

# 共同研究報告書

令和5年度

東京大学 大気海洋研究所  
気候システム研究系

# 目次

令和5年度共同研究報告書の発行にあたって

令和5年度共同研究応募及び配分一覧

## 【特定共同研究】

1. ①衛星データと数値モデルの融合による雲の素過程の研究  
②全球雲解像モデルの開発及びデータ解析  
分担課題：大気粒子と短寿命気体及び雲との相互作用に関するモデリング研究 .....5
2. 衛星データと数値モデルの融合による雲の素過程の研究  
分担課題：領域高解像モデルを用いた雲とその関連過程に関する素過程研究 .....7
3. 世界海洋大循環モデルの相互比較  
分担課題：大気海洋研究所および気象研究所の世界海洋大循環モデルの相互比較 .....9
4. 衛星データと数値モデルの複合利用による温室効果気体の解析  
分担課題：衛星データと数値モデルの複合利用による温室効果ガスの解析 .....11
5. 全球雲解像モデルの開発及びデータ解析  
分担課題：雲解像モデルにおける物理過程の高度化 .....13
6. 高分解能大気モデル及び領域型気候モデルの開発  
分担課題：アジアモンスーンの数値シミュレーションのための物理過程の高度化と  
データ同化手法の開発 .....15
7. 海洋物質循環・古海洋研究のためのモデル開発・数値実験  
分担課題：海洋物質循環モデルを用いた氷期の海洋炭素循環変動に関する研究 .....17
8. 海洋モデルにおけるサブグリッド現象のパラメータ化  
分担課題：海洋深層における乱流拡散のパラメタリゼーション .....19

【一般共同研究】

1. 海洋棚氷相互作用に関わるモデル同化、生態系モデル結合、古環境モデル開発 .....	21
2. 気候変動予測の不確実性低減に資する海洋大循環モデルの精緻化 .....	23
3. NICAM 及び MIROC モデルを用いた汎惑星気象予測・物質輸送・気候変動の研究 .....	25
4. 金星気象現象の全球非静力学モデル NICAM による解明 .....	27
5. 気象・気候シミュレーションを用いた惑星規模現象のメカニズムに関する研究 .....	29
6. MIROC と NICAM を用いた地球型惑星におけるスノーボール状態突入条件の解明 .....	30
7. 気候モデル・全球雲解像モデルを用いた熱帯大気研究 .....	31
8. 深層学習を用いた降水予測モデルの開発 .....	33
9. 全球および領域雲解像モデルを用いた極端気象予測研究 .....	35
10. 海洋モデルを用いたケープダンレー沖南極底層水の沈み込み過程の再現 .....	37
11. 惑星中層大気大循環の力学 .....	39
12. エルニーニョ・南方振動現象の形成機構と鉛直乱流混合が果たす役割 .....	41
13. 全球雲解像モデルデータを用いた熱帯雲活動の解析 .....	43
14. 大型大気レーダーと全球高解像度モデルを相補的に用いた中層大気大循環の階層構造の解明 .....	45
15. 数値モデルを用いた東アジア大気循環の変動力学の探究 .....	47
16. 衛星データ活用による全球炭素収支推定に向けた大気モデル開発研究 .....	49

17. 沿岸－沖合移行帯域における物理場と生態系に関する数値的研究.....	51
18. 海洋における循環・水塊形成・輸送・混合に関する数値的研究.....	53
19. 海洋循環－低次生態系結合モデルを用いた魚類生息環境場の比較研究.....	54
20. 放射収支算定のための放射スキームの高速・高精度化.....	56
21. 非静力学海洋モデルの汎用化と OGCM へのシームレスな接続（準備中）.....	58
22. データ同化を用いた古気候復元に関する研究.....	59

## 令和5年度共同研究報告書の発行にあたって

東京大学大気海洋研究所では、気候システム研究系を中心に、地球温暖化に係る気候予測研究や、その基盤となる気候の基礎科学研究に取り組んでいます。特に、数値シミュレーションや人工衛星観測データ解析を強みとしつつ、国内外の様々な研究機関・研究者と連携しながら、気候変動に関する政府間パネル(IPCC)による評価報告書に資する研究等を展開してきました。本共同研究はそうした連携の重要な一翼を担うものです。

地球温暖化の影響は気候の様々な側面で顕在化し、豪雨や猛暑といった極端現象をはじめとして、人間の生活や社会への波及も深刻度を増しています。地球温暖化がもたらす社会影響の評価、地球温暖化対策の立案と有効性評価など、地球温暖化問題の解決に向けては幅広い学術分野を融合的な枠組みで捉えることが必要とされ、そうした研究の場面でも AI の活用など新規的な計算科学の展開が求められています。気候に係る諸問題に関して、新たな連携を構築し、新たな計算科学研究を推進する上でも、本共同研究の枠組みが有効であるものと考えます。

本共同研究が、伝統的な気候科学の基礎研究から先進的な文理融合研究に至る様々な分野に最先端研究の場を提供し、気候システムの理解と気候変動に係る課題解決の一助になることを願っています。

令和6年11月

東京大学大気海洋研究所 気候システム研究系 系長  
羽角 博康

2023年度 気候システムに関する共同研究 応募及び配分一覧

2023年度時点

研究区分	研究課題	研究組織	気候系担当教員	配分額				
				ノード時間	消耗品 千円	旅費 千円	合計 千円	
特定研究1	衛星データと数値モデルの融合による雲の素過程の研究 全球雲解像モデルの開発及びデータ解析	国立環境研究所 国立環境研究所・地域環境保全領域 北海道大学大学院理学研究院	五藤 大輔 主任研究員 打田 純也 特別研究員 佐藤 陽祐 准教授	鈴木 健太郎 佐藤 正樹	50,000	0	0	0
特定研究2	衛星データと数値モデルの融合による雲の素過程の研究	北海道大学大学院理学研究院 北海道大学大学院理学研究院 北海道大学大学院理学研究院 北海道大学大学院理学研究院 北海道大学大学院理学院 北海道大学大学院理学院	佐藤 陽祐 准教授 稲津 将 教授 石渡 正樹 教授 川添 祥 博士研究員 近藤 誠 大学院生 加藤 真奈 大学院生	鈴木 健太郎	100,000	0	80	80
特定研究3	世界海洋大循環モデルの相互比較	気象庁気象研究所 全球大気海洋研究部	浦川 昇吾 主任研究官 中野 英之 室長 豊田 隆寛 主任研究官 川上 雄真 研究官 青木 邦弘 研究官	羽角 博康	43,200	0	0	0
特定研究4	衛星データと数値モデルの複合利用による温室効果気体の解析	鹿児島大学	大橋 勝文 教授	今須 良一	3,000	0	80	80
特定研究5	全球雲解像モデルの開発及びデータ解析	富山大学	安永 数明 教授	佐藤 正樹	100,000	0	40	40
特定研究6	高分解能大気モデル及び領域型気候モデルの開発	気象庁情報基盤部 数値予報課 数値予報モデル技術開発室	氏家 将志 予報官 米原 仁 予報官 金濱 貴史 技術専門官 高橋 由美子 技術専門官 木南 哲平 技術専門官 齊藤 慧 技術主任 黒木 志洸 技官 林田 和大 技官 須藤 康平 技官	渡部 雅浩	16,000	0	0	0
特定研究7	海洋物質循環・古海洋研究のためのモデル開発・数値実験	富山大学学術研究部理学系	小林 英貴 特命助教	岡 顕	100000	0	0	0
特定研究8	海洋モデルにおけるサブグリッド現象のパラメータ化	福井県立大学海洋生物資源学部 東京海洋大学海洋環境科学部門 東京大学大学院理学系研究科	田中 祐希 准教授 日比谷 紀之 客員教授 伊地知 敬 助教	羽角 博康	60,000	0	0	0
小計					472,200	0	200	200

2023年度 気候システムに関する共同研究 応募及び配分一覧

2023年度時点

研究区分	研究課題	研究組織	気候系担当教員	配分額				
				ノード時間	消耗品千円	旅費千円	合計千円	
一般研究 1	海洋棚氷相互作用に関するモデル同化、生態系モデル結合、古環境モデル開発	北海道大学低温科学研究所 北海道大学大学院環境科学院 北海道大学大学院環境科学院 北海道大学大学院環境科学院	中山 佳洋 助教 瓢子 俊太郎 大学院学生 大谷 若葉 大学院学生 森吉 紘己 大学院学生	阿部 彩子	33,000	0	80	80
一般研究 2	気候変動予測の不確実性低減に資する海洋大循環モデルの精緻化	海洋研究開発機構 北極環境変動総合センター 海洋研究開発機構 環境変動予測研究センター 海洋研究開発機構 環境変動予測研究センター 海洋研究開発機構 地球情報科学技術センター	小室 芳樹 副主任研究員 鈴木 立郎 研究員 渡辺 路生 特任研究員 黒木 聖夫 准研究員	羽角 博康	100,000	0	0	0
一般研究 3	NICAM及びMIROCモデルを用いた汎惑星気象予測・物質輸送・気候変動の研究	東北大学大学院理学研究科        東京大学大学院総合文化研究科 情報通信研究機構 京都産業大学 大阪公立大学	黒田 剛史 助教 寺田 直樹 教授 笠羽 康正 教授 中川 広務 助教 鎌田 有紘 特任研究員 狩生 宏喜 大学院生 古林 未来 大学院生 池田 有里 大学院生 堀江 駿吾 大学院生 小玉 貴則 特任助教 笠井 康子 上席研究員 佐川 英夫 教授 前澤 裕之 准教授	佐藤 正樹 阿部 彩子	100,000	0	25	25
一般研究 4	金星気象現象の全球非静力学モデルNICAMによる解明	京都産業大学 京都産業大学 慶応義塾大学 東京海洋大学 京都産業大学 国立環境研究所	高木 征弘 教授 佐川 英夫 教授 杉本 憲彦 教授 関口 美保 教授 安藤 紘基 助教 八代 尚 主任研究員	佐藤 正樹	100,000	0	100	100
一般研究 5	気象・気候シミュレーションを用いた惑星規模現象のメカニズムに関する研究	お茶の水女子大学	神山 翼 助教 田村 香子 大学院生	渡部 雅浩	12,000	0	0	0
一般研究 6	MIROCとNICAMを用いた地球型惑星におけるスノーボール状態突入条件の解明	東京大学総合文化研究科 先進科学研究機構 海洋研究開発機構 地球環境部門 東北大学大学院 理学研究科	小玉 貴則 特任助教 齋藤 冬樹 研究員 黒田 剛史 助教	阿部 彩子 佐藤 正樹 宮川 知己	100,000	0	10	10
一般研究 7	気候モデル・全球雲解像モデルを用いた熱帯大気研究	東京大学大学院理学系研究科      東京大学情報基盤センター	三浦 裕亮 准教授 大野 梨野花 大学院生 橋本 恵一 大学院生 井野 創開 大学院生 上野 和雅 大学院生 井上 虹子 特任専門職員 山崎 一哉 助教	渡部 雅浩	100,000	0	0	0
一般研究 8	深層学習を用いた降水予測モデルの開発	東京大学 生産技術研究所     東京大学大学院工学系研究科	芳村 圭 教授 山崎 大 准教授 金子 凌 東京大学特別研究員 新田 友子 特任講師 B.M. Diani N.A. 大学院生 謝 文鵬 東京大学特別研究員 吉川 晴矢 大学院生 木野 佳音 助教 沖 大幹 教授	渡部 雅浩	100,000	0	0	0
一般研究 9	全球および領域雲解像モデルを用いた極端気象予測研究	海洋研究開発機構 地球環境部門   国立環境研究所 地球システム領域 北海道大学 環境科学院 東京大学 大気海洋研究所	中野 満寿男 研究員 小玉 知央 副主任研究員 山田 洋平 特任研究員 升永 竜介 研究員 八代 尚 主任研究員 荒金 匠 特任研究員 齋藤 成利 大学院生 菲澤 雄太朗 大学院生	宮川 知己 高須賀 大輔	50,000	0	0	0
一般研究 10	海洋モデルを用いたケープダンレー沖南極底層水の沈み込み過程の再現	北海道大学低温科学研究所	大島 慶一郎 教授 Mensah, Vigan 特任助教 中山 佳洋 助教	羽角 博康	50,000	0	60	60
一般研究 11	惑星中層大気大循環の力学	九州大学応用力学研究所	山本 勝 准教授	佐藤 正樹	1,000	0	60	60
一般研究 12	エルニーニョ・南方振動現象の形成機構と鉛直乱流混合が果たす役割	東京大学大学院理学系研究科	東塚 知己 准教授 田村 優樹人 大学院生 白井 健人 大学院生	渡部 雅浩	15,000	0	0	0
一般研究 13	全球雲解像モデルデータを用いた熱帯雲活動の解析	福岡大学理学部 富山大学学術研究部 東京大学大学院理学系研究科	西 憲敬 教授 濱田 篤 准教授 三浦 裕亮 准教授	佐藤 正樹	50,000	0	90	90
一般研究 14	大型大気レーダーと全球高解像度モデルを相補的に用いた中層大気大循環の階層構造の解明	東京大学大学院理学系研究科	佐藤 薫 教授 高麗 正史 助教 奥井 晴香 大学院生	羽角 博康	100,000	0	0	0
一般研究 15	数値モデルを用いた東アジア大気循環の変動力学の探究	東京大学先端科学技術研究センター	中村 尚 教授 小坂 優 准教授 宮坂 貴文 特任准教授 岡島 悟 助教 宮本 歩 特任助教 関澤 偲温 特任助教	渡部 雅浩	50,000	0	0	0
一般研究 16	衛星データ活用による全球炭素収支推定に向けた大気モデル開発研究	国立環境研究所	八代 尚 主任研究員 丹羽 洋介 主任研究員 齊藤 誠 主任研究員 佐伯 田鶴 主任研究員 村上 和隆 特別研究員 山田 恭平 特別研究員 Guangyu Liu 特別研究員	佐藤 正樹	50,000	0	0	0
一般研究 17	沿岸-沖合移行帯域における物理場と生態系に関する数値的研究	東京大学大気海洋研究所  鹿児島大学水産学部	伊藤 幸彦 准教授 柴野 良太 特任研究員 孫 文蕙 大学院生 堤 英輔 助教	羽角 博康	86,400	0	0	0
一般研究 18	海洋における循環・水塊形成・輸送・混合に関する数値的研究	東京大学大気海洋研究所	安田 一郎 教授 川口 悠介 助教 松浦 知徳 特任研究員 孫 恩愛 特任研究員 張 愛き 大学院生 佐々木 雄亮 大学院生	羽角 博康	6,000	0	0	0

2023年度 気候システムに関する共同研究 応募及び配分一覧

2023年度時点

研究区分	研究課題	研究組織		気候系担当教員	配分額				
					ノード時間	消耗品 千円	旅費 千円	合計 千円	
一般研究 19	海洋循環-低次生態系結合モデルを用いた魚類生息環境場の比較研究	東京大学大気海洋研究所	伊藤 進一 教授 松村 義正 助教 佐々木 千晴 学術支援職員 矢部 いつか 特任研究員 許 浩東 研究生	羽角 博康	20,000	0	0	0	
一般研究 20	放射収支算定のための放射スキームの高速・高精度化	東京海洋大学	関口 美保 教授	鈴木 健太郎	100	0	6	6	
一般研究 21	非静力学海洋モデルの汎用化とOGCMへのシームレスな接続	東京大学大気海洋研究所 東京大学大気海洋研究所 東京大学大学院新領域創成科学研究科 東京大学大学院新領域創成科学研究科 北海道大学低温科学研究所 北海道大学低温科学研究所 The University Centre in Svalbard 九州大学応用力学研究所 九州大学総合理工学府	松村 義正 助教 小松 幸生 准教授 王 業浩 大学院生 龔 含遠 大学院生 中村 知裕 講師 伊藤 薫 学術研究員 大橋 良彦 Guest postdoctoral fellow 木田 新一朗 准教授 松浦 浩巳 大学院生	羽角 博康	100,000	0	0	0	
一般研究 22	データ同化を用いた古気候復元に関する研究	弘前大学	岡崎 淳史 助教 Matthew McKenny 研究機関研究員	阿部 彩子 吉森 正和	8,000	0	0	0	
小計					1,231,500	0	431	431	
特定共同合計					8	件	472,200	0	200
一般共同合計					22	件	1,231,500	0	431
合計					30	件	1,703,700	0	631

# 大気粒子と短寿命気体及び雲との相互作用に関するモデリング研究

## A modeling study of interaction between atmospheric particles, short-lived gases and clouds

五藤 大輔, 国立環境研究所, E-mail: goto.daisuke(at)nies.go.jp

打田 純也, 国立環境研究所, E-mail: uchida.junya(at)nies.go.jp

佐藤 陽祐, 北海道大学大学院理学研究院, E-mail: yousuke.sato(at)sci.hokudai.ac.jp

Daisuke Goto and Junya Uchida, National Institute for Environmental Studies

Yousuke Sato, Faculty of Science, Department of Earth and Planetary Sciences

Hokkaido University

### 要旨

これまで継続的に開発してきた全球 14 km 解像度の大气汚染物質輸送モデル NICAM-Chem を用いて、2 種類の異なる雲微物理モデルを用いたエアロゾルシミュレーションを実施することで、エアロゾル自身の時空間分布およびエアロゾル雲相互作用にどのような違いが生じるかを調べた。その結果、2 種類の異なる雲微物理モデルによって、エアロゾル自身の時空間分布は最大 20% 程度の差が生じたが、どちらの結果も観測の不確実性の範囲内に収まる結果であった。しかし、エアロゾル雲相互作用に関しては、雲微物理モデルの違いによって大きく異なり、有効放射強制力を見積もると  $0.55 \text{ Wm}^{-2}$  もの大きな差が生じることがわかった。これは、エアロゾル雲相互作用の指標となる 2 つの物理量である雲粒の大きさと雲水量の双方で違いが生じたことに起因しており、より精緻化された雲微物理モデルを利用する必要性が示唆された。

### 1. はじめに

大気中に浮かぶ粒子（大気粒子、あるいは、エアロゾル）は、大気環境だけではなく、気候にも影響を与えている。国際的な気候変動問題に対応するため、日本においても  $\text{CO}_2$  などの長寿命温室効果ガスと併せて、大気汚染物質でもある短寿命気候強制因子（SLCFs）の削減政策を組み合わせることで、気候変動緩和策を早急に検討する必要があると考えられている。本研究では、全球雲解像モデル（NICAM）<sup>1,2,3)</sup> に結合したエアロゾル化学統合モデル（NICAM-Chem）<sup>4,5)</sup> を用い、モデル内で取り扱われている大気粒子とその前駆気体である短寿命気体との相互作用に着目したエアロゾル化学の精緻化と、エアロゾルと雲の相互作用に関するモデリングの高度化を行うことを目的としている。

### 2. 問題設定・方法

大気汚染物質輸送モデルである NICAM-Chem<sup>4,5)</sup> を用いて、世界最高解像度レベルの全球 14 km 格子で全球エアロゾルシミュレーションを実現した。高解像度化によって、特に都市部及び極域でのエアロゾル再現性が向上し<sup>6,7)</sup>、雲エアロゾル相互作用の表現が従来の気候モデルよりも劇的に向上した<sup>8)</sup>。昨年度報告したように、モデルはバージョンを v16 から v19 に更新し、さらに鉛直格子を従来の 38 層から 78 層に高解像度化している。以上の成果を踏まえて、本年度は雲微物理モジュールを 1 モーメントバルク法である NSW6<sup>9)</sup> から 2 モーメントバルク法である NDW6<sup>10)</sup> に更新した。これにより、エアロゾル時空間分布およびエアロゾル雲相互作用にどのような違いが生じるかを調べた。産業革命前と現在におけるエアロゾル排出量を仮定し、それぞれのシミュレーションを 6 年間実施し、それぞれのシミュレーションで計算された放射強制力の差分を取ることで、エアロゾル放射相互作用の有効放射強制力（ERFari）とエアロゾル雲相互作用の有効放射強制力（ERFaci）を計算した。議論を端的にするために、本報告書では放射強制力に焦点を当てた。なお、これらの結果は、Goto et al. (2024)<sup>11)</sup> にて公表している。

### 3. 結果と考察

図 1 は、本研究の設定で計算した全球年平均値の ERFari と ERFaci である。比較のため、全球 14 km および 56 km 格子で NSW6 を用いて計算した ERFari と ERFaci の結果<sup>9)</sup> も載せている。この結果から、NDW6 と NSW6 を用いて計算された ERFari は 20% 程度 ( $0.04 \text{ Wm}^{-2}$ ) の差となることがわかった。この差は、モデルのバージョンの異なる HRM<sup>6)</sup> との違い ( $0.07 \text{ Wm}^{-2}$ ) よりも小さく、モデル解像度が 14 km と 56 km 格子の違いによって生じる ERFari の差 ( $0.06 \text{ Wm}^{-2}$ ) よりも小さかった。しかし、ERFaci に関しては NDW6 と NSW6 を用いて計算された結果には大きな差 ( $0.55 \text{ Wm}^{-2}$ ) が生じた。この差は、モデルのバージョンの異なる HRM<sup>6)</sup> との違い ( $0.20 \text{ Wm}^{-2}$ ) よりも大きく、モデル解像度の違いによって生じる ERFari の差 ( $0.17 \text{ Wm}^{-2}$ ) よりも大きかった。

エアロゾル放射相互作用に関しては、エアロゾル自身の時空間分布の差が反映されたことから、エアロゾル存在量の差と同程度であり、この結果は NDW6 と NSW6 の雲雨変換割合の違いによって生じたものと解釈できる。しかし、エアロゾル雲相互作用に関しては、関連する物理量である雲水量や雲粒有効半径を比較すると、どちらの物理量の変化も NDW6 を用いた結果の方が大きかった。したがって、NDW6 と NSW6 において雲とエアロゾルの相互作用と、その相互作用によって変化する雲水・雲氷・降水の水物質の変化によって、その差が大きくなったと解釈できる。

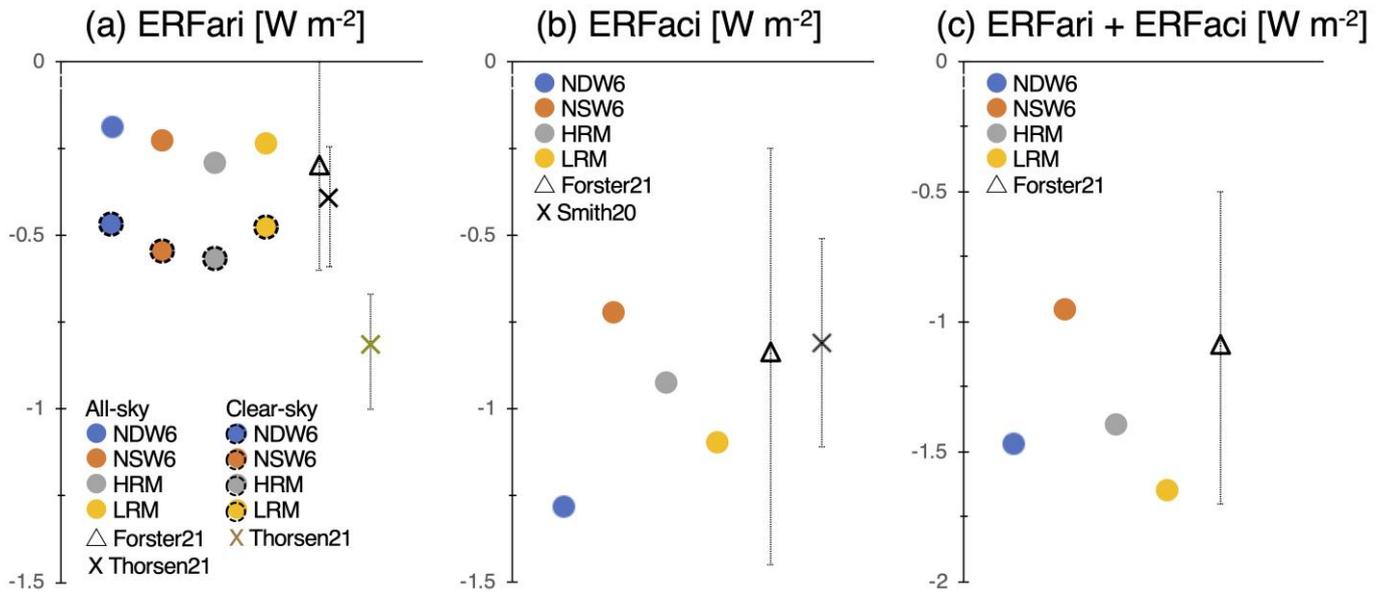


Fig. 1 Global and annual mean values of (a) effective radiative forcing for anthropogenic aerosol-radiation interaction (ERFari) for net (sum of shortwave and longwave) radiation, (b) ERFaci for anthropogenic aerosol-cloud interaction, and (c) the net ERF (sum of ERFari and ERFaci). All units are in  $W m^{-2}$ . In ERFari, the reference of Forster21 is estimated in the net radiation by IPCC-AR6 or Forster et al. (2021)<sup>12</sup>, whereas the reference of Thorsen21 is estimated in the shortwave radiation by Thorsen et al. (2021)<sup>13</sup>. The reference for Smith20 is Smith et al. (2020)<sup>14</sup>. These are shown in Goto et al. (2024)<sup>11</sup>.

#### 4. まとめと今後の展望

全球大気汚染物質輸送モデル NICAM-Chem を用いて、世界最高解像度レベルである全球 14km のエアロゾルシミュレーションを、高度化された雲微物理モデル NDW6 を用いて実施したところ、NSW6 を利用した結果に比べて、特にエアロゾル雲相互作用が大きく異なることが明らかとなった。得られた放射強制力は IPCC で得られている不確実性の範囲内に入るものであるが、両者の放射強制力の差はかなり大きいため、今後はこの違いに起因する過程を詳細に解析し、モデル素過程としてはより現実的なものである NDW6 を用いて計算した結果の妥当性を示したい。

#### 参考文献

- (1) Tomita H., and M. Satoh, 2004: *Fluid Dyn. Res.* 34, 357–400
- (2) Satoh M., T. Matsuno, H. Tomita, T. Miura, T. Nasuno, S. Iga, 2008 : *J. Comput. Phys.* 227, 3486–3514
- (3) Satoh M., H. Tomita, H. Yashiro, H. Miura, C. Kodama, et al., 2014: *Prog. Earth Planet. Sci.* 1, 18-49
- (4) Suzuki K., T. Nakajima, M. Satoh, H. Tomita, T. Takemura, T. Y. Nakajima, G. L. Stephens, 2008: *Geophys. Res. Lett.* 35, L19817
- (5) Goto, D., T. Nakajima, T. Dai, H. Yashiro, Y. Sato, K. Suzuki, et al., 2018: in: Land-Atmospheric Research Applications in South and Southeast Asia, edited by: Vadrevu, K., Ohara, T., and Justice, C., *Springer Remote Sensing/Photogrammetry*, Springer, Cham
- (6) Goto D., Y. Sato, H. Yashiro, K. Suzuki, E. Oikawa, R. Kudo, T. M. Nagao, T. Nakajima, 2020: *Geosci. Model Dev.*, 13, 3731-3768
- (7) Sato Y., H. Miura, H. Yashiro, D. Goto, T. Takemura, H. Tomita, T. Nakajima, 2016: *Sci. Rep.*, 6, 26561
- (8) Sato Y., D. Goto, T. Michibata, K. Suzuki, T. Takemura, H. Tomita, T. Nakajima, 2018: *Nat. Comm.*, 9, 985
- (9) Tomita, H., 2008: *J. Meteorol. Soc. Jpn.*, 86A, 121-142
- (10) Seiki, T., T. Nakajima, 2014: *J. Atmos. Sci.*, 71 (2), 833–853
- (11) Goto D., T. Seiki, K. Suzuki, H. Yashiro, T. Takemura, 2024: *Geosci. Model Dev.*, 17(2), 651-684
- (12) Forster, P., and Coauthors, 2021: Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 923–1054
- (13) Thorsen, T. J., D. M. Winker, R. A. Ferrare, 2021: *J. Clim.*, 34, 195-214
- (14) Smith, C. J., and Coauthors, 2020: *Atmos. Chem. Phys.*, 20, 9591–9618

# 領域高解像モデルを用いた雲とその関連過程に関する素過程研究

Fundamental study of clouds and their relating process by using a high-resolution regional model.

佐藤 陽祐, 北大・理学研究院, E-mail: yousuke.sato@sci.hokudai.ac.jp  
稲津 将, 北大・理学研究院, E-mail: inaz@sci.hokudai.ac.jp  
石渡 正樹, 北大・理学研究院, E-mail: momoko@gfd-dennou.org  
川添 祥, 北大・理学研究院, E-mail: kawazoe@sci.hokudai.ac.jp  
Yousuke Sato, Faculty of Science, Hokkaido University  
Masaru Inatsu, Faculty of Science, Hokkaido University  
Masaki Ishiwatari, Faculty of Science, Hokkaido University  
Sho Kawazoe, Faculty of Science, Hokkaido University

## 要旨

本研究では雲の昇華成長と雲粒捕捉成長によって形成された雲の質量を予報変数として計算する Process Tracking Model を結合した SCALE を用いた疑似温暖化実験により、北海道の降雪粒子の将来変化について調べた。結果から、北海道の冬季の降雪粒子は将来気候では霰や雲粒付が多くなることが見込まれた。この結果は、将来における北海道の降雪粒子が現在の北陸のそれに似たものになることを示している。

## 1. はじめに

雲・降水・降雪とその関連過程(雷やエアロゾルなど)は気候予測や気象予測における最も大きな不確実性要因の一つである。その一つの要因は、気象・気候モデルの多くで雲とその関連過程を簡略化されたさまざまなパラメタリゼーションで表現していることである。富岳をはじめとした大型計算機を含めた計算機の計算能力の飛躍的な向上によって、パラメタリゼーションを用いず雲微物理モデルによって雲・降水・降雪を直接表現する雲解像モデルが主流になり、全球モデルでも雲解像モデル(例えば NICAM(Tomita et al. 2005; Tomita and Satoh 2004; Satoh et al. 2014)など)が用いられ始めているが、依然として雲・降水・降雪とその関連過程に起因する不確実性は大きい。そのため、数値モデルにおける雲・降水・降雪やその関連過程を精緻に表現するための取り組みは、気象・気候予測の精度向上だけでなく、雲やその関連過程の本質的な理解のために重要である。

そこで本研究では、雲・降水・降雪とエアロゾルや雷といった雲の関連過程を直接表現し、領域高解像モデルとして利用されている次世代気象気候ライブラリ(SCALE: Nishizawa et al. 2015; Sato et al. 2015)を用いた数値実験により、雲・降水・降雪とその関連過程の科学的な理解度を向上させ、雲・降水・降雪とその関連過程に関する数値モデルの高度化に関する知見を得ることを目指した。

本年度は、主に降雪過程に着目した研究を実施した。具体的には、昇華成長と雲粒捕捉成長によって形成された雲の質量を予報変数として追跡する Process Tracking Model (PTM: Hashimoto et al. 2020)を SCALE に結合した数値モデルによって冬季北海道を対象とした数値実験を実施し、将来気候を疑似的に表現する疑似温暖化実験(Pseud-Global Warming Experiment: PGWE, Adachi and Tomita 2020)を実施し、その結果の解析から北海道で観測される降雪粒子の将来変化の傾向を調べた。

## 2. 問題設定・方法

利用した SCALE の version 5.3.6 である。力学の計算には HEVI を用い、雲物理スキームは PTM を実装した 2 モーメントバルク法(Seiki and Nakajima 2014)を、放射、乱流の効果はそれぞれ MSTRN-X(Sekiguchi and Nakajima 2008)、MYNN(Nakanishi and Niino 2006)を用いて計算した。地表面からの熱と運動量フラックスはバルク法で計算し、バルク係数は(Beljaars and Holtslag 1991)に基づいて計算した。海洋モデルは用いず、後述する初期値の値で固定して計算を実施した。計算対象領域は北海道を覆う領域(図1)である。

実験は PTM を結合した SCALE を用いた力学的ダウンスケーリングによって、現在気候と、将来気候を想定した PGWE の 2 種類の実験を実施した。計算対象期間は 2020 年 12 月~2021 年 2 月の 90 日間であり、1 日ごとに前日の 18 時から 30 時間の実験を実施し、最初の 6 時間をスピナップ期間として解析対象から外し、90 日の各実験の最後の 24 時間のみを解析した。初期値と境界値には気象庁のメソ解析値(MANL、水平解像度 5km、3 時間間隔)の風速、気圧、温度( $T$ )、比湿から計算される相対湿度(Relative Humidity: RH)、地表気温などを用いた。PGWE は、現在気候の計算に d4PDF(Mizuta et al. 2017)の 4K 上昇実験における図1の領域の気温と、d4PDF の現在気候の気温との差の平均を MANL の気温に加えたものを初期値・境界値として力学的ダウンスケーリングを行った。その際、RH は固定のままとすることで、将来気候における水蒸気量の増加を表現した。

なお本研究で用いる PTM は温度ごとの昇華成長と雲粒捕捉成長によって生成された固体降水粒子の質量を予報変数として予報する。これらのカテゴリは(Nakaya 1954)に基づいて大まかに固体降水粒子の形状の情報を反映していると捉えることができる。本研究ではこれらの固体降水粒子の形状に焦点を当てて解析を行った。

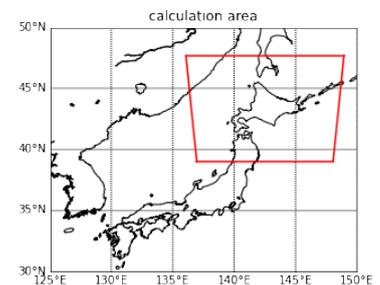


Fig. 1 Calculation domain depicted by red square

### 3. 結果と今後の展望

図2左は現在気候の対象期間全体で最も地表での固体降水に寄与していた成長プロセスを示したものである。現在気候では柱状結晶の成長が卓越する温度帯 ( $-36 < T < -20$  °C) での昇華成長による寄与が最も大きい地域が広範囲に広がっている。一方で将来においては、固体降水が卓越する北海道西部を中心に雲粒捕捉成長による寄与が最も大きい領域が広範囲に広がり、次に板状結晶の成長が卓越する温度帯 ( $-20 < T < -10$  °C) での昇華成長の寄与が多い領域が広がっている (図2右)。

一方で、現在気候で寄与が大きかった柱状結晶の成長が卓越する温度帯 ( $-36 < T < -20$  °C) での昇華成長による寄与が大きい領域は無くなっていた。この結果は、北海道における固体降水は、現在気候では昇華成長による寄与が支配的であるのに対して、将来気候では、雲粒捕捉成長による寄与が大きくなり、雲粒付きや霰が主体となることを意味している。このような雲粒付や霰が主体となる固体降水は、現在気候における北陸の固体降水と似通っており (Hashimoto et al. 2020)、将来、北海道の雪が現在気候における北陸のような雪になることを示している。今後は北海道のみならず日本の領域を対象とした数値実験を実施し、固体降水粒子の将来変化についてのより包括的な理解に努める。なおこの成果は投稿論文としてまとめ米国気象学会の学会誌である *Journal of the Applied Meteorology and Climatology* に投稿し、現在改訂中である (Sato et al. 2024)。

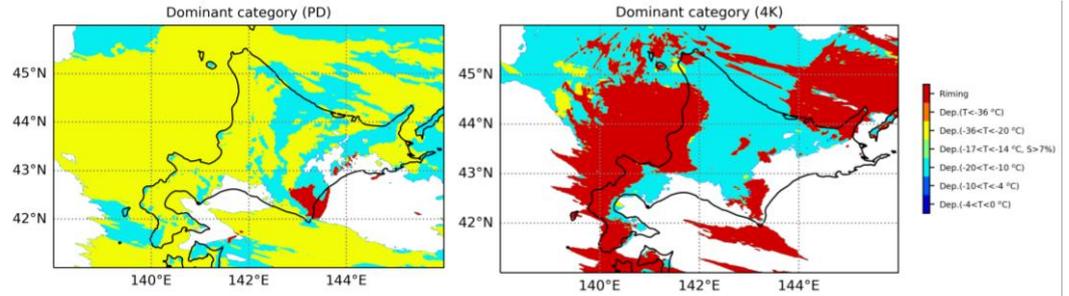


Fig. 2 Dominant category of PTM to the mass of the surface solid precipitation on (left) present day and (right) future. Dark blue, blue, sky blue, green, yellow, orange, and red represent that the largest mass fraction remaining in the solid surface precipitation is the depositional growth of Irregular needle ( $-4$  °C  $< T < 0$  °C), the depositional growth of Needle/Columnar ( $-10$  °C  $< T < -4$  °C), the depositional growth of Plate ( $-20$  °C  $< T < -10$  °C), the depositional growth of Dendrite ( $-17$  °C  $< T < -14$  °C,  $S > 7\%$ ), the depositional growth of Columnar ( $-36$  °C  $< T < -20$  °C), the depositional growth of Other habit ( $T < -36$  °C), and Riming. S means supersaturation over ice. (Sato et al. 2024)

### 参考文献

- (1). Adachi, S. A., and H. Tomita, 2020: Methodology of the Constraint Condition in Dynamical Downscaling for Regional Climate Evaluation: A Review. *J. Geophys. Res.: Atmos.*, 125, <https://doi.org/10.1029/2019JD032166>.
- (2). Beljaars, A. C. M., and A. A. M. Holtslag, 1991: Flux Parameterization over Land Surfaces for Atmospheric Models. *J. Appl. Meteorol.*, 30, 327-341
- (3). Hashimoto, A., H. Motoyoshi, N. Orikasa, and R. Misumi, 2020: Process-Tracking Scheme Based on Bulk Microphysics to Diagnose the Features of Snow Particles. *SOLA*, 16, 51-56
- (4). Mizuta, R., and Coauthors, 2017: Over 5,000 Years of Ensemble Future Climate Simulations by 60-km Global and 20-km Regional Atmospheric Models. *Bull Am Meteorol Soc*, 98, 1383-1398
- (5). Nakanishi, M., and H. Niino, 2006: An Improved Mellor-Yamada Level-3 Model: Its Numerical Stability and Application to a Regional Prediction of Advection Fog. *Boundary Layer Meteorol*, 119, 397-407
- (6). Nakaya, U., 1954: Snow crystals, natural and artificial. Harvard University Press, 510 pp.
- (7). Nishizawa, S., H. Yashiro, Y. Sato, Y. Miyamoto, and H. Tomita, 2015: Influence of grid aspect ratio on planetary boundary layer turbulence in large-eddy simulations. *Geosci Model Dev*, 8, 3393-3419
- (8). Sato, Y., S. Nishizawa, H. Yashiro, Y. Miyamoto, Y. Kajikawa, and H. Tomita, 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, [doi:10.1186/s40645-015-0053-6](https://doi.org/10.1186/s40645-015-0053-6).
- (9). Sato, Y., M. Kamada, A. Hashimoto, and M. Inatsu, 2024: Future change in the contribution of riming and depositional growth to the surface solid precipitation in Hokkaido, Japan. *J. Appl. Meteorol. Clim.* In revision
- (10). Satoh, M., and Coauthors, 2014: The Non-hydrostatic Icosahedral Atmospheric Model: description and development. *Prog Earth Planet Sci*, 1, 18, [doi:10.1186/s40645-014-0018-1](https://doi.org/10.1186/s40645-014-0018-1).
- (11). Seiki, T., and T. Nakajima, 2014: Aerosol Effects of the Condensation Process on a Convective Cloud Simulation. *J Atmos Sci*, 71, 833-853
- (12). Sekiguchi, M., and T. Nakajima, 2008: A k-distribution-based radiation code and its computational optimization for an atmospheric general circulation model. *J Quant Spectrosc Radiat Transf*, 109, 2779-2793
- (13). Tomita, H., and M. Satoh, 2004: A new dynamical framework of nonhydrostatic global model using the icosahedral grid. *Fluid Dyn Res*, 34, 357-400,
- (14). Tomita, H., H. Miura, S. Iga, T. Nasuno, and M. Satoh, 2005: A global cloud-resolving simulation: Preliminary results from an aqua planet experiment. *Geophys Res Lett*, 32, 1-4

# 大気海洋研究所および気象研究所の世界海洋大循環モデルの相互比較

## Ocean model intercomparison of AORI and MRI

浦川 昇吾, 気象研, E-mail: surakawa(at)mri-jma.go.jp  
中野 英之, 気象研, E-mail: hnakano(at)mri-jma.go.jp  
豊田 隆寛, 気象研, E-mail: ttoyoda(at)mri-jma.go.jp  
青木 邦弘, 気象研, E-mail: kaoki(at)mri-jma.go.jp  
川上 雄真, 気象研, E-mail: y-kawakami(at)mri-jma.go.jp  
羽角 博康, 東大・大気海洋研, E-mail: hasumi(at)aori.u-tokyo.ac.jp  
Shogo Urakawa, Meteorological Research Institute  
Hideyuki Nakano, Meteorological Research Institute  
Takahiro Toyoda, Meteorological Research Institute  
Kunihiro Aoki, Meteorological Research Institute  
Yuma Kawakami, Meteorological Research Institute  
Hiroyasu Hasumi, Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo

### 要旨

気象研究所で主に開発されている「MRI.COM」に昨今提唱された grease ice scheme を導入し、海氷生成過程の高度化を実施した。従来型スキームを用いた実験に比べ、海氷厚の増加、底層循環の強化、底層高温バイアスの緩和などが認められた。

### 1. はじめに

大気海洋研究所が中心となり開発されている海洋大循環モデル「COCO」や気象研究所で主に開発されている「MRI.COM」はそれぞれ、日本国の主要な地球システムモデルである「MIROC」と「MRI-ESM」の海洋要素である。間近に控えた第7次結合モデル相互比較計画(CMIP7)に向けて、これらのモデルの開発が各関連機関にて進められているところである。2020年度から2022年度にかけて気候システム研究系共同研究の枠組みで実施された海洋モデル相互比較プロジェクト日本版「OMIPj」を通して、気象研においてもCMIP7に向けて海氷モデルの高度化を中心とした開発が実施されてきた。一方で、このようなモデル開発はモデルに内在する誤差補償のために一般的に必ずしもそのモデルが持つバイアスの低減につながるとは限らない。複数のプロセスが互いに相殺し合う誤差を持ってモデル内で表現されているとき、特定プロセスのみの改善は他のプロセスの誤差の発露につながり、モデル全体のバイアスが悪化することがあるからである。MRI.COMを用いた全球海洋モデル実験においても、非現実的なウェッジル海での外洋深層対流の抑制に成功したが、深層・底層水の高温バイアスが悪化するという問題に直面した。MRI.COMではこの問題に対し海氷モデルの更なる高度化によって対応すべく開発を進めている。

### 2. 問題設定・方法

極域海洋では、大気からの強い冷却等により海水温が結氷点を下回る過冷却状態になったとき、frazil ice と呼ばれる小さな氷の結晶が生成される。Frazil ice は海面付近に浮上し、周囲の海水とともに grease ice と呼ばれる油状の混成物を構成する。Grease ice が更なる冷却等を経験し複数の段階を経て成長していけば、一定の厚さを持った海氷に変質する。冷却を受けずに大気からの加熱を受ければ、frazil ice が融解し、海氷へと変質することなく海水へと戻る。MRI.COMではこのような海氷の成長過程を表現しておらず、過冷却水が存在すれば、過冷却分のエネルギーに対応した量の海氷を開水面全体に即座に生成する。このモデル表現は開水面を断熱材として働く海氷で早期に覆ってしまうことにつながり、開水面での新規海氷生成の阻害につながり得る。昨今では海氷の成長過程の一部をパラメタライズした grease ice scheme が提案されており(e.g., Smedsrud, 2011)、海洋大循環モデルへの導入事例も報告されている(e.g., Smedsrud and Martin, 2015; Mackie et al., 2020)。

これらの先行研究を参考にMRI.COMに grease ice scheme を導入した。従来型の新規海氷生成スキームを利用する標準実験CTRLと grease ice scheme を利用した感度実験GREASEを実施し、 grease ice scheme による海氷・海洋場への影響を定量的に評価した。実験設定はCMIP6/OMIP2に準拠した。大気外力にJRA55-do v1.5を使用し、World Ocean Atlas 2013 version 2の温位・塩分分布を初期値として静止状態から366年間の時間積分を実施した。

### 3. 結果と考察

結果の一例として、両実験の海氷厚の3月及び9月別気候値(1980-2009年平均)と偏差を図1に示す。Grease ice scheme の導入により、両半球で海氷厚が増加する傾向にあることがわかる。特に南半球夏季に影響が大きく、広い領域で0.5 mを超えて海氷厚が増加している。GREASE 実験では各半球で水平積算した海氷体積は両半球ともにCTRL 実験よりも増加しており、海氷生成が促進されていることが示唆される。これに伴い、南緯30度におけるインド-太平洋への底層水北上流量は1.4 Sv 強化された。また底層水の高密度化も認められた。その一方で北緯26.5度での北大西洋深層水南下流量には大きな違いは見られなかった。底層水の高密度化・底層循環の強化に伴い、GREASE 実験ではCTRL 実験の深層・底層に見られた高温バイアスが緩和された。全球水平平均値で3割程度の緩和に留まるが、パラメータ調整によって更に大きな効果を得ることも期待できる。Grease ice scheme の利用に伴う計算コスト増は全体の1%にも満たないため、実用面でも効果的なスキームであることがわかった。

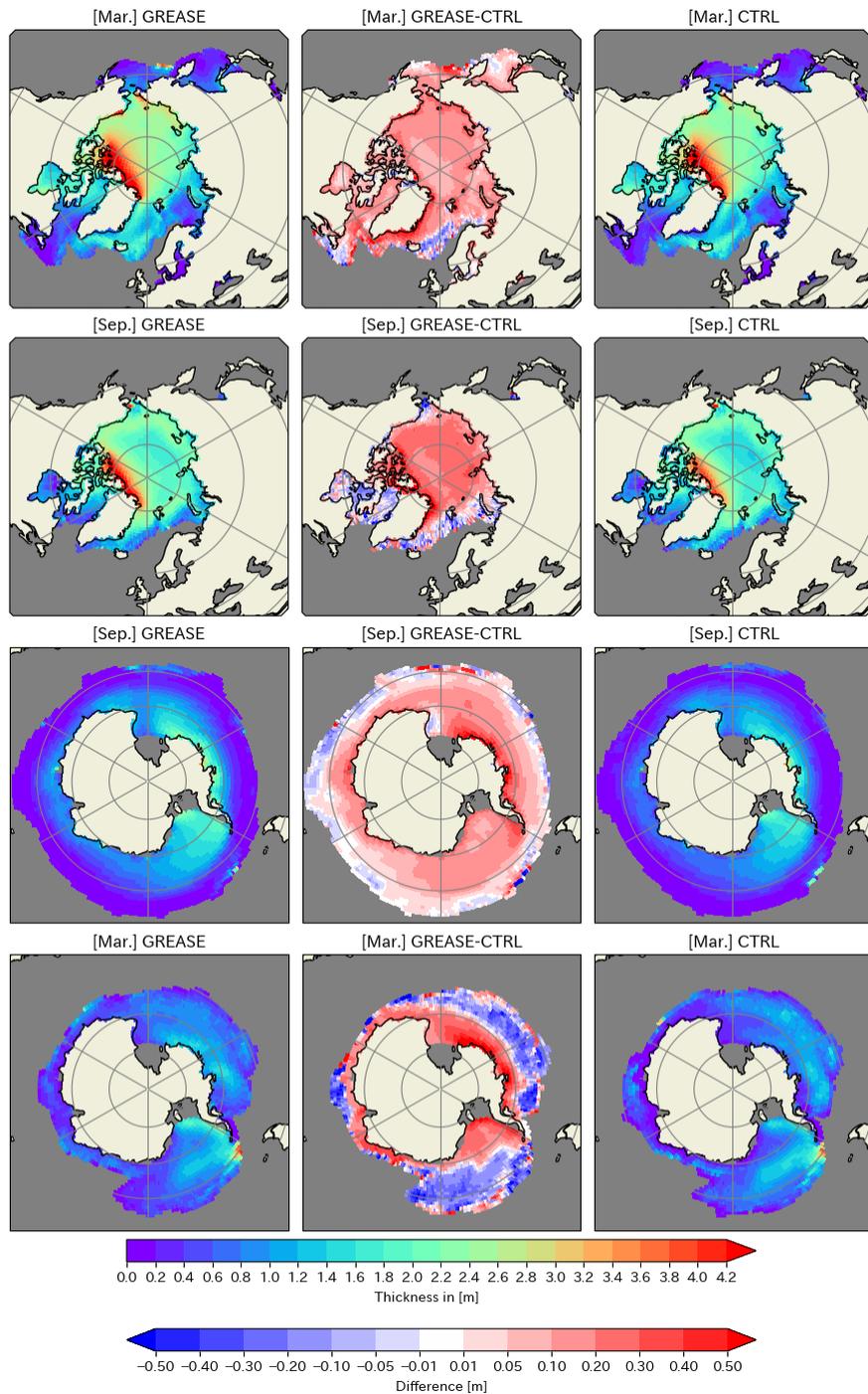


Fig. 1 Sea ice thickness distributions of the experiment GREASE (left column) and the experiment CTRL (right column), and their difference (center column). Climatological average from 1980 to 2009 in units of [m].

#### 4. まとめと今後の展望

気象研究所で主に開発されている「MRI.COM」に grease ice scheme を導入し、海洋モデルの性能向上に効果的なスキームであることを確認した。今後は実験結果の更なる解析によって性能向上の要因を詳細に調査したい。また本スキームのパラメータにはまだ調整の余地があるため、感度実験を通して CMIP7 に向けた適切なパラメータ設定を模索したいと考えている。

#### 参考文献

- (1) Smedsrud, L. H., 2011: Grease-ice thickness parameterization. *Annals of Glaciology*, 52(57), 77-82.
- (2) Smedsrud, L. H., and T. Martin, 2015: Grease ice in basin-scale sea-ice ocean models. *Annals of Glaciology*, 56(69), 295-306.
- (3) Mackie, S., P. J. Langhorne, H. D. B. S. Heorton, I. J. Smith, D. L. Feltham, and D. Schroeder, 2020: Sea ice formation in a coupled climate model including grease ice. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 12, e2020MS002103.

# 衛星データと数値モデルの複合利用による温室効果ガスの解析

## Analysis of greenhouse gas concentrations by synergy of satellite data and numerical simulation model

大橋 勝文, 鹿児島大学・大学院理工学研究科, E-mail: [mohashi@ibe.kagoshima-u.ac.jp](mailto:mohashi@ibe.kagoshima-u.ac.jp)  
Masafumi Ohashi, Graduate School of Science and Engineering, Kagoshima University

### 要旨

今須教授らは、GOSAT や GOSAT-2 の GOSAT シリーズによる温室効果ガスの分布の把握に努めている。一方、大橋は、Fiber Etalon Solar Carbon (FES-C)計測器を今須教授らにより南鳥島に、Optical Spectrum Analyzer(OSA)を我々が東京学芸大学附属高校の屋上に設置して計測を行っている。その観測データを研究分担代表者が所属する鹿児島大学に送ってもらい、東京大学大気海洋研究所のスパコン等によりデータ解析を進めた。南鳥島の観測データを解析した二酸化炭素カラム量結果は、気象庁が南鳥島の地上で計測している二酸化炭素量から約 3 ppm 下がった濃度となっていた。この違いから、地表近くで起きている現象に関する情報が得られる可能性がある。FES-C、OSA による観測は、GOSAT/GOSAT-2 の観測データの検証が目的であり、南鳥島の FES-C による二酸化炭素平均カラム量は、GOSAT のデータとほとんど一致した結果を示した。

### 1. はじめに

近年、温室効果ガスの二酸化炭素量の大气中の濃度の増加が問題になっている。この二酸化炭素濃度の分布と変化の把握が重要になっている。海外では OCO-2 などの衛星による観測や Fourier Transform Spectrometers (FTS)を世界各地に設置して組織的に計測している Total Carbon Column Observing Network (TCCON)らによって行われている。日本では、今須教授らにより GOSAT や GOSAT-2 の GOSAT シリーズによる温室効果ガスの分布の把握に努めている。一方、大橋は、地上に温室効果ガスのカラム量を計測する機器を設置して二酸化炭素カラム量を計測し、その解析を進めているこの観測結果を解析したデータと GOSAT シリーズの観測結果との比較による衛星データの評価が、本研究の目的である。

### 2. 計測および解析方法

二酸化炭素平均カラム量の計測は、国立研究開発法人科学技術振興機構 (JST) の支援「世界標準を目指した光学的二酸化炭素自動計測器の実用化開発」と JST 研究成果展開事業 (先端計測分析技術・機器開発プログラム) 課題「CO<sub>2</sub> 大気カラム濃度自動計測装置の活用・普及促進」により開発した FES-C 計測器を今須教授らにより南鳥島に設置して行っている。同時期に、社会活動により温室効果ガスが排出されている大都会として東京に注目し、東京学芸大学附属高校の屋上に OSA を設置して行っている。その後、Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC) [1]の再解析データから観測地・観測時間で内挿した値から高度・気象データを算出して、さらに気象庁が提示している観測場所・観測場所付近の地上の気象データ[2]で、補正を行った高度・気象データにより観測地の吸収スペクトルをシミュレートすることで観測データを解析した。データ解析には東京大学大気海洋研究所のスパコン等を用いた。

### 3. 結果と考察

国立環境研究所が所有している FTS と Fiber Etalon Solar Carbon (FES-C)計測器との同時計測により得られた観測データの解析結果と比較した結果、感度係数(SF)が HITRAN2016 では 0.990 だったが、HITRAN2020 では 1.000 と見積もった。現在、HITRAN2020 用のプログラムやパラメータを用いて南鳥島での FES-C の観測データや Optical Spectrum Analyzer (OSA)による東京学芸大学附属高校での観測データに対して再解析を進めている。

2018 年 7 月 22 日から 2020 年 7 月 31 日まで、南鳥島における計測データを解析し、太陽が南中する時刻を正午とする Solar Time10 時から 14 時の感度補正後の平均値を●とし、その日の Solar Time10 時から 14 時の感度補正後の値の標準偏差をエラーバーとして示した (図 1)。地上から成層圏に向けて二酸化炭素が拡散することを示すために、気象庁のデータベースから南鳥島の地上で計測したデータを図 1 に重ねた。平均カラム量は地上の計測データに比べて 3 ppm 少ない値を示した。この違いから、地表近くで起きている現象に関する情報が得られる可能性があるため、南鳥島や関東平野の詳細な大気流解析を考えている。さらに、季節変動を把握するため、Ref.[3]を参考に 2 種類の周期関数と 1 次関数を組み合わせた式(1)で Fitting し、赤色の曲線で示した。2014~2016 年に東京学芸大学附属高校で行った結果[4]と同時期の国立環境研での観測データ[5]と Mauna Loa の地上の観測データ[6]とを比較した (表 1)。夏場は植物の光合成により全ての場所は 9 月に二酸化炭素量が少なくなった。二酸化炭素の発生源に近い東京やつくばは 2 月頃に最大値を示すが、南鳥島まで拡散するため南鳥島では 5 月が一年で最も多くなった。式(1)の Fitting 曲線から、年間 2.74ppm の二酸化炭素濃度の上昇が明らかになった。この値は世界の標準としている Mauna Loa の 2.55 に近い値していた。

$$CO_2 \text{ Mixing Ratio} = I_{intercept} + T_{rend} \cdot t + Amp_1 \cdot \cos\left(2\pi \frac{t - \phi_1}{365.25}\right) + Amp_2 \cdot \cos\left(4\pi \frac{t - \phi_2}{365.25}\right) \quad (1)$$

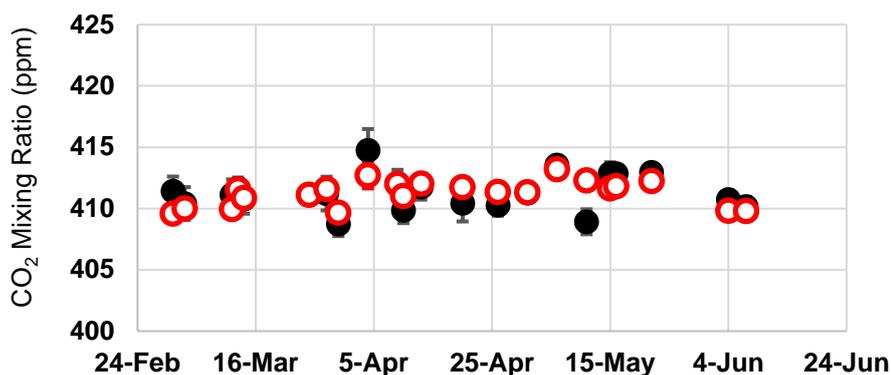


図1 国立環境研究所で観測した FES-C 補正值と FTS 値の比較 (Solar Time 10 時から 14 時)

● FES-C 補正值の平均値 (エラー値: 標準偏差) FES-C 補正值 = OSA/SF (SF:1.000) ○ FTS 値 (エラー値: 標準偏差)

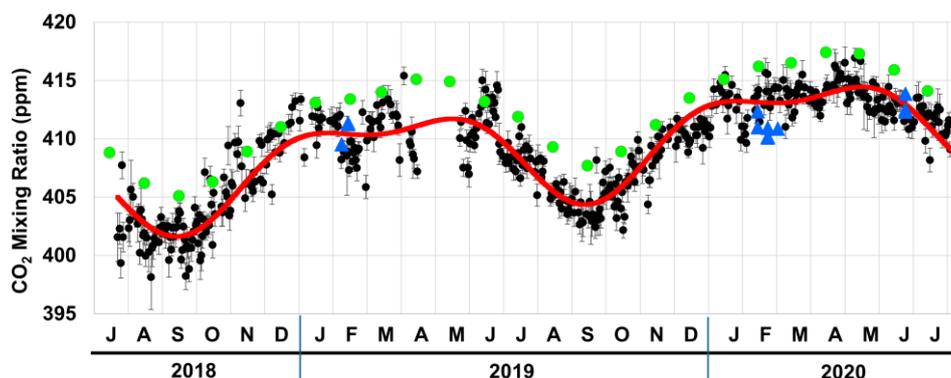


図1 南鳥島の CO<sub>2</sub> 平均カラム量解析結果

● FES-C 補正值 (SF 0.990), 赤線 Fitting 曲線, ▲ GOSAT 観測値 ● 気象庁観測の地上 CO<sub>2</sub> 量

表1 Fitting 関数の係数表

Site	Intercept (ppm)	T <sub>trend</sub> (ppm/y)	Amp <sub>1</sub> (ppm)	Amp <sub>2</sub> (ppm)	Max. Month	Min. Month	Ref.
南鳥島	394.2	2.74	3.71	1.67	5	9-10	This Work
東京	393.6	1.07	11.8	1.99	2	9	4
つくば	384.7	1.88	7.9	2.93	1-2	9	5
Mauna Loa	397.4	2.55	3.11	1.03	5	9	6

#### 4. まとめと今後の展望

HITRAN2016 の場合、Scale Factor が 0.990 と小さい値になったが、HITRAN2020 の場合、ほぼ 1.000 の値を見積もった。HITRAN データベースの CO<sub>2</sub> スペクトルデータの変更によりこのような違いを得た。そのため、HITRAN2020 による再計算を進めたが、Scale Factor の補正後のデータには大きな違いはなかった。

南鳥島に FES-C を設置して計測したデータを解析した結果、気象庁が南鳥島の地上で計測している二酸化炭素量から約 3 ppm 下がった濃度となっていた。GOSAT データと南鳥島に FES-C を設置して計測したデータとが、ほぼ一致した結果を得ることができた。現在、東京学芸大学付属高校の屋上に OSA を設置して行っている二酸化炭素平均カラム量計測データに対して HITRAN2020 を用いた解析を進めている。

#### 参考文献

- [1] [https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets/M2I3NPASM\\_5.12.4/summary?keywords=M2I3NPASM](https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets/M2I3NPASM_5.12.4/summary?keywords=M2I3NPASM)
- [2] <https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrm/index.php>
- [3] M. Inoue, et. al., "Validation of XCO<sub>2</sub> derived from SWIR spectra of GOSAT TANSO-FTS with aircraft measurement data", Atmos. Chem. Phys., 13, pp.9771–9788 (2013).
- [4] Xiu-Chun Qin, et. al. "Observation of column -averaged molar mixing ratios of carbon dioxide in Tokyo", Atmospheric Environment X, 2, pp. 1-8, (2019).
- [5] <https://data.caltech.edu/records/958>
- [6] <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/>

# 雲解像モデルにおける物理過程の高度化

## Development of Cloud Microphysics Parameterization in a Nonhydrostatic Cloud-system Resolving Model

安永数明, 富山大学

E-mail: yasunaga@sus.u-toyama.ac.jp

Kazuaki Yasunaga

### 要旨

数値気象モデルは、ある時点の大気状態とその変化を物理法則に基づいて定量的に予測する。大気には数多くの物理プロセスが含まれているため、それらを数値気象モデルで完全に表現することは不可能である。したがって数値気象モデルでは、いくつかの物理プロセスは、適当な仮定の下に近似的に取り扱われている。これをパラメタリゼーションとよぶ。極端気象に関わる豪雨、特に線状降水帯では雲微物理プロセスが重要な役割を果たしている。雲微物理パラメタリゼーションは、この降水プロセスを数値気象モデルにおいて取り扱うためのもので、水の相変化や粒子の衝突・併合等の複雑な過程を含んでいる。ここでは、粒子の平均的な半径や数密度に関わるパラメータが仮定されているが、これらのパラメータの値の妥当性は雲微物理パラメタリゼーションにおける大きな問題の1つであり、これを最適化することは降水の予報精度を向上させる鍵と考えられる。以上の背景を基に本研究では、雲微物理パラメタリゼーションに含まれているパラメータの最適化に関して、先行研究で提案された Green 関数法の有効性を調べた。ここでは、あるパラメータを真値として数値積分を行い、その結果の一部を抽出して適当なランダムノイズを加えて疑似的な観測値を生成した。別途、異なるパラメータを用いた数値積分を行い、その結果と生成した観測値が合うようにパラメータの修正を行い、最初の値に近づくかを確かめた。最初に、非常に単純化された熱対流モデル (Lorenz 1963 モデル) に適用したところ、非常に良い精度で元のパラメータの推定ができた。次に、実際の気象モデルを用いて、ある豪雨事例を対象に同様の実験を行ったところ、雲微物理モデルにおける雪と霰の切片パラメータに関しても、疑似的な観測値を生成した時のパラメータを、ある程度の精度で推定することが確認できた。すなわち気象数値モデルのパラメータの推定において、Green 関数法は有望な手法の1つであることが示唆された。

### 1. はじめに

近年、温暖化の進行に伴い豪雨等の極端気象の発生頻度が上がっているといわれており、その予報精度の向上は重要な課題である。そうした降水に関わる物理プロセスは、気象数値モデルでは雲微物理パラメタリゼーションで表現されている。現在使用されているパラメタリゼーションは、Lin et al. (1983)の研究から発展したもので、雲水、雨水、雲氷、雪、霰、雹など降水物質を幾つかの種類に区別しながら、水の相変化だけでなく粒子の衝突・併合等の複雑な過程を近似的に表している。またそのパラメタリゼーションでは、それぞれの粒子の平均的な半径や数密度に関わる経験的パラメータが用いられている。これらのパラメータは、複雑な雲微物理過程を経て降水量、雲の放射特性、力学的な構造に影響を与えることから、この値の妥当性は雲微物理パラメタリゼーションにおける大きな問題の1つである。また、これを最適化することは降水の予報精度を向上させる鍵と考えられる。先行研究である Menemenlis et al. (2005)では、海洋大循環モデルの気候の再現性を向上させるために、Green 関数法を用いたモデルパラメータの最適化の手法を提案した。これは誤差をベースラインに対して線形化できるという仮定のもと、二次形のコスト関数を最小化するようにパラメータを最適化するものである。このアプローチは、実装が比較的簡単であり、モデルの精度を大幅に向上させる可能性を持つ。ただし計算コストが制御パラメータの数に比例して増加する点は、実用化に際して問題となりうる点である。Menemenlis et al. (2005)では、Green 関数法を海洋 GCM に適用し、観測データとの比較を行った。その結果モデルの全体的なバイアスが減少し、従来の気候場の再現性と比較して顕著な改善が見られた。このことから、同手法を気象モデルのパラメータに適用することで、雲微物理過程のパラメータを最適化できる可能性がある。以上から本研究では Menemenlis et al. (2005)によって提案された Green 関数法を、理化学研究所によって開発された気象モデル SCALE の雲微物理モデルにおける雪と霰の切片パラメータに適用し、これらの経験的パラメータの最適化を行うことを通じて、モデルが極端な天候、特に豪雨に対する予報精度の向上を目指す。

### 2. 問題設定・方法

Menemenlis et al. (2005) の方法の基本的な考え方は、誤差がベースライン (最適化前のモデル) に基づいて線形に展開できるといものである。

$$\mathbf{y}_{obs} = \mathbf{baseline} + \mathbf{G}\boldsymbol{\eta} + \boldsymbol{\varepsilon}$$

ここでの  $\mathbf{y}_{obs}$  は観測値、 $\mathbf{baseline}$  はモデルパラメータ最適化前のモデル予測値、 $\mathbf{G}\boldsymbol{\eta}$  は一階補正項、残りの誤差を  $\boldsymbol{\varepsilon}$  とする。式を整理し、 $\mathbf{y}_{obs} - \mathbf{baseline}$  を  $\mathbf{y}_d$  で置き換えると、

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{y}_d - \mathbf{G}\boldsymbol{\eta}$$

となる。ここで行列  $\mathbf{G}$  は、モデルがパラメータ摂動に対する勾配と解釈でき、グリーン関数である。行列  $\mathbf{G}$  の  $j$  番目の列は、

$$g_{(j)} = \frac{G(e_j) - \text{baseline}}{e_j}$$

ここで $e_j$ は摂動ベクトル、 $\eta$ はパラメータの誤差(修正分)、 $G\eta$ はモデルがパラメータ修正分に対する反応である。コスト関数 $J$ には以下のように2つの項が含まれる。

$$J = \eta^T Q^{-1} \eta + \epsilon^T R^{-1} \epsilon$$

事前誤差共分散行列 $Q$ と $R$ に関して、大きな $Q$ 値を仮定すると $Q^{-1}$ は小さくなりコスト関数第1項の加重が減少する。これは元のパラメータへの信頼性が低いことを示し、大きな不確実性や誤差があると考えられる。小さな $Q$ 値の場合は、元パラメータを大きく調整する必要がないことを意味する。 $R$ も同様な効果がある。前式の $\epsilon$ をコスト関数に代入すると、

$$J = \eta^T Q^{-1} \eta + (y_d - G\eta)^T R^{-1} (y_d - G\eta)$$

となる。コスト関数 $J$ を最小化する条件は、

$$\frac{\partial J}{\partial \eta} = 2Q^{-1}\eta - 2G^T R^{-1}(y_d - G\eta) = 0$$

$$\eta = (Q^{-1} + G^T R^{-1} G)^{-1} G^T R^{-1} y_d$$

となる。これを通じて求められたパラメータの修正分に元のパラメータを加えると新しいパラメータ推定値が得られる。

$$\eta_{\text{new}} = \eta_{\text{old}} + \eta$$

### 3. 結果と考察

まず Menemenlis et al. (2005) の方法を, Lorenz (1963) システムに適用して, パラメータの推定精度を確かめる。Lorenz (1963) システムは, 次のように3つの微分方程式において $\sigma, \rho, \beta$ の3つのパラメータを含んでいる。

$$\begin{aligned} dx/dt &= \sigma(y - x) \\ dy/dt &= x(\rho - z) - y \\ dz/dt &= xy - \beta z \end{aligned}$$

まず $(\sigma, \rho, \beta) = (10, 28, 2.66)$ というパラメータを真値とし, 数値積分を行い観測値の生成をする。ただし生成した観測値には平均値=0、分散=0.1のガウスノイズを加える。検証実験では, そのパラメータの真値とは違う値(ここでは $(\sigma, \rho, \beta) = (12, 30, 3)$ とした)のシミュレーションを行い, パラメータを個別に(それぞれ $(\delta\sigma, \delta\rho, \delta\beta) = (1, 1, 0.1)$ )の摂動を与えて, Green関数法の最適化プロセスを通じてパラメータの真値に近づくかどうかを検証する。この結果,  $(\sigma, \rho, \beta) = (9.93 \pm 0.23, 27.21 \pm 0.22, 2.71 \pm 0.02)$ となり, Green関数法は非線形のシステムでもパラメータの最適化に適用可能であることが分かった。

次に, 気象数値モデルの雲微物理パラメタリゼーションに含まれている, パラメータの推定を客観解析値の可降水量を用いて行った。ここではSCALE (Scalable Computing for Advanced Library and Environment) とよばれる気象モデルを使用している。これは理化学研究所 (RIKEN) によって開発されているオープンソースのモデルである。雲微物理過程に関しては, Tomita (2008)で開発されたスキームを使用しており, このスキーム中に含まれる各種の降水物質の平均的な半径や数密度に関わる様々なパラメータの内, 雪の切片パラメータ ( $N0_S$ ) と霰の切片パラメータ ( $N0_G$ ) に着目した。2021年8月11日から19日にかけて九州から西日本において発生した豪雨事例を対象に, Green関数法を適用して確かめる。この検証実験では, Wainwright (2014)で提案されている

$$N0_S = 3.95 \times 10^8, N0_G = 5.26 \times 10^7$$

を真値とし観測値を生成する。最適化前のそれぞれのパラメータを, Tomita (2008)の規定値である

$$N0_S = 3.0 \times 10^6, N0_G = 4.0 \times 10^6$$

とし, 降水に最も関係の深い物理量の1つである可降水量を用いて推定を行ったところ, それぞれ

$$N0_S = 3.95 \times 10^8, N0_G = 2.58 \times 10^7$$

となった。すなわち新しい推定値は, いずれも観測値生成用のパラメータの方向へ戻った。前述のLorenz (1963)システムほど完璧な結果ではないが, これは3つのパラメータのみを持つ単純化されたシステムである一方で, 実際の大気は複雑なシステムであり, 強い非線形的プロセスが存在することを考慮すると十分有望な結果であると考えられる。

### 4. まとめと今後の展望

本研究ではGreen関数法を用いて, 複雑な非線形システムにおけるパラメータ最適化の可能性を調べた。特に, 気象モデルの雲微物理パラメータにおける雪と霰の切片パラメータに着目し, その最適化への適用可能性について確かめた。まず単純なLorenz (1963)モデルを用いた最適化検証実験を行い, 同モデルにおいてパラメータ推定値が元々の観測値生成用のパラメータに近づくことを示した。また現実的な気象モデルにおいてもパラメータの効果的な最適化を実現できることを, 実際の豪雨事例を対象に示した。これらの結果はGreen関数法が, 複雑な非線形システムにおいても適用可能であることを示唆している。今後は, 実際の観測値を用いて雲微物理パラメータの推定を行う予定である。

#### 参考文献

- (1) Menemenlis, D., Fukumori, I., & Lee, T. (2005). Using Green's functions to calibrate an ocean general circulation model. *Monthly weather review*, 133(5), 1224-1240.
- (2) Tomita, H. (2008). New Microphysical Schemes with Five and Six Categories by Diagnostic Generation of Cloud Ice. *Journal of the Meteorological Society of Japan*. Ser. II. 2008, Vol. 86A, p. 121.
- (3) Wainwright, C. E., Dawson, D. T., Xue, M., & Zhang, G. (2014). Diagnosing the intercept parameters of the exponential drop size distributions in a single-moment microphysics scheme and impact on supercell storm simulations. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 53(8), 2072-2090.

# アジアモンスーンの数値シミュレーションのための物理過程の高度化と

## データ同化手法の開発

### Development of Physical Parameterizations and Data Assimilation Technique Aimed at Numerical Simulations for the Asian Monsoon

氏家 将志, 米原 仁, 金浜 貴史, 木南 哲平, 高橋 由実子, 齊藤 慧, 黒木 志洸,  
林田 和夫, 須藤 康平

気象庁情報基盤部数値予報課,

E-mail: globalnwp(at)met.kishou.go.jp

Masashi Ujiie, Hitoshi Yonehara, Takafumi Kanehama, Teppei Kinami, Yumiko Takahashi, Kei  
Saitou, Yukihiko Kuroki, Kazuhiro Hayashida, Kouhei Sutou

Numerical Prediction Division,

Information Infrastructure Department, Japan Meteorological Agency

#### 要旨

物理過程の精緻化によるアジアモンスーン等の予測精度向上や、将来の計算機上での高解像度モデルの高速実行を見据え、積雲対流過程の改良と気象庁全球モデル (GSM) のスペクトル変換の GPU 化にそれぞれ取り組んだ。積雲対流過程における積雲の強さを決めるプロセスの改良により、雲頂高度の高い対流による弱い降水の予測頻度過多の抑制や降水の日変化の表現が改善されることを確認した。GPU 化においては、GPU 間での直接の MPI 通信や、GPU に最適化された数学ライブラリの利用により、Wisteria-A において、CPU 利用時よりも GSM のスペクトル変換が高速に実行されることを確認した。

#### 1. はじめに

気象庁は、天気予報や台風予報の作成支援等を目的に、水平解像度約 13km (TQ959) の全球モデル (GSM) を現業運用している。GSM の予測対象とする大気現象であるアジアモンスーンやそれに伴う降水予測の精度向上のためには、物理過程のより精緻な表現や、高解像度モデルによる空間スケールの小さい現象の表現向上が重要になる。数値予報モデルの高度化には大きな計算機資源を要するが、近年の計算機性能向上のペースが鈍化している現状や GPU のようなアクセラレータの台頭を踏まえると、CPU の性能向上だけに頼らずに数値予報モデルを将来の計算機に合わせて高速化していくことも重要な開発課題となる。これらの背景から、2023 年度は、(1) 積雲対流過程における積雲の強さを決めるプロセス (クロージャー) の改良、特に、環境場の湿度や境界層の状態に対する積雲の強さの感度の見直し、(2) GSM の GPU 化の検討、特に GSM の通信、計算における主要なボトルネックであるスペクトル変換の GPU 化の試行に取り組んだ。

#### 2. 開発の概要

##### 2. 1 積雲対流過程におけるクロージャーの見直し

熱帯における積雲対流活動は大気的主要な熱源の一つで、アジアモンスーンを始め大気の循環の駆動源である。GSM では、積雲対流過程 (パラメタリゼーション) によって、モデルが解像しないスケールの対流に伴う輸送や凝結・降水を表現している。現在の GSM の積雲対流過程には、環境場の湿度に依らず雲頂高度の高い積雲に伴う弱い降水が表現されやすい、積雲対流過程の発動を決める「トリガー」と呼ばれる処理による抑制を行わないと、陸上の降水の日変化の位相が観測よりも早まるといった問題点がある。この問題点の解決に向けて、積雲対流の強さを決める「クロージャー」と呼ばれる部分の見直しを行った。GSM の積雲対流過程は、マスフラックス (サブグリッドスケールの対流性上昇流の質量フラックス) 型のスキームの一種で、クロージャーは雲底におけるマスフラックス  $M_b$  の大きさの予報方程式の形で表される。

$$\frac{\partial M_b}{\partial t} = F - \frac{M_b}{\tau} \quad (1)$$

式 (1) の右辺第 1 項は、対流に伴う浮力の行う仕事や環境場の成層、境界層の状態に依存する項、第 2 項は雲底マスフラックスの減衰項である。本報告で示す開発では、式 (1) の右辺第 1 項において対流圏中層の環境場の湿度への感度を高める、大気境界層過程による成層の時間変化率に依存する項の修正といった改良を行った。

##### 2. 2 GSM のスペクトル変換の GPU 化

GPU のようなアクセラレータと CPU を組み合わせたヘテロジニアスな構成を持つ将来の計算機上で高解像度全球モデルを高速に実行することを視野に入れ、Wisteria-A を利用した GSM の GPU 対応を進めている。特に、GSM の通信、計算部分における主要なボトルネック (TQ959 の場合、計算時間全体の約 3 割を占める) であるスペクトル変換の GPU 化を行った。GSM は球面上のスペクトル法を採用しており、その計算性能は MPI 通信や、高速フーリエ変換及び行列積計算等で用いる数学ライブラリの性能に大きく依存する。これらの特徴を踏まえ、GSM のスペクトル変換の GPU 化の方針は、OpenACC ディレクティブを利用し可能な限

りコード構造を変えずにGPU化することを基本としつつ、(1)CPUを介さずにGPU同士でのプロセス間通信が可能なCUDA Aware MPIを使用すること、(2)GPU上での計算に最適化されたcuFFT（高速フーリエ変換）やcuBLAS（行列計算）といった数学ライブラリを使用すること、とした。また、CPU-GPU間のメモリ転送を最小限にするため、スペクトル変換の計算開始時に必要なデータのみをCPUからGPUに転送し、終了後に計算結果のみをCPUに戻す等、主要な計算はすべてGPU上で行うようにした。

### 3. 結果

Fig. 1に、積雲対流過程の改良前後での北西太平洋域における、GSMによる1時間降水量の予測と衛星観測に基づく降水プロダクト（提供：GSMaP(JAXA)）の比較を示す。改良前のGSMは、フィリピン東などで、1mm/hr未満の弱い降水の領域が広い範囲で見られるが、改良後はこの弱い降水域が狭まり、GSMaPの分布との整合性が高くなっている。Fig. 2は、0.5mm/3hr以上の降水予測のアメダスに観測に対するバイアスコアについて、予報時間による変化を示している。GSMは弱い降水に対しては予測頻度過多（バイアスコアが1を超える）の傾向があり、そのピークは夜間（図中では、FT=24, 48…付近）に見られる。トリガーが無い場合はこのピーク時刻が早まる他、予測頻度過多の傾向が拡大することがわかっている（図略）。改良後は、トリガーによる抑制が無くても、改良前と同程度の予測頻度を維持することができている。

スペクトル変換のGPU化の効果を確認するため、Wisteria-A 1ノード実行におけるCPU利用とGPU利用の実行時間比較を行った。Fig. 3はTL479（水平解像度約40km）鉛直128層の3次元変数3個、2次元変数1個について、Wisteria-A 1ノード8MPIプロセス、2CPU・8スレッド/MPI、8GPUを使用してスペクトル変換した場合の実行時間を示す。GPUを利用した場合は、CPU-GPU間のメモリ転送コストが追加されるものの、CPUを介さないGPU間の直接通信、GPUに最適化されたFFT（フーリエ変換で使用）、行列積計算ライブラリ（ルジャンドル変換で使用）利用による高速化の効果が上回り、CPU利用時よりも全体として5倍以上高速化（理論演算性能比は2CPU:8GPU=約1:28）されることを確認した。

### 4. まとめと今後の展望

2023年度の開発では、積雲対流過程の改良については、積雲の強さの環境場の湿度への感度を高めること、境界層の状態への感度の定式化を見直すことで、熱帯で弱い降水が広がりすぎる問題や、トリガーによる抑制が無い場合に陸上の降水の日変化の位相が早まり過ぎる問題が軽減されることを確認した。GSMのGPU対応については、CPUを介さないGPU間での直接のMPI通信、GPUでの計算に最適化された数学ライブラリの利用により、CPU利用に対して高い加速率が得られることを確認した。今後も引き続き、予測精度、GPU等も活用した計算性能の両面で、全球モデルの改善に向けた実験に取り組んでいく予定である。

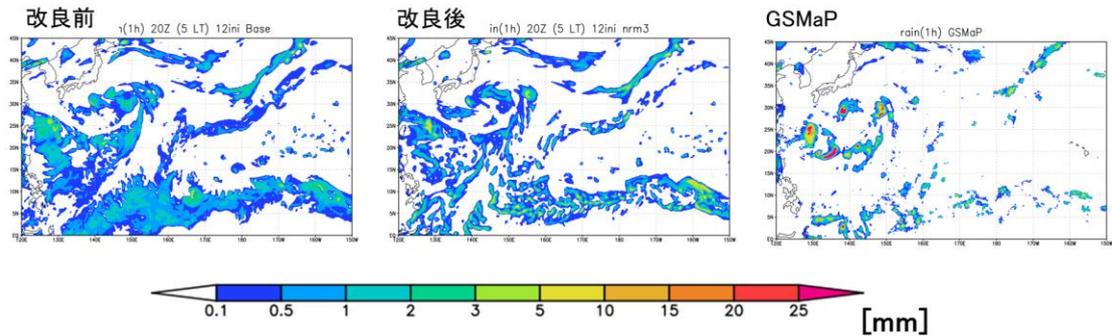


Fig. 1 北西太平洋付近（赤道- 40N, 120E - 150W）2023年7月24日20 UTCを対象とした前1時間降水量[mm]の比較。（左）改良前、（中）改良後のGSMの32時間前からの予測、（右）衛星観測による降水プロダクト（提供：GSMaP(JAXA)）

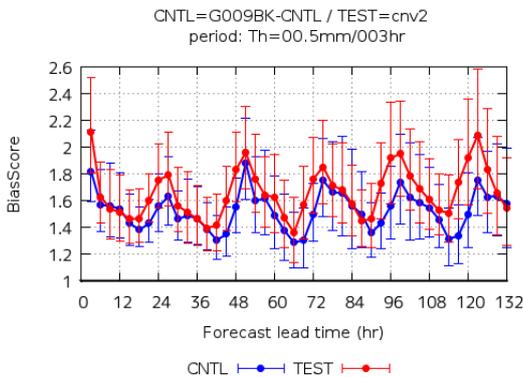


Fig. 2 0.5mm/3hr以上の降水を対象としたアメダス観測に対する、予報時間（横軸, hr）ごとのバイアスコア（縦軸）。（青）改良前、（赤）改良後のGSM。2023年7月の各日12UTC初期値の予測の統計値。

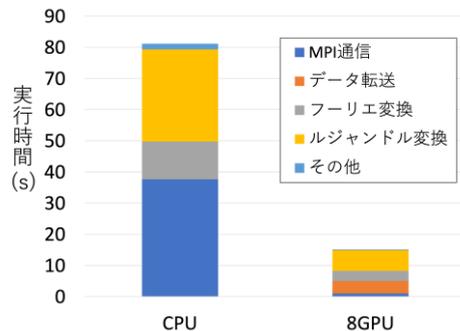


Fig. 3 Wisteria-A 1ノード8MPI使用時において、TL479（水平解像度約40km）128層の設定でスペクトル変換を100回実行した際の実行時間[s]とその処理別内訳。（左）CPU（2CPU利用、8スレッド/MPI）、（右）GPU（8GPU使用）。

# 海洋物質循環モデルを用いた氷期の海洋炭素循環変動に関する研究

## A study on changes in the ocean carbon cycle during glacial periods using an ocean biogeochemical cycle model

小林 英貴, 富山大学・学術研究部理学系, E-mail: hidekoba(at)sci.u-toyama.ac.jp  
岡 顕, 東大・大気海洋研, E-mail: akira (at)aori.u-tokyo.ac.jp  
Hidetaka Kobayashi, Faculty of Science, The University of Toyama  
Akira Oka, Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo

### 要旨

大気中の CO<sub>2</sub>濃度 (pCO<sub>2</sub>) は、最終氷期最盛期から完新世にかけて約 80ppm 増加した。この変化は、主に海洋からの CO<sub>2</sub>放出に起因すると考えられている。本研究では、MIROC 4m 気候モデルを用いた数値実験の出力を用いて海洋の炭素循環に関する数値実験を行った。実験結果について、大気中 pCO<sub>2</sub>の変化を氷床コア記録と比較、炭素同位体比指標を海底堆積物コア記録と比較し、モデルとデータ間の変化の相違や背後にあるプロセスを評価した。数値実験の結果は、いくつかの点で観測的知見と異なり、モデルは退氷期初期の海洋ベンチレーションの増加や表層における生物生産の制限を過小評価していた可能性がある。大西洋子午面循環の急激な変化に応じた大気中 pCO<sub>2</sub>の変化は、主にそれに伴う海面水温やアルカリ度の変化によって引き起こされ、これらの寄与は部分的に互いに打ち消し合い、大気中 pCO<sub>2</sub>の正味の変化は退氷期全体の変化に対して比較的小さいことが示された。

### 1. はじめに

最終氷期最盛期 (LGM: Last Glacial Maximum) から完新世にかけて、大気中の二酸化炭素濃度 (pCO<sub>2</sub>) は約 80 ppm 増加した。大気中の温室効果ガスのこの変化は、日射量の緩やかな時間変化に対する気候システムの応答として認識され、主に海洋から大気への CO<sub>2</sub>放出が大気中 pCO<sub>2</sub>の増加をもたらしたと考えられている。さらに、大西洋子午面循環 (AMOC: Atlantic meridional overturning circulation) の急激な変化とそれに伴う半球間の気候変化も、海洋から大気への CO<sub>2</sub>放出に関与していると考えられている。しかし、最終退氷期における海洋炭素循環の変化要因と、それが大気中 pCO<sub>2</sub>に及ぼす影響についての理解は限られている。

筆者らはこれまでに、海洋大循環モデルを用いて、海底堆積物コア記録から復元された海洋環境に基づいて、LGM の海洋炭素循環場を概ね再現することに成功している (Kobayashi et al., 2021; 小林・岡, 2023)。計算資源の制限により、これまでの研究は、氷期気候条件下での定常状態の応答の議論に限定されてきた。しかしながら、海洋炭素循環を構成するプロセスは、海面での比較的速やかなガス交換から、生物ポンプ、海洋深層循環、海底での炭酸塩の堆積と溶解プロセスを含み、気候の変化によって均一に変化するわけではない。そこで本研究は、ある時期のスナップショット的な計算ではなく、LGM から完新世までの約 1 万年にわたる数値実験を行う。数値実験とその結果の観測的知見との比較を通じて、海洋の炭素循環を構成するさまざまなプロセスが、時間の経過とともにどのように変化するかを定量的に調べることを目的としている。

### 2. 問題設定・方法

MIROC 4m 気候モデルの最終退氷期 (2 万 1 千年前から 1 万 1 千年前) にわたる遷移実験から得られた、AMOC の急激な変化を再現する三次元海洋循環場を用いて、この時期の海洋炭素循環の数値実験を行った。また、海底堆積物コア記録の最新の統合データを取得し、数値実験で得られた炭素同位体比と堆積物コアデータを比較することで、海洋炭素循環の変化のモデルデータ間の相違や、モデル内の潜在的なバイアス、見落とされているあるいは過小評価されているプロセスについて議論した。

本研究で使用した海洋大循環モデルおよびトレーサーモデルは、CCSR Ocean Component model (COCO) version 4.0 である。生物地球化学トレーサーモデルの予報変数には、栄養塩、溶存有機栄養塩、溶存無機炭素、アルカリ度、溶存鉄、溶存酸素、炭素同位体 (<sup>13</sup>C, <sup>14</sup>C) が含まれる。モデル領域は全球海洋で、解像度は水平方向が ~1.4°、鉛直方向が 43 層 (層厚: 5–250m) である。本研究では、氷期と間氷期の間の海陸地形の変化は考慮していない。

### 3. 結果と考察

数値実験によって得られた大気中 pCO<sub>2</sub>の変化は、氷床コア記録と定性的には一致している (Fig. 1)。例えば、大気中 pCO<sub>2</sub>はハイネリッヒ亜氷期 1 (HS1) に 10.2 ppm 増加し、その後ベーリング・アレレード期 (BA) に 7.0 ppm 減少し、さらにヤングアドリアス期 (YD) に 6.8 ppm 増加した。しかしながら、モデルは氷床コア記録から復元された値と比較して、これらの期間における大気中 pCO<sub>2</sub>の変化を過小評価している。放射性炭素および安定炭素同位体比の指標 ( $\Delta^{14}\text{C}$  および  $\delta^{13}\text{C}$ ) は、モデルが退氷期初期の海洋のベンチレーションの活発化と生物生産の効率低下を過小評価していることを示し、その違いは南大洋で特に顕著である (Fig. 2)。数値実験が示す HS1 における大気中 pCO<sub>2</sub>の比較的小さな変化は、これらの海洋環境変化の過小評価に起因する可能性がある。BA および YD 期間には、AMOC の急激な強化と弱体化が生じており、これに伴う  $\Delta^{14}\text{C}$  の変化は、堆積物コア記録の復元と概ね一致している。ただし、堆積物コア記録は YD 期を通じて深海での  $\delta^{13}\text{C}$  の連続的な増加を示しているにもかかわらず、モデルは反対の傾向を示す。これは、モデルが示す YD 期の AMOC の弱体化が過度あるいはその期間が長すぎるか、海洋表層の生物生産の変化が小さすぎるか、陸上炭素貯蔵を含む表現できていない地球化学プロセスに要因があることを示唆

している。今回の実験では、大気中  $p\text{CO}_2$  の定量的な変化の再現は不十分ではあるが、それをもたらす海水の  $p\text{CO}_2$  変化の背後にある要因を分解して調べた。その結果、まず HS1 の期間には、水温の上昇による  $\text{CO}_2$  の溶解度の低下が大気中  $p\text{CO}_2$  上昇の主要因であることが明らかになった。また、その後の AMOC の急激な変化が生じる BA と YD の期間においては、海面水温とアルカリ度の変化が大気中  $p\text{CO}_2$  の変化に最も大きな影響を与えることが明らかになった。海水の  $p\text{CO}_2$  変化に対する水温と溶存無機炭素、アルカリ度の寄与がそれぞれ相殺することで、AMOC の急激な変化とそれに伴う気候変化による大気中  $p\text{CO}_2$  の変化は限定的で、その結果として BA 期の大気中  $p\text{CO}_2$  の小規模な減少と YD 期の大気中  $p\text{CO}_2$  の増加に寄与することが示された (Fig. 3)。

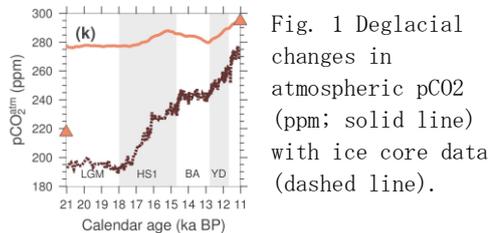


Fig. 1 Deglacial changes in atmospheric  $p\text{CO}_2$  (ppm; solid line) with ice core data (dashed line).

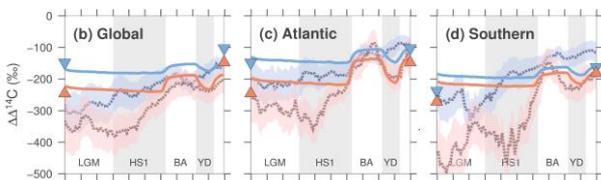


Fig. 2 Deglacial changes in  $\Delta \Delta^{14}\text{C}$  (‰), difference in  $\Delta^{14}\text{C}$  (‰) between the ocean and the atmosphere, averaged in the mid-depth (500–2000 m; blue solid line) and deep global ocean (2000–5500 m; red solid line), Atlantic Ocean ( $40^\circ\text{S}$ – $90^\circ\text{N}$ ), and the Southern Ocean ( $90^\circ\text{S}$ – $40^\circ\text{S}$ ) with compiled sediment core data (dashed line).

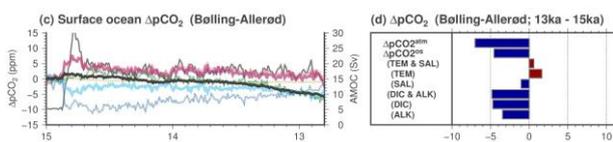


Fig. 3 (c) Temporal changes in sea surface  $p\text{CO}_2$  (ppm; gray) during the Bølling-Allerød (BA) period. The contributions of changes in temperature and salinity (purple), temperature (red), salinity (yellow), dissolved inorganic carbon (DIC) and alkalinity (cyan), DIC (green), and alkalinity (blue) to the changes in sea surface  $p\text{CO}_2$  are shown. The thin gray line shows the time series of the AMOC strength. (d) Temporal changes in the partial pressure of atmospheric and sea surface  $p\text{CO}_2$  (ppm) during the BA. (d) The contributions of changes in temperature and salinity, temperature, salinity, DIC and alkalinity, DIC, and alkalinity to the changes in sea surface  $p\text{CO}_2$  are represented by different colored bars.

#### 4. まとめと今後の展望

本研究では、海洋大循環モデルを用いて、最終退氷期の 1 万年間にわたる海洋炭素循環の時間変化を調べ、モデル実験の結果を氷床コアや堆積物コア記録と比較することで、実験の妥当性や欠如しているあるいは過小評価しているプロセスについて議論した (Kobayashi et al., 2024)。今回の実験では、大気中  $p\text{CO}_2$  の定性的な変化は再現されたが、変化の振幅は過小評価しており、短期間で生じる急激な変化は見られなかった。退氷期初期のベンチレーションの変化や南大洋を中心とした生物生産の変化を正確に捉えるためには、氷床や海陸地形の分布、氷床融け水の想定、深層水形成過程の表現などに関するモデルや実験設定の改善が必要である。そのうえで、AMOC の変化が南大洋や太平洋の海洋循環や海洋物質循環に影響を及ぼすプロセスに加えて、海洋と陸域、堆積物との間の物質の交換の影響を合わせて調べることで、退氷期にわたる大気中  $p\text{CO}_2$  の変化に対する海洋の役割の理解を進展させることを目指す。

#### 参考文献

- (1) Kobayashi, H., A. Oka, A. Yamamoto, and A. Abe-Ouchi 2021: Glacial carbon cycle changes by Southern Ocean processes with sedimentary amplification, *Science Advances*, 7, eabg7723.
- (2) 小林英貴, 岡頭 2023: “氷期の海洋炭素循環シミュレーション” *地球化学*, 57, 205–223.
- (3) Kobayashi, H., A. Oka, T. Obase, and A. Abe-Ouchi 2024: Assessing transient changes in the ocean carbon cycle during the last deglaciation through carbon isotope modeling, *Climate of the Past*. (accepted)

# 海洋深層における乱流拡散のパラメタリゼーション

## Parameterization of Turbulent Mixing in the Deep Ocean

田中 祐希, 福井県立大学海洋生物資源学部, E-mail: y-tanaka@fpu.ac.jp  
 日比谷 紀之, 東京海洋大学海洋環境科学部門, E-mail: hibiya@eps.s.u-tokyo.ac.jp  
 伊地知 敬, 東京大学大学院理学系研究科, E-mail: ijichi@eps.s.u-tokyo.ac.jp  
 Yuki Tanaka, Faculty of Marine Science and Technology, Fukui Prefectural University  
 Toshiyuki Hibiya, Department of Ocean Sciences, Tokyo University of Marine Science and Technology  
 Takashi Ijichi, Graduate School of Science, The University of Tokyo

### 要旨

Subinertial な内部潮汐は、superinertial な内部潮汐と異なり、必ずしも傾圧的な鉛直構造を持つとは限らない。近年、順圧的な内部潮汐を表す「地形性モード」を導入することで、subinertial な内部潮汐の励起率を定量化できる新たなエネルギーダイアグラムが提案された。理想化された海底地形を与えた数値実験の結果、このエネルギーダイアグラムは亜寒帯の代表的なパラメータ範囲で有効であり、subinertial な内部潮汐の励起率は従来の見積もりの 2 倍程度になり得ることが示された。

### 1. はじめに

内部潮汐の碎波によって生じる鉛直乱流混合は、浮力の鉛直輸送を通じて、深層海洋大循環の強さやパターンをもコントロールする重要な物理過程の一つである。このため、外部潮汐から内部潮汐へのエネルギー変換率の空間分布を明らかにすることは、海洋や気候の数値モデリングの高精度化に向けて重要な課題である。

従来、このエネルギー変換率は、順圧潮汐から傾圧潮汐へのエネルギー変換率と同一視して見積もられてきた。全球のほとんどの海域で卓越する半日周潮については、「外部潮汐 = 順圧潮汐」、「内部潮汐 = 傾圧潮汐」という関係が良い近似で成り立つので、この方法によって正確に外部潮汐から内部潮汐へのエネルギー変換率を見積もることができる。ところが、中緯度から高緯度の一部の海域で卓越する日周潮については、上記の等式が必ずしも成り立たない。これは、半日周潮と緯度 30°より低緯度の日周潮が慣性周波数以上の周波数を持つ (superinertial) のに対し、緯度 30°より高緯度の日周潮は慣性周波数以下の周波数を持つ (subinertial) ため、内部潮汐の力学的性質が大きく変わるためである。すなわち、superinertial な内部潮汐が必ず傾圧的な鉛直構造を持つのに対し、subinertial な内部潮汐は海底地形や密度成層に応じて傾圧的にも順圧的にもなり得る。この事実は、subinertial な潮汐については「外部潮汐から内部潮汐へのエネルギー変換率」と「順圧潮汐から傾圧潮汐へのエネルギー変換率」は一致せず、おそらく後者は前者を過小評価してしまうことを意味している。

この問題を解決するために、報告者らは最近、順圧的な鉛直構造を持つ内部モードを表す「地形性モード」の概念を導入し、subinertial な内部潮汐の励起率を定量化できる新しいエネルギーダイアグラムを提案した (Tanaka 2023; 図 1)。本研究では、その有効性を数値実験によって検証する。

### 2. 数値モデルと実験設定

図 1 に示されたエネルギーダイアグラムの有効性を数値実験によって検証する。用いた数値モデルは“kinaco”で、静水圧近似を仮定する。東西・南北 200 km、水深 2400 m の矩形海洋の中央に、幅 35 km、高さ 2000 m のガウシアン型の海山を置き (海底地形の形状は図 2, 3 を参照)、東西境界で日周期の順圧東西流を一様に与えることで ( $u = u_0 \sin(\omega t)$ ;  $\omega = 0.727 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$  は日周潮周波数,  $u_0 = 2.4 \text{ cm/s}$  は振幅)、モデルを駆動する。解像度は水平 1 km、鉛直 40 m である。慣性周波数は  $f = 1.1 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 、浮力周波数は  $N = 1.73 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$  と、亜寒帯での典型的な値を仮定する。定常振動に達した後の 11 潮汐周期目のデータを解析に使用する。

### 3. 結果と考察

まず、図 1 のエネルギーダイアグラムに基づく外部モードと内部モードの分布を確認する。外部モードは、境界での強制を完全に含み、モデル領域全体でほぼ様な空間構造を持っていた (非図示)。一方、図 2a は傾圧第 1 モードの等密度面変位、図 2b は地形性モードの流線関数を示す。地形性モードは海山の周囲でのみ大きな振幅を持ち、方位角方向の波数 1 で海山の周りを時計回りに伝播している (図 2b)。傾圧第 1 モードも海山の周囲でのみ大きな振幅を持ち、地形性モ

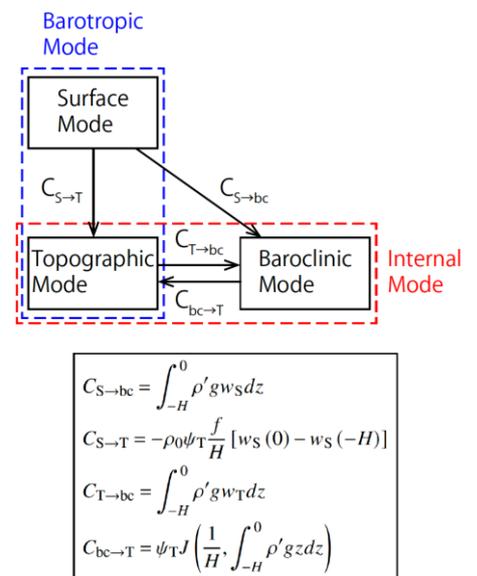


図 1: Tanaka (2023)によって提案されたエネルギーダイアグラム。Subinertial な内部潮汐を特徴づける「地形性モード」を、傾圧モードの一部かつ内部モードの一部として新たに定義した。式は各モード間のエネルギー変換率を表す。

ードとほぼ同位相で海山の周りを伝播している (図 2a)。さらに、傾圧モードと地形性モードを合わせた内部モードの流速構造は、この海山に対して固有値問題を解いて得られる海山捕捉波の流速構造と非常によく一致していた (非図示)。これらのことから、外部モードと内部モードへの分解はうまく機能していると言える。

そこで次に、各モード間のエネルギー変換率を調べる (図 3)。外部モードから傾圧モードへのエネルギー変換率  $C_{S \rightarrow bc}$  は 32 MW、外部モードから地形性モードへのエネルギー変換率  $C_{S \rightarrow T}$  は 36 MW と、両者は同程度の大きさとなっている。また、両エネルギー変換とも、外部モードが斜面上に乗り上げる海山の東西の側面で大きくなっている。一方、内部モード間のエネルギー変換率を表す  $C_{T \rightarrow bc}$  は、正負両方の値を含むやや複雑な空間パターンを示すものの、領域積分では -4 MW と負であり、正味では傾圧モードから地形性モードへのエネルギー変換が生じていることがわかる。

$C_{S \rightarrow bc}$  と  $C_{S \rightarrow T}$  の和として求められる外部モードから内部モードへのエネルギー変換率  $C_{S \rightarrow I}$  は 67 MW となる。これに対して、従来の研究で用いられてきた順圧モードから傾圧モードへのエネルギー変換率  $C_{bt \rightarrow bc} = C_{S \rightarrow bc} + C_{T \rightarrow bc}$  は 27 MW と、 $C_{S \rightarrow I}$  の半分以下に過ぎない。このように、subinertial な内部潮汐の励起率は、報告者らの新たな定式化では従来の定式化の 2 倍以上になり得ることが示された。

#### 4. まとめと今後の展望

本研究では、順圧的な内部モードである「地形性モード」を導入した新たなエネルギーダイアグラムの有効性を数値実験によって検証した。数値実験の結果、亜寒帯の代表的なパラメータにおいては、本研究の定式化による外部潮汐から内部潮汐へのエネルギー変換率は、従来の定式化による順圧潮汐から傾圧潮汐へのエネルギー変換率の 2 倍ほどになり得ることがわかった。この結果は、日周潮内部潮汐の励起率はこれまで過小評価されている可能性が高く、本研究の定式化を用いて再評価する必要があることを示している。Niwa and Hibiya (2014)によれば、日周期の順圧潮汐から傾圧潮汐へのエネルギー変換率は全球積分で 130 GW 程度である。このうち約半分が日周潮が subinertial になる緯度  $30^\circ$  より高緯度で生じているとすると、内部潮汐の励起率は 65 GW ほど過小評価されている可能性がある。

Subinertial な内部潮汐波の励起率を見積もる別の方法として、Kelly and Ogbuka (2022)は、捕捉波のモード構造をあらゆる鉛直断面で求め、潮流構造をモード展開して表す方法を提案している。しかし、この方法には、2次元面内における固有値問題を多くの断面で解くのに計算コストがかかるという問題に加え、複雑な海底地形に対して鉛直断面を客観的に決めるのは困難であるという問題がある。本研究の地形性モードの定義はシンプルで、複雑な地形への適用も容易である。

#### 参考文献

- Kelly, S. M., and S. Ogbuka, 2022: Coastal trapped waves: Normal modes, evolution equations, and topographic generation. *J. Phys. Oceanogr.*, **52**, 1835–1848.
- Niwa, Y., and T. Hibiya, 2014: Generation of baroclinic tide energy in a global three-dimensional numerical model with different spatial grid resolutions. *Ocean Modell.*, **80**, 59–73.
- Tanaka, Y., 2023: Energy conversion rate from subinertial surface tides to internal tides. *J. Phys. Oceanogr.*, **53**, 1355–1374.

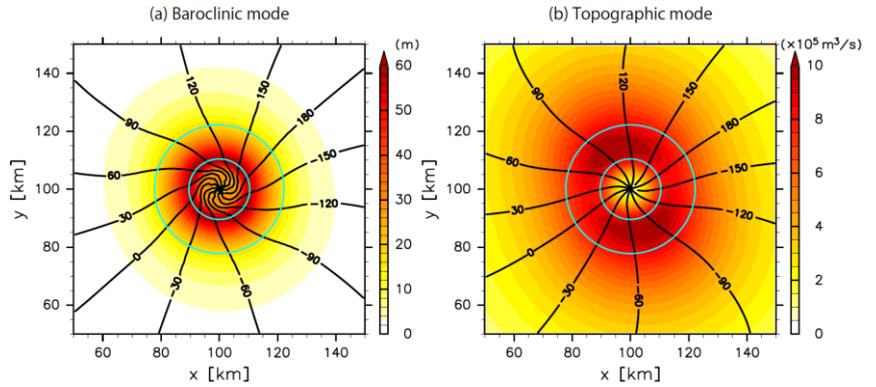


図 2: (a) 傾圧第 1 モードの等密度面変位と (b) 地形性モードの流線関数。カラーが振幅、コンターが位相を表す。水色の線は 1000 m と 2000 m の等深線を示す。

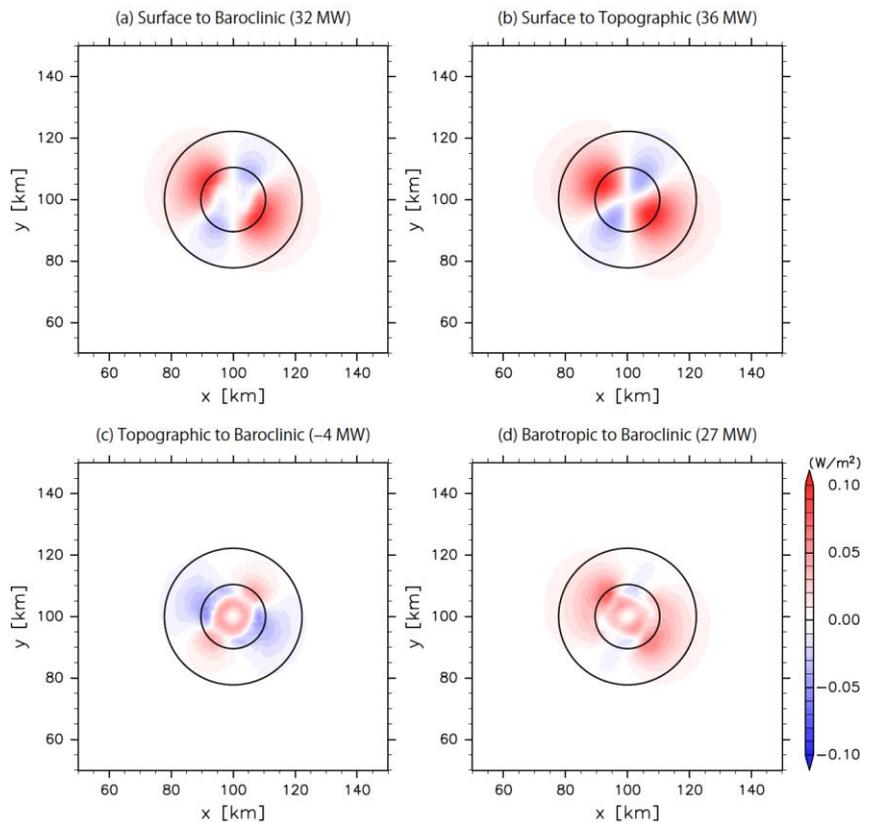


図 3: (a) 外部モードから傾圧モード、(b) 外部モードから地形性モード、(c) 地形性モードから傾圧モード、(d) 順圧モードから傾圧モードへのエネルギー変換率。

# 海洋棚氷相互作用に関わるモデル同化、生態系モデル結合、古環境モデル開発

## Development and data analysis of Nonhydrostatic Icosahedral Atmospheric Model

中山 佳洋, 北海道大学・低温科学研究所, E-mail: Yoshihiro.Nakayama(at)lowtem.hokudai.ac.jp  
瓢子 俊太郎, 北海道大学環境科学院, E-mail: shuntaro1022(at)ees.hokudai.ac.jp  
大谷 若葉, 北海道大学・低温科学研究所, E-mail: 76223026(at)elms.hokudai.ac.jp  
森吉 紘己, 北海道大学・低温科学研究所, E-mail: hiroki.m77 (at)elms.hokudai.ac.jp  
Yoshihiro Nakayama, Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University  
Hyogo Shuntaro, School of Environmental Science, Hokkaido University  
Wakaba Otani, School of Environmental Science, Hokkaido University  
Hiroki Moriyoshi, School of Environmental Science, Hokkaido University

### 要旨

海洋と氷床/棚氷が接する沿岸域では、それらの相互作用によって、海洋物理/生態系にとって重要なプロセスが存在する。例えば、南極沿岸域の西南極域では、高温の水塊が大陸棚上へ流入し、棚氷を融解させる。また、ウェッデル海/ロス海や東南極域では、大量に海水が形成され、水塊が高密度化し、南極低層水を形成する。これらの海洋物理プロセスは、海洋に鉛直的な循環を形成し、物質/炭素循環にも重要な働きをする。沿岸域の生態系/海洋による二酸化炭素吸収に貢献しているとされる。しかし、極域の沿岸域の観測は断片的で、また、海洋物理過程を再現できる及び海洋生態系を再現できるモデルはほとんど開発されていない。本研究では、グリーンランド/南極沿岸域の海洋物理/海洋生態系モデルの開発を目指し研究を実施する。2023 年度には、新たな研究領域を開拓するために、ウェッデル海の領域モデル開発/西グリーンランド域モデル開発を実施した。過去のモデルと比較して、過去の海洋物理観測をよく再現できるモデルが開発された。今後は、これらのモデルを氷床モデル/生態系モデルなどと結合し、海面上昇/海洋による二酸化炭素吸収の見積もりの高精度化に貢献するモデルの開発を進める。

### 1. はじめに

本研究では、海洋数値モデル MITgcm(Massachusetts Institute of Technology General Circulation Model)を用いて、南大洋ウェッデル海/西グリーンランド域の海洋物理モデル開発を実施する。ウェッデル海は、地球最大の体積の棚氷であるフィルヒナー・ロンネ棚氷(FRIS)があり、棚氷下部に流入する海水のほとんどが結氷点の $-1.9^{\circ}\text{C}$ に近いままに保たれている。FRIS の底面融解による氷の損失は、棚氷の大きさを考慮すると現在のところは小さく、暖水の流入から守られた安定した状態だと考えられてきた。しかし、Hellmer et al., 2012 は数値モデルを用いて、FRIS で 21 世紀後半に急激な棚氷融解の増加が起こりうることを示唆した。棚氷下部に暖水が流入し、棚氷底面融解量が 20 倍に激増する状態への急激な変化が起こる可能性がある。しかし、暖水の流入経路など詳細なメカニズムやどのような条件で起こるかなどは明らかになっていない。理解が進んでいない原因の一つは、既存のウェッデル海のモデル研究は全球モデルを利用したものがほとんどで、高い観測再現性が実現できていないことである。そこで本研究は、棚氷の循環メカニズムや暖水の流入経路を理解し、将来実験の精度を上げることに繋げるため、ウェッデル海の領域モデルを開発し、数十の感度実験の結果から最も観測再現性の高いパラメーターを決定した。

西グリーンランド域では、氷河表面融解水は氷河の底から海に流出する。表面融解水は淡水であることからフィヨルド内に流入してきた高温で富栄養な海水(Atlantic Water(AW))を巻き込みながら氷河前面で湧昇する。この湧昇は海中での氷河融解を引き起こすと同時に、海洋での基礎生産を助ける。暖かい AW は北大西洋域から運ばれてきて北上し、大陸棚を横切る狭谷を通り、西グリーンランド沖のフィヨルドへ流入する。氷河融解のドライバーとなる AW において、外洋の北大西洋域やフィヨルド内での変動は多く研究されてきたが、外洋からフィヨルド内部への流入経路や、湧昇による融解水の海洋循環への影響は詳細に議論されていない。本共同利用研究で(1)AW における外洋-大陸棚-フィヨルドシステムを理解するダウンスケーリングモデル開発を実施し (2)さらに、ダウンスケールモデルにアイスプルームパラメタリゼーションを組み込み、氷河融解水流出に伴う湧昇現象/海中氷河融解による海洋への影響を調査した。

### 2. 問題設定・方法

#### ウェッデル海領域モデル

モデルの解像度は、水平方向  $1/3^{\circ}$ 、鉛直方向には 50 層である。モデルの初期値は、January World Ocean Atlas の 1990 年代の冬の水温と塩分を用いる。モデル内の地形は International Bathymetric Chart of the Southern Ocean (IBCSO)(Arndt et al., 2013)、棚氷の draft(海水面下の氷厚) は MEaSURES BedMachine Antarctica, Version 3 を使用する。さらに、NASA ジェット推進研究所(NASA JPL)によって進められているデータ同化プロダクト (Estimating the Circulation and Climate of the Ocean (ECCO)) を海洋の境界条件として用いる。海洋モデルを駆動するための大気境界条件には、Era-interim を用いる。

#### 西グリーンランド域領域モデル

モデルの解像度は、水平方向  $1/12^{\circ}$ 、鉛直方向には 50 層である。モデルの初期値は、ECCO LLC270 の 1992/01/01 の値を用いる。地形は ECCO LLC270 を使用した。また、ECCO LLC270 を境界条件として用いて、ERA5 を大気強制として、モデルを駆動した。さらに、湧昇現象を再現するために MITgcm の iceplume パッケージを組み込むことで接地線深さからの淡水流出とそれに伴う湧昇現象/海中氷河融解をパラメータ化した。淡水流出と流出量は Mankoff et al., 2020 の観測データを基にした。現時点での計算期間は 1992/01~2004/12 で、今後拡張予定である。

### 3. 結果と考察

#### ウェッデル海領域モデル

領域モデルで1992年1月から2020年1月までの約30年間を対象に計算を行った。水塊ごとに再現された水温・塩分などの性質の違いはあるものの、過去の研究や他のモデル(ECCOなど)と比較しても、モデル実験の結果は、観測データの水温・塩分の水塊分布を鉛直方向・水平方向によく再現していた。例えば、棚氷前面部では、棚氷水、高密度陸棚氷といった水塊が見られるが、これらの水塊分布が数値モデルでよく再現され、棚氷水の水温の誤差は $-0.05^{\circ}\text{C}$ 、高密度陸棚氷の塩分の誤差は0.05程度であった。過去のモデル研究と比較して、棚氷付近の水塊分布については、特に再現性の向上が確認できた(Figure 1)。さらに棚氷下部の循環メカニズムを調べるために、作成したモデル内でトレーサー実験を行った。棚氷下部の循環における時間スケールは観測結果とおおよそ一致し、循環経路を理解することができた。周極深層水(暖水)はフィルヒナートラフの東斜面とCentral Troughの東側斜面からFRIS前面まで流入していることがわかった。さらに、棚氷の底面融解量の時間/空間的変動は棚氷下部の流速と相関があることがわかった。

#### 西グリーンランド域領域モデル

解像度を水平 $1/3^{\circ}$ から $1/12^{\circ}$ に上げることで、ECCOでは見られなかったAWの外洋からヤコブスハブ氷河への流入が再現され、300m深度の等深線に沿って流入してくることが分かった。また、AWは経年変動/季節変動の両方を持ち、この原因は大規模循環による移流によって変動することが示された。次に、氷河底流出に伴う海中氷河融解をモデル内に取り込むことのできるiceplumeパラメタリゼーションを組み込んだ感度実験を行った。アイスプルームによる氷河前面部での海水を巻き込みが再現され、より多くのAWが深層部で外洋からフィヨルド内に流入し、表層付近で流出する様子が見られた。氷河融解による沿岸域での淡水増加により、沿岸域と外洋域での密度差が増加することで西グリーンランドを北上する西グリーンランド海流(WGC)が強化され、AWの北上も強化されることが分かった(Figure 2)。

### 4. まとめと今後の展望

ウェッデル海の領域モデルを開発し、既存のモデルと比較してもかなり観測再現性の高いモデルを作成することができた。また、作成したモデルを使って棚氷下部の循環メカニズムを調べた。循環の時間スケール、経路を理解することができた。さらにFRISの底面融解量の時間/空間的変動は棚氷下部の流速と相関があることがわかった。近年、船舶を利用した海洋観測だけでなく、フロートなどの用いた自動観測、バイオロギング技術の進歩によって、ウェッデル域でも観測データが急速に増えてきている。本研究は、これらの観測を利用した観測とモデルを融合する研究の最初のステップと位置付けられる。今後は作成したモデルを高解像度化し、潮汐モデルに組み込み、グリーン関数法を用いたデータ同化を予定し、ウェッデル海フィルヒナー・ロンネ棚氷と海洋に内在するレジームシフトの理解、将来予測の高精度化を目指す。

西グリーンランド域では、ECCOダウンスケーリングを行い、既存のモデルでは再現されてこなかったAWの外洋からフィヨルドへの流入経路を再現することができ、AWには経年変動/季節変動の両方を持つことがモデル結果から示唆された。氷河底から流出する淡水が駆動する海中の氷河融解を再現し、アイスプルームによるより多くのAWのフィヨルド内への流入が見られた。さらに、氷河融解水による沿岸域-外洋域の密度差増加がAWの北上を強化させることも示唆された。今後、NASA JPLが開発を進めている生態系モデル(ECCO Darwin)を結合させることで、将来的な海洋生態系/海による二酸化炭素吸収量の変化を理解することを目指す。

#### 参考文献

- (1) Arndt, J. E., H. W. Schenke, M. Jakobsson, F. O. Nitsche, G. Buys, B. Goleby, M. Rebecco, F. Bohoyo, J. Hong, J. Black, R. Greku, G. Udintsev, F. Barrios, W. Reynoso-Peralta, M. Taisei, and R. Wigley (2013), The international bathymetric chart of the southern ocean (ibcs) version 1.0-a new bathymetric compilation covering circumantarctic waters, *Geophysical Research Letters*, 40 (12), 3111- 3117, doi:10.1002/grl.50413.
- (2) Hellmer, H. H., Kauker, F., Timmermann, R., Determann, J., & Rae, J. (2012). Twenty-first-century warming of a large Antarctic ice-shelf cavity by a redirected coastal current. *Nature*, 485, 225-228. <https://doi.org/10.1038/nature1106>
- (3) Mankoff, K. D. Noël, B. Fettweis, X. Andreas, P. Ahlström, A. Colgan, W. Kondo, K. Langley, K. Sugiyama, S. van As, D. and Fausto, R. S. (2020). Greenland liquid water discharge from 1958 through 2019. *Earth System Science Data*. 12(4). 2811-2841. <https://doi.org/10.5194/essd-12-2811-2020>

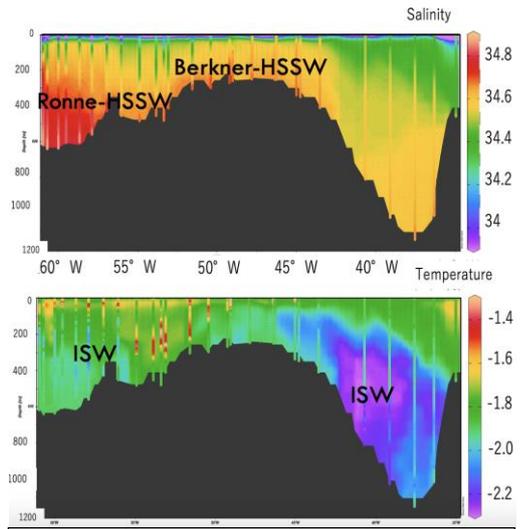


Figure 1: Simulated (top) Potential Temperature and (bottom) salinity FRIS front sections.

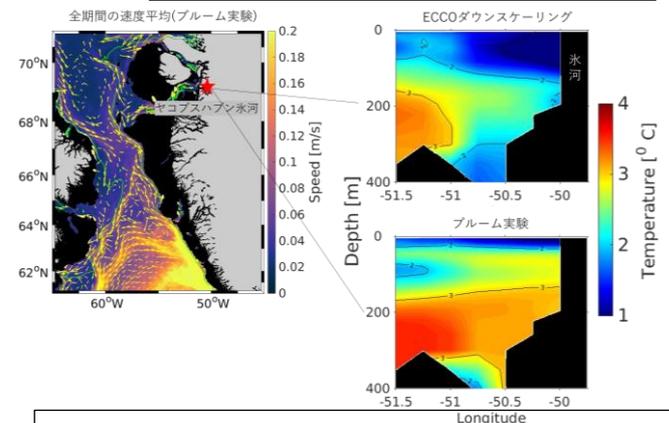


Figure 2: (left) Simulated ocean current at 300 m depth. (right) Potential temperature vertical sections near Jackovshaven Glacier highlight the impact of ice plume parameterization on warm ocean heat inflow.

# 気候変動予測の不確実性低減に資する海洋大循環モデルの精緻化

## Development of General Ocean Circulation Model for Climate Prediction

小室芳樹, 海洋研究開発機構, E-mail: komuro(at)jamstec.go.jp  
鈴木立郎, 海洋研究開発機構, E-mail: tsuzuki(at)jamstec.go.jp  
渡辺路生, 海洋研究開発機構, E-mail: michiow(at)jamstec.go.jp  
黒木聖夫, 海洋研究開発機構, E-mail: m\_kurogi(at)jamstec.go.jp

Yoshiki Komuro, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC)  
Tatsuo Suzuki, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC)  
Michio Watanabe, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC)  
Masao Kurogi, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC)

### 要旨

気候システムにおいて海水-海洋系は、百年規模の地球温暖化から数年規模のエルニーニョ現象、北極海氷の変動に伴う遠隔影響など、時空間的に多様なスケールにおける変動を律する。本課題では、気候変動予測の精度向上及び不確実性の低減を目指し、気候モデルの主要素の一つである海洋大循環モデルの精緻化を、ネスト手法を用いた高解像度化、パラメタリゼーションの精緻化と高度化などの面から行うことを目的とする。

昨年度に引き続き、沿岸から外洋にわたる物質輸送やスケール間相互作用に関する知見獲得に向けて水平約 500m 格子日本沿岸モデルの積分を継続しているが、主に 2 つの問題への対処を行なった。1 つ目の問題は、間宮海峡付近で氷が非常に厚くなり計算が破綻してしまう問題であり、地形・水平拡散・海氷の塩分の調整によりモデルを安定に駆動可能となった。2 つ目の問題は、特に夏期において海面付近の水温が低くなることである。混合層スキームを変更し、日本付近の水平解像度が 1/12 度のモデルを用いてパラメータの調整を行なった。

### 1. はじめに

沿岸から外洋にわたる物質輸送やスケール間相互作用に関する知見獲得のためには、海洋モデルを用いた数値実験が有用であるが、潮汐残差流や島等の後方に生成される渦等の微細な現象の効果をできるだけ忠実に表現できる高解像度設定が求められる。本課題研究では、利用する計算機資源で運用可能な解像度の上限に近い設定である、日本近海を水平約 500m 格子で覆う全球多重ネストモデルを用いた数値実験を行う。

### 2. 問題設定・方法

本研究では、東京大学大気海洋研究所と海洋研究開発機構 (JAMSTEC) で共同開発・運用されている海氷海洋結合モデル COCO (Hasumi, 2006) を基にした双方向ネストモデル (Kurogi et al., 2013) を用いた。モデルは L0-L3 の 4 つのモデルから構成される。L0 は三極座標系に基づいた全球モデルであり、北緯 63° 以南の緯度経度座標系領域の水平格子幅は 1/4 度×1/4cos φ 度 (φ は緯度) である。L1、L2、L3 モデルの水平座標は緯度経度座標系に基づき、水平解像度はそれぞれ、1/12 度×1/12cos φ 度、1/60 度×1/60cos φ 度、1/180 度×1/180cos φ 度である。最内の L3 モデルの水平領域は 116.98E-150.32E、23.69N-47.69N である。モデルは次の手順で駆動した。(1)、(2) では 232m 以深のポテンシャル水温と塩分を再解析データ FORA-WNP30 (Usui et al., 2017) に緩和した。昨年度の段階で(3)の途中まで進んでいたが、(3)は昨年度と設定を変え(水温・塩分緩和なし)再計算した。

- (1) L0-L1 モデルを 2000 年 1 月 1 日から 2012 年 12 月 31 日まで積分
- (2) L0-L2 モデルを 2012 年 12 月 31 日から 2013 年 1 月 1 日まで積分 (L2 の初期値は(1)の結果を補間)
- (3) L0-L3 モデルを 2013 年 1 月 1 日から積分を継続 (L3 の初期値は(2)の結果を補間、起潮力ポテンシャルあり)

### 3. 結果と考察

L0-L3 モデルを 1 年程度積分したところで、間宮海峡付近で氷が非常に厚くなり計算が破綻してしまう問題が発生した。氷が非常に厚くなる原因は、アムール川の淡水流入により間宮海峡付近の海面塩分が海氷の塩分より低くなるのが原因であると考えられた。そこで、(1) 間宮海峡の幅を広げること、(2) 塩分が低くなる場所での水平拡散を大きくすること、(3) 海氷の塩分の設定を小さくすること、という 3 つの対処法を施し、モデルを安定に駆動することに成功した。

また、特に夏期において海面付近の水温が看過できない程度に低くなる問題があることが判明したため、混合層スキームを Noh and Kim (1999) から、GLS (Umlauf and Burchard, 2003) に変更し、L0-L1 モデルを用いてパラメータの調整を行なった。COCO では、GLS は Warner et al. (2005) に基づいて実装され、Carniel et al. (2009) に従って砕波による TKE input の効果が加えられている。図 1 は GLS で標準的な設定を用いた場合における L1 モデルの 2013 年 8 月の海面水温を観測 (MGDSST (Kurihara et al., 2006)) と比較したものであるが、黄海、日本海、オホーツク海付近においてモデルの海面水温が観測より 5°C 以上低くなった。パラメータ等設定を変えて調査したところ、砕波による TKE input に関連するパラメータ CW (Carniel et al. (2009) の(8)式の CW) に感度があることが判明した。CW=100 が標準的な値であるが、2013 年 6 月から CW=10 として変更して積分した場合、2013 年 8 月の海面水温のバイアスが軽減された (図 2)。

#### 4. まとめと今後の展望

昨年度に引き続き、水平約 500m 格子日本沿岸モデルの積分を継続し、主に 2 つの問題への対処を行なった。1 つ目の問題は、間宮海峡付近で氷が非常に厚くなり計算が破綻してしまう問題であり、地形・水平拡散・海氷の塩分の調整によりモデルを安定に駆動可能となった。2 つ目の問題は、特に夏期において海面付近の水温が低くなることである。混合層スキームを GLS に変更し、日本付近の水平解像度が 1/12 度のモデル (L0+L1 モデル) を用いてパラメータの調整を行なった。今後、調整したパラメータを用いて積分を継続する予定である。また、GLS については、MRI.COM (Tsuji no et al., 2017) と COCO の実装を比較すると、使用している stability function 等に違いがあるようである。モデルの表現性向上のため、これらの実装の違いの影響について今後検討する予定である。

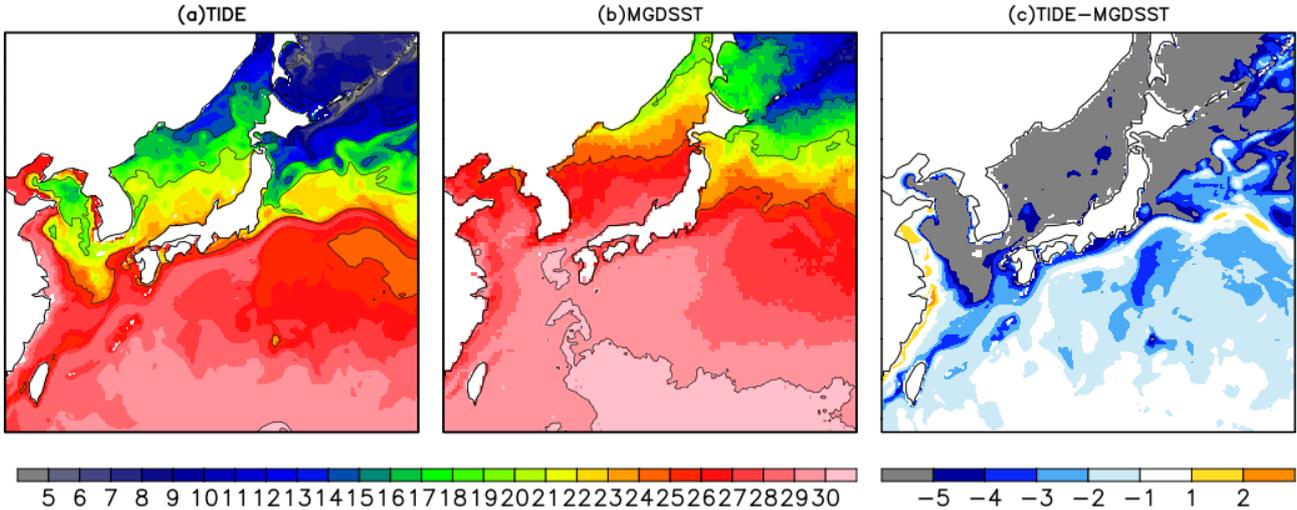


図 1(a)L1 モデルの 2013 年 8 月の海面水温。(b) 2013 年 8 月の海面水温の観測値 (MGDSSST)。(c) 観測との海面水温差 ((a)-(b))。単位は℃。

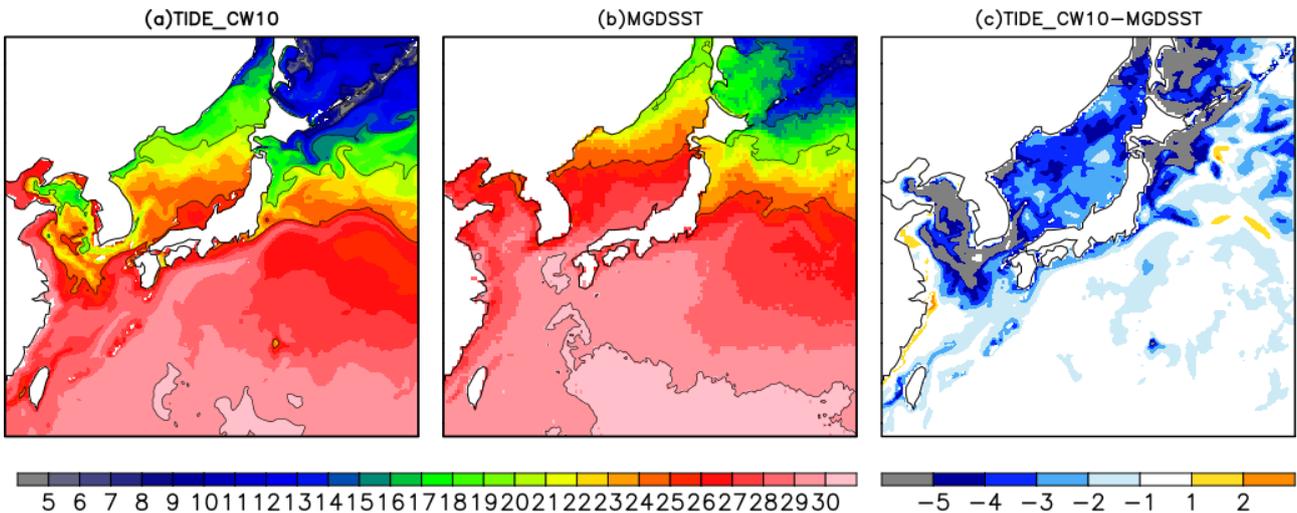


図 2(a) 2013 年 6 月から GLS のパラメータを変更した (CW=10) 場合の L1 モデルの 2013 年 8 月の海面水温。(b) 2013 年 8 月の海面水温の観測値 (MGDSSST)。(c) 観測との海面水温差 ((a)-(b))。単位は℃。

#### 参考文献

- (1) Carniel, S. et al., 2009: Ocean Modell. 30, 225–239.
- (2) Hasumi, H., 2006: CCSR Report, 25, Cent. for Clim. Sys. Res., Univ. of Tokyo, 103 pp.
- (3) Kurihara Y., T. Sakurai, and T. Kuragano, 2006: Weather Bull, 73, s1–s18.
- (4) Kurogi, M., H. Hasumi, and Y. Tanaka, 2013: J. Geophys. Res., 118, 1182–1194.
- (5) Noh, Y., and H. J. Kim, 1999: J. Geophys. Res., 104, 15, 621–15, 634.
- (6) Tsujino, H. et al., 2017: Tech Rep 80, Meteorological Research Institute, Japan.
- (7) Umlauf, L., and H. Burchard, 2003: J. Mar. Res. 61, 235–265.
- (8) Usui, N. et al., 2017: J. Oceanogr., 73, 205–233.
- (9) Warner, J.C. et al., 2005: Ocean Modell. 8, 81–113.

# NICAM 及び MIROC モデルを用いた汎惑星気象予測・物質輸送・気候変動の研究

## Study of the weather forecast, material transport and climate change of multi-planetary atmosphere using NICAM and MIROC models

黒田 剛史, 寺田 直樹, 笠羽 康正, 中川 広務, 鎌田 有紘, 狩生 宏喜, 古林 未来, 池田 有里,  
東北大・理, E-mail: tkuroda(at)tohoku.ac.jp (黒田)

小玉 貴則, 東工大・地球生命研究所

笠井 康子, 情報通信研究機構

佐川 英夫, 京都産業大・理

前澤 裕之, 大阪公立大・理

佐藤 正樹, 阿部 彩子, 東大・大気海洋研

Takeshi Kuroda, Naoki Terada, Yasumasa Kasaba, Hiromu Nakagawa, Arihiro Kamada, Hiroki Karyu,

Mirai Kobayashi, Graduate School of Science, Tohoku University

Takanori Kodama, Komaba Institute for Science, The University of Tokyo

Yasuko Kasai, National Institute of Information and Communications Technology

Hideo Sagawa, Faculty of Science, Kyoto Sangyo University

Hiroyuki Maezawa, Graduate School of Science, Osaka Metropolitan University

Masaki Satoh, Ayako Abe-Ouchi, Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo

### 要旨

NICAM を用いた太陽系外惑星を想定しての様々な条件下での気候シミュレーション, MIROC をベースとする火星・金星大気大循環モデルを用いた水・物質循環や雲生成過程のシミュレーションを行い, 太陽系惑星については観測との十分な連携を通して汎惑星大気気象予測・物質輸送・気候変動に対する総合的な理解を目指している. 今年度は特に MIROC モデルを用いた現在火星におけるレゴリス水吸着に伴う地下水分布の計算, 及び軌道傾斜角変動を導入した初期火星水環境の計算について進展があったので, それらを紹介する. さらに火星地下水分布計算の手法を応用し, MMX のイオン観測によるフォボス内部水量推定との連携を見据えたフォボス内部水進化計算を行い, 論文発表した(Kamada et al., 2024).

### 1. はじめに

我々はかねてから, MIROC モデルの火星(現在及び形成初期)・金星化に着手し, 太陽系外惑星の理解も視野に入れた比較惑星気象・気候学に貢献する成果を創出している. そのことに加え, 火星においては地表・地下の水環境の把握が 10~20 年先の有人探査等を見据えた上で重要なトピックとなっており, Mars Ice Mapper 等それに主眼を置いた将来探査も国内外で計画されている. 合わせて火星, 及びその衛星フォボスの起源と形成初期からの水環境進化は, 2026 年に打ち上げ予定の JAXA の火星探査機 MMX (Martian Monns eXploration) ミッション(Kuramoto et al., 2022)における主要科学ターゲットとなっている.

我々はそのような将来探査への貢献を見据え, 火星地表のレゴリスによる大気中水蒸気の吸着と地下への水の蓄積を再現する大気・地下水圏カップリング計算を進めている. さらにそのような過程を考慮した地下水圏の計算は, フォボス・月などの大気のない天体にも適用可能で, それらをターゲットとした惑星科学や将来探査への貢献が見込める.

加えて我々は初期火星の水環境の解明にあたり, MIROC による初期火星気候計算に地表流水モデル CRIS (Catchment-based RIver Simulator) と全球氷床モデル ALICE (Accumulation and ablation of Large-scale ICE-sheets with dynamics and thermodynamics) をカップリングさせ, 大気中の H<sub>2</sub> の混合比に応じた液体の降雨が存在しうる温暖なケース(H<sub>2</sub> 混合比 6%)・氷河の底融解が地表流水をもたらす冷涼なケース(H<sub>2</sub> 混合比 3%)・氷で覆われ底融解も存在しない寒冷なケース(H<sub>2</sub> 混合比 0%)の 3 パターンの初期火星気候を再現し, 観測されている流水地形(Valley Networks: 以降 VNs)分布の 1 万~100 年スケールでの再現について議論を行った(Kamada et al., 2020, 2021, 2022). ただしこれらの計算は軌道傾斜角を固定して行っており, 約 12 万年周期で想定される軌道傾斜角の変動(ミランコビッチサイクル)は考慮されていなかった.

### 2. 問題設定・方法

MIROC4 をベースとした火星 GCM による火星地下水圏の計算は, 前年までの進捗をもとに熱慣性データから見積もったレゴリス粒径分布(Presley and Christensen, 1997), レゴリス粒径から見積もった氷のない状態での空隙率(Sizemore and Mellon, 2008), 及び固有表面積(Clifford and Hillel, 1983; Bryson et al., 2008)の 3 つのパラメータについて全球一様を仮定した計算と空間分布を考慮した計算を行った. またこのようなレゴリスによる水の保持・地下水輸送過程を大気のない天体に適用した小惑星・衛星内部水輸送モデル ASTRA (Asteroid and Satellite internal water TRANsport model)を開発し, 43 億年前から現在までの想定されるフォボスの内部水分分布変動について計算を行った(モデルの詳細は Kamada et al., 2024 に記述). 加えて初期火星の水環境変遷では軌道傾斜角を 40°→50°→40°→30°→40°と変動させた 12 万年間の積分計算を, MIROC+CRIS による温度場・地表流水の推定と ALICE による氷床成長の 15,000 年間積分とを繰り返すことにより実行して, 温暖・冷涼・寒冷それぞれのケースについて得られる地表 Valley Networks 分布の再現性のアップデートを行った.

### 3. 結果と考察

図 1 はレゴリス粒径分布・空隙率・固有表面積の空間変動を導入してアップデートされた火星地下 2m より浅いところの吸着

水+氷のカラム量分布(単位  $\text{kg m}^{-2}$ )である。特に固有表面積の空間変動が明瞭な地下水の空間変動をもたらし、Mars Odyssey 観測による見積もり(Boynton et al., 2002)と定性的により整合する結果が得られた(古林, 2024)。図 2 はフォボス内部吸着水分分布の計算結果の一例で、初期状態で水の質量混合比 10%(含水鉱物に富む小惑星に相当)、レゴリスの最大吸着量(吸着係数)を  $10 \text{ kg m}^{-3}$  と仮定し 43 億年の積分計算を行ったものである。Kamada et al. (2024)では計算結果について初期含水量・レゴリス吸着係数の依存性を示しており、MMX によるフォボス周辺のイオン観測やサンプルリターンとの連携によりフォボスの起源の制約に貢献することが期待できる成果が得られた。さらに軌道傾斜角変動を考慮した初期火星計算では、得られた地表流水・氷床分布と Valley Networks 分布(Hynek et al., 2010; Alemanno et al., 2018)との整合性が軌道傾斜角を  $40^\circ$ に固定した計算(Kamada et al., 2021, 2022)と比べて 4%ほど向上した(Kamada et al., 2023)。

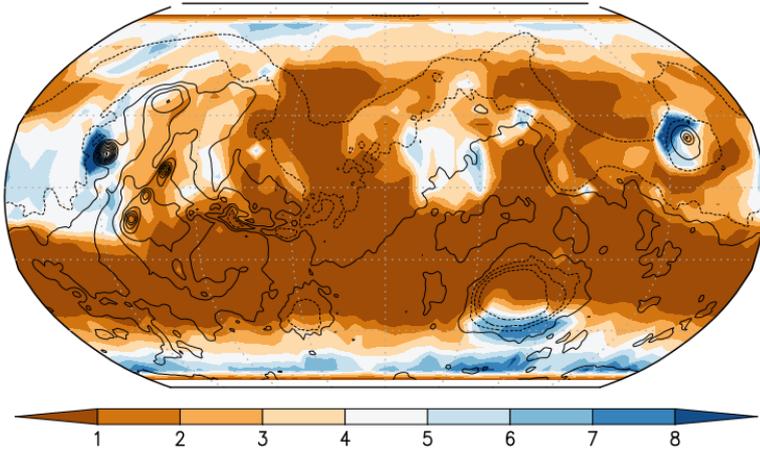


Fig. 1: Simulated amount distribution of subsurface water (sum of adsorbed water and ice) in 0-2 m from the surface on Mars (in  $\text{kg m}^{-2}$ ) (Kobayashi, 2024).

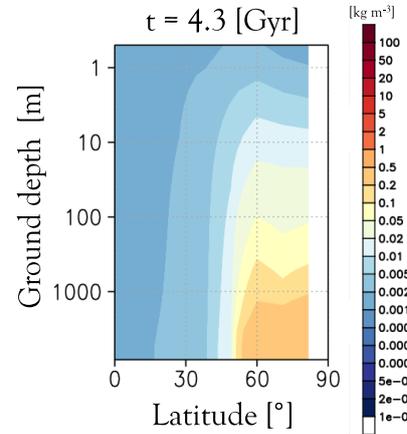


Fig.2: The simulated latitude-ground depth distributions of adsorbed water (in  $\text{kg m}^{-3}$ ) inside Phobos after the evolution of 4.3 Gyr, assuming the initial water content of 10 wt% and adsorption coefficient of  $10 \text{ kg m}^{-3}$  (Kamada et al., 2024).

#### 4. まとめと今後の展望

MIROC を用いた惑星水環境に係る研究については、現在の火星地下水分布に関して観測と定性的に整合する結果が得られたことで論文投稿への準備が整い、またフォボスの内部水量変動計算への適用へもなされたことで、今後の火星をはじめとする惑星探査への幅広い貢献を行う段階にまで開発が進んだ。さらに上記の結果の他にも直近数百万年間の火星における軌道傾斜角変動を考慮した地下水分布変遷計算、TRAPPIST-1e を想定した潮汐固定太陽系外惑星における氷床・河川流水を考慮しての水循環研究にも着手しており、次年度に向けて成果の創出が見込まれる。合わせて MIROC6 をベースとした現在火星の GCM も必要な物理過程の実装をほぼ終え、これを用いたダストストーム発生メカニズムや大気上下結合の研究も今後予定している。

#### 参考文献

- (1) Kamada et al., 2024: Modeling 4.3 billion years of water history on Phobos. *Icarus*, 410, 115916.
- (2) Kuramoto et al., 2022: Martian moons exploration MMX: sample return mission to Phobos elucidating formation processes of habitable planets. *Earth Planet. Spa.*, 74, 12.
- (3) Kamada et al., 2020: A coupled atmosphere–hydrosphere global climate model of early Mars: A ‘cool and wet’ scenario for the formation of water channels. *Icarus*, 338, 113567.
- (4) Kamada et al., 2021: Global climate and river transport simulations of early Mars around the Noachian and Hesperian boundary. *Icarus*, 368, 114618.
- (5) Kamada et al., 2022: Evolution of ice sheets on early Mars with subglacial river systems. *Icarus*, 385, 115117.
- (6) Presley and Christensen, 1997: Thermal conductivity measurements of particulate materials 2. *Results. J. Geophys. Res.*, 102, 6551–6566.
- (7) Sizemore and Mellon, 2008: Laboratory characterization of the structural properties controlling dynamical gas transport in Mars-analog soils. *Icarus*, 197, 606–620.
- (8) Clifford and Hillel, 1983: The Stability of Ground Ice in the Equatorial Region of Mars. *J. Geophys. Res.*, 88, 2456–2474.
- (9) Bryson et al., 2008: Stability of ice on Mars and the water vapor diurnal cycle: Experimental study of the sublimation of ice through a fine-grained basaltic regolith. *Icarus*, 196, 446–458.
- (10) Boynton et al., 2002: Distribution of Hydrogen in the Near Surface of Mars: Evidence for Subsurface Ice Deposits. *Science*, 297, 81–85.
- (11) 古林未来, 2024: 全球気候モデルによるレゴリス特性が火星地下水分布に与える影響の研究. 修士論文, 東北大学大学院理学研究科.
- (12) Hynek et al., 2010: Updated global map of Martian valley networks and implications for climate and hydrologic processes. *J. Geophys. Res.*, 115, E09008.
- (13) Alemanno et al., 2018: Global Map of Martian Fluvial Systems: Age and Total Eroded Volume Estimations. *Earth Spa. Sci.*, 5, 560–577.
- (14) Kamada et al., 2023: Impact of the Obliquity Cycle on Early Martian Climate and Valley Network Formation. *AGU Annual Meeting 2023*, P21B-3009.

# 金星気象現象の全球非静力学モデル NICAM による解明

## Development of a Venus Atmospheric General Circulation Model Based on NICAM

高木 征弘, 京産大・理学部, E-mail: takagi.masahiro(at)cc.kyoto-su.ac.jp

佐川 英夫, 京産大・理学部, E-mail: sagawa(at)cc.kyoto-su.ac.jp

安藤 紘基, 京産大・理学部, E-mail: hando(at)cc.kyoto-su.ac.jp

杉本 憲彦, 慶応大・自然科学教育センター, E-mail: nori(at)a2.keio.jp

関口 美保, 東京海洋大・海洋工学部, E-mail: miho(at)kaiyodai.ac.jp

八代 尚, 環境研・地球環境研究センター, E-mail: yashiro.hisashi(at)nies.go.jp

Masahiro Takagi, Faculty of Science, Kyoto Sangyo University

Hideo Sagawa, Faculty of Science, Kyoto Sangyo University

Hiroki Ando, Faculty of Science, Kyoto Sangyo University

Norihiko Sugimoto, Research and Education Center for Natural Sciences, Keio University

Miho Sekiguchi, Faculty of Marine Technology, Tokyo University of Marine Science and Technology

Hisashi Yashiro, Center for Global Environmental Research, National Institute of Environmental Studies

### 要旨

金星用 NICAM のための物理過程モデルの開発を行った。金星大気物理過程（雲物理・大気化学・放射輸送）は大気力学に大きな影響を与えている。また、金星は大気運動に関する観測データが極めて限られており、平均子午面循環などの情報がほぼ完全に欠如している。大気大循環モデルに大気化学モデルと雲物理モデルを組み込み、大気微量成分の分布を地上観測等の結果と比較することにより、数値モデルで再現された大気大循環の信頼性をチェックする必要がある。今年度は大気化学モデルの設計および実装を進めた。平行して短波放射輸送モデルの開発を行った。金星大気中に存在する惑星規模波動を数値モデルで再現することにより、下部雲層の赤道ジェットの原因および時間変動の力学的メカニズムを明らかにした。

### 1. はじめに

金星探査機「あかつき」や地上望遠鏡の観測によって、金星の新しい大気波動や擾乱が相次いで発見されている（Fukuhara et al., 2017; Kouyama et al., 2017; Kouyama et al., 2019; Imai et al., 2019; Kashimura et al., 2019; Peralta et al., 2020 など）。これらの現象は、雲層中の対流層を通過したり、その影響（中立成層の効果）を受けたりするため、静力学近似に基づく従来の大気大循環モデルでは正しく表現できない。本研究では、金星用の雲物理・放射輸送過程を備え、鉛直対流を正しく表現できる全球非静力学モデルを開発することにより、新たに発見された大気現象のメカニズムを解明する。特に、熱潮汐波や山岳波の大気大循環への寄与を初めて正確に評価し、大気スーパーローテーションの生成維持機構の解明に寄与する。

### 2. 問題設定・方法

これまでに開発した GCM 用の金星雲物理モデル（Ando et al., 2020, 2021）により、雲分布の形成に対する擾乱活動や惑星規模波の影響が明らかになってきた。しかしながら、上部雲層（高度 60-70 km）では観測よりも雲量が少なく、紫外線で観測される雲頂の雲模様が十分に再現されないなどの課題が残されており、雲物理モデルの精密化が必要である。また、現在の雲物理モデルは硫酸蒸気の生成などの大気化学プロセスを十分に考慮していないため、平均子午面循環などタイムスケールの長い現象が雲や物質の分布に与える影響を調べることができない。金星では大気運動に関する観測データが極めて限られているため、数値モデルで再現された大気大循環の信頼性を十分に検証することができず、大気スーパーローテーションの成因解明といった重要課題の解決の大きな妨げになっている。そこで今年度は、雲物理モデルの精密化と地上観測等との比較による数値モデルの信頼性の検証を目的として、大気化学モデルの検討および実装に着手した。平行して、放射輸送モデルの開発を進めるとともに、既存の静力学 GCM によるシミュレーションデータを解析し、金星大気中に存在する惑星規模波動の解析を行った。

### 3. 結果と考察

金星大気には硫黄 (S) を中心とする複雑な大気化学プロセスが存在しており、その結果として金星全体を覆う厚い硫酸エアロゾルの雲層が形成され、大気温度構造や大循環に極めて大きな影響を与えている。多数の分子種を含む大規模な大気化学モデルが提案されているものの（例えば Krasnopolsky, 2012）、金星大気中に存在する分子種や存在量には不明な点が多く残されており、こうした複雑な化学反応過程を機械的に実装した研究では現実的な雲分布や物質分布を再現することに成功していない（Stolzenbach, 2023）。そこで本研究では、比較的長寿命かつ地上観測等によって観測可能な分子種である一酸化炭素 (CO) に着目し、CO と硫酸ガス (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) を中心とする大気化学・雲物理モデルを構築することにした。これにより、雲物理モデルの精密化を図るとともに、モデルで再現される雲分布や物質分布の現実性を失うことなく、ある程度観測と比較可能なモデルが構築できるものと期待される。現在、大気主成分である二酸化炭素 CO<sub>2</sub> の光解離による一酸化炭素 CO と酸素原子 O の生成プロセスや、三酸化硫黄 SO<sub>3</sub> と水 H<sub>2</sub>O の反応による硫酸ガス H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> の生成反応の実装を進めているところである。

長波放射輸送モデルに引き続き、短波放射輸送モデルの開発を進めている。これまでに開発した長波放射輸送モデルと短波放射輸送モデルを利用した1次元・2次元の簡単な数値モデルを作成し、金星大気の温度構造、特に下層大気の成層度や鉛直対流の有無、夜昼間の温度差の形成などに着目した研究を行った結果、下層大気(0-40 km)には対流層が形成される可能性が高いこと、この対流層には顕著な地方時依存性が存在することなどが明らかになってきた。しかしながら、現在のモデルにはCO<sub>2</sub>の吸収線の圧力拡幅 (pressure broadening) に起因する不確実性が含まれている。この不確実性を適切に評価し、物理的な根拠に基づいて補正するための方法を検討中である。また、金星大気は上層と下層の密度差が極めて大きいため、地球用の赤外放射モデルとは異なる最適化が必要であることも分かった。

金星雲頂の紫外線観測の結果から、金星大気には4日波・5日波と呼ばれる惑星規模波が存在することが指摘されている (e. g., Del Genio & Rossow, 1990)。近年の金星探査機の観測により、5日波が南北対称な東西波数1の渦であることが明らかにされたが、成因や3次元的な構造は不明なままであった (Kouyama et al., 2013; Imai et al., 2019)。これらの惑星規模波の再現実験を実施し、結果を詳細に解析した結果、4日波・5日波がロスビー・ケルビン不安定 (Iga & Matsuda, 2005) によって励起されること、5日波による運動量輸送により下部雲層に赤道ジェットが形成されることなどが示された (Takagi et al., 2020)。さらに、赤道ジェットの発達をもたらすシア不安定により7日波が励起され、赤道ジェットが弱められること、5日波と7日波が交互に発達を繰り返すことにより200日程度のタイムスケールで赤道ジェットが準周期的に時間変動することなどが明らかになった (Takagi et al., 2023)。これらの結果は金星探査機あかつきの観測結果をよく説明するものである。

#### 4. まとめと今後の展望

金星大気の大気化学、雲物理、放射輸送モデルの開発を進めるとともに、金星の惑星規模波動に関する研究を行った。今後は物理過程を完成させ、観測結果との整合性をチェックし、大気スーパーローテーションの維持機構の解明を進めたい。

#### 参考文献

- (1) Haus et al., 2015: Radiative heating and cooling in the middle and lower atmosphere of Venus and responses to atmospheric and spectroscopic parameter variations. *Icarus*, 117, 262-294, <http://dx.doi.org/10.1016/j.pss.2015.06.024>
- (2) Ando et al., 2020: Venusian cloud distribution simulated by a general circulation model. *J. Geophys. Res.: Planets*, 125, e2019JE006208, <https://doi.org/10.1029/2019JE006208>
- (3) Ando et al., 2021: Quasi-Periodic Variation of the Lower Equatorial Cloud Induced by Atmospheric Waves on Venus. *J. Geophys. Res.: Planets*, 126, e2020JE006781. <https://doi.org/10.1029/2020JE006781>
- (4) Krasnopolsky, 2012: A photochemical model for the Venus atmosphere at 47-112 km. *Icarus*, 218, 230-246. doi:10.1016/j.icarus.2011.11.012
- (5) Stolzenbach et al., 2023: Three-dimensional modeling of Venus photochemistry and clouds. *Icarus*, 395, 115447. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2023.115447>
- (6) Horinouchi et al., 2017: Equatorial jet in the lower to middle cloud layer of Venus revealed by Akatsuki. *Nature Geoscience*, 10, 646-651. doi:10.1038/NGEO3016
- (7) Takagi et al., 2022: A GCM study on the 4-day and 5-day waves in the Venus atmosphere. *J. Geophys. Res.: Planets*, 127, e2021JE007164. <https://doi.org/10.1029/2021JE007164>
- (8) Takagi et al., 2023: Formation and quasi-periodic variation of equatorial jet caused by planetary-scale waves in the Venusian lower cloud layer. *J. Geophys. Res.: Planets*, 128, e2023JE007922. <https://doi.org/10.1029/2023JE007922>

# 気象・気候シミュレーションを用いた惑星規模現象のメカニズムに関する研究

## Mechanisms of planetary-scale meteorological and climatological phenomena and their simulations

神山 翼, お茶大・情報科学, E-mail: tsubasa(at)is.ocha.ac.jp  
Tsubasa Kohyama, Department of Information Sciences, Ochanomizu University

### 要旨

惑星規模現象の中でも、今年度は特に境界流同期現象について「既知現象との位置付け」と「中緯度気象との関係」の二つの明らかにすることを目標として研究を行った。たとえば、境界流同期は NAM 指数の確率分布を歪め異常気象をもたらすことなどを強く示唆する結果を得た。

### 1. はじめに

本課題は、研究代表者が発見した境界流同期現象 (Kohyama et al. 2021) について、主に「A. 境界流同期を既知現象と照らした際の位置付けを理解する」「B. 我が国を始めとする中緯度気象との関係を探る」の二つの目標を持って明らかにしようとしたものである。

### 2. 問題設定・方法

MIROC6 の CGCM(大気海洋結合モデル)の海洋高解像度バージョン(MIROC6Subhires)を用いて行われた、西岸境界流域の海面水温のみを強制する「西岸境界流ペースメーカー実験」(Yamagami et al. 2024, in prep) について、境界流同期のもたらす異常気象についてのデータ解析を行った。

### 3. 研究の進捗状況と今後の予定

まず上記の目標 A. について、西岸境界流域の海面水温のみを強制する「西岸境界流ペースメーカー実験」により、境界流同期の位相は「北半球環状モード (NAM) 指数」の確率分布を変化させることを示すことができた (図 1)。

次に目標 B. について、上記のペースメーカー実験等を解析することにより、境界流同期によるテレコネクションは、西岸境界流に近い我が国やアメリカ東海岸だけでなく、遠方のヨーロッパの夏季地上気温の確率分布に影響を与えることが示された。また北半球冬季には、境界流同期にともなる NAM 指数の確率分布の変化により、寒波や暖冬などの極端イベントの発生がサポートされている可能性が示唆された。

これらの目標については、共著のものを含めて多数の国内・国外発表を行ったほか、複数の論文原稿を準備している最中である。

### 参考文献

- Kohyama, T., Yamagami, Y., Miura, H., Kido, S., Tatebe, H., & Watanabe, M. (2021). The Gulf Stream and Kuroshio Current are synchronized. *Science*, 374(6565), 341-346.  
Yamagami Y., Tatebe H., Kohyama T., Kido S., and Okajima S. (2024), Title TBD, in prep.

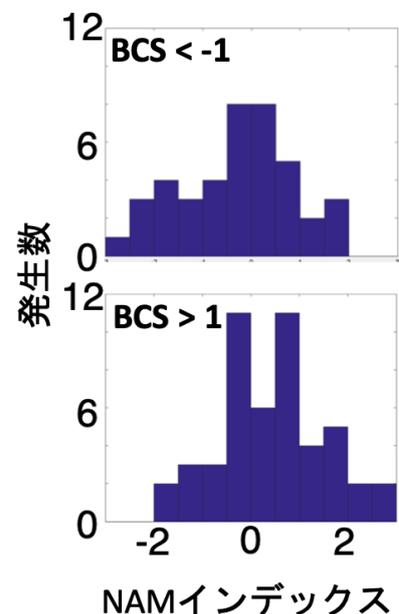


図 1: BCS のフェーズごとに分けて作成した NAM インデックスのヒストグラム。

# MIROC と NICAM を用いた地球型惑星におけるスノーボール状態突入条件の解明

## Understanding the condition of Snowball state for terrestrial planets using MIROC and NICAM

小玉 貴則, 東工大・地球生命研究所, E-mail: koda(at)elsi.jp  
黒田 剛史, 東北大学大学院 理学研究科  
齋藤 冬樹, JAMSTEC  
Takanori Kodama, Earth-Life Science Institute, Tokyo Institute of Technology,  
Takeshi Kuroda, Tohoku University,  
Fuyuki Saito, JAMSTEC

### 要旨

地球史の中で過去に少なくとも3回あった全球凍結イベントは、気候進化の重要な問題であるだけでなく、生命の進化に対しても重要な意味を持つ。しかしながら、それぞれの全球凍結イベントにおける、太陽放射、二酸化炭素濃度、大陸配置は異なるため、全球凍結イベントを引き起こしたトリガーは未だ明らかでない。加えて、全球凍結イベントを再現するシミュレーションの例は少なく、その物理場も十分に理解されているとは言えない。よって、この課題では、古気候実験で実績のある MIROC4m を用いて、3000 年積分を実施し、全球凍結状態における気候場を調べた。加えて、NICAM を用いて全球凍結時のテスト計算を行なった。その結果、大気海洋結合モデルで得られた全球凍結条件であっても、全球凍結に陥らないことを確認した。

### 1. はじめに

地球史の中で、最も大規模に環境が変化したイベントの1つに地球表層が全球的に凍結した『スノーボールイベント』が挙げられる。本現象は、約25億年前、約7億年前、約6億年前に少なくとも3回発生し、大規模な気候変動をもたらした。それぞれのイベント間で継続期間は大きく異なるが、イベント前後で、大気組成の変化を伴う気候進化や生態系の大きな変化があったことが知られている。しかし、その原因や『どのような気候の推移だったか?』など、多くの議論が残っており、地球気候進化を議論する上で、大きな課題である。しかしながら、先行研究におけるスノーボール状態のシミュレーション例は多くなく、十分に理解されているとは言えない。特に、長期積分を要する、海洋循環の推移などに関して、その物理場を記述したものはなく、長期気候進化の観点から議論が残っている状況である。

### 2. 問題設定・方法

本研究課題では、数ある課題のうち、スノーボール突入条件とその後の気候推移に注目し、モデル整備と実験を予定した。スノーボール突入条件は、低緯度まで氷床・海氷が張り出す条件(アイスアルベドフィードバックが駆動する条件)と予想できる。よって、第一ステップとし、現在地形において太陽放射量を減らす実験を行い、スノーボール突入条件を調べた。しかしながら、現状の MIROC4m ではスノーボール突入後のシミュレーションが扱えないという問題があるため、MIROCの陸面を修正(すべて氷床とした初期条件)し、厚い海氷に対応できるように海洋モデルも修正し、実験した。加えて、MIROCによって得られたスノーボール突入条件での太陽放射量にて、NICAMを用いた気候実験を行なった。

### 3. 結果と考察

太陽放射量を現在の100%、96%、94%、91%にて、MIROC4mを用いて長期気候実験を行なったところ、94%と91%の場合において、スノーボール状態への気候遷移を確認した。加えて、スノーボール突入後も91%の場合に500年間、94%の場合に1000年間の延長計算を行い、スノーボール状態での平衡場を求めた。スノーボール状態での大気循環、特にハドレー循環は、先行研究で見られたように強くなり、海洋循環はスノーボール突入直前に大きくなるが、突入後すぐに弱くなるのがわかった。また、NICAMを用いた検討では、MIROCから得られたスノーボール突入条件での太陽放射量94%ではスノーボール状態に突入せず、むしろ表面温度が初期値(273K)から上昇してしまった。テスト計算として、太陽放射量50%で計算したところ、表面温度は低下していき、およそスノーボール状態に突入するだろうと考えられる状態まで確認することができた。表面温度が暖まった理由としては、雲による短波長の太陽放射の反射による寄与であると考察している。

### 4. まとめと今後の展望

MIROCによるスノーボール状態への突入条件は、それぞれの太陽放射量に対し検討し、94%で突入することを確認した。また、長期積分を実施し、スノーボール状態での気候の平衡場を明らかにした。NICAMを用いたスノーボール実験では、テスト実験を行なったが、スノーボール条件の定量化までは至らなかった。今後、雲の効果を検討する予定である。加えて、スノーボール脱出条件も検討することを予定している。これら成果は、本課題に加え、小長谷(JAMSTEC)と高須賀(東北大)との共同研究として行い、今後も数値計算リソースや議論検討を行う予定である。

# f 面放射対流平衡シミュレーションにおける熱帯低気圧形成のコリオリパラメータと領域サイズへの依存性についての研究

Study on the dependence of tropical cyclone developments on the Coriolis parameter and the domain size in the radiative-convective equilibrium simulation on an f-plane

井野 創開, 東大・理学系, E-mail: sino(at)eps.s.u-tokyo.ac.jp  
山崎 一哉, 東大・情報基盤センター, E-mail: kyamazaki (at)cc.u-tokyo.ac.jp  
三浦 裕亮, 東大・理学系, E-mail: h\_miura(at)eps.s.u-tokyo.ac.jp  
Sosaku Ino, Faculty of Science, The University of Tokyo  
Kazuya Yamazaki, Information Technology Center, The University of Tokyo  
Hiroaki Miura, Faculty of Science, The University of Tokyo

## 要旨

鉛直シアや陸地等の環境場の影響を除いた理想的な条件において熱帯低気圧形成のコリオリパラメータ依存性、および、その領域サイズ依存性について調べた。数値実験には理研が開発した雲解像モデル SCALE-RM を用いた。数値実験の水平領域は正方形とし、水平格子間隔 4 km を用いて正方形領域の一边の長さを 96 km から 960 km まで変更して実験を行った。また、水平格子間隔 16 km を用いて正方形領域の一边の長さを 1600 km、3200 km、4800 km とした実験も行った。赤道近傍に相当する小さなコリオリパラメータでも領域を大きくすると熱帯低気圧の形成が確認できた。熱帯低気圧の形成に必要な領域サイズは、等価深度を一定としてコリオリパラメータのみ変化させたロスビーの変形半径でスケールできることが分かった。

## 1. はじめに

熱帯低気圧は主として熱帯海洋上で発生する。発達した熱帯低気圧は日本では台風と呼ばれ、恵みをもたらすと同時にしばしば強風と激しい降水により甚大な被害をおよぼす社会にとって重要な気象現象として知られている。熱帯低気圧については、発生過程、発達過程、発達時の構造などについて多くの研究がある。しかし、発生メカニズムをはじめとする多くの事柄について、科学的な理解は十分とは言えない。

熱帯低気圧は気象現象としていくらか特異であり、そのマルチスケール性が理解の難しさの原因になっている。一つ一つの積乱雲の寿命は数時間程度であり、組織化した積乱雲群の寿命も 2 日程度である。しかし、熱帯低気圧はさまざまな雲の集合体として数 100 km から 1000 km におよぶ大きさを持っており、その寿命は数日から 2 週間程度におよぶ。このように、熱帯低気圧の寿命は同程度の水平スケールを持つ気象現象に比して長い。その時空間スケールの存在理由については分かっていない。

熱帯低気圧の形成過程には、海面水温のような熱的因子や惑星渦度や鉛直シアのような力学的因子が複雑に関係する。そのうち惑星渦度は熱帯低気圧の循環や構造形成に決定的な役割を果たすと考えられ、コリオリパラメータの小さい赤道付近では熱帯低気圧の発生数が少ないことが知られている。一方で、数は少ないものの赤道付近での熱帯低気圧の発生も確認されている。本研究では、コリオリパラメータが熱帯低気圧形成に果たす力学的寄与の理解を目指し、地形や鉛直シア等のような背景場の非一様性を排した理想条件における放射対流平衡シミュレーションにおける熱帯低気圧形成について調べた。

## 2. 問題設定・方法

理化学研究所が開発した雲解像モデル SCALE-RM (Nishizawa et al. 2015; Sato et al. 2015) を使用して実験を行った。鉛直総数は 74 層で、最下層の高度は 37 m、最上層の高度は 33200 m である。水平格子間隔については後述する。計算期間は 50 日とした。下部境界条件は海面とし、海面水温は 300 K に設定した。側面境界条件には二重周期条件を用いた。雲微物理スキームは TOMITA08、放射スキームは MSTRNX を使用した。全ての実験において積雲対流パラメタリゼーションは用いていない。初期条件はノイズを加えた静止大気で、初期渦は与えていない。

水平方向の領域は正方形とした。水平格子間隔 4 km の設定では、正方形の一边を 96 km、160 km、240 km、360 km、480 km、720 km、960 km に設定した 7 つの実験を行った。水平格子間隔 8 km、16 km で、正方形の一边を 960 km とした実験を水平格子間隔 4 km の実験と比較したところ、熱帯低気圧形成のコリオリパラメータ依存性は、水平格子間隔にあまり大きく依存していなかった。そこで、計算資源節約の目的で、水平格子間隔を 16 km にして、正方形の一边を 1600 km、3200 km、4800 km とした実験を行った。それぞれの解像度においてコリオリパラメータを少しずつ変更した実験を行い、熱帯低気圧形成が確認できるコリオリパラメータ閾値を特定した。コリオリパラメータの値は水平方向に一樣とした。

## 3. 結果と考察

水平解像度 4 km で正方形領域の一边の長さを 96 km から 960 km まで変更して、熱帯低気圧形成に必要なコリオリパラメータの閾値の存在を調べたところ、全ての領域サイズにおいてコリオリパラメータ閾値の存在が確認できた。さらに、領域サイズを 1600 km、3200 km、4800 km 四方とさらに拡大した同様の実験においてもコリオリパラメータ閾値の存在が確認できた。領域が広い場合には、赤道近傍のコリオリパラメータでも熱帯低気圧の形成が確認できた。

#### 4. まとめと今後の展望

水平一様なコリオリパラメータを与えた  $f$ -面放射対流平衡シミュレーションにおいて、熱帯低気圧形成のコリオリパラメータ依存性、および、その領域サイズ依存性について調べた。面白いことに、熱帯低気圧形成のコリオリパラメータ閾値と領域サイズの関係は、等価深度を一定として評価したロスビーの変形半径でスケールすることが分かった。これは熱帯低気圧の水平スケールはロスビーの変形半径とは無関係ではないかという先行研究の議論に反する結果であり、さらなる調査が必要である。

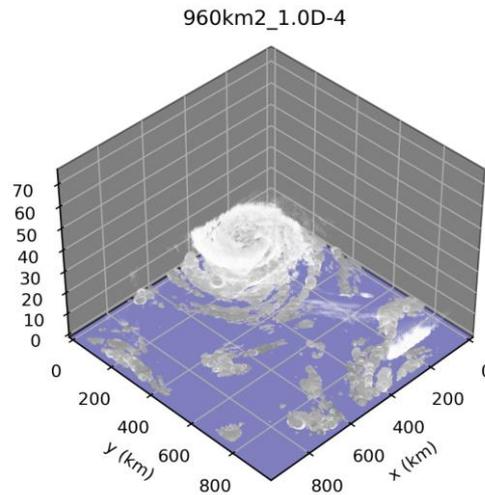


図 1: 960 km 領域で発生した熱帯低気圧の例。雲水と雲氷を描画した。  
コリオリパラメータの値は  $f = 1.0 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 。

#### 参考文献

- (1) Nishizawa, S., H. Yashiro, Y. Sato, Y. Miyamoto, and H. Tomita, 2015, Influence of grid aspect ratio on planetary boundary layer turbulence in large-eddy simulations. *Geosci. Model Dev.*, 8, 3393–3419, doi:10.5194/gmd-8-3393-2015
- (2) Sato, Y., S. Nishizawa, H. Yashiro, Y. Miyamoto, Y. Kajikawa, and H. Tomita, 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, doi:10.1186/s40645-015-0053-6

# 深層学習を用いた降水予測モデルの開発

## Development of a Precipitation Forecast Model Using Deep Learning

金子 凌, 東大・生研, E-mail: rkaneko@iis.u-tokyo.ac.jp

芳村 圭, 東大・生研, E-mail: kei@iis.u-tokyo.ac.jp

### 要旨

深層学習を用いた降水予測の研究は、世界的に積極的に行われている。短時間先の降水予測は、防災・減災分野において非常に重要である一方、未だに評価手法などに於いて幾つかの課題が存在している。本研究では、深層学習降水予測モデルを提案し、更にこれらの課題を解決する。日本領域において、比較的長期間である三年間のテストデータを用いて予測精度の評価を行った。評価対象は弱い雨に留まらず、豪雨も対象とし、より汎化性能の評価を厳密に行った。また、現業の気象庁降水短時間予報とも比較することで、深層学習モデルの予測性能とその課題を詳細に調査した。

### 1. はじめに

近年、深層学習を利用した短時間降水予測の研究が世界的に増加している。これらの手法は、防災や減災などの分野での利用が期待される一方で、四つの課題が存在している。第一に、予測精度の評価期間が短く、モデルの汎化性能が十分に確認できない点が挙げられる。年ごとに降水の傾向は異なるから、数年にわたる予測期間を評価する必要がある。第二に、強い降水への対応が不十分な研究が多い点が挙げられる。日本領域での降水は  $50 \text{ mm h}^{-1}$  を超える事例も少なくはなく、これらの豪雨も考慮しモデルの開発・評価を行う必要がある。第三に、既存の研究においては、深層学習モデルと現業の気象モデルとの比較が多く行われていない点が挙げられる。現業の気象モデルと比較しなければ、深層学習モデルがどの程度有用なのか相対的な評価をすることが難しいと考えられる。第四に、そもそも深層学習による降水予測を日本領域に適用した事例が多くない点が挙げられ、本邦でも深層学習手法が有用なのかどうか未知な点が多いことが課題である。本研究では、深層学習による降水予測の精度を改善し、上の四つの課題を解決すべく、より包括的で詳細な評価を行うことを目的とする。評価期間を三年間、最大雨量の閾値を  $50 \text{ mm h}^{-1}$  とし、これを日本領域において適用する。更に、予測結果を現業の、気象庁の降水短時間予報の予測結果と比較することで、深層学習モデルの現状の性能を明らかにする。

### 2. 学習データ・モデル・計算ケース

学習データには気象庁の作成する解析雨量を利用した。これを日本領域が覆われるように  $256\text{km}$  四方の 13 領域に分割し学習データを作成した。モデルは現在から 2 時間前までの 1 時間降水量を入力すると、3 時間先までを予測するよう学習される。予測時には、予測結果を再帰的に入力に使うことで、6 時間先までの予測を可能とする。いずれの降水量もカテゴリー値に変換して利用した (閾値は  $0.0, 0.5, 5.0, 10, 30, 50 \text{ mm h}^{-1}$ )。トレーニングデータとして 2006 年から 2012 年までのデータ、バリデーションデータとして 2013 年から 2015 年までのデータ、テストデータとして 2016 年から 2018 年までの三年間のデータを利用し予測性能の評価を行った。

深層学習モデルとして、U-net<sup>1)</sup>と、それに Attention<sup>2)</sup>と Deformable Convolution<sup>3)</sup>を追加した提案手法を用意した。これらと、気象庁の現業の降水短時間予報、更に、現在と同様の降水が降り続けると仮定し予測する、持続予報との精度比較も行う。それぞれのケース名を U-net, Proposed, Kotan, Persistence とし精度を評価した。この際、テストデータの全期間で評価できるよう、Performance Diagram<sup>4)</sup> (後述)を作成し、様々な精度指標で評価を行っている。

### 3. 結果と考察

提案手法と U-net の学習曲線をみると (Fig. 1)、提案手法では 62 エポック目でバリデーションの誤差が下がってきたが、U-net はモデルのパラメーター数が少なくシンプルであるから、提案手法よりも早く学習が進行し、26 エポック目からは学習の改善は見られなかった。またバリデーション誤差も、U-net は Proposed よりも下がりがなかった。

全ケースを Performance Diagram 上にプロットして三年間の網羅的な評価を行った (Fig. 2)。これは Threat score (TS, 予測性能)、Probability of Detection (POD, 実際の降水を見逃すこと無く予測できているか)、Success Ratio (SR, 予測した降水が実際に発生していたか)、Bias (POD と SR のどちらかに偏っているか) が同時に評価できる図である。この図によると、降水量の閾値が  $5 \text{ mm h}^{-1}$  以上のとき、Proposed の TS は、2 時間先予測では Kotan よりも低いが、3 時間先予測以降は高くなる傾向があることがわかった。しかし、4 時間先以降の予測では大きな差が見られなかった。また、Kotan では予測先時刻が延びる

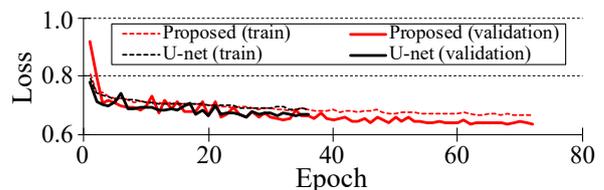


Fig. 1 学習曲線 (金子・芳村, 2024<sup>4)</sup> から引用)

ほど POD 側にバイアスがあり過大評価の傾向が見られたが, Proposed や U-net は過大評価の傾向を抑えるように予測が行えていることが分かる. 閾値となる降水が  $50 \text{ mm h}^{-1}$  と豪雨の時, Proposed の TS は 1 時間先予測では Kotan と同じだが, その後は Kotan よりも高かった. また, U-net は POD 側にバイアスがあり過大評価の傾向が強いのにに対し, Proposed はその傾向が抑えられた予測をしていることが明らかとなった. 一方 Kotan では過小評価の傾向があることが明らかとなり, 豪雨を予測しきれなかった可能性がある.

全予測事例で Proposed や U-net は Persistence より予測性能が高かった. これより, 深層学習モデルは何らかの物理現象を学習し予測することが可能であることが考えられる. さらに, Proposed は U-net より予測性能が高い場合が多かった. これは, Attention や Deformable Convolution を導入することによって, 降水の発生領域を重点的に学習することができ, 予測精度の向上に繋がったためだと考えられる.

#### 4. まとめと今後の展望

本研究は, U-net に Attention と Deformable Convolution を追加した深層学習モデルを提案し, これらを活用した短時間降水予測の精度向上とその詳細な評価を行った. この Proposed は, 閾値  $5 \text{ mm h}^{-1}$  以上の降水において, 3 時間先の降水予測で現業の降水短時間予報 Kotan の予測精度を上回ることが確認された. また, 同様に豪雨の予測でも, 2 時間先予測からは Kotan よりも予測性能が高いことが明らかとなった. しかし, 降水を過大評価する傾向が確認されている. Proposed は U-net での過大評価の傾向を緩和する傾向にあるが, 今後もこの問題をいかに解決していくかが重要となるだろう.

さらに, データについても様々な気象情報を統合して学習させることで, 予測精度の向上が考えられる. 現在は降水のデータのみの学習であるため, 例えば地形データや, 空気中の水蒸気量などの衛星データを加えることも予測精度の向上に繋がるだろうと考えられる. また, 深層学習系のモデルは, Persistence よりも予測性能が良いことから, 何らかの物理現象を学習している可能性がある. これを理解するためには Attention によって作成された注意マップや, Deformable Convolution のフィルター形状の分析に基づいた比較を行うことが必要であると考えられる.

#### 謝辞

本研究は JSPS 科研費 22KJ0533 の助成の支援を受け, 解析雨量・降水短時間予報 GPV は一般財団法人気象業務支援センターより提供されているものを使用した. ここに謝意を示す.

#### 参考文献

- (1) Ronneberger, O., Fischer, P. and Brox, T. : U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation, Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention - MICCAI 2015, Vol. 9351, pp. 234-241, 2015.
- (2) Oktay, O., Schlemper, J., Folgoc, L. L., Lee, M., Heinrich, M., Misawa, K., Mori, K., McDonagh, S., Hammerla, N. Y., Kainz, B., Glocker, B. and Rueckert, D. : Attention U-Net: Learning Where to Look for the Pancreas, 1st Conference on Medical Imaging with Deep Learning (MIDL 2018), 2018.
- (3) Zhu, X., Hu, H., Lin, S. and Dai, J. : Deformable ConvNets V2: More Deformable, Better Results, 2019 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), pp. 9300-9308, 2019.
- (4) 金子 凌, 芳村 圭: 深層学習降水予測の精度改善と現状の詳細評価, 土木学会論文集, 80 巻, 16 号, 2024.
- (5) Roebber, P. J. : Visualizing Multiple Measures of Forecast Quality, Weather and Forecasting, Vol. 24, No. 2, pp. 601-608, 2009.

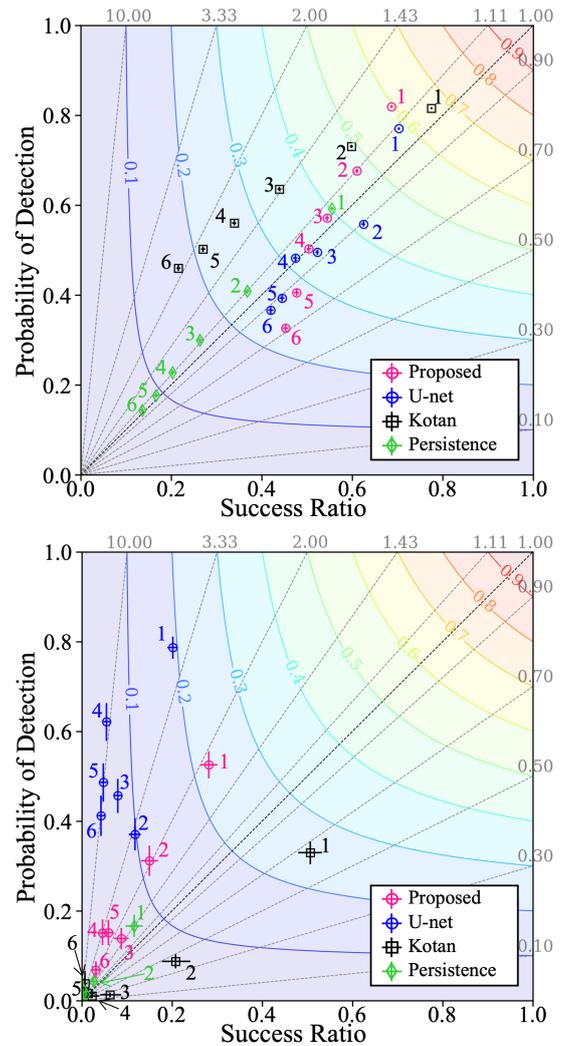


Fig 2 Performance Diagram. 閾値の降水カテゴリーは上の図で  $5 \text{ mm h}^{-1}$  以上, 下の図で  $50 \text{ mm h}^{-1}$  以上である. プロット近傍の数字は予測先時間 (単位は時間) を表す. シェードは TS を示しグレーの点線は POD と SR のバイアスを示す. ブートストラップ法を用い 1,000 回のサンプルを行った. 95%信頼区間を点から伸びる線で示している. (金子・芳村, 2024<sup>4)</sup> から引用)

# 全球および領域雲解像モデルを用いた極端気象予測研究

## Extreme weather prediction study using global and regional cloud resolving models.

中野 満寿男, 海洋研究開発機構, E-mail: masuo(at)jamstec.go.jp

小玉 知央, 海洋研究開発機構

山田 洋平, 海洋研究開発機構

升永 竜介, 海洋研究開発機構

八代 尚, 海洋研究開発機構

荒金 匠, 台湾中央研究院

齋藤 成利, 東京大学大気海洋研究所

菫澤 雄太朗, 東京大学大気海洋研究所

Masuo Nakano, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

Chihiro Kodama, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

Yohei Yamada, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

Ryusuke Masunaga, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

Hisashi Yashiro, National Institute for Environmental Studies

Sho Arakane, Academia Sinica

Sigetoshi Saito, Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo

Yutaro Nirasawa, Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo

### 要旨

To mitigate the impact of typhoons, it is needed to precisely predict typhoon activity before the beginning of the typhoon season (June). Dynamical-based typhoon seasonal forecast using conventional coupled GCMs has been intensively examined along with the progress of high-performance computers in the recent couple of decades. However, horizontal resolution is not high enough to represent observed typhoon intensity and some bias correction technique is needed to predict the intensity-related index (e.g., ACE) quantitatively. Here, we used a 14-km-mesh global nonhydrostatic atmospheric model coupled with a 0.25-deg-mesh global ocean model (NICOCO; an AGCM NICAM coupled with an OGCM COCO) for 2023 typhoon seasonal forecast experiments.

The SST pattern predicted by NICOCO showed that more La nina like pattern rather than El nino pattern which actually observed in 2023. TC number in the western north Pacific was overestimated in September to October and that lead to overestimation in whole season.

### 1. はじめに

台風は毎年東アジア諸国に襲来し、しばしば重大な災害を引き起こす。その一方で水資源をもたらす側面もある。このため、台風シーズン前にその年の台風活動を予測する、台風季節予測の技術開発が望まれる。現状では、欧州中期予報センター (ECMWF) など一部の現業予想センターが台風季節予測プロダクトを提供している (たとえば [https://charts.ecmwf.int/products/seasonal\\_system5\\_tstorm\\_hurricane\\_frequency](https://charts.ecmwf.int/products/seasonal_system5_tstorm_hurricane_frequency) 2024. 6. 27 閲覧) がモデルの水平解像度の不足などにより、十分な強度の台風を再現できず、台風の検出において風速の閾値を弱めに設定するなどバイアス補正などを行っているのが現状である。日本においては、全球非静力学モデル NICAM と海洋モデル COCO とを結合した NICOCO (Miyakawa et al, 2017) が開発され、台風の強度をある程度再現できる水平解像度での季節予測実験が可能である。このため、2023 年の季節予測実験を行った。

なお、領域大気モデル SCALE (大気 5 km) を用いた、2018 年 1 月下旬の南岸低気圧に伴う関東大雪事例の実験も行ったが、報告は割愛する。

### 2. 問題設定・方法

用いたモデルは NICOCO (Miyakawa et al, 2017) である。大気モデル NICAM の水平解像度は 14km、鉛直層数は 78 (モデルトップ 50km) とした。海洋モデル COCO の水平解像度は 0.25 度、鉛直層数は 63 とした。NICAM の初期値は ALERA3 (Yamazaki et al. 2023) から作成した。ALERA3 は JAMSTEC で作成している LETKF ベースのアンサンブル大気解析データである。ALERA のメンバー数は 63 であり、初期値には最初の 5 メンバーから作成した。COCO の初期値は COCO を JRA55-do (Tsujino et al. 2018) で初期時刻まで駆動することで作成した。実験のアンサンブルサイズは 5 であり、海洋モデルの初期値は全メンバーで共通で大気モデルのみが異なる。

### 3. 結果と考察

図 1 は OISST と NICOCO による 6-10 月平均の海面水温 (SST) 分布である。NICOCO はカリフォルニア沖の下層雲が少ない

バイアスがあり、短波入射過剰であるため、この領域での SST を高めに予測した。熱帯太平洋においては OISST ではエルニーニョ現象の発生に伴い、ペルー沖の SST が高くなっているが、NICOCO では前年から続くラニーニャをより強く引きずっているような SST 分布になっている。  
 北西太平洋域における台風発生数は過大評価であり、これは、7-9月の発生数はほぼ観測と同程度であったものの、9-10月の発生数が観測より多かったためであった。

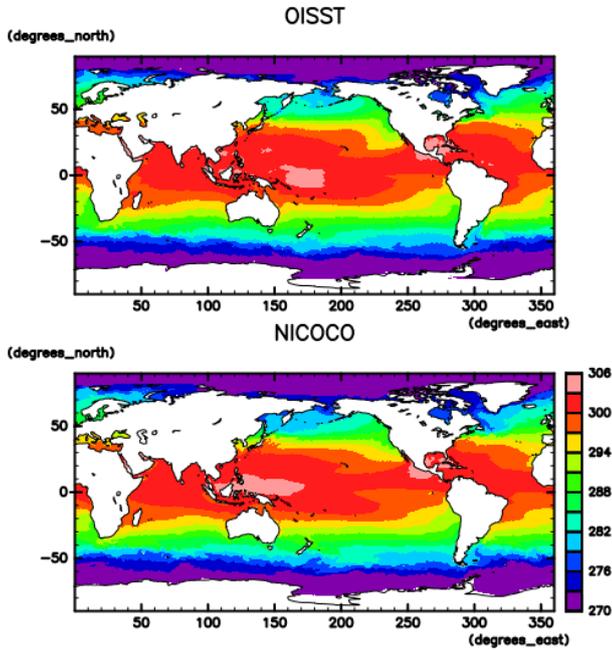


Fig. 1 予測された SST 分布.

#### 4. まとめと今後の展望

NICOCO を用いて 2023 年の台風活動の季節予測を行った。熱帯太平洋域の SST 予測が観測よりもラニーニャを引きずっており、台風の発生数も観測より多い予測となった。これは 7-9 月の発生数予測の精度は高かったものの、9-10 月の発生数の予測が過大だったためである。今後は SST の初期値化手法の見直しや、モデルの高度化による精度向上を目指したい。

#### 参考文献

- (1) Miyakawa, T., H. Yashiro, T. Suzuki, H. Tatebe, and M. Satoh, 2017: A Madden-Julian Oscillation event remotely accelerates ocean upwelling to abruptly terminate the 1997/1998 super El Niño, *Geophys. Res. Lett.*, 44, 9489-9495, doi:10.1002/2017GL074683.
- (2) Yamazaki, A., K. Terasaki, T. Miyoshi, and S. Noguchi, 2023: Estimation of AMSU-A radiance observation impacts in an LETKF-based atmospheric global data assimilation system: Comparison with EFSO and observing system experiments. *Wea. Forecasting*, 38 (6), 953-970, doi:10.1175/WAF-D-22-0159.1
- (3) Tsujino, H., S. Urakawa, H. Nakano, R. J. Small, W. M. Kim, S. G. Yeager, G. Danabasoglu, T. Suzuki, J. L. Bamber, M. Bentsen, C. W. Böning, A. Bozec, E. P. Chassignet, E. Curchitser, F. B. Dias, P. J. Durack, S. M. Griffies, Y. Harada, M. Ilıcak, S. A. Josey, C. Kobayashi, S. Kobayashi, Y. Komuro, W. G. Large, J. L. Sommer, S. J. Marsland, S. Masina, M. Scheinert, H. Tomita, M. Valdivieso, D. Yamazaki, 2018: JRA-55 based surface dataset for driving ocean-sea-ice models (JRA55-do), *Ocean Modelling*, 130, 79-139, doi: 10.1016/j.ocemod.2018.07.002

# 海洋モデルを用いたケープダムレー沖南極底層水の沈み込み過程の再現

## Ocean model study on the formation processes of Cape Darnley Bottom Water

メンサ ビガン, 北海道大学・低温科学研究所, E-mail: [vmensah@lowtem.hokudai.ac.jp](mailto:vmensah@lowtem.hokudai.ac.jp)  
中山 佳洋, 北海道大学・低温科学研究所, E-mail: [Yoshihiro.Nakayama@lowtem.hokudai.ac.jp](mailto:Yoshihiro.Nakayama@lowtem.hokudai.ac.jp)  
大島 慶一郎, 北海道大学・低温科学研究所, E-mail: [ohshima@lowtem.hokudai.ac.jp](mailto:ohshima@lowtem.hokudai.ac.jp)  
Vigan Mensah, Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University  
Yoshihiro Nakayama, Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University  
Kay I. Ohshima, Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University

### Abstract:

Using a 2-km resolution model, we investigated the downslope flow of Dense Shelf Water (DSW) and its modification into Cape Darnley Bottom Water (CDBW) throughout this downslope flow. The study region covers the shelf off Cape Darnley Polynya (CDP, East Antarctica) to the oceanic bottom through the Wild Canyon. The high-resolution of the model and high-quality of bathymetric data in the Wild Canyon resulted in a good match between the properties of CDBW obtained from the model and mooring observations. This allowed us to investigate in detail the modification process of DSW into CDBW, and to confirm that CDBW is a mix of three, rather than two water masses: DSW, Winter Water (WW), and modified Circumpolar Deep Water (mCDW). When the cold and salty DSW starts to flow down the slope at the shelf break, it entrains some overlaying cold and fresher WW, with whom it first mixes. This results in a decrease in DSW salinity and density, which then favors subsequent mixing with the warmer mCDW. As the three water masses mix during the continuous downslope flow, the density increases, resulting in the generation of the bottom water.

### 1. Introduction

In several locations in the Southern Ocean, cold and salty DSW is formed in winter due to strong atmospheric cooling and sea ice production. The production of DSW and subsequent downslope flow from the shelf to the offshore is crucial because DSW contributes greatly to the formation of Antarctic Bottom Water (AABW) and thus plays a role in the global ocean overturning circulation. The Cape Darnley Polynya is a major area of bottom water formation, where CDBW is generated (Ohshima et al., 2013). Understanding the processes through which DSW flows down the continental slope and transforms into AABW is especially important since global warming may affect the production of sea ice and DSW. Due to the episodic nature of DSW downslope flow and the difficulty in obtaining a sufficiently high number of observations in polar regions, numerical model is particularly helpful to study this topic. While our previous works with this model enabled us to understand the transport of the dense water from the shelf break to the bottom of the slope, details about the modification of DSW to CDBW are yet to be understood. In particular, whether AABW or CDBW is a result of the mixing of DSW and mCDW only, or whether WW is also a part of the mix, is still unclear. Similarly, where along the slope and by which process the mixing occurs is also yet to be understood. Here, we use a high-resolution model and bathymetric data in the CDP region to better understand how CDBW is formed from DSW and other water masses.

### 2. Methods and model setup

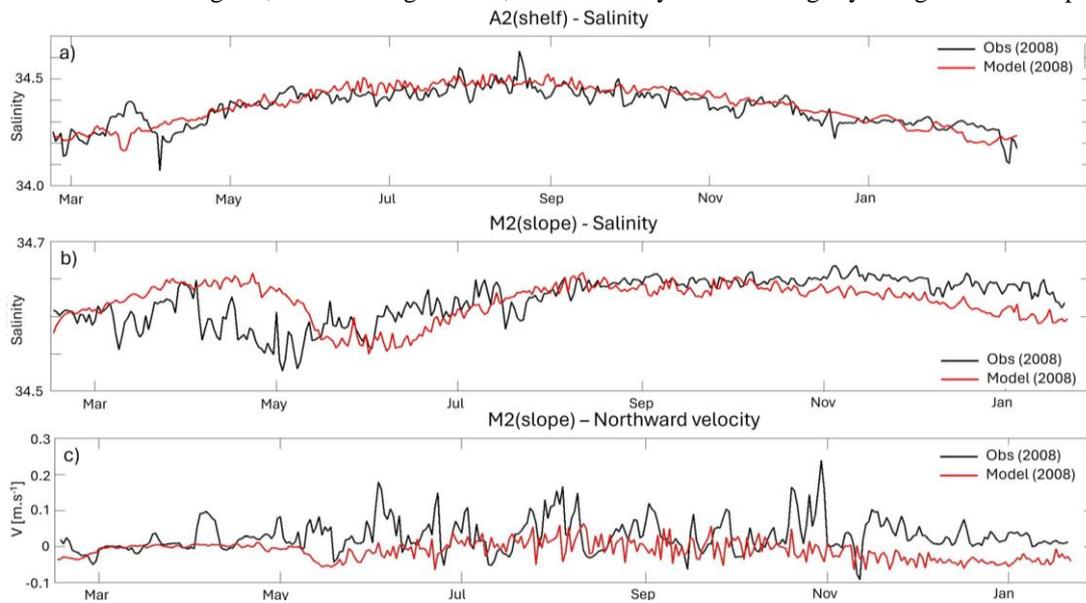
We used an eddy-resolving regional configuration of the Massachusetts Institute of Technology general circulation model (MITgcm) for the CDP region with hydrostatic approximation and dynamic/thermodynamic sea ice. The model configuration includes sea-ice modeling as well as realistic wind forcing, lateral and surface boundary conditions. Our configuration is similar to that of Mensah et al. (2021), who determined that for the CDP region, a minimum horizontal resolution of 2-km is necessary to reproduce the downslope flow of DSW. We also improved the quality of the bathymetric dataset by including newer, high-resolution bathymetry data, obtained between 2013 and 2020 by various Japanese research vessels as well as the Japanese icebreaker *Shirase*. Following a 1-year spin-up, we ran the model for the years 2008-2011, and 2018-2020. We analyzed the model output in current velocities, potential temperature ( $\theta$ ), and salinity throughout the year at 6-hour and daily resolution and compared its results with similar data obtained from instrumented moorings both on the continental shelf and in the mid-slope.

### 3. Results

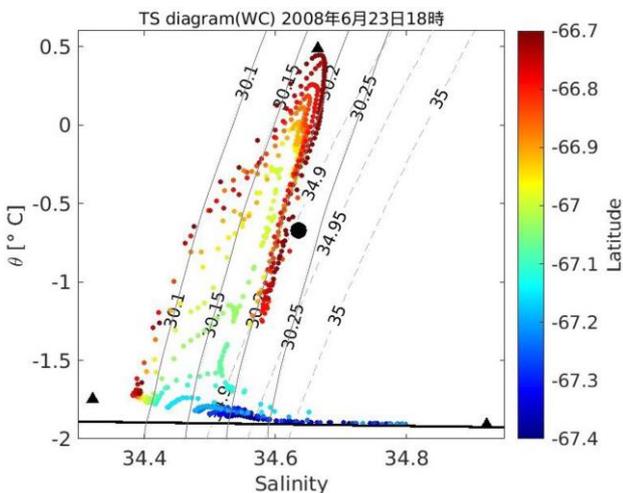
The comparison between mooring observations and model data yielded remarkable similarities on both the shelf and slope. In particular, the increase in bottom salinity following sea ice formation (Fig. 1a) and the high-frequency changes in bottom temperature associated with the on-shelf intrusion of mCDW were well reproduced by the model on the shelf locations.

Along the slope, the timing and frequency of  $\theta$ , salinity, and current velocity changes were also well matched by the model (Fig. 1b-c). The T-S characteristics of DSW or/and CDBW, and their temporal changes were also well reproduced at all locations. This allowed us to analyze in more detail the process of water mass transformation from DSW to mCDW with the model data.

We found that the first step of CDBW formation occurs when DSW starts its downslope flow at the shelf break. There, the intense downward flow of DSW with a  $\sigma_{500}$  density of  $\sim 30.5 \text{ kg.m}^{-3}$ , leads to the entrainment of some overlying WW with a considerably lower  $\sigma_{500}$  of  $\sim 30.0 \text{ kg.m}^{-3}$ . The two water masses mix, possibly due to strong turbulence associated with the downslope current shear. This results in water with  $\sigma_{500}$  of  $30.20 \text{ kg.m}^{-3}$ . This water can then more easily mix with the surrounding mCDW whose  $\sigma_{500}$  is  $30.17 \text{ kg.m}^{-3}$ , thus forming CDBW, whose density increases slightly along the downslope path.



**Fig. 1. Time series of (a) salinity at mooring A2 (shelf) at 90 m, (b) salinity at mooring M2 (slope) at 1180 m, and (c) northward current velocity at M2 in 2008. The black and red curves represent observation and model data, respectively.**



**Fig. 2.  $\theta$ -S diagram of model data along a cross-section running from the shelf to the slope off Cape Darnley Polynya on 23<sup>rd</sup> June 2008. The three water masses at the origin of CDBW are represented by the black triangles and the properties of CDBW as defined in Ohshima et al. (2013) is represented by the black dot. The thin solid (dotted) gray lines represent the  $\sigma_{500}$  ( $\sigma_{1500}$ ) isopycnals**

#### 4. Conclusions and future works

Our high-resolution model allowed us to document in unprecedented detail the formation process of CDBW from DSW, WW, and mCDW. The main focus of future works will be to summarize the results of downslope pathways and volume transport previously obtained with these recent results of water mass transformation.

#### References:

- Mensah, V., Nakayama, Y., Fujii, M., Nogi, Y., Ohshima, K.I., 2021. Dense water downslope flow and AABW production in a numerical model: Sensitivity to horizontal and vertical resolution in the region off Cape Darnley polynya, *Ocean Modelling*, 165, 101843.
- Ohshima, K.I., Fukamachi, Y., Williams, G.D., Nihashi, S., Roquet, F, et al., 2013. Antarctic bottom water production by intense sea-ice formation in the Cape Darnley polynya. *Nat. Geosci.* 6 (3), 235–240.

# 惑星中層大気大循環の力学

## Dynamics of general circulations of planetary middle atmospheres

山本 勝, 九大・応力研, E-mail: yamakatu(at)kyudai.jp  
Masaru Yamamoto, Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University

### 要旨

現実的な金星大気大循環モデルで「太陽放射や帯状平均場から擾乱場へのエネルギー変換率」や「流線関数・速度ポテンシャル」を調査し、潮汐波の構造や成因を明らかにし、赤道スーパーローテーションの加速機構を議論した(Yamamoto et al. 2024)。

### 1. はじめに

さまざまな惑星探査の観測データが蓄積されている中、惑星中層大気大循環の理論体系は確立されていない。特に、金星のような「厚い雲で覆われた天体」の大気力学は十分に理解されていない。本研究の目的は、

(1) 放射伝達と地形を組み込んだ金星大気大循環モデルを用いて、短周期擾乱や潮汐波の成因を明らかにする。特に、熱潮汐波の3次元構造とエネルギー収支からみた成因を明らかにし、スーパーローテーションに与える影響を評価する。

(2) 放射過程を簡略化した大気大循環モデルを用いてパラメーター感度実験を行い、大気大循環構造を明らかにする。特に、地球型惑星の対流圏の力学にも拡張する。

と定めて、本年度の研究を進めた。

### 2. 問題設定・方法

放射伝達と地形を組み込んだ金星大気大循環モデル(上記の研究目的1)に関しては、Ikeda(2011)が開発したモデルを用いて、T63L52の解像度で計算した(Yamamoto et al. 2021, 2023)。今年度は、熱潮汐波の構造と成因を整理し、赤道スーパーローテーションの加速機構について調査した。

放射過程を簡略化したGlobal WRF(Lu & Yamamoto 2020)を用いて、ロスビー数のみを変化させる理想化実験を行い、爆弾低気圧や二つ玉低気圧の最適出現条件を調べた(上記の研究目的2)。

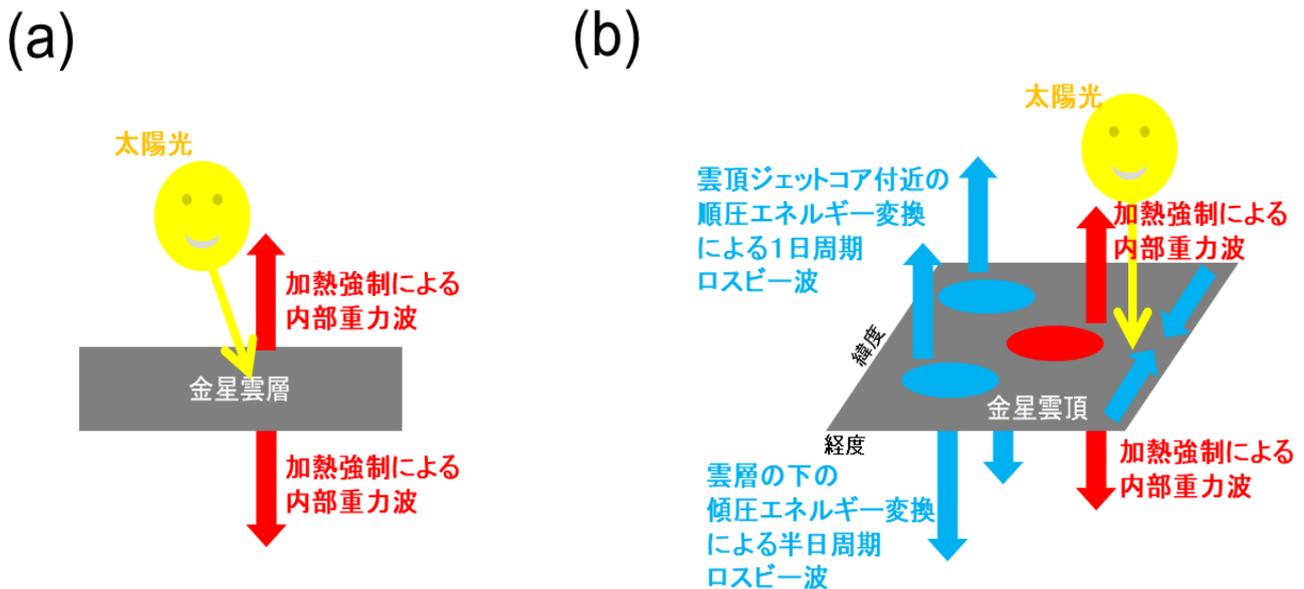


図1 (a) 雲層加熱で生じ、鉛直伝播する重力波としての熱潮汐波 と (b) スーパーローテーションが形成する状況下の赤道加熱に対する3次元応答という視点で見た熱潮汐波。

### 3. 結果と考察

#### 3. 1. 放射伝達と地形を組み込んだ金星大気大循環モデル

今年度は、金星大気大循環モデル(Yamamoto et al. 2021, 2023)を用いた研究で、熱潮汐波の回転・発散流構造とエネルギー収支について調査した。雲頂加熱域では、発散成分と回転成分の南北流が一致するような流線関数と速度ポテンシャルの位相構造が見られ、太陽光加熱により熱潮汐波の有効位置エネルギーが生成される。太陽光加熱によるエネルギー変換だけでなく、帯状平均東西風ジェットコアが位置する雲頂では、順圧エネルギー変換によって1日潮のロスビー波構造が強化される。また、加熱域から離れた雲層の下(50km以下)では、極域の下層大気の傾圧エネルギー変換によって半日潮のロスビー波構造が強化される。従来考えられていた「雲層の加熱域から下層に伝播し、減衰しながら地面に達する」という熱強制重力波的なシンプルな描像ではなく(図1a)、下記の視点も重要であることが分かった(図1b)。

- ・熱潮汐の加熱域では、Matsuno-Gill 応答のような循環構造(赤道重力波とロスビー波のペア)がみられる。
- ・熱潮汐波が3次元伝播をする中で、帯状平均場から擾乱エネルギーが供給されている。

この研究では、熱潮汐波の鉛直および水平の運動量フラックスが、発散流成分や回転流成分によって、どのように形成されるのかについて明らかにした。また、(おそらく地形に関連した)流れの南北非対称が、赤道を横切る南北流を生み、赤道周辺域の東西風加速を複雑にしていることが示された。

#### 3. 2. 地球型惑星の対流圏の力学

Global WRFに「北太平洋の縁辺海ホットスポット」を与え、偏西風ジェットの位置や強度を変える理想化実験を行なった。偏西風ジェットの位置と強さを表すパラメーターとして、偏西風ジェットのロスビー数を定義して「縁辺海域ホットスポットと偏西風ジェットが爆弾低気圧や二つ玉低気圧を形成する最適条件」を整理した(Yamamoto 2024)(地球型惑星大気大循環を地球に拡張した関連研究として紹介)。

### 4. まとめと今後の展望

現実的な金星大気大循環モデルを用いて、帯状平均場から擾乱場へのエネルギー変換率や流線関数・速度ポテンシャルを基に、熱潮汐波の構造や成因を議論した。今後は、大気大循環の長周期の変動についても調査しなければならない。

### 参考文献

- (1) Ikeda 2011: Development of radiative transfer model for Venus atmosphere and simulation of superrotation using a general circulation model, *Ph.D. thesis, The University of Tokyo, Japan*
- (2) Lu, L., & Yamamoto, M. 2020: Planetary-size dependence of zonal jets: Effects of horizontal diffusion in an idealized Earth-like general circulation model. *Planetary and Space Science*, 190, Article 104976.
- (3) Yamamoto, M., Ikeda, K., & Takahashi, M. 2021: Atmospheric response to high-resolution topographical and radiative forcings in a general circulation model of Venus: Time-mean structures of waves and variances. *Icarus*, 355, Article 114154.
- (4) Yamamoto, M., Hirose, T., Ikeda, K., Takahashi, M., & Satoh, M. 2023: Short-period planetary-scale waves in a Venus general circulation model: Rotational and divergent component structures and energy conversions. *Icarus*, 392, Article 115392.
- (5) Yamamoto, M., Ikeda, K., Takahashi, M., & Satoh, M. 2024: Rotational/divergent flow and energy conversion of thermal tides in a Venus general circulation model. *Icarus*, 411, Article 115921.
- (6) Yamamoto, M. 2024: Explosive and binary cyclogenesis over a mid-latitude hotspot and its Rossby number dependence in an idealized general circulation model. *Climate Dynamics*, in press.

# エルニーニョ・南方振動現象の形成機構と鉛直乱流混合が果たす役割

## Generation mechanisms of the El Niño/Southern Oscillation and the role of vertical mixing

東塚 知己, 東大院理, E-mail: tozuka(at)eps.s.u-tokyo.ac.jp  
田村 優樹人, 東大院理, E-mail: y-tamura(at)eps.s.u-tokyo.ac.jp  
臼井 健人, 東大院理, E-mail: k\_usui(at)eps.s.u-tokyo.ac.jp  
Tomoki Tozuka, Graduate School of Science, The University of Tokyo  
Yukito Tamura, Graduate School of Science, The University of Tokyo  
Kento Usui, Graduate School of Science, The University of Tokyo

### 要旨

世界各地に異常気象を引き起こす太平洋熱帯域の気候変動現象であるエルニーニョ・南方振動現象は、多様性を持っており、標準的なイベントとエルニーニョもどき現象が存在することが知られている。前年度の研究で、標準的なイベントに伴う正の海面水温偏差の形成において、鉛直混合項偏差が最も重要な役割を果たしているという結果を得たが、エルニーニョもどき現象の成長において鉛直乱流混合が果たす役割は、明らかになっていない。そこで、本年度の研究でも精緻な鉛直混合パラメタリゼーションを独自に導入した領域海洋モデル (ROMS) によるシミュレーションに基づき、完全に閉じる混合層の熱収支解析を行い、エルニーニョもどき現象の形成メカニズムを調べた。その結果、鉛直混合項偏差がエルニーニョもどき現象の成長に最も寄与し、先行研究で重要性が指摘されていた東西移流偏差も二次的に成長に寄与することが明らかになった。

### 1. はじめに

エルニーニョ・南方振動現象 (ENSO) は、世界各地に異常気象を引き起こす太平洋熱帯域の気候変動現象である (Yeh et al., 2018)。エルニーニョ現象には東部太平洋赤道域において正の海面水温 (SST) 偏差が生じる標準的なイベント (canonical El Niño) と中部太平洋赤道域において正の SST 偏差、西部・東部太平洋赤道域において負の SST 偏差が生じるエルニーニョもどきが存在することが知られている (Ashok et al., 2007)。前年度の研究では、標準的なイベント (canonical El Niño) のメカニズムを調べ、先行研究 (例えば、Huang et al., 2012) で重要性が指摘されていた鉛直移流よりも、鉛直混合過程の方が、正の SST 偏差の形成に関して支配的に寄与していることが明らかになった。先行研究 (例えば、Capotondi, 2013) では、エルニーニョもどきに伴う SST 偏差の形成には、東西移流が重要な役割を果たすことが示唆されているが、標準的なイベント (canonical El Niño) と同様、鉛直混合過程が重要な役割を果たしている可能性がある。そこで、本年度の研究では、精緻な乱流混合のパラメタリゼーションが導入された領域海洋モデルを用いてシミュレーションを行い、完全に閉じる混合層の熱収支解析を実行することで、エルニーニョもどきに伴う正の SST 偏差の形成メカニズムを定量的に明らかにすることを目的とする。

### 2. モデル・データ

使用した海洋モデルは、熱帯太平洋を対象とした領域海洋モデル (Regional Ocean Modeling System; ROMS; Shchepetkin and McWilliams, 2005) である。対象としたモデル領域は  $120^{\circ}$  E- $67^{\circ}$  W,  $25^{\circ}$  S- $25^{\circ}$  N で、鉛直層数は 40 層、水平解像度は  $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$  である。大気外力には大気再解析データ JRA55-do v1.3 (Tsujino et al., 2018) を使い、側面の境界条件には海洋同化データ ORAS4 (Balmaseda et al., 2013) を用いた。乱流混合パラメタリゼーションには、Mellor-Yamada スキームを元に開発された Furuichi et al. (2012) を使用した。月平均気候値を用いて 20 年間のスピニングアップを行った後、1958 年から 2016 年まで日平均データを用いて積分を行い、1961 年から 2016 年までの計算結果を解析に用いた。シミュレーションの各時間ステップで熱収支の各項を保存することによって、完全に閉じる混合層の熱収支解析を行えるようにした。モデルの検証のため、海面水温の観測データ (HadISST; Rayner et al., 2003) と海洋同化データ ORAS4 を使用した。

### 3. 結果と考察

まず、モデルの再現性の検証を行った。その結果、エルニーニョもどき指数を相関係数 0.92 で再現する等、ROMS が現象を現実的に再現していることが確認された。

次に、エルニーニョもどき指数 (Ashok et al., 2007) の 3 ヶ月移動平均が、冬季に 1 標準偏差よりも大きくなる年をエルニーニョもどき現象の発生年として同定することにした。その結果、1961 年から 2016 年にかけて 7 回のエルニーニョもどき現象が発生していることが明らかになり、コンポジット解析を行うことにした。混合層熱収支解析を行ったところ (図 1)、初期には海面熱フラックスの効果が重要な役割を果たすが、その後、鉛直混合の効果が現象の成長に最も寄与し、先行研究で重要性が指摘されていた東西移流偏差も二次的に成長に寄与することが明らかになった。海面付近を流れる南赤道海流と亜表層の温度躍層付近を流れる赤道潜流の間の強い流速シアに起因する活発な鉛直乱流混合 (Warner and Moum, 2019) は、東部太平洋赤道域の方が強いが、中部太平洋赤道域でも重要な役割を果たし得ることが明らかになった。エルニーニョもどき現象においても鉛直乱流混合過程が重要な役割を果たす可能性を示したのは、本研究が初めてである。一方、標準的なエルニーニョ現象と同様に、エ

エルニーニョもどき現象においても、海面熱フラックスの効果が、負のフィードバックとして働くことも明らかになった (図 1)。

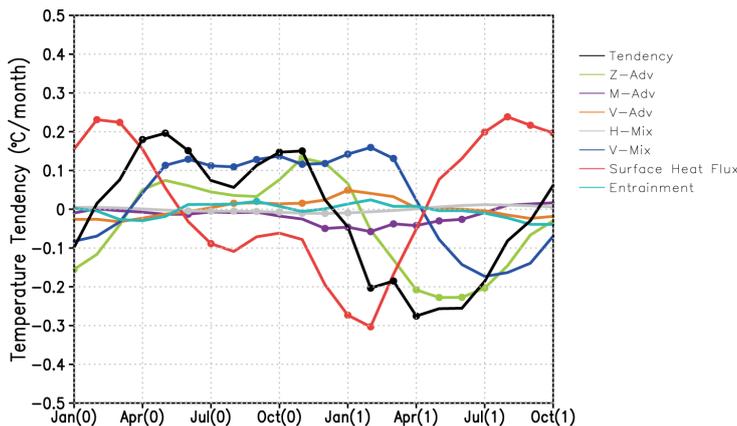


Fig. 1 Composites of anomalies in mixed layer heat budget terms in the central equatorial Pacific during El Niño Modoki events.

#### 4. まとめと今後の展望

本研究では、領域海洋モデルを用いてシミュレーションを行い、完全に閉じる混合層の熱収支解析を実行することで、エルニーニョもどきに伴う正の SST 偏差の形成メカニズムを定量的に明らかにした。具体的には、先行研究では、東西移流の効果が支配的であるとされていたが、本研究では、初めて鉛直混合の効果が正の SST 偏差の形成に重要な役割を果たしていることを示した。今後は、標準的なイベントとエルニーニョもどきの違いの原因やエルニーニョ現象とラニーニャ現象の非対称性についても調べていく予定である。

#### 参考文献

- (1) Ashok, K., Behera, S. K., Rao, S. A., Weng, H., & Yamagata, T. (2007). El Niño Modoki and its possible teleconnection. *Journal of Geophysical Research*, 112(C11), C11007.
- (2) Balmaseda, M. A., Mogensen, K., & Weaver, A. T. (2013). Evaluation of the ECMWF ocean reanalysis system ORAS4. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 139(674), 1132-1161.
- (3) Capotondi, A., 2013: ENSO diversity in the NCAR CCSM4 climate model. *Journal of Geophysical Research Oceans*, 118(10), 4755-4770.
- (4) Furuichi, N., Hibiya, T., & Niwa, Y. (2012). Assessment of turbulence closure models for resonant inertial response in the oceanic mixed layer using a large eddy simulation model. *Journal of Oceanography*, 68(2), 285-294.
- (5) Huang, B., Xue, Y., Wang, H., Wang, W., & Kumar, A. (2012). Mixed layer heat budget of the El Niño in NCEP climate forecast system. *Climate Dynamics*, 39(1), 365-381.
- (6) Rayner, N. A. et al. (2003). Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 108(D14), 4407.
- (7) Shchepetkin, A. F., & McWilliams, J. C. (2005). The regional oceanic modeling system (ROMS): a split-explicit, free-surface, topography-following-coordinate oceanic model. *Ocean Modelling*, 9(4), 347-404.
- (8) Tsujino, H. et al. (2018). JRA-55 based surface dataset for driving ocean-sea-ice models (JRA55-do). *Ocean Modelling*, 130, 79-139.
- (9) Warner, S. J., & Moum, J. N. (2019). Feedback of mixing to ENSO phase change. *Geophysical Research Letters*, 46(23), 13920-13927.
- (10) Yeh, S.-W. et al. (2018). ENSO atmospheric teleconnections and their response to greenhouse gas forcing. *Reviews of Geophysics*, 56(1), 185-206.

# 全球雲解像モデルデータを用いた熱帯雲活動の解析

## Analysis of the tropical cloud activity using the output of Nonhydrostatic Icosahedral Atmospheric Model

西 憲敬, 福岡大・理, E-mail: nornishi(at)fukuoka-u.ac.jp

濱田 篤, 富山大・学術研究部, E-mail: hamada(at)sus.u-toyama.ac.jp

三浦 裕亮, 東大・理学研究科, E-mail: h\_miura(at)eps.s.u-tokyo.ac.jp

佐藤 正樹, 東大・大気海洋研, E-mail: satoh(at)aori.u-tokyo.ac.jp

NISHI Noriyuki, Science Faculty, Fukuoka University

HAMADA Atsushi, Academic Assembly, Faculty of Sustainable Design, University of Toyama

MIURA Hiroaki, Graduate School of Science, The University of Tokyo

SATO Masaki, Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo

### 要旨

全球雲解像モデル NICAM を用いて、太平洋中西部の熱帯収束帯の中に発生する東西数千 km におよぶ雲帯の南北への同時分割現象の再現実験を行ったが、昨年度に引き続き本年度の実験では再現できた事例は少なかったが、2016 年 2 月の事例について比較的良好な再現結果を得た。再解析 ERA5 の解析も同時に進め、分割後の上層雲主体の雲帯が南北に傾いた構造をもつこと、この傾きは NICAM 実験結果にはみられないことがわかった。

### 1. はじめに

中西部太平洋域の熱帯収束帯(ITCZ)において、東西数千 km におよぶ雲帯がほぼ同時に南北に分割する現象を見いだしてその解析を行ってきた(文献 1)。昨年度までに、全球雲解像モデル NICAM を用いて、太平洋中西部の熱帯収束帯の中に発生する東西数千 km におよぶ雲帯の南北への同時分割現象の再現実験を行ったが、再現できる事例は多くなかった。本年度はさらにいくつかの事例の再現実験を行うとともに、再解析データ ERA5 を用いた現実大気での現象の解析も並行して行った。

### 2. 実験方法および結果

コンピュータ Wisteria-O において、NICAM Version19.3 を用いて、高水平解像度(7km)の実験を試みた。初期値としては、この現象がよく再現されている ERA5 の解析データを用い、現象発生の 2-3 日前からの積分を行った。雲物理スキームには、NICAM Single Moment Water 6class Scheme (NSW6)を用いた。

#### (1) 実験のための事例選定

昨年度行った実験では、あまり良い再現結果が得られなかったことから、本年度はなるべく単純な形状で規模の大きい現象をみつけて、再現実験を行うことにした。分割前の帯(初期帯)が、十分に多くの積乱雲を含み細く長く単純な形状をしている事例を客観的に抽出して、そのリストを元に分割事例を目視で探した。初期帯の選定において、巻雲からなる帯状の雲域を除外するという条件を用いることによって、今までより正確に初期帯の抽出ができるようになった。以下の再現実験で用いた事例もこのようにして見つけることができた。また、今まで分割現象は主に西中部太平洋でのみ検出されていたが、今回の検索では、南半球側の南米西岸沖でも 1 例見いだすことができた。

(2) 再現実験

本年度は(1)の方法でみつけた非常に典型的な事例についての実験で、かなり忠実な再現を行うことができた。現象は、2016年2月8日に中部太平洋で起きたもので、発生時刻と経度は少し実際のものとは異なっていた。また、以前より注目している2020年12月24日の事例について、初期時刻を変更した感度実験を行った。初期時刻を1時間変更した結果はほとんど変わらなかった。初期時刻を1日単位で変更した実験では、23日0時を初期値としたものでは良い再現性があったが、それより早くても遅くても、再現性は良くなかった。初期値は分割発生に近いほど良いはずだが、場のスピニアップに1日程度はかかるということかと考えている。

(3) ERA5 データ解析: 雲帯の傾いた構造

ERA5 データを用いて現実大気の解析を行った。分割後の上層雲主体の雲帯が、高度が上がるにつれて北(南)側の帯ではその位置が北(南)に検出される「傾いた構造」が、いくつかの事例で認められた。図1は、2020年12月の事例の中心経度付近における雲氷量と南北風の分布を示している。帯の中の雲氷量の極大は、300 hPaでは10.5N付近にあるが、200 hPaでは12N付近にある。上昇流の強い部分もほぼ同じ場所にあり(図は示さず)、この上昇流が雲帯の構造の形成に大きな役割を果たしているとみられる。また、南風の極大の位置は、300 hPa付近では上昇流の極大の少し南側にみられ、200hPaでは少し北側にみられる。このように、分割後の雲帯には浅い南北循環が伴っているようである。この浅い構造は、雲帯が検出される時間帯で、継続的にみられるようだ。この雲帯の移動速度は、ほぼその付近の南北風速の平均値と同じであり、雲帯は基本的に移流されていると考えられる。この上昇流の成因ははっきりしておらず、今後の解析が必要である。

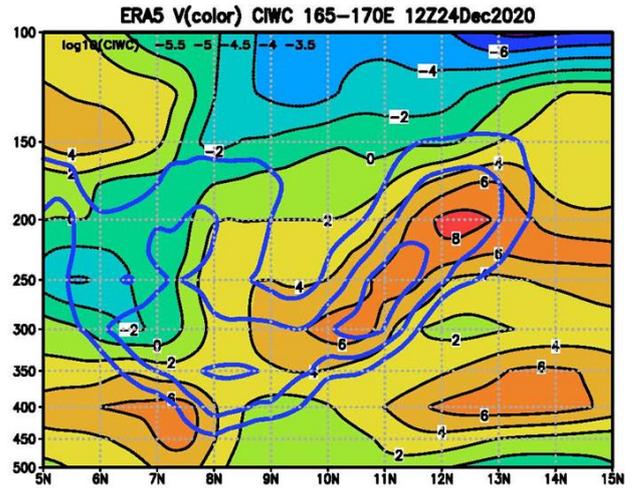


図1: 2020年12月24日12Zにおける165-170Eで平均した南北風(色、m/s)と雲氷量の対数(等値線)の緯度高度断面。

3. まとめと今後の展望

本年度は1例だけであるが、NICAMを用いた事例の再現に成功した。再現の成功のためには、実験対象に、典型的かつ大規模なものを選ぶことが重要ではないかと考えられる。ERA5を用いた現実事例の解析では分割した北(南)側の雲帯では、上ほど北(南)に傾く構造が認められることを示した。雲帯を含む、現象全体の模式的説明を図2に示す。NICAM実験では、この浅い循環自体は再現されるのだが、雲帯の傾きはほとんど認められない。分割現象や浅い循環は再現されるのに、この傾きが再現されないのはなぜかについて、実験を通して考えていく必要がある。次年度以降はこの点に注目してさらに実験を重ねたいと考えている。

参考文献

(1) Hamada, A. et al. 2013: Separation of zonally elongated large cloud disturbances over the western tropical Pacific. *J. Meteor. Soc. Japan*, **91**, 375-389, DOI:10.2151/jmsj.2013-309.

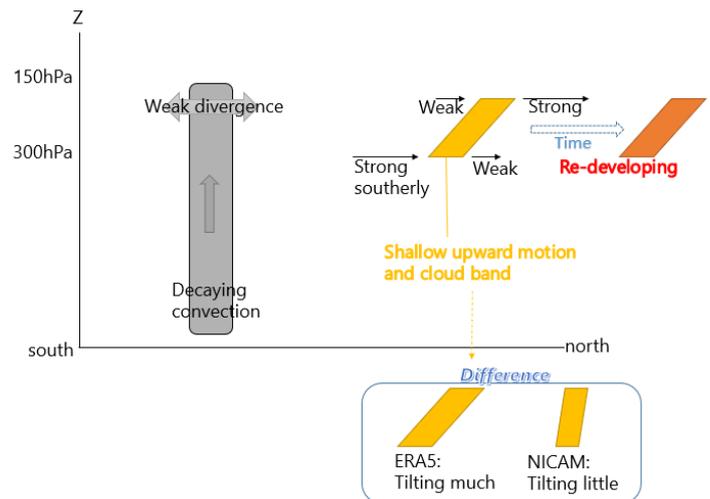


図2: 上層の雲帯を含む分割現象全体の模式的説明。下の吹き出しは、ERA5とNICAMによる雲帯表現の違いを示す。

# 大型大気レーダーと全球高解像度モデルを相補的に用いた

## 中層大気大循環の階層構造の解明

### Elucidation of the hierarchy of dynamical processes in the middle atmosphere using atmospheric radar observations and global high-resolution models

佐藤 薫, 東大・大学院理学系研究科, E-mail: kaoru(at)eps.s.u-tokyo.ac.jp  
高麗 正史, 東大・大学院理学系研究科, E-mail: kohmasa(at)eps.s.u-tokyo.ac.jp  
Kaoru Sato, Department of Earth and Planetary Science, The University of Tokyo  
Masashi Kohma, Department of Earth and Planetary Science, The University of Tokyo

#### 要旨

2021年5月18日に南極昭和基地のレーダーにより観測された大気重力波（以下、重力波）について、現実的な水平風・温度の背景場の下で、高解像度モデルを用いた理想化数値シミュレーションを実施した。この数値実験は、水平解像度 250 m、鉛直分解能 60 m とし、再解析データから作成した水平一様な背景風速の鉛直分布を用いた。その結果、南極大陸沿岸域の急斜面を下る強い地表風に伴いハイドロリックジャンプが発生し、その下流域において、小スケールの乱流的な擾乱 (Turbulent wake) が卓越することが確認された。興味深いことに、この Turbulent wake の先端はおおよそ東西に伸びており、これは高度 8 km より上の高度で見られる重力波の位相線と一致していた。これらの関係を明らかにするために、位相線を横切る鉛直断面図を作成し、地表付近において持ち上げられた温位面の上に、風速の擾乱成分の波状構造・重力波の運動量フラックスが現れることを明らかにした。これは、地表付近の Turbulent wake の先端から重力波が放射される機構があることを示唆する結果である。

#### 1. はじめに

近年、対流圏から中間圏までの広い高度領域を対象とした高精度・高分解能な観測が行われている。昭和基地に設置された大型大気レーダー (PANSY レーダー) は対流圏から中間圏までの 3 次元風速の鉛直プロファイルを高精度かつ高い高度・時間分解能で連続観測することができる南極唯一のレーダーである (Sato et al., 2014)。2015 年 10 月から、PANSY レーダーはフルシステムによる連続観測を継続しており、大型大気レーダーとしては類を見ない長期連続データが蓄積されている。本研究では、2021 年 5 月 18 日に PANSY レーダーで観測された大気重力波 (Figure 1) に焦点を当て、高解像度数値モデルを用いた数値シミュレーションを実施した。これまでに、観測された重力波の再現性を確認し、対流圏・下部成層圏でのクリティカルレベルフィルタリングによる波の特性の高度変化について解釈を与えた。さらに、モデルで表現された小スケールの渦構造が顕著な高度領域において、レーダー観測により推定された乱流エネルギー散逸率の増加を確認した。本年度においては、重力波の発生について、地表付近の Turbulent wake との関係に着目して新たなメカニズムを提案する。

#### 2. 数値モデル・実験設定

数値実験には、圧縮性流体のナビエ・ストークス方程式の有限体積コードである Complex Geometry Compressible Atmospheric Model (CGCAM) を用いた (Lund et al., 2020; Fritts et al., 2021)。計算ドメインは昭和基地を中心とした 560 km 四方正方形領域とし、地上から高度 96 km までを含む。中心の 100 km 四方の領域において、水平解像度を 250 m とした。サブグリッドスケールの運動の効果を取り込むために Dynamic Smagorinsky subgrid-scale model (Germano et al., 1991) を用いた。初期値・背景場は、MERRA-2 再解析データと JAGUAR-DAS 再解析データ (Koshin et al., 2022) を組み合わせて作成した風速・温度の鉛直プロファイルを与えた。数値積分は 12 時間実施した。その他の実験設定は、2022 年度の共同研究報告書に記載したものと同様である。

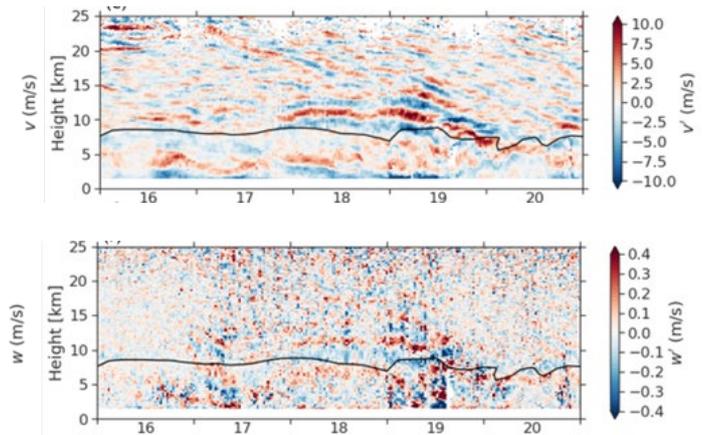


Figure 1: Time-height sections of wind fluctuations  $v'$  and  $w'$  observed by the PANSY radar on 16–20 May 2021. A black curve indicates tropopause height.

### 3. 結果と考察

積分開始 8 時間後以降に、昭和基地の西側において Hydraulic jump の風下に広がる低層の turbulent wake が現れる (Figure 2 左)。この後、Turbulent wake の前面は +y 方向(北方向)に進み、積分開始 10 時間後には、Turbulent wake の前面はほぼ直線状となり、東西方向に伸びる。興味深いことに、東西方向に伸びる Turbulent wake の構造は、Syowa Station の西側で水平波長約 30 km の 300-K の等温位面の波状構造と同じような構造となっている。

低層の Turbulent wake と上層の波状構造の関係を調べるために、 $x = -50$  km に沿った温位  $\theta$  と南北風擾乱  $v'$ 、南北運動量の鉛直フラックス  $v'w'$  の鉛直断面を Figure 3 に示す。地表面付近で温位面が持ち上がった構造があり、その前面の上空において、 $v'$  の波状構造、及び、正の  $v'w'$  が現れている。これは、地表付近の Turbulent wake の先端から重力波が放射される機構があることを示唆する結果である。今回示した重力波放射機構は、地表付近の前線構造とそれを横切る水平風の相互作用により重力波放射機構の一種に分類される (Ralph et al., 1999)。

以上の結果は、査読付き論文として、Journal of Geophysical Research Atmosphere に出版されている (Kohma et al., 2024)。

### 4. まとめと今後の展望

南極昭和基地のレーダーにより観測された大気重力波の数値シミュレーションを実施し、下部成層圏で観測された重力波の発生機構について調べた。南極大型大気レーダーは対流圏・下部成層圏と中間圏の交互観測を継続しており、また本数値計算は、成層圏・中間圏全層まで含んでいる。今後は、成層圏・中間圏に見られる重力波の反射・砕波などの物理機構を解析する予定である。

### 参考文献

- (1) Sato, K., Tsutsumi, M., Sato, T., Nakamura, T., Saito, A., Tomikawa, Y., Nishimura, K., Kohma, M., Yamagishi, H., and Yamanouchi, T.: Program of the Antarctic Syowa MST/IS Radar (PANSY). J. Atmos. Sol.-Terr. Phys., 118A, 2–15, 2014, <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2013.08.022>
- (2) Lund, T. S., Fritts, D. C., Wan, K., Laughman, B., and Liu, H. L. (2020). Numerical Simulation of Mountain Waves over the Southern Andes. Part I: Mountain Wave and Secondary Wave Character, Evolutions, and Breaking. J. Atmos. Sci., 77(12), 4337–4356. <https://doi.org/10.1175/Jas-D-19-0356.1>
- (3) Fritts, D. C., Lund, T. S., Wan, K., and Liu, H. L. (2021). Numerical Simulation of Mountain Waves over the Southern Andes. Part II: Momentum Fluxes and Wave-Mean-Flow Interactions. J. Atmos. Sci., 78(10), 3069–3088. <https://doi.org/10.1175/Jas-D-20-0207.1>
- (4) Germano, M., Piomelli, U., Moin, P., and Cabot, W. H. (1991). A Dynamic Subgrid-Scale Eddy Viscosity Model. Physics of Fluids a-Fluid Dynamics, 3(7), 1760–1765. <https://doi.org/10.1063/1.857955>
- (5) Koshin, D., Sato, K., Kohma, M., and Watanabe, S. (2022). An update on the 4D-LETKF data assimilation system for the whole neutral atmosphere. Geosci. Model Devel., 15(5), 2293–2307. <https://doi.org/10.5194/gmd-15-2293-2022>
- (6) Ralph, F. M., Neiman, P. J., & Keller, T. L. (1999). Deep-tropospheric gravity waves created by leeside cold fronts. Journal of the Atmospheric Sciences, 56(17), 2986–3009. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1999\)056<2986:Dtgwcb>2.0.Co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1999)056<2986:Dtgwcb>2.0.Co;2)
- (7) Kohma, M., Sato, K., Fritts, D. C., & Lund, T. S. (2024). Numerical simulation of orographic gravity waves observed over Syowa Station: Wave propagation and breaking in the troposphere and lower stratosphere. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 129, e2023JD039425. <https://doi.org/10.1029/2023JD039425>

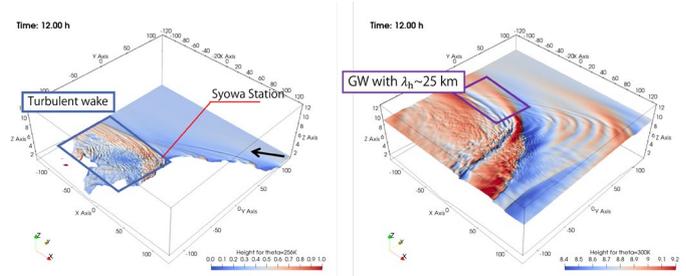


Figure 2: Isentropic surface for 256 K (left) and 300 K at  $t = 10$  hr. A black arrow indicates the surface wind direction.

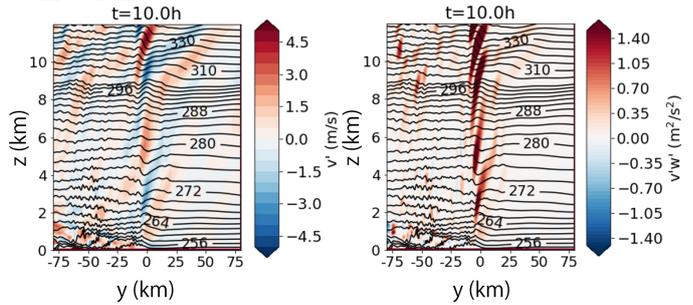


Figure 3: (Left) Vertical sections of  $\theta$  (contour) and  $v'$  (color) at altitudes of 0–12 km along  $x = -50$  km. (Right) Same as the left panel but for  $v'w'$ .

# 数値モデルを用いた東アジア大気循環の変動力学の探究

## Numerical study on dynamics of atmospheric circulation variability over East Asia

小坂 優, 東大・先端研, E-mail: ykosaka(at)atmos.rcast.u-tokyo.ac.jp

徐 震昊, 東大・先端研, E-mail: zhenhao\_xu(at)atmos.rcast.u-tokyo.ac.jp

戸田 賢希, 東大・先端研, E-mail: m\_toda(at)atmos.rcast.u-tokyo.ac.jp

岩切 友希, 気象研, iwakiri(at)mri-jma.go.jp

宮本 歩, カリフォルニア大・スクリプス海洋研, ayumiyamoto(at)ucsd.edu

Yu Kosaka, Research Center for Advanced Science and Technology, The University of Tokyo

Zhenhao Xu, Research Center for Advanced Science and Technology, The University of Tokyo

Masaki Toda, Research Center for Advanced Science and Technology, The University of Tokyo

Tomoki Iwakiri, Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency

Ayumu Miyamoto, Scripps Institution of Oceanography, University of California San Diego

### 要旨

全球平均地表気温の上昇を産業革命前と比べて  $2^{\circ}\text{C}$  ないし  $1.5^{\circ}\text{C}$  に抑制するパリ協定の達成のために、温室効果ガス濃度上昇を今世紀中にピークアウトさせ、減少に転じさせる必要がある。だが、温室効果ガス濃度低下時の気候が、濃度上昇時の気候と同じ経路を辿るとは限らない。本研究では大気海洋結合モデル MIROC6 において  $\text{CO}_2$  濃度を年 1% ずつ上昇 (ramp-up) させた後、年 1% ずつ減少 (ramp-down) させて元に戻す理想化実験を用いて、北半球の大気循環の不可逆性を調査した。Ramp-up 期間と ramp-down 期間において全球平均地表気温が産業革命前実験より  $2^{\circ}\text{C}$  高い 2 つの期間を比較することで、北半球冬季の大気循環の不可逆性を評価したところ、北太平洋から北米にかけて顕著な波列状のパターンが見られ、これに伴って降水分布にも特徴的な 3 極パターンが見られた。これらは海面水温場のエルニーニョ的な特徴に加え、熱帯太平洋における赤道反対称な海面水温分布も寄与していることが示唆された。

### 1. はじめに

産業革命以降の地球温暖化に対する人為起源の影響は明らかであり、その主要因は温室効果ガス濃度の上昇である。全球平均地表気温はすでに  $1.1^{\circ}\text{C}$  上昇しており、この気温上昇レベルを  $2^{\circ}\text{C}$  より十分低く抑制し  $+1.5^{\circ}\text{C}$  を目指すパリ協定の達成には、温室効果ガス濃度、特に  $\text{CO}_2$  濃度を今世紀中頃から後半にピークアウトさせ、人為的な  $\text{CO}_2$  除去 (Carbon Dioxide Removal; CDR) により減少に転じさせる必要があると考えられる。しかし、この  $\text{CO}_2$  減少期の気候は、先行する増加期の気候とは必ずしも同じにはならない。言い換えると、 $\text{CO}_2$  濃度変化に対して気候システムは不可逆性を有する。

現在起こっているような温室効果ガス濃度の急速な上昇に対する気候システムの過渡応答では、全球平均地表気温は概ね放射強制力に比例して上昇する。しかしこれより長い数百年程度以上の時間スケールでは、海洋垂表層の水温変化を伴う「遅い応答」が無視できなくなる。海洋表層と垂表層の熱交換は気候学的な湧昇域や深層水形成域において活発であるため、遅い応答における海面水温変化は特徴的な空間構造を示す。これが大気循環を駆動することで、 $\text{CO}_2$  濃度変化に対する大気循環の不可逆性が引き起こされると考えられる。

温室効果ガスに対する気候応答の不可逆性を調査するために、本研究では大気海洋結合モデル MIROC6 (Tatebe et al. 2019) を用いて、 $\text{CO}_2$  濃度を一定の割合で増加させた後、一定の割合で減少させ、元の状態に戻す理想化実験を行った。このデータを用い、特に北半球冬季に着目して大気循環と降水のヒステリシスを調査した。

### 2. モデル実験と解析手法

気候モデル MIROC6 を用いて、 $\text{CO}_2$  濃度を産業革命前の値 (284.7ppm) から年 1% ずつ、140 年で 4 倍 (1138.8ppm) まで増加 (ramp-up) させた後、年 1% ずつ減少 (ramp-down) させ 140 年間かけて産業革命前の値まで戻す実験を行った。それ以外の放射強制要素は産業革命前の値に固定している。この設定は CMIP6 の CDRMIP (Keller et al. 2018) のプロトコルに従ったものである。実験は産業革命前固定実験から分岐させた 5 メンバーからなる。

本研究では ramp-up 期間と ramp-down 期間の間で同一の温暖化レベルとなる期間の気候を比較する。全球平均年平均地表気温が産業革命前固定実験の気候値より  $2^{\circ}\text{C}$  高くなる年を中心とした 20 年を Window 1 (ramp-up 期間) と Window 2 (ramp-down 期間) とし、両期間の気候値の差 Window 2 - Window 1 を不可逆応答とみなして解析した。本研究は北半球冬季 (12-2 月) 平均に着目する。

### 3. 結果

500hPa 等圧面高度の不可逆応答には、北太平洋から北米に連なる波列パターンが顕著である (Fig. 1a)。その分布はエルニーニョ・南方振動に伴うテレコネクションを想起させる。実際、海面水温の不可逆応答には北大西洋亜寒帯の低温や南大洋の高温に加えて、エルニーニョ的な赤道太平洋昇温が見られる (Fig. 1c; Oh et al. 2024)。これに伴って赤道中央太平洋を中心に顕著な降水増加が見られ (Fig. 1b)、これに伴う非断熱加熱がテレコネクションを励起すると考えられる。

テレコネクションに伴って、北太平洋・北米域 (Fig. 1b で黒線で囲った領域) の降水には中緯度北東太平洋を中心とする正偏差、北米北西太平洋岸の負偏差、アラスカ南岸の正偏差からなる 3 極パターンが目立つ (Fig. 1b)。CDRMIP に参加した 8 つ

の気候モデルによる同様の実験結果のマルチモデルアンサンブル平均にも同様の特徴が見られ（図略）、この応答がロバストであることを示唆している。水蒸気収支解析を行ったところ（図略）、月平均の循環及び水蒸気場から診断した水蒸気収束偏差がこの降水応答の主要な部分を占めていることから、テレコネクションに付随する大気循環・水蒸気偏差の寄与が主要で、短周期擾乱活動の変調からの寄与は二次的であることが示唆された。さらにこの月平均場による水蒸気収束の寄与を分解すると、水蒸気量変化よりも大気循環変化の寄与が卓越することがわかった。

上述のように、この降水の不可逆応答をもたらす大気循環の形成にはエルニーニョ的な海面水温応答が寄与していると考えられる。しかし、付随するアリューシャン低気圧強化は同じモデルのエルニーニョ・南方振動に伴うもの（Niño3.4海面水温に対する回帰偏差を、Window 2 - Window 1のNiño3.4海面水温差でスケールしたもの）よりも遙かに強い。Figure 1cをよく見ると、水温応答分布は赤道に対して非対称で、昇温は熱帯東太平洋でより顕著である。このような海面水温偏差の赤道非対称成分の影響を、地球流体力学研究所大気大気循環モデルAM2.1 (Anderson et al. 2004)を用いて調べた。熱帯東太平洋の北側で海面水温負偏差、南側で海面水温正偏差を与える理想化実験において、アリューシャン低気圧の強化を伴うテレコネクションが見られた (Fig. 2)。よって、エルニーニョ的な海面水温応答に加えて南北半球非対称な昇温も、北太平洋・北米域の大気循環の不可逆応答と上述の降水の3極パターンの形成に寄与していることが示唆される。

#### 4. 今後の展望

以上の結果は、気候システムが同一の地球温暖化レベルにおいても、それまでの放射強制力の履歴を反映し、特に地域規模で顕著な非対称性を持つことを示している。本研究は冬季の北太平洋セクターにおける大規模大気循環と水循環に着目したが、気候の不可逆性は様々な地域・季節・気候指標において見られ、近年活発に研究がなされている。そのような研究の更なる進展は、自然科学としての気候科学だけでなく社会にも有用な情報をもたらさう。

#### 参考文献

- (1) Tatebe, H. et al., 2019: Description and basic evaluation of simulated mean state, internal variability, and climate sensitivity in MIROC6. *Geosci. Model Dev.*, 12, 2727–2765.
- (2) Keller, D. P. et al., 2018: The Carbon Dioxide Removal Model Intercomparison Project (CDRMIP): rationale and experimental protocol for CMIP6. *Geosci. Model Dev.*, 11, 1133–1160.
- (3) Oh, J.-H. et al., 2024: Emergent climate change patterns originating from deep ocean warming in climate mitigation scenarios. *Nature Climate Change*, 14, 260–266.
- (4) Anderson, J. L. et al., 2004: The new GFDL global atmosphere and land model AM2–LM2: Evaluation with prescribed SST simulations. *J. Climate*, 17, 4641–4673.

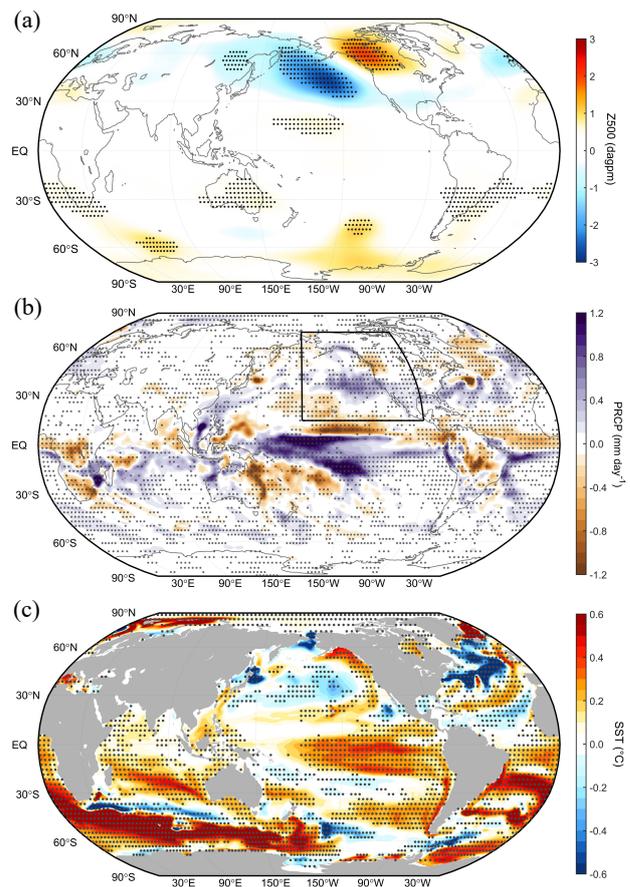


Fig. 1 北半球冬季における(a) 500hPa等圧面高度、(b)降水量、(c)海面水温の不可逆応答 (Window 2 - Window 1). 点描は2期間の差がt検定において95%信頼水準を満たす領域、(b, c) 5メンバー中4メンバー以上で符号がアンサンブル平均と一致する領域を表す。

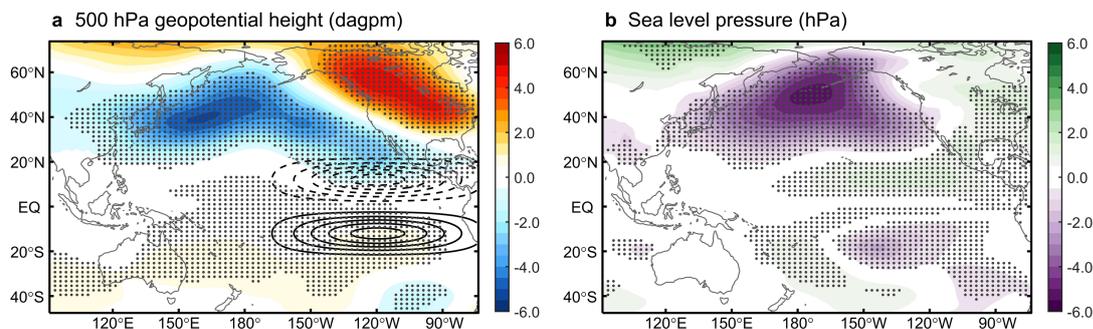


Fig. 2 熱帯東太平洋に与えた赤道反対称な海面水温偏差に対するAM2.1の北半球冬季の応答。(a) 500hPa等圧面高度、(b)海面気圧。点描は応答がt検定において99%信頼水準を満たす領域を表す。基準実験と、海面水温偏差（最大2°C；aの等値線）を与えた実験のそれぞれ50年間の差で応答を評価した。

# 衛星データ活用による全球炭素収支推定に向けた大気輸送モデル開発研究

## Atmospheric transport model development for global carbon budget estimate using satellite observations

八代 尚, 国立環境研究所, E-mail: yashiro.hisashi(at)nies.go.jp  
丹羽 洋介, 国立環境研究所, E-mail: niwa.yosuke(at)nies.go.jp  
齊藤 誠, 国立環境研究所, E-mail: saito.makoto(at)nies.go.jp  
佐伯 田鶴, 国立環境研究所, E-mail: saeki.tazu(at)nies.go.jp  
村上 和隆, 国立環境研究所, E-mail: murakami.kazutaka(at)nies.go.jp  
Liu Guangyu, 国立環境研究所, E-mail: liu.guangyu(at)nies.go.jp  
山田 恭平, 国立環境研究所, E-mail: yamada.kyohei(at)nies.go.jp  
Hisashi Yashiro, National Institute for Environmental Studies  
Yosuke Niwa, National Institute for Environmental Studies  
Makoto Saito, National Institute for Environmental Studies  
Tazu Saeki, National Institute for Environmental Studies  
Kazutaka Murakami, National Institute for Environmental Studies  
Liu Guangyu, National Institute for Environmental Studies  
Kyohei Yamada, National Institute for Environmental Studies

### 要旨

温室効果ガス(GHG)の全球分布予測だけでなく、GHGの地表面吸収排出量を精度良く求めるためには、シミュレーションモデル内におけるより精度の高い大気輸送過程の表現が必要である。本研究では、地上観測結果に見られる二酸化炭素の半球間濃度差の再現性に着目し、全球大気モデルNICAMの半球間物質輸送の経路と強度についての解析を行った。その結果、特に2009-2010年および2015-2016年の時期に、北半球冬における熱帯太平洋上の輸送経路の変化が見られ、前者の時期には半球間濃度差の拡大をシミュレーションでも捉えていることが示された。後者の時期は他の輸送プロセスによって半球間濃度差の拡大がキャンセルされているが、シミュレーションでは観測された濃度勾配を定量的に再現できておらず、今後更なる解析が必要である。

### 1. Introduction

The inter-hemispheric gradient (IHG) of carbon dioxide ( $\text{CO}_2$ ) has been used as an important constraint on sources and sinks of carbon. IHG is maintained by asymmetric distribution of anthropogenic  $\text{CO}_2$  emissions and uptake by biosphere in northern hemispheric midlatitudes [3]. Cross-equatorial exchange of  $\text{CO}_2$  also influences the variation of the IHG. Several mechanisms have been proposed to explain how cross-equatorial exchanges impact the variation of IHG. Cross-equatorial transport of  $\text{CO}_2$  by divergence in the upper troposphere associated with the convection and by via upper tropospheric equatorial westerlies termed “westerly ducts” has been demonstrated to contribute to cross-equatorial exchange of  $\text{CO}_2$  [1, 5]. Respective cross-equatorial exchange contributions and the balance between them remain poorly understood due to uncertainties in atmospheric transport processes in model simulation. For a better understanding of the variations in the IHG, precise simulations of the cross-equatorial exchange of  $\text{CO}_2$  by different pathways are required.

### 2. Materials and Methods

In this study, we have estimated the global  $\text{CO}_2$  distributions using the Non-hydrostatic Icosahedral Atmospheric model (NICAM) and atmospheric measurements from ground-based sites, with a focus on the period 2008-19. The horizontal resolution was 223 km with a vertical resolution of 18 layers from surface to 10 hPa. Horizontal wind field from ERA-5 reanalysis data were assimilated using a nudging technique. The emission inventories were from the NISMON- $\text{CO}_2$ -2022 [4].

### 3. Result

The IHG reflects a combination of variability in carbon sources/sinks and atmospheric transport. Fig.1 shows the time evolution of the inter-hemispheric gradient of  $\text{CO}_2$ . The simulation

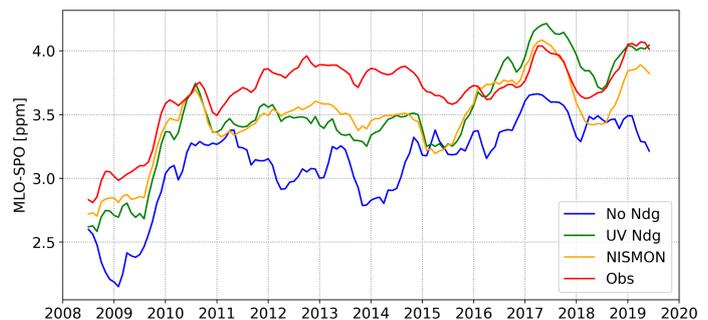


Fig. 1. Time series of inter-hemispheric gradients of carbon dioxide between Mauna Loa and South Pole from the in-situ observations and model simulations. 0 km area encompassing each site for each month.

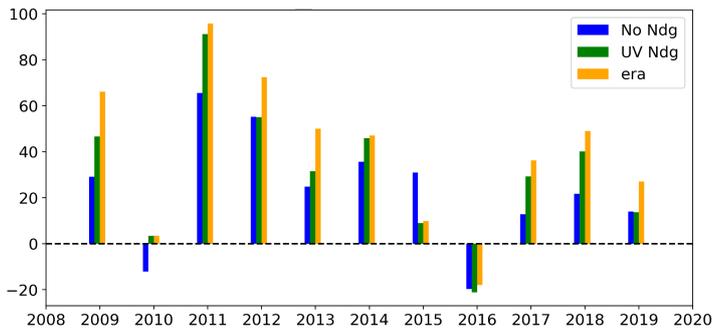


Fig. 2. Monthly zonal winds averaged from October to April (300 hPa, 5N to 5S, 140 to 170W)

boreal winter and CO<sub>2</sub> can propagate southward via the duct. Fig.2 shows westerly ducts in the upper tropospheric Pacific equatorial region. The westerly ducts in 2009-10 and 2015-16 were found weaker, which is attributed to the simulated enhanced IHG in 2015-16 seen in Fig.1. However, the gradual increased IHG in 2015-16 may be caused by mean southward transport of CO<sub>2</sub> due to a stronger Hadley circulation [2]. The discrepancies arise from incomplete representation of balance of multiple processes in the model, including westerly duct and mean transport of CO<sub>2</sub>.

accurately captured the increasing IHG in 2009-2010 reported by in-situ observations, which was caused by inhibition due to weak westerly duct [1]. Discrepancies between simulations and observations of the IHG in 2015-2016. Compared to the observation, the IHG in simulation and inversion indicated stronger enhancements in 2015-2016. It is possible that the disagreement of the IHG between observation and simulation in 2015-16 arose from underestimating the cross-equatorial exchanges via the westerly duct in the model.

In most years, the westerly duct is positive in

#### 4. Summary

We compared the 3-D wind fields and CO<sub>2</sub> simulated by a global atmospheric model NICAM with ground observations and atmospheric reanalysis data. As a result, we confirmed that the simulation reproduced the large interannual variability of CO<sub>2</sub> IHG. One of the factors causing this variability is the change of the zonal wind in the upper troposphere in the tropical Pacific region, which has been proposed as the "westerly duct." The simulation results include years in which the magnitude of the interannual variability of IHG is quantitatively well reproduced and years in which it is not, and further analysis is required to determine the factors causing these differences.

This study allows us to understand the cross-equatorial exchanges of CO<sub>2</sub> and their impact on the inter-hemispheric gradient and highlights the critical role of simulation in refining CO<sub>2</sub> emission assessments.

#### References

- (1) Francey, R. J., and J. S. Frederiksen. "The 2009-2010 step in atmospheric CO<sub>2</sub> interhemispheric difference". *Biogeosciences* 13.3 (2016): 873-885.
- (2) Frederiksen, J. S. and R. J. Francey, "Unprecedented strength of Hadley circulation in 2015-2016 impacts on CO<sub>2</sub> interhemispheric difference". *Atmospheric Chemistry and Physics* 18 (2018): 14837-14850.
- (3) Tans, P. P., I. Y. Fung, and T. Takahashi. "Observational constraints on the global atmospheric CO<sub>2</sub> budget". *Science* 247 (1990): 1431-1438.
- (4) Niwa, Y., K. Ishijima, A. Ito, and Y. Iida. "Toward a long-term atmospheric CO<sub>2</sub> inversion for elucidating natural carbon fluxes: technical notes of NISMOM-CO<sub>2</sub> v2021. 1.". *Progress in Earth and Planetary Science* 9.1 (2022): 1-10.
- (5) Webster, P. and J. Holton. "Cross-equatorial response to middle-latitude forcing in a zonally varying basic state". *J. Atmos. Sci* 39 (1982): 722-733.

# 沿岸-沖合移行帯域における物理場と生態系に関する数値的研究

## Numerical studies on physical field and ecosystem in coastal-offshore transition zones

伊藤 幸彦, 東大・大気海洋研, E-mail: itohsach(at)aori.u-tokyo.ac.jp  
堤 英輔, 鹿大・水産, E-mail: tsutsumi(at)fish.kagoshima-u.ac.jp  
柴野 良太, 東大・大気海洋研, E-mail: rshibano(at)aori.u-tokyo.ac.jp  
孫 文蕙, 東大・大気海洋研, E-mail: sunwenhui(at)aori.u-tokyo.ac.jp  
Sachihiko Itoh, Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo  
Eisuke Tsutsumi, Faculty of Fisheries, Kagoshima University  
Ryota Shibano, Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo  
Wenhui Sun, Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo

### 要旨

沿岸-沖合移行領域における生物生産性を支える栄養塩供給に重要な湧昇過程の理解を目的として、夏季の三陸沿岸津軽暖流域と大隅海峡黒潮分枝流域における数値シミュレーションを行った。その結果、海流と潮汐流が沿岸の地形と相互作用し大きな地形性ロスビー数を持つ渦流を生じ、それに伴って湧昇が発生することが示された。

### 1. はじめに

日本の沿岸には多数の河川や内湾が存在するとともに、沖合には黒潮や親潮、津軽暖流、宗谷暖流等の海流系が流れ、多様な海洋環境が形成されている。この沿岸と沖合の間の「移行帯」では、物質循環と生物生産、生物多様性のホットスポットとなっている。三陸の海洋は代表的な移行帯であり、そこを流れる津軽暖流では前線（潮目）が生じ漁場形成に関わることが知られているが、それには海域に特徴的なサブメソスケール（海洋において 10 km 以下のスケール）の流動が混合と物質循環を通じ、重要な役割を果たすと考えられる。本研究課題では、沖合の海流系が沿岸地形に作用して生じるサブメソスケールの流動の物質循環・生態系に与える影響の理解を目的として数値モデルによる解明を行う。本年度は栄養塩輸送に重要な湧昇を生じる過程について、昨年度までの三陸に加え黒潮分枝流が流れる鹿児島県大隅海峡を対象とした研究を行った。

### 2. 問題設定・方法

海洋大循環モデル MITgcm (Marshall et al. 1997) を用い、三陸沖と大隅海峡を対象とした流動と鉛直混合の数値シミュレーションを行った。サブメソスケール構造を解像するため主要な海域では水平格子幅を 100 m とし、その外側では開境界に向けて格子幅を 1 km にまで拡張した。鉛直格子幅については、表層 200 m で 2 m とし、それ以深で徐々に拡張させた。海底地形には約 50 m 格子の Global tsunami Terrain Model (Chikasada, N. 2020) を使用し、モデル格子に内層して与えた。鉛直拡散・粘性係数はともに背景の値を  $1 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  とし、不安定等によって鉛直密度逆転が生じた層ではそれらの値が Thorpe scale 法によって強化される Klymak & Legg (2010) のスキームを採用した。水平拡散・粘性係数は  $1 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  とした。初期条件は三陸については北西太平洋海洋長期再解析 FORA-WNP30 (Usui et al. 2017) の 8 月の気候値を、大隅海峡については鹿児島大学理工学研究科加古真一郎教授が提供する海況予報 DREAMS\_E (<http://me.oce.kagoshima-u.ac.jp/vwp/>) から 2022 年 8 月の月平均値を用いた。水温・塩分・流速・海面高度をモデル格子へ内層して与え、開境界における水温・塩分・流速・海面高度を同気候値に強制的に緩和するとともに、開境界から潮汐モデル TPX08-atlas (Egbert & Erofeeva 2002) の  $M_2$ ,  $S_2$ ,  $K_1$ ,  $O_1$  分潮の順圧潮汐流で駆動した。海面フラックスについては、運動量（風応力）は与えず、一定値 ( $50 \text{ W m}^{-2}$ ) の下向き味の熱フラックスを与えた。

### 3. 結果と考察

昨年度報告したように、本州最東端である鮎ヶ崎周辺の沿岸に沖合よりも冷たい水塊が沿岸に分布する海面水温分布が再現された (図 1)。この冷水帯を生じた水温の低下は水深 20m より浅い層で生じており、高塩分化を伴っていた。また冷水帯の分布は南下する津軽暖流が陸と相互作用して生じる著しい高気圧性渦度帯の分布に一致していた。この冷水帯の形成要因を調べるために冷水が生じた領域で熱収支の解析を行ったところ、20m 深下層からの鉛直移流フラックスが主要因であり、鮎ヶ崎沖で湧昇が生じていることを示唆する結果であった (図 2)。また、冷水化は概ね 1 日毎に生じており、三陸で卓越する日周期による潮汐が津軽暖流を加速し高気圧性渦度を強化するときに水温低下が促進された。一方大隅海峡においては、図 3, 4 に示すように半島先端の佐多岬で発生し下流へ剥離する低気圧性渦の内部で冷水が生じる計算結果であった。この低気圧性渦は半日毎に出現しており、海域で卓越する半日周期の潮汐流が大隅分枝流を強める時に生成し弱める時に切離・孤立する。このような大隅海峡における孤立渦列はしきさい等の高解像度の衛星海面水温等に認められた。いずれの海域も極めて大きな地形性ロスビー数  $R_0 = |\zeta/f|$  ( $\zeta$  は相対渦度の鉛直成分,  $f$  は慣性周波数) で特徴づけられる。このような高い  $R_0$  を持つ潮汐流によって駆動される渦流中では、高気圧性・低気圧性にかかわらず湧昇が生じることが石崎ら (2023) によって示されており、海底エクマン層内の湧昇とその上部の傾度流バランスにある渦流内の循環で説明されており、本実験の結果も同様に説明されると考えられる。

### 4. まとめと今後の展望

本研究では三陸と大隅海峡の高解像度数値シミュレーションから、夏季に形成される沿岸冷水帯の成因を検討した。三陸では

津軽暖流と潮汐流によって沿岸湧昇が生じ、夏季に観測される沿岸に沿った冷水帯が再現された。一方、夏季大隅海峡沿岸でも三陸で見られるような沿岸に沿った冷水帯の形成がしばしば観測されるが、本実験では再現されなかった。今後はこの原因を検討するとともに、様々な海域で観測される地形性湧昇過程の理解に役立つよう感度実験の実施とパラメータスペースでの整理を実施する予定である。

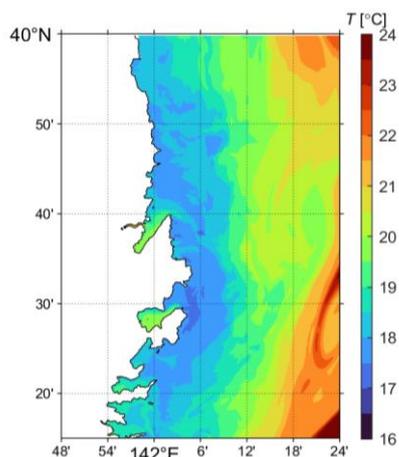


Fig. 1 数値モデルで再現された三陸沿岸の冷水の一例。カラーは海面水温を表す。

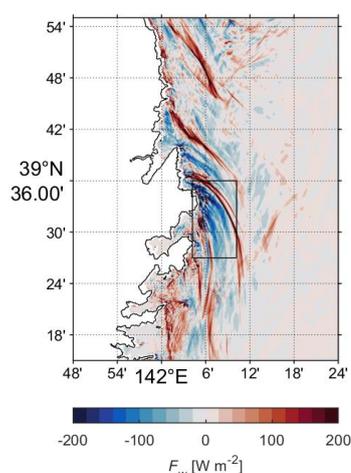


Fig. 2 水深 20mにおける鉛直移流熱フラックス。正（負）の値は上（下）向きの熱輸送を示す。黒枠は冷水が生じている領域を表す。

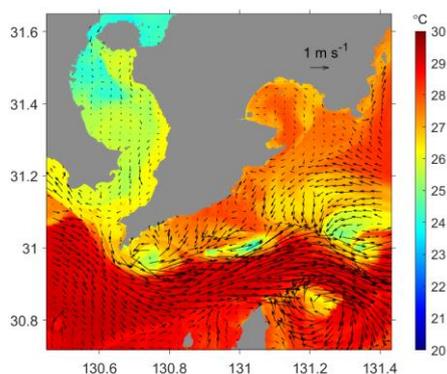


Fig. 3 数値モデルで計算された大隅海峡周辺の海面水温場（2022年8月25日の満潮時）。大隅半島先端の佐多岬で生成・切離した渦中で水温が低下している。

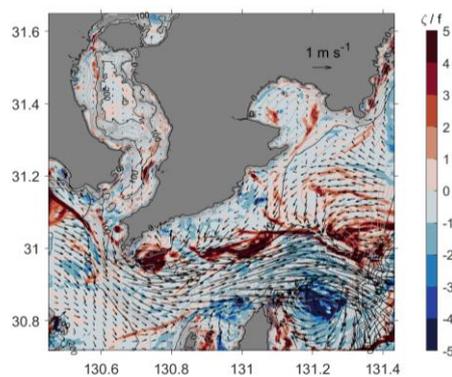


Fig. 4 Fig. 3の時刻に対応した相対渦度の鉛直成分。

## 参考文献

1. Marshall, J., A. Adcroft, C. Hill, L. Perelman, and C. Heisey, 1997, A finite-volume, incompressible Navier Stokes model for studies of the ocean on parallel computers. *Journal of Geophysical Research*, 102, 5753–5766, <https://doi.org/10.1029/96JC02775>.
2. Chikasada, N., 2020, Global tsunami Terrain Model, <https://doi.org/10.17598/NIED.0021>.
3. Klymak, J. M., and S. M. Legg, 2010, A simple mixing scheme for models that resolve breaking internal waves. *Ocean Modelling*, 33(3–4), 224–234. <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2010.02.005>.
4. Usui, T. Y., and Coauthors, 2017, Four-dimensional variational ocean reanalysis: A 30-year high-resolution dataset in the western North Pacific (FORA-WNP30). *Journal of Oceanography*, 73, 205–233, <https://doi.org/10.1007/s10872-016-0398-5>.
5. Egbert, G. D., and S. Y. Erofeeva, 2002, Efficient inverse modeling of barotropic ocean tides. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 19, 183–204, [https://doi.org/10.1175/1520-0426\(2002\)019<0183:EIMOBO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0426(2002)019<0183:EIMOBO>2.0.CO;2).
6. Gula, J., Taylor, J., Shcherbina, A., and Mahadevan, A., 2022, Submesoscale processes and mixing, in *Ocean Mixing: Drivers, Mechanisms and Impacts*, eds M. Meredith and A. N. Garabato, 181–214. doi: 10.1016/B978-0-12-821512-8.00015-3
7. 石崎裕也・磯田豊・田谷浩志郎・小林直人, 2023, 津軽海峡東口において強い鉛直循環流を伴う長寿命の時計回り地形性剥離渦, 沿岸海洋研究, 61(1), 1–19.

# 海洋における循環・水塊形成・輸送・混合に関する数値的研究： 北西太平洋ソルトフィンガー二重拡散対流

## Numerical study on circulation, formation, transport and mixing of water-masses in the ocean

安田 一郎, 東大・大気海洋研, E-mail: ichiro(at)aori.u-tokyo.ac.jp

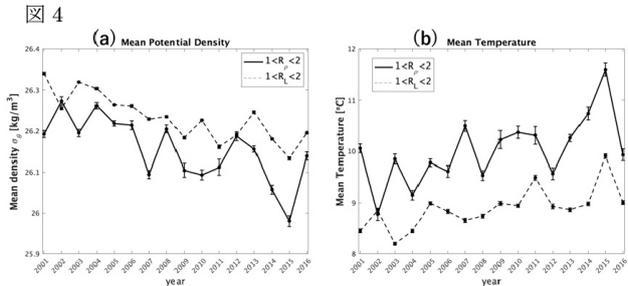
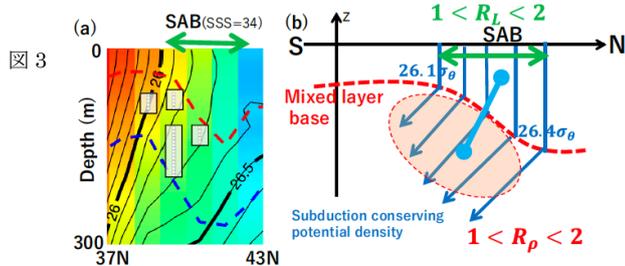
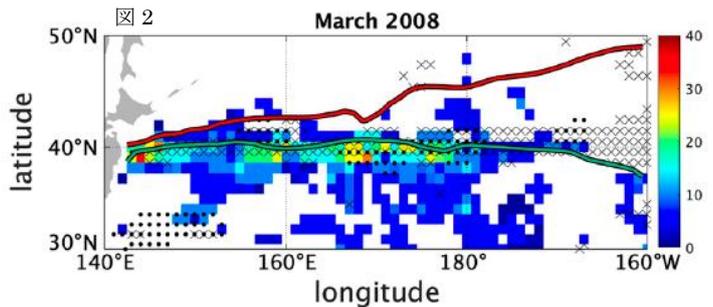
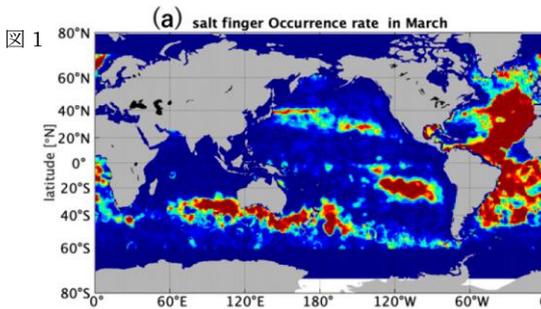
佐々木 雄介, 東大・大気海洋研, E-mail: yssk(at)aori.u-tokyo.ac.jp

Ichiro Yasuda and Yusuke Sasaki

Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo

**要旨:** 2023 年度は、これまでソルトフィンガー(SF)二重拡散は活発では無いとされていた北西太平洋において、北緯 40 度亜寒帯境界に沿って、水平密度比 1-2 の海水がサブダクトして鉛直に重なることにより鉛直密度比 1-2 の活発な SF が 3 月に形成され、その後夏季までに急激に減衰すること、亜寒帯境界付近での冬季表層水の温暖化に伴い、SF を形成する海水の水温上昇・密度低下・水深浅化トレンドが存在することを明らかにした。

- はじめに** 本研究課題では、海洋物質循環や生態系・気候に影響する海洋構造とその変動、特に鉛直混合を通じた水塊形成と変動に焦点を当てて研究を行っている。二重拡散混合は、乱流が弱い海域において、熱や物質の鉛直輸送に重要な役割を持つ可能性があり、1960 年代から活発に研究がなされてきた。上方に向かって、高温高塩分となるソルトフィンガー型二重拡散(SF)が活発な海域は、鉛直密度比  $R_\rho = \alpha T_z / \beta S_z = 1-2$  ( $\alpha$ : 熱膨張係数、 $\beta$ : 塩分収縮係数、 $T_z$ : 水温鉛直勾配、 $S_z$ : 塩分鉛直勾配) で指標されるが、北西太平洋ではこれまで活発な SF は一部を除き見つかっていなかった。本研究では、これまで活発では無いとされてきた北西太平洋海域において活発な SF を見出すこと、その分布や変動について明らかにすることを目的として研究を行なった。
- 問題設定・方法** 鉛直密度比 1-2 の海域を格子化された観測データ (MOAA-GPV) を鉛直方向に 5m に線形内挿し、鉛直密度比を求め、 $R_\rho=1-2$  の部分を抽出し、分布と変動を調べた。また、3 月 10m 深での緯度方向の水平密度比  $R_L = \alpha T_y / \beta S_y = 1-2$  となる海域を抽出し、鉛直密度比と対応させることで、形成・変動過程を明らかにすることを旨とした。
- 結果と考察** 図 1 は 3 月の SF の分布確率を表す。40N に沿った日付変更線以西に高確率で SF 分布があり、その分布は図 2 から、表層塩分 34 で指標される亜寒帯境界(図 2 緑線)付近に高頻度で分布し、また、表層での水平密度比  $R_L=1-2$  の分布(X)と対応していた。158E での 3 月塩分南北断面図(図 3a)にみられるように、混合層底(赤破線: 表面密度+0.02 で定義)と青破線で表される表面密度+0.2 の間、混合層が北向きに深くなる海域に鉛直密度比  $R_\rho=1-2$  の部分(白)が分布した。このことから、表層混合層で水平密度比  $R_L=1-2$  の海水がサブダクトして鉛直に重なることで、SF が形成されると考えられた(図 3b)。これら鉛直密度比  $R_\rho=1-2$  や水平密度比  $R_L=1-2$  での平均水温・平均密度には昇温・低密度化トレンドがみられた(図 4)。
- 今後の展望** 北西太平洋で SF が発見され、その水塊が温暖化とともに変化している。晩冬 3 月における  $R_L=1-2$  の海水の形成については、北大西洋での SF の密度比の説明を試みた Stommel や Young の研究があり、冬季水温塩分前線での形成メカニズムが提唱されているが、本海域での亜寒帯境界での冬季混合層前線でのサブメソ不安定、亜寒帯境界がなぜ 40N に沿って分布するか、他の SF 形成海域での  $R_L$  と  $R_\rho$  の対応等、今後研究課題として興味深い課題である。



### 参考文献

- (1) Oyabu, R., I. Yasuda, and Y. Sasaki (2023) Large-scale distribution and variations of active salt-finger double-diffusion in the western North Pacific. *J. Phys. Oceanogr.*, 53, 2013-2027, DOI: 10.1175/JPO-D-22-0244.1

# 海洋循環－低次生態系結合モデルを用いた魚類生息環境場の比較研究

## A comparative study on habitat environments of fish species using ocean circulation and lower trophic level marine ecosystem coupled model

伊藤 進一, 東大・大気海洋研, E-mail: goito(at)aori.u-tokyo.ac.jp

松村 義正, 東大・大気海洋研, E-mail: ymatsu(at)aori.u-tokyo.ac.jp

佐々木 千晴, 東大・大気海洋研, E-mail: sasaki.chiharu(at)aori.u-tokyo.ac.jp

矢部いつか, 東大・大気海洋研, E-mail: yabe.itsuka(at)aori.u-tokyo.ac.jp

Shin-ichi Ito, Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo

Yoshimasa Matsumura, Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo

Chiharu Sasaki, Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo

Itsuka Yabe, Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo

### 要旨

領域海洋モデル Regional Ocean Modeling System と低次栄養段階生態系モデルおよび魚類回遊モデルを結合させたモデルによって魚類生息環境の模算を計画した。魚類成長－回遊モデルとしてマサバ、サンマのモデル改良を進め、海洋環境変動に対する魚類の応答を調べた。中国の水産十種であるフウセイに拡張した。さらに、マイクロプラスチックの海洋中での輸送実験を継続した。

### 1. はじめに

北西太平洋は魚類生産が世界でも最も盛んな海域であるが、数値モデルによる魚類の生息環境の再現性が低く、過去の魚類資源変動および将来予測のボトルネックになっている。特に、小型浮魚類の餌料となる動物プランクトンの再現性が低いことが問題となっている。そこで本課題では、複数の海洋循環－低次栄養段階生態系結合モデルを用いて北西太平洋の魚類生息環境を模算し、それらの相互比較および観測結果と比較することによって、モデルの改良方針を明らかにする。また、魚類－成長回遊モデルの改良を行い、より現実的な回遊を表現できるようにする。さらに、近年、海洋生態系への影響が危惧されているマイクロプラスチックの海中での動態を表現するモデルを開発し、将来的に魚類成長－回遊モデルと結合し、魚類への影響評価を可能とするために準備を進める。

### 2. 問題設定・方法

領域海洋モデル Regional Ocean Modeling System (ROMS) と低次生態系モデル NEMURO (North Pacific Ecosystem Model for Understanding Regional Oceanography) を結合させた ROMS-NEMURO による数値実験を行い、その再現性を吟味してきた。しかし、ROMS を用いた数値実験では黒潮の流路の再現性が良くないため、インド洋における数値実験を実施し、シェーシェルドームの発達に伴う栄養塩の鉛直拡散と混合層へのエントレイメントの強化が植物プランクトンブルームに寄与していることを示してきた (Yokoi et al., 2022)。また、NEMURO と魚類の成長を結び付けたサンマの成長－回遊モデル NEMURO.FISH (NEMURO For Including Saury and Herring; Ito et al., 2004) をマサバなどに適用してきた。マサバは、春季に伊豆諸島付近に主産卵場を有するが、産卵された卵は黒潮および黒潮統流によって沖へと輸送され、輸送過程で孵化した仔魚は、成長とともに混合水域へと索餌回遊し、夏秋季に混合水域および親潮域で索餌後、越冬のために常磐・鹿島灘海域へと南下回遊することが知られている。マサバ太平洋系群の個体数は、数十年周期で 10 倍以上の変動を繰り返すが、先行研究によって、仔稚魚期の成長が良いときに生残率が高いことが知られている。また、マサバの耳石を用いた日周輪解析と酸素安定同位体比分析結果から、仔魚期の成長が良い個体が稚魚期に積極的に低水温域に侵入し、多くの餌料を摂餌することで成長が加速されるという growth positive spiral 仮説を提唱した (Higuchi et al., 2019) が、用いた分析数は限定されている。そこで、マサバの魚類回遊－成長モデルを用いて、growth positive spiral 仮説の妥当性を評価してきた。マサバの飼育実験などをもとに摂餌の水温依存性や体重依存性を設定するとともに、自ら室内実験で求めた酸素消費量の水温、体重、遊泳速度依存性 (Guo et al., 2020; 2021) を取り入れてマサバ回遊－成長モデルを構築し、2002 から 2016 年の衛星海面水温、餌料環境を外力として計算し、黒潮流軸の北側に位置する経路を回遊したマサバが高餌料環境を経験することで成長が加速され、高成長個体はより早く混合水域に侵入し、さらに良い餌条件を経験していることがモデル内でも示され、growth positive spiral を支持した (Guo et al., 2022)。

上記のマサバの成長モデルを、成魚に至るまでの成長を再現するよう拡張させ資源変動を同時に計算するマサバ成長－個体群動態結合モデルを開発してきた。1998 年から 2018 年にかけて 21 年間の衛星データから求めた水温および餌料環境を与えた過去再現実験を実施し、計算結果として得られる 1998 年から 2014 年のマサバの資源量と再生産成功率が観測値とあうように最適な死亡率の体長依存性と成長率依存性を求めた結果、体長依存性のみを考慮した死亡率が支持された (Wang et al., 2023)。このモデルを用いた研究から、2000 年代のマサバの資源増大は餌料環境の好転が影響している一方、2010 年以降の個体数の増加には水温および餌料密度の両者が好適であることが影響していることを示唆した (Wang et al., 2023)。

本年度は、NEMURO.FISH を中国における水産重要種であるフウセイに応用した。黒潮域におけるマサバとカリフォルニア回遊域のマサバのそれぞれの呼吸代謝特性を持つモデル魚を、黒潮域およびカリフォルニア海流域の成長－回遊モデルに導入することで、局所順応能力を試験した。サンマの成長－回遊モデルについては、耳石酸素安定同位体比を取得した個体の成長－回遊を表現できるモデルの構築を進めた。また、北太平洋で問題となっているマイクロプラスチックの数値実験を実施し、沈降性マ

マイクロプラスチックについては、海底土中の鉛直分布に関する解析を進めた。

### 3. 結果と考察

フウセイに応用したモデルを用いて三沙湾におけるフウセイの適性生息地を明らかにし、Xie et al. (2024)として論文発表した。黒潮域におけるマサバとカリフォルニア回遊域のマサバのそれぞれの呼吸代謝特性を持つモデル魚を、黒潮域およびカリフォルニア海流域の成長-回遊モデルに導入する局所順応能力試験については、カリフォルニア海流域における分布水温の情報が不足しており、カリフォルニア海流域での回遊が妥当な範囲で再現できておらず、現在も調整を続けている。黒潮域については、これまでの実績から成長、回遊経路とも妥当なものを得ている (Fig. 1)。

サンマの成長-回遊モデルについては、比較に用いる耳石酸素安定同位体比の分析を進め、100 個体を超える比較データを作成した。成長-回遊モデルにおいて耳石酸素安定同位体比の変化と成長変化を表現できるモデルの構築を進めた。今後、魚類成長-回遊モデルを、マイクロプラスチック動態モデルに導入することで、魚類のマイクロプラスチック遭遇確率に関する研究を展開する予定である。

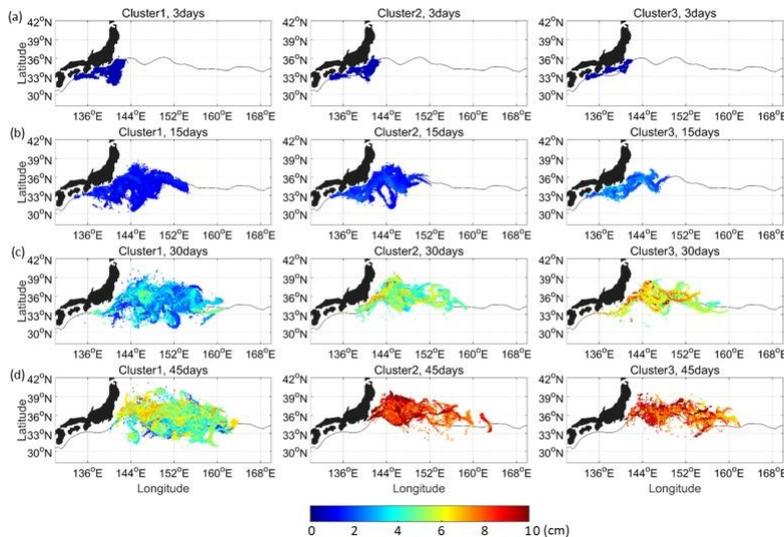


Fig. 1 Distribution snapshots of all clustered individuals from 2002 to 2016 at (a) 5 days, (b) 15 days, (c) 30 days, and (d) 45 days after hatching. The color represents the fork length (cm) of each individual. Black lines are the averaged position of the Kuroshio axis from 2002 to 2016. From Guo et al. (2022). <https://doi.org/10.1016/j.pocan.2022.102821>

### 4. まとめと今後の展望

新しい魚種への拡張を進めるとともに、マサバ、サンマの魚類成長-回遊モデルと魚類成長-個体群動態結合モデルの開発を継続した。魚類成長-回遊-個体群動態結合モデルを用いることで、将来の気候変動に対し、成長、回遊、資源量がどのように変化するか総合的に解析することが可能となる。

### 参考文献

- (1) Yokoi, T., S. Ito, and E. Curchitser, 2022, Effect of Seychelles Dome intensity on nutrient supply to mixed layer: Insights from a physical-biological coupled model. *J. Mar. Sys.*, 227, 103689.
- (2) Ito S., M. J. Kishi, Y. Kurita, Y. Oozeki, Y. Yamanaka, B. A. Megrey and F. E. Werner (2004) Initial design for a fish bioenergetics model of Pacific saury coupled to a lower trophic ecosystem model, *Fish. Oceanogr.*, 13, Suppl. 1, 111-124.
- (3) Higuchi T., S. Ito, T. Ishimura, Y. Kamimura, K. Shirai, H. Shindo, K. Nishida, K. Komatsu, 2019, Otolith oxygen isotope analysis and temperature history in early life stages of the chub mackerel *Scomber japonicus* in the Kuroshio-Oyashio transition region. *Deep-Sea Res. II*, 169-170, Article 104660.
- (4) Guo C., S. Ito, N. C. Wegner, L. N. Frank, E. Dorval, K. A. Dickson, D. H. Klinger, 2020, Metabolic measurements and parameter estimations for bioenergetics modelling of Pacific Chub Mackerel *Scomber japonicus*. *Fish. Oceanogr.*, 29, 215-226. <https://doi.org/10.1111/fog.12465>
- (5) Guo C., S. Ito, M. Yoneda, H. Kitano, H. Kaneko, M. Enomoto, T. Aono, M. Nakamura, T. Kitagawa, N. C. Wegner, and E. Dorval, 2021, Fish specialize their metabolic performance to maximize bioenergetic efficiency in their local environment: conspecific comparison between two stocks of Pacific chub mackerel (*Scomber japonicus*). *Frontiers Mar. Sci.*, Article 613965. <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.613965>.
- (6) Guo C., S. Ito, Y. Kamimura, and P. Xiu, 2022, Evaluating the influence of environmental factors on the early life history growth of chub mackerel (*Scomber japonicus*) using a growth and migration model. *Prog. Oceanogr.*, 206, 102821. <https://doi.org/10.1016/j.pocan.2022.102821>
- (7) Wang Z., S. Ito, I. Yabe, C. Guo, 2023, Development of a bioenergetics and population dynamics coupled model: A case study of chub mackerel. *Frontiers Mar. Sci.*, 10, 1142899. <https://doi.org/10.3389/fmars.2023.1142899>
- (8) Xie B., S. Ito, L. Huang, H. Yu, C. Guo, Z. Wang, 2024, Growth patterns and optimum habitat of *Larimichthys crocea* throughout ontogenesis based on a bioenergetics model. *Regional Studies in Marine Science*, 70, 103386. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2024.103386>

# 放射収支算定のための放射スキームの高速・高精度化

## Fast and accurate radiation scheme for radiation budget calculation

関口 美保, 海洋大・学術研究院, E-mail: miho(at)kaiyodai.ac.jp  
Miho Sekiguchi, Tokyo University of Marine Science and Technology

### 要旨

昨年度に引き続き、MIROC に用いられている放射伝達モデル Mstrn の気体吸収過程の更新を行った。本更新では、相関  $k$ -分布モデル比較プロジェクト(CKDMIP)で指定されているデータを用いて長波領域と短波領域のプログラムを分割して作成し気体吸収テーブルの構築を行っている。昨年度は Mstrn11 短波版の精度を向上させ、評価結果を CKDMIP に提出した。今年度は長波版として作成した 33 バンド 75 点の気体吸収テーブルの加熱率の精度を向上させ、33 バンド 89 点としたテーブルを作成した。

### 1. はじめに

MIROC に用いられている放射伝達モデル MstrnX は気体吸収過程を 29 バンド 111 チャンネル版（以下、温暖化対応版）が CMIP6 向けに採用されている。この気体吸収テーブルは二酸化炭素倍増状態やメタン、一酸化二窒素が増加した状態を再現するように最適化されており、二酸化炭素 4 倍増のケースで放射強制力の精度が不十分であることが指摘されている(1)。これを受けて、2017 年度に 29 バンド 147 チャンネルの二酸化炭素 4 倍増状態に対応した吸収テーブル（以下、4 倍増対応版）を作成したが、20 世紀の気温上昇の再現性が悪く、IPCC AR6 に提出する実験には採用されなかった。また、短波領域での水蒸気吸収が過小評価されていることがわかっている(2)。この原因としては、現在使われている温暖化対応版のデータベースは HITRAN2004(3) であり、HITRAN2012(4)以降に導入された近赤外域の水蒸気の吸収線が考慮されていないため、過小評価になっていることが考えられる。さらに、温暖化対応版は波長  $4\mu\text{m}$  で太陽放射領域と地球放射領域に分けて計算するように最適化を行っているため、波長  $4\mu\text{m}$  前後で太陽放射と地球放射を同時に計算すると誤差が生じやすい。

これらの問題を解決するため、相関  $k$ -分布モデル比較プロジェクト(CKDMIP; Correlated- $k$  distribution model intercomparison project)(5)への参加を念頭に、Mstrn の気体吸収過程の更新を続けている。今年度はこの更新作業を継続して行った。

### 2. Mstrn11-LW

昨年度作成した Mstrn11-LW の仕様について記述する。気体吸収データは CKDMIP で配布されているものを使用した。長波領域のデータは波数  $0\text{--}3260\text{ cm}^{-1}$  の範囲であるが、 $0\text{--}20\text{ cm}^{-1}$  の波長領域では、吸収線は多いが地球放射領域における影響は小さいため、今回開発する気体吸収テーブルは  $20\text{--}3260\text{ cm}^{-1}$  と設定した。この領域は  $320\text{K}$  のプランク関数の 99.9% をカバーしている。次にそれぞれの領域についてバンド分割を行った。放射フラックスの波数依存性を考慮する時、もっとも波数依存性が高いものは気体の吸収係数であるが、この波数依存性については相関  $k$ -分布法で積分を行うため、その他の係数や変数がバンド内で大きく変化しないようにバンド範囲を設定した。また、バンド内で考慮する吸収気体の吸収線が途切れると  $k$ -分布が不連続になり積分が難しくなることから、気体吸収帯の境界をバンド境界とし、バンドごとに扱う吸収気体を分けるように設定した。

積分点と重みを設定する最適化を各バンドで行った。最適化する大気プロファイルは AFGL 標準大気 6 種類と、気体濃度を水蒸気が 1.2 倍増した状態、氷河期最大時における温室効果気体濃度、2100 年における推定の温室効果気体濃度を用いた。つまり、最大で 24 種類の大気状態について最適化を行った。バンド内で 2 種類以上の吸収気体を考慮している場合、初期値を 2 通り (completely correlated, uncompletely correlated)、積分点数を増加させていく、または減少させていく過程の 2 通り、計 4 通りの実験を行った。このようにして得られた結果において、各バンドにおけるしきい値は大気上端、地表面、対流圏界面（ここでは  $200\text{hPa}$  とする）における正味の放射フラックスの誤差が  $0.2\text{ W/m}^2$  以下、放射強制力が  $0.1\text{ W/m}^2$  以下とし、これを満たすもっとも点数の少ない結果を採用することとした。いくつかのバンド、特に二酸化炭素の吸収が強い  $15\mu\text{m}$  帯のバンドで上記の閾値を満たすことが出来なかったが、33 バンド 75 点の長波領域の気体吸収テーブルを作成した。

### 3. Mstrn11-LW 精度評価

最適化に使用したプロファイルでの大気上端（青）と地表面（橙）での放射フラックスの LBL 計算結果からの差を図 1 に示す。どの大気プロファイルでもほぼ  $1.0\text{ W/m}^2$  以下に収まっており、フラックスの精度は担保されていることが示された。誤差原因となるバンドについては、前述の通り二酸化炭素  $15\mu\text{m}$  帯の wing 部分に該当するバンド 10, 11 の誤差が大きい。

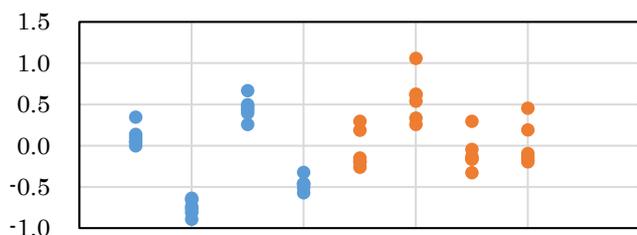


図 1. 大気上端（青）と地表面（橙）での放射フラックスの LBL 計算結果からの差。左から順に、AFGL 標準大気 6 種類と、気体濃度を水蒸気が 1.2 倍増した状態、氷河期最大時における温室効果気体濃度、2100 年における推定の温室効果気体濃度。

また、加熱率のプロファイルが十分に再現されていない。図 2 にバンド 10 ( $710 - 740\text{cm}^{-1}$ ) の加熱率プロファイルを示す。最適化した積分点で計算したプロファイル（緑）は LBL 計算（紫）のプロファイルにおける上層の加熱・冷却のピークを再現できていないことがわかる。これは上層では  $k$ -分布のピークが尖っているため、最適な積分点の探索が困難であるためと考えられる。また、機械学習によって LBL からの誤差を小さくしようとするため、LBL プロファイルの周りで波打つようなプロファイルになっている。

これを避けるため、最適化で決定した積分点の位置と重みの再調整を行った。上層の再現できていないピークについては積分点を追加することでこれを補った。これにより、修正した積分点で計算したプロファイル（水色）は LBL 計算プロファイルをよく再現できていることがわかる。この再調整をバンド 3, 7, 10, 11 に行い、それぞれの積分点を 2 から 8 点、3 から 6 点、4 から 8 点、5 から 6 点に増加させ、33 バンド 89 点のテーブルを再構築した。

このテーブルによる放射フラックスの差を図 3 に示す。プロファイルや計算手法などは図 1 と同じである。やや誤差が拡大した結果もあるが、大きく誤差は変化していない。上層の加熱率の大きいピークについて積分点を追加したが、この追加はフラックスには大きな影響を及ぼさないことが理由の一つに挙げられる。

#### 4. まとめと今後の展望

本研究で更新した長波領域用放射伝達モデル Mstrn11-LW は一定の精度を確保できたが、より一層の精度向上を目指してさらなる調整を目指す。前述の 4 つのバンド以外についても積分点の再調整を行う予定である。

十分な精度が得られたところで CKDMIP から提供されている評価プロファイルを用いて評価を行い、放射フラックス、加熱率に対して精度を検証していく予定である。本パッケージを提供した環境研究所の廣田博士によると、CKDMIP の現在の気象状態の評価プロファイル 100 点の平均誤差は大気上端では約  $0.5\text{W/m}^2$  程度であるが、地表面で約  $2.0\text{W/m}^2$  であり、MstrnX よりも精度が劣っている。また、対流圏での加熱率の誤差も目立つとのことで、より一層の修正が必要である。

#### 参考文献

- (1) Pincus et al., *Geophys. Res. Lett.*, 42, 5485-5492, 2015.
- (2) Wild, *Clim. Dyn.*, 55, 553-577, 2020.
- (3) Rothman et al., *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer.*, 96, 139-204, 2005.
- (4) Rothman et al., *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer.*, 130, 4-50, 2013.
- (5) Hogan and Matricardi, *Geosci. Model Dev.*, 13, 6501-6521, 2020.

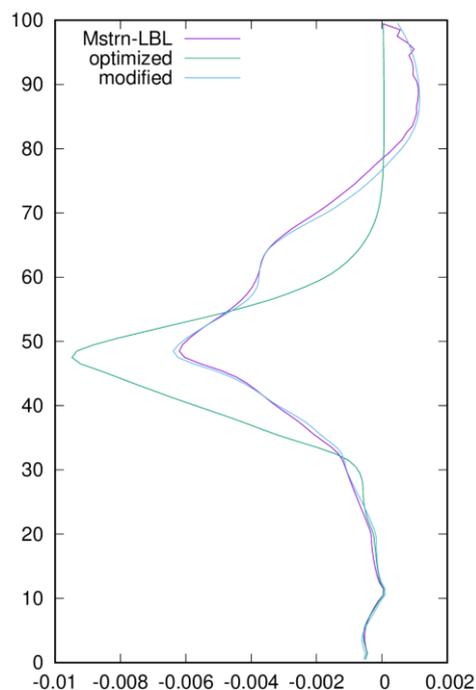


図 2. バンド 10 ( $710-740\text{cm}^{-1}$ ) における LBL 計算（紫）、最適化した積分点（緑）、修正した積分点（水色）による加熱率プロファイル。気象状態は米国標準大気。

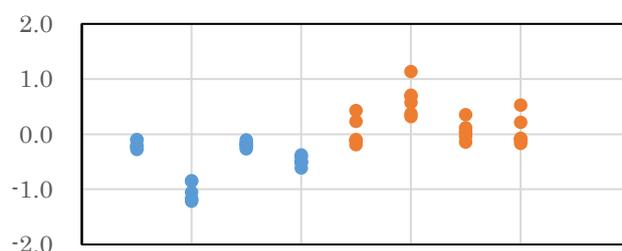


図 3. 図 1 と同様、ただし修正した吸収テーブルを用いた結果。

# 準備中

21. 非静力学海洋モデルの汎用化  
と OGCM へのシームレスな接続

# データ同化を用いた古気候復元に関する研究

## Study on paleoclimate reconstruction with data assimilation

岡崎 淳史, 千葉大・国際高等研究基幹, E-mail: atsushi.okazaki(at)chiba-u.jp  
Atsushi Okazaki, Institute for Advanced Academic Research, Chiba University

### 要旨

水同位体気候モデルを古気候研究に適用するにあたり、モデルそのものの再現性が重要である。本研究は、水同位体モデル高度化を目指して、降水同位体比の計算に関係するモデルパラメタの推定を、データ同化を用いて行った。この結果、これまで全球一様・時間不変として扱われてきた同位体パラメタが明瞭な空間パターン・季節変化を示すことが明らかになった。推定とは異なる期間を対象に、推定された同位体パラメタを用いた実験を行ったところ、降水同位体比・水蒸気同位体比の再現性が僅かながら改善する様子が観察された。また、改善の程度は、観測が空間的に密なところで顕著であった。この事は、より多くの観測を同化することでパラメタ推定精度が向上する可能性を示唆する。次世代静止気象衛星で可能になる水蒸気同位体比連続観測の同化により推定精度向上が期待される。

### 1. はじめに

水同位体 (e.g., HDO, H<sub>2</sub><sup>18</sup>O) は大気・水循環におけるトレーサーや古気候代替指標として利用されてきた。雨水や水蒸気の水同位体比を調べることで、それらがどのようなプロセスを経てきたのかを診断・復元することができる。水同位体の振る舞いを再現し、説明することを目的に水同位体を組み込んだ気候モデル (同位体 GCM) が開発されてきた。同位体 GCM には降水同位体比の計算に共通して用いられるパラメタが複数存在するが、どのような値が適切であるかは十分に検討されていない。水同位体モデルを古気候研究に適用するにあたり、水同位体モデルそのものの再現性は重要である。そこで、本研究では同位体 GCM の同位体に関連するパラメタの推定を行った。

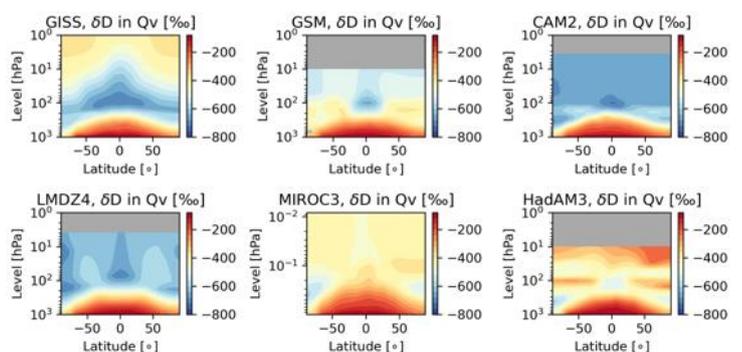


Figure 1 Zonal mean of the isotope ratios in vapor (HDO) simulated by isotope-enabled GCMs participating SWING2

### 2. 問題設定・方法

本研究では、データ同化を用いてパラメタ推定を行う。データ同化手法にはアンサンブルカルマンフィルタの一つである局所アンサンブル変換カルマンフィルタ (LETKF; Hunt et al., 2007) を用いる。同位体 GCM としては MIROC5-iso (Okazaki and Yoshimura, 2019) を用いる。推定するパラメタは、雪片形成時の同位体比に大きな影響を与える過飽和パラメタ  $\lambda$  と、雨粒がどの程度周囲の水蒸気と同位体平衡にあるかを定めるパラメタ  $\epsilon$  である。 $\epsilon$  は、大規模凝結と積雲対流について分けて定義されており、本研究ではそれぞれ  $\epsilon_{LS}$ ,  $\epsilon_{CC}$  と表記する。これらのパラメタは既往研究では全球一様・時間不変として扱われてきたことに注意されたい。同化する観測には Global Network of Isotopes in Precipitation (GNIP; IAEA, 2024) による月平均降水同位体比を用いる。

本研究では、データ同化による推定値をモデル初期値としては使用しない、いわゆるオフライン同化 (Steiger et al., 2014) を用いる。背景アンサンブルは、上記の同位体パラメタをランダムに振った実験を多数行うことで生成した (PPE; Perturbed Parameter Ensemble)。アンサンブル数は 100 メンバーである。なお、それぞれの実験において、境界条件 (海面水温、海水分布など) は同一のものを用いた。パラメタ推定は、1970/01-1972/12 を対象に行った。

### 3. 結果と考察

Fig. 2 にパラメタ推定期間における解析値と第一推定値の降水同位体比を示す。多くの地点で解析により誤差が低減していることが確認できた。このことはデータ同化が正常に作動していることを示す。パラメタ推定の結果、空間的に非一様かつ時間変化するパターンが推定された (Fig.3)。同化に用いた観測が空間的に疎であり、またデータ同化において擬似相関を除くために誤差共分散に局所化が適用されているため、空間的に平滑化されたパターンとなっていることに留意する必要があるが、これまで全球一様・時間不変として扱われてきた同位体パラメタが明瞭な空間パターン・季節変化を示す結果が得られた事は特筆すべき点である。

推定されたパラメタの妥当性を調査するため、全球一様のデフォルトパラメタ ( $\lambda=0.003$ ,  $\epsilon_{LS}=0.95$ ,  $\epsilon_{CC}=0.45$ ) を用いた実験 (CTRL) と、推定パラメタを用いた実験 (TEST) を行った。この結果、TEST と CTRL の間で、降水同位体比の全球的な再現性には大きな変化は見られなかった。南極における積雪中の同位体比や、対流圏中層の水蒸気同位体比についても同様の比較を行ったが、僅かな改善は見られるものの顕著な変化は観察されなかった。一方で、観測が空間的に密である領域 (e.g. ヨーロッパ) では降水同位体比の再現に改善がみられた (Fig. 4)。このことは、既往研究の設定を指示するとともに、より多くの同

位体観測により、同位体モデルの改善が可能であることも示唆する。

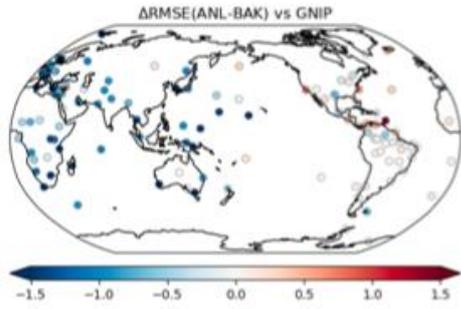


Figure 3 Difference in RMSE for monthly mean precipitation isotopes (‰) calculated against GNIP.

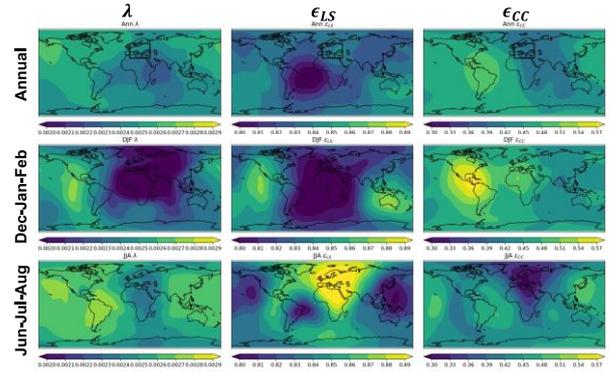


Figure 2 Estimated parameters ( $\lambda$ ,  $\epsilon_{LS}$ , and  $\epsilon_{CC}$ ) with data assimilation for (top) the annual mean, (middle) DJF, and (bottom) JJA

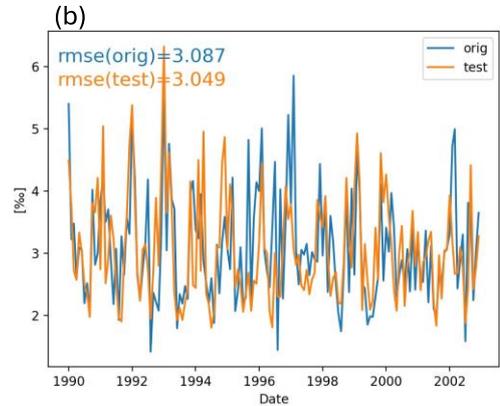
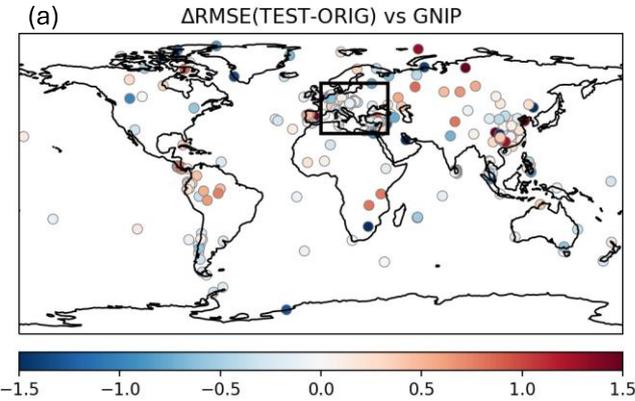


Figure 4 (a) RMSE difference for precipitation isotopes between CTRL and TEST for the period of 1990-2000. (b) timeseries of RMSE averaged over Europe (squared area in (a)). The blue and red line is for CTRL and TEST respectively

#### 4. まとめと今後の展望

本研究はデータ同化を用いて水同位体 GCM のパラメタ推定を行った。推定の結果、これまで定数として扱われてきたパラメタが時空間的に変化することが示された。また、推定されたパラメタを用いて過去再現実験を行ったところ、推定を行わなかった場合に比べて、僅かながら降水同位体比・水蒸気同位体比の再現性に改善が見られた。改善の程度は、観測が空間的に密な領域であるヨーロッパで比較的明瞭であった。このことは、より多くの観測を同化することでパラメタ推定精度が向上する可能性を示唆する。今後は衛星による水蒸気同位体比観測の同化により推定精度の向上を狙いつつ、推定されたパラメタを現在とは大きく異なる気候（例えば最終氷期など）のシミュレーションに適用し、その妥当性の検討を深める。雲・降水過程は地球温暖化予測において最大の不確実性をもたらすモデル要素であるが、水同位体を用いることでこれらを拘束し不確実性を低減できることが期待されており（e.g., Risi et al., 2012; Hu et al., 2022）、本研究で行う水同位体モデル高度化は気候モデルの発展にも資することが期待される。

#### 参考文献

- (1) Hunt et al., 2007: Efficient data assimilation for spatiotemporal chaos: A local ensemble transform Kalman filter, 230, 1-2, 112-126.
- (2) Okazaki, A., & Yoshimura, K., 2019: Global evaluation of proxy system models for stable water isotopes with realistic atmospheric forcing. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 124, 8972-8993.
- (3) Steiger et al., 2014: Assimilation of Time-Averaged Pseudoproxies for Climate Reconstruction, *J. Climate*, 27, 1, 426-441.
- (4) Risi et al., 2012: Process-evaluation of tropospheric humidity simulated by general circulation models using water vapor isotopic observations: 2. Using isotopic diagnostics to understand the mid and upper tropospheric moist bias in the tropics and subtropics, *J. Geophys. Res.*, 117, D05304.
- (5) Hu et al., 2022: Tracking shallow convective mixing and its influence on low-level clouds with stable water isotopes in vapor. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 127, e2021JD035355.