matrix として表現する。Transition matrix は、温室効果ガスなどの物質収支を計算するために、陸域生態系モデルで利用される。昨年度までは、TeLMO が扱う農地は穀物だけであったが、今年度の開発により、バイオ燃料作物のための農地を予報するモジュールを追加した。

MIROC-INTEG-LAND では将来予測のために、様々な社会経済データを利用している。具体的には、水資源モデル HiGW-MAT では水需要を、作物モデル PRYSBI2 では作物収量の増加をもたらす技術係数を、土地利用モデル TeLMO では食糧需要や GDP などを利用している。将来の社会経済データは、AIMによる Shared Socio-economic Pathways (SSP) にもとづく Representative Concentration Pathways (RCP) ごとの計算結果 (Fujimori et al. 2017) を利用する。

陸域統合モデル MIROC-INTEG-LAND は、スカラー機 (CPU30コア) を利用し、1年あたり40分程度で計算が可能である。結合モデル相互比較プロジェクト (CMIP) や部門横断影響評価モデル相互比較プロジェクト (ISMIP) で提供されている様々な境界条件を利用し、過去再現実験および将来予測実験を実行可能な形に、モデルを整備した。令和元年度 (平成31年度) には、ISIMIP phase 2 のプロジェクトに、水部門の過去再現実験、将来予測実験の結果を提供した。ISIMIP2 では、様々な境界条件の与え方が指定されており、計算期間は最長で1661-2300年に及ぶ。ISIMIP2 ではバイアス補正された4つの気候モデルによる日平均気象データが配布されるが、MIROC-INTEG-LAND はこれを3時間値に時間ダウンスケーリングしたデータを利用した。

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、CPU160コアを利用し、1年あたり1時間程度である。

3.4 結果

将来の気候変動と社会経済の変化により、干ばつが甚大化し、人間社会と自然生態系へ被害が生じることが危惧されている。干ばつは、食料・エネルギー・健康・経済など、幅広い分野に様々な影響を及ぼす。陸域の乾燥度は、陸域システムの変化にとって重要な制約条件あるいは駆動力の一つであり、地球システム変動の理解には、その適切な定量化が不可欠である。本研究では、干ばつ判別法として日単位変位閾値法を用い、長期変化の指標として年干ばつ日数の変化を分析した (佐藤ほか 2015)。具体的には、ある日の日平均流量が閾値以下となった場合にその日を早魃日と定義した。閾値には日単位の可変閾値を用い、各グリッド毎に 365 日全ての日が固有の閾値を持つ。RCP2.6 と RCP8.5 とで干ばつ日数を比較した結果が図 1 である。RCP8.5 における領域平均値の時系列は、26 地域中 21 地域が増加傾向を示し、増加幅と増加率には地域的な特徴がある。干ばつ日数領域平均値の増加傾向は、全ての地域で線形の増加傾向を示すわけではなく、米国西部・中部、西アフリカなど、21 世紀後半に急激な増加を示す地域が存在する。IPCC AR5 レポートには、干ばつは急激には変化しないと記されているが、本解析では領域的によっては急激な変化が起こりうることを示している。一方、RCP2.6 では、多くの地域で 21 世紀中盤にピークがあり、その後安定化もしくは減少に転じる傾向を示している。その結果、21 世紀中盤においては RCP2.6 の方が RCP8.5 よりも干ばつ日数が大きくなる領域がある。

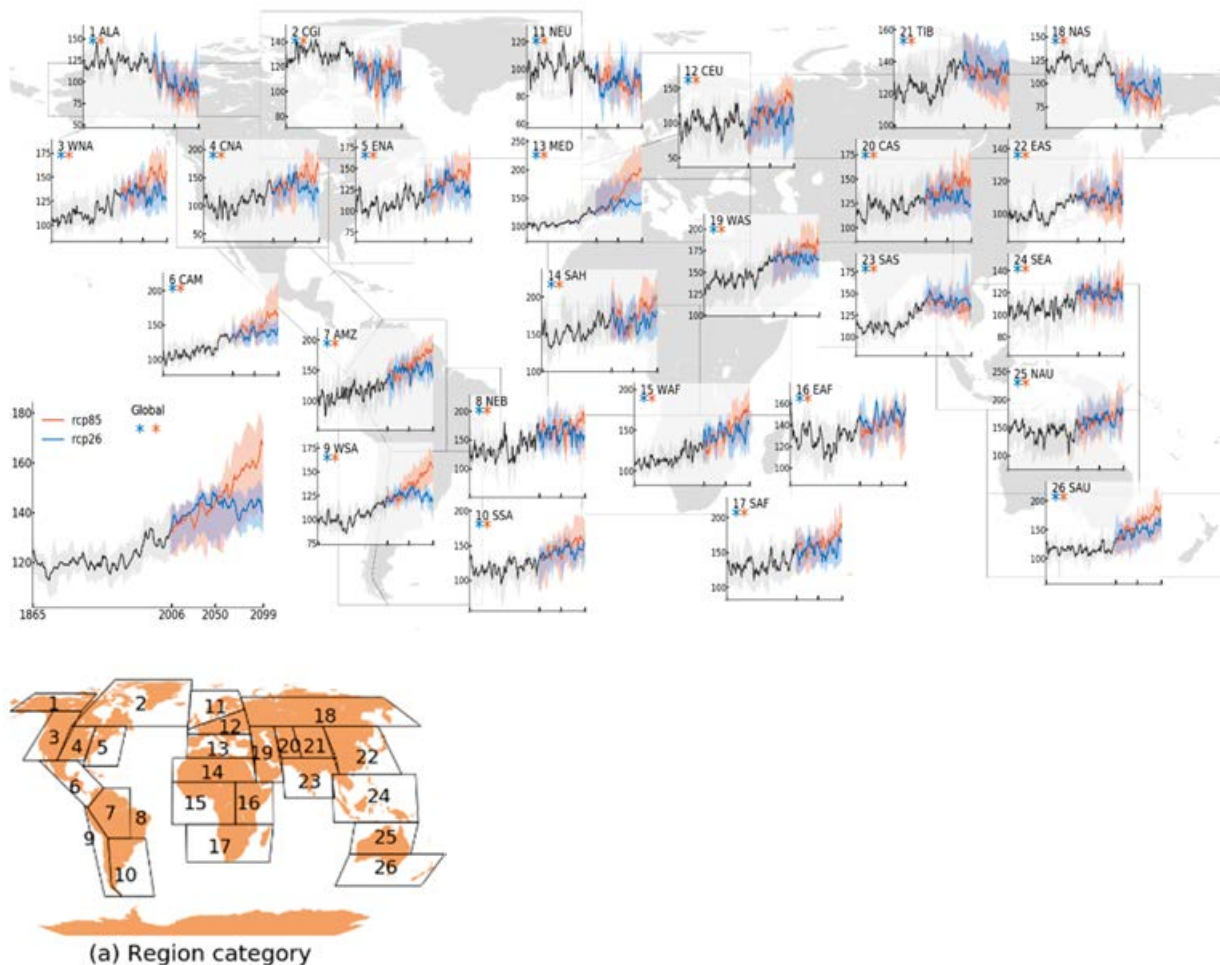


図 1. 陸域統合モデル MIROC-INTEG-LANDを含む ISIMIP2 によって集められたマルチモデルデータに基づく、干ばつ日数の過去および将来予測。RCP8.5 (赤)、RCP2.6 (青) シナリオを与えた結果で、ISIMIP2 によって提供された 4 つの気候モデルを、5 つの全球水文・陸面過程モデルに与えた場合の結果をシェードで示す。(a) Region category の図のように世界を 26 地域に分け、それぞれの領域および全球の空間平均時系列を示す。

参考文献

- Fujimori, S., Hasegawa, T., Masui, T., Takahashi, K., Herran, D. S., Dai, H., Hijioka, Y., Kainuma, M. (2017) SSP3: AIM implementation of Shared Socioeconomic Pathways. *Global Environmental Change*, **42**, 268-283. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.06.009>
- 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>
- Hanasaki, N., Fujimori, S., Yamamoto, T., Yoshikawa, S., Masaki, Y., Hijioka, Y., Kainuma, M., Kanamori, Y., Masui, T., Takahashi, K., and Kanae, S. (2013) A global water scarcity assessment under Shared Socio-

- economic Pathways – Part 1: Water use. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, **17**, 2375-2391. <https://doi.org/10.5194/hessd-9-13879-2012>
- 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., Koiraala, 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>
- 佐藤雄亮, 芳村 圭, 金 炯俊, 沖 大幹 (2015) 旱魃の将来変化に対する水資源管理の効果に関する研究. *土木学会論文集B1 (水工学)*, **71** 巻 4 号. https://doi.org/10.2208/jscejhe.71.I_391
- Takata, K, Emori, S, Watanabe, T (2003) Development of the minimal advanced of the surface interaction and runoff. *Global Plan. Change* **38**,:209-222. [https://doi.org/10.1016/S0921-8181\(03\)00030-4](https://doi.org/10.1016/S0921-8181(03)00030-4)
- 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-INTEGRALAND 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可能な新たなモデルを完成させることができた。ISIMIP2 にデータを提供し、同様の境界条件の下で計算されたマルチモデルシミュレーション結果を利用し、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。将来の干ばつの増加に関する知見は、社会が気候変動に適応するための方策を検討するうえで非常に重要な知見である。

5. 今後の研究展望

さまざまなモデルの間の相互作用を正しく表現し、水資源・作物・土地利用に関する人間活動と、大気・陸面・海洋からなる気候システムの相互作用を評価し、様々な条件の下で将来予測を行うことが今後の目標である。気候予測の不確実性に加え、社会経済要素の不確実性を考慮することで、起こりえる将来像を幅広くとらえることが可能となる。将来的には、地球システム統合モデルにおける人間活動をより広く考慮することにより、様々な地球-人間システムの相互作用をより包括的に評価する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）

Friedlingstein, P., M. W. Jones, M. O'Sullivan, R. M. Andrew, J. Hauck, G. P. Peters, W. Peters, J. Pongratz, S. Sitch, C. Le Quéré, D. C. E. Bakker, J. G. Canadell, P. Ciais, R. B. Jackson, P. Anthoni, L. Barbero, A. Bastos, V. Bastrikov, M. Becker, L. Bopp, E. Buitenhuis, N. Chandra, F. Chevallier, L. P. Chini, K. I. Currie, R. A. Feely, M. Gehlen, D. Gilfillan, T. Gkritzalis, D. S. Goll, N. Gruber, S. Gutekunst, I. Harris, V. Haverd, R. A. Houghton, G. Hurtt, T. Ilyina, A. K. Jain, E. Joetzer, J. O. Kaplan, E. Kato, K. Klein Goldewijk, J. I. Korsbakken, P. Landschützer, S. K. Lauvset, N. Lefèvre, A. Lenton, S. Lienert, D. Lombardozzi, G. Marland, P. C. McGuire, J. R. Melton, N. Metz, D. R. Munro, J. E. M. S. Nabel, S. I. Nakaoka, C. Neill, A. M. Omar, T. Ono, A. Peregón, D. Pierrot, B. Poulter, G. Rehder, L. Resplandy, E. Robertson, C. Rödenbeck, R. Séférian,

- J. Schwinger, N. Smith, P. P. Tans, H. Tian, B. Tilbrook, F. N. Tubiello, G. R. van der Werf, A. J. Wiltshire & S. Zaehle (2019) Global Carbon Budget 2019. *Earth Syst. Sci. Data* **11**, 1783-1838. <https://doi.org/10.5194/essd-11-1783-2019>
- Ito, A. (2019a). Disequilibrium of terrestrial ecosystem CO₂ budget caused by disturbance-induced emissions and non-CO₂ carbon export flows: a global model assessment. *Earth Syst. Dynam.* **10**, 685-709. <https://doi.org/10.5194/esd-10-685-2019>
- Ito, A. (2019b). Methane emission from pan-Arctic natural wetlands estimated using a process-based model, 1901 - 2016. *Polar Science* **21**, 26-36. <https://doi.org/10.1016/j.polar.2018.12.001>
- Ito, A, P. O. Reyer Christopher, Gaedeke Anne, Ciais Philippe, Chang Jinfeng, Chen Min, Francois Louis, Forrest Matthew, Hickler Thomas, Ostberg Sebastian, Hao Shi, Thiery Wim & Tian Hanqin (2020) Pronounced and unavoidable impacts of low-end global warming on northern high-latitude land ecosystems. *Environmental Research Letters*. **15**, 044006. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab702b>
- Yokohata, T., T. Kinoshita, G. Sakurai, Y. Pokhrel, A. Ito, M. Okada, Y. Satoh, E. Kato, T. Nitta, S. Fujimori, F. Felfelani, Y. Masaki, T. Iizumi, M. Nishimori, N. Hanasaki, K. Takahashi, Y. Yamagata & S. Emori. (2020) MIROC-INTEG1: A global bio-geochemical land surface model with human water management, crop growth, and land-use change. *Geosci. Model Dev. Discuss.* <https://doi.org/10.5194/gmd-2019-184>

6.2 誌上発表（査読なし）

該当なし。

6.3 口頭発表

- Yokohata T., Sato Y., Sakurai G., Kinoshita T., Yadu P., Ito A., Hanasaki N., Nitta T., Masaki Y., Okada M., Emori S. (2019) Interconnection of water, food, bio-energy, and land investigated with MIROC-INTEG: a global bio-geophysical land surface model with human components. *European Geoscience Union Meeting 2019*, Vienna.
- Satoh Y., Boulange J., Hanasaki N., Takata K., Pokhrel Y., Veldkamp T., Burek P., Yokohata T. (2019) Understanding the centennial-scale human-natural interactions using an integrated terrestrial model MIROC-INTEG under ISIMIP2b. *European Geoscience Union General Assembly 2019*, Vienna.
- Yokohata T., Sato Y., Sakurai G., Kinoshita T., Yadu P., Ito A., Hanasaki N., Nitta T., Masaki Y., Okada M., Emori S. (2019) Future projection of global climate, water, food, bio-energy, and land investigated with MIROC-INTEG: a global bio-geophysical land surface model with human components. *Japan Geoscience Union Annual Meeting 2019*, Makuhari.
- Satoh Y., Boulange J., Hanasaki N., Takata K., Pokhrel Y., Veldkamp T., Burek P., Yokohata T. (2019) Understanding the centennial-scale human-natural interactions using an integrated terrestrial model MIROC-INTEG under ISIMIP2 project. *Japan Geoscience Union Annual Meeting 2019*, Makuhari.
- Yokohata T. (2019) Future changes in climate, water, food, bioenergy, and land use investigated with MIROC-INTEG. *Workshop ESM IAM collaboration on future scenarios: opportunities and perspectives*, Tokyo.
- 横島徳太, 木下継基, 櫻井 玄, Yadu Pokhrel, 伊藤昭彦, 佐藤雄亮, 花崎直太, 新田友子, 岡田将誌, 江守正多 (2019) 陸域統合モデル MIROC-INTEG による将来の水資源・食料・エネルギー・土地利用予測. *日本気象学会 2019 年度秋季大会*, 福岡.
- Yokohata T., Kinoshita T., Sakurai G., Pokhrel Y., Ito A., Satoh Y., Kato E., Fujimori S., Tachiiri K., Hajima T., Takahashi K., Hanasaki N., Emori S. (2019) Future projection of water, food, bio-energy, ecosystem and land investigated with an integrated Earth System Model (MIROC-INTEG). *IAMC 12th Annual Meeting*, Tsukuba
- Yokohata T., Saito K., Iwahana G., Ohno H., Sueyoshi T., Ito A., Tanaka K. (2020) Future projection of climate change due to greenhouse emission by permafrost degradation. *Sixth International Symposium on Arctic Research*, Tokyo.

6.4 その他（書籍等）

該当なし。

7. 連絡先

横畠徳太

〒305-8506 茨城県つくば市小野川 16-2

国立研究開発法人国立環境研究所地球環境研究センター

Tel: 029-850-2347 Fax: 029-858-2645

E-mail: yokohata@nies.go.jp

Project name:
Climate change studies by development of global-scale land models

April 2016 – March 2020

Project leader:
Tokuta Yokohata, Center for Global Environmental Research, National Institute for Environmental Studies

Project members:
Akihiko Ito, Yusuke Satoh, Center for Global Environmental Research, National Institute for Environmental Studies
Tomohito Yamada, Faculty of Engineering, Hokkaido University
Etsushi Kato, Global Environment Group, The Institute of Applied Energy

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) which 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 (Takata et al. 2003, Nitta et al. 2014), which is a component of the global climate model MIROC (Watanabe et al. 2010). The output variables of each sub-model were exchanged with other sub-models during the time integration. The time intervals of variable exchange were from hourly to monthly or yearly. The water resource model H08 considered the irrigation process (water withdrawal from rivers), as well as dam operations in large rivers, which affect the state of the soil moisture and the river flows in the land surface model. In this report, we present the future projection of drought frequency using the numerical experiment data by MIROC-INTEG-LAND and other hydrological and land surface models. We show that the drought frequency will increase considerably (21 regions out of 26 global regions), which indicates that we need to prepare for and adapt to the hydrological changes in the future.

Keywords:
climate change, integration, risk management, terrestrial models

研究課題名：

懸濁粒子の動態および環境負荷物質との相互作用を考慮した沿岸海洋長期環境予測モデルの開発

実施年度：

平成 28 年度～令和元年度

課題代表者：国立環境研究所地域環境研究センター 東 博紀

共同研究者：国立環境研究所地域環境研究センター 中田聡史

国立環境研究所地域環境研究センター 吉成浩志

水産研究・教育機構水産工学研究所 古市尚基

大阪大学大学院工学研究科 入江政安

要旨：

懸濁粒子の動態は、沿岸海洋における長期の水質・底質環境および生態系の形成を大きく左右するにも関わらず、その的確な予測手法はいまだ確立されていない。本課題では、懸濁粒子の動態およびそれを支配する海底混合の数理モデル精緻化を通じて、長期沿岸海洋環境の予測精度を向上させることを目的とする。さらに、構築したモデルを閉鎖性海域の富栄養化、放射性物質による海底土汚染、海底資源開発による環境影響評価、気候変動の影響予測などの環境問題に活用し、環境政策立案に貢献する科学的知見の提示を目指す。

本報では、瀬戸内海における一次生産・水質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 年間の予測シミュレーションを行った。現在気候と比べて将来気候の表層水温は、年間を通じて 3～4℃程度上昇することが全ての湾灘で確認された。特に夏～秋の顕著な高水温は一次生産を阻害・低下させると予測された。それに応じて夏～秋の表層 DIN は大幅に上昇するが、季節的な水温低下が進んだ 10～11 月に入ると、この豊富な栄養塩に支持されて一次生産は強まる傾向が見られた。冬に入っても将来気候では、水温が現在気候より高いため、一次生産は高く維持され、その結果、表層 DIN は減少する傾向が示された。

キーワード：

気候変動影響、一次生産、栄養塩、陸域－海域統合モデル、瀬戸内海

研究課題名：

懸濁粒子の動態および環境負荷物質との相互作用を考慮した沿岸海洋長期環境予測モデルの開発

実施年度：

平成 28 年度～令和元年度

課題代表者：国立環境研究所地域環境研究センター 東 博紀

共同研究者：国立環境研究所地域環境研究センター 中田聡史

国立環境研究所地域環境研究センター 吉成浩志

水産研究・教育機構水産工学研究所 古市尚基

大阪大学大学院工学研究科 入江政安

1. 研究目的

閉鎖性海域の富栄養化、放射性物質による海底土汚染、海底資源開発による環境影響評価、気候変動の影響予測など、近年の沿岸海洋環境問題の解決・対策に向けた各種検討では、数十年スケールに及ぶ長期間の水質・底質の的確な将来予測・アセスメントが求められている。しかし、沿岸海洋の長期環境予測にはいまだ多くの不確実性が残されており、シミュレーション手法の標準化のみならず、環境保全・再生に向けた政策決定においても支障をきたしている。長期沿岸海洋環境を予測する上での最重要課題は「海底堆積物・懸濁粒子の動態を如何に的確に再現・予測するか」である。海底堆積物、とくにシルト・粘土など細粒径の懸濁粒子は、海水の水質・光環境や底生生物の生息環境に影響を与えるのみでなく、放射性物質、重金属、栄養塩、有機物などの環境負荷物質を吸着して海底に蓄積するなど、沿岸海洋における長期スケールの物質循環や水質・底質環境の形成に強く関わっている。しかし、海底混合に支配された複雑な懸濁粒子の再分配過程、すなわち潮汐・風浪による巻上、海水流動に伴う輸送・拡散、水中沈降・再堆積を的確に予測する数理モデルはいまだ確立されていない。本研究では、懸濁粒子の動態・環境負荷物質との相互作用を考慮した水質・底質の長期予測モデルを開発し、東アジア・日本近海から国内の沿岸・内湾までの様々なスケールで直面している海洋環境問題（放射性物質汚染、富栄養化、気候変動など）への適用と検証・改良を通じてモデルの確立を目指す。

上記の一研究として我々は、陸域からの流出の影響を強く受ける閉鎖性海域の水環境・生態系への気候変動影響を評価・予測するため、陸域淡水・汚濁負荷流出－海域流動・水質・底質モデルを構築した。そのモデルを用いて本報では、瀬戸内海およびその集水域を対象に現在気候(20世紀末)と RCP8.5 の将来気候(21世紀末)のそれぞれ 20 年間の数値シミュレーションを実施し、両結果の比較を通じて瀬戸内海の一次生産・栄養塩への気候変動影響を解析した。

キーワード：

気候変動影響、一次生産、栄養塩、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 (2019 年 4 月 1 日～11 月 30 日)

CPU 時間	v_deb	(デバック用)	: 452.28 hours
	v_32cpu	(最大 32CPU コア)	: 863.60 hours
	v_96cpu	(最大 96CPU コア)	: 24,018.59 hours
	v_160cpu	(最大 160CPU コア)	: 1,485,944.26 hours
		計	: 1,511,278.73 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 1 km 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、現在気候と将来気候のそれぞれ 20 年間のシミュレーションを実施した。プログラムコードについては MPI と OpenMP のハイブリッド並列 (80 MPI×2 OpenMP) を使用しており、計算は v_160cpu を主に使用した。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 v_deb、v_32cpu およびスカラー機を用いた。

3. 研究結果

3.1 背景と目的

気候変動適応法が 2018 年に公布・施行され、国や地方に気候変動の影響評価と適応計画の策定が求められることとなった。沿岸域・閉鎖性海域においても気候変動影響に関する調査研究が活発に進められているが、水質・生態系の影響予測に関しては、いまだ多くの不確実性が残されていることが課題となっている (中央環境審議会, 2015)。

我が国最大の閉鎖性海域である瀬戸内海では、かつては「瀕死の海」とも呼ばれるほど水質汚濁が深刻な問題であったが、総量削減等の長年の取り組みの結果、全体的には水質は改善傾向に向かっている。しかし、生物多様性・生物生産性については必ずしも回復傾向が見られず、新たな課題となっている。現在の瀬戸内海では、大阪湾湾奥部等の赤潮・貧酸素水塊といった栄養塩類の過剰が原因とみられる問題と、播磨灘や備讃瀬戸、大阪湾湾口部等の養殖藻類の色落ちといった栄養塩類の減少が原因とみられる問題が混在し、海域によって異なる方向性の問題に応じたきめ細やかな水質管理が求められている (中央環境審議会, 2020)。

瀬戸内海をはじめ閉鎖性海域の持続的な水質の保全と生物多様性・生物生産性の確保に向けた施策・取り組みを検討するためには、将来の気候変動の影響を踏まえた海域環境の長期予測が必要である。特にきめ細やかな水質管理や気候変動の適応策では、水域利用など海域の実情に応じた検討が必要になるため、それに耐えうる高解像度の予測が求められる。瀬戸内海への気候変動影響に関する先行研究として、森ら (2014) は CMIP5 の 61 種類の AOGCM による予測結果を解析し、数値シミュレーションを通じて RCP8.5 の将来気候の年平均水温が現在気候よりも 1.6°C 前後上昇することを示した。水産・養殖分野をはじめ、水温上昇への懸念は大きく、その影響に関する調査研究が全国各地で活発に進められている (環境省ら, 2018) もの、閉鎖性海域の水質・一次生産を対象として、これらを強く支配する陸域からの流出の変化も含めて気候変動の影響を総合的に予測した事例はこれまでにない。

以上を背景として、我々は瀬戸内海の水環境・生態系への気候変動影響の予測に向けた研究を進めてきた。前報では瀬戸内海とその集水域を対象とした陸域降水流出—海域流動モデルを、また別報(東ら, 2019)において集水域の汚濁負荷流出モデルをそれぞれ構築し、河川流量や水質、海水温や塩分の再現性等を報告した。本研究では、さらに海域の水質・底質の予測計算を組み込んだ陸域淡水・汚濁負荷流出—海域流動・水質・底質モデルを構築し、RCP シナリオに基づく気候変動影響予測を行った。本報では、最も気候変動が大きい RCP8.5 の 21 世紀末における将来気候と 20 世紀末における現在気候のそれぞれ 20 年間の計算結果に基づき、海域表層の水質と一次生産に特に着目して気候変動影響を解析した。

3.2 研究手法

3.2.1 予測モデルの概要

(1) 陸域淡水・汚濁負荷流出モデル

瀬戸内海の水質予測の入力条件として必要な陸域からの淡水・汚濁負荷(SS, COD, TN, TP)流出量については、21 一級河川のみでなく、中小河川も含む全集水域 (図 1) を対象に構築した分布型流出モデル (東ら, 2018; 東ら, 2019) を用いて予測した。本モデルは、水平解像度約 1 km の 3 次メッシュで落水線 (擬河道網) が作成されており、流域の降水、施設からの点源負荷物質および降水に伴って土地から流出する面源負荷物質が落水線に沿って流下する構造になっている。

(2) 海域流動・水質・底質モデル

海域の予測には、前報で構築した水平解像度約 1 km (3 次メッシュ) の 3 次元流動モデルに C-N-P-O の物質循環を取扱う水質・底質モデル (図 2) を組み込んだものを用いた。この水質・底質モデルは、先行研究 (東ら, 2011) において伊勢湾を対象に構築したモデルをベースとして、植物プランクトンをはじめ、瀬戸内海の水質・一次生産の長期予測計算に向けて改良・簡略化を行ったものである。水質や一次生産の予測結果を大きく左右する植物プランクトンは 2 種類とし、比増殖速度や半飽和定数など増殖に関わる重要なパラメータについては、大阪湾や播磨灘の代表的な優占種 *Skeletonema marinoi-dohrnii* complex (図 2 の S 型) と *Eucampia zodiacus* (図 2 の E 型) を対象に別途行った培養実験の結果に基づいて設定した。

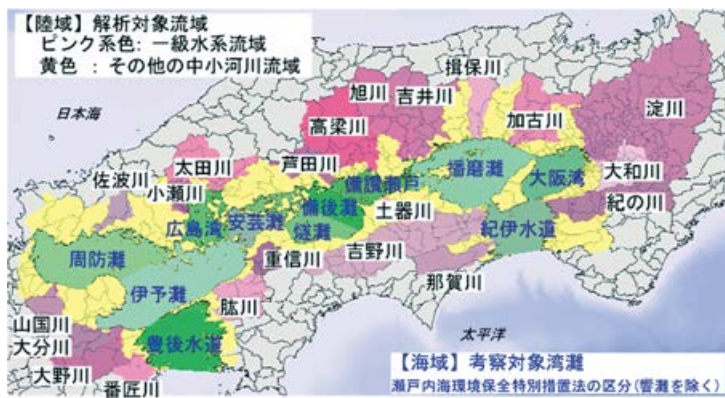


図 1. 解析対象流域・海域の概要。

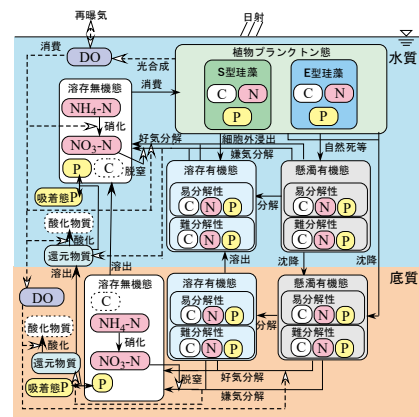


図 2. 水質・底質モデルの構造。

3.2.2 計算条件

予測計算の気象場には気象研究所の地域気候モデル NHRCM (水平解像度約 20km) で解析された環境省の「地域気候変動予測データ」(気象研究所, 2015) を使用し、現在気候 20 世紀末および RCP8.5 の将来気候 21 世紀末のそれぞれ 20 年間の計算を実施した。陸域における点源からの汚濁負荷発生量や外洋境界における水質など他の計算条件については、気候変動の影響を抽出しやすくするため、次のとおり、現在気候と将来気候で同じ条件を与えた。点源の発生負荷量については、2014 年度の調査実績(環境省, 2016)を 3 次メッシュ化して与えた。外洋境界の水質条件については、World Ocean Atlas 2009 に収録されているグリッド統計値を使用した。

3.3 結果と考察

3.3.1 陸域の淡水・汚濁負荷流出量への気候変動影響

陸域の予測結果については、後述のとおり、RCP8.5 の気候変動が海域の水質・一次生産に及ぼす影響は水温上昇によるものが卓越する結果になったため、概略を述べるに留める。現在気候に比べて将来気候では、降水流出の極端化とそれに伴う SS の流出量の増加が予測されたが、淡水の平均流出量はあまり差がないこと、点源負荷の割合が高いことが原因で COD、TN、TP の平均流出量に顕著な増減は見られなかった。

3.3.2 海域の一次生産・水質への気候変動影響

現在気候と将来気候のシミュレーションにより、それぞれ 20 年間の日別値を得たが、ここでは初期条件の影響が比較的強い最初の 1 年を除いた 19 年間の月別平均を求め、現在気候と将来気候の結果を比較することによって気候変動影響を考察した。図 3 に表層水温、Chl. a、DIN、TN の 2・8 月平均値の現在気候と将来気候の比較を示す。また、月別平均値をさらに湾灘別に空間平均し、湾灘単位の表層水質への影響を検討した。一例として、播磨灘の結果を図 4 に示す。

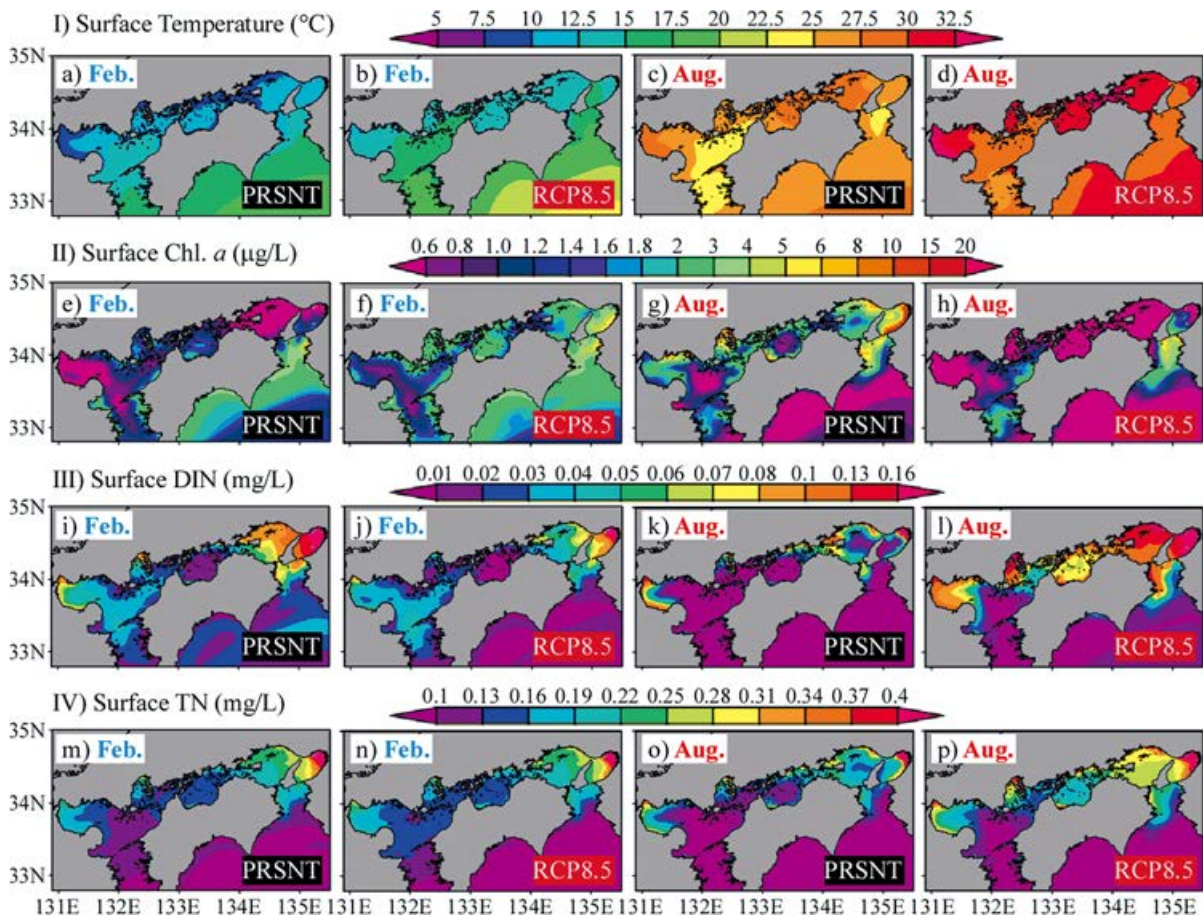


図 3. 現在気候(PRSNT)と将来気候(RCP8.5)における表層水温・Chl. a・DIN・TN の2・8月平均値。

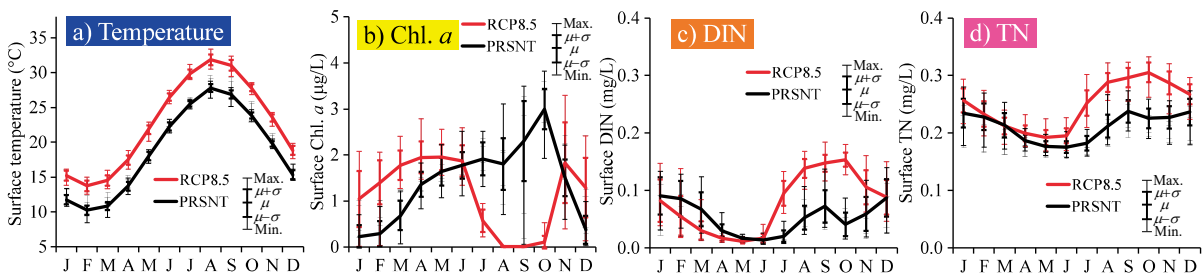


図 4. 現在気候(PRSNT)と将来気候(RCP8.5)の播磨灘における表層水温・Chl. a・DIN・TN 月別平均値。

(1) 表層水温・Chl. a

全ての湾灘において将来気候の表層水温は年間を通じて現在気候よりも 3~4℃程度上昇した。この昇温幅は森ら (2014) の予測よりも大きい。計算の期間や外力条件の違いによるものと推察される。本研究の昇温幅は夏~秋が比較的大きい傾向にあり、大阪湾湾奥部、備後灘、備讃瀬戸、播磨灘 (図 3a)、広島湾、周防灘西部の 6 海域では、将来気候の 8 月平均の表層水温が 30℃を超えた (図 4d)。

現在気候と将来気候の一次生産の変化は夏～秋と冬で対照的な特徴を示した。冬については、現在気候では比較的低温のために一次生産が抑制され、表層 Chl. *a* が低い値に留まったが、将来気候では水温上昇によって植物プランクトンの増殖が活発化し、表層の Chl. *a* が現在気候よりも高くなった (図 3e・f, 図 4b)。水温上昇によって一次生産が増加するという結果は、想像に難しくなく、これまでの報告事例も少なくない (環境省ら, 2018)。興味深い結果は夏～秋であり、将来気候の表層 Chl. *a* は、栄養塩(DIN)が十分に存在する海域においても、現在気候より顕著に低下した (図 3g・h, 図 4b)。水温が比較的高くなりにくい豊後水道、伊予灘、紀伊水道などの外洋に近い海域では表層 Chl. *a* の低下は小さく、上記の 6 海域、すなわち将来気候の 8 月平均表層水温が 30°C を超える海域では、表層 Chl. *a* が著しく減少しているため、原因は高温による一次生産の阻害であると考えられた。以上の結果は、モデルに入力した植物プランクトンの増殖速度と水温の関係に強く依存しており、より高温耐性がある種の追加などによって予測結果が大きく変わる不確実性を含んでいる。

(2) 表層 DIN・TN

表層 DIN の予測結果は上記の一次生産の変化に応じたものとなった。将来気候の夏～秋の表層 DIN は、一次生産が顕著に低下した海域では消費が減るため、現在気候よりも上昇する傾向となった (図 3k・l, 図 4c)。その後の将来気候の一次生産速度は、季節的な水温降下に伴って徐々に回復・活発化し、蓄積された豊富な栄養塩にも支持され、10～11 月頃には現在気候を上回るものとなった (図 4b)。将来気候の表層 DIN は、それに応じて急速に減少し、12 月頃には現在気候とほぼ同じくらいまでに低下した (図 4c)。その後の冬に移っても、水温上昇によって将来気候の表層 Chl. *a* は現在気候より高い濃度で維持される (図 3e・f, 図 4b) ため、将来気候の表層 DIN は減少が続き、現在気候よりも低くなる傾向となった (図 3i・j, 図 4c)。近年の瀬戸内海では、播磨灘をはじめ、ノリやワカメ等養殖藻類の色落ちの原因の一つとして DIN の減少が問題になっているが、本研究の予測結果は、気候変動によってその問題が深刻化すること、現在すでにその影響を受けている可能性があることを示唆している。

TN に見られる将来気候と現在気候の差 (図 3m～p, 図 4d) は概ね DIN の変動に対応しているものの、有機態成分の割合が大きいため、変化の比率は DIN ほど大きくはなかった (図 4c・d)。TN の水質環境基準では年平均値が指標とされているが、その観点においては、若干 TN が高くなるものの、例えば環境基準の達成率などに大きな影響はないといえる。

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.
- 環境省, 文部科学省, 農林水産省, 国土交通省, 気象庁 (2018) 気候変動の観測・予測及び影響評価総合レポート2018～日本の気候変動とその影響～. http://www.env.go.jp/earth/tekiou/report2018_full.pdf, 参照2020-5-15.
- 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>
- 中央環境審議会 (2015) 日本における気候変動による影響に関する評価報告書. <https://www.env.go.jp/press/upload/upfile/100480/27462.pdf>, 参照2020-6-15.
- 中央環境審議会 (2020) 瀬戸内海における今後の環境保全の方策の在り方について (答申). <http://www.env.go.jp/press/files/jp/113703.pdf>, 参照2020-6-15.
- 東 博紀, 秋山千亜紀, 中田聡史, 吉成浩志 (2019) 瀬戸内海流域圏の汚濁負荷流出モデルの構築と2006～2015年における全窒素流出の変動傾向. *土木学会論文集B (水工学)*, **75(2)**, I_421-I_426.
- 東 博紀, 越川 海, 村上正吾, 木幡邦男 (2011) 長期シミュレーションによる1990年代の伊勢湾のアサリ資源量変動に関する考察. *土木学会論文集B2 (海岸工学)*, **67(2)**, I_1046-I_1050. https://doi.org/10.2208/kaigan.67.I_1046

- 東 博紀, 佐藤嘉展, 吉成浩志, 牧 秀明, 越川 海, 金谷 弦, 内山雄介 (2018) 瀬戸内海における中小河川からの淡水流入量と流動シミュレーションの再現性への影響. *土木学会論文集B2 (海岸工学)*, **74(2)**, I_1135-I_1140. https://doi.org/10.2208/kaigan.74.I_1135
- 森 信人, 今井優樹, 二宮順一, 安田誠宏, 間瀬 肇 (2014) CMIP5にもとづく瀬戸内海の長期物理環境場の将来変化予測. *土木学会論文集B2 (海岸工学)*, **70(2)**, I_1271-I_1275. https://doi.org/10.2208/kaigan.70.I_1271

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、RCP シナリオに基づく瀬戸内海の一次生産・水質への気候変動影響予測を行った。地域気候変動予測データの現在気候と RCP8.5 の将来気候のそれぞれ 20 年間の計算を行った結果、次の結論を得た。

- 1) RCP8.5 の将来気候では、瀬戸内海の表層水温は現在気候と比べて 3～4℃程度年間を通じて上昇した。昇温幅は夏～秋が比較的大きく、大阪湾湾奥部、備後灘、備讃瀬戸、播磨灘、広島湾、周防灘西部の 6 海域では、将来気候の 8 月平均の表層水温が 30℃を超えた。
- 2) 将来気候の夏～秋の一次生産は、水温上昇がもたらす高温阻害により、現在気候より大きく低下した。この結果は、不確実性が高い高温域の植物プランクトンの増殖特性に依存しており、今後の課題である。
- 3) 将来気候の冬～春の表層 DIN は、水温上昇に伴う一次生産の増加のため、現在気候よりも減少した。

5. 今後の研究展望

本報の結論は最も気候変動が大きい RCP8.5 のものであり、陸域からの流出変動よりも水温上昇の影響が卓越する結果となったが、昇温幅がより小さい他の RCP シナリオでは流出変動の影響が表れる可能性があるため、予測計算を実施する。また、現時点では単一の気候シナリオ・モデルの予測結果に過ぎないため、アンサンブル解析を行う。本報では表層水質のみの議論に留まったが、成層や鉛直構造、流動場の変化についても解析を進める。

6. 研究成果発表

6.1 誌上発表 (査読あり)

- 東 博紀, 秋山千亜紀, 中田聡史, 吉成浩志 (2019) 瀬戸内海流域圏の汚濁負荷流出モデルの構築と 2006～2015年における全窒素流出の変動傾向. *土木学会論文集B (水工学)*, **75(2)**, I_421-I_426.
- 古市尚基, 東 博紀, 杉松宏一, 大村智宏, 越川 海, 長谷川徹, 山田東也, 南部亮元, 帰山秀樹 (2019) 海底混合層内の懸濁粒子動態. *沿岸海洋研究*, **57(1)**, 21-30. <https://doi.org/10.32142/engankaiyo.2019.8.004>

6.2 誌上発表 (査読なし)

なし。

6.3 口頭発表

- 中田聡史, 吉成浩志, 東 博紀, 秋山千亜紀 (2019) 陸域から瀬戸内海への淡水・汚濁負荷流出の気候変動による将来変化. *日本海洋学会 2019 年度秋季大会*, 同予稿集, 127.
- 吉成浩志, 中田聡史, 東 博紀 (2019) RCP8.5 シナリオに基づく瀬戸内海における海面水温・塩分の気候変動影響評価. *日本海洋学会 2019 年度秋季大会*, 同予稿集, 126.

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研究センター

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

E-mail: higashi@nies.go.jp

Project name :**A long-term prediction model for coastal ocean environments involving suspendable particle behavior and its interaction with pollutant substances**

April 2016 – March 2020

Project leader:

Hironori Higashi, Center for Regional Environmental Research, National Institute for Environmental Studies

Project member:

Satoshi Nakada, Center for Regional Environmental Research, National Institute for Environmental Studies
Hiroshi Yoshinari, Center for Regional Environmental Research, National Institute for Environmental Studies

Naoki Furuichi, Aquaculture and Fishing Port Engineering Department, National Research Institute of Fisheries Engineering, Japan Fisheries Research and Education Agency

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

Abstract:

Numerical modeling of suspendable particulate behavior in the coastal ocean has several issues to be addressed, although that behavior is very important, as it governs long-term water quality, sediment quality, and ecosystem. Our primary objective is to enhance the prediction performance of models for long-term coastal ocean environments by improving the numerical model of bottom mixing and subsequent suspended particle behavior. The developed model will be applied to marine environmental problems such as eutrophication, radioactive pollution, environmental assessment of deep-ocean mining, and prediction of climate change impacts.

In FY 2019, to clarify climate change impacts on primary production and water quality in the Seto Inland Sea, we performed 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. The simulations indicated that sea surface temperature (SST) in the future increased by 3–4 degrees C from that in the present. The SST warming was particularly significant from summer to autumn in the center of the sea. In these seasons, the SST warming reduced the primary production seriously because of the high-temperature stress of phytoplanktons, and nutrients increased, therefore, in the surface layer. After that, when SST dropped, the abundant nutrients enhanced the primary production. The state of higher primary production in the future compared with that in the present continued until spring, supported by SST warming. As a result, nutrient concentration from winter to spring in the future was lower than that in the present.

Keywords:

climate change impact, primary production, nutrient, numerical prediction, the Seto Inland Sea

研究課題名：
GOSAT-2 全球炭素循環モデルシステム開発

実施年度：
平成 30 年度～令和元年度

課題代表者：国立環境研究所地球環境研究センター 齊藤 誠
共同研究者：国立環境研究所地球環境研究センター 丹羽洋介・佐伯田鶴・高木宏志・村上和
隆・叢 日超・宮内達也

要旨：

GOSAT-2 は、宇宙から主要な温室効果ガスを観測する GOSAT の強化・継続を目的として 2018 年 10 月に打ち上げられた。GOSAT-2 プロジェクトが公開を予定する CO₂・CH₄ 気柱平均濃度や全球 CO₂・CH₄ 吸収排出量推定プロダクトの精度向上を目指し、本課題ではこれらプロダクトの作成において必要となるモデルシステムの開発、試験、運用、および研究を実施する。今年度は、1) エアロゾル分布推定値の観測データとの比較解析、2) 一酸化炭素濃度を利用した森林火災プロダクトの比較解析、3) GOSAT データを使用した GOSAT-2 モデルシステムの試験、4) アジア・太平洋上空におけるメタン高濃度イベントに関する解析、5) インドネシア森林火災に関する逆解析、などに取り組んだ。また、モデルシステムの一部については GOSAT-2 プロジェクトでの定常運用を開始した。

キーワード：
温室効果ガス、衛星観測、大気輸送モデル

研究課題名： GOSAT-2 全球炭素循環モデルシステム開発

実施年度：
平成 30 年度～令和元年度

課題代表者：国立環境研究所地球環境研究センター 齊藤 誠
共同研究者：国立環境研究所地球環境研究センター 丹羽洋介・佐伯田鶴・高木宏志・村上和
隆・叢 日超・宮内達也

1. 研究目的

温室効果ガス観測技術衛星「いぶき」(Greenhouse gases (GHG) Observing SATellite, GOSAT) は 2009 年 1 月の打上げ以降、11 年を経過した現在も二酸化炭素 (CO₂) およびメタン (CH₄) 気柱平均濃度の全球分布観測を継続している。2018 年 10 月には GOSAT の後継機 GOSAT-2 の打上げが成功し、GOSAT から続く衛星を用いた GHG モニタリングの継続と、衛星観測手法の更なる精緻化へ向けた取り組みが行われている。現在は GOSAT および GOSAT-2 の 2 機の同時運用が実施されている。これら衛星 GHG 観測において、GHG 気柱平均濃度プロダクトの精度を高め、それらを炭素循環研究へ活用するためには、プロダクト導出過程で必要となる各種モデルを用いた先験情報や、GHG 吸収排出量推定に係る様々なモデルの精緻化もまた必須である。本課題では、GOSAT-2 プロジェクトにおいて要求される GHG およびエアロゾル大気輸送モデルを中心とした複合的なモデルの開発・試験を実施し、プロダクトの定期公開に対応したモデルシステムの運用体制を構築し、衛星観測データを用いた全球 CO₂・CH₄ 吸収排出量推定に取り組む。

キーワード：
温室効果ガス、衛星観測、大気輸送モデル

2. スーパーコンピュータ利用実績

2.1 計算機利用時間 (2019 年 4 月 1 日～11 月 30 日)

CPU 時間	v_deb	(デバック用)	: 1,620.22 hours
	v_32cpu	(最大 32CPU コア)	: 2,580.42 hours
	v_96cpu	(最大 96CPU コア)	: 130,629.88 hours
	v_160cpu	(最大 160CPU コア)	: 31,963.59 hours
	計		: 166,794.11 hours

2.2 利用概要

本課題では、GOSAT-2 プロジェクトで使用する全球気候モデル NICAM (Nonhydrostatic ICosahedral Atmospheric Model) を中心にモデル研究・開発を進める。NICAM を基にして開発された GHG 大気輸送モデル NICAM-TM およびエアロゾル大気輸送モデル NICAM-SPRINTARS の試験・システム開発を実施し、それらを GOSAT-2 プロジェクトにおいて定常運用することを目的とする。また、NICAM-TM を用いて全球炭素収支を推定する上で不可欠な先験情報である森林火災排出量に関して、森林火災プロダクトの比較解析を行う。昨年度まで開発を進めてきた陸域生態系モデルおよび人為起源排出量インベントリについても作業を継続する。

3. 研究結果

3.1 概要

本課題は、GOSAT-2 プロジェクトにおいて必要となる複数のモデルシステムを開発・試験し、定常運用に向けた体制を国立環境研究所スーパーコンピュータ（ベクトル・スカラ両機、以下、NIES-SC）上に整備する。このモデルシステムの中心を成すのが NICAM-TM および NICAM-SPRINTAR である。両モデルは GOSAT-2 レベル 2 プロダクトの先験情報として利用されることに加え、NICAM-TM に逆解析システムを統合した NICAM-TM 4D-Var [Niwa et al., 2017a, b] は GOSAT-2 レベル 4 プロダクトの核となるシステムである。今年度はこれらのモデルの開発・試験を実施するとともに、GOSAT-2 プロダクトにおいて一部モデルシステムの定常運用を開始した。また、開発したモデルシステムを利用したプロセス研究への応用を進めると同時に、NICAM-TM の先験情報の一つである森林火災プロダクトについての比較解析を実施する。

3.2 背景と目的

2009 年 1 月に打ち上げられた GOSAT の観測開始以降、地上観測だけでは全容を把握することが困難であった全球の CO₂ および CH₄ 濃度分布の概要が明らかとなり、炭素循環研究における GHG 衛星観測データの利用も一般的となった。この結果を受け、GOSAT 打ち上げ以降も GHG 観測を目的とした衛星が複数打ち上げられて来た。GOSAT-2 は、GOSAT による主要な GHG の宇宙からの観測を強化・継続し、気候変動や人間活動が炭素循環に与える影響を監視するとともに気候科学と気候変動に関連する政策に貢献することを目的に 2018 年 10 月に打ち上げられた。

GOSAT-2 プロジェクトでは、CO₂・CH₄ 気柱平均濃度などのレベル 2 プロダクトや、全球 CO₂・CH₄ 吸収排出量推定のレベル 4 プロダクトの公開を予定しており、現在はこれらプロダクトの公開に向けた試験・準備を進めている。レベル 2 プロダクトの導出過程では先験情報として CO₂・CH₄ 濃度および各種エアロゾル分布情報を、またレベル 4 プロダクトの作成では大気輸送モデルおよび逆解析、また複数の先験情報を必要とする。本課題では、これら GOSAT-2 プロジェクトにおけるプロダクト作成において必要となる複合的なモデルを全球炭素循環モデルシステムとして統合し、その開発、試験、整備に取り組む。

3.3 計算方法

本課題におけるモデル開発および計算は主に NIES-SC 上で行った。GHG・エアロゾルの時空間分布推定に大気輸送モデル NICAM-TM および NICAM-SPRINTARS を用いるため、NIES-SC 上で開発環境を整備した。これら大気輸送モデルは水平解像度 glevel=5（約 223 km）、鉛直 40 層、時間解像度 20 分を基準に開発を進めた。なお、GOSAT-2 プロジェクトにおける実運用でも、この解像度で本モデルシステムを運用する予定である。大気輸送モデルのナッジング用水平風速場には気象庁 55 年長期再解析（JRA-55）データを使用した。

3.4 結果

3.4.1 GOSAT-2 レベル 2 プロダクト先験情報

これまでに構築したシステムを用いて、NICAM-TM を 1 ヶ月ごとに運用している。SPRINTARS の計算出力を変換したデータと合わせて、月に 1 回の頻度で、スカラ処理用計算機フロントエンド上のインターフェイスディレクトリを介して、GOSAT-2 データ処理運用システム（G2DPS）へこれら先験値情報の提供を行っている。この先験値情報は GOSAT-2 レベル 2 プロダクト等の算出に用いられている。

GOSAT-2 レベル 2 プロダクトにおける SPRINTARS の代替先験情報として、NICAM-SPRINTARS を用いたエアロゾル先験情報の試験を実施した。NICAM-SPRINTARS が推定したエアロゾル光学的厚さ AOD を、MODIS および Assimilation SPRINTARS の AOD と比較した。対象とする波長域は MODIS が 532 nm、NICAM-SPRINTARS と Assimilation SPRINTARS が 550 nm である。図 1 に結果を示す。MODIS AOD が高い値を示すアフリカ中央部、インド北東部、中国沿岸部、アマゾン中央部、サハラ西部、およびソマリアからアラビア海に渡る領域において、NICAM-

SPRINTARS も同様に AOD が高い値で再現出来ていることが確認できた（サハラ西部を除く）。次に、AOD を 10 度格子ごと（60°N-60°S）に平均した上で MODIS AOD との相関係数を月ごとに確認した。各月の MODIS AOD との相関係数は Assimilation SPRINTARS および NICAM-SPRINTARS とともに概ね 0.7 以上であった。Assimilation SPRINTARS は MODIS AOD に同化したモデルであるが、その結果と同程度の相関係数を NICAM-SPRINTARS は示した。

次の比較解析として、消散係数 (km^{-1}) の平均鉛直勾配を CALIPSO レベル3 プロダクトと比較した。この解析において、地上から上空 6 km までの AOD を用いて規格化した消散係数鉛直分布を使用した。海洋に面している北大西洋域や北西太平洋域では消散係数の鉛直勾配が大きく、これらの領域ではモデル間の差が大きくなることが Koffi et al. (2016) では報告されているが、本研究における CALIPSO と NICAM-SPRINTARS の差は高度 1 km 以下の境界層内の勾配を除けば概ね一致した。また、森林火災の影響が大きい南アメリカ域、南アフリカ域、中央アフリカ域では、特に SPRINTARS の再現性が低いことが Koffi et al. (2016) で報告されているが、南アメリカ域を除く 2 領域における NICAM-SPRINTARS の結果は、Koffi et al. (2016) によるモデル間のバラツキ内に収まる結果が得られた。

上記の比較解析を踏まえ、現在は NICAM-SPRINTARS で推定したエアロゾル先験情報を G2DPS へ定常的に提供するための運用体制の整備を行っている。

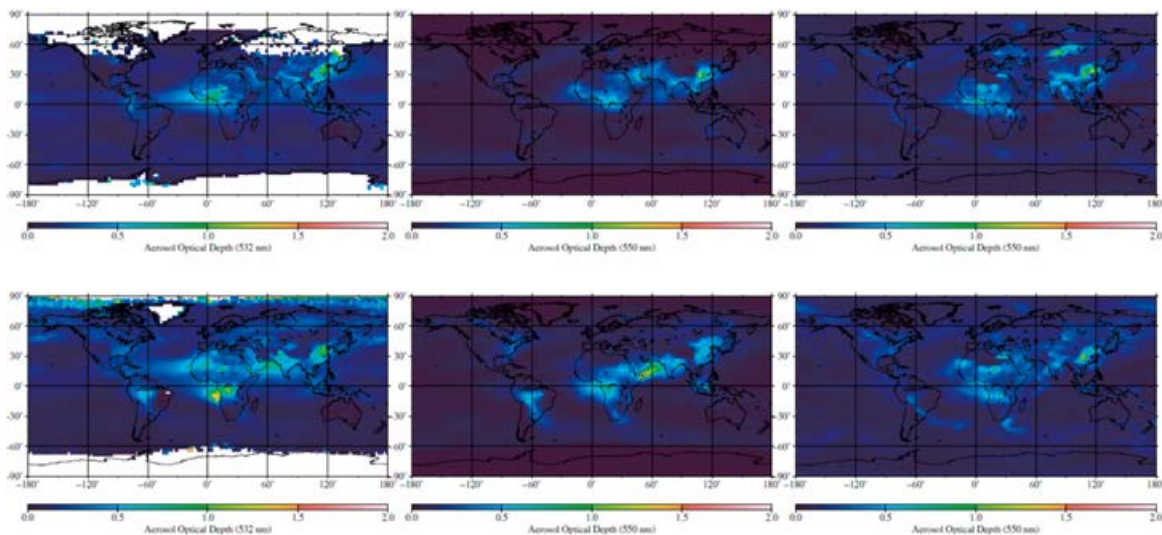


図 1. AOD の 2 月（上）および 8 月（下）における分布地図。左から MODIS、NICAM-SPRINTARS、Assimilation SPRINTARS を示す。

3.4.2 GOSAT-2 レベル 4 プロダクト先験情報

森林火災に伴うバイオマスの燃焼過程において CO_2 、一酸化炭素 (CO)、 CH_4 等が生成され、大気中へ放出される。GOSAT-2 レベル 4 プロダクトの全球 $\text{CO}_2 \cdot \text{CH}_4$ 吸排出量推定値の計算において、この森林火災による $\text{CO}_2 \cdot \text{CH}_4$ 排出量は必要不可欠な先験情報である。GOSAT-2 プロジェクトでは研究の一環として、新たな森林火災排出量プロダクトの作成に取り組んできた (Shiraishi and Hirata, 2019)。この森林火災プロダクトでは使用する土地被覆図、バイオマス密度、火災イベントデータの組み合わせにより複数のプロダクトが試作されている。しかし、既存の森林火災プロダクトとの比較解析だけでは、どのプロダクトの森林火災排出量の再現性が高いかを判別することは困難である。そこで、 CO_2 や CH_4 と比べ大気中での寿命が短く、大気濃度には地域的な影響が反映される CO に焦点を当て、森林火災プロダクトの評価を試みる。解析では、NICAM-TM

を使用して森林火災排出量を含む先験情報から大気 CO 濃度変動を推定し、大気濃度観測データとの比較解析を行った。

森林火災 CO 排出量には、公開プロダクトとして広く利用されている GFED および GFAS に加え、GOSAT-2 プロジェクト内で新たに作成された森林火災排出量プロダクトの内、GEL、GWL、MEL、および MWL の 4 種類、計 6 種類のプロダクトを使用した。各プロダクトの詳細は省略するが、GEL、GWL、MEL、MWL の違いは使用した土地被覆図およびバイオマス密度の違いに起因する。これらの組み合わせの違いにより、全球月平均した CO 排出量にはプロダクト間で 18.2-52.0 Tg CO month⁻¹ の違いが見られる。これらのプロダクト等を用いて大気 CO 濃度変動を推定し、その結果を温室効果ガス世界資料センターが公開する現地観測データ、および衛星観測データである MOPITT レベル 3 CO 気柱平均濃度データとの比較を行った。現地観測データとの比較では、森林火災の影響を受けない観測点ではプロダクト間に有意な違いは見られなかった。一方、アラスカやインドネシアに位置し、森林火災の影響を強く受ける観測点ではプロダクト間の違いが顕著に表れた。一例として、インドネシアの Bukit Kototabang (BKT) サイト (0.2°S, 100.3°E) では、2013 年から 2015 年の 3 年間における大気 CO 濃度観測データ (日値) との比較において、相関係数はプロダクト間で 0.38 - 0.71 の違いが見られた。今回の試験で使用した森林火災プロダクトの時間解像度は GFAS が 3 時間、それ以外は全て 1 月である。時間解像度が高い GFAS が最も高い相関係数を示し、他は GFED=0.44、GEL=0.57、GWL=0.38、MEL=0.52、MWL=0.39 であった。この結果から、散発的に発生する森林火災を再現する上で時間解像度の高さが重要な要因の一つであることが推測される。また、森林火災プロダクト間においても、CO 排出量の再現性の高さには無視できない違いが存在することがわかった。現在は、より長期間の観測データおよびモデル推定結果の比較解析を実施中である。

次に、図 2 に 2015 年 10 月における MOPITT と、上記解析において現地観測データと関連の高かった GEL を用いた CO 気柱平均濃度分布 (ppb) を示す。MOPITT CO 気柱平均濃度において森林火災の影響が顕著なアマゾン域、アフリカ中央域、ボルネオ島を中心とした領域において高濃度域が確認できる。GEL を用いたモデル推定においてもこれらの領域では高濃度の CO 気柱平均濃度が再現できていることがわかる。同様の傾向は MEL を用いたモデル推定でも確認できたが、GWL および MWL を用いたモデル推定ではアマゾン域やアフリカ中央域での高濃度帯の再現性が低かった。CO 濃度観測データとの比較では GEL および MEL が良好な結果となったが、現在は CO₂ および CH₄ の再現性についても同様の解析を行っており、それらの結果を考慮した上で GOSAT-2 レベル 4 プロダクトの先験情報に使用する森林火災プロダクトを選定する。

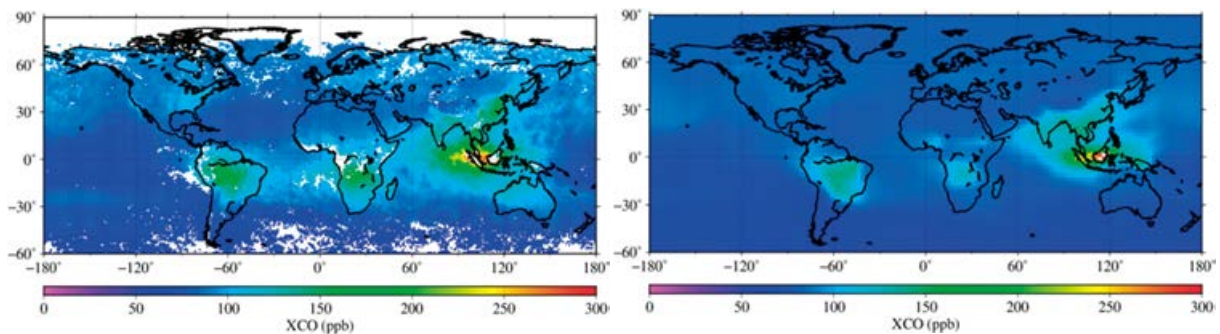


図 2. 2015 年 10 月における MOPITT (左) と森林火災プロダクト GEL などをもとに推定した CO 気柱平均濃度 (ppb) の全球分布図。

3.4.3 GOSATデータを用いたNICAM-TM 4D-Varシステムの試験

2010～2013年について、入力するCO₂濃度データを変えて3通りの計算を行った。地上観測データのみを使用したケース、ACOS-GOSATデータのみを使用したケース、両方のデータを使用したケースである。それぞれのケースについて、 $\chi^2 \approx 1$ となるよう観測誤差（モデルエラーを含む）を調整した。予備的な結果ではあるが、地上観測データとGOSATデータのそれぞれを用いた解析結果からは、観測地点の地理的特徴を示したCO₂フラックス変動が得られた。NICAM-TM 4D-VarによるCO₂フラックス推定結果と、NIES GOSAT レベル4A CO₂プロダクト（GU v02.06）の比較を行った結果、まず、フラックスの値について、両者のフラックス推定システムや入力データ等は全く異なるものの、亜大陸規模では両者でオーダーに違いが無いことが確認出来た。つまり、月ごとの推定フラックスの空間解像度は、L4Aプロダクト作成システムで64領域、NICAM-TM 4D-Varで10242領域（ただし空間相関を考慮している）と両者で大きく異なるが、NICAMシステムでも現実的なCO₂フラックスが推定できることが確認された。図3に、寒帯ユーラシアでの推定フラックスの時系列を示す。地上観測データのみを用いた推定では、領域内に観測が少ないことから、先験フラックスからの差異が小さかった。一方、GOSATデータを合わせた推定では、地上観測データのみでの推定値よりも夏季の吸収が強くなり、NIES GOSAT レベル4Aプロダクトと近い結果が得られた。

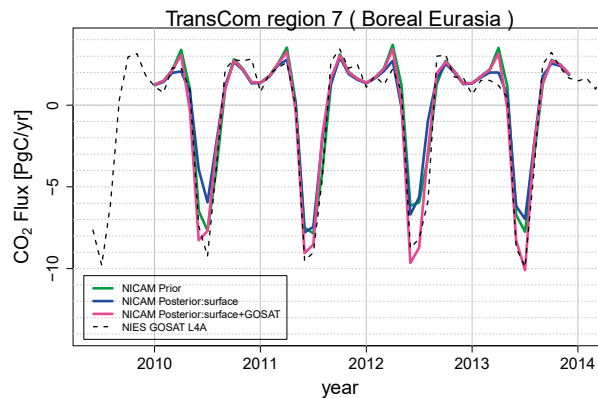


図3. 寒帯ユーラシアにおけるNIES GOSAT L4A-CO₂プロダクト（黒点線）とNICAM-TM 4D-Varの推定CO₂フラックス（実線）の比較。緑実線はNICAM-TM 4D-Varのフラックス推定で用いたCO₂の先験フラックス、青実線は地上観測データのみを用いた推定結果、赤実線は地上観測とACOS-GOSATデータの両方を用いた推定結果。

3.4.4 アジア・太平洋上空におけるCH₄高濃度イベントに関する解析

アジア大陸の風下に位置する西太平洋の上空では、しばしば夏季に高濃度のCH₄が観測されている。この高濃度は気温上昇に伴う湿地からのCH₄放出増加によるものと考えられ、フラックスのメカニズム理解に繋がる重要な情報となりうる。逆解析にこの観測データの情報を有効に取り込むためには、高濃度イベントのモデル再現性を高めると同時に、モデルの輸送誤差や輸送メカニズムをあらかじめ把握しておく必要がある。

まず、NICAM-TMのCH₄モジュールが適切に機能していることを確認するため、地上観測データとモデルとの比較解析を行った。その結果、季節変動などについて、モデルが先行研究と同程度に再現できていることを確認した。さらに、日本ーバンコク間のCONTRAIL-ASE観測で得られた上空の季節変動についても、各緯度帯においてモデルが概ね再現していることを確認した。しかし、夏季に頻繁に観測された1900 ppbを超える高濃度については、モデルの水平解像度によって、その再現性に差が出るのがわかった。NICAM-TMで再現した2017年9月12日の高度約10 kmにおけるCH₄濃度分布について解析した。当該日に実施されたCONTRAIL-ASE

観測では、15°N 付近と 30°付近に 2000 ppb 前後の高濃度が観測された。水平解像度 30km のモデル格子 (glevel-8) を用いた場合、観測された高濃度がモデルでよく再現されているが、水平解像度 240km のモデル格子 (glevel-5) を用いた場合では、これら高濃度はどちらも明瞭に再現されていなかった。240km から 30km まで段階的に解像度を上げて行った感度実験から、これら高濃度イベントを再現するためには少なくとも 120km の水平解像度を要することがわかった。この結果からは、CONTRAIL-ASE は、15°N と 30°N とで、それぞれ異なる CH₄ 高濃度空気塊を捉えたことが推察される。15°N のインドシナ半島上の高濃度は局所的に分布していることから、積雲対流などの比較的小さいスケールの現象によって生じていることが示唆される。一方、30°N の日本付近の高濃度は中国から日本にかかる前線付近に位置しているため、前線活動によって生じている可能性がある。また、バングラディッシュ上空でも高濃度の空気塊が生じており、この高濃度空気塊が切離して生じている可能性も考えられる。なお、バングラデシュ上空の高濃度はインドやバングラデシュの湿地から放出された大量の CH₄ がインド・モンスーンによる高気圧性循環によってトラップされて形成されたものであると考えられる。

図 4 に、上記 CH₄ 高濃度について、NICAM-TM のアジョイント・モデルを用いて逆追跡を行なった結果を示す。図 4a より、15°N 付近のインドシナ半島上空の高濃度については、インドシナ半島内のフラックスが大きく寄与していること、また、2 日程度の短時間で地表から観測点まで到達していることがわかった。特に地表から上空までほぼ垂直に 1 日以内で輸送されていることが見て取れる。このことから、積雲対流による輸送が寄与していることが強く示唆される。一方、30°N の日本付近の高濃度については、図 4b に示すようにインドやバングラデシュ、中国から上空へと輸送され、その後、西風によって日本近辺まで移流し、最後に時計周りに曲がって観測点まで到達していることがわかる。フラックスの寄与度を見ると、中国とインド・バングラディッシュの寄与が同程度であることがわかる。このことから、インド・モンスーンからの切離と前線活動による上空への輸送の両者が、観測された高濃度イベントの形成メカニズムとして重要であることがわかった。

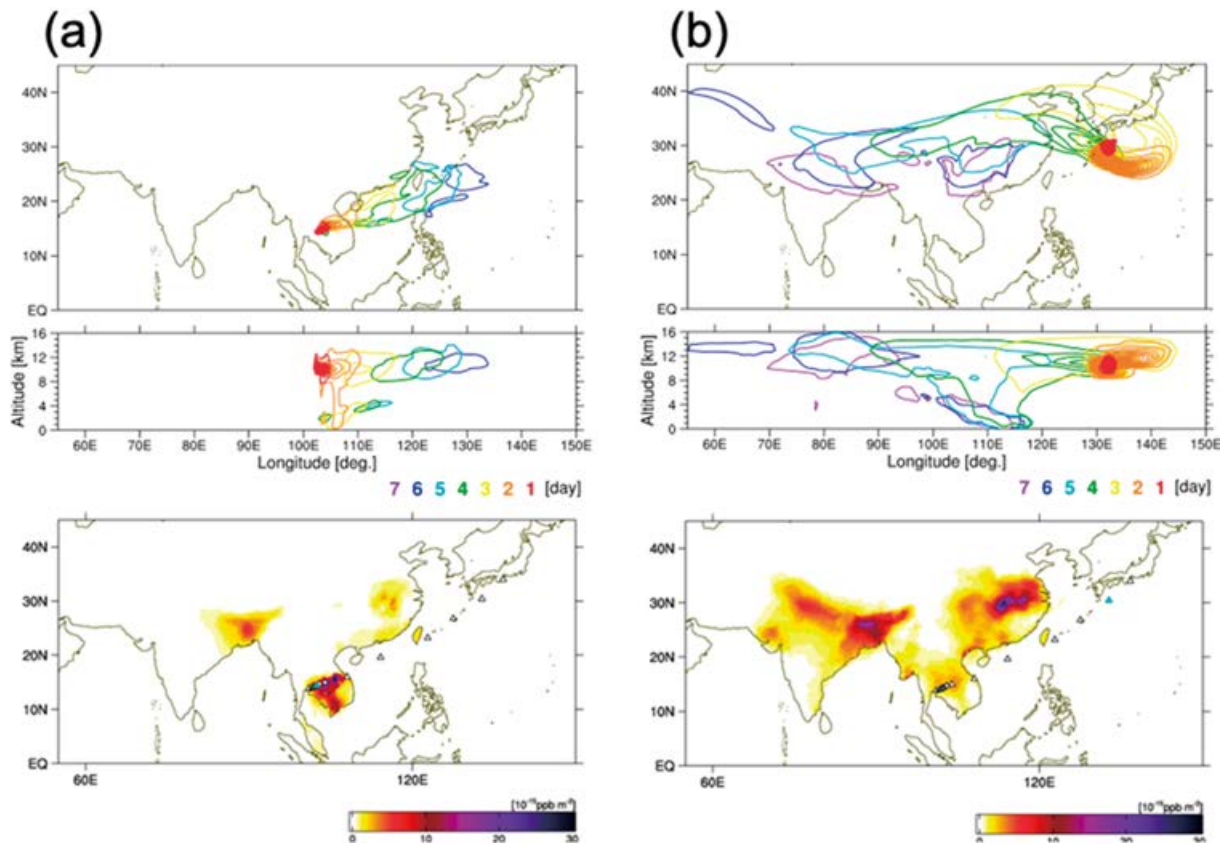


図 4. NICAM-TM のアジョイント・モデルによって計算された高濃度イベントに対する逆追跡の結果。上段、中段はそれぞれ、高濃度空気塊の輸送経路（色で観測日までの時間を示す）の水平、鉛直断面図を示す。下段は濃度上昇に対する地表面フラックスの寄与度（フットプリント×フラックス）を示す。(a)、(b) はそれぞれ 2017 年 9 月 12 日における 15°N 付近、30°N 付近での観測に対する結果を示す。

3.4.5 2015年インドネシア森林火災に関する逆解析への適用

図 5 に逆解析システム NICAM-TM 4D-Var によって推定された、2015 年 10 月の東南アジア域における炭素フラックス（CO₂ と CO の合計フラックスで、炭素換算で示す）の分布を示す。この月は、2015 年の大規模なエルニーニョに伴って発生した森林火災がピークに達した時期である。図 5d から、初期値のフラックスデータでは、スマトラ島の南東部やカリマンタン島の南部で、フラックスが顕著となっていることがわかる。この森林火災起源のフラックスデータは、人工衛星搭載の光学センサ MODIS による火災ホットスポット観測をもととしており、実際にこれらの地域で甚大な火災が発生していたことがわかっている。本研究の逆解析では、これら火災からの炭素フラックスの分布はほとんど変化しておらず（図 5b）、上記衛星による観測結果と整合的なものとなっている。一方で、東南アジア域の合計の炭素放出量については、初期値では 9-10 月の間に 357 Tg C であったのに対し、逆解析では 324 Tg C と約 10% 小さく推定された。異なる初期値を用いた感度解析でも、初期値に森林火災起源を除いた場合（C_NO）（図 5e）以外の実験全てで、この傾向は一致していた。C_NO 実験では 211 Tg C とより低い値が推定されたが、図 5e で示されるように、解析前に除かれていた森林火災による炭素放出の分布が解析後に

再現されており、このことから、本解析で使った観測データ（CONTRAIL-CME）に森林火災の情報が含まれていることがわかる。

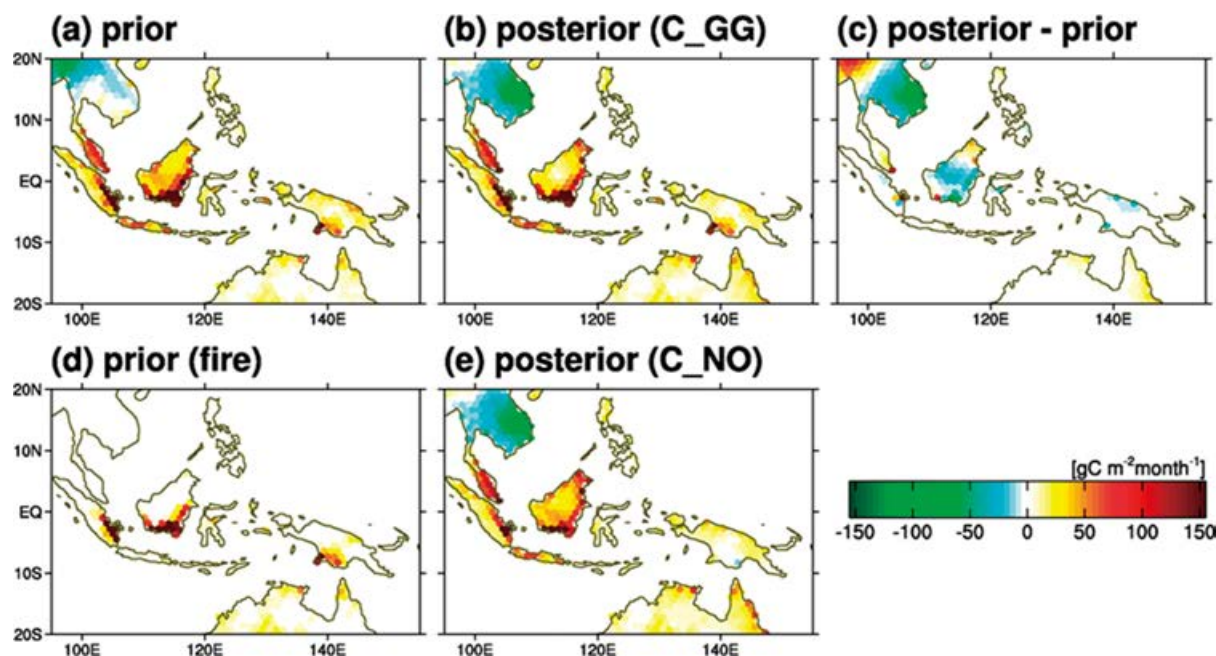


図 5. 2015 年 10 月の炭素フラックス（CO₂ と CO の合計フラックスで、炭素換算で示す）の分布。初期推定値（(a):全起源合計値、(d):森林火災起源(d)）と逆解析システム NICAM-TM 4D-Var で得られた推定値（(b): 初期値の森林火災起源として GFED と GFAS の平均値を用いた場合、(e):初期値から森林火災起源を除いた場合）を示す。(c)は(b)と(a)の差を示す。

参考文献

- Koffi, B. et al. (2016) Evaluation of the aerosol vertical distribution in global aerosol models through comparison against CALIOP measurements: AeroCom phase II results. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **121**(12), 7254-7283. <https://doi.org/10.1002/2015JD024639>
- Niwa, Y. et al. (2017a) 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. *Geoscientific Model Development*, **10**(3), 1157-1174. <https://doi.org/10.5194/gmd-2016-232>, 2016
- Niwa, Y. et al. (2017b) 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. *Geoscientific Model Development*, **10**(6), 2201-2219. <https://doi.org/10.5194/gmd-2016-232>, 2016
- Shiraishi T. and Hirata R. (2019) Estimation of global CO₂ emissions caused by biomass burning using satellite data. Land Use/Cover Changes, Environment and Emissions in South/Southeast Asia. *An International Regional Science Meeting*.

4. まとめ

本課題では、GOSAT-2 プロジェクトにおいて使用する全球炭素循環モデルシステムを開発する中で、各種モデル開発、先験情報開発、モデルおよび先験情報の試験、モデルシステムの運用および研究、全ての過程において NIES-SC を利用した。また、どの過程においても必要となる事前処理、実走、事後処理の大部分を NIES-SC 上で行った。本課題を通して NIES-SC 上に構築されたモデルシステムは、GOSAT-2 レベル 2 プロダクトの先験情報である CO₂、CH₄、エアロゾル時空間分布推定値の定常処理システムとしての運用が始まり、また、レベル 4 プロダクトの公開に向けた試験も実施中である。

5. 今後の研究展望

本課題で構築した全球炭素循環モデルシステムを GOSAT-2 プロジェクトとして定常運用することで、レベル 2 プロダクトの先験情報を定期的に G2DPS へ提供するとともに、レベル 4 プロダクトの新規公開を計画している。これらのプロダクトは、全球炭素循環研究や地球温暖化緩和策に対する各国の取り組みを評価するための基盤情報として世界の様々な機関で活用されることを期待している。また、本課題の中で開発が進められた大気輸送モデル、エアロゾル輸送モデル、陸域生態系モデル、人為起源排出量インベントリ、森林火災排出量プロダクト等は、GOSAT シリーズのみならず、関係する自然プロセスの解明、人間活動の影響評価等、幅広い研究分野で有効活用されることを期待している。

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

佐伯田鶴、丹羽洋介、齊藤 誠 (2019) Impact of GOSAT data on CO₂ fluxes in the NICAM-TM 4D-Var system –Towards GOSAT-2 Level 4 product–. *日本気象学会 2019 年度春季大会*, 2019 年度春季大会講演予稿集, p.214.

Saeki T., Y. Niwa, and M. Saito (2019) Carbon flux estimation using NICAM-TM 4D-Var and GOSAT data towards GOSAT-2 Level 4 product. *日本地球惑星科学連合 2019 年大会*, 講演情報, ACG32-04.

Saito M., Y. Niwa, D. Goto, T. Saeki, K. Murakami, R. Cong, T. Miyauchi, T. Shiraishi, R. Hirata, H. Yashiro, Y. Yoshida, and T. Matsunaga (2019) A global carbon cycle model system for the GOSAT-2 project, AsiaFlux Workshop.

丹羽洋介 (2019) 全球 CH₄ 逆解析によるフラックス推定値の独立性評価. *日本気象学会 2019 年度秋季大会*.

Y. Niwa, A. Ito, T. Machida, M. Sasakawa, Y. Tohjima, Y. Terao, T. Umezawa, S. Morimoto, S. Aoki, Y. Sawa, K. Tsuboi, H. Matsueda, E. Dlugokencky, C. Harth, P. B. Krummel, R. L. Langenfelds, Z. M. Loh, J. Mühle, S. O’Doherty, R. G. Prinn, M. Ramonet, P. Salameh, C. Sweeney, R. Weiss, D. Young, S. Castaldi, S. Noce, M. Saunio and A. R. Stavert (2019) Global inverse analysis of CH₄ fluxes using NICAM-TM 4D-Var. *日本地球惑星科学連合 2019 年大会*.

Y. Niwa and Y. Fujii (2019) Accurate estimation of posterior error covariance in a 4D-Var inverse analysis. *日本地球惑星科学連合 2019 年大会*.

Y. Niwa, T. Machida, Y. Sawa, T. Umezawa, K. Tsuboi, K. Saito, H. Matsueda and N. Saigusa (2019) Transport pathways of high CH₄ events observed over the western North Pacific. *8th International Symposium on Non-CO₂ Greenhouse Gases (NCGG8)*, Amsterdam, Netherland, 2019.

Y. Niwa, Y. Sawa, H. Nara, T. Machida, H. Mmtsueda, U. Umezawa, A. Ito, S. Nakaoka and H. Tanimoto (2019)
Fire-induced CO₂ emission in Equatorial Asia during the 2015 drought estimated by aircraft and ship observations. *AGU Fall Meeting 2019*, San Francisco, USA, 2019.

6.4 その他（書籍等）

なし。

7. 連絡先

齊藤 誠

〒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環境研究センター

Tel: 029-850-2792 Fax: 029-850-2219

E-mail: saito.makoto@nies.go.jp

Project name:
Constructing a global carbon cycle model system for the GOSAT-2 project

April 2018 – March 2020

Project leader:
Makoto Saito, Center for Global Environmental Research, National Institute for Environmental Studies

Project members:
Yosuke Niwa, Tazu Saeki, Kazutaka Murakami, Richao Cong, and Tatsuya Miyauchi, Center for Global Environmental Research, National Institute for Environmental Studies

Abstract:
GOSAT-2 was launched in October 2018 for continuous development of the spaceborne measurement of major greenhouse gases from space, which was started by GOSAT. The GOSAT-2 project provides various data products such as column-averaged CO₂ and CH₄ concentrations and global CO₂ and CH₄ flux estimates. This study develops and tests the models used in the GOSAT-2 data products to get the best possible results and operates those for generating the products. In this fiscal year this project included the following studies: 1) comparison of aerosol model estimates with observations, 2) comparison of forest fire emission products with observations by using atmospheric carbon monoxide concentrations, 3) test of the GOSAT-2 model system using GOSAT products, 4) analysis of high methane concentration events observed over Asia and the Pacific Ocean, and 5) inverse analysis of forest fires in Indonesia. The model system developed in this study has been partly employed in the GOSAT-2 project.

Keywords:
greenhouse gases, satellite observations, atmospheric transport model

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：

平成 31 年度～令和 3 年度

課題代表者：国立環境研究所地域環境研究センター 五藤大輔

共同研究者：国立環境研究所地域環境研究センター 菅田誠治

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

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

東京大学大気海洋研究所 鈴木健太郎・堀田陽香

宇宙航空研究開発機構地球観測研究センター 橋本真喜子・Chong Shi

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ー (Localized Ensemble Transform Kalman Filter: LETKF) を用いて、衛星から得られた 2 次元量である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。しかし、AOT はエアロゾルの鉛直積算量であるため、データ同化を行なっても、エアロゾル鉛直分布をうまく再現するのは難しい。そこで、エアロゾルの鉛直分布情報をもつエアロゾル消散係数 (Coefficient of aerosol extinction: Cext) の観測量を用いて、エアロゾルデータ同化を試みた。NICAM-Chem の全球版を用い、同化する衛星データとして、極軌道衛星 MODIS/TERRA から得られた AOT に加えて、極軌道衛星 CALIOP/CALIPSO から得られた Cext を用いた。その結果、CALIPSO によって得られた Cext を同化することで、エアロゾル鉛直分布再現性が向上し、同化がうまく稼働することが確認できた。さらに、夜間の CALIPSO による Cext と、日中の MODIS の AOT とを組み合わせた同化によって、より高精度の結果が得られることも確かめた。このことは、世界ではまだまだあまり取り組まれていない複数存在する衛星データをうまく組み合わせに成功し、単一の衛星だけでは実現しなかったエアロゾル予測高精度化に繋がることを示している。

キーワード：

大気汚染物質、大気汚染予測

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：

平成 31 年度～令和 3 年度

課題代表者：国立環境研究所地域環境研究センター 五藤大輔

共同研究者：国立環境研究所地域環境研究センター 菅田誠治

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

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

東京大学大気海洋研究所 鈴木健太郎・堀田陽香

宇宙航空研究開発機構地球観測研究センター 橋本真喜子・Chong Shi

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を構築することを目的とする。

キーワード：

大気汚染物質、大気汚染予測

2. スーパーコンピュータ利用実績

2.1 計算機利用時間（2019 年 4 月 1 日～11 月 30 日）

CPU 時間	v_deb	（デバック用）	: 1,144,26 hours
	v_32cpu	（最大 32CPU コア）	: 0.00 hours
	v_96cpu	（最大 96CPU コア）	: 90,106.02 hours
	v_160cpu	（最大 160CPU コア）	: 0.00 hours
	計		: 91, 250.28 hours

2.2 利用概要

本研究課題では、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 NICAM-Chem モデルを用いて、並列計算を行なっている。

3. 研究結果

3.1 概要

エアロゾルの鉛直分布情報をもつエアロゾル消散係数（Coefficient of aerosol extinction; Cext）の観測量を用いて、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ー（Localized Ensemble Transform Kalman Filter; LETKF）によるエアロゾルデータ同化を新たに試みた。その結果、CALIPSO によって得られた Cext を同化することで、エアロゾル鉛直分布再現性が向上し、同化がうまく稼働することが確認できた。さらに、CALIPSO による観測頻度

が少ないため、夜間の CALIPSO による C_{ext} と、日中の MODIS の AOT とを組み合わせた同化によって、より高精度の結果が得られることも確かめた。

3.2 背景と目的

大気汚染は環境問題として、1970 年頃から着目されており、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。近年、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因子 (Short-Lived Climate Pollutant: SLCP) 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、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を構築することを目的とする。

3.3 計算方法

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 (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 (Dai et al., 2014b) を行った。これまでに、エアロゾルデータ同化を適用しないエアロゾルシミュレーションに関しては、全球規模のシミュレーション (Dai et al., 2014a) や日本を対象とした領域規模のシミュレーション (Goto et al., 2015) を行っており、このモデルが都市大気汚染や越境大気汚染などを概ね再現できることが確かめられている。従来までのエアロゾルデータ同化では、極軌道衛星 MODIS/TERRA (Levy et al., 2013) や静止衛星 AHI/ひまわり (Yoshida et al., 2018) などの衛星によって得られる 2 次元エアロゾル量であるエアロゾル光学的厚さ (Aerosol Optical Thickness; AOT) を用いた (Dai et al., 2019)。しかし本年度は、極軌道衛星 CALIPO/CALIPSO によって得られる 3 次元エアロゾル量であるエアロゾル消散係数 (Coefficient of aerosol extinction; C_{ext}) を同化変数とした (Cheng et al., 2019)。AOT(= $\tau(x,y)$) は $C_{ext}(x,y,z)$ を地表面から大気上端まで積算した値になっており、その関係は式(1)のようになる。

$$\tau(x, y) = \int_{z=surface}^{z=top} C_{ext}(x, y, z) dz \quad (1)$$

なお、本研究で用いた NICAM のモデル水平解像度は全球 220km とした。対象は 2016 年 11 月で、気象場は 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) であり、土壌粒子および海塩粒子はモデル内部で発生させる。一方、モデルの検証に用いたのは、極軌道衛星 MODIS/TERRA の AOT で、NRL (Naval Research Laboratory) によって提供された 6 時間値である。エアロゾルデータ同化では、CALIPSO の C_{ext} と MODIS の AOT を組み合わせたエアロゾル同化を行い、時間窓は 24 時間を主とした。アンサンブル数は 20 とした。同化に用いる衛星等の組み合わせに関しては、表 1 に記載した通りである。表 1 の実験間の違いを調べることで、3 次元エアロゾル量を用いた同化の有効性と、異なる衛星を用いた同化の組み合わせ手法の有効性を検討することが可能となる。また、データ同化に関するパラメータの不確実性を調べるための感度実験も行った (表 2)。なお、異なる衛星を用いた同化手法は、これまであまり適用されておらず、本研究の成果が世界的にも最先端といえる。

表 1. 本研究で行ったエアロゾル同化実験。

実験名	同化	CALIPSO	NRL MODIS	時間窓
FR (FreeRun)	×	×	×	--
LETKF-CALIPSO	○	○	×	1 時間
4D-LETLF-24H-CALIPSO	○	○	×	24 時間
4D-LETLF-24H-NRL	○	×	○	24 時間
4D-LETLF-24H-CALIPSO-NRL	○	○	○	24 時間
4D-LETKF-24H-CALIPSO-night	○	△ (only night)	×	24 時間
4D-LETKF-24H-CALIPSO-NRL-night	○	△ (only night)	○	24 時間

表 2. 同化に関連するパラメータに対する感度実験*。

感度実験名	水平局所化 (km)	鉛直局所化 (km)	土壌粒子排出量 摂動 (%)
4D-LETKF-24H-CALIPSO	200	200	100
4D-LETKF-24H-CALIPSO-HL500	500	200	100
4D-LETKF-24H-CALIPSO-HL1000	1000	200	100
4D-LETKF-24H-CALIPSO-HL2000	2000	200	100
4D-LETKF-24H-CALIPSO-VL	200	1000	100
4D-LETKF-24H-CALIPSO-Dust	200	200	500

*すべて CALIPSO で同化した結果である。また、局所化長はデータ同化を適用するサイズを示しており、その境界では連続的に変化させるので、例えば水平局所化長が 200km の場合は、実際には 730km のサイズに含まれるグリッドを対象とした同化を行う。

3.4 結果

図 1 は、世界各地におけるエアロゾル (Cext) 鉛直分布のシミュレーション結果と CALIPSO 観測結果を示している。この図から、CALIOP によって得られた Cext を同化することで、領域におけるエアロゾル鉛直分布再現性が概ね向上することが明らかとなった。例えば、バイオマス燃焼 (Biomass Burning) 地域では、同化なしの結果 (図 1 の青実線) では過小評価傾向であったが、CALIOP を同化することで結果 (図 1 の赤実線等) が改善された。しかし、SAM (南アメリカ) では同化を行っても、CALIOP の結果との差はまだ大きかった。これは同化前のモデル結果と観測の差が、アンサンブルによる変動幅よりも大きいため、同化によって改善がされなかったと考えられる。したがって、同化する前にモデル自体 (FR 結果、図 1 の青実線) の改良が必要であり、今回の場合は実験対象とした 2016 年 11 月のバイオマス燃焼から排出されるエアロゾル量の過小評価を改善する必要があると示唆された。他の領域においても、同化によって改善があまりなされない場合もあるが、その原因は元のモデル自体の再現性が良くないことや同化する観測データが少ないことが挙げられ、同化自体はうまくいっていると判断できる。

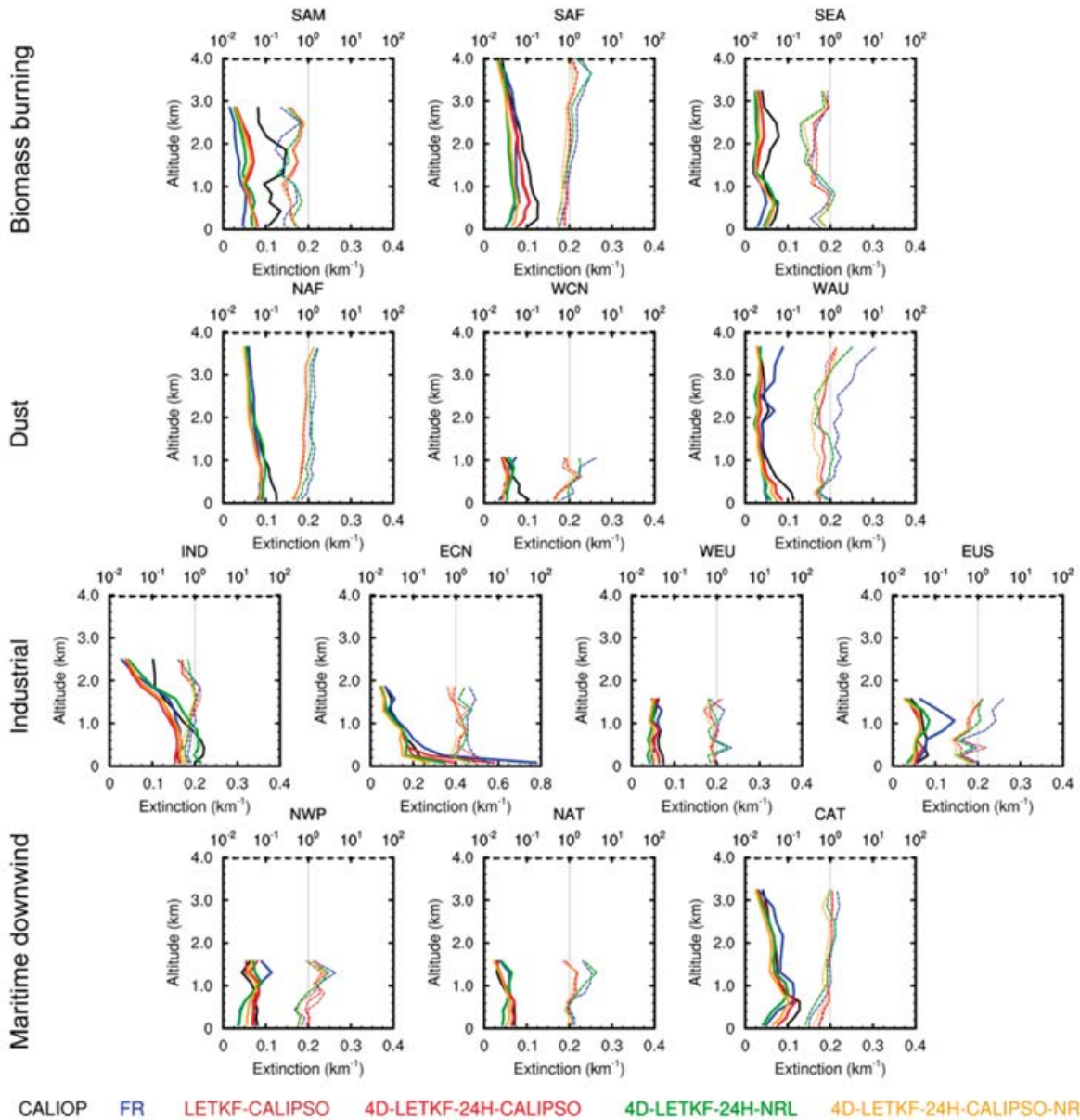


図 1. 世界の各領域におけるエアロゾル消滅係数の鉛直分布。場所は SAM(South America)、SAF(South Africa)、SEA(Southeast Asia)、NAF(North Africa)、WCN(Western China)、WAU(Western Australia)、IND(India)、ECN(Eastern China)、WEU(Western Europe)、EUS(Eastern United States)、NWP(Northwest Pacific Ocean)、NAT(North Atlantic Ocean)、CAT(Central Atlantic Ocean)である。色の違いは図の下に記載した組み合わせの結果であり、表 1 に記載した命名法に従う。実線は C_{ext} の値で、点線は CALIOP との偏差を示す。図は Cheng et al. (2019)の図 7 から抜粋したものであり、各領域の定義は Cheng et al. (2019)の図 3(a)に記載がある。

さらに同化結果を検証するために、図 2 左には全球海上における日中エアロゾル消散係数の平均鉛直分布を示した。ここでは、図 1 には載せていない実験である、夜間の CALIOP データを同化に用いる追加実験（実験名の最後に-night を追加）も示しており、昼間の CALIOP データを検証用データとすることで、同化には使用しない独立した観測データを用いた検証を行った。図 2 左から、4D-LETKF-24H-CALIPSO-night（橙色線）と 4D-LETKF-24H-CALIPSO-NRL-night（黄色線）、つまり夜間の CALIOP（黒線）のデータを用いた結果は高度 0.6km 以下のエアロゾル鉛直分布をよく再現しており、高度 0.6-1.2km においては最も CALIOP の鉛直分布に近いことがわかった。4D-LETKF-24H-CALIPSO-night と 4D-LETKF-24H-CALIPSO-NRL-night の違いは、高度 1km 以上の場所で顕著であるが、これは CALIOP の観測が高度 1km 以上であまり観測されていないことが挙げられ、MODIS による AOT 観測によってエアロゾル量が強制されていることを示している。したがって、CALIPSO のデータがあまり得られていない時空間においては特に、MODIS も用いた複合的なエアロゾル同化が重要であることが示された。

図 2 右には、同化に用いていない独立した観測データ（MODIS/AQUA）によって得られた AOT との差を全球海上における日中の値に対して計算をし、PDF（Probability Distribution Function）として示した。この結果から明らかなように、同化によって AOT の再現性が向上しており、特に夜間の CALIOP のデータを用いることで、日中の AOT 再現性がかなり向上した。同化なしの結果（FR）は、偏差（deviation）が ± 0.01 にある割合が約 11%であるのに対して、MODIS/TERRA の AOT および夜間の CALIOP の Cext も同化することで、約 35%と大きくなることを見積もられた。

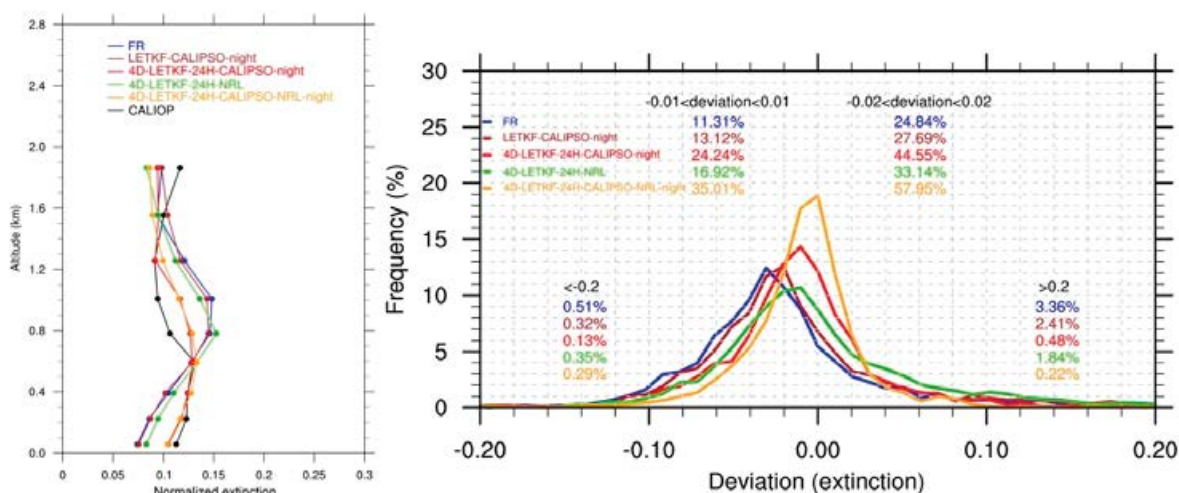


図 2. (左) 全球海上における日中エアロゾル消散係数の平均鉛直分布 (2016 年 11 月対象) と (右) 独立した MODIS データとの AOT に関する頻度分布全球比較。色の違いは図中に記載した組み合わせの結果であり、表 1 に記載した命名法に従う。左図で示された Deviation は、モデル AOT と衛星 AOT の差を示す。なお、図は Cheng et al. (2019) の図 11 および 14 から抜粋したものである。

データ同化に用いたパラメータ（つまり、データ同化の水平・鉛直局所化や土壌粒子発生関数の不確実性）に関する感度を調べるために、表 2 に記載した 4 つの追加の実験に加えて、参考結果として同化なしおよび標準設定の同化ありの実験結果も提示し、同化に用いていない MODIS/AQUA の AOT を比較した PDF を図 3 に示した。図 3 にある 6 つの実験結果から、4D-LETKF-24H-CALIPSO (橙色線) が最も MODIS との誤差が小さい（偏差が 0.05 以内にある割合が最大である）ことがわかった。また水平局所化を増加することで、偏差が 0.05 以内に入る割合が減少することもわかった。また、鉛直局所化を増加させても、結果が悪くなることがわかった。したがって標準実験で設定した比較的短い局所化が最適であることが示された。また、土壌粒子排出量の摂動も標準実験で設定した 100%の方が、感度実験で設定した 500%よりも偏差が 0.05 以内に入る割合が多いことが示された。

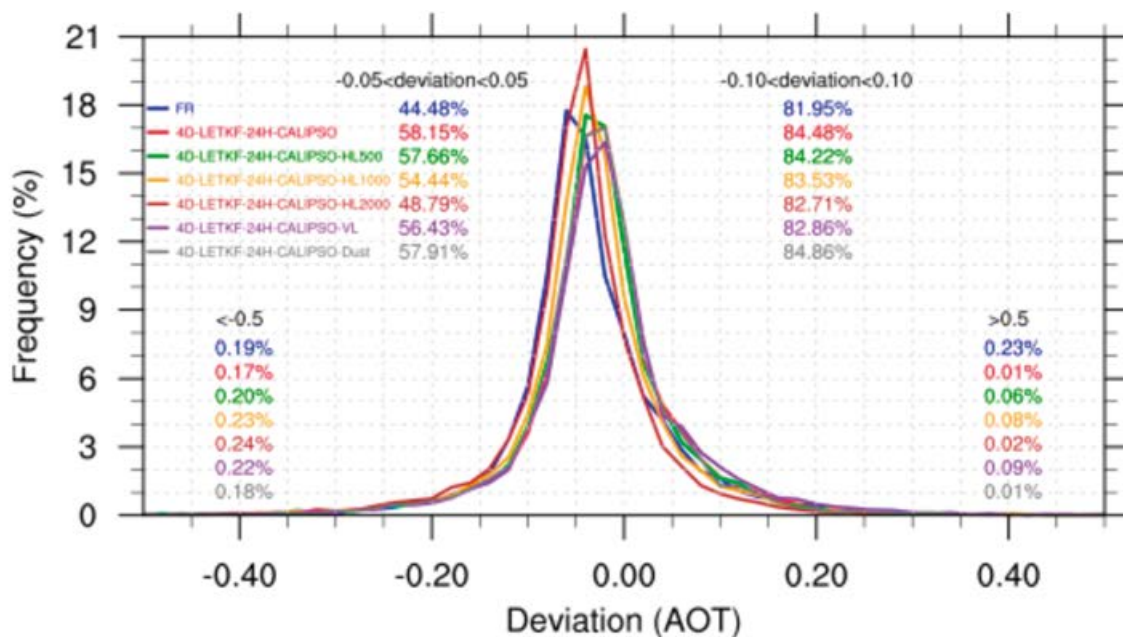


図 3. 同化に関連した変数の感度実験結果と独立した MODIS データとの AOT に関する頻度分布全球比較。色の違いは図中に記載した感度実験結果であり、詳細は表 2 に記載してある。図は Cheng et al. (2019) の図 16 から抜粋したものである。

参考文献

- Dai T., et al. (2014a) Improvement of aerosol optical properties modeling over Eastern Asia with MODIS AOD assimilation in a global non-hydrostatic icosahedral aerosol transport model. *Env. Pol.*, **195**, 319-329. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2014.06.021>
- Dai T., et al. (2014b) 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>
- Dai T., et al. (2019) Hourly aerosol assimilation of Himawari-8 AOT using the four-dimensional local ensemble transform Kalman filter. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, **11**, 680-711. <https://doi.org/10.1029/2018MS001475>
- Goto D., et al. (2015) Application of a global nonhydrostatic model with a stretched-grid system to regional aerosol simulations around Japan. *Geosc. Model Dev.*, **8**, 235-259. <https://doi.org/10.5194/gmd-8-235-2015>
- Hunt B. R., et al. (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., 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>
- Levy R. C., et al. (2013) The Collection 6 MODIS aerosol products over land and ocean. *Atmos. Mea. Tech.*, 6(11), 2989-3034. <https://doi.org/10.5194/amt-6-2989-2013>
- Satoh M., 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>
- van der Werf, G. R., et al. (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., et al. (2018) Common retrieval of aerosol properties for imaging satellite sensors. *J. Meteor. Soc. Japan*, 96B <https://doi.org/10.2151/jmsj.2018-039>

4. まとめ

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、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した。大気汚染物質輸送モデル NICAM-Chem と LETKF を組み合わせて、衛星から得られた 2 次元量である AOT を同化してきたが、今年度は 3 次元量である Cext の観測量も用いて、エアロゾルデータ同化を新たに試みた。その結果、Cext を同化することで、それぞれの領域におけるエアロゾル鉛直分布再現性が向上した。また、特に夜間の CALIOP による Cext と日中の MODIS の AOT とを組み合わせ、世界的にも珍しい同化によって、より高精度の結果が得られることが確かめられた。

5. 今後の研究展望

今年度は、MODIS と CALIOP の異なる衛星センサーのデータを用いたエアロゾルデータ同化手法を開発することができた。特にエアロゾル 3 次元量を同化できたことは、世界的にみても珍しい。今後は、エアロゾルだけではなく、大気汚染物質として重要な対流圏オゾンに関連した短寿命気体にも着目したい。また、これまではエアロゾル存在量に対するデータ同化手法を主に適用してきたが、今後はエアロゾルの発生量に関する逆推定にも着手して、大気汚染予測の高精度化に繋げられるツールの作成を継続して行っていきたい。

6. 研究成果発表

6.1 誌上発表（査読あり）

- Cheng Y., T. Dai, D. Goto, N.A.J. Schutgens, G. Shi, and T. Nakajima (2019) Investigating the assimilation of CALIPSO global aerosol vertical observations using Four-Dimensional Ensemble Kalman Filter. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 19, 13445-13467. <https://doi.org/10.5194/acp-19-13445-2019>
- Dai T., Y. Cheng, D. Goto, N.A.J. Schutgens, M. Kikuchi, M. Yoshida, G. Shi, and T. Nakajima (2019) Inverting the East Asian Dust Emission Fluxes Using the Ensemble Kalman Smoother and Himawari-8 AODs: A Case Study with WRF-Chem v3.5.1. *Atmosphere*, 10, 543. <https://doi.org/10.3390/atmos10090543>
- Goto, D., Y. Morino, T. Ohara, T. T. Sekiyama, J. Uchida, and T. Nakajima (2020) Application of linear minimum variance estimation to multi-model ensemble of atmospheric radioactive Cs-137 with observations. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 20, 3589-3607. <https://doi.org/10.5194/acp-20-3589-2020>
- Hotta H., K. Suzuki, D. Goto, and M. Lebsock (2020) Climate impact of cloud water inhomogeneity through microphysical processes in a global climate model. *Journal of Climate*, 33 (12): 5195–5212. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-19-0772.1>
- Jiang, Z., M. Duan, H. Che, W. Zhang, T. Nakajima, M. Hashimoto, B. Chen, and A. Yamazaki (2020) Intercomparison between the aerosol optical properties retrieved by different inversion methods from SKYNET sky radiometer observations over Qionghai and Yucheng in China. *Atmospheric Measurement Techniques*, 13, 1195-1212. <https://doi.org/10.5194/amt-13-1195-2020>

- Jing, X., K. Suzuki, and T. Michibata (2019) The key role of warm rain parameterization in determining the aerosol indirect effect in a global climate model. *Journal of Climate*, **32**, 4409-4430. <https://doi.org/10.1175/jcli-d-18-0789.1>
- Ma, R., H. Letu, K. Yang, T. Wang, C. Shi, J. Xu, J. Shi, C. Shi, and L. Chen (2020) Estimation of Surface Shortwave Radiation from Himawari-8 Satellite Data Based on a Combination of Radiative Transfer and Deep Neural Network, *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, **58(8)**, 5304-5316. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2019.2963262>
- Michibata T., K. Suzuki, T. Ogura, and X. Jing (2019) Incorporation of inline warm rain diagnostics into the COSP2 satellite simulator for process-oriented model evaluation. *Geoscientific Model Development*, **12**, 4297-4307. <https://doi.org/10.5194/gmd-12-4297-2019>
- Michibata T., K. Suzuki, M. Sekiguchi, and T. Takemura (2019) Prognostic precipitation in the MIROC6-SPRINTARS GCM: Description and evaluation against satellite observations. *Journal of Advances in Modeling Earth System.*, **11**, 839-860. <https://doi.org/10.1029/2018MS001596>
- Michibata, T., and K. Suzuki (2020) Reconciling compensating errors between precipitation constraints and the energy budget in a climate model. *Geophys. Res. Lett.*, **47(12)**. <https://doi.org/10.1029/2020GL088340>
- Peng, Z., H. Letu, T. Wang, C. Shi, C. Zhao, G. Tana, N. Zhao, T. Dai, R. Tang, and H. Shang (2019) Estimation of shortwave solar radiation using the artificial neural network from Himawari-8 satellite imagery over China. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, **240** 106672. <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2019.106672>

6.2 誌上発表（査読なし）

該当なし。

6.3 口頭発表

- Goto D., (2019) Global aerosol simulations with a cloud-system resolving model. *8th International EarthCARE science workshop*, Fukuoka, Japan.
- Goto D., S. Sugata, T. Dai, Y. Cheng, and T. Nakajima (2019) Application of a multi-model ensemble method for PM_{2.5} estimation. *16th Annual Meeting: Asia Oceania Geosciences Society (AOGS)*, Singapore, Singapore.
- Hashimoto, M., S. Chong, M. Yoshida, M. Kikuchi, T. M. Nagao, and T. Nakajima (2019) Monitoring of Air Pollution From Space by GOSAT, GOSAT-2 and Himawari-8. *LCLUC SARI 2019*, Johor Bahru, Malaysia.
- Hashimoto, M., H. Takenaka, S. Chong and T. Nakajima (2019) GOSAT-2/TANSO-CAI-2 Aerosol properties by Multiple wavelengths and pixels method. *AGU Fall Meeting 2019*, San Francisco, USA.
- Hashimoto, M., H. Takenaka, A. Higurashi and T. Nakajima (2019) GOSAT-2/TANSO-CAI-2 and the aerosol product. *IWGGMS*, Sapporo, Japan.
- Hashimoto, M., H. Takenaka, T. Nakajima and A. Higurashi (2019) Aerosol retrieval and PM_{2.5} from space using GOSAT/TANSO-CAI. *Japan Geoscience Union Meeting*, Chiba, Japan.
- Hotta H., K. Suzuki, D. Goto, and M. Lebsock (2019) A modeling study on climate impact of cloud water horizontal inhomogeneity. *American Geophysical Society (AGU) Fall meeting*. San Francisco, USA.
- Shi C., M. Hashimoto, M. Yoshida, and T. Nakajima (2019) Remote sensing of aerosols based on the optimal estimation approach. *2019 ISPRS Workshop on Remote Sensing and Synergic Analysis on Atmospheric Environment*, Nanjing, China.
- Shi C., M. Hashimoto, H. Takenaka, and T. Nakajima (2019) Retrieval of Aerosol Optical Properties Using GOSAT/ TANSO-CAI and GOSAT2/TANSO-CAI2. *The 15th International Workshop on Greenhouse Gas Measurements from Space (IWGGMS-15)*, Hokkaido, Japan.
- Shi C., T. Nakajima, M. Hashimoto, and H. Takenaka (2019) Remote sensing of aerosol optical properties and water-leaving radiance based on the optimal estimation approach. *Japan Geoscience Union Meeting*, Chiba, Japan.
- Shi C., T. Nakajima, M. Hashimoto, and H. Takenaka (2019) Simultaneous retrieval of aerosol optical properties and ocean color based on the optimal estimation approach. *European Geosciences Union*, Vienna, Austria.
- 五藤大輔 (2019) 全球高解像度エアロゾルシミュレーションを対象としたモデル解像度の影響評価. *日本気象学会 2019 年度秋季大会*, 福岡県福岡市.
- 菅田誠治 (2019) 大気汚染予測システム VENUS の現状と課題. *第 60 回大気環境学会年会市民集会. 市民集会要旨集「大気環境データの国民への即時提供-観測と予測-」*, 6-9.
- 橋本真喜子, 石 崇, 竹中栄晶, 中島映至 (2019) GOSAT-2/TANSO-CAI2 エアロゾル特性プロダクトと 導出アルゴリズムを考慮した誤差解析と地上観測との比較. *日本気象学会 2019 年度秋季大会*, 福岡県福岡市.

堀田陽香, 鈴木健太郎, 五藤大輔 (2019) 雲水量の水平不均質性をもたらす気候影響についてのモデリング研究. 日本気象学会 2019 年度春季大会. 東京.

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研究センター
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, Center for Regional Environmental Research, National Institute for Environmental Studies

Project members:
Seiji Sugata, Center for Regional Environmental Research, National Institute for Environmental Studies
Tie Dai and 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
Kentaro Suzuki and Haruka Hotta, Atmosphere and Ocean Research Institute, University of Tokyo
Makiko Hashimoto and Chong Shi, Earth Observation Research Center, Japan Aerospace Exploration Agency

Abstract:
Air pollution is the key to environmental and climate issues. To more accurately forecast its spatio-temporal distribution, a data assimilation technique for air pollution using measurements is required. The purpose of this project is to develop data assimilation into an air pollution transport model (NICAM-Chem) as the next-generation system of the atmospheric forecasting 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). However, since AOT is a 2-dimensional product, it is difficult to improve the 3-dimensional aerosol distribution in NICAM-Chem. Therefore, in this study, a new 3-dimensional aerosol extinction coefficient (C_{ext}) was applied to the assimilation system of the global NICAM-Chem. The measurements were obtained from MODIS/TERRA-retrieved AOT and CALIPSO-retrieved C_{ext} . As a result, the data assimilation technique using C_{ext} improved the vertical profile of the simulated aerosol. In addition, a combined assimilation technique of CALIPSO-retrieved C_{ext} during the night and MODIS-retrieved AOT during daytime resulted in a better performance. This demonstrates the new successful assimilation of aerosols using multiple products from multiple satellites, suggesting that the simulated aerosols in the forecast system are more accurate.

Keywords:
air pollution, forecast of air pollutions

研究課題名：

大陸から都市スケールでの大気質予測システムの開発と雲・エアロゾル相互作用研究

実施年度：

平成 31 年度～令和元年度

課題代表者：理化学研究所計算科学研究センター 八代 尚
(令和元年 7 月より国立環境研究所地球環境研究センター)

共同研究者：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：

本年度より新たに開始された本研究課題は、メソスケールから都市 LES スケールまでの空間解像度をカバーするエアロゾル・大気汚染物質予測システムを開発し、都市とそれを取り巻く地域の気象と大気環境を統合的に扱うための研究プラットフォームを構築することを目的とする。領域気象・気候モデル SCALE-RM と局所アンサンブル変換カルマンフィルタ LETKF を組み合わせたデータ同化システムを用いて、数日スケールでの現実的な気象場を高い空間解像度で再現し、大気汚染物質の輸送の再現性を向上することを目指す。本年度行った SCALE-LETKF データ同化システムのテストランでは、7 時間遅れで 72 時間先までの予報結果を計算する上での計算性能面での検討を進めた。領域化学輸送モデルとしての開発は順調に進行し、福島原発事故に伴い放出された放射性セシウムのシミュレーション、および過去に近畿地方で行われたエアロゾル集中観測時の再現シミュレーションにおいて、期待される再現性能を示すことを確認した。

キーワード：

領域シミュレーション、都市シミュレーション、エアロゾル、大気汚染物質、データ同化

研究課題名：

大陸から都市スケールでの大気質予測システムの開発と雲・エアロゾル相互作用研究

実施年度：

平成 31 年度～令和元年度

課題代表者：理化学研究所計算科学研究センター 八代 尚
(令和元年 7 月より国立環境研究所地球環境研究センター)

共同研究者：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

本研究は、メソスケールから都市 LES スケールまでの空間解像度をカバーするエアロゾル・大気汚染物質予測システムを開発し、都市とそれを取り巻く地域の気象と大気環境を統合的に扱うための研究プラットフォームを構築することを目的とする。さらにこの予測システムを用いて、数百メートルから数十メートルの空間スケールでのエアロゾル・大気汚染物質と雲微物理、対流活動、また都市との相互作用に関する研究を推進する。

キーワード：

領域シミュレーション、都市シミュレーション、エアロゾル、大気汚染物質、データ同化

2. スーパーコンピュータ利用実績

2.1 計算機利用時間 (2019 年 4 月 1 日～11 月 30 日)

CPU 時間	v_deb	(デバック用)	: 0.00 hours
	v_32cpu	(最大 32CPU コア)	: 0.00 hours
	v_96cpu	(最大 96CPU コア)	: 0.00 hours
	v_160cpu	(最大 160CPU コア)	: 0.00 hours
	計		: 0.00 hours

2.2 利用概要

本研究課題では、領域気象・気候モデル SCALE-RM とアンサンブルデータ同化システム LETKF を用いている。SCALE-RM の流体力学コア部分は完全圧縮流体方程式系を有限体積法のもとに離散化し、大気の水平方向には陽解法、鉛直方向には陰解法を用いている。加えて、雲微物理、大気放射、境界層乱流、地表面過程等の諸物理過程を解いている。大気の水平方向にプロセス分割を行い、MPI 通信を用いたメモリ分散型の並列計算を行っている。LETKF の主要計算部分は主に行列積と固有値分解であり、大気モデルから受け取った格子点データをプロセス分割して受け持ち、それぞれの点に対して独立したシングルプロセスでの計算を並列に行っている。

3. 研究結果

3.1 概要

本年度より新たに開始された本研究課題は、メソスケールから都市 LES スケールまでの空間解像度をカバーするエアロゾル・大気汚染物質予測システムを開発し、都市とそれを取り巻く地域の気象と大気環境を統合的に扱うための研究プラットフォームを構築することを目的とする。領域気象・気候モデル SCALE-RM と局所アンサンブル変換カルマンフィルタ LETKF を組み合わせたデータ同化システムを用いて、数日スケールでの現実的な気象場を高い空間解像度で再現し、大気汚染物質の輸送の再現性を向上することを目指す。本年度行った SCALE-LETKF データ同化システムのテストランでは、7時間遅れで72時間先までの予報結果を計算する上での計算性能面での検討を進めた。領域化学輸送モデルとしての開発は順調に進行し、福島原発事故に伴い放出された放射性セシウムのシミュレーション、および過去に近畿地方で行われたエアロゾル集中観測時の再現シミュレーションにおいて、期待される再現性能を示すことを確認した。

3.2 背景と目的

多くの人間の生活基盤である都市域において、詳細かつ精度の高い気象予測・大気環境予測を行うことは重要な課題の一つである。近年のスーパーコンピュータの計算性能の向上により、大陸スケールの越境大気汚染、メソスケールの気象現象、そして都市気象・都市大気環境を統合的に扱うことができるだけのコンピュータリソースが揃いつつあるが、シミュレーションモデル側では先進的な研究を行えるだけの十分なソフトウェア基盤が整っているとはいえない。そこで、本研究では国内外の研究者が利用可能な研究プラットフォームとして、エアロゾル・大気汚染物質予測システムを開発し、その性能を検証する。大気モデルには理化学研究所が主体となって開発された領域気象・気候モデル SCALE-RM(Nishizawa et al.,2015; Sato et al.,2015a; <http://scale.rccs.riken.jp/>)を用い、大気化学モデルコンポーネントには気象庁気象研究所が開発を進める NHM-Chem (Kajino et al., 2019) を用いた。大気汚染物質の予測精度を上げるために重要な大気初期場の作成には、局所アンサンブル変換カルマンフィルタ LETKF を用いたアンサンブルデータ同化システムを採用する。

3.3 大気質予測システムの開発

本年度は SCALE-LETKF データ同化システムのベクトル機への移植とテストランを実施した。Lien et al.(2016)による準リアルタイム予測システムをベースに、東アジアのエアロゾル放出源を広くカバーするよう実験設定を行った。図1にアンサンブルデータ同化を行う第1ドメイン(14km 解像度)と、同化結果からダウンスケール実験を行う第2・第3ドメイン(それぞれ3.5km, 0.9km)を示す。また、図2に実時間およびシミュレーション内の時間での実行フローを示す。第1ドメインの側面境界はNCEPが公開するGFSの予報値またはNICAMのシミュレーション結果によって与えることが可能である。ラジオゾンデや地上観測等での気象観測データはNCEPが公開するPREPBUFRを用いる。ターゲットとする時刻からおよそ7時間遅れて観測データと外部境界条件を取得し、データ同化と予測シミュレーションを実行し、実行完了の時点で72時間先までの予測結果が得られることを目標とする。予測システムの中で最も計算負荷が大きい部分はダウンスケール実験であり、この部分の計算性能についてNIESスーパーコンピュータ(NEC SX-ACE)を用いて評価を行った結果を図3に示す。3つのドメインはそれぞれ格子数、時間ステップ数が異なり、別々のプロセスで並行して実行される。現状の性能では1時間のシミュレーションに対して実時間で2時間弱かかっており、ベクトル機への性能最適化が不十分である。今後さらなる最適化を進め、また計算量のインバランスを平滑化し計算時間が最短になるよう、プロセス数の組み合わせを改善する必要がある。

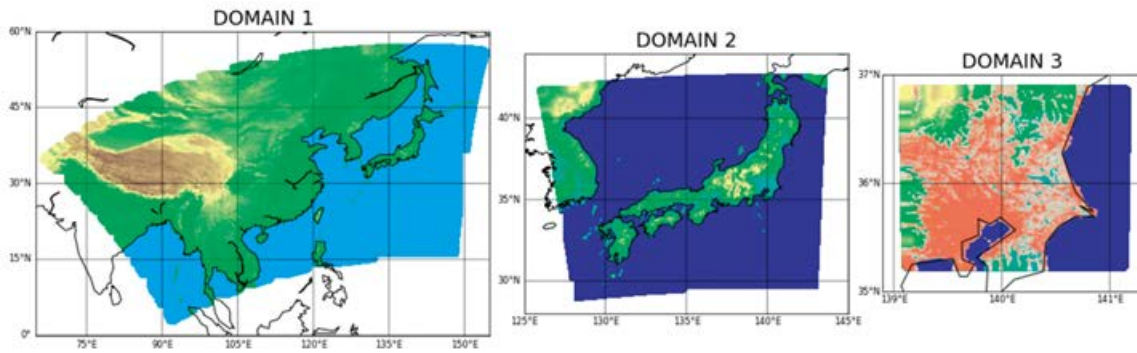


図 1. 大気質予測システムのドメイン設定。ドメイン3は実験設定に応じて関東圏あるいは近畿圏に設定する。また、ドメイン3で都市域と判定している地域を赤く表示している。

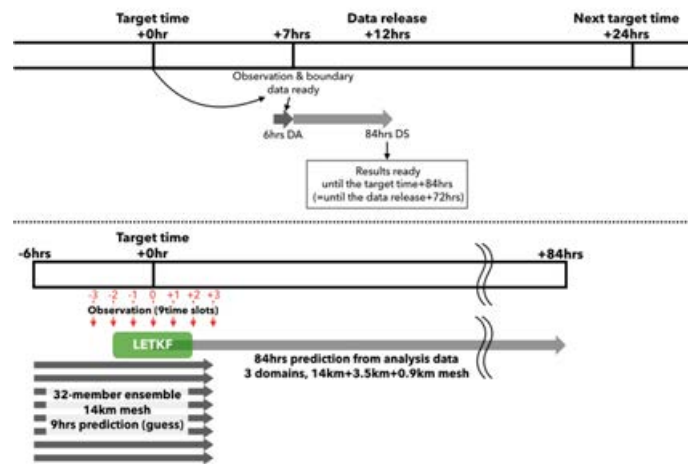


図 2. (上)実時間におけるデータ取得とシミュレーション実行の時間フロー。(下)シミュレーション内での時間フロー。

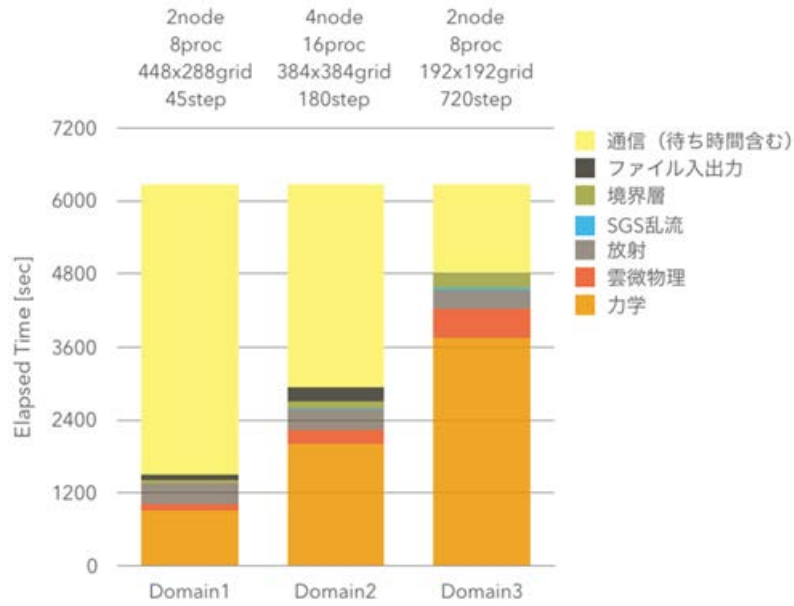


図 3. NEC SX-ACE 上で計算されたダウンスケール実験 (1 時間積分) の経過時間。左からそれぞれドメイン 1、ドメイン 2、ドメイン 3 の結果を示し、それぞれのドメインは格子数、タイムステップ数、利用プロセス数が異なる。

上記と並行して、気象モデル SCALE と、オフライン版領域気象化学モデル NHM-Chem とのインターフェースを開発し、領域化学輸送モデル SCALE-Chem を新たに構築した。モデルの妥当性を評価するために、福島原発事故に伴い放出された放射性セシウムの輸送・沈着計算のマルチモデル比較実験 (Sato et al., 2018) の追実験を行い、SCALE-Chem の妥当性を確認した。さらに Sato et al. (2018) に続く、福島原発事故に伴い放出された放射性セシウムに関する第 3 次モデル間比較プロジェクトのための計算 (解像度 1 km) を SCALE-Chem を用いて行い、計算結果をモデル間比較の事務局に提出した。

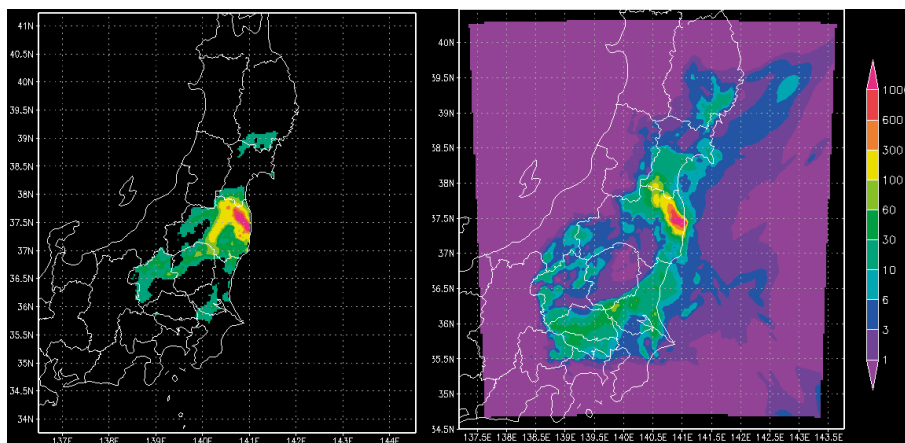


図 4. (a) 航空機による福島原発事故由来 ^{137}Cs の総沈着量の観測値 (モデル格子に内挿した結果)。(b) 2011 年 3 月の ^{137}Cs 積算沈着量の計算値。いずれも単位は $[\text{kBq}/\text{m}^2]$ 。

3.4 観測キャンペーンとの比較結果

次に ^{137}Cs 以外の対流圏の主要微量気体やエアロゾル成分の再現実験として、近畿地方を対象とした数値実験を行なった。アメリカ航空宇宙局 (NASA) の Aerosol Robotics Network (AERONET) は Distributed Regional Aerosol Gridded Observation Networks (DRAGON) という放射計を密に設置し領域スケールでのエアロゾルを観測する集中観測を世界中で実施している。2012 年春季に実施された DRAGON-Osaka では、大阪を中心に都市域でのエアロゾル動態を調査するために複数の放射計を密に設置した集中観測が行われた。集中観測期間には都市汚染だけではなく、越境汚染とみられる高濃度も測定された。近畿大学大気環境モニタリングサイトでは、AERONET 放射計の他に、PM (PM_{2.5}、PM₁₀/TSP、OBC) 連続計測器、ライダーによる観測を実施している。2012 年 3 月 11 日は、越境汚染とみられる PM_{2.5} 濃度の上昇が観測された。このような都市スケールでの大気汚染の状況について、領域化学輸送モデル SCALE-Chem によるシミュレーションを行い、観測データとの比較を行った。

2012 年 3 月 11 日の事例では、近畿大学大気環境モニタリングサイトで測定している PM_{2.5} 濃度は夕方 17 時頃にピークに達した。SCALE-Chem によるシミュレーションでは、観測より少し早くエアロゾル濃度がピークを迎えたが、エアロゾルが輸送されてくる様子などを概ね再現することができた。

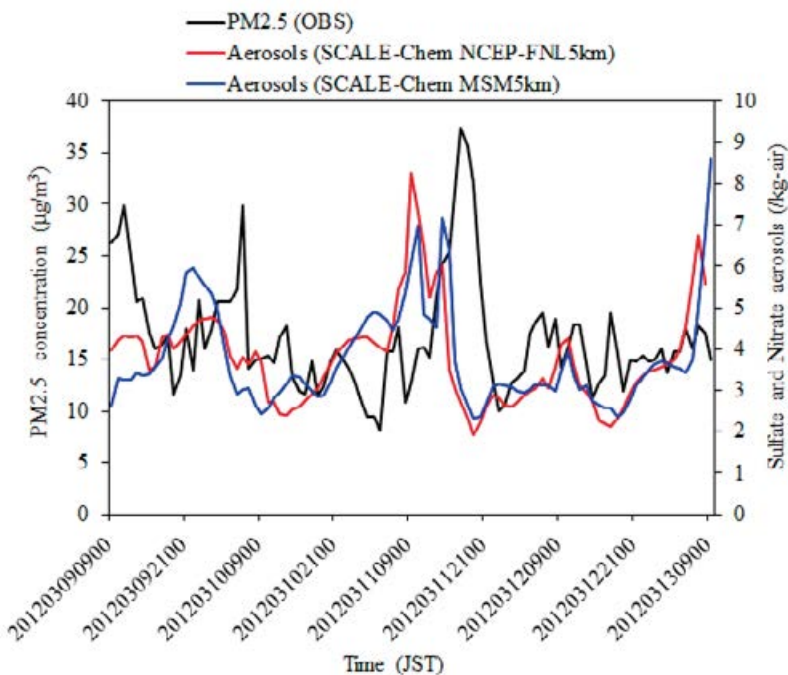


図 5. 大阪で観測された 2012 年 3 月 9 日～11 日の PM_{2.5} 濃度 (黒線) と SCALE-Chem の硫酸塩エアロゾル濃度と硝酸塩エアロゾル濃度の合計値 (赤線 : NCEP-FNL 使用、青線 : MSM 使用、モデルの解像度は 5 km)

参考文献

- Dai T., et al. (2014a) Improvement of aerosol optical properties modeling over Eastern Asia with MODIS AOD assimilation in a global non-hydrostatic icosahedral aerosol transport model. *Env. Pol.*, **195**, 319-329. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2014.06.021>
- Nishizawa, S. et al. (2015) Influence of grid aspect ratio on planetary boundary layer turbulence in large-eddy simulations. *Geosci. Model Dev.*, **8**, 3393-3419. <https://doi.org/10.5194/gmd-8-3393-2015>
- Sato, Y. et al. (2015) Impacts of cloud microphysics on trade wind cumulus: which cloud microphysics processes contribute to the diversity in a large eddy simulation ?. *Prog. Earth Planet. Sci.*, **2**, 23, <https://doi.org/10.1186/s40645-015-0053-6>
- Lien, G.-Y. et al. (2017) The Near-Real-Time SCALE-LETKF System: A Case of the September 2015 Kanto-Tohoku Heavy Rainfall. *SOLA*, **13**, 1-6. <https://doi.org/10.2151/sola.2017-001>
- Kajino, M. et al. (2019) NHM-Chem, the Japan Meteorological Agency's Regional Meteorology – Chemistry Model: Model Evaluations toward the Consistent Predictions of the Chemical, Physical, and Optical Properties of Aerosols. *J. Meteor. Soc. Japan*, **97**(2), 337-374. <https://doi.org/10.2151/jmsj.2019-020>
- Sato, Y. et al. (2018) Model intercomparison of atmospheric ¹³⁷Cs from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident: Simulations based on identical input data. *J. Geophys. Res.*, **123**, 11,748-11,765. <https://doi.org/10.1029/2018JD029144>

4. まとめ

本年度は、データ同化システムの移植と最適化、SCALE-Chem の開発に注力した。特に領域大気化学シミュレーションはモデル間比較プロジェクトのプロトコルに沿った結果比較や、エアロゾル地上観測との比較が進められ、十分なシミュレーション性能を発揮することが示された。SCALE-Chem とそれを用いるデータ同化システム、予測システムは、使いやすく高性能な領域大気環境研究のためのソフトウェアとして着実に進展している。

5. 今後の研究展望

大気微量成分の再現性に着目したデータ同化システム、予測システムの検証と改善を引き続き行う。また、新たなエアロゾル観測キャンペーンである DRAGON/J-ALPS の期間を対象とした再現実験を複数行い、観測との比較を通してモデルの精度を高め、領域から都市スケールでのモデル評価と現象解析を進めていく。加えて、まだ着手していない都市モデルの精緻化について開発を進める。

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

佐藤陽祐, 関山 剛, Sheng Fang, 梶野瑞王, Arnaud Quéré, Denis Quélo, 近藤裕昭, 寺田宏明, 門脇正尚, 滝川雅之, 森野 悠, 打田純也, 五藤大輔, 山澤弘実 (2020) 福島第1原子力発電所起源の¹³⁷Csを対象とした第3次モデル間比較プロジェクト, 日本気象学会2020年春季大会, B412.

M. Nakata, M. Kajino, Y. Sato, H. Yashiro, I. Sano, and S. Mukai (2020) Development of SCALE-Chem and its application for regional simulation targeting on urban area and mountain area of Japan, *JpGU Annual Meeting 2020*, AAS11-P08.

6.4 その他（書籍等）

なし。

7. 連絡先

八代 尚

〒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 地球環境研究センター

Tel: 029-850-2108

E-mail: yashiro.hisashi@nies.go.jp

Project name:
Development of a continent- to urban-scale air quality prediction system and studies on aerosol-cloud interactions

April 2019—March 2020

Project leader:
Hisashi Yashiro, RIKEN Center for Computational Science
(from July 2020, Center for Global Environmental Research, National Institute for Environmental Studies)

Project members:
Yosuke Sato, Hokkaido University
Makiko Nakata, Kindai University
Mizuo Kajino, Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency
Masayuki Hara, Center for Environmental Science in Saitama

Abstract:

This study aims to develop a new air quality prediction system which covers systems from meso scale to urban scale. The system will be used as a research platform for the weather and atmospheric environment around urban regions. A state-of-the-art data assimilation system is constructed by using the regional atmospheric model SCALE-RM and local ensemble transform Kalman filter (LETKF). In this FY, we evaluated the computational performance of the SCALE-LETKF. We also developed SCALE-Chem, which is a coupled system between the SCALE-RM and NHM-Chem. The SCALE-Chem showed a fairly good performance result in the model inter-comparison of atmospheric ^{137}Cs from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident. The simulation results of the model also showed good agreement with the ground observations of the aerosol around the Osaka region.

Keywords:
regional-scale simulation, urban-scale simulation, aerosol, air pollutant, data assimilation

Project name:
Numerical study on cloud systems using NICAM

April 2019 – March 2020

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 joined the international intercomparison project of global cloud-resolving models. We intercompared the cloud properties of global cloud-resolving simulations over the Atlantic Ocean. We found that the domain-averaged Outgoing Longwave Radiation (OLR) was similar in each model, but the vertical profiles of cloud fractions were different. We evaluated the cloud fraction of NICAM using a Joint simulator and satellite observations like CloudSat and a Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observation (CALIPSO) lidar.

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

Project name:
Numerical study on cloud systems using NICAM

April 2019 – March 2020

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

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

2. Record of supercomputer use

2.1 Devoted computing time (April 1- Novmember 30, 2019)

CPU hours	v_deb	(Debug)	: 0.00 hours
	v_32cpu	(max.32CPU cores)	: 0.00 hours
	v_96cpu	(max.96CPU cores)	: 0.00 hours
	v_160cpu	(max.160CPU cores)	: 0.00 hours
		Total	: 0.00 hours

2.2 Details of supercomputer usage

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

3. Research progress and results

3.1 Outline

In this fiscal year, we joined the DYnamics of the Atmospheric general circulation Modeled On Non-hydrostatic Domains (DYAMOND, Stevens, et al., 2019) project. We intercompared the cloud properties of global cloud-resolving simulations in the DYAMOND project over the Atlantic Ocean. We found that the domain-averaged Outgoing Longwave Radiation (OLR) was similar in each model, but the vertical profiles of cloud fractions were different. We evaluated the cloud fraction of NICAM using a Joint simulator and satellite observations like CloudSat and a Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observation (CALIPSO) lidar.

3.2 Research background and purpose

Global cloud system resolving models (GCSRMs) such as the Nonhydrostatic ICosahedral Atmospheric Model (NICAM, Satoh, et al., 2014) are widely used for understanding cloud systems and projections of future climate. These models have cooperated with satellite missions to test retrieval data and data assimilation before the launch of a satellite.

These models have uncertainties derived from their cloud microphysics schemes. Recently, various methods have been proposed to evaluate and improve the cloud microphysics schemes of GCSRMs using satellite data. GCSRMs and retrieval algorithms have different assumptions of microphysical properties such as the size distributions of hydrometeors. One method to avoid uncertainties resulting from this difference in assumptions is radiance-based evaluation using a satellite simulator, because it uses the same setting of microphysical properties as GCSRMs (Masunaga et al., 2010; Hashino et al., 2013; Matsui et al., 2014).

In the previous fiscal year, we evaluated two microphysics of super-cooled water clouds in NICAM over the Southern Ocean as a single-moment scheme using a Joint simulator (the NICAM Single-moment Water 6-categories, Tomita, 2008b; Roh and Satoh, 2014, hereafter NSW6) and a double-moment scheme (the NICAM Double-moment scheme of 6-Water categories, Seiki and Nakajima, 2014, hereafter NDW6). We found good agreements of super-cooled water clouds near the boundary layer by NDW6. We investigated the reason for the better performance of super-cooled water clouds in NDW6 compared with NSW6 and improved the NSW6 using the NDW6 results.

Recently, many GCSRMs such as NICAM have been developed and used for simulations with a few kilometers' horizontal resolution. It is important to intercompare GCSRM simulations and investigate the characteristics of clouds and precipitation. The first intercomparison project for GCSRMs was the DYnamics of the Atmospheric general circulation Modeled On Non-hydrostatic Domains (DYAMOND, Stevens et al., 2019). According to Stevens et al., 2019, the intercomparison of GCSRMs gives shape expectations and guides future developments by understanding cloud microphysical processes and representations of turbulent mixing.

In this fiscal year, we investigated DYAMOND data for cloud properties using satellite observations over the Atlantic. There are three typical cloud types: shallow cumulus, cumulonimbus, and congestus (e.g. Johnson et al., 1999). In this report, we investigate the vertical cloud structures over the Atlantic using DYAMOND data. The purpose of this study was an intercomparison of GCSRMs and an understanding of the characteristics of NICAM for the performance of tropical cloud simulations. We try to discuss the possibility of evaluations using a Joint simulator and satellite data.

3.3 Data and methodology

The DYAMOND data were initialized on 1st Aug. 2016 with the same ECMWF 9 km reanalysis data. The total integration time was 40 days. Nine models participated in this project: the global non-hydrostatic model of the Météo-France (ARPEGE-NH, Bubnova et al., 1995), the GFDL Finite Volume Cubed-Sphere Dynamical Core (FV3, Lin, 2004), the Goddard Earth Observing System (GEOS, Putman and Lin, 2007), a non-hydrostatic model discretized over an icosahedral (ICON, Zangl et al., 2015), the ECMWF Integrated Forecasting System (IFS, Wedi, 2014), the Model for Prediction Across Scales (MPAS, Skamarock et al., 2012), a Non-hydrostatic ICosahedral Atmospheric Model (NICAM, Satoh et al., 2014), the System for Atmospheric Modeling (SAM, Khairoutdinov and Randall, 2003), and the Unified Model (UM, Wood et al., 2013).

Four models did not use cumulus parameterization (ARPEGE-NH, ICON, NICAM, and SAM) and the other models used the shallow or full parametrization for clouds. The simulations except for the UM simulation were done with less than 5 km horizontal resolution. The NICAM, IFS, and ICON simulations were done with coarser resolutions for the sensitivity experiments.

We used daily OLR data from the Clouds and the Earth's Radiant Energy System (CERES; Wielicki et al., 1996) with one-degree spacing. We used the merged CloudSat/CALIPSO data (DarDar data, Delanoë and Hogan, 2010). The 94 GHz radar reflectivity, 532 nm total attenuated backscatters, and simplified cloud mask (Delanoë and Hogan, 2010) were used as observation data in the DarDar data.

We focused on the domain over the Atlantic with 30°W – 50°W and 0°N – 20°N and the data on the 11th Aug. 2016.

We evaluated the cloud fractions of NICAM using CloudSat and CALIPSO signals using a Joint simulator and will discuss the findings in the discussion section. The sensor simulator used was the EarthCARE Active Sensor Simulator (EASE, Okamoto et al., 2007, 2008; Nishizawa et al., 2008).

3.4 Results

Figure 3.1 shows the horizontal distributions of daily OLR on the 11th Aug. 2016 for the CERES observation and the NICAM, IFS, ICON, and GEOS models. The CERES data show a convective band near the equator and a large convective system over the American continent (60° W–80° W). The four models reproduced similar large-scale cloud systems like a convective band over the tropical ocean and a larger convective systems over the American continent. The CERES observation data with daily OLR data and with a horizontal resolution of one degree is useful for understanding the large scales of cloud distributions. However, the CERES data have limitations for small scales of cloud systems and the lifetime of mesoscale convective systems. It is necessary to use merged 11 mm brightness temperatures which have smaller horizontal resolutions than 5 km and 30 min temporal resolution. A satellite simulator is needed for the evaluation using 11 mm brightness temperatures instead of OLR.

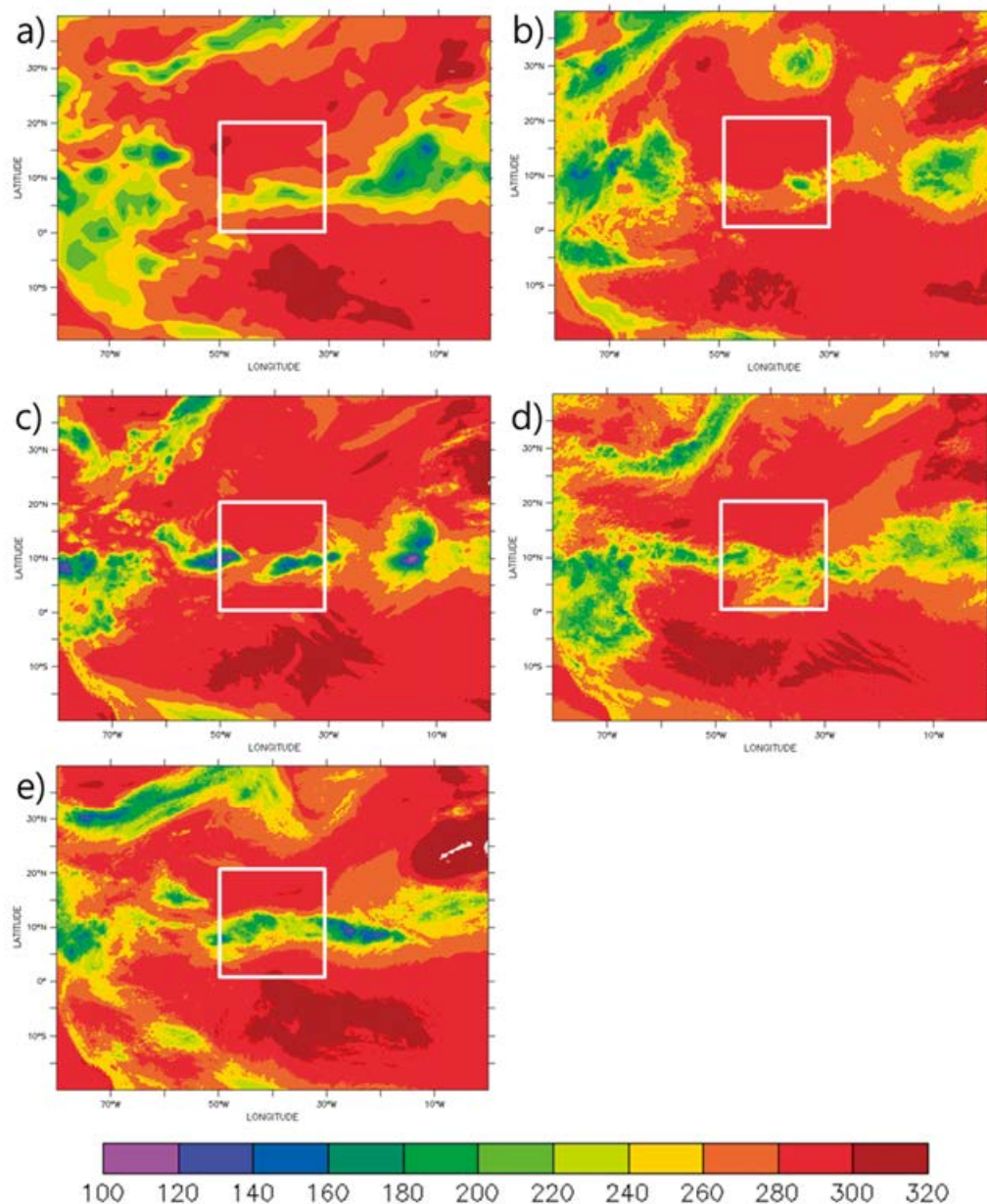


Fig. 3.1 The horizontal distributions of daily OLR in CERES (a), NICAM (b), IFS (c), ICON (d), and GEOS (e) in 11th Aug. 2016. The unit of contour is $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$. The white box is the analysis domain.

Figure 3.2 shows the vertical profiles of the domain-averaged mixing ratios of cloud water and cloud ice at 00 UTC on the 11th Aug, 2016. All simulations reproduced the triple modes of cloud systems, i.e., shallow, congestus, and deep clouds. The distribution of cloud water describes shallow and congestus clouds. The peaks of cloud water amount in shallow clouds are between 1.5 and 2 km altitudes in the DYAMOND data. The peaks of cloud water amount in congestus vary from 4 km to 7 km altitudes. It means the dynamics of congestus are different in the simulations. IFS reproduced the highest peak of the cloud water amount better than the other models. Most of the models reproduced the 5 km altitude of congestus. The distribution of cloud ice shows a deep-cloud mode. NICAM shows a large amount of cloud ice near 14 km. SAM and GEOS reproduced a lower height for the maximum amount of cloud ice near 9 km. SAM and GEOS included the precipitation ices and rain in the cloud ice and the cloud water categories, which affected the increase of cloud water and cloud ice amount.

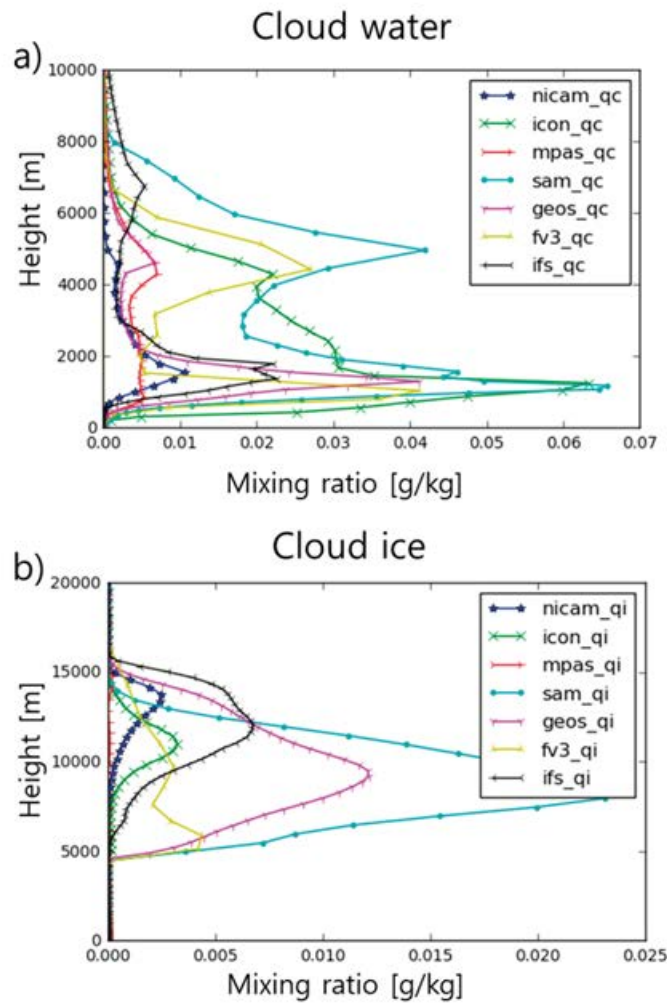


Fig. 3.2 Vertical profiles of domain-average mixing ratio of cloud water (a) and cloud ice (b) on 00UTC 11th Aug. 2016.

Figure 3.3 shows the vertical profiles of cloud fractions. The observation was based on the simplified cloud mask (Delanoë and Hogan, 2010) from the merged data from CALIPSO and CloudSat. In the simulations, we defined clouds with a mixing ratio of cloud water and cloud ice larger than 1 mg/kg-1. The observation shows the triple modes of clouds as vertical profiles of the domain-averaged mixing ratio. The shallow clouds are dominant compared to congestus and deep clouds. Although the simulations reproduced the three modes of clouds, the fraction is different in each model. For example, NICAM underestimated the shallow and deep clouds compared to the observation and the other models. ICON reproduced a higher fraction of shallow clouds than the observation and NICAM. IFS and SAM reproduced higher congestus clouds than the observation and the other models. It means that the distribution of the OLR is similar, but the vertical structure of cloud systems is different in each model.

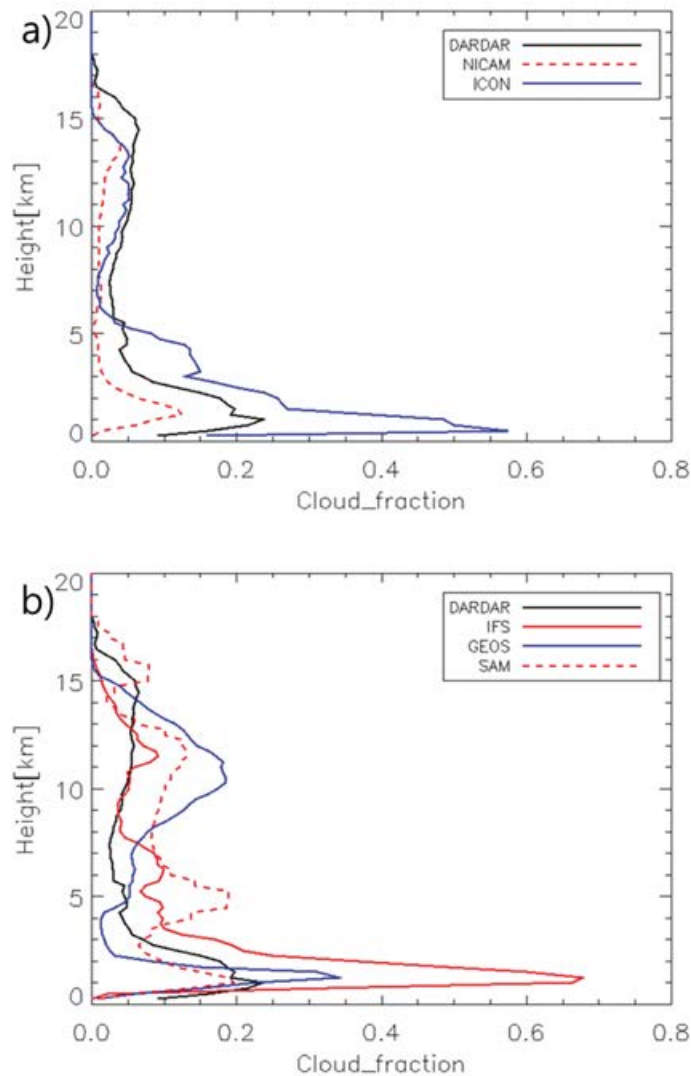


Fig. 3.3 Vertical profiles of the cloud fractions among DarDar, NICAM, and ICON (a), among DarDar, IFS, GEOS, and SAM (b) in 11th Aug. 2016.

The choice of the threshold of mixing ratio affects the cloud fraction (Fig. 3.4). We tested three different thresholds in NICAM. When we reduced the thresholds of the mixing ratio, the fraction of the high and shallow clouds increased. This means that the detection of clouds is important for the evaluation of the vertical structure of clouds.

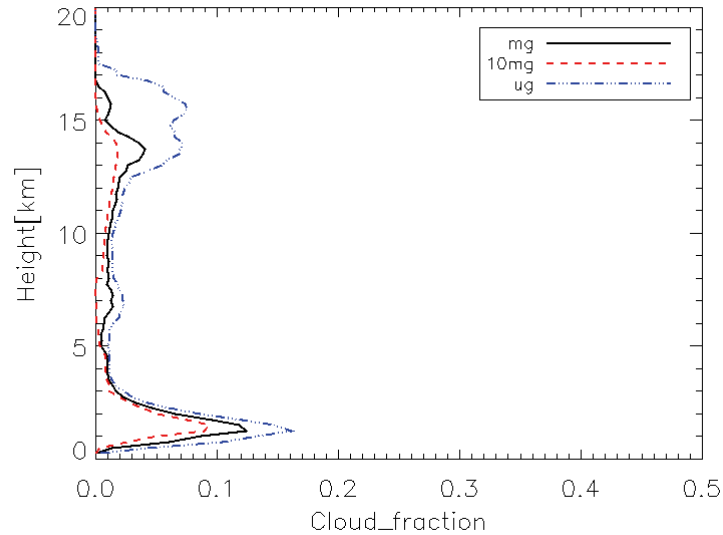


Fig. 3.4 Vertical profiles of cloud fraction in NICAM with different thresholds of clouds.

The variables of DYAMOND data are not enough to run the Joint simulator. The reason is the shortage of output data on hydrometeors. We ran tests only for NICAM. We used the merged brightness temperature and CALIPSO/CloudSat singles for the evaluation.

First, we compared the horizontal distribution of clouds using 11 mm brightness temperatures (Fig. 3.5). A convective band was shown in the observed brightness temperature, and NICAM also reproduced a convective band near the equator. Shallow clouds were found in the northern part of this analysis domain. The simulated 11 mm TBB showed an underestimation of clouds and a small size of high clouds compared with the observation. These results correspond to previous vertical profiles of cloud fractions like the underestimation of shallow and deep clouds.

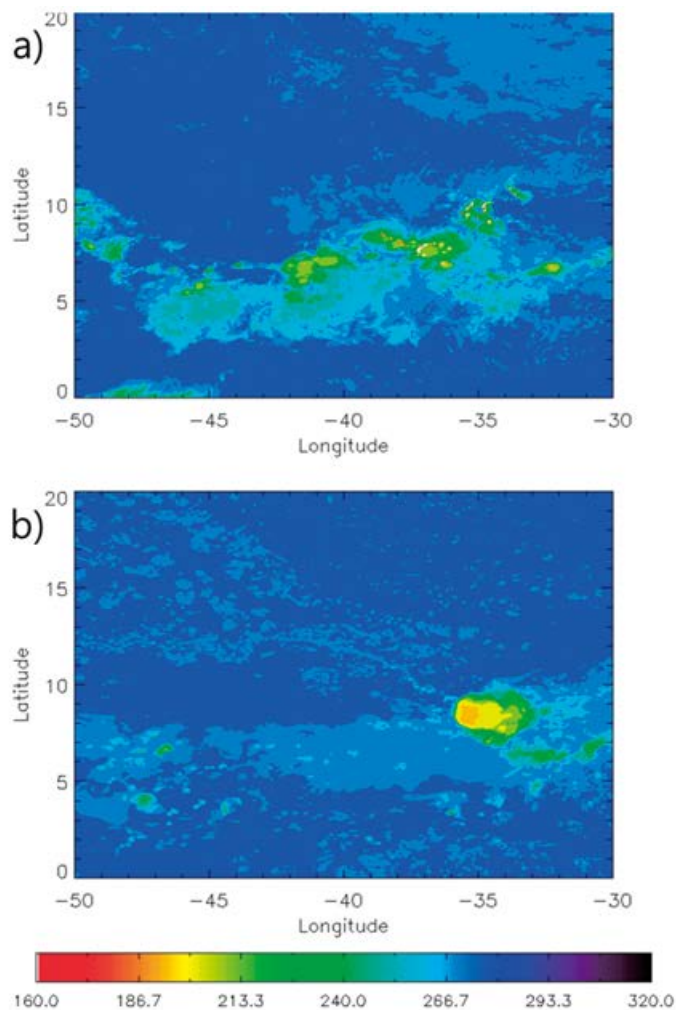


Fig. 3.5 Horizontal distributions of 11 μm brightness temperatures in the observation (a) and NICAM (b) on 00UTC 11th Aug. 2016.

We evaluated the vertical profiles of cloud fractions using CloudSat and CALIPSO (Fig. 3.6). We compared the cloud fraction between CloudSat and NICAM using the same threshold of radar reflectivity. We used the threshold of -25 dBZ for cloud detection by the cloud radar. The cloud radar is more sensitive to precipitating ice and rain than the lidar. The cloud fraction observed by the cloud radar was similar to the cloud fraction from the simplified cloud mask from CALIPSO and CloudSat. The fraction of CloudSat above 14 km was underestimated compared to the merged cloud mask of the DarDar data. The cloud fraction of NICAM showed similar patterns to previous analysis such as underestimation of high and low clouds compared to the observation. The observation shows surface clutters of observation. The cloud fraction of NICAM did not show any surface clutter for CloudSat.

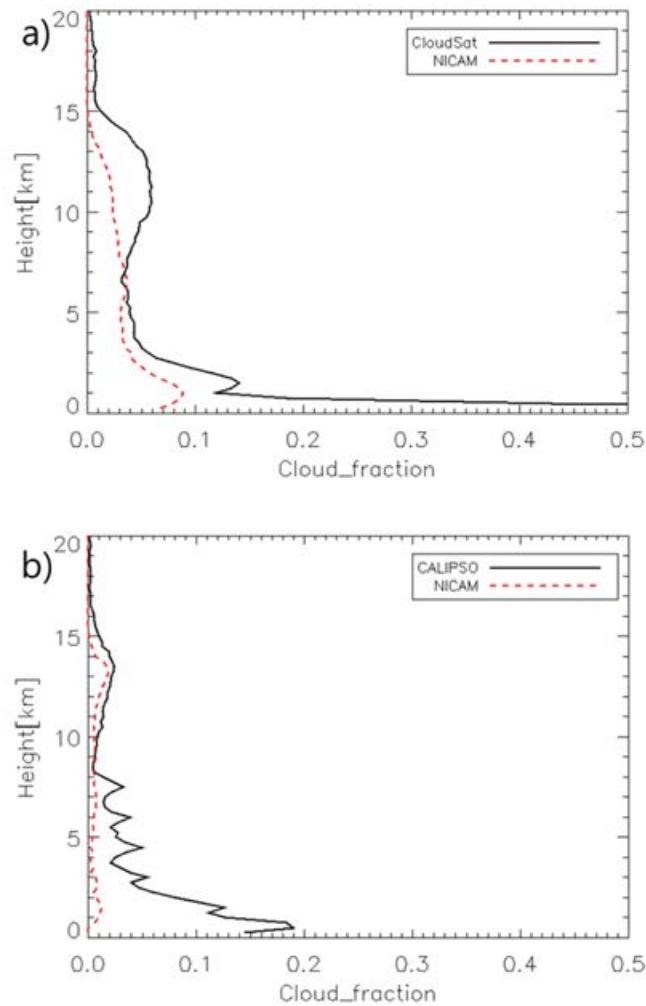


Fig. 3.6 Vertical profiles of cloud fraction by cloud radar (a) and lidar (b).

We compared the cloud fractions between CALIPSO and NICAM using the same threshold of the 532 nm total attenuated backscatter of lidar. We used the threshold of $5 \times 10^{-3} / \text{m}^{-1} / \text{sr}^{-1}$ for the cloud detection of the lidar. This threshold is a relatively large backscatter for clouds to detect optically thick ice clouds and water clouds. The observation of CALIPSO shows a high fraction of shallow clouds and congestus clouds with liquid phases of clouds. NICAM shows an underestimation of cloud fraction for shallow and congestus clouds by the lidar. It means an underestimation of backscatters compared to the observation. One reason is the underestimation of liquid water content because of a fast transition from cloud water to the rain category in NSW6. We think the evaluation using CALIPSO is one of the best tools to improve the autoconversion process from cloud water to rain in our microphysics scheme.

References

Bubnova, R., G. Hello, P. Benard, and J. F. Geleyn, (1995) Integration of the Fully Elastic Equations Cast in the Hydrostatic-Pressure Terrain-Following Coordinate in the Framework of the Arpege/Aladin Nwp System. *Mon Weather Rev*, **123**, 515-535. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1995\)123<0515:IOTFEE>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1995)123<0515:IOTFEE>2.0.CO;2)

- Delanoč, J., and R. J. Hogan (2010) Combined CloudSat-CALIPSO-MODIS retrievals of the properties of ice clouds. *J. Geophys. Res.*, **115**, D00H29. <https://doi.org/10.1029/2009JD012346>.
- 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>
- Johnson, R. H., T. M. Rickenbach, S. A. Rutledge, P. E. Ciesielski, and W. H. Schubert (1999) Trimodal characteristics of tropical convection. *J. Climate*, **12**, 2397-2418. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1999\)012<2397:TCOTC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1999)012<2397:TCOTC>2.0.CO;2)
- Khairoutdinov, M. F., and D. A. Randall (2003) Cloud resolving modeling of the ARM summer 1997 IOP: Model formulation, results, uncertainties, and sensitivities. *J Atmos Sci*, **60**, 607-625. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(2003\)060<0607:CRMOTA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(2003)060<0607:CRMOTA>2.0.CO;2)
- Lin, S. J. (2004) A "vertically Lagrangian" finite-volume dynamical core for global models. *Mon Weather Rev*, **132**, 2293-2307. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(2004\)132<2293:AVLFDC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(2004)132<2293:AVLFDC>2.0.CO;2)
- Masunaga, H., T. Matsui, W.-K. Tao, A. Y. Hou, C. D. Kummerow, T. Nakajima, P. Baur, W. S. Olson, M. Sekiguchi, and T. Y. Nakajima (2010) Satellite data simulator unit: a multisensor, multispectral satellite simulator package. *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*, **91**, 1625-1632. <https://doi.org/10.1175/2010BAMS2809.1>
- Matsui, T., and Coauthors (2014) Introducing multisensor satellite radiance-based evaluation for regional Earth System modeling. *J Geophys Res-Atmos*, **119**, 8450-8475. <https://doi.org/10.1002/2013JD021424>
- 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>
- Putman, W. M., and S. H. Lin (2007) Finite-volume transport on various cubed-sphere grids. *J Comput Phys*, **227**, 55-78. <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2007.07.022>
- 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. <https://doi.org/10.1175/JAS-D-13-0252.1>
- 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. <https://doi.org/10.1186/s40645-014-0018-1>
- Seiki, T., and T. Nakajima (2014) Aerosol Effects of the Condensation Process on a Convective Cloud Simulation. *J. Atmos. Sci.*, **71**, 833-853. <https://doi.org/10.1175/JAS-D-12-0195.1>
- Skamarock, W. C., J. B. Klemp, M. G. Duda, L. D. Fowler, S. H. Park, and T. D. Ringler (2012) A Multiscale Nonhydrostatic Atmospheric Model Using Centroidal Voronoi Tessellations and C-Grid Staggering. *Mon Weather Rev*, **140**, 3090-3105. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-11-00215.1>
- Stevens, B., and Coauthors (2019) DYAMOND: the DYNAMics of the Atmospheric general circulation Modeled On Non-hydrostatic Domains. *Prog Earth Planet Sc*, **6**. <https://doi.org/10.1186/s40645-019-0304-z>
- Tomita, H. (2008) New microphysical schemes with five and six categories by diagnostic generation of cloud ice. *J. Meteorol. Soc. Jpn.*, **86**, 121-142. <https://doi.org/10.2151/jmsj.86A.121>
- Wedi, N. P. (2014) Increasing horizontal resolution in numerical weather prediction and climate simulations: illusion or panacea? *Philos T R Soc A*, **372**. <https://doi.org/10.1098/rsta.2013.0289>
- Wielicki, B. A., B. R. Barkstrom, E. F. Harrison, R. B. Lee, G. L. Smith, and J. E. Cooper (1996) Clouds and the earth's radiant energy system (CERES): An earth observing system experiment. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **77**, 853-868. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1996\)077<0853:CATERE>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1996)077<0853:CATERE>2.0.CO;2)

- Wood, N., and Coauthors (2014) An inherently mass-conserving semi-implicit semi-Lagrangian discretization of the deep-atmosphere global non-hydrostatic equations. *Q J Roy Meteor Soc*, **140**, 1505-1520. <https://doi.org/10.1002/qj.2235>
- Zangl, G., D. Reinert, P. Ripodas, and M. Baldauf (2015) The ICON (ICOsahedral Non-hydrostatic) modelling framework of DWD and MPI-M: Description of the non-hydrostatic dynamical core. *Q J Roy Meteor Soc*, **141**, 563-579. <https://doi.org/10.1002/qj.2378>

4. Summary

In this report, we compared the cloud properties of DYAMOND data over the Atlantic. The horizontal distribution of OLR was found to be very similar to most of the models, but the vertical structure of the clouds had large differences among the simulations. The cloud fraction was affected by the threshold of cloud detection. It is important to use the same criteria between satellite data and models. The protocol for the output is not enough for using a satellite simulator like the Joint simulator.

We evaluated the NICAM results with CloudSat and CALIPSO using a Joint simulator. We found that NICAM underestimated the cloud fraction of shallow and congestus clouds compared to satellite data.

5. Future perspective

This study implies that it is important to use the same criteria when intercomparing cloud properties. A satellite simulator like the Joint simulator is one of the best tools to use the same criteria and evaluate the results compared to satellite observations. However, more variables and information are needed to run the Joint simulator for the DYAMOND data except for NICAM. We need to suggest a list of output variables for the Joint simulator to the GCSR community.

We think one of the hints about improvements is the diversity of vertical cloud fractions in DAYMOND data. For example, we can increase shallow clouds using the results of the overestimation of shallow clouds in ICON and IFS.

6. List of publications

6.1 Peer-reviewed articles

- Kuba, N., Seiki, T., Suzuki, L., Roh, W., and Satoh, M. (2020) Evaluation of rain microphysics using a radar simulator and numerical models: Comparison of two-moment bulk and spectral bin cloud microphysics schemes. *J. Adv. Model. Earth Sys.* **12**, e2019MS001891, <https://doi.org/10.1029/2019MS001891>
- Roh W., Satoh M., Hashino T., Okamoto H., and Seiki T. (2020) Evaluations of the thermodynamic phases of clouds in a cloud system-resolving model using CALIPSO and a satellite simulator over the Southern Ocean. *J. Atmos. Sci.* **77(11)**: 3781-3801. e2020MS002138. <https://doi.org/10.1029/2020MS002138>.
- Seiki T., Roh, W. (2020) Improvements in super-cooled liquid water simulations of low-level mixed-phase clouds over the Southern Ocean using a single-column model. *J. Atmos. Sci.* **77(11)**: 3803-3819. <https://doi.org/10.1175/JAS-D-19-0266.1>.
- Roh W., Satoh, M., Hohenegger, C. (2020): Intercomparison of cloud properties in DYAMOND simulations over the Atlantic Ocean. *J. Meteor. Soc. Japan*. (Submitted).

6.2 Other publications

None.

6.3 Oral presentations

- Roh, W., Seiki, T., Satoh, M., Hashino T. (2019) Improvement of single-moment bulk microphysics for super-cooled water clouds over the Southern Ocean in NICAM using Joint simulator and double-moment microphysics. *JpGU 2019* in Chiba, 37-30 May 2019.
- Roh, W., Seiki, T., Satoh, M., Hashino T. (2019) Evaluations of Cloud and Precipitation Using a Satellite Simulator. *2nd DYAMOND-ESiWACE Hackathon* in Mainz, Germany, 19-21 June 2019.
- Roh, W., Satoh, M., Hashino T. (2019) EarthCARE Joint Simulator. *EarthCARE Forward Operator Workshop* in

Hamburg, Germany, 24-25 June 2019.

Roh, W., Hohenegger C., Satoh, M. (2019) An intercomparison of tropical clouds using DYAMOND data over the Atlantic. *2019年度秋季大会* in Fukuoka, 28-31 Oct. 2019.

Roh, W., Seiki, T., Satoh, M., Hashino T. (2019) An impact of microphysics schemes on the evaluation method using CALIPSO. *8th International EarthCARE Science Workshop* in Fukuoka, Japan, 25-27 Nov 2019

Roh, W., Satoh, M., (2019) An introduction to DYAMOND project. *NIES supercomputer workshop 2019* in Tsukuba, 25 Dec. 2019.

Roh, W., Seiki, T., Satoh, M., Hashino T. (2019) Evaluations of thermodynamics phases of clouds in NICAM using CALIPSO and a satellite simulator over the Southern Ocean. *第 21 回非静力学モデルに関するワークショップ* in 三重大学, 26 Dec. 2019.

Roh, W., Satoh, M., (2020) Introduction to analysis of DYAMOND data. *NICAM開発者会議 2019* in Numazu, 16-17 Jan. 2020.

7. Contact person

Woosub Roh

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

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

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

研究課題名：
NICAM による雲降水システムの研究

実施年度：
平成 31 年度～令和元年度

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。

今年度は全球雲解像モデル国際比較プロジェクトに参加した。いろいろな全球雲解像大気モデルのシミュレーション結果を利用し大西洋の雲の特性を比較しました。ドメイン平均の OLR は各モデルに似ているが、雲の割合 (cloud fraction) の縦断プロフィールは異なる。NICAM の場合は Joint Simulator を利用し、衛星観測データ CloudSat と CALIPSO を使用して、雲の割合を評価した。

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：
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

要旨：

太陽の日変化以外の外部条件を固定して4つの季節（春、夏、秋、冬）の長期シミュレーションと季節変化する気候値シミュレーションのそれぞれの準二年振動（quasi-biennial oscillation : QBO）を比較することによって、季節変化がQBOに及ぼす影響を評価した。冬（1月）、春（4月）、夏（7月）、秋（10月）のそれぞれの月の15日で太陽の位置（日変化はある）を固定し、各月の気候値海面水温を使い、その他、温室効果気体等は気候値の濃度で化学-気候モデルを約20年走らせ、4季節ランと気候値ランをQBOに焦点を当てて解析した。季節を固定して行った1月、7月、10月の3つのランではそれぞれのQBOは、周期や東西風の降下の様子などさまざまに特色が異なるが、とにかく持続していることは共通している。しかし、4月固定のランでは、10数年後、5サイクルあたりから振幅が弱くなり、次のサイクルの西風の降下が20hPa付近で止まり、やがて振動しなくなっている。このQBO消滅の原因は、パラメタライズされた重力波が対流圏上部の背景風によるフィルタリングで減衰したことだと思われる。季節の違いによるQBOへの影響はその他の点でも見られ、パワースペクトルにおいて1月と7月はQBOが成層圏内に限られているのに対し、4月と10月はQBOが中間圏にまで伸びており、両半球が夏冬の状態と春秋の状態ではその影響が異なることを示している。

キーワード：

成層圏準二年振動、成層圏オゾン、化学-気候モデル、季節変化

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

1. 研究目的

熱帯成層圏での準二年振動（quasi-biennial oscillation：QBO）を現実的にシミュレートできる気象研究所の化学-気候モデル（MRI-CCM）を使い、気候固定の条件でのランで QBO がどのように変化するかを調べ、毎年同じ季節変化する気候値フォーシングでシミュレートされた QBO と比較することで、季節変化と QBO の関係を明らかにする。

キーワード：
成層圏準二年振動、成層圏オゾン、化学-気候モデル、季節変化

2. スーパーコンピュータ利用実績

2.1 計算機利用時間（2019 年 4 月 1 日～11 月 30 日）

CPU 時間	v_deb	（デバック用）	: 0.00 hours
	v_32cpu	（最大 32CPU コア）	: 4, 995.36 hours
	v_96cpu	（最大 96CPU コア）	: 0.00 hours
	v_160cpu	（最大 160CPU コア）	: 0.00 hours
		計	: 4, 995.36 hours

2.2 利用概要

1 月、4 月、7 月、10 月のそれぞれの月の 15 日で太陽の位置（日変化はある）で固定し、さらにそれぞれの月平均の海面水温を使い、その他、温室効果気体等は気候値の条件で化学 - 気候モデルを約 20 年走らせ、4 つの季節ランと気候値ランを QBO に焦点を当てて解析した。

3. 研究結果

3.1 概要

QBO を現実的に再現できる気象研究所の化学-気候モデル（Shibata and Deushi, 2005）で季節固定のランを行い、その QBO への影響を調べた。気候値ランで QBO 周期がほとんど観測値（28 ヶ月）に近い 29 ヶ月である CCM（分解能は T42L81）で季節固定（1 月、4 月、7 月、10 月）の長期ランを行い、季節固定が QBO に与える影響を調べた。1 月、7 月、10 月固定のランではそれぞれの QBO は周期や東西風の降下の様子などさまざまに QBO の特色は異なるけれど、とにかく QBO が持続していることは共通している。しかし、4 月固定のランでは 10 数年後、5 サイクルあたりから振幅が弱くなり次のサイクルの西風の降下が 20 hPa 付近で止まりやがて振動しなくなっていた。パラメタライズされた重力波が対流圏上部の背景風によるフィルタリングで減衰したのが原因だと思われる。

3.2 背景と目的

周期が約28ヶ月であるQBOはそれよりかなり短い12ヶ月の年周期（季節変化）とは関係していないように思えるが、東西風の反転は特定の季節（4～6月）により起こりやすいことが解析されており（Taguchi and Shibata, 2013）、東西風の加速が大きい時期は季節変化の影響を受けていることを示している。本研究ではQBOを再現できるCCM（Shibata and Deushi, 2005）で季節変化を作り出している太陽の赤緯と海面水温を固定して季節を春夏秋冬のそれぞれの時期に固定して長期ラン（パーペチュアルラン）を行い、季節変化のある気候値ランを比較して季節変化がQBOへ与える影響を評価するのが目的である。

3.3 数値計算

（1）気候値ランのQBO

CCMはShibata and Deushi（2005, 2012）を改良した版（Shibata and Lehmann, 2020）を使い、温室効果気体の濃度一定、太陽定数は固定、季節変化はあるが毎年同じ海面水温のフォーシングで約20年の長期ラン（コントロールラン）を行ったときの熱帯成層圏の帯状平均東西風アノマリーとそのパワースペクトルを図1に示す。熱帯中層大気の東西風には半年振動、年周期、QBOがシミュレートされており、QBOは周期が約29ヶ月と現実の値より約1ヶ月長いが現実的な特徴を再現している。

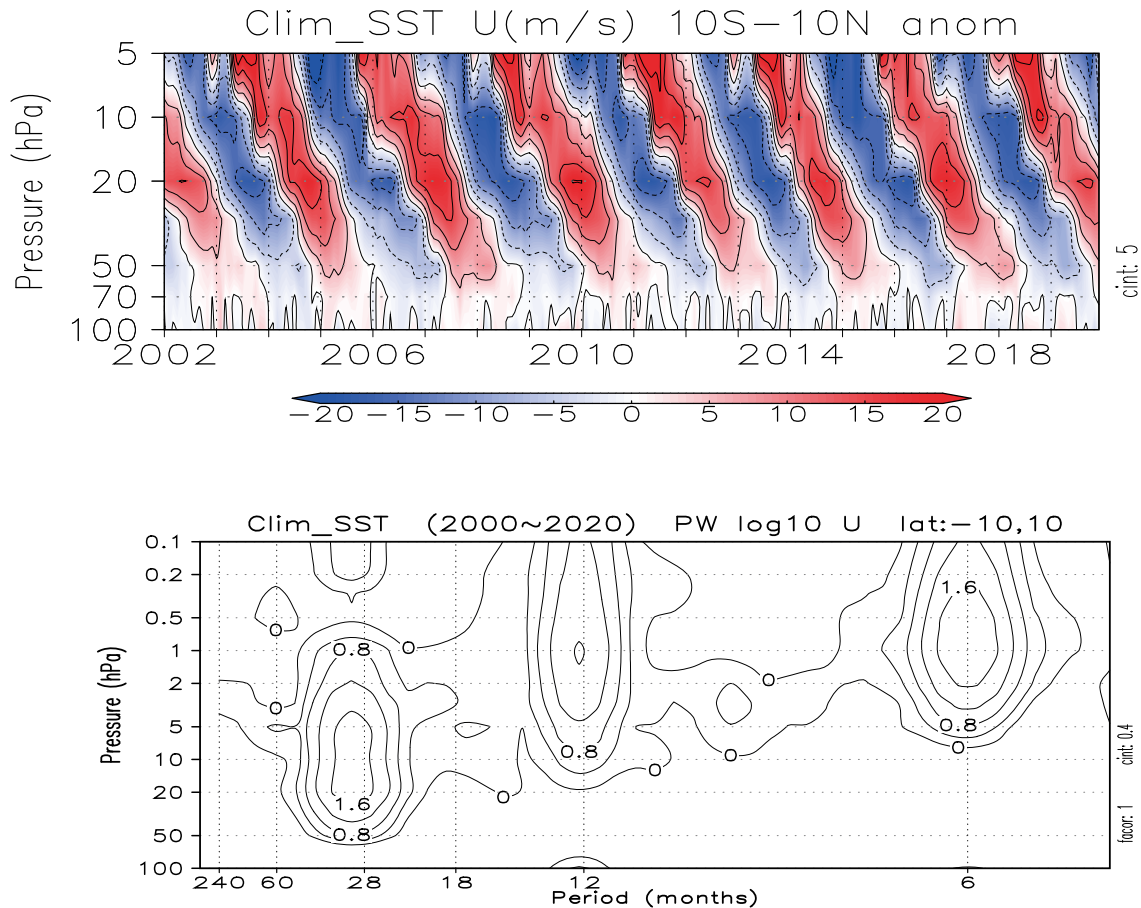


図 1. 気候値コントロールランにおける熱帯成層圏（100～5 hPa）の帯状平均東西風（10S-10N 平均）の（上）アノマリーの時間-高度断面（正は西風、負は東風）、（下）パワースペクトル（常用対数で表示）の高度分布。

(2) 季節固定ラン

太陽の位置 (赤緯) を1月、4月、7月、10月のそれぞれの月の15日で固定し (日変化はある)、それぞれの月の気候値の海面水温を使い、温室効果気体等は気候値に設定してCCMを約10数年走らせた。初期値はコントロールランの2000年のそれぞれの月のリスタート値を使った。図2にそれぞれのランにおける熱帯成層圏の帯状平均東西風アノマリーの推移を示す。

1月、7月、10月固定のランではそれぞれのQBOは周期や東西風の降下の様子などさまざまにQBOの特色は異なるが、とにかく期間を通してQBOが持続していることは共通している。しかし、4月固定のランでは10数年後、5サイクルあたりから振幅が弱くなり次のサイクルの西風の降下が20hPa付近で止まりやがて振動しなくなっていた。

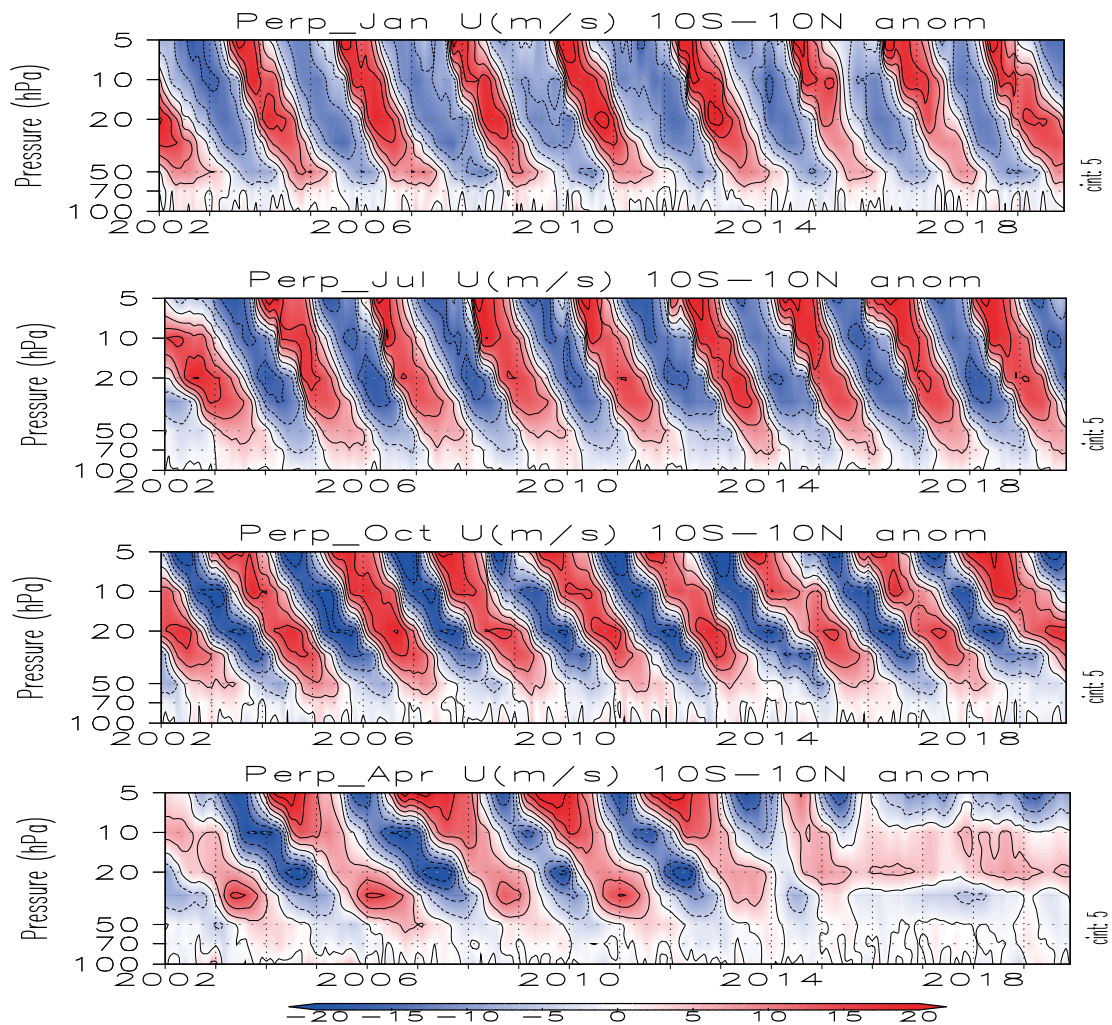


図 2. 熱帯成層圏 (100~5 hPa) の帯状平均東西風のアノマリー (10S-10N 平均) の時間-高度断面図。(a) 1月ラン、(b) 7月ラン、(c) 10月ラン、(d) 4月ラン。

パーペチュアルランで対流圏と成層圏の代表的な高度での1月と7月の東西風の全球分布を示したのが図3である。1月の上部対流圏の300hPaでは亜熱帯ジェットのコア付近に相当し、北半球は冬なのでの30度付近に35m/sの強いジェットが持続している。一方、南半球は夏半球なので極よりの45度付近に30m/sのジェットが持続している。上部成層圏の10hPaでは北半球の60~70度で約50m/sの強い極夜ジェットが吹いているが、強弱を繰り返してマイナーウォーミングが頻発し、時には東風になるメジャーウォーミングも発生している。南半球では約10m/s以下の弱い安定な東風が持続している。7月は季節が反転し、冬半球の南半球ではより80m/s以上の強い極夜ジェットが吹いており、突然昇温は起きていない。夏半球の北半球では1月の南半球と同じように約10m/s以下の弱い安定な東風が持続している。1月と7月のいずれにしても季節は止まっているため気象場の変動は小さくなっており、例外的に顕著な変動は熱帯成層圏のQBOと北半球の極夜ジェットである。

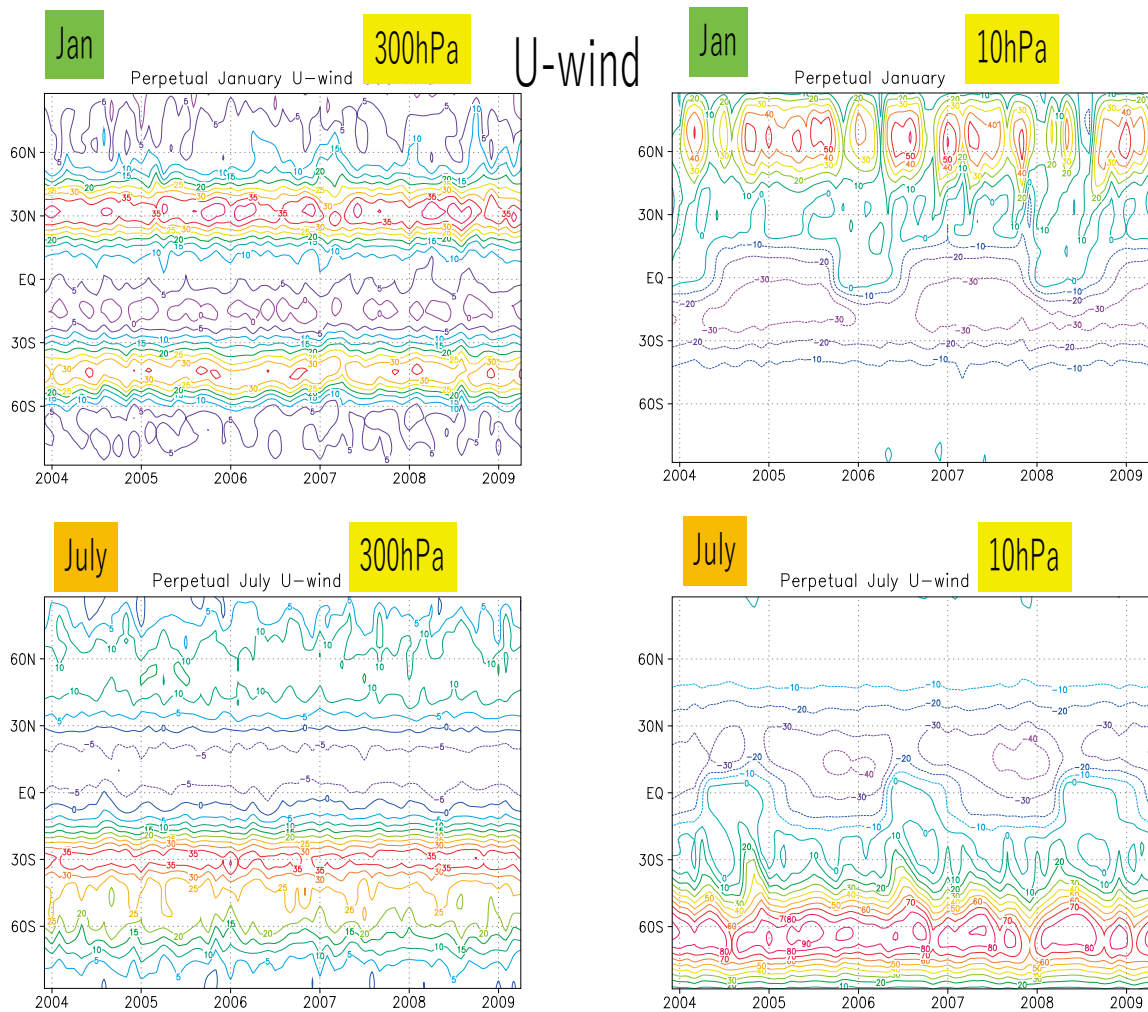


図 3. パーペチュアルの1月ラン（上）と7月ラン（下）の帯状平均東西風の時間-緯度断面。
（左）対流圏の300 h Pa、（右）成層圏の10 h Pa。

QBOが最大振幅となる20hPa(図1)で4季節パーペチュアルランにおける東西風アノマリー(U)とそのフォーシング(EPフラックスの発散による加速(epd)、パラメタライズした重力波による加速(gwf)と両者の和(g+e))の各項を2010~2020年で評価したのが図4である。東西風Uはトータル加速g+eから1/4波長遅れており、両者の位相関係は保たれている。QBOが期間中減衰することなく持続している1月、7月、10月ランでは東西風や加速項について差異はあるものの、当然ではあるが、加速が持続している。一方、4月ランでは10数年後(2014年付近)から加速項が急速に減衰し、これに伴って東西風も急激に小さくなり、やがてほとんど振動しなくなる。MRI-CCMでのQBOの主な励起はパラメタライズした重力波でありモデルで表現される波による加速は二次的な役割と評価できるので、QBO消滅の原因は加速項、特に、パラメタライズした重力波加速gwfの消滅に求めることができる。

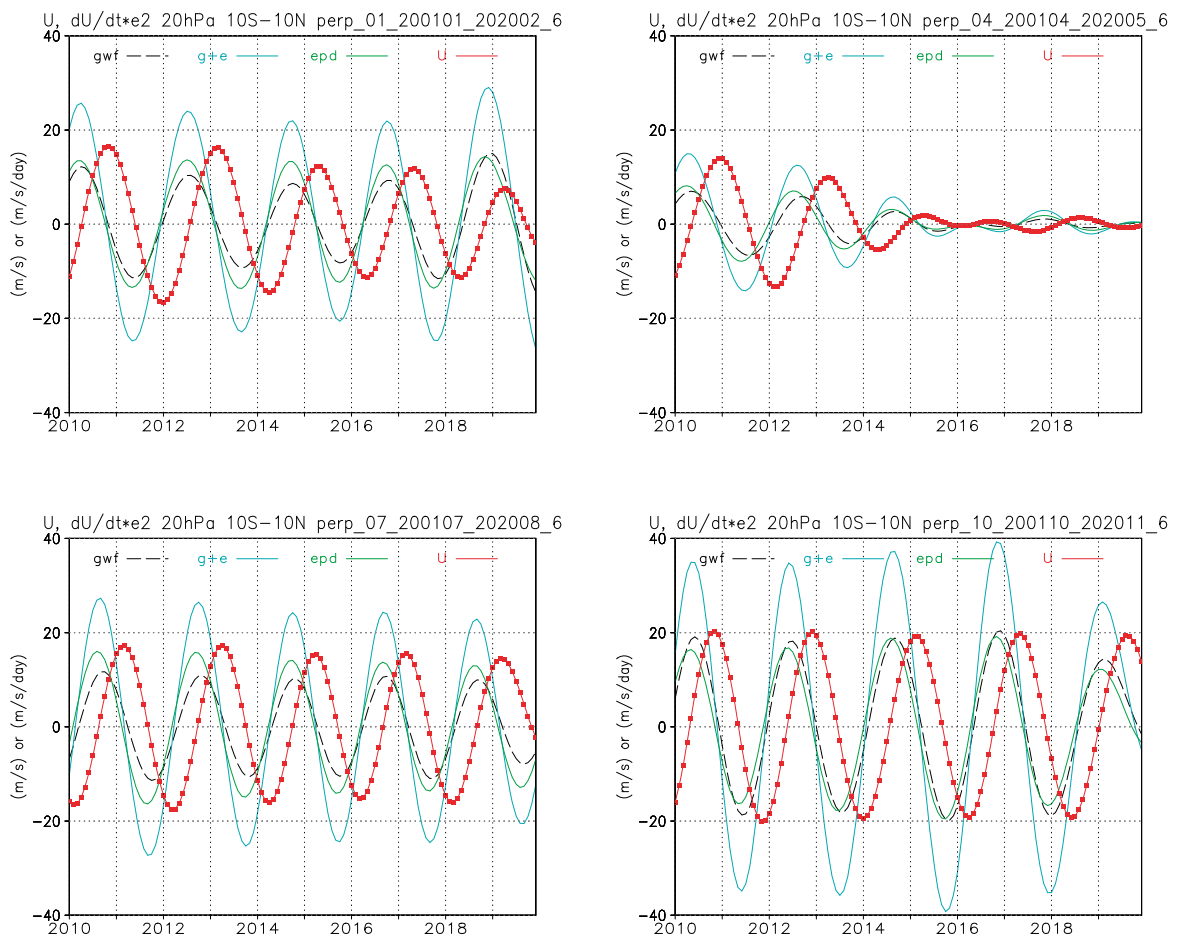


図 4. 熱帯の高度20hPaにおける帯状平均東西風(赤、m/s)とフォーシング(m/s/day、パラメタライゼーション重力波加速(黒)、モデルで表現された波による加速(EPフラックス発散)(緑)、両者の和(シアン))の100倍の時系列。いずれも10S-10N平均。(左上)1月ラン、(右上)4月ラン、(左下)7月ラン、(右下)10月ラン。

図4と同期間（2010～2020年）について4月ランと1月ランのパラメタライズした重力波加速gwfの高度による違いを上部対流圏の300hPaから成層圏20hPaまでの各高度で現したのが図5である。4月ランと1月ランを比較すると、1月ランは期間を通して成層圏でのgwfの振幅はほぼ一定であるのに対し、4月ランは2014年以降急激に減衰している。一方、対流圏を見ると、両方のランとも振動が継続している。図からは4月ランでは2014年頃からgwfの振幅が100hPaと70hPaの間でかなり異なっているのが明白である。つまり、100hPaではgwf加速は存在するのに70hPaではかなり減衰しているのである。パラメタライズした重力波の鉛直伝搬も実際の重力波のように背景風の影響を受けるので、この70hPaにおける2014年以降のgwfの大きな減衰は対流圏界面付近の背景風の影響であると見なすことができる。

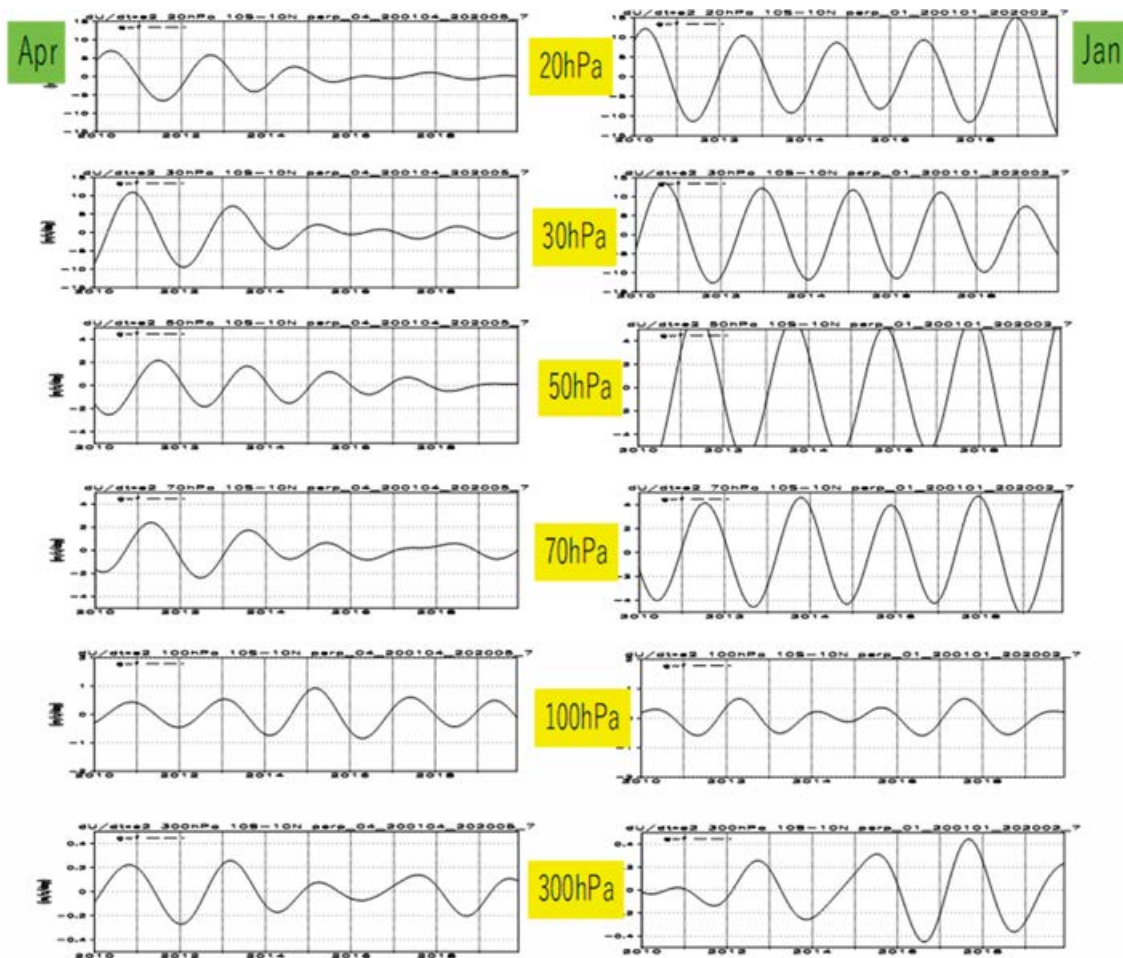


図 5. 熱帯の上部対流圏から中部成層圏の各高度おけるとパラメタライゼーション重力波加速 (m/s/day) の 100 倍の時系列. いずれも 10S-10N 平均。(左) 4 月ラン、(右) 1 月ラン.

参考文献

- Shibata, K. and M. Deushi (2005) Partitioning between resolved wave forcing and unresolved gravity wave forcing to the quasi-biennial oscillation as revealed with a coupled chemistry-climate model. *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L12820. <https://doi.org/doi:10.1029/2005GL022885>
- Shibata, K. and M. Deushi (2012) Future changes in the quasi-biennial oscillation under a greenhouse gas increase and ozone recovery in transient simulations by a chemistry-climate model, *Greenhouse Gases - Emission, Measurement and Management*, Dr. Guoxiang Liu (Ed.), 355-386. ISBN: 978-953-51-0323-3, InTech.
- Shibata, K. and R. Lehmann, Partitioning of ozone loss pathways in the ozone quasi-biennial oscillation simulated by a chemistry-climate model. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, **98**, 615–636. 2020. <https://doi.org/doi:10.2151/jmsj.2020-032>
- Taguchi, M. and K. Shibata: Diagnosis of annual synchronization of the quasi-biennial oscillation: results from JRA-25/JCDAS reanalysis and MRI chemistry-climate model data. *J. Meteor. Soc. Japan*, **91**, 243-256. <https://doi.org/10.2151/jmsj.2013-301>, 2013

4. まとめ

CCMにおいて太陽の赤緯を固定して春、夏、秋、冬の4つの季節の長期シミュレーションと季節変化する気候値シミュレーションのそれぞれのQBOを比較することによって、各季節において季節変化がQBOに及ぼす影響を評価した。1月、4月、7月、10月のそれぞれの月の15日で太陽の位置（日変化はある）とそれぞれの月の海面水温を固定し、その他、温室効果気体等は気候値の条件で化学 - 気候モデルを約20年走らせ、4季節ランと気候値ランをQBOに焦点を当てて解析した。1月、7月、10月固定のランでは、それぞれのQBOは周期や東西風の降下の様子などさまざまにQBOの特色は異なるが、とにかくQBOが持続していることは共通している。しかし、4月固定のランでは10数年後、5サイクルあたりから振幅が弱くなり、次のサイクルの西風の降下が20hPa付近で止まり、やがて振動しなくなっている。パラメタライズされた重力波が対流圏上部の背景風によるフィルタリングで減衰し成層圏への伝搬が消滅したのが原因だと思われる。その他、季節変化のQBOへの影響として、中間圏への伸びが挙げられるパワースペクトルで見ると1月と7月はQBOが成層圏内に限られているのに対して、4月と10月はQBOが中間圏にまで伸びており、両半球が夏冬の状態と春秋の状態ではその影響が異なることを示している。

5. 今後の研究展望

四季がない熱帯成層圏のQBOに中緯度の季節変化の関わり方は2つ存在する。1つは中高緯度の対流圏から熱帯成層圏へ伝搬する傾圧波やプラネタリー波による影響であり、もう1つは熱帯対流圏の背景風の変動による影響である。さらに、今回使ったCCMでは重力波のソースは一定にしてあるが、実際の気候では重力波の主なソースである対流活動に季節依存があるので、これの影響も考えられる。これらの影響を別々に評価するのが今後の課題である。

6. 研究成果発表

6.1 誌上発表（査読あり）

Shibata, K. and R. Lehmann (2020) Partitioning of ozone loss pathways in the ozone quasi-biennial oscillation simulated by a chemistry-climate model. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, **98**, 615–636, 2020.
<https://doi.org/10.2151/jmsj.2020-032>

6.2 誌上発表（査読なし）

なし。

6.3 口頭発表

Shibata, K. and R. Lehmann (2019) Partitioning of ozone loss pathways in the ozone quasi-biennial oscillation simulated by a chemistry-climate model, *27th IUGG General Assembly*, Montreal.

Shibata, K. (2019) QBO simulations under perpetual conditions with a chemistry-climate model. *AGU 2019 Fall Meeting*, San Francisco.

6.4 その他（書籍等）

なし。

7. 連絡先

柴田清孝

〒782-8502 高知県香美市土佐山田町宮ノ口 185 高知工科大学環境理工学群

Tel: 0887-57-2504 Fax: 0887-55-2520

E-mail: shibata.kiyotaka@kochi-tech.ac.jp

Project name:

Studies of the effect of seasonal change on the equatorial quasi-biennial oscillation

April 2019–March 2020

Project leader:

Kiyotaka Shibata, School of Environmental Science and Engineering, Kochi University of Technology

Abstract:

The effect of seasonal change on the quasi-biennial oscillation (QBO) was investigated using the chemistry-climate model (CCM) of the Meteorological Research Institute (MRI) by fixing the seasonal change in CCM simulations. The MRI-CCM of the T42L81 version could realistically reproduce the QBO in wind and ozone fields of a 29-month period in a climatological simulation under annually repeated sea surface temperature with seasonal change. To this standard model simulation (control run), four anomaly simulations (perpetual runs) were made by fixing solar declination on the 15th of January, April, July, and October for about 20 years. In the three perpetual January, July, and October runs, the QBO was maintained and persisted although there were some differences in periods and amplitudes among the three runs. On the other hand, the QBO in the perpetual April run, began to weaken after 15 years and the downward propagation of the westerly wind stopped at about 20 hPa, resulting in the ceasing of the QBO. The cause of this disappearance is related to the background wind in the upper troposphere, which filtered out the parameterized gravity waves propagating upwards to the stratosphere.

Keywords:

quasi-biennial oscillation, stratospheric ozone, chemistry-climate model, seasonal change

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：
陸惑星のハビタビリティに関する考察**

実施年度：

平成 31 年度～令和元年度

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

神戸大学大学院理学研究科 河合佑太

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。Abe et al. (2011) は陸惑星 GCM (General Circulation Model) 実験を実施し、太陽定数が 2333W/m^2 となるまで陸惑星の表層に液体の水が存在でき、太陽定数がその臨海値を超えると完全蒸発状態が発生するという結果を示した。本研究では、完全蒸発が起こる臨界値に関する再検討をおこなうために、Abe et al. (2011) の追実験を実施した。数値実験の実行には大気大循環モデル DCPAM (Dennou-Club Planetary Atmospheric Model) を用いた。全ての地表面にバケツモデルを適用し、自転角速度として地球と同じ値を用い、太陽定数を 2400W/m^2 まで増加させた実験をおこなった。大気の初期状態として、2 種のものを用いた。1 つは Abe et al. (2011) と同様に水惑星実験で得られた平衡状態であり、もう 1 つは暴走温室状態である。いずれの場合でも、完全蒸発状態は得られず、極域に水量の大部分が蓄積される状態が得られた。この結果は過去の研究で議論されていたよりも広い太陽定数範囲で陸惑星の表面には液体の水が存在する可能性があることを示唆するものである。しかし、さらに、自転傾斜角などのパラメータに対する依存性に関する調査など検討を進める必要がある。

キーワード：

系外惑星、陸惑星、大気大循環モデル、暴走温室状態、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：
陸惑星のハビタビリティに関する考察

実施年度：

平成 31 年度～令和元年度

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

神戸大学大学院理学研究科 河合佑太

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ける完全蒸発状態の発生/非発生を確認する大気大循環モデル (General Circulation Model: GCM) 実験を実施する。全球表面にバケツモデルを適用し、初期の大気中水蒸気量を変えた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、暴走温室状態、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 (2019 年 4 月 1 日～11 月 30 日)

CPU 時間	v_deb	(デバック用)	: 0.00 hours
	v_32cpu	(最大 32CPU コア)	: 33,284.26 hours
	v_96cpu	(最大 96CPU コア)	: 0.00 hours
	v_160cpu	(最大 160CPU コア)	: 0.00 hours
	計		: 33,284.26 hours

2.2 利用概要

大気大循環モデル DCPAM (Dennou-Club Planetary Atmospheric Model) 5 を用いて全球にバケツモデルを適用した陸惑星実験を行った。数値実験の実行にはスーパーコンピュータシステムを使用した。DCPAM5 が依存する gtool5, ispack, spml の各種ライブラリファイルはスーパーコンピュータシステム上でコンパイルして使用した。出力データは北海道大学で所有するデータ解析用サーバに転送し解析をおこなった。

3. 研究結果

3.1 背景と目的

これまでの系外惑星探査により、地球と同程度の質量を持つ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、生命の存在が可能となる気候を持つ (ハビタブルである) と予想されている (たとえば TRAPPIST-1 の惑星系: Wit et al., 2018 など)。これらの惑星は、軌道要素・日射分布・表面水量などの緒量が地球とはかなり異なる状況に置かれており、それらの気候は多様な様相を呈していると想像されている。系外惑星にあらわれると考えられる惑星気候の多様性を調べるために大気大循環モデル (GCM) を用いた数値的な

研究がおこなわれてきている。たとえば、Abe et al. (2011) や Noda et al. (2018) は、比較的単純な設定を用いた GCM 実験により、惑星気候の多様性を理解する切口を与えることを試みた研究である。これらの研究は、地球外生命の存在可能性の探求に端を発するものではあるが、地球とは異なる条件下で実現する気候状態を数値的に調べることにより、現在地球気候と同様な温暖温和な気候が実現する条件やその安定性を考察するものである。その知見は、我々の地球環境とその安定性を広いパラメータ空間において議論し理解することにつながる。

本研究は、上記のような視点から、系外惑星を想定したさまざまな設定を用いて全球凍結状態から暴走温室状態に至るまでの気候多様性を数値的に探索し、生命生存可能環境（液相の水が存在できる環境）の存在条件を詳細に調べることを目的としたものである。

昨年度まで、我々は系外惑星の 1 つの姿として考えられる陸惑星の気候に関する GCM 実験に取り組んできた。陸惑星とは、地球の海洋に比較して非常に少ない量の水 (H_2O) しか表層に持たない惑星である (Abe et al., 2005, Abe et al., 2011)。Abe et al. (2011) は、陸惑星 GCM 実験を行い、太陽定数がおよそ 2333 W/m^2 となるまで高緯度に水が存在する状態が維持され、それよりも太陽定数が増加すると土壤水分が全て蒸発した状態（完全蒸発状態）が発生するという結果を示した。完全蒸発状態が発生する太陽定数の臨界値は、Abe et al. (2011) の水惑星実験で得られた暴走温室状態 (Ishiwatari et al., 2002, Ishiwatari et al., 2007) が発生する太陽定数 1400 W/m^2 を大きく上回るものとなっており、水が少ない惑星の方が、広い太陽定数の範囲で惑星表層に液体の水を有することになる。このため、陸惑星は惑星の生命存在可能性を考える上で重要な研究対象であると考えられる。

昨年度に我々が実施したスーパーコンピュータ利用研究における陸惑星実験では、Abe et al. (2011) の結果とは異なり、土壤水分量が増加を続ける状態が得られ、完全蒸発が起らない可能性があることが示された。しかし、Abe et al. (2011) の実験に比較して、統計的平衡状態に達するまでの時間が非常に長いものとなっており統計的平衡状態を得るところまで至っておらず、完全蒸発状態の非発生を正しく確認することはできていなかった。また、我々の実験では、Abe et al. (2011) とは解像度と初期状態が異なるものを使用してしまっていたため、結果の違いが実験設定によってもたらされた可能性も排除できずにいた。今年度は Abe et al. (2011) と条件を合わせた追実験を実施し平衡状態を得るところまで時間積分を実行して、完全蒸発状態が得られない可能性が本当にあるのかどうかを確認することを目的とした。

3.2 モデルと実験設定

用いる大気大循環モデルは、我々が開発を進め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なる。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。物理過程として、地球大気用放射スキーム (Chou et al., 1996; Chou et al., 2001)、Relaxed Arakawa and Schubert 積雲対流スキーム (Moorthi and Suarez, 1992)、鉛直乱流拡散スキーム (Mellor and Yamada, 1974)、地表面フラックススキーム (Beljaars and Holtlag, 1991) などを用いる。雲水量は、積雲対流スキームから決まる生成過程、移流過程、乱流拡散過程、雲の消滅時間を仮定した消滅過程を考慮した時間発展方程式を解くことにより求める。水蒸気および雲水の移流は Kashimura et al. (2013) のセミラグランジュ法物質移流スキームを用いて計算する。地表面モデルとして、バケツモデル (Manabe, 1969) を惑星表面全体に用いる。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。

自転傾斜角は 0 とし、太陽定数の値は $1366, 1900, 2400 \text{ W/m}^2$ 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 とした。解像度は T21L26 を用いた。初期条件として (a) 水惑星実験で得られた統計的平衡状態、(b) 水惑星実験で得られる暴走温室状態、の 2 種のものを用いた。初期状態として、(a) を用いる実験は、鉛直解像度が Abe et al. (2011) よりも高いことを除けば、完全蒸発状態を得た Abe et al. (2011) と同様の設定となっており、Abe et al. (2011) の追実験となるものである。以下では (a) の場合の結果を中心に記載する。

3.3 結果

図 1 に、太陽定数として 2400W/m^2 、初期状態として水惑星実験で得られた統計的平衡状態を用いた場合（3.2 節で記載した a の初期状態を用いた場合）に得られた全球平均土壌水分量と全球平均大気水蒸気量の時間変化を示す。図 1 の細黒実践は大気水蒸気量と土壌水分量の和を示している。これは計算開始から徐々に減少しており、表層の雪層に含まれる水量が増加していることを示している。40000 日目（およそ 110 年目）には、大気水蒸気量も土壌水分量もほぼ一定値に達したように見える。惑星表層に存在する水の大部分は土壌水分となっており、完全蒸発は得られなかった。これは Abe et al. (2011) の陸惑星実験とは異なる結果である。彼らの実験では、全ての水が大気水蒸気として存在するという結果が得られていた。

図 2 には、同実験で得られた大気状態を示す。温度分布のパターンも質量流線関数のパターンも地球に似たものになっている。赤道域で上昇流・亜熱帯で下降流が生じておりハドレー循環が存在している。対応して温度場では熱帯域の南北温度差が小さいものになっている。また、熱帯域における大気下層の温度は非常に高いものになっており 360K を超えている。中緯度帯では、温度分布に南北温度差が、質量流線関数場にハドレー循環とは逆向きのフェレル循環が現れている。ここでは示さないが、降水の時間変化などでは傾圧不安定擾乱擾乱が観察できる。

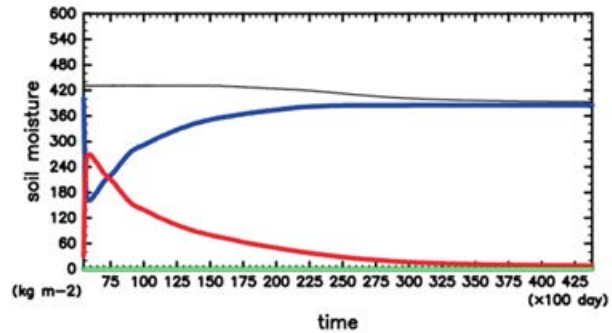


図 1. 水(H_2O)に関する量の全球平均値の時間変化。赤線は大気水蒸気量 $[\text{kg}/\text{m}^2]$ 、青線は土壌水分量 $[\text{kg}/\text{m}^2]$ 。細い黒線は両者の和である。横軸は時間 $[\text{day}]$ 。

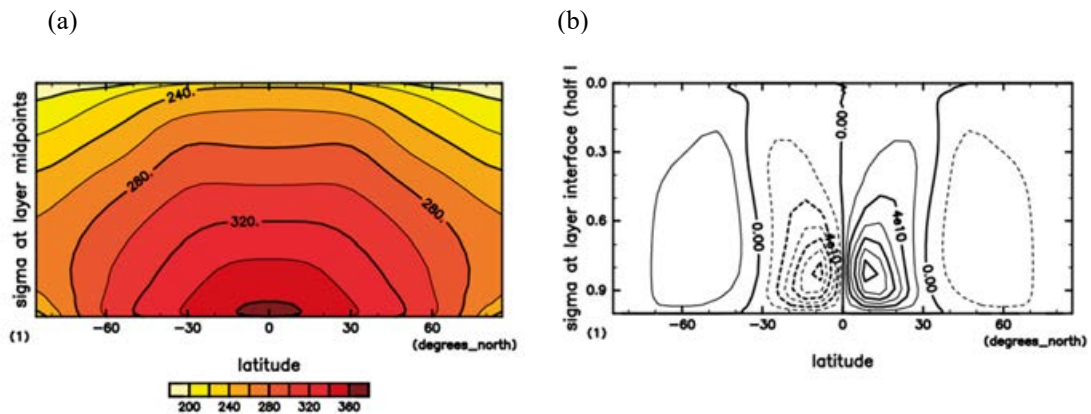


図 2. 陸惑星実験で得られた大気場。(a) 東西平均温度 $[\text{K}]$ 。(b) 質量流線関数 $[\text{kg}/\text{sec}]$ 。いずれも横軸は緯度、縦軸は σ 。

図 3 に、水量がほぼ一定値に達したと思われる最終状態における水に関する量の緯度分布を示す。図 3 (a) から、熱帯域では土壌水分量も大気水蒸気量も大きく減少しているのに対して、極域では表層にほぼ全ての水が存在していることがわかる。極域に存在する水のほぼ 9 割は土壌水分として保持され残りの 1 割は表層の雪層として存在している。図 3 (b) から、赤道域と極域で降水および蒸発が起こっていることがわかる。赤道域ではわずかに残った水により降水と蒸発が発生

している。全ての緯度において降水量と蒸発量は局所的にはほぼバランスしており、地表から蒸発した水がその場で降水となって土壌水分に戻っていると考えられる。

以上と同様の結果が、3.2 節で記載した(b)の初期状態を用いた場合(水惑星実験で得られた暴走温室状態を初期状態とする実験)でも得られた。その場合でも、完全蒸発状態は得られなかった。これらの結果は、陸惑星上に液体の水が存在する太陽定数範囲は過去の研究で議論されてきたものよりずっと広い可能性があることを示唆するものである。しかし、さらなる長時間積分、自転傾斜角などのパラメータを変更した実験を実施し、検討を重ねる必要があると考えられる。

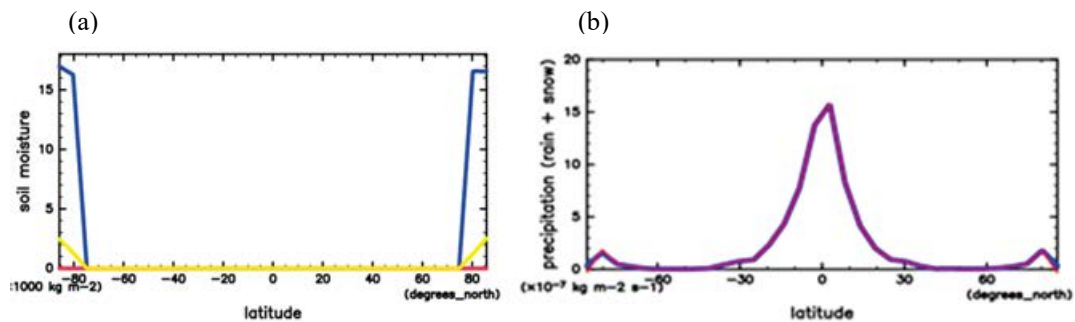


図 3. 陸惑星実験で得られた水量と降水・蒸発フラックスの緯度分布。(a) 青線は土壌水分 $[\text{kg}/\text{m}^2]$ 、赤線は大気水蒸気量 $[\text{kg}/\text{m}^2]$ 、黄色線は表面上の雪層中の水量 $[\text{kg}/\text{m}^2]$ をあらわす。(b) 降水 $[\text{kg}/\text{m}^2/\text{sec}]$ (青線)と蒸発 $[\text{kg}/\text{m}^2/\text{sec}]$ (赤線)の緯度分布。いずれも 154 年目における 200 日平均の結果を示す。横軸は緯度。

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., 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)
- Beljaars A. C. M., Holtslag A. A. M. (1991) Flux parameterization over land surfaces for atmospheric models. *J. Appl. Meteor.*, **30**, 327-341. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1991\)030<0327:FPOLSF>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1991)030<0327:FPOLSF>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>
- 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)
- Nakajima S., Hayashi Y.-Y., Abe Y. (1992) A study on the "runaway greenhouse effect" with a one dimensional radiative convective equilibrium model. *J. Atmos. Sci.*, **49**, 2256-2266. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1992\)049<2256:ASOTGE>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1992)049<2256:ASOTGE>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

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実験をおこなった。Abe et al. (2011) の追実験を実施したところ、かれらの結果とは異なり、太陽定数を増加させた場合でも土壌水分が全て蒸発する完全蒸発状態は得られなかった。この結果は、過去の研究で議論されていたよりも広い太陽定数範囲で陸惑星の表面には液体の水が存在する可能性があることを示唆している。

5. 今後の研究展望

本研究では 150 年の積分をおこない、大気水蒸気量と土壌水分がほぼ一定となる状態を得ることができた。しかし、この後、徐々に土壌水分および大気水蒸気量が変化していく可能性も残っており、さらなる長時間積分によって確認する必要があると考えている。さらに、自転傾斜角などのパラメータを変更した場合についても検討を行っていく予定である。

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

Ishiwatari M., Yoshida T., Nakajima K., Takahashi Y.O., Takehiro S., Hayashi, Y.-Y. (2019) Numerical experiments on climates of terrestrial exoplanets: aquaplanet and land planet. *AGU Fall meeting*.

Ishiwatari M., Yoshida T., Nakajima K., Takahashi Y.O., Takehiro S., Hayashi, Y.-Y. (2019) Numerical experiments on climate of land planet using an atmospheric general circulation model. *Planet2/RESCEU Symposium*.

吉田哲治, 石渡正樹 (2019) 陸惑星における完全蒸発状態の発生に関する大気大循環モデル実験. *日本気象学会 2019 年度秋季大会*.

吉田哲治, 石渡正樹 (2019) 陸惑星における完全蒸発状態の発生に関する大気大循環モデル実験. *日本惑星科学会 2019 年秋季大会*.

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 a variety of climates of terrestrial planets with taking exoplanets into consideration: an examination on habitability of land planets

April 2019—March 2020

Project leader:

Masaki Ishiwatari, Faculty of Sciences, Hokkaido University

Project members:

Kensuke Nakajima, Faculty of Sciences, Kyushu University

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

Yuta Kawai, Graduate School of Science, Kobe University

Abstract:

An atmospheric general circulation model (AGCM) experiment was performed 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 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 (Abe et al., 2005). Therefore, a land planet is an important example for considering the habitability of exoplanets. Abe et al. (2011) performed a land planet GCM experiment and showed that surface water is maintained for solar constant values below 2333 W/m^2 , and that complete evaporation of the soil moisture occurs for solar constant values larger than the critical value. In this study, we performed a follow-up experiment of Abe et al. (2011) in order to reexamine the critical value of the occurrence of complete evaporation. The model utilized in this study was DCPAM5. A bucket model was applied to the whole surface. The value of the planetary rotation rate was set to be Earth's value. The value of solar constant was increased up to 2400 W/m^2 . Two kinds of states were used for the initial states of the atmosphere: one was an equilibrium state obtained by aquaplanet experiments similar to an experiment by Abe et al. (2011), and the other was a runaway greenhouse state. In neither case did complete evaporation state emerge. Almost all the surface water existed in the polar regions. However, further investigation is necessary for examining the dependence on parameters such as obliquity.

Keywords:

exoplanets, land planet, atmospheric general circulation model, runaway greenhouse state, complete evaporation

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

国立研究開発法人国立環境研究所(以下、「NIES」という)は、2013(平成25)年6月SX-8R/128M16の後継として導入した、NECベクトル処理用計算機(SX-9/A(ECO))を2015年3月まで運用していた。2015年6月からは、SX-ACEの運用を開始している。2016年11月からはスカラ処理用計算機にSGI UV30を増強し、運用している。

2016年11月以降スーパーコンピュータシステムは、ベクトル処理用計算機(SX-ACE)、スカラ処理用計算機(SGI UV20、UV30)とフロントエンドサーバ(NEC Express5800、SGI Rackable)、大容量ファイルシステム(DDN SFA12K-20、NEC iStorage D3-30)を中心に構成し、ネットワークはノード間接続装置(IXS)・InfiniBand等を採用している。

SX-ACEによるベクトル計算のピーク性能は98.3 TFLOPS(合計384ノード、1ノードあたり、256GFLOPS)である。また、以下の特徴を有している。

- 大容量24TBメインメモリ搭載(64GB/node)
- 8GB/sノード間接続装置(IXS)

スカラ処理用計算機は以下の特徴を有している。

- 13.56GB/sノード間接続装置(4X InfiniBand FDR×2セット、スカラ処理用計算機用)

大容量ファイルシステムは以下の特徴を有している。

- 大容量ファイルシステム(約1.6PB)

なお、上記システムについては、2019年11月末で運用を終了しており、2020年3月に新システム(SX-Aurora TSUBASA A511-64)へと更新した。ただし、新システムによる2019年度運用実績はわずかであるため、本年報での記述は割愛している。

キーワード:

SX-ACE、SX-9/A(ECO)、ベクトル、スカラ、大容量メモリ、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 概要

2013（平成25）年6月より、NIESは、NECスーパーコンピュータシステムを導入し、2015年3月までSX-9/A（ECO）を運用した。2015年6月^(※1)からは図1に示すベクトル処理用計算機SX-ACEに増強して運用している。

コンピュータシステムは、ベクトル処理用計算機、スカラ処理用計算機、フロントエンドサーバ（ベクトル用、スカラ用）、大容量ファイルシステムを中心に構成した。このコンピュータシステムの全体構成を、図1に示す。

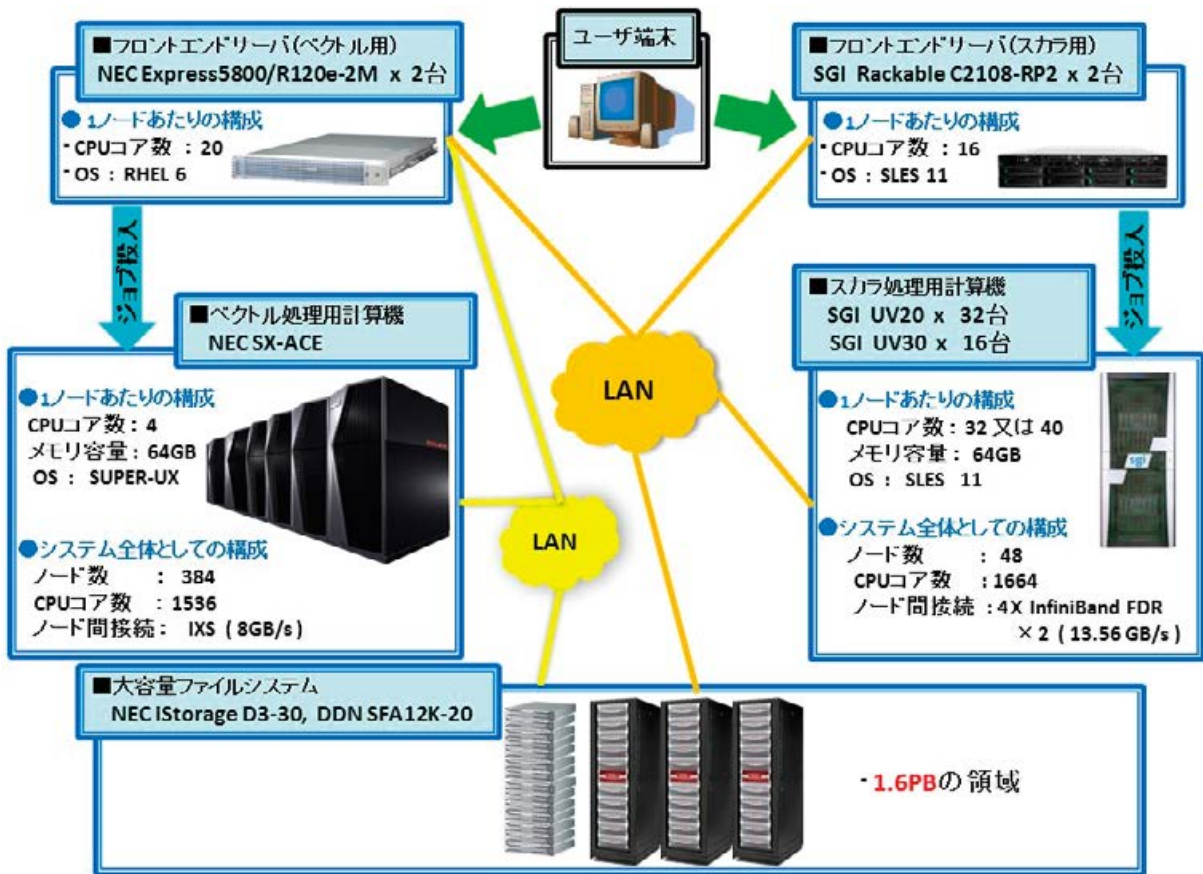


図1. システム概要図（2016年11月以降）。

サブシステムには、NEC Express5800/R120e-2M（ベクトル用フロントエンドサーバ）、SGI UV20・UV-30^(※2)（スカラ処理用計算機）、SGI Rackable Standard-Depth Servers C2108-RP2（スカラ用フロントエンドサーバ）、DDN SFA12K-20、NEC iStorage D3-30（大容量ファイルシステム）などを含む。サブシステム間のネットワークは4X InfiniBand FDRにて接続されている。

ベクトル処理用計算機の、ベクトル計算のピーク性能は 98.3 TFLOPS (1 ノードあたり、256GFLOPS) である。また、以下の特徴を有している。

- 大容量 24 TB メインメモリ搭載 (64GB/node)
- 8GB/s ノード間接続装置 (IXS)

スカラ処理用計算機は以下の特徴を有している。

- 13.56GB/s ノード間接続装置 (4X InfiniBand FDR×2 セット、スカラ処理用計算機用)

大容量ファイルシステムは以下の特徴を有している。

- 大容量ファイルシステム (約 1.6PB)

ベクトル処理用計算機、スカラ処理用計算機 及びフロントエンドサーバは、GridScaler (GPFS 相当) や ScaTeFS により、大容量ファイルシステムとのファイル共有を実現している。

※1 2015 年 6 月に、以下のシステムの入れ替え、及び新規導入を行った。

- ベクトル処理用計算機 (SX-ACE)
- ベクトル用統合コンソール装置 (NEC Express5800)
- ベクトルノード間接続装置 (IXS)
- ベクトル用バッチサーバ (NEC Express5800)
- ベクトル用環境監視装置 (ND-EW04)
- ベクトル通報用サーバ (NEC Express5800)
- ベクトル用ネットワーク装置 (スイッチ等)
- ベクトル用フロントエンドサーバ (NEC Express5800)
- 大容量ファイルシステム (NEC iStorage M300)
- バックアップ用サーバ (NEC Express5800)

※2 2016 年 11 月に、以下のシステムの追加導入を行った。

- スカラ処理用計算機 (SGI UV30)

1.2 システムの特徴

1.2.1 SX-ACE によるベクトル処理

ベクトル処理用計算機として、ベクトル型スーパーコンピュータ SX-ACE 384 ノードを実装した。SX-ACE は、最大ベクトル性能が CPU コアあたり 64 GFLOPS、シングルノード当たりの最大ベクトル性能が 256 GFLOPS をもつベクトル型スーパーコンピュータである。データ転送性能は、メモリの最大転送理論性能：256GB/s、ノード間理論性能：8 GB/s を実現しており、スペックは表 1 に示す。

実効性能でも、数値演算の代表的なベンチマークプログラム Linpack において 92.31 TFLOPS を実現している。

表 1. システムのスーパーコンピュータ性能 (2015 年 6 月 1 日～2019 年 11 月 30 日)。

	SX-ACE
ノード数	384 nodes
CPU コア数	1536 CPU コア
理論演算性能	98.3 TFLOPS (256 GFLOPS/node)
メモリ容量	24 TB

1.2.2 Xeon E5 シリーズを採用したスカラ処理用シミュレーション環境の実現

スカラ処理用計算機として、CPUに8コアプロセッサ Intel Xeon EP E5-4640 (2.4GHz) を4個搭載したサーバ SGI UV20 を高速なネットワーク 4X FDR InfiniBand (56Gbps) 2セットで結合したシステムを搭載している。

Xeon 5500/5600 番台のコアマикроアーキテクチャを発展させたアーキテクチャを持ち、32nm デザインルールを用いた低消費電力設計の CPU である。実効性能でも、Xeon 5500 番台に対し、Intel AVX の SIMD 拡張命令セットにより、演算性能が2倍になっている。

また、2016年11月に増強したスカラ処理用計算機は、CPUに10コアプロセッサ Intel Xeon EP E5-4627 v4 (2.6GHz) を4個搭載したサーバ SGI UV30 を高速なネットワーク 4X FDR InfiniBand (56Gbps) 2セットで結合したシステムを搭載している。

16nm デザインルールを用いた CPU である。メモリは DDR4-2400 をサポートする。演算性能は Intel Xeon EP E5-4640 (2.4GHz) の約2倍になっている。

1.2.3 柔軟な拡張性を備えたストレージシステム

汎用的な解析処理や高速なデータ処理が可能で、かつ、高信頼性のストレージシステムを実現するために、DDN 製「SFA12K シリーズ」、NEC 製「iStorage シリーズ」をはじめとしたシステムを搭載する。ファイルシステムの特徴は、以下のとおり。

- ベクトル利用領域では、SX-ACE の I/O に最適化した分散・並列ファイルシステム (ScaTeFS) を構築することにより、高速な I/O を実現する。
- スカラ機及びフロントエンドのサーバでは、ファイルサーバと各機器間において、4X FDR InfiniBand (GridScaler (GPFS 相当)) による高速ファイル共有を実現する。

キーワード：

SX-ACE、ベクトル、スカラ、大容量メモリ、大容量ファイルシステム

2. スーパーコンピュータ利用実績

2.1 計算機利用時間（平成31年度～令和元年度：2019年4月1日～2019年11月30日）

延べ CPU 時間：

v_try (トライアル用)	: 0.00 hours (所内課題：0.00 hours, 所外課題：0.00 hours)
v_deb (デバック用)	: 4,492.02 hours (所内課題：3,482.91 hours, 所外課題：1,009.11 hours)
v_32cpu (1～32CPU 用)	: 1,940,296.10 hours (所内課題：1,904,591.78 hours, 所外課題：35,704.32hours)
v_96cpu (33～96CPU 用)	: 1,746,937.35 hours (所内課題：1,661,371.30 hours, 所外課題：85,566.05hours)
v_160cpu (97～160CPU 用)	: 1,882,677.63 hours (所内課題：1,882,677.63 hours, 所外課題：0.00 hours)
計	: 5,574,541.65 hours (所内課題：7,990,152.19 hours, 所外課題：240,904.51hours)

注) 平成31年度～令和元年度の所内課題数は8(休止課題1を含む)、所外課題数は4。

2.2 利用詳細

2.2.1 運用支援

運用支援として、システム運用管理、運用提案、利用支援（問い合わせ、チューニングなど）を行っている。

令和元年度のジョブクラスの設定は表 2 および表 3 の通りで、運用状況により、適宜定を改善している。このため表 3 スカラジョブクラス設定は 2017 年度半ばからの改良版を示した。

表 2. ベクトルジョブクラス設定（2019年11月末まで）。

キュー名	用途	最大同時 実行数*1	経過時間 制限	ジョブあたりの 最大メモリサイ ズ	リクエスト あたりの使 用可能CPU数	実行ノード
v try	1～32CPU利用	- (2)	24H	63.1GB/node	1～32	scv001 – scv360
v deb	1～160CPU利用	2 (2)	0.5H	63.1GB/node	1～160	scv345 – scv384
v 32cpu	1～32CPU利用	- (-)	24H	63.1GB/node	32	scv001 – scv360
v 96cpu	33～96CPU利用	- (-)	24H	63.1GB/node	96	scv001 – scv360
v 160cpu	97～160CPU利用	- (-)	24H	63.1GB/node	160	scv001 – scv360

*1 括弧内数字は、各ユーザの同時実行可能本数。

表 3. スカラジョブクラス設定 (2017年9月から2019年11月末まで)。

キュー名	用途	最大同時 実行数	経過時間 制限	ジョブあたりの 最大メモリサイズ	実行ホスト
s_single	シングルジョブ	96	336H	8GB	scs02-scs05, scs21- scs22,scs26, scs28- scs30, scs34-scs36
s_p4	4 CPUジョブ	96	336H	32GB	scs03-scs05, scs21- scs22,scs26,scs28- scs30,scs34-scs36
s_p8	8 CPUジョブ	96	336H	62GB	scs03-scs05, scs21- scs22,scs26,scs28- scs30,scs34-scs36
s_p16	16 CPUジョブ	128	336H	62GB	scs03-scs06, scs21- scs22,scs26,scs28- scs30,scs34-scs36
s_p32	32 CPUジョブ	480	336H	62GB	scs03-scs05,scs07- scs22,scs26,scs28- scs30,scs34-scs36
s_p96	96 CPUジョブ	384	1344H	186GB	scs09-scs17, scs21- scs22,scs26, scs28-scs30
s_large	160 CPUジョブ	384	168H	310GB	scs09-scs17, scs21- scs22,scs26,scs28- scs30,scs41-scs44
s_nrc	大気汚染予測システム	32	336H	124GB	scs23
s_nwc	大気汚染予測システム	256	336H	496GB	scs45-scs48
s_gosat	Gosat定常運用ジョブ	48	336H	93GB	scs24-scs25
s_matlab	MATLAB専用ジョブ	3	168H	12GB	scs25
s_idl	IDL専用ジョブ	5	168H	12GB	scs25
s_debug	デバック用 (シングルジョブ)	8	6H	2GB	scs25

2.2.2 計算機利用状況

システムの運用を開始した2015（平成27）年6月から運用を終了した2019（令和元）年11月までのベクトル処理用計算機SX-ACEの利用状況を、投入ジョブ数（図2）およびCPU時間（図3）によって示す。

2019年度（平成31年4月～令和元年11月）の投入ジョブ数は期間を通して安定していて、前年の2018年度と同程度、2015年度や2017年度に比べると少なくなっている。ただし図3から明らかのように、これは必ずしもCPU時間が減ったことを意味するわけではなく、2019年度のCPU使用時間はむしろ増加している。確定されたモデルとジョブ形態によって、SX-ACEの終了時の11月まで計算が精力的に行われたためだと考えられる。

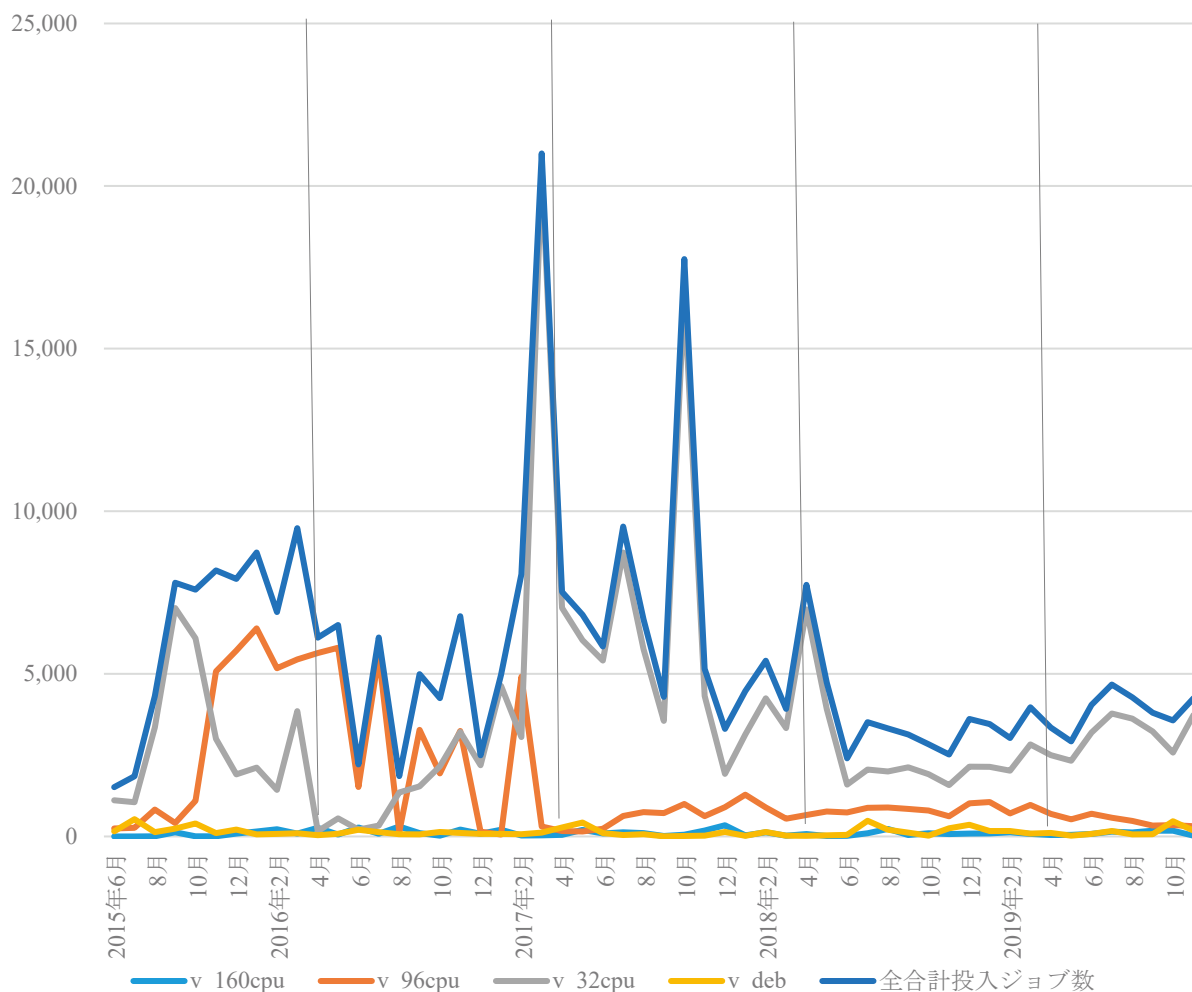


図 2. 2015～2019年度（平成27～令和元年度）投入ジョブ（リクエスト）数からみたシステム利用状況。縦の点線は年度の区切りを表す。

2019年度（平成31年4月～令和元年11月）のCPU時間の合計使用量（図3、濃青線）は、昨年度と同レベルの高い水準であった。SX-ACEの運用は2019年11月末までだったので、今年度は、例年夏に行っていた国立環境研究所の節電対策の一環としてのCPUの一部停止（384ノード中64ノードの停止、約17%）を行わなかった。それゆえ2019年8月には高いCPU使用時間を示している。この時のCPU使用率は80%を超えており、仮に夏季のCPUの一部停止を例年どおりに行ったとすると、ジョブ待ち等の弊害を生じたものと思われる。v_160cpuは、ユーザからの要望によって2015年8月18日に新設されたジョブクラスであるが、2019年度の使用量は当初に比べ増加した（図3、水色線）。図2に示されたとおり、2019年度の投入ジョブ数は減ったが、使用CPU時間はむしろ増加しており、年度を通して安定した、高い使用率の利用であった。

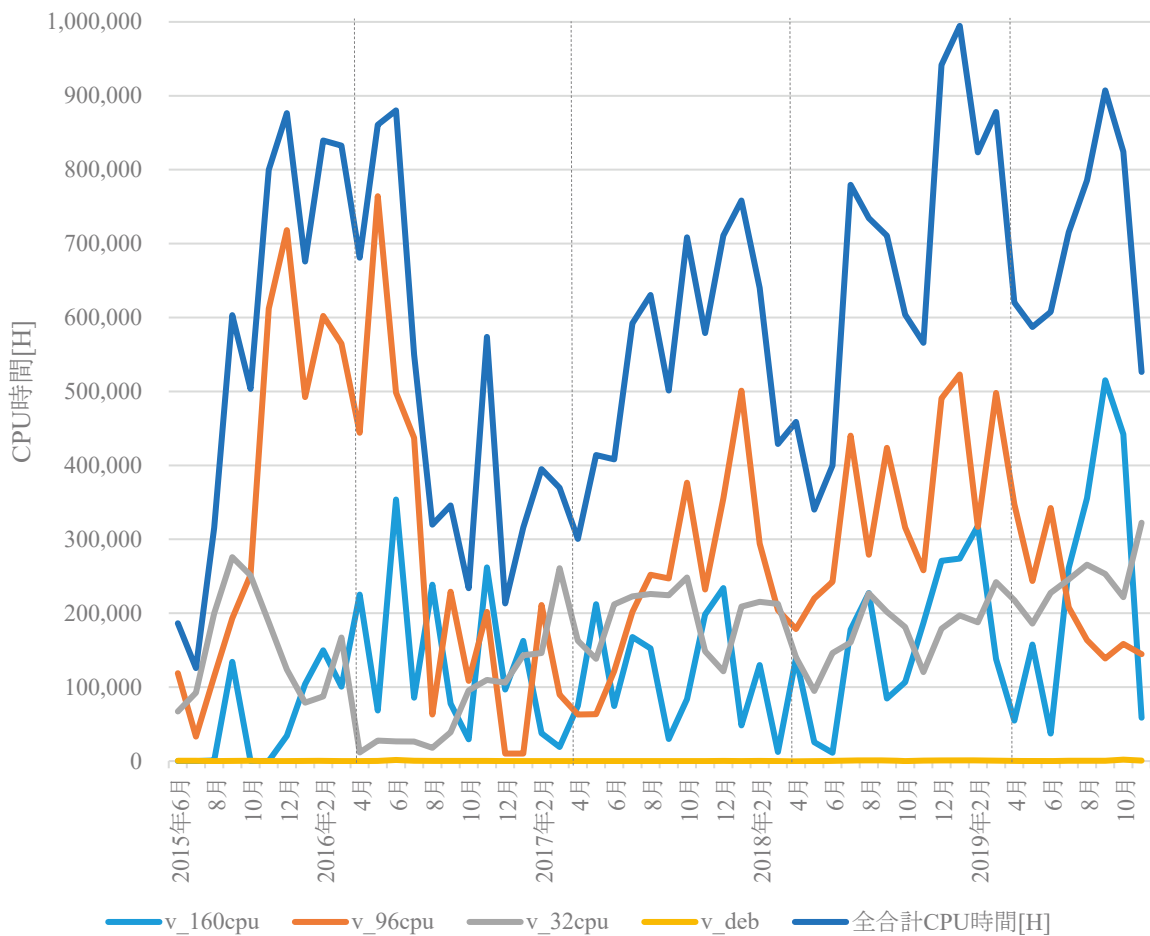


図 3. 2015～2019年度（平成27～令和元年度）CPU時間からみたシステム利用状況。縦の一点鎖線は年度の区切りを表す。

3. 本システムの機能強化点

以下では、SX-ACE 導入に伴い本システムにおける機能強化点である、バッチ処理システム、ジョブスケジューリング機能を有する NQSII の拡張スケジューラ JobManipulator と ADB (Assignable Data Buffer) 等について記載する。

3.1 拡張スケジューラ JobManipulator

JobManipulator は、計画的なリソース管理機能によってシステム稼働率の最大化を実現する高機能バッチスケジューラである。

ジョブ実行に必要な計算リソースを計画的に割り当て、占有利用を可能にするバックフィル・スケジューリングを提供すると共に、ユーザ、グループ、および組織単位に、公平なジョブの優先度制御を実現するフェアシェア・スケジューリング機能や、ジョブの実行開始時刻と必要リソース量を保証する事前予約機能をサポートする。

バックフィル・スケジューリング機能では、リクエストの実行予定時間 (ELAPSE 時間) と必要リソース量 (CPU、メモリ) をもとに、計算リソースの有効活用と高稼働率を実現することが可能となる。

フェアシェア・スケジューリング機能では、ユーザ、グループ、組織を単位とした計算リソースの配分比とリソース使用実績に基づき、リクエストの優先度制御を行うことが可能となる。

割り込みアサイン制御機能では、優先リクエストに対する計算リソース割り当てを保証し即時実行を可能にする。

同時実行数制限機能では、システムやユーザ単位で同時実行可能なジョブ数を制限する。

3.2 SX-ACEの高いコア性能と広いコアメモリ帯域

単一コアで高い性能や広いメモリ帯域を実現する、従来の SX ベクトルアーキテクチャを継承しつつ、アーキテクチャの強化と低消費電力設計により、64 ギガフロップス (GFLOPS : 1 秒間に 10 億回の浮動小数点演算性能) のコア性能と、64 ギガバイト/秒のコアメモリ帯域を実現した。

これにより、一般に多数のプロセッサの利用を必要とするスカラ型並列コンピュータと比較して、少ないプロセッサ数でも、複雑な科学技術計算において高い性能が得られ、並列プログラミングの負担も軽減される。

「SX シリーズ」初となる新開発マルチコア・ベクトル CPU には、高性能コアを 4 つ搭載し、256 ギガフロップスの演算性能と 256 ギガバイト/秒のメモリ帯域を実現する。

このマルチコア・ベクトル CPU を 1 ノードとして、片方向あたり 8 ギガバイト/秒の超高速インターコネクトにより、複数のノード間を接続することで、マルチノードによる高い実効性能を実現する。

3.3 SX-ACEの最先端の高密度設計や冷却技術による低消費電力、省スペースの実現

4 つの高性能コア、メモリ制御部、ネットワーク制御部、および I/O (周辺) 制御部 1 チップに集約したプロセッサを小型のノードカードに搭載。

これにより、従来機種比で、同一性能あたり 10 分の 1 の消費電力、および 5 分の 1 の設置面積を実現した。

3.4 使いやすさを重視した計算環境

「SX-ACE」は、ユーザが培ってきたアプリケーション資産をそのまま継承して、高速にアプリケーションを実行することが可能である。

また、高いコア性能の実現により、従来と比較して少ないコア数で高い演算性能の利用が可能となり、スーパーコンピュータのアプリケーション開発者・研究者に対し、プログラミングや性能向上が容易なシステムを実現している。

また、「SX-ACE」の性能を最大限に活用可能なコンパイラ・ライブラリ群、プログラム開発支援機能を提供している。

3.5 SX-ACEのADB (Assignable Data Buffer)

ADB はプロセッサ-メモリ間ネットワーク内にあり、主にベクトルデータを選択的にバッファリングする機能を有している。ADB とベクトルユニット間のデータ転送は、プロセッサ-メモリ間より高いデータ転送性能を、より短いレイテンシで実現できるため、利用頻度の高いデータを ADB に配置することで、さらに実効性能を高めることが可能となる。また、これによりメモリトラフィックの削減とメモリバンク競合の回避も可能となり、マルチプロセッサでの並列処理における性能低下を抑制することができる。

ベクトルデータの格納に対しては、それぞれのベクトルロード/ストア命令ごとに ADB を利用するかどうかを制御できるため、必要なデータが意図せず ADB から追い出されることを防ぐことが可能である。さらに、より ADB を積極的に利用できるように、新規命令としてプリフェッチ命令を追加して、ソフトウェア制御によるプリフェッチ機能をサポートしている。

ある配列、ポインタの指示先を `on_adb` コンパイラ指示オプションで指定したとき、あるいは、コンパイラの自動判断により ADB を利用することが指定されたとき、それらのベクトルロード、ベクトルストアは ADB 経由で行われる。そのとき、それらの最初のベクトルロード、またはベクトルストアにおいて、データが ADB にバッファリングされる。そして、次にそれらのデータを利用するときには、ADB にバッファリングされたデータがロードされる。ADB からは、メモリからロードするより高速にデータをロードできるため、2回目以降のベクトルロードを高速化できる。

本機能は、コンパイラオプションによる明示的指定も可能だが、コンパイラによる自動解析による指定も積極的に行われる。

Overview of the NIES Supercomputer Systems

Environmental Information Department, National Institute for Environmental Studies
NEC Corporation

Abstract:

At the National Institute for Environmental Studies (NIES), the NEC supercomputer system, SX-9/A(ECO) (for the vector calculation server) was in operation from June 2013 to March 2015. From June 2015, a new system, SX-ACE started operation. Also, SGI UV30 was added to the scalar processing computer from November 2016.

The system was configured of an SX-ACE (for the vector calculation server) and other central machines; SGI UV20, UV30 (for the scalar calculation server), NEC Express5800 (for the vector front-end server), SGI Rackable (for the scalar front-end server), and DDN SFA12K-20 and NEC iStorage D3-30 (for the large capacity file system), among others. The network utilized an IXS and 4X InfiniBand FDR.

The SX-ACE had a peak vector performance of 98.3 TFLOPS (256 GFLOPS per node), and had the following features:

- 24 TB of main memory (64GB per node)
- inter-node crossbar switch (IXS) interface at 8 GB/s

The scalar calculation server (SGI UV20, UV30) had the following features:

- two 4X InfiniBand FDR at 13.56 GB/s

The large capacity file system had the following features:

- large capacity file system (approx. 1.6 PB of raid disk)

However, the operation of SX-ACE was finished at the end of November 2019. We are now operating a new system, SX-Aurora TSUBASA A511-64 from March 2020. The operating report of the new system will be published as a part of the NIES Supercomputer Annual Report 2020.

Keywords:

SX-ACE, SX-9/A(ECO), vector computer, scalar computer, large-scale memory, 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)

.....

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)

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>

令和元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
高見昭憲 国立研究開発法人国立環境研究所地域環境研究センター
江守正多 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
秋吉英治 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

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

令和元年度

NIES Supercomputer Annual Report 2019

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-I151-2020]

2020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。

リサイクル適性の表示：紙へリサイクル可

本冊子は、グリーン購入法に基づく基本方針における「印刷」に係る判断の基準にしたがい、印刷用の紙へのリサイクルに適した材料〔Aランク〕のみを用いて作製しています。