

共同研究報告書

令和6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6年度共同研究報告書の発行にあたって

令和6年度共同研究応募及び配分一覧

【特定共同研究】

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
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. 「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... 7
3. 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：領域高解像モデルを用いた雲・エアロゾル・大気化学に関する素過程研究
..... 9
4. 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.... 11
5. 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..... 13
6. 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：温室効果ガス計測データの解析 15
7. 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..... 17
8. 気候研究のための気候・氷床モデル開発と古気候数値実験
分担課題：MIROC-ES2L を用いたパラメタアンサンブル実験 19
9. 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..... 21

【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.....	23
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.....	25
3. 確率雲アンサンブルモデルにおける量子計算活用.....	27
4. 海洋モデルを用いたケーブダンレー沖南極底層水の沈み込み過程の再現.....	29
5. NICAM 及び MIROC モデルを用いた惑星気象予測・物質輸送・気候変動の研究	31
6. MIROC と NICAM を用いた潮汐固定地球型惑星の気候	33
7. 4200 年前の日射条件がメソポタミア地域の日降水強度に与える影響	34
8. 金星気象現象の全球非静力学モデル NICAM による解明.....	36
9. 熱帯域の海洋変動過程に関する研究.....	38
10. 惑星中層大気大循環の力学.....	40
11. 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.....	42
12. 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.....	44
13. 全球雲解像モデルデータを用いた熱帯雲活動の解析.....	46
14. トレーサー・粒子複合海洋低次栄養段階生態系モデルの開発.....	48
15. 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	50
16. 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	52
17. 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	54
18. 衛星データを利用した可降水量解析と短時間降水予測深層学習モデルの開発.....	56
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.....	58

2 0．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.....	60
2 1．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.....	62
2 2．放射収支算定のための放射スキームの高速・高精度化.....	64
2 3．シミュレータ ILS の開発及び較正・検証.....	66

令和6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7年9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

2024年度 気候システムに関する共同研究 応募及び配分一覧

2024年度時点

研究 区分	研 究 課 題 (分 担 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	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	国立環境研究所 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	五藤 大輔 佐藤 陽祐 山田 雄斗	主幹研究員 准教授 大学院生（修士1年）	鈴木 健太郎	50,000	0	0	0
特定 研究 2	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	気象庁気象研究所 全球大気海洋研究部	浦川 昇吾 中野 英之 豊田 隆寛 青木 邦弘 川上 雄真	第四研究室 主任研究官 第四研究室 室長 第四研究室 主任研究官 第四研究室 研究官 第四研究室 研究官	羽角 博康	43,200	0	0	0
特定 研究 3	領域高解像モデルを用いた雲・エアロゾル・大気化学に関する素過程研究	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 千葉大学環境リモートセンシング研究センター 福島大学環境放射能研究所 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 北海道大学大学院理学院	佐藤 陽祐 稲津 將 石渡 正樹 齋藤 尚子 平尾 茂一 川添 祥 近藤 誠 山田 雄斗 浅井 颯馬	准教授 教授 教授 准教授 准教授 博士研究員 大学院生（博士3年） 大学院生（修士2年） 大学院生	鈴木 健太郎 今須 良一	60,000	0	80	80
特定 研究 4	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	富山大学学術研究部理学系	小林 英貴	特命助教	岡 顕	50,000	0	0	0
特定 研究 5	海洋深層における乱流拡散のパラメタリゼーション	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 水産研究・教育機構 東京大学大学院理学系研究科	田中 祐希 日比谷 紀之 永井 平 伊地知 敬	准教授 客員教授 主任研究員 助教	羽角 博康	60,000	0	0	0
特定 研究 6	温室効果ガス計測データの解析	鹿児島大	大橋 勝文	教授	今須 良一	3,000	0	80	80
特定 研究 7	雲解像モデルにおける物理過程の高度化	富山大学	安永 数明 塚田 希望 上好 慧	教授 修士2年生 修士2年生	佐藤 正樹	60,000	0	80	80
特定 研究 8	MIROC-ES2Lを用いたパラメタアンサンブル実験	琉球大学 気象研究所 環境研究所 JAMSTEC JAMSTEC	シェリフ多田野 サム 岩切 友希 林 未知也 建部 洋晶 阿部 学	助教 学振PD 研究員 主任研究員 副主任研究員	阿部 彩子 吉森 正和 鈴木 健太郎 渡部 雅浩 今田 由紀子	50,000	0	80	
特定 研究 9	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	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 米原 仁 木南 哲平 金濱 貴史 高橋 由実子 齊藤 慧 黒木 志洸 林田 和大 須藤 康平	予報官 予報官 調査官 技術専門官 技術専門官 技術専門官 技官 技官 技官	渡部 雅浩	16,000	0	0	
小 計						392,200	0	320	240

研究 区分	研 究 課 題 (分 担 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わるモデル同化/生態系モデル結合	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 中山 佳洋 瓢子 俊太郎 大谷 若葉 森吉 紘己	助教 大学院生 大学院生 大学院生	阿部 彩子	20,000	0	120
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 地球情報科学技術センター 小室 芳樹 鈴木 立郎 黒木 聖夫	副主任研究員 副主任研究員 准研究副主任	羽角 博康	60,000	0	0
一般 研究 3	全球気候モデルの高度化および大気科学の研究	東京大学大学院理学系研究科 三浦 裕亮 橋本 恵一 上野 和雅 島田 雄大 田中 瞳	准教授 大学院生 大学院生 大学院生 大学院生	渡部 雅浩	60,000	0	0
一般 研究 4	海洋モデルを用いたケーブ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 MENSAH Vigan 中山 佳洋	教授 特任助教 助教	羽角 博康	30,000	0	80
一般 研究 5	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 黒田 剛史 鎌田 有紘 狩生 宏喜 古林 未来 池田 有里 鹿志村 樹 佐藤 礼一 東京科学大学 地球生命研究所 小玉 貴則	助教 特任研究員 大学院生 大学院生 大学院生 大学院生 大学院生 特任准教授	佐藤 正樹 阿部 彩子	50,000	0	25
一般 研究 6	MIROCとNICAMを用いた潮汐固定地球型惑星の気候	東京科学大学 地球生命研究所 東北大学 大学院理学研究科 東京科学大学 地球生命研究所 東京科学大学 地球生命研究所 小玉 貴則 黒田 剛史 谷口 啓悟 天田 航	特任准教授 助教 大学院生 大学院生	阿部 彩子 佐藤 正樹 宮川 知己	40,000	0	10
一般 研究 7	大気海洋結合モデルを用いた完新世の極端気象の様相に関する研究	東京大学大学院工学系研究科社会基盤学専攻 東京大学大学院工学系研究科 東京大学工学部 木野 佳音 若松 駿 松村 徳大	助教 大学院生 大学生	今田 由紀子	30,000	0	0
一般 研究 8	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 慶應義塾大学 東京海洋大学 京都産業大学 国立環境研究所 高木 征弘 佐川 英夫 杉本 憲彦 関口 美保 安藤 紘基 八代 尚	教授 教授 教授 教授 准教授 主任研究員	佐藤 正樹	60,000	0	80
一般 研究 9	熱帯域の海洋変動過程に関する研究	東京大学大学院理学系研究科 升本 順夫 久住 空広 寺田 雄亮 穴見 武司	教授 大学院生 大学院生 大学院生	羽角 博康	30,000	0	0
一般 研究 10	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	70
一般 研究 11	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 堤 英輔	准教授 助教	羽角 博康	50,000	0	0
一般 研究 12	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	JAMSTEC 地球環境部門 JAMSTEC 地球環境部門 JAMSTEC 地球環境部門 JAMSTEC 地球環境部門 国立環境研究所 地球システム領域 台湾中央研究院 環境変遷研究中心 東京大学 大気海洋研究所 東京大学 大気海洋研究所 中野 満寿男 小玉 知央 山田 洋平 升永 竜介 八代 尚 荒金 匠 菫澤 雄太朗 中井 舜乃祐	副主任研究員 Postdoctoral Fellow 特任研究員 研究員 主任研究員 ポスドク研究員 大学院生 大学院生	宮川 知己	50,000	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 濱田 篤 三浦 裕亮	教授 准教授 准教授	佐藤 正樹	40,000	0	80
一般 研究 14	トレーサー・粒子複合海洋低次栄養段階生態系モデルの開発	東京大学大気海洋研究所 東京大学大気海洋研究所 北海道大学低温科学研究所 九州大学応用力学研究所 The University Centre in Svalbard 北海道大学低温科学研究所 干場 康博 松村 義正 中村 知裕 木田 新一郎 大橋 良彦 伊藤 薫	特任助教 助教 講師 准教授 Guest postdoctoral fellow 学術研究員	羽角 博康	60,000	0	0
一般 研究 15	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	講師	渡部 雅浩	12,000	0	0
一般 研究 16	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 田村 優樹人 臼井 健人	准教授 大学院生（博士課程） 大学院生（修士課程）	渡部 雅浩	15,000	0	0
一般 研究 17	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 高麗 正史	教授 助教	羽角 博康	50,000	0	0
一般 研究 18	衛星データを利用した可降水量解析と短時間降水予測深層学習モデルの開発	千葉大・CEReS 千葉大・IAAR/CEReS 千葉大・CEReS 金子 凌 小槻 峻司 白石 健太	特任研究員 教授 修士課程学生	渡部 雅浩	50,000	0	0
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 松村 義正 佐々木 千晴 矢部 いつか 許 浩東	教授 助教 学術支援員 特任研究員 大学院生（D1）	羽角 博康	20,000	0	0
一般 研究 20	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 小坂 優 宮坂 貴文 岡島 悟 Scripps Institution of Oceanography, University 宮本 歩	教授 准教授 特任准教授 准教授 Postdoctoral Fellow	渡部 雅浩	40,000	0	0

研究 区分	研 究 課 題 (分 担 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 21	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 丹羽 洋介 齊藤 誠 佐伯 田鶴 村上 和隆 山田 恭平 Guangyu Liu	主任研究員 主任研究員 主任研究員 主任研究員 高度技能専門員 特別研究員 特別研究員	佐藤 正樹	30,000	0	0	0
一般 研究 22	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	50	50
一般 研究 23	統合陸域シミュレータILSの開発及び較正・検証	東京大学生産技術研究所 東京大学生産技術研究所 東京大学生産技術研究所 東京大学新領域創成科学研究科 東京大学大学院工学系研究科 東京大学生産技術研究所 東京大学新領域創成科学研究科 東京大学生産技術研究所 東京大学工学系研究科社会基盤学専攻 東京大学工学系研究科社会基盤学専攻	芳村 圭 Wenpeng Xie 新田 友子 Hongmei Li 沖 大幹 山崎 大 Jingya Cheng Olson Roman Diani Nimanthika Abeyrathne Basnayake MudiyanseLage Tamima Amin	教授 東京大学特別研究員 特任講師 博士課程学生 教授 准教授 博士課程学生 特任研究員 博士課程学生 修士課程学生	渡部 雅浩	60,000	0	0	0
小 計						858,100	0	515	515
特 定 共 同 合 計						392,200	0	320	240
一 般 共 同 合 計						858,100	0	515	515
合 計						1,250,300	0	835	755

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
佐藤 陽祐, 北海道大学大学院理学研究院, E-mail: yosuke.sato(at)sci.hokudai.ac.jp
山田 雄斗, 北海道大学大学院理学院, E-mail: Yamada.yuto.r7(at)sci.hokudai.ac.jp
Daisuke Goto, National Institute for Environmental Studies
Yosuke Sato, Faculty of Science, Hokkaido University
Yuto Yamada, Graduate School of Science, Hokkaido University, Hokkaido, Japan

要旨

これまで継続的に開発してきた全球 14 km 解像度の全球大気汚染物質輸送モデル NICAM-Chem を用いて、人為起源のブラックカーボン (BC) 排出量をアフリカ・中東・アジア領域および全球でゼロに設定したシミュレーションを実施した。日射量に注目したところ、アフリカでは人為起源 BC 削減によって、エアロゾル自身の減少と共に、大気安定化に伴う雲の減少による日射量増加効果がみられ、最大 10 Wm^{-2} 程度であった。中東では雲自体が少ないために、エアロゾル自身の減少による日射量増加効果が大きかった。アジアでは、人為起源 BC 排出量削減によって、雲-降水システムが大きく影響され、日射量の変化に地域的な差が生じることがわかった。このような地域的な変化の違いを解釈するために、アジアではさらに詳細な領域区分によるエアロゾル削減効果を見る必要がある。

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 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) ^{1,2,3)} に結合したエアロゾル化学統合モデル (NICAM-Chem) ^{4,5)} 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^{4,5)} の version 19 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施した。環境研究総合推進費戦略的研究開発課題 S-20 (S-20 プロジェクト) の共通プロトコルに基づき、人為起源ブラックカーボン (BC) 排出量をアフリカ・中東・アジア領域および全球でゼロに設定したシミュレーションを実施した。アフリカ・中東・アジアは人為起源エアロゾルが多く排出される地域であり、3 領域の総和は世界の大部分の排出量を占める。解析では、各領域で人為起源排出量をゼロに設定した感度実験と、排出量をゼロにしない標準実験との差分に注目した。積分期間は 3 年間とした。雲微物理モデルは NSW6⁶⁾ を用いた。

3. 結果と考察

図 1 には、大気上端における短波でのエアロゾル放射強制力 (ARF) を示した。アフリカ・中東・アジアは、全球で人為起源 BC 排出量をゼロにした感度実験結果と比べると、BC の鉛直積算量はそれぞれ 24.3% (アフリカ)、10.8% (中東)、49.8% (アジア) となり、これらの 3 領域で 84.9% を占めていた。つまり、世界の人為起源 BC の鉛直積算量のうち、これらの領域の寄与は約 85% であり、アジアは約 50% であることがわかった。それゆえ、この 3 領域における人為起源 BC 排出量削減による気候影響評価は、世界全体の影響を見る上で重要であることを意味している。ARF は、人為起源 BC 排出量をゼロにした場合、BC による光吸収成分の減少によって負の値となることが予想される応答であり、図 1 (a,b,c) に示したように BC 変化量が多い領域では ARF の値は負となった。全球で人為起源 BC 排出量をゼロにした感度実験結果では、全球年平均値が -0.21 Wm^{-2} であるのに対して、アフリカ・中東・アジアで人為起源 BC 排出量をゼロにした感度実験結果は全球年平均値が -0.04 Wm^{-2} (アフリカ)、 -0.01 Wm^{-2} (中東)、 -0.06 Wm^{-2} (アジア) であった。アフリカ・中東・アジアの人為起源 BC が全球 ARF 値に及ぼす影響は約 55% となり、BC 鉛直積算量の寄与率 85% に比べて小さくなった。これは、BC 存在量の変化に伴って気象場が変化することで、土壌粒子の発生量が変化することや、雲場も変化し、エアロゾルの放射強制力が変化したこと起因する。

図 2 には、全天での日射量を示した。全天日射量はエアロゾル変化に対する雲の変化も反映されているため、複雑な変化が見られた。図 2(a) で見られるように、アフリカで人為起源 BC 削減によって、雲の減少による日射量増加効果もみられた。BC 量が増えた場所では、全天では 10 Wm^{-2} もの変化が見られる場所が広く卓越しており、特にアフリカ中央部の沖合であるギニア湾では雲が減少した。BC 減少による雲減少は、BC の加熱効果が減少することで大気が安定化するメカニズムと解釈できる。中東では、図 2(b) で見られるように、人為起源 BC 排出量が多い場所では、曇天における日射量の変化は小さく、主にエアロゾル自身の放射影響が大きかった。つまり、中東では雲自体の存在が少ないために、雲を介したエアロゾルの効果があまり大きくなかった。このことは、人為起源エアロゾル関連物質の削減対策において、エアロゾルの雲への影響が大きい地域とそうではない

地域で、その影響が大きく異なることを示している。アジアでは、アフリカや中東とは異なる結果であった。図 2(c)で見られるように、アジアでは人為起源 BC 排出量削減によって、雲-降水システムが大きく影響され、雲の分布が地域毎に変化したことがわかった。即ち、アジアで人為起源 BC を削減すると、中国南部で雲が増加するために全天での日射量が減少したが、他のアジアでは雲増加に伴う日射量減少は見られなかった (図 3c)。

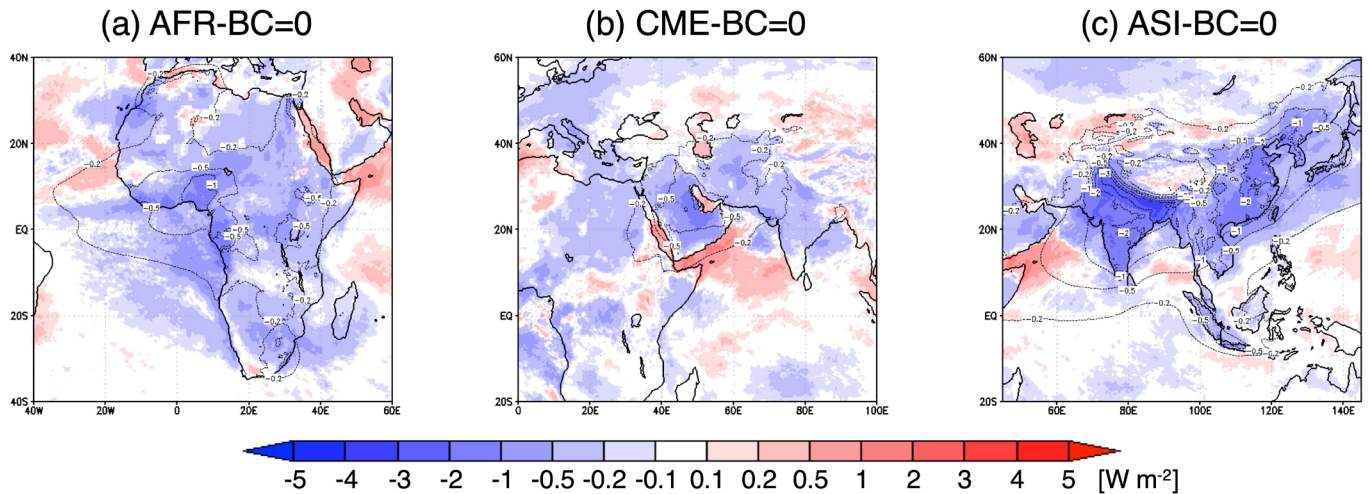


Fig. 1 異なる 3 つの感度実験と標準実験との差によって得られた、大気上端での短波に関するエアロゾルと放射の相互作用の瞬時放射強制力 (ARF) に関する年平均水平分布。(a) はアフリカ (AFR)、(b) は中東 (CME)、(c) はアジア (ASI) における人為起源 BC 排出量をゼロにした感度実験と標準実験の差を示す。単位は全て $[\text{W m}^{-2}]$ である。また、点線は BC の鉛直積算量変化 $[\text{g m}^{-2}]$ を示す。

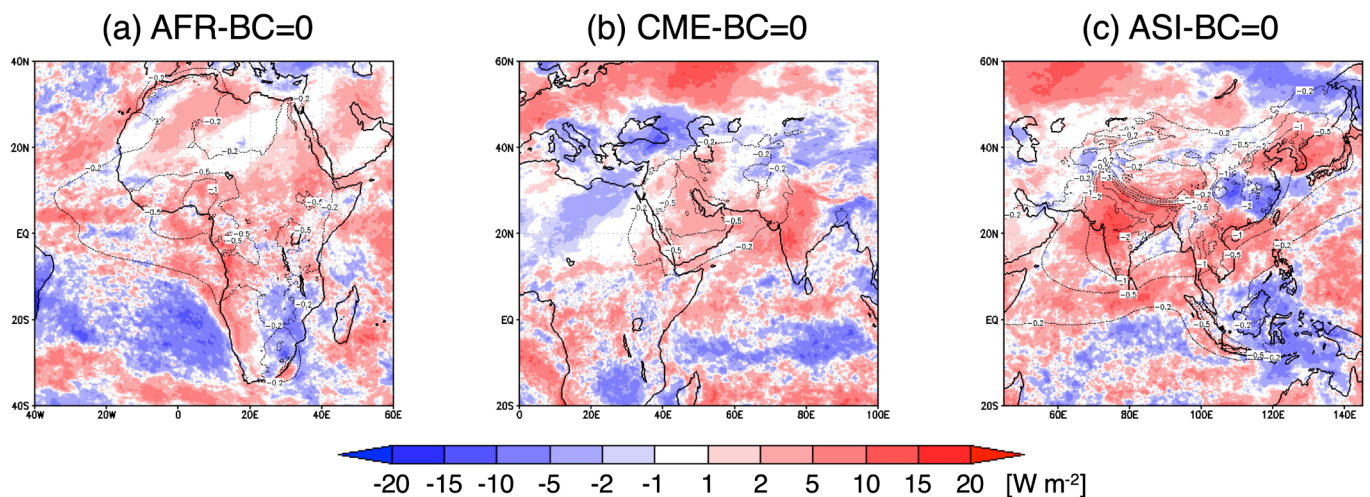


Fig. 2 Fig. 1 と同じだが、全天での下向き短波放射フラックス (日射量) に関する年平均水平分布

4. まとめと今後の展望

全球 14 km 分解能の NICAM-Chem を用いて、BC 排出量をアフリカ・中東・アジア領域および全球でゼロに設定したシミュレーションを実施した。特にアジアでは、人為起源 BC 排出量削減によって、雲-降水システムが大きく影響され、日射量の変化に地域的な差が生じることがわかった。従って、アジアではさらに詳細な区分 (中国、インド、その他のアジア等) によるエアロゾル削減効果を見る必要があり、今後はアジア域における人為起源エアロゾル関連物質の排出量削減シナリオの違いによる雲・降水場への影響評価を追究したい。

参考文献

- (1) Tomita H., 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. Seiki, K. Suzuki, H. Yashiro, T. Takemura, 2024: Geosci. Model Dev., 17(2), 651-684
- (6) Tomita, H., 2008: J. Meteorol. Soc. Jpn., 86A, 121-142

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

Intercomparison between ocean general circulation models developed in Atmosphere and Ocean Research Institute and Meteorological Research Institute

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
平原 翔二, 気象研, E-mail: s_hirahara(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
Shoji Hirahara, 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2つの潮汐混合パラメタリゼーションを導入し、底層循環の再現性への影響を調査した。COCOにて開発されたKawasaki et al. (2021)はCMIP6で利用した経験的な鉛直拡散係数と同程度の底層循環を再現することがわかった。

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」と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。MRI.COMでは海洋大循環モデリングにとって重要なパラメータの1つである鉛直拡散係数について大きな変更を予定している。CMIP6では観測結果にフィッティングされた、海底粗度に依存する経験式に基づく3次元空間分布(Decloedt and Luther, 2010; 以後DL10)を利用していた。一方で国際的には内部潮汐の散逸に基づくパラメタリゼーションの利用が多い。昨今では潮汐混合を精緻に表現しようとするスキーム(de Lavergne et al., 2020; 以後dL20)や、COCOにて開発された太平洋子午面循環強度の再現性を重視するスキーム(Kawasaki et al., 2021; 以後Ka21)が提唱されてきている。MRI.COMには上記2つのスキームが実装されており、その比較が可能である。

2. 問題設定・方法

CMIP7向けに開発した気象研究所の全球海洋モデルGONDOLA_100を用い、鉛直拡散係数の違いが大循環場に与える影響を定量的に評価する。係数にDL10, dL20, Ka21の3種類をそれぞれ適用した3つの感度実験を実施する。それ以外の設定は気象研究所のCMIP7向け暫定仕様とする。CMIP6仕様からの大きな変更点は以下のとおり。等密度面拡散スキームにShao et al. (2020)とMarques et al. (2023)を利用、層厚拡散スキームにFerrari et al. (2010)を利用し、係数にGriffies et al. (2005)の式を適用(50–1200 m^2/s)、海水を可変塩分(Toyoda et al., 2024)とし、Mackie et al. (2020)に基づくグリースアイススキームを利用する。大気外力にはJRA55-do v1.5(Tsujino et al., 2018)に基づくRepeat Year Forcing 1990/1991(Stewart et al., 2020)を利用し、海底熱源にLucazeau (2019)を与え、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1800年の時間積分を実施した。最後の50年平均の結果を解析対象とする。

3. 結果と考察

2000m基準の等密度座標上で計算したインド-太平洋子午面流線関数の50年平均を図1に示す。30°Sでの底層水北上流量はKa21実験で8.3 Sv、dL20実験で6.0 Sv、DL10実験で8.7 Svである。CMIP7暫定仕様であるKa21はCMIP6で用いたDL10よりも底層水北上流量を弱く表現するが、その差は0.4 Sv程であり、同程度の再現性を持つと考えてよい。dL20を利用した場合は他の2実験に比べて底層水北上流量が25%以上も弱化する結果となった。一般に気候研究で用いられる海洋モデルでの底層循環強度は観測に基づく見積もりを大きく下回る傾向にあることが知られている(e.g., Tsujino et al., 2020)。dL20実験が最も弱い底層循環を再現したことは、潮汐混合のプロセスを精緻にパラメタライズすることが必ずしも数値モデルの底層循環の再現性向上に直結しないことを示しており、同時に、現実的な海洋底層循環の再現が未だに困難な課題であり続けていることを示唆している。

4. まとめと今後の展望

COCOで開発されたKa21はMRI.COMがCMIP6で利用したDL10と同程度の底層循環強度を示すことがわかった。潮汐混合プロセスをより精緻に表現しようとするdL21は再現性が低下することがわかった。これらの結論からKa20をCMIP7仕様とする決定をした。今回の感度実験で再現された底層循環は、DL10実験ではその大部分がインド-太平洋内で湧昇する構造を示す一方で、

Ka21 や dL20 は深層で南大洋に戻る構造を示した。今後は水塊変質解析を通して数値モデルでの 3 次元底層循環場を定量的に調査し、鉛直拡散係数分布との関連性を明らかにしたい。

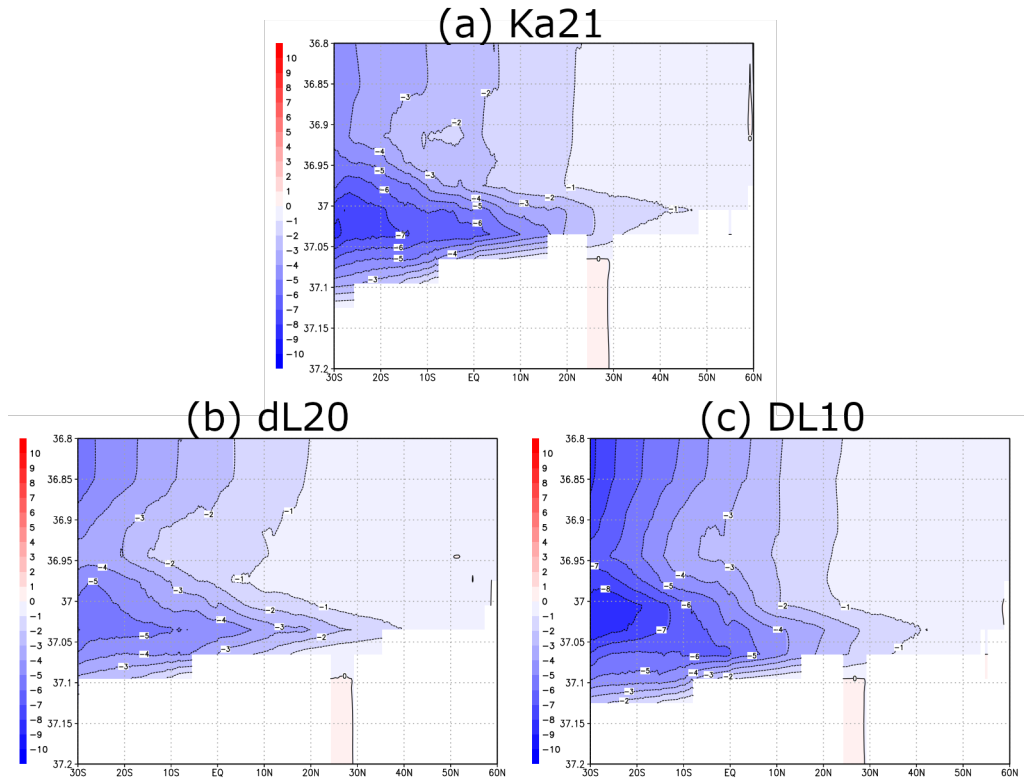


Fig. 1 Meridional overturning streamfunction in the Indo-Pacific Ocean in the units of [Sv] (a) for the exp. Ka21, (b) for the exp. dL20 and (c) for the exp. DL10. Positive for clockwise. Climatological averages for the last 50 years.

参考文献

- (1) Decloedt, T., and D. S. Luther, 2010: On a simple empirical parameterization of topography-catalyzed diapycnal mixing in the abyssal ocean. *J. Phys. Oceanogr.*, 40, 487–508.
- (2) de Lavergne, C., et al., 2020: A parameterization of local and remote tidal mixing, *J. Adv. Model. Earth Syst.*, 12, e2020MS002065.
- (3) Kawasaki, T., H. Hasumi, and Y. Tanaka, 2021: Role of tide-induced vertical mixing in the deep Pacific Ocean circulation, 77, 173–184.
- (4) Shao, A. E., A. Adcroft, R. Hallberg, and S. M. Griffies, 2020: A general-coordinate, nonlocal neutral diffusion operator, *J. Adv. Model. Earth Syst.*, 12, e2019MS001992.
- (5) Marques, G. M., et al., 2023: Representing eddy diffusion in the surface boundary layer of ocean models with general vertical coordinates, *J. Adv. Model. Earth Syst.*, 15, e2023MS003751.
- (6) Ferrari, R., S. M. Griffies, A. J. G. Nurser, and G. K. Vallis, 2010: A boundary-value problem for the parameterized mesoscale eddy transport, *Ocean Modelling*, 32, 143–156.
- (7) Griffies, S. M., et al., 2005: Formulation of an ocean model for global climate simulations, *Ocean Science*, 1, 45–79.
- (8) Toyoda, T., et al., 2024: Improvement of sea ice thermodynamics with variable sea ice salinity and melt pond parameterization in an OGCM, *Ocean Modelling*, 187, 102288.
- (9) Mackie, S., et al., 2020: Sea ice formation in a coupled climate model including grease ice. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 12, e2020MS002103.
- (10) Tsujino, H., et al., 2018: JRA-55 based surface dataset for driving ocean-sea-ice models (JRA55-do), *Ocean Modelling*, 130, 79–139.
- (11) Stewart, K. D., et al., 2020: JRA55-do-based repeat year forcing datasets for driving ocean-sea-ice models, *Ocean Modelling*, 147, 101557.
- (12) Lucazeau, F., 2019: Analysis and mapping of an updated terrestrial heat flow data set, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 20, 4001–4024.
- (13) Tsujino, H., et al., 2020: Evaluation of global ocean-sea-ice model simulations based on the experimental protocols of the Ocean Model Intercomparison Project phase 2 (OMIP-2), *Geosci. Model Dev.*, 13, 3643–3708.

領域高解像モデルを用いた雲・エアロゾル・大気化学に関する素過程研究

Fundamental study of clouds, aerosol, and atmospheric chemistry by a high-resolution regional model.

佐藤 陽祐, 阪大・工学研究科, E-mail: yousuke.sato@civil.eng.osaka-u.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

齋藤 尚子, 千葉大・CEReS, E-mail: nsaitoh@faculty.chiba-u.jp

平尾 茂一, 福島大・環境放射能研, E-mail: s-hirao@ipc.fukushima-u.ac.jp

川添 祥, 電力中央研究所, E-mail: kawazoe40610@criepi.denken.or.jp

近藤 誠, 北大・理学院, E-mail: konchasu56@eis.hokudai.ac.jp

山田 雄斗, 北大・理学院, yamada.yuto.r7@elms.hokudai.ac.jp

浅井 颯馬, 北大・理学院, asai.soma.n6@elms.hokudai.ac.jp

Yousuke Sato, Graduate School of Engineering, Osaka University

Masaru Inatsu, Faculty of Science, Hokkaido University

Masaki Ishiwatari, Faculty of Science, Hokkaido University

Naoko Saitoh, Center for Environmental Remote Sensing, Chiba University

Shigekazu Hirao, Institute of Environmental Radioactivity Radioisotope Geoscience Division,
Fukushima University

Sho Kawazoe, Central Research Institute of Electric Power Industry

Makoto Kondo, Graduate School of Science, Hokkaido University

Yuto Yamada, Graduate School of Science, Hokkaido University

Soma Asai, Graduate School of Science, Hokkaido University

要旨

本研究では領域高解像モデル SCALE を用いた大気科学に関する研究一環として、SCALE に実装された二酸化炭素 (CO₂) および Rn-222 を計算するコンポーネントを結合した数値実験を行い、観測との比較を通して、SCALE の検証を実施した。同時に、数値モデルを用いた基盤的な研究として、高速な線型ソルバーの開発、惑星に関する数値実験、エアロゾル輸送モデルと SCALE を結合した数値実験などを実施した。これらを通して、数値モデルを用いた研究基盤の構築につながる知見を得ることができた。

1. はじめに

大気中に存在する雲、エアロゾル、微量気体といった物質は、気候システムを構成する重要な要素であり、それらの変動が気候変動の要因となっている。そのため、気候予測に用いられる気候モデルにおいても、それらを直接的に扱い、その変動が気候システムに与える影響を直接計算することで気候変動を再現する。これらの気候モデルによるシミュレーションは気候変動予測の分野で大きな貢献をしてきたことは疑いの余地はないが、気候モデルの空間解像度は数十 km から数百 km と粗いため、都市からメソスケールの現象を十分に表現することはできない。そのため、それらの現象を表現するためには領域気象モデルを用いた力学的ダウンスケーリングが用いられる。このような領域気象モデルを用いることで、都市スケールからメソスケールの現象を表現することが可能になるが、計算資源の制約や、領域気象モデルを取り扱う研究者の興味などから、エアロゾル、微量気体を直接扱った領域気象モデルによる計算例は限られる。この傾向は我が国のコミュニティにおいてはその傾向が特に顕著である。これは、雲、エアロゾル、微量気体を直接扱うことができる領域気象モデルが我が国には存在していないことが一つの原因であり、雲、エアロゾルや微量気体を直接取り扱うことができる領域気象モデルの開発が求められている。そのような背景から、本研究では 2023 年度から我が国で開発されてきた領域気象モデル Scalable Computing for Advanced Library and Environment (SCALE: Nishizawa et al. 2015, Sato et al. 2015) に雲、エアロゾル、微量気体を扱える素過程のコンポーネントの実装をすると共に、数値実験全般の基盤となる基礎的な開発や数値実験を実施している。2023 年度は雲の素過程モデルに着目した開発やそれを用いた数値実験に取り組んだが、2024 年度は微量気体やエアロゾルに関する開発やそれを用いた実験を実施した。

2. 方法

本研究で利用した数値モデルは理化学研究所で開発されている SCALE である。本年度はこの SCALE に大気中の微量気体である CO₂ とラドン (Rn-222) を扱うコンポーネントの実装を行うことで、それらの気体を直接扱うことができるように開発を行った。また開発を施した SCALE を用いて数値実験を実施し、観測との比較を通して、モデルの検証を行った。これらの開発は別プロジェクトと並行で実施しており、CO₂ のコンポーネントを用いた実験と、CO₂ 濃度を対象とした検証については、主に別プロジェクトによって実施されているため、本報告書では Rn-222 を対象とした計算とその検証結果について記載する。

用いたモデルは SCALE の version 5.4.5 で、このバージョンに Rn-222 を取り扱うコンポーネントを Hirao et al. (2008) を参考に実装した。Rn-222 に関する予報変数は Rn-222 とその壊変生成物である Po-218, Pb-214, Bi-214, Pb-210 の全質量に対する質量比であり、取り込んだ物理過程は、「地表面からの Rn-222 の放出」「放射性壊変」「乾性沈着」「湿性沈着」である。このうち、Rn-222 は気体であるため、乾性沈着、湿性沈着の効果は扱わず、地表面からの放出と放射性壊変のみを扱うように実装した。また地表面からの Rn-222 の放出は、陸上では Schery and Whittlestone (1989) の放出データベースを用い、海上は固定値

(0.16 mBq/m²/s) を用いた。また計算結果を検証するためのデータとして八丈島と波照間島で観測された Rn-222 の観測データ (Moriizumi et al. 2008) のデータを用いた。計算期間は 2007/12/15 の 18UTC から 2008/1/14 12UTC とし、モデルの水平解像度は 40 km、鉛直層数は 36 層とした。これらの解像度は、必ずしも本研究の目的とした領域スケールの計算としては十分な解像度ではないが、モデル開発と検証の第 1 歩としてこの解像度を用いた。SCALE のその他の設定については、SCALE のチュートリアル (<https://scale.riken.jp/>に詳細は記載) と同様のものとし、初期境界値は、気象場については NCEP-FNL、Rn-222 については全球雲解像モデル NICAM の出力値 (Ishijima et al. 2018) を用いた。

3. 結果および本年度の実施事項

図 1 は計算された Rn-222 と観測された Rn-222 の比較結果である。モデルは高濃度 (3 Bq/m³ 以上のイベントと定義) の Rn-222 が観測された 14 のイベントのうち、12 イベントを再現していた。また絶対値のモデルと観測との差は Factor 2~4 の範囲内であった。高濃度イベントを再現できなかった 2 回のイベントは風向の再現性が高くなかったことに起因しており、この原因は主に与えた気象場である NCEP-FNL の再現性の低さに起因していた (図は非表示)。以上から、SCALE は、気象場が再現できれば Rn-222 をよく再現できることが明らかにできた。Rn-222 は希ガスであり、大気における安定したトレーサーとしてよく用いられるが、その Rn-222 を再現できたことで、SCALE は概ねよく輸送の計算を実施できていることを明らかにできたと考えられる。

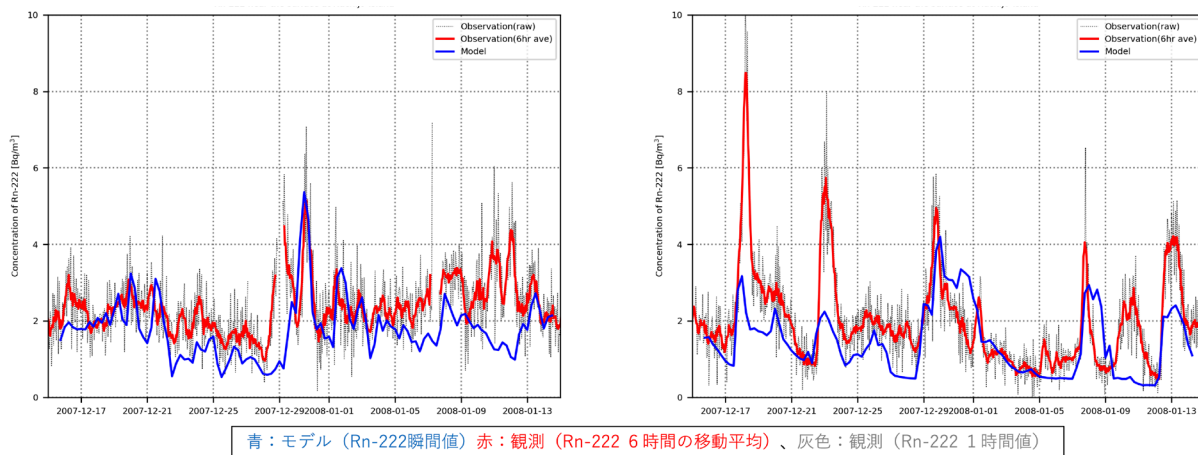


Fig. 1 Time series of Rn-222 concentration near the surface at (left) Hachijo Island and (right) Hateruma Island during calculation period. The blue, red, and grey line indicates results of simulation, 6-hour average of measured value, and 1-hour moving average of measured value.

本年度は、上記だけでなく、数値モデルを用いた実験に関わる基盤的な開発や数値実験として、多重合法に基づく線型ソルバーの開発、エアロゾル輸送モデルを結合した数値実験と検証、大気海洋海水結合モデルを用いた全球凍結、部分凍結、氷無し平衡、暴走温室それぞれの状態に必要な太陽定数範囲を同定することを目指したモデルの整備を実施した。

4. まとめ

本研究では雲、エアロゾル、微量気体といった物質を直接扱うことができ、高解像度での計算が可能な領域気象モデルの開発をはじめとした、数値モデルによる研究を実施するための基盤的な開発や研究を実施した。本年度は主に Rn-222 を用いた計算結果について検証を実施した。なお本研究における開発や数値実験は、研究代表者が参画している他のプロジェクトとの協働によって行われており、本報告書で記載されていない成果については、それらのプロジェクトの報告書を参考にされたい。

参考文献

- (1) Nishizawa et al., 2015: Influence of grid aspect ratio on planetary boundary layer turbulence in large-eddy simulations. *Geosci Model Dev*, 8, 3393–3419
- (2) Sato et al., 2015: Impacts of cloud microphysics on trade wind cumulus: which cloud microphysics processes contribute to the diversity in a large eddy simulation? *Prog Earth Planet Sci*, 2, 23, doi:10.1186/s40645-015-0053-6.
- (3) Hirao et al. 2008: Development and Verification of Long-Range Atmospheric Radon-222 Transport Model, *J. Nucl. Sci. Tech.*, 45, 116–172
- (4) Schery and Whittlestone: 1989: Desorption of radon at the Earth's surface, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 94, 18297–18303
- (5) Moriizumi et al. 2008: Continuous Observation of Atmospheric ²²²Rn Concentrations for Analytic Basis of Atmospheric Transport in East Asia, *J. Nucl. Sci. Tech.*, 45, 173–179.
- (6) Ishijima et al. 2018: Analysis of high radon-222 concentration events using multi-horizontal-resolution NICAM simulations, *SOLA*, 14, 111–115.

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

氷期から間氷期にかけて、大気中の二酸化炭素濃度 ($p\text{CO}_2^{\text{atm}}$) は約 80 ppm 上昇した。この変化は主に、海洋からの CO_2 放出に起因すると考えられている。本研究では、気候モデルに基づく数値実験の出力を用いて、二つの異なる退氷期 (Termination 1 および Termination 2) における海洋炭素循環の変化を対象とした数値実験を実施した。計算された $p\text{CO}_2^{\text{atm}}$ の変化は氷床コアの記録と比較され、また炭素同位体比に関するモデル出力は、海底堆積物コアに基づく記録と照合した。これにより、モデルと観測データとの相違点や、それらの背景にあるプロセスについての評価を行った。

数値実験の結果、最終退氷期 (T1) の前半では、海洋ベンチレーションの強化や表層における生物生産の制限の緩和が、 $p\text{CO}_2^{\text{atm}}$ の上昇をもたらしたことが示唆された。また、T1 中盤以降に見られる大西洋子午面循環の急激な変化に伴う $p\text{CO}_2^{\text{atm}}$ の応答は、海面水温、溶存無機炭素、アルカリ度の変化が複合的に寄与し、それぞれの効果が部分的に相殺し合うことで、 $p\text{CO}_2^{\text{atm}}$ の正味の変化量は比較的小さいことが示された。一つ前の氷期に対応する退氷期 (T2) については、実験の途中段階ではあるものの、現時点の結果からは、水温上昇が $p\text{CO}_2^{\text{atm}}$ の増加を主に支配している傾向が示されている。

1. はじめに

後期更新世における周期的な気候変動 (氷期・間氷期サイクル) に伴い、大気中の二酸化炭素濃度 ($p\text{CO}_2^{\text{atm}}$) は約 80 ppm の振幅で周期的に変動していた。この温室効果ガスの変化は、日射量の緩やかな変化に対する気候システムの応答として捉えられており、その主因は海洋の炭素貯留量の変化であると考えられている。特に、氷期から間氷期への移行期 (退氷期) には、大西洋子午面循環 (AMOC) の変化と、それに伴う半球間の気候変動が、海洋から大気への CO_2 放出に関与した可能性が指摘されている。しかし、退氷期における海洋炭素循環の変動要因と、それが $p\text{CO}_2^{\text{atm}}$ に与えた影響については、依然として理解が不十分である。筆者らはこれまでに、海洋大循環モデルを用いて最終氷期最盛期 (LGM) の数値実験を行い、海底堆積物コア記録から復元された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)。しかしながら、計算資源の制約により、これまでの研究は氷期気候条件下における定常状態の応答に議論が限定されてきた。

2. 問題設定・方法

海洋炭素循環を構成するプロセスは、海面での比較的速度やかなガス交換、生物ポンプ、海洋深層循環、さらに海底での炭酸塩の堆積と溶解といった、広範な空間・時間スケールにまたがっており、気候変動に対して一様には応答しない。したがって、氷期から間氷期への移行期において、それらのプロセスが時間とともにどのように変化し、 $p\text{CO}_2^{\text{atm}}$ に影響を与えたのかを明らかにするには、時間発展を考慮した過渡応答を調べる必要がある。

本研究では、気候モデル MIROC 4m を用いて行われた退氷期実験に基づき、海洋大循環モデルおよび生物地球化学トレーサーモデルを用いて、約 1 万年にわたる海洋炭素循環の数値実験を行う。数値実験は、最終氷期極大期 (LGM) を代表する気候条件で初期化し、軌道日射量と淡水強制力を変化させて、最終退氷期 (2 万 1 千年前から 1 万 1 千年前; Termination 1: T1) ならびにひとつ前の退氷期 (13 万 9 千年前から 12 万 5 千年前; Termination 2: T2) を対象とする。さらに、その結果を海底堆積物コアや氷床コア記録に基づく古環境復元と比較することで、海洋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したのかを定量的に明らかにすることを目的とする。

3. 結果と考察

前年度までに、T1 実験の実施および解析を行った。その結果、退氷期の前半では水温の上昇が $p\text{CO}_2^{\text{atm}}$ の上昇を主に支配しているのに対し、中盤以降では AMOC の変化に伴う水温、DIC、アルカリ度の変化が互いに打ち消し合い、 $p\text{CO}_2^{\text{atm}}$ の時間変化をもたらすことを明らかにした (Kobayashi et al., 2024)。さらに、海洋物質循環モデルに対して海洋物理場の強制力を差し替える感度実験を追加で実施した。その結果、退氷期における $p\text{CO}_2^{\text{atm}}$ の変化は、背景の鉛直拡散係数の変化に対して敏感に応答することが明らかとなった。なお、このような強制力の差し替えは、ある意味で恣意的な変化を与えているとも解釈できることから、今後は実際の海洋環境における現実的な過程に基づいたパラメタ化の導入を検討する必要がある。

T2 実験に先立ち、異なる間氷期である完新世 (1 万 1 千年前) と最終間氷期 (Last Interglacial, LIG: 12 万 7 千年前) における準平衡状態の比較したところ、LIG の方が完新世よりも高い $p\text{CO}_2^{\text{atm}}$ を示すことが確認された。この差異は、LIG における AMOC の強化に起因すると考えられる。海水中の DIC の分布形成要因を解析した結果、AMOC の強化は深海における炭素の滞留時間を短縮させ、生物ポンプの効率を弱めることで、比較的高い $p\text{CO}_2^{\text{atm}}$ をもたらすことが示唆された (Fig.1)。

この比較を踏まえ、T2 期を対象とした数値実験の積分を開始した。南極氷床コア記録によれば、T2 期間中の $p\text{CO}_2^{\text{atm}}$ は、T1 とは異なり一時的な停滞や低下を伴わず、約 190 ppm から約 260 ppm へとほぼ線形に上昇している (Fig.2)。このような

特徴は、T1における Bølling–Allerød や Younger Dryas に対応する気候の急変が T2 には存在しないことも一致しており、南北半球間の非同期的な気候応答がより抑制されていた可能性が指摘されている。T2 実験の積分は完了していないものの、現時点までの結果からは、T1 とは対照的に、退氷期にわたって $p\text{CO}_2^{\text{atm}}$ が線形に増加する様子が再現されている。さらに、この $p\text{CO}_2^{\text{atm}}$ の変化をもたらす海洋表層における二酸化炭素分圧の変動要因を時間的に解析した。その結果、T2 期間中の $p\text{CO}_2^{\text{atm}}$ の増加は、主に水温上昇によって説明されることが示された。

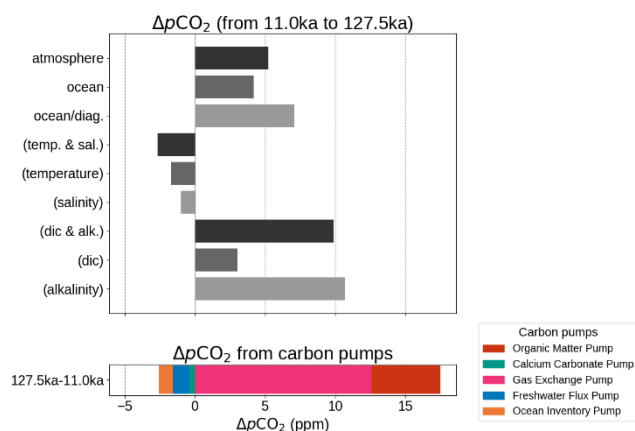


Fig.1 Changes in $p\text{CO}_2^{\text{atm}}$ between the Holocene (11,000 years ago) and the Last Interglacial (LIG: 127,500 years ago), and decomposition of the contributing factors.

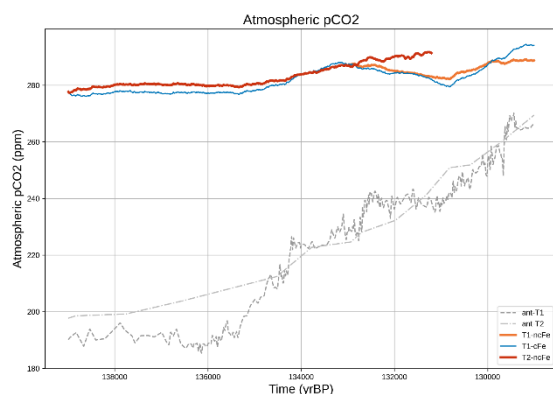


Fig.2 Deglacial changes in $p\text{CO}_2^{\text{atm}}$ (ppm; solid line) with ice core data (dashed line). Orange: T1 exp. (no iron flux change), Blue: T1 exp. (with iron flux change), Red: T2 exp. (without iron flux change)

4. まとめと今後の展望

退氷期に着目し、海洋大循環モデルおよび生物地球化学トレーサーモデルを用いた数値実験により、 $p\text{CO}_2^{\text{atm}}$ の変化メカニズムを検討した。T1 実験では、退氷期中盤以降における AMOC の変化に伴う水温、DIC、アルカリ度の変化が複合的に寄与することが、 $p\text{CO}_2^{\text{atm}}$ の時間変化を特徴づける要因であることが明らかとなった。一方、T2 実験では、現時点までの結果から、T1 とは異なり、退氷期を通じて $p\text{CO}_2^{\text{atm}}$ が線形に増加する傾向が再現されており、その主因として水温上昇が示唆されている。今後は、T2 実験の積分をさらに進め、 $p\text{CO}_2^{\text{atm}}$ の時間変化を構成する各要因を定量的に切り分けて解析する。また、海洋循環の変化のみならず、海洋と陸域、堆積物との間の物質交換が $p\text{CO}_2^{\text{atm}}$ に与える影響についても統合的に評価することで、退氷期にわたる大気中二酸化炭素の変動に対する海洋の役割の理解をさらに深化させたい。

この目的に向けて、堆積物モデルの高解像度化を進めるとともに、海洋生態系モデルの高度化も進めており、鉄循環モデルの異なる鉄供給源の導入、可変化学量論比、植物プランクトンの競合表現、有機物分解における温度依存性の導入といった改良を進行中である。観測的知見との比較を通じて、必要に応じた導入を図る方針である。あわせて、陸域の植生炭素貯留を扱う診断モデルとの連携を通じて、陸空海の炭素循環の統合的な理解を目指す。

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) 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*, 20, 769-787.

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: thib001@kaiyodai.ac.jp

永井 平, 水産研究・教育機構, E-mail: nagaitaira@affrc.go.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
Taira Nagai, Japan Fisheries Research and Education Agency
Takashi Ijichi, Graduate School of Science, The University of Tokyo

要旨

深海の凹凸海底地形上を通過する潮汐流によって励起される内部風下波が形成する乱流混合ホットスポットの鉛直分布を調べた。一連の数値実験の結果、乱流混合ホットスポットの鉛直分布は、海底地形の高さをスケールする **Steepness** パラメータに強く依存することが明らかになった。すなわち、**Steepness** パラメータが小さい場合には、内部風下波と背景内部波場との非線形相互作用が強く働くことで、「背の高い乱流混合ホットスポット」が形成されるのに対し、**Steepness** パラメータが大きい場合には、内部風下波エネルギーの大部分が、海底地形直上に形成される慣性流によるドップラー効果を受けて吸収されることで、「背の低い乱流混合ホットスポット」が形成されることがわかった。

1. はじめに

海洋深層における鉛直乱流混合は、熱や物質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。緯度 20° – 30° に存在する海嶺や海山などの海底地形と強い潮汐流との相互作用によって励起された鉛直低波数の内部潮汐波は、海底地形から離れて水平伝播していく途上で、非線形相互干渉を通じて鉛直高波数の近慣性流シアを励起し、周囲の高波数の内部波を捕捉・砕波させる (Far-field Mixing)。一方、海底地形の近傍に残された鉛直高波数の内部波の方は、背景に存在する Garrett-Munk (GM) 内部波場との非線形相互干渉を通じて、鉛直上方に乱流混合域を形成していく (Near-field Mixing)。

従来、この海底地形の近傍における内部波は、鉛直高波数の「内部潮汐波」であると考えられてきた。しかしながら、報告者らの最近の研究 (Hibiya 2022; He and Hibiya 2024; Hibiya et al. 2024) によれば、解像度を上げて高波数の海底凹凸地形の存在も考慮すると、Tidal Excursion パラメータ; $T_e = k_H U_0 / \Omega$ (k_H : 海底地形の水平波数, U_0 : 潮汐流の振幅, Ω : 潮汐周波数) でスケールされる潮流の移流効果が支配的となり、準定常な「内部風下波」の生成が卓越するようになってくる。この内部風下波は、内部潮汐波と比べて鉛直群速度がきわめて大きくなるため、海底凹凸地形上で励起される Near-field Mixing の強度や鉛直分布も、従来考えられてきたものと比べて著しく異なってくる可能性がある。

本研究では、特に、**Steepness** パラメータ $S_p = Nh_0/U_0$ (N : 浮力周波数, h_0 : 海底地形の振幅) でスケールされる海底凹凸地形の振幅が Near-field Mixing の鉛直分布に及ぼす影響を明らかにするため、一連の数値実験を行った。

2. 数値モデルと実験設定

数値実験は MITgcm を用い、非静水圧の条件下で行った。水深 4 km, 周期境界を仮定した幅 30 km の鉛直 2 次元海洋の底面に波数 $k_H = 1/2000$ cpm, 振幅 h_0 の正弦波型の海底地形を与えた。慣性周波数は $f = 1/24$ cph (緯度 30°)、浮力周波数は $N = 1.5$ cph (一様成層) を仮定し、準定常な GM 内部波場を初期条件として組み込むとともに、外力として振幅 U_0 の半日周潮流 ($\Omega = 1/12$ cph) を加えて、20 潮汐周期間計算した。海底地形から上向きに射出されるエネルギーフラックス $E_f \sim \rho N k_H h_0^2 U_0^2 / 4E$ (ρ : 海水の密度) が一定に保たれるように T_e と S_p を調節しながら、 S_p を様々に変化させ ($0.09 \leq S_p \leq 0.79$)、海底凹凸地形上に形成される Near-field Mixing の鉛直分布を調べた。さらに、Near-field Mixing の鉛直分布を決定する要因を明らかにするために、GM 内部波場を除いた実験も行った。

3. 結果と考察

数値実験の結果、 T_e が大きく内部風下波が励起される場合には、Near-field Mixing の鉛直分布は、 S_p に強く依存することがわかった。具体的には、海底凹凸地形の振幅が小さい ($S_p < 0.2$) 場合には、GM 内部波場との相互作用により鉛直減衰の小さな「背の高い乱流混合ホットスポット」が形成されるのに対し、海底凹凸地形の振幅が大きくなる ($S_p \geq 0.2$) と、鉛直減衰の大きな「背の低い乱流混合ホットスポット」に遷移していく様子が得られた (図 1)。さらに、 S_p が増加し、海底凹凸地形の振幅が大きくなるにつれて、海底上約 150 m を中心に慣性流が時間とともに強化され (図 2)、この慣性流の増幅に伴って「背の低い乱流混合ホットスポット」が形成されることもわかった。

次に、 S_p が大きい場合の慣性流の増幅機構を調べた。鉛直伝播する内部風下波の水平位相速度と慣性流シアの方向が一致する際には、図 3(右)のように、内部風下波は鉛直波数が増加、鉛直群速度が減少するようにドップラー効果を受け

る。その結果、内部風下波が、その運動量を慣性流に受け渡し、慣性流を加速させていく。実際、詳細なエネルギー解析を行ってみると、鉛直上方に伝播していく内部風下波エネルギーの相当部分がこの慣性流の強化に使われてしまい、海底から 600 m 以上に到達する内部風下波のエネルギーは著しく小さくなってしまふことが示された。一方、鉛直伝播する内部風下波の水平位相速度と慣性流シアの方向が逆向きになる際には、このような慣性流の強化は生じない (図 3 左)。このため、慣性流の強化は間欠的に生じることになる。

以上の結果、 S_p が小さい場合 ($S_p < 0.2$) には、海底近傍での乱流混合はあまり減衰せず、海底から離れたところでも強い乱流混合を引き起こすが、 S_p が大きい場合 ($S_p \geq 0.2$) の乱流混合は、海底近傍では強くなるものの 海底 600 m 以上では極めて弱くなってしまふというトレードオフの関係が確認されることになる。なお、このような S_p 依存性は、南極周極流によって形成される Near-field 混合を対象とした近年の観測および数値実験結果とも整合的である (Sheen et al. 2013; He and Hibiya 2024)。

4. まとめと今後の展望

海底地形データの解像度が低い現状では、Tidal Excursion パラメータ T_e の値が小さいため、本研究で示されたような内部風下波の砕波による Near-field Mixing の生成機構は見逃されてきた。しかしながら、特に $T_e \gg 1$, Steepness パラメータ $S_p < 0.2$ の場合に形成される「背の高い乱流混合ホットスポット」は、深層海洋大循環を効率的に駆動する主密度躍層付近の乱流混合を著しく強化する可能性がある。今後、これまで見逃されてきた乱流混合ホットスポットの有力候補、例えば海嶺や海山の山頂付近を対象として、高解像度の海底凹凸地形の情報を把握した上で、乱流観測やその数値シミュレーションを実施していくことが、海洋物理学に長く残されてきた「Missing Mixing 問題」の解決に大きく貢献するものと期待される。

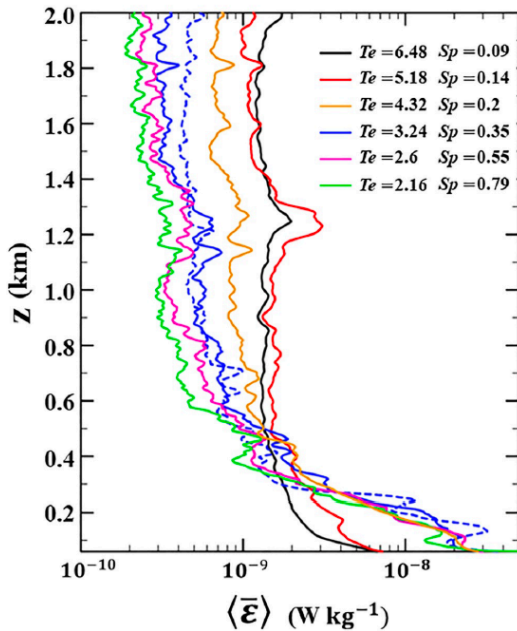


図 1: 乱流エネルギー散逸率の鉛直分布の S_p 依存性。

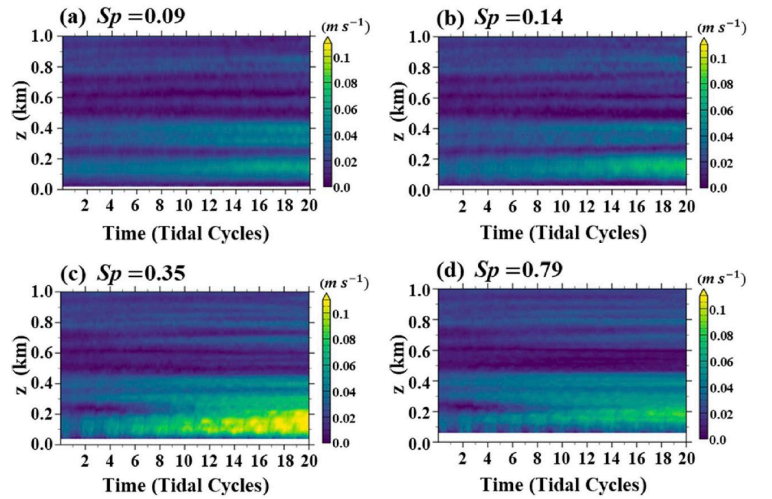


図 2: 慣性流の振幅の時間発展の S_p 依存性。

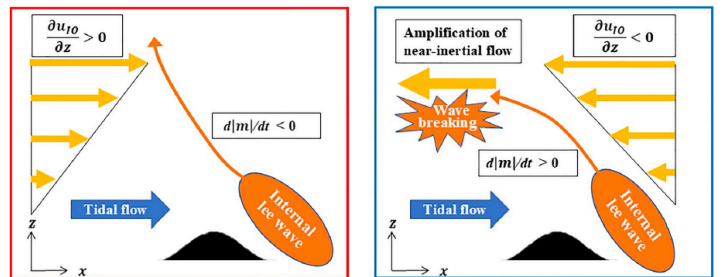


図 3: 内部風下波と慣性流シアの相互作用によって慣性流が間欠的に増幅されていく機構を表す模式図。

参考文献

- He, Y., and T. Hibiya, 2024: The vertical structure of internal lee wave-driven benthic mixing hotspots. *J. Phys. Oceanogr.*, **54**, 253–263.
- Hibiya, T., 2022: A new parameterization of turbulent mixing enhanced over rough seafloor topography. *Geophys. Res. Lett.*, **49**, e2021GL096067.
- Hibiya, T., Y. Tanaka, T. Nagai, and Y. Hirano, 2024: Revisiting tide-induced near-field mixing in the abyssal ocean. *Geophys. Res. Lett.*, **51**, e2024GL111217.
- Sheen, K. L., and Coauthors, 2013: Rates and mechanisms of turbulent dissipation and mixing in the Southern Ocean: Results from the diapycnal and isopycnal mixing experiment in the Southern Ocean (DIMES). *J. Geophys. Res. Oceans*, **118**, 2774–2792.

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
Masafumi Ohashi, Graduate School of Science and Engineering, Kagoshima University

要旨

今須教授らは、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に設置して計測を行っていた。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。FES-C、OSA による観測データを解析した二酸化炭素カラム量結果は、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。さらに、OCO-2、GOSAT に加え地上計測の Total Carbon Column Observing Network (TCCON)をデータ同化により再解析データと我々の観測データとの比較を行った。

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「CO₂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 (に) [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。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。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。

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

OCO-2、GOSAT に加え地上計測の Total Carbon Column Observing Network (TCCON)をデータ同化により再解析データが、GES DISC にて OCO-2 の 1 日ごとの二酸化炭素平均カラム量の再解析データ (OCO2_GEOS_L3CO2_DAY) [7]が公開されている。こ

のデータは、全球を緯度 361 点、経度 576 点に分割した 1 日分のデータのため、対象場所の値を得るためには、全球データから推定する必要があり、南鳥島の周囲 16 点（東側に 2 列、西側に 2 列、北側に 2 行、南側に 2 行の交点）の値から南鳥島の値を推定して図 1 に重ねた。二酸化炭素平均カラム量が多い 12 月から 5 月までは非常に一致していたが、6 月から 11 月の時期に差が見られ 9 月が最も大きな違いが見られた。二酸化炭素平均カラム量が中国の Xianhe、日本の佐賀、南鳥島では、Xianhe が最も高く、南鳥島は少なかった。以上のことから、アジア大陸の方から大気が流れてきた時期は、大陸の都市から排出される二酸化炭素からと思われる。次に、差の多い時期は南鳥島の周囲から流入しているため周囲の海面に二酸化炭素が取り込まれていると考えられる。

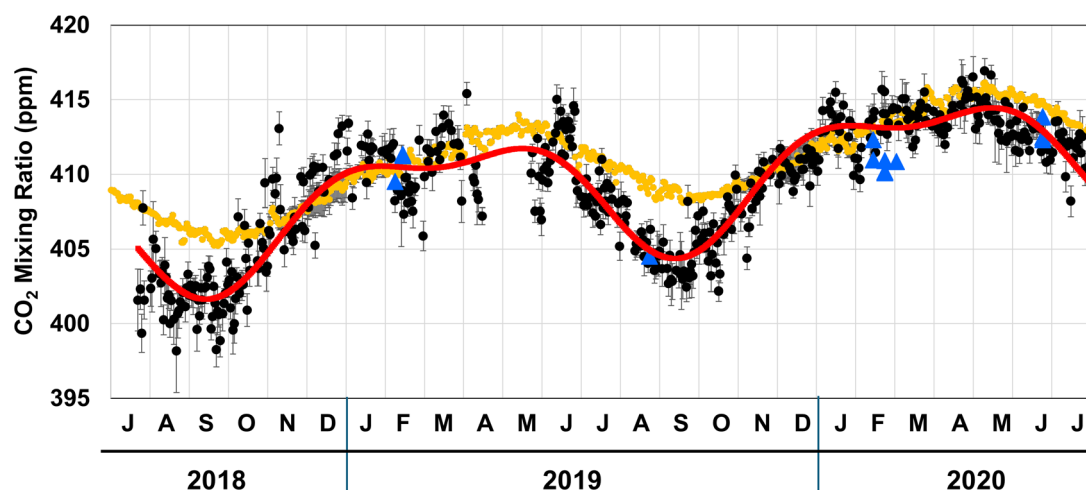


図 1 南鳥島の CO₂ 平均カラム量解析結果

●FES-C 補正值(SF 0.990), 赤線 Fitting 曲線, ▲GOSAT 観測値●OCO2 L3 の CO₂ 量

表 1 Fitting 関数の係数表

Site	Intercept (ppm)	Trend (ppm/y)	Amp ₁ (ppm)	Amp ₂ (ppm)	Max. Month	Min. Month	Ref.
Xianhe	401.4	1.88	3.90	1.76	4	9	[7]
佐賀	398.7	2.25	2.95	0.50	5	9	[7]
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 CO₂ スペクトルデータの変更によりこのような違いを得た。我々が二酸化炭素永金カラム量と GOSAT や OCO₂ などの衛星観測データとの比較を行うために OCO₂ L3 の再解析データとの比較を行った。また、大気の流れを把握するために南鳥島を基点とする流跡線解析を行った。OCO₂ L3 との差が大きな時期は、南鳥島周囲からの大気流入が関係しているため、二酸化炭素の海洋への吸収が関係していると思われるため、現在、二酸化炭素の変化について調査を進めている。また、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
- [2] <https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>
- [3] M. Inoue, et. al., "Validation of XCO₂ 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/>
- [7] https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets/OCO2_GEOS_L3CO2_DAY_10r/summary?keywords=OCO2_GEOS_L3CO2_DAY
- [8] <https://tccondata.org/>

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の精緻化に向けた基礎的な研究として、日本海の中緯度海洋環境における雨滴サイズ分布 (DSD) の特徴を調査した。調査には、日本海に位置する離島である舩倉島に設置されたディストロメータによって2年間にわたり収集された観測データを用いた。分析の結果、中緯度海洋域では主に2つのタイプのDSDの分布様式が存在することが明らかになった。それらは「大きな雨滴サイズ型 (D-type)」および「多い雨滴数密度型 (N-type)」である。D型とN型の降水は、それぞれ、与えられた降水強度に対して雨滴サイズが大きい、あるいは雨滴数密度が高いという特徴を持つ。衛星から得られる輝度温度による層別化の結果、N型は暖かい雨の過程に関連しており、一方でD型の降水は氷相過程を通じて発生していることが示された。さらに本研究は、衛星観測と地上観測データを統合することで、降水過程の全体像をよりよく理解するための新たな手法も提案している。

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な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。

本研究は、中緯度海洋域における降水の特徴を雨滴サイズ分布 (DSD) という観点から明らかにすることを目的としている。DSDは、降水粒子のサイズごとの分布を示す基本的なパラメータであり、気象レーダー観測や数値天気予報モデルにおける雲微物理過程の記述にも広く利用されている。従来の研究では、対流性/層状性、大陸性/海洋性といった分類に基づき、地域特有のDSDの違いが詳細に調査されてきた。例えば、海洋上の対流性降水は、同じ降水強度でも陸上よりも小さな平均粒径を持つ傾向がある。また大陸性降水は、海洋性に比べて平均雨滴径が大きく、DSDの切片パラメータが小さいことも知られている。近年では、DSDの全球的な多様性に注目が集まり、Dolan et al. (2018)は12の観測データセットを用いて、緯度帯ごとの代表的なDSDタイプを6つに分類している。しかしながら、こうした研究の多くは熱帯域や大陸・沿岸部に偏っており、中緯度海洋域のデータは不足している。この地域は傾圧性の強い環境にあり、山岳地形などの影響も小さいため独自の雲微物理過程が存在する可能性がある。このギャップを埋めるため、本研究では日本海に位置する舩倉島にディストロメータを設置し、2年間にわたる継続観測を実施した。その結果、これまでの分類では捉えきれなかったDSDの特徴が明らかになり、雲の発達過程や降水形成メカニズムに対する新たな知見が得られた。本論文では、観測方法と解析手法を紹介し、得られたDSDのタイプとそれに伴う環境条件の違いを示すとともに、衛星データとの比較によって降水過程の理解を深めることを目指している。

2. 問題設定・方法

本研究では、日本海に浮かぶ小さな離島・舩倉島において、2020年3月下旬から2年間にわたるディストロメータ (LPM) による降水観測で得られたデータを使用する。観測対象は暖候期 (4~9月) であり、取得されたデータのうちノイズや異常値は除外し、最終的に約118万件のデータが得られた。また降水に関連する雲の発達状況を調べるために、静止気象衛星「ひまわり8号」の赤外バンド (10.4 μm) の輝度温度 (TB) データを利用した。加えて全球降水観測計画 (GPM) 衛星に搭載された二周波降水レーダー (Ku 帯・Ka 帯) による観測データも活用した。LPMは、雨滴サイズと落下速度に関するビンにデータを分類しており、そこから雨滴数密度や質量加重平均直径 (D_m)、降水強度、液体水量 (LWC)、切片パラメータ (N_w) などが算出される。

3. 結果と考察

舢倉島で得られた降水粒子の観測データをもとに、雨滴サイズ分布 (DSD) と降水強度との関係を分析したところ、質量加重平均直径 (D_m) および正規化切片パラメータ (N_w) のいずれも降水強度の増加とともに上昇する傾向が明らかとなった (図 1)。さらに降水強度が同じであっても、2つの主要な頻度ピークが観測され、これにより中緯度海洋域には2種類の代表的な DSD レジームが存在することが示唆された。1つ目は「多数密度型 (N-type)」であり、比較的小さな D_m と大きな N_w を示す。これは、同じ降水強度であっても雨滴の数密度が高いことを意味する。もう1つは「大粒径型 (D-type)」で、 D_m が大きく N_w が小さい、すなわち雨滴のサイズが大きいタイプである。これらの2種類は、従来の研究では明確に区別されていなかった特徴であり、特に N-type は中緯度海洋環境に特有のものと考えられる。 D_m と N_w の2次元頻度分布でも、N-type は左上、D-type は中央付近にピークを持っており、Dolan et al. (2018) が示した中緯度陸上での DSD 分布にはこのような2ピーク構造は見られない。これらのデータの大半は Bringi et al. (2009) が提案した層状性降水の領域内に収まっており、また Thompson ら (2015) の対流性／層状性分類では、D-type が対流性降水と重なっている。この結果は、従来の分類手法が中緯度海洋条件には必ずしも適用できないことを示唆している。

次に、N-type および D-type の代表的な事例を取り上げ、衛星観測による雲の輝度温度 (TB) との関係を検討した。N-type が現れるケースでは、観測地点は大規模な気象擾乱から遠く離れ、雲頂温度が 260K 以上の比較的温暖な均質雲が広がっていた。一方、D-type は雲頂温度が 235K 以下と冷たく、発達した深い対流性雲に対応していた。この違いをさらに詳しく調べるため、雲頂の TB に基づいてデータを層別化したところ、263K を境に N-type から D-type へとレジームが切り替わることが明確になった。263~273K の温度帯は過冷却水が存在する領域であり、N-type が氷相を含まない「暖かい雨過程」に起因するのに対し、D-type は氷相過程 (蒸気成長、集合、着氷など) によって形成されると解釈される。また GPM 衛星の二周波降水レーダー (DPR) によって得られた DSD パラメータを用いて独立検証を行ったところ、浅い対流では小さな D_m 、深い対流や層状性降水では大きな D_m が支配的であるという結果が得られ、本研究の地上観測結果と整合的であった (図 2)。従来の研究では、ディストロメータ近傍のレーダーエコーの鉛直構造や水平構造に基づいて降水形成過程を推定していたが、それには同時観測の困難さが伴う。一方で、衛星の雲頂 TB データとの組み合わせは、より簡便かつ有効な手法であることが示された。実際、TB による層別化を行うことで、N-type は高温 TB (暖かい雲) に、D-type は低温 TB (氷雲) に対応していることが明瞭に捉えられた。これらの結果は、アクティブセンサーを用いなくても、衛星の輝度温度データと地上観測を組み合わせることで、雲微物理のパラメタリゼーションの検証に活用できる可能性を示している。

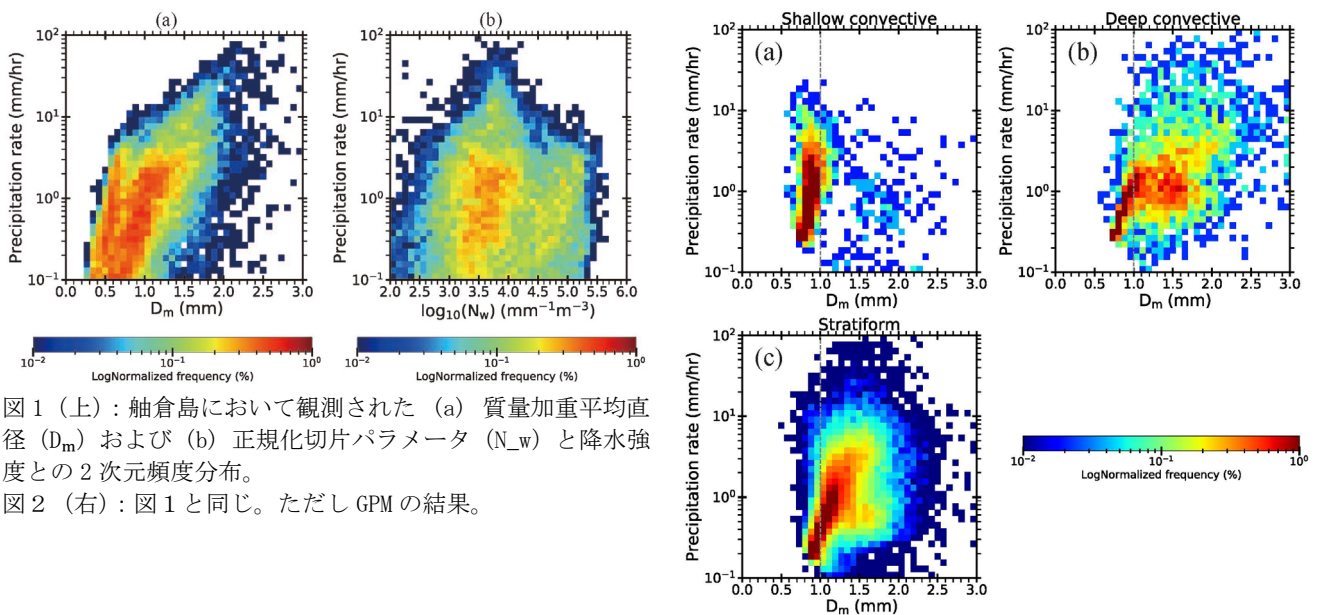


図 1 (上) : 舢倉島において観測された (a) 質量加重平均直径 (D_m) および (b) 正規化切片パラメータ (N_w) と降水強度との 2 次元頻度分布。

図 2 (右) : 図 1 と同じ。ただし GPM の結果。

4. まとめと今後の展望

本研究では、日本海に位置する離島・舢倉島に設置されたディストロメータによって得られた 2 年間の観測データをもとに、中緯度海洋域における雨滴サイズ分布 (DSD) の特徴を明らかにした。その結果、降水強度が同程度であっても、異なる 2 種類の降水粒子の特徴が存在することが判明した。1つは「D 型 (大粒径型)」で、比較的大きな雨滴が特徴であり、もう1つは「N 型 (多数密度型)」で、小粒ながら数の多い雨滴が支配的である。さらに、衛星から得られる雲頂の輝度温度 (TB) との比較によって、D 型は雲頂温度が低い、すなわち氷相過程を伴う降水に対応しており、一方の N 型は高い TB を示す暖かい雨過程と関連していることがわかった。これらの知見は、従来の DSD 分類 (対流性／層状性、陸上／海洋) では説明しきれなかった、中緯度海洋域特有の降水特性を新たに示すものである。本研究は、DSD の地域差や降水形成過程の理解に貢献するとともに、天気予報モデルにおける雲微物理パラメタリゼーションの検証・改良に資するものである。

参考文献

- (1) Tsuji, T., K. Yasunaga, and A. Hamada, 2024: Statistical Characteristics of Drop Size Distributions in the Warm Season over the Sea of Japan, Scientific Online Letters in the Atmosphere (SOLA), 20, 255-263.

MIROC-ES2L を用いたパラメタアンサンブル実験

Perturbed parameter ensemble simulations with a global earth system model MIROC-ES2L

シェリフ多田野 サム(琉球大学), E-mail: sam(at)sci.u-ryukyu.ac.jp, 岩切 友希(ソウル大学校),
林 未知也(NIES), 阿部 彩子(東大・大気海洋研), 吉森 正和(東大・大気海洋研),
鈴木 健太郎(東大・大気海洋研), 渡部 雅浩(東大・大気海洋研), 今田 由紀子(東大・大気海洋研),
建部 洋晶(JAMSTEC), 阿部 学(JAMSTEC), 小倉 知夫(NIES)
Sam Sherriff-Tadano (Uni. of the Ryukyus), Tomoki Iwakiri (Seoul National University), Michiya Hayashi (NIES),
Ayako Abe-Ouchi (AORI), Masakazu Yoshimori (AORI), Kentaroh Suzuki (AORI), Masahiro Watanabe (AORI),
Yukiko Imada (AORI), Hiroaki Tatebe (JAMSTEC), Manabu Abe (JAMSTEC), Tomoo Ogura (NIES)

要旨

地球システムモデル MIROC-ES2L は北西太平洋亜熱帯に低水温バイアスを持つ。その要因を調べた結果、負の雲放射効果バイアスの重要性が明らかになった。浅い対流スキームを加えた MIROC-ES2L でパラメタアンサンブル実験を 500 本行い、パラメタの不確実性が北西太平洋亜熱帯の雲放射効果に与える影響を評価した。

1. はじめに

地球温暖化に伴い、気候が急激に変化する可能性が指摘されている。急激に変化する可能性を持つ要素はティッピングエレメントと呼ばれ、例として沖縄域周辺のサンゴ礁や南極氷床、アマゾンの森林などが挙げられる。これらティッピングエレメントの将来予測向上のため、多くの地球システムモデルで温暖化実験などが行われている。しかし全てのモデルでは現代気候実験の海面水温に大きなバイアスが存在するため、気候が急激に変化する臨界点の位置や気候変化の大きさ、速さの予測に大きな不確実性が生じる。JAMSTEC で開発された MIROC-ES2L (1) も同様であり、サンゴ礁が多く存在する北西太平洋亜熱帯に低水温バイアスのあることがわかっている。本研究ではこのバイアスの要因を調べ、MIROC-ES2L を用いたアンサンブル実験を行うことで不確実なモデルパラメタが雲放射効果や水温バイアスの解消に与える影響を明らかにすることを目指した。

2. 解析データとアンサンブル実験設定

IPCC AR6 に提出された MIROC-ES2L の piControl, Historical と AMIP 実験結果を解析し、モデルの水温バイアスを引き起こす要因を調べた。具体的にはモデルで計算された短波長波放射を CERES-EBAF と比較し、雲放射効果バイアスを確認した。また同様の解析を海面顕熱潜熱フラックスや対流圏下層風についても行った。

次に MIROC-ES2L 内で不確実なパラメタが雲放射効果に与える影響を調べるため、パラメタアンサンブル実験を piControl 設定で行った。今回の実験では、MIROC6 で使用される浅い対流スキームを加えた MIROC-ES2L を使用した。MIROC-ES2L の雲スキーム内などの不確実なパラメタ 31 個を同時に変化させるパラメタアンサンブル(PPE)実験を 500 本行った(パラメタは(2)などを元を選定した。図 2 に対象パラメタを示す)。500 のアンサンブルメンバーはラテンハイパキューブ法に基づいて計算した(例(3))。全てのメンバーで 2 年間積分し、そのうち 1 年目の年平均大気上端放射収支が $\pm 5 \text{ W/m}^2$ 以内の 230 メンバーをさらに 15 年積分した。これらの実験の最初の 10 年を spin-up とし、最後の 7 年平均を解析に用いた。

3. 結果

まず IPCC AR6 に提出された piControl と Historical 実験の北西太平洋亜熱帯水温バイアスを計算した。Historical については 1981-2010 年の全アンサンブルメンバーの平均を用いた。比較観測データとして、WOA2013 で提供されている 1981 年から 2010 年の 30 年間の気候値を用いた。図 1 より、モデルは大まかな水温パターンを再現しているものの、観測に比べて海面水温を 2 度程度過小評価していることがわかった。またこの低温バイアスは季節を通して持続することがわかった。

次に水温バイアス要因を調べるため、MIROC-ES2L の AMIP 実験における海面フラックスの解析を行った。結果として、短波放射反射と海面潜熱フラックスが過剰であることが重要であることがわかった。短波放射に関しては夏季の雲アルベドの影響が大きく、潜熱フラックスに関しては冬の北風が過大であることが影響していた。

MIROC-ES2L 内の不確実なパラメタが水温や雲放射バイアスに与える影響を検証するため、浅い対流スキームを加えた MIROC-ES2L で PPE 実験を行った。図 2 に各パラメタに関して 230 メンバーの雲放射効果(短波と長波の和)を回帰したものを示す。北西太平洋亜熱帯では、雲放射効果に影響を与えるパラメタとして、積雲対流スキームの webmax, clmd, 浅い対流スキームの minpdc, cismax, 大規模凝結の vicec, b1 が重要であることがわかった。この領域では、メンバー間で 20 W/m^2 程度、雲放射効果が違ってくるのがわかり、パラメタの組み合わせ次第で低水温バイアスを軽減できる可能性が見つかった。

4. 今後の展望

積分期間を延長することで、結果のロバスト性や各パラメタが水温バイアスに与える影響を定量化する必要がある。また解析領域を南大洋やアマゾン域に拡張し、ティッピングエレメント存在域もモデルバイアスへの影響評価を行うことが重要である。

参考文献

- (1) Hajima, T. et al. Geosci. Model Dev., <https://doi.org/10.5194/gmd-13-2197-2020>, 2020.
- (2) Ogura, T. et al. Geosci. Model Dev., <https://doi.org/10.5194/gmd-10-4647-2017>, 2017.
- (3) Sherriff-Tadano, S. et al. Clim. Past., <https://doi.org/10.5194/cp-20-1489-2024>, 2024

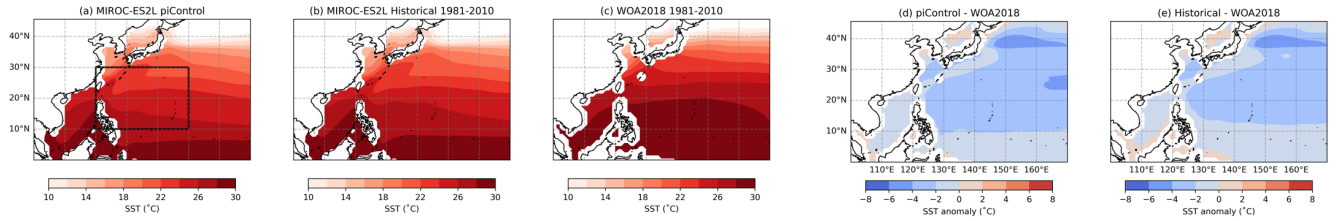


図 1 年平均北西太平洋亜熱帯水温の空間分布. 30 年平均を示す.

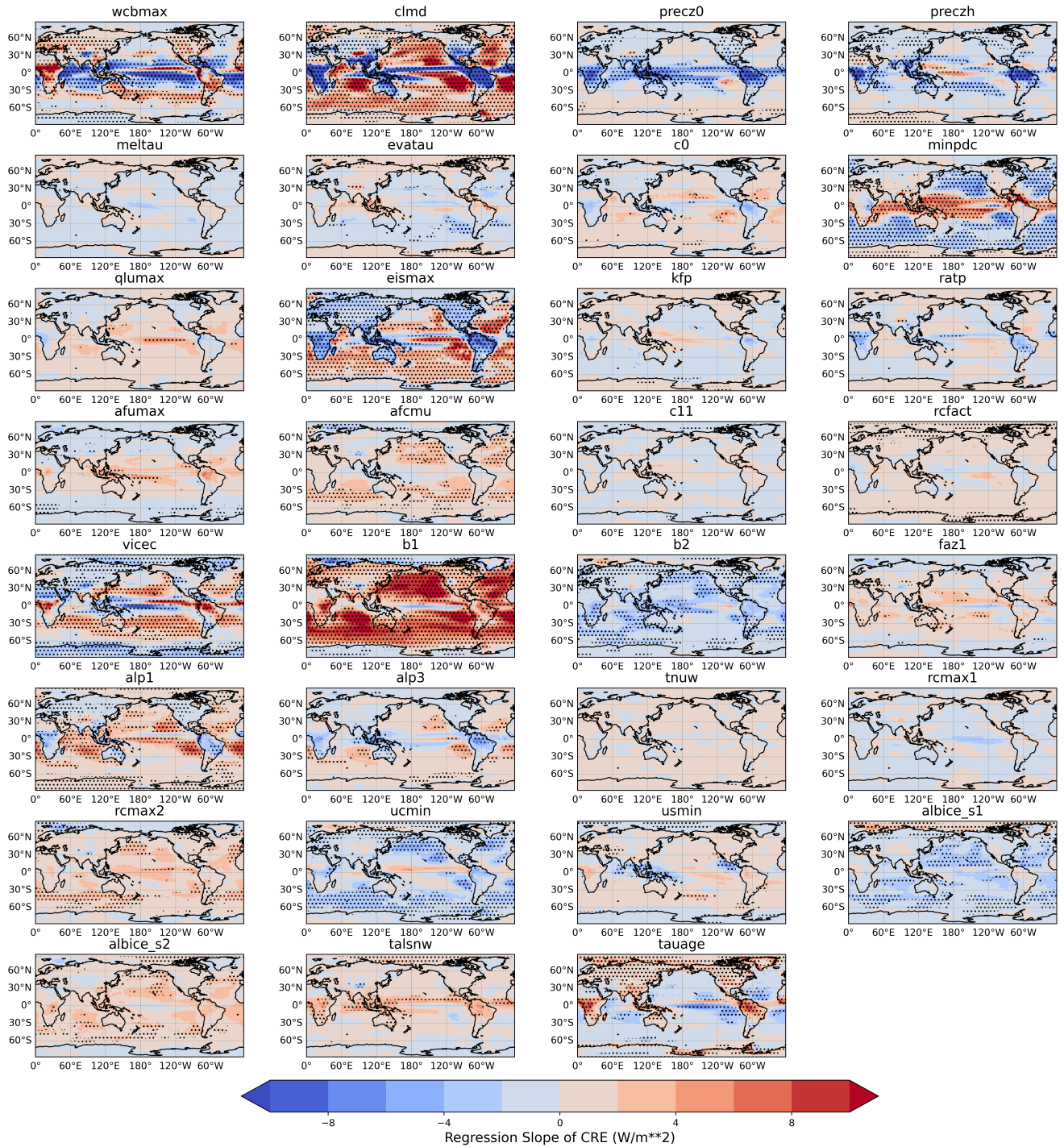


図 2 アンサンブル実験(230 メンバー)から得られた大気上端での雲放射効果(CRE)を正規化された各パラメタに線型回帰したもの. 単位は W/m^2 . 図中の点は p 値が 0.05 以下の値を取る場所を示す.

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, 神代 剛, 金浜 貴史, 木南 哲平, 高橋 由実子, 齊藤 慧,
黒木 志洸, 林田 和大, 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, Tsuyoshi Koshiro, Takafumi Kanehama, Teppei Kinami, Yumiko
Takahashi, Kei Saitou, Yukihiro Kuroki, Kazuhiro Hayashida, Kouhei Sutou
Numerical Prediction Division,
Information Infrastructure Department, Japan Meteorological Agency

要旨

気温の系統誤差（バイアス）低減による気象庁全球モデルの予測精度向上を目的に、陸面過程及び放射過程で使われる気候値の精緻化を行った。特に、気温の予測精度への影響が大きい、陸面過程における葉面積指数（Leaf Area Index; LAI）の更新と放射過程における二酸化炭素濃度気候値の更新に取り組んだ。現在の気候状態をより反映した LAI 気候値への更新により対流圏の低温バイアスが、二酸化炭素濃度気候値更新により成層圏の高温バイアスが低減した。

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循環及び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が必要となる。気温の系統誤差低減や海陸の熱的コントラストがもたらすアジアモンスーン循環の表現向上には、陸面過程や放射過程が影響する。これら過程では、植生の状態やその物理的特性を表すパラメータ、放射計算の際に考慮する大気微量成分の濃度等について、観測値や衛星データからのリトリブに基づく気候値データセット（パラメータ）を使用する。特に、陸面過程や放射過程は、入力に使う気候値データセットの種類が他の物理過程に比べて多く、これらが大気気温や水蒸気の予測精度に与える影響も大きい。これらの背景から、2024年度は、(1)陸面過程における葉面積指数(Leaf Area Index; LAI)気候値、及び(2)放射過程における二酸化炭素濃度気候値の更新に取り組んだ。

2. 開発の概要

2. 1 陸面過程における LAI 気候値更新

陸面過程における植生パラメータのひとつである LAI は植生の粗密を表し、その変化は潜熱・顕熱フラックスの予測に影響を与える。地域ごとの LAI 分布の特徴をより反映した気候値利用による潜熱・顕熱フラックスの予測改善を通じた GSMの対流圏下層における水蒸気や気温の予測精度向上を目的に、陸面過程における LAI 気候値の更新を行った。

更新前の GSMでは、LAI 気候値に MODIS プロダクト(Myneni et al. 2002)に基づく緯度帯(低緯度($<23.5^{\circ}$)・中緯度($\geq 23.5^{\circ}$, $<55^{\circ}$)・高緯度($\geq 55^{\circ}$)の3区分)及び植生種別ごとの2001年から2010年までの月別平均値を利用している。これに対して、新気候値では緯度帯・植生種別平均値の利用から各モデル格子点値への精緻化、気候値作成年代の更新(2010年から2019年)、MODIS プロダクトのバージョンの v005 から v006 への更新(Myneni et al. 2015)を適用した。

2. 2 放射過程における二酸化炭素濃度気候値更新

GSMでは大気二酸化炭素濃度として、近似的に全球一様・通年の気候値を採用している。現在の GSMで用いられている二酸化炭素濃度は2013年の観測値の396.0ppmvである(関口ほか(2019))。しかし、年々の二酸化炭素濃度の上昇により GSM内での二酸化炭素濃度と最新の濃度とは乖離が生じている。そこで、最新の二酸化炭素濃度として報告されている417.9ppmv(2022年の観測値(WMO(2023)))に更新した。

3. 結果

8月のLAI気候値の更新前後の変化、及びオフライン陸面モデル(大気の観測値や解析値等を強制力に陸面モデル単体で予測するモデル)による2000年8月平均の潜熱フラックスの変化をFig.1に示す。緯度帯・植生種別平均値ではなく各モデル格子の値を利用することで、熱帯や夏半球側の森林域でLAIが増加し、インドやユーラシア大陸内陸では減少する等、各地域のLAI分布の特徴がより反映されるように変化した。各地域のLAI増加(減少)に対応して潜熱フラックスが増加(減少)した。さらに、CEOP(Coordinated Energy and Water Cycle Observations Project; Roads et al. 2007)観測データを用いた検証から、気候値更新により潜熱・顕熱フラックス予測値の平均誤差が複数地点で減少することを確認した(図略)。

Fig.2は、解析予報サイクル実験より得られた2023年8月の月平均解析気温の鉛直プロファイルを示している。二酸化炭素

濃度気候値の増加により、成層圏から中間圏で長波放射過程による冷却の強まりが見られ（図略）、最大で 1K 程度の気温の減少が見られた。対流圏ではごくわずかに加熱の傾向が見られたが 0.05K よりも小さい変化量であった。これらは理論的に想定される二酸化炭素濃度増加による気温の変化と整合している。

さらに、LAI 気候値更新、二酸化炭素濃度気候値更新を組み合わせた実験からは夏季北半球において、対流圏下層の低温・湿潤バイアス減少、成層圏の高温バイアス減少といった、組み合わせた内容と整合した改善を確認した。（Fig. 3）

4. まとめと今後の展望

2024 年度の開発では、陸面過程における LAI 気候値更新と放射過程における二酸化炭素濃度気候値更新に取り組んだ。現在の気候状態をより反映した LAI 気候値への更新により、地上や対流圏下層を中心に気温のバイアスが低減することを確認した。二酸化炭素濃度気候値更新により二酸化炭素濃度増加に伴う対流圏のごくわずかな高温化と成層圏の低温化が見られ、対流圏の予測精度を維持しつつ GSM における成層圏の高温バイアスが低減されることを確認した。これら GSM の改良は 2025 年 3 月 18 日から気象庁の全球数値予報システムに導入された。今後は、改良された GSM をベースに、物理過程（雲、積雲、地形に関する過程等）の更なる改善やデータ同化手法の改良を継続して進めていくとともに、将来の計算機への対応やさらなる高解像度化に向けて GPU 等も活用した計算性能面でも、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。

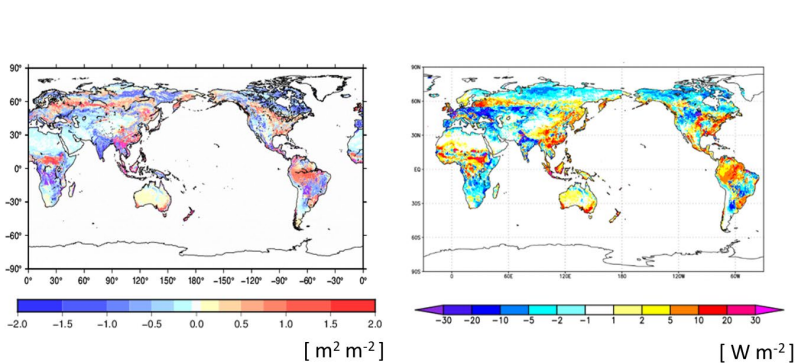


Fig. 1 8月における（左）新気候値と現気候値の LAI の差 $[m^2 m^{-2}]$ 、（右）オフライン実験による 2000 年 8 月平均の潜熱フラックスの LAI 更新前後の差 $[W m^{-2}]$ 。

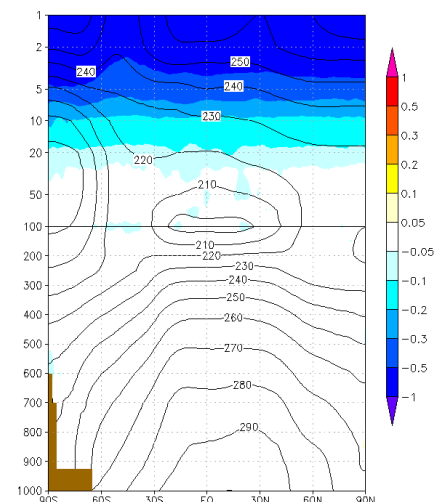


Fig. 2 解析予報サイクル実験による 2023 年 8 月平均の帯状平均気温解析値 $[K]$ と二酸化炭素気候値更新前後の差 $[K]$ 。縦軸は気圧 $[hPa]$ 。

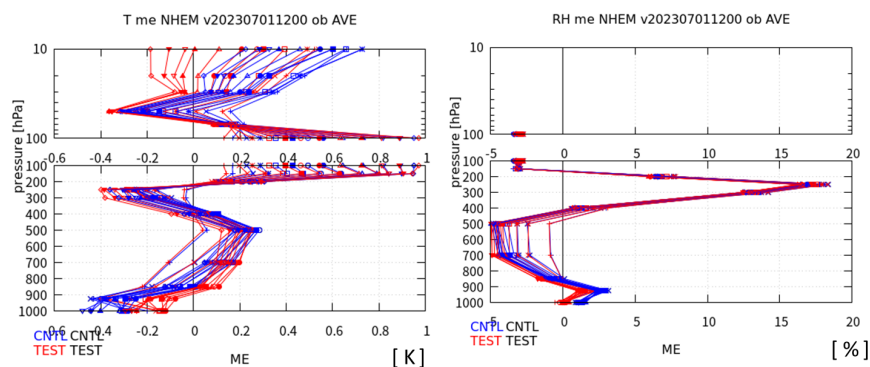


Fig. 3 解析予報サイクル実験による 2023 年 7-9 月平均の北半球 $(20^{\circ} N-90^{\circ} N)$ における予測値のラジオゾンデ観測に対する平均誤差の予報時間別（初期時刻から 264 時間予測までの 24 時間毎）の鉛直プロファイル。（左）気温 $[K]$ 、（右）相対湿度 $[\%]$ 。青は LAI 及び二酸化炭素気候値更新前、赤は更新後を表す。

参考文献

- (1) 関口亮平, 長澤亮二, 中川雅之, 簗将吉, 2019: 放射. 数値予報課報告・別冊第 65 号, 気象庁予報部, 66-80.
- (2) WMO, 2023: The state of Greenhouse Gases in the Atmosphere Based on Global Observations through 2022. WMO Greenhouse Gas Bulletin, 19, 1-11.
- (3) Myneni, R. B. and co-authors, 2002: Global products of vegetation leaf, area and fraction absorbed PAR from year one of MODIS data. Remote Sens. Environ., 83, 214-231.
- (4) Myneni, R. and co-authors, 2015: MOD15A2H MODIS/Terra Leaf Area Index/FPAR 8-Day L4 Global 500m SIN Grid V006 [Data set]. NASA EOSDIS Land Processes Distributed Active Archive Center.

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

Development of ice-ocean-carbon coupled simulations and state estimates

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/東南極域では、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。また、これらは沿岸域の生態系/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。2024 年度には、2023 年度から継続して、南極沿岸域、グリーンランド沿岸域のモデル開発を継続した。特に大きな成果が、東南極域モデル開発から得られた。日本が観測を実施する東南極/トッテン氷河棚氷域のモデルについて、全世界のモデルに共通して、常に観測される分厚い冬季水を再現できず、トッテン棚氷融解プロセスが間違っていて再現されているという問題があった。モデル開発の結果から、分厚い冬季水を再現するには、(1)大陸棚斜面上を西向きに流れる南極斜面流の強い流速、および、(2)氷山からの質量フラックスをモデル計算に反映させること、が重要であるということがわかった。本年の報告書では、特にこの成果に着目してまとめる。

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、ウェッデル海/ロス海/東南極沖/西グリーンランド域の領域海洋モデル開発を実施してきた。東南極域モデル、西グリーンランド域モデルについては、さらに、海洋生態系モデルとの結合を実施した(図 1)。昨年度は、ウェッデル海/西グリーンランド域モデルについて注目して報告書をまとめた。本年度は、東南極域モデル開発について得られた成果をまとめる。

東南極のトッテン氷河上流部には、海水準を約 3.5 メートル程度上昇させる量の氷が存在する。近年、トッテン氷河には沖から暖水が流入していることや、氷河の流動速度が加速していることが知られ、今後海水準上昇に大きく寄与することが危惧されている。現在、暖水の流入メカニズムに関して最も研究が進んでいる西南極では、水温躍層が重要な要因として注目されている。水温躍層とは深さに対して水温が急激に変化する層であり、暖水の厚さを決める。つまり、水温躍層の深さは棚氷下部へ流入する暖水の体積を変動させ、棚氷底面へ運ばれる熱をコントロールする。しかし、既存のトッテン氷河沖における複数の海洋数値モデルでは、大陸棚上における水温躍層の深さが観測データよりも約 200 メートル以上浅いという共通した課題がある。本研究では、トッテン氷河沖における棚氷底面への暖水の流入に寄与する水温躍層・塩分躍層の再現性を高めた海洋数値モデルの開発することを目的とした。

2. 問題設定・方法

モデルの設定は Nakayama et al., 2021 と同様である。解像度は、水平方向約 4 km、鉛直方向には 50 層である。計算期間は、2010 年 1 月から 2015 年 1 月の 5 年間である。モデルの初期値は、January World Ocean Atlas 2013 の水温と塩分を使用した。海底地形は ETOP01 を用い、棚氷形状は、Antarctic Bedrock Mapping (BEDMAP-2)を用いる。さらに、NASA ジェット推進研究所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設定した。海洋モデルを駆動するための大気境界条件には、Era-interim を用いた。

3. 結果と考察

Naughten et al., 2022 における手法を用いて、Nakayama et al., 2021 モデルに氷山からの融解水として質量フラックスをモデル計算に組み込んだ。この際、Naughten et al., 2022 では Merino et al., 2016 による氷山からの質量フラックスをインプットデータとして計算に使用しているが、本研究領域における Merino et al., 2016 による氷山からの質量フラックスの空間



図 1: 中山グループにおける南極海を対象とした各モデルの計算領域。

分布は、確認したところ、沿岸部に偏りすぎていた。衛星観測による南極氷山の位置を追跡した研究によると、氷山の多くは、大陸棚上では広く分布しているため、本研究では海底地形の深さとモデルグリッドの面積により重み付けをし、新たに空間分布を作成した。その結果、氷山からの質量フラックス無し実験に比べ、有り実験では水温躍層の深さが約 200m 程度深くなった (図 2a, c)。また、塩分躍層についても同様に下がり、観測値に近い鉛直様な冬季形成水が再現されるようになった (図 2b, d)。また、大気-海氷間の抵抗係数を変更させることにより、さらに水温躍層が 100m 程度低下し、観測データで得られている水温躍層・塩分躍層をより良く再現するモデルを開発することができた (図 3d-f)。大気-海氷間の抵抗係数の変更は、南極斜面流の流速の上昇及び、海洋から大気への海面熱フラックスを上昇させたと考えられる。また、側面境界条件における西向き流速を弱め、かつ、氷山からの質量フラックスを考慮した実験では、水温躍層・塩分躍層の深さに変化は現れなかった。この結果から、南極斜面流が強い条件下でのみ、大陸棚上の氷山からの質量フラックスは、水温躍層・塩分躍層を下げるということがわかった。これは、南極斜面流に大陸棚上の水塊と外洋の水塊の交換を妨げる役割が大きく貢献していると考えられ、トッテン氷河沖における水塊分布に対して氷山からの質量フラックス、および、南極斜面流の流速の 2 つが重要であることが本研究から明らかになった。

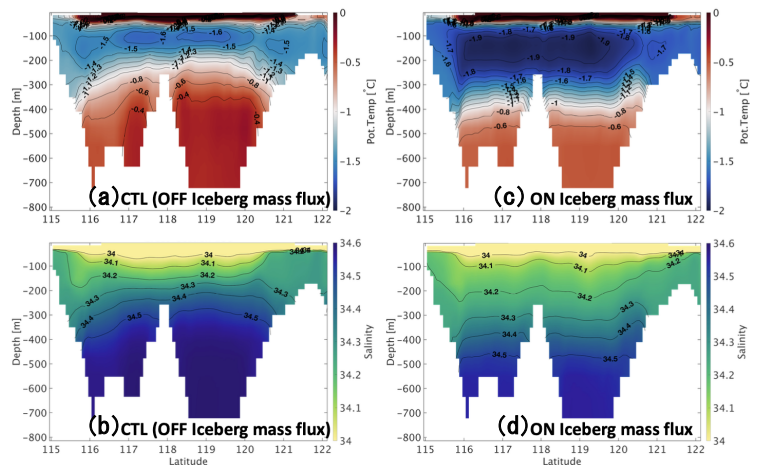


図 2: 氷山からの質量フラックスに対する感度実験におけるトッテン氷河沖大陸棚上の鉛直断面図 (2015 年 1 月月平均)。(a, b) 氷山からの質量フラックス無し実験における (a) ポテンシャル水温、(b) 塩分。(c, d) 氷山からの質量フラックス有り実験における (c) ポテンシャル水温、(d) 塩分。

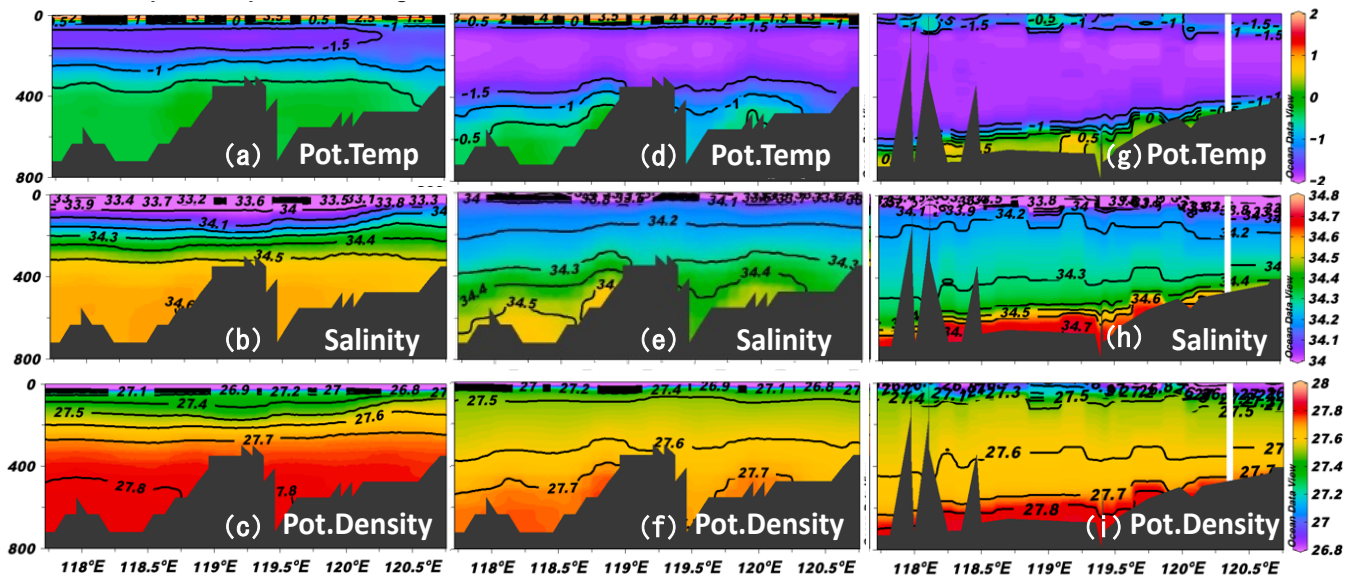


図 3: トッテン氷河沖大陸棚上の (a, d, g) ポテンシャル水温、(b, e, h) 塩分、(c, f, i) ポテンシャル密度の鉛直断面図 (2015 年 1 月月平均)。(a-c) CTL 実験、(d-f) 氷山からの質量フラックスを考慮し、大気-海氷間の抵抗係数を調整した実験、(g-i) 2019/2020 年に行われたトッテン氷河沖における船舶による観測データ。

4. まとめと今後の展望

本研究では、氷山からの質量フラックスをモデル計算に組み込み、大気-海氷間の抵抗係数を調整することで、観測データで得られている水温躍層・塩分躍層の深さの再現性を高めたモデルを開発した。また、南極斜面流の流速が弱い状況では、同様の結果は得られず、トッテン氷河沖大陸棚上の水塊分布を再現するには、強い南極斜面流と氷山からの質量フラックスを考慮することが必要であることがわかった。今後は海底地形を変えた実験や、より長期間の計算を実施し、水塊分布の時間変動性についても調査を進める。

参考文献

- (1) Nakayama, Y., Greene, C. A., Paolo, F. S., Mensah, V., Zhang, H., Kashiwase, H., et al. (2021). Antarctic Slope Current modulates ocean heat intrusions towards Totten Glacier. *Geophysical Research Letters*, 48, e2021GL094149. <https://doi.org/10.1029/2021GL094149>
- (2) Naughten, K. A., Holland, P. R., Dutrieux, P., Kimura, S., Bett, D. T., & Jenkins, A. (2022). Simulated twentieth-century ocean warming in the Amundsen Sea, West Antarctica. *Geophysical Research Letters*, 49, e2021GL094566. <https://doi.org/10.1029/2021GL094566>
- (3) Nacho Merino, Julien Le Sommer, Gael Durand, Nicolas C. Jourdain, Gurvan Madec, Pierre Mathiot, Jean Tournadre, Antarctic icebergs melt over the Southern Ocean: Climatology and impact on sea ice, *Ocean Modelling*, Volume 104, 2016, Pages 99-110, ISSN 1463 5003, <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2016.05.001>.

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
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)
Masao Kurogi, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC)

要旨

気候システムにおいて海氷-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。

今年度は、海氷海洋結合モデル COCO の最新のコードの GPU 対応を行った。OpenACC 指示文を挿入したコードを用いて全球 1/4 度モデルを Wisteria-A で実行したところ、GPU を使用したケース (4CPU+16GPU) は、CPU のみ使用したケース (16CPU) と比べ、約 4.6 倍高速となった。両者の実行結果の差異は小さく問題ないと考えられるが、今後更なる検証を行う予定である。

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高解像度設定で数値実験を行ってきた。近年のスーパーコンピュータでは GPU を搭載したものが多くなってきており、今後高解像度海洋モデルを GPU で駆動することを想定し、今年度は海洋モデルの GPU 対応を中心に行なった。

2. 問題設定・方法

本課題研究では、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) を用いてきた。COCO の最新のソースコードの高解像度設定で用いられる部分に対して OpenACC 指示文を挿入する作業を次の方針で行なった。

- !\$acc enter data …, !\$acc update …等を用いてホストメモリとデバイスメモリ間のデータ転送を陽に記述
- GPU で計算する部分の前後に !\$acc kernels default(present) と !\$acc end kernels を挿入
- GPU で計算する部分に関連した通信では、GPUDirect RDMA を使うため、MPI 関数の前後に !\$acc host_data use_device (送信・受信バッファの配列) と !\$acc end host_data を挿入

以上のように OpenACC 指示文を挿入したコードを用いて、全球 1/4 度モデル (三極座標系, 1440×1200×62) をテスト駆動した。用いた計算機は東京大学情報基盤センター Wisteria/BDEC-01 システムの Wisteria-A (Aquarius) であり、表 1 に示す CPU のみを用いた実行 (以後、TEST_CPU) と CPU と GPU を用いた実行 (以後、TEST_GPU) について出力変数と実行時間を比較した。

表 1

	TEST_CPU	TEST_GPU
使用ノード数	8 (16CPU、GPU は不使用)	2 (4CPU+16GPU)
MPI プロセス数	576 (24×24, flat MPI)	16 (4×4)
開発環境	Intel OneAPI	NVIDIA HPC SDK
コンパイラオプション	-xCORE-AVX512 -fp-model precise -mcmodel=large -shared-intel -convert big_endian -fpe0 -traceback	-mcmodel=medium -fast -acc -Minfo=accel -byteswapio

3. 結果と考察

図 1 上は 16GPU を用いたケース (TEST_GPU) について、1 日積分後の海面高度と海氷厚を示しており、図 1 下は、それぞれの変数について CPU のみ用いたケース (TEST_CPU) との結果の差を示している。それぞれの変数の空間変化と比べて TEST_CPU と TEST_GPU 間の差異は小さく、OpenACC 指示文の挿入に問題はないと思われるが、今後、CPU のみを用いてコンパイラやコンパイラオプションを変えて実行した場合の差異と比較することで妥当性を評価する予定である。

表 2 は各計算過程の実行時間について、TEST_CPU と TEST_GPU を比較したものであり、初期・終末処理等を除いた計算時間が示されている。CPU のみを用いた TEST_CPU と比べ、同じ数の GPU を用いた TEST_GPU では、全体としては約 4.6 倍高速化された。計算過程別に見ると、鉛直粘性・拡散、傾圧モード、流速診断 (トレーサ・運動量)、トレーサの計算過程では 10 倍程度以上の

高速化が達成されている。一方、海面境界条件、海氷、傾圧モードの過程では高速化率が低くなっている。これらの過程での計算は基本的に2次元か、2次元×5程度であり、スレッド数が十分大きくないためGPUの性能が出ていない可能性がある。海面境界条件については、OpenACC指示文が挿入されていない部分も存在する。また、傾圧モードの計算過程では、通信と通信データにまとめる（から戻す）計算が高頻度で発生することもGPUでの高速化を妨げていると考えられる。

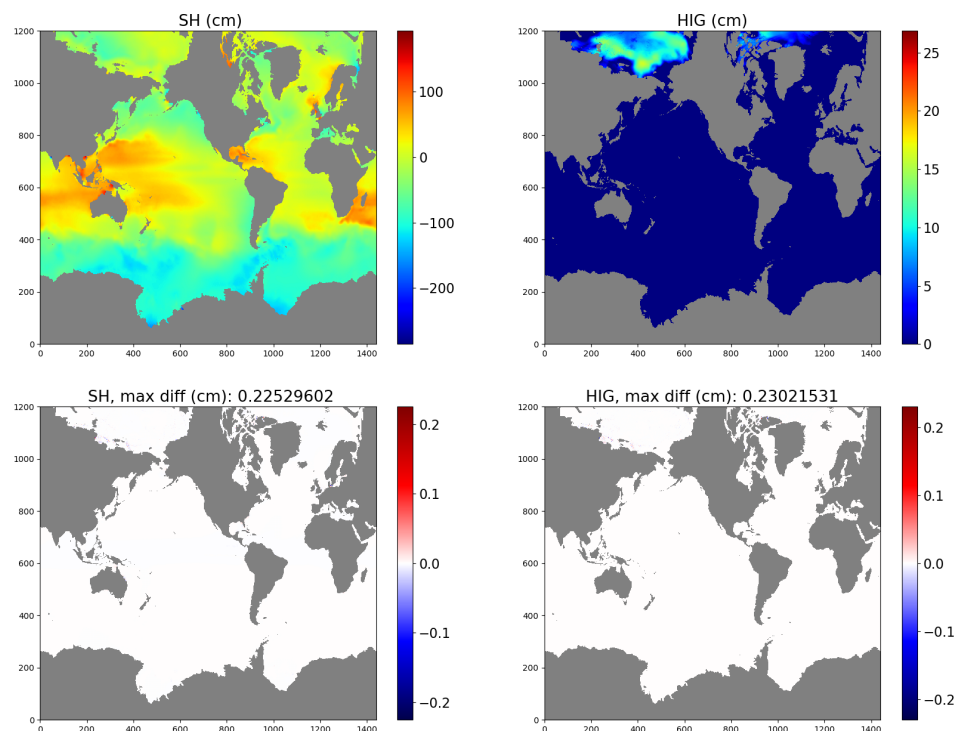


図2: 上は16GPUを用いたケース (TEST_GPU) で1日積分した場合の海面高度 (左)、海氷厚 (右)。下はCPUのみ用いたケース (TEST_CPU) との差。

表2: 各計算過程の実行時間 (A, B)、高速化率 (C)。初期・終末処理、一部の初期設定部分を除いた。

	A: TEST_CPU (16CPU)	B: TEST_CPU (4CPU+16GPU)	C: A/B
全体	166.3	35.9	4.6
海面境界条件	5.4	4.8	1.1
海氷	6.1	1.9	3.2
鉛直粘性・拡散	15.3	1.1	13.7
傾圧モード	20.9	1.8	11.4
傾圧モード	7.6	7.0	1.1
流速診断 (トレーサー)	2.7	0.2	16.1
トレーサー	91.7	9.4	9.7
流速診断 (運動量)	7.6	0.7	11.3

4. まとめと今後の展望

今年度は、海氷海洋結合モデル COCO の GPU 対応を中心に行なった。OpenACC 指示文を挿入したコードを用いて全球 1/4 度モデルを Wisteria-A で実行したところ、GPU を使用したケース (4CPU+16GPU) は、CPU のみ使用したケース (16CPU) と比べ、約 4.6 倍高速となった。両者の実行結果の差異は小さく問題ないと考えられるが、差異については更なる検証を行う予定である。今後、OpenACC 指示文の挿入をさらに進めるとともに、既に OpenACC 指示文を挿入した箇所も更なる高速化が可能か検討する (例えば非同期処理など)。また、傾圧モード部分については、傾圧モード部分のみを切り出してこれまで行なったテストから、通信の袖領域の格子数を増やして通信頻度を減らす方法 (例えば、Tanaka and Tsugawa (2004)) を用いることが高速化に効果があることがわかっているため、この手法を COCO へ適用する予定である。

参考文献

- (1) Hasumi, H., 2006: CCSR Report, 25, Cent. for Clim. Sys. Res., Univ. of Tokyo, 103 pp.
- (2) Tanaka, Y., and M. Tsugawa, 2004: Development of a high resolution parallel ocean circulation model on the Earth Simulator. <https://doi.org/10.1016/B978-044451612-1/50042-1>

確率雲アンサンブルモデルにおける量子計算活用

Applying Quantum Computing to Stochastic Multicloud Model

上野 和雅, 東大・理学系, E-mail: kazumasa-e67(at)eps.s.u-tokyo.ac.jp
三浦 裕亮, 東大・理学系, E-mail: h_miura (at)eps.s.u-tokyo.ac.jp
Kazumasa Ueno, Faculty of Science, The University of Tokyo
Hiroaki Miura, Faculty of Science, The University of Tokyo

要旨

量子計算は、量子の性質である重ね合わせの原理や干渉、量子もつれを利用して、従来の計算機（古典計算機）で時間・空間的に解けなかった問題を解けるようにすると期待されている、次世代の計算技術である。本研究では、膨大な計算資源を必要とする大気科学分野における量子計算の有用な活用方法を模索することを目的として、確率雲アンサンブルモデル(SMCM)を計算するための量子計算アルゴリズムの開発を行い、古典計算との比較を行った。シミュレータを用いて構築した量子アルゴリズムの検証を行い、量子計算における確率的な出力の性質を利用することで、従来の古典モンテカルロ計算と同等の結果が得られたことを確認した。また、計算量に関しては、ばらつきの程度を抑えるという点では量子計算と古典計算で同等の計算コストがかかり、量子計算の計算量的なメリットがないことがわかった。

1. はじめに

量子計算技術開発が近年飛躍的に進んでいる。現存の量子計算機を用いた量子超越の実証や(Arute et al., 2019)、エラー訂正技術の実証など(Google Quantum AI, 2023)、量子計算利用に関する研究が盛んに進められている。その活用に関しても、従来から注目されていた量子系の計算のみならず、機械学習への応用や(Bramonte et al., 2017)、古典系の計算への応用(Hu et al., 2024)の研究が進められている。大気海洋科学分野の研究においてもしばしば膨大な計算資源を必要となることから、量子計算の活用に関するコンセプトの提案がなされている(Tennie and Palmer, 2023)。しかしながら、その具体的なアプリケーションに関してはまさに模索が始まったばかりであり、有用な活用先・活用方法に関しては不明である。

確率雲アンサンブルモデル (Stochastic Multicloud Model; SMCM; Khouider et al. 2010) は、大気大循環モデル(GCM)で解像しきれないサブグリッドスケールの雲の変動に関して確率的に取り扱うモデルである。時間発展はマルコフ過程に従うと仮定し、線形な時間発展方程式で記述されるため、量子計算と相性が良いことが期待される。また、量子計算の出力は確率的であり、確率計算と相性が良いことが期待される。これらの理由から、最初の実用アプリケーションとして SMCM を選択し、量子アルゴリズムを構築、シミュレータで計算を実行、その性能に関する評価と量子計算の適用可能性に関する調査を行った。

2. 問題設定・方法

SMCM ではサブグリッドスケールの状態に関して、clear sky、congestus cloud、deep convective cloud、stratiform anvil のいずれかに分類されると仮定し、それぞれの状態の格子内割合の時間発展を確率的に計算する。時間発展はマスター方程式で記述されるものと仮定し、遷移確率は観測事実などに整合的となるように設定されている。従来法では古典モンテカルロ法を用いて各時間における各状態の割合を計算する。

構築した量子計算アルゴリズムでは、量子状態の振幅に各状態の割合を埋め込み、それに時間発展の行列をかけることで次時間ステップの各状態の割合を計算する。量子状態はそのままでは知ることができず、測定を行うことで古典ビット列に収縮させて結果を抽出する必要がある。各状態に収縮する割合が計算された量子状態の振幅の2乗となるため、繰り返し計算による統計サンプリングを行うことで、確率的に各状態を得るという仕組みである。なお、量子計算における演算はユニタリ演算に限定されるため、Linear Combination of Unitaries (LCU; Xin et al., 2020)の方法を用いて、時間発展行列をユニタリ行列の和に分解して演算する方法を用いた。

現存の量子コンピュータは、ノイズの影響やアーキテクチャの構造から本計算を検証するのには不向きであり、本研究では量子計算を古典計算機上でエミュレートするパッケージである Qiskit (Javadi-Abhari, 2024)の Aer Simulator を用いることで、計算した。

3. 結果と考察

まず、構築した量子アルゴリズムが従来法の計算結果と同等の結果を計算するのかを検証した。決定論的な解の周りに確率的な解がばらつく様子が再現されており、同等の結果が得られることが確認された(図1)。量子計算でも SMCM の計算が可能であることを示す結果である。

次に、ばらつきの程度の制御において、計算量の依存性を調べた。古典モンテカルロ計算に関してはグリッド内における分割数、量子計算に関しては繰り返し計算の回数を変更し、決定論的な解の周りの確率的な解のばらつきを標準偏差で評価した。計算の結果、いずれもそれぞれに関して大数の法則に従う様子が確認された(図2)。これはばらつきの程度の制御においては計算量の増加が同程度であることを示唆し、この点における量子計算を利用することの計算量的なメリットがないことを示す結果である。

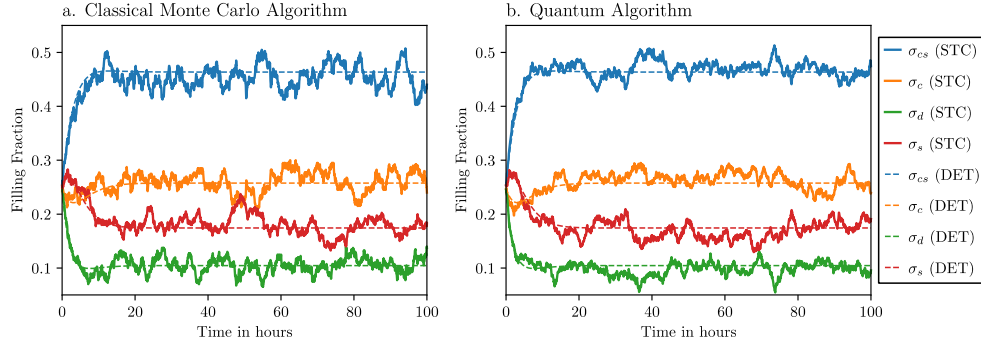


図 1 : SMCM の時間発展の様子。決定論解（破線）の周りに確率解（実線）がばらつく様子が再現されている。

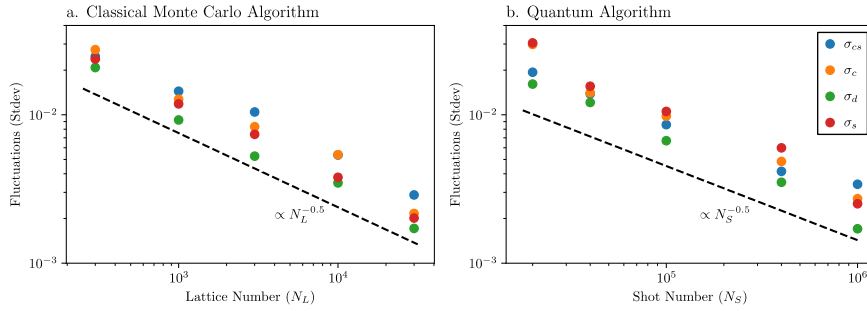


図 2 : 決定論解の周りの確率解のばらつきの（古典）格子分割数（量子）繰り返し回数依存性。いずれも大数の法則に従う。

4. まとめと今後の展望

SMCM を計算する量子アルゴリズムを構築し、古典計算と比較した。古典計算と同等の計算が行えることを確認できた一方で、ばらつきの制御において計算量の観点で量子計算のメリットは特になかったことが明らかになった。量子計算の有効な活用法の模索の方向性としては、古典計算で扱いきれないような問題を対象として問題設定をすることが有効と考えられ、別の課題への量子計算適用を模索する予定である。

参考文献

- (1) Arute, F., Arya, K., Babbush, R., Bacon, D., Bardin, J. C., Barends, R., Biswas, R., Boixo, S., Brandao, F. G. S. L., Buell, D. A., Burkett, B., Chen, Y., Chen, Z., Chiaro, B., Collins, R., Courtney, W., Dunsworth, A., Farhi, E., Foxen, B., ... Martinis, J. M. (2019). Quantum supremacy using a programmable superconducting processor. *Nature*, 574(7779), 505–510. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1666-5>
- (2) Google Quantum AI. (2023). Suppressing quantum errors by scaling a surface code logical qubit. *Nature*, 614(7949), 676–681. <https://doi.org/10.1038/s41586-022-05434-1>
- (3) Biamonte, J., Wittek, P., Pancotti, N., Rebentrost, P., Wiebe, N., & Lloyd, S. (2017). Quantum machine learning. *Nature*, 549(7671), 195–202. <https://doi.org/10.1038/nature23474>
- (4) Hu, J., Jin, S., Liu, N., & Zhang, L. (2024). Quantum Circuits for partial differential equations via Schrödingerisation. *Quantum*, 8, 1563. <https://doi.org/10.22331/q-2024-12-12-1563>
- (5) Tennie, F., & Palmer, T. N. (2023). Quantum Computers for Weather and Climate Prediction: The Good, the Bad, and the Noisy. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 104(2), E488–E500. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-22-0031.1>
- (6) Khouider, B., Biello, J., & Majda, A. J. (2010). A stochastic multicloud model for tropical convection. *Communications in Mathematical Sciences*, 8(1), 187–216. <https://doi.org/10.4310/cms.2010.v8.n1.a10>
- (7) Xin, T., Wei, S., Cui, J., Xiao, J., Arrazola, I., Lamata, L., Kong, X., Lu, D., Solano, E., & Long, G. (2020). Quantum algorithm for solving linear differential equations: Theory and experiment. *Physical Review A*, 101(3), 032307. <https://doi.org/10.1103/physreva.101.032307>
- (8) Javadi-Abhari, A., Treinish, M., Krsulich, K., Wood, C. J., Lishman, J., Gacon, J., Martiel, S., Nation, P. D., Bishop, L. S., Cross, A. W., Johnson, B. R., & Gambetta, J. M. (2024). Quantum computing with Qiskit. In *arXiv [quant-ph]*. arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2405.08810>

海洋モデルを用いたケーブダン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
中山 佳洋, 北海道大学・低温科学研究所, E-mail: 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
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 500-m resolution model, we investigated the downslope flow and transport of Dense Shelf Water (DSW) from the shelf off Cape Darnley Polynya (CDP, East Antarctica) to the oceanic bottom through the Wild Canyon and its network of sub-canyons. We made a thorough comparison of the model data with observations from three moorings located across a narrow canyon. The model accurately reproduces the 2-D structure of hydrographic properties and velocity, with the presence of a bottom-intensified downslope (upslope) flowing current on the western (eastern) flank of the canyon. The current velocity time series from the model and observations also exhibited comparable variations. The model is then fully validated by observations.

1. Introduction

In several locations in the Southern Ocean, cold and salty DSW forms in winter due to strong atmospheric cooling and sea ice production. The DSW production and subsequent downslope flow from the shelf to the offshore is crucial because DSW contributes 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. 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 models are particularly helpful to study this topic. A high-resolution is preferable due to the downslope flow being enabled by small-scale topographic disturbances. Previously, we used a 500-m horizontal resolution model to describe the DSW downslope flow process. However, validation of the model data with observations was needed to confirm the results. In 2019, three moorings were deployed for a year across a 20-km wide canyon part of the Wild Canyon system (Mizuta et al., 2024). Here, we use the salinity, temperature, and current velocity data from these moorings to compare with our 500m-resolution model, with the advantage that the location of the moorings on the western, central, and eastern side of the Canyon allowed us to also evaluate the model ability to reproduce the 2-D flow structure.

2. Model and experimental 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. Here, after including the latest bathymetry data acquired by various Japanese research vessels and the Japanese icebreaker *Shirase*, we ran the 500-m resolution model for the year 2019 following a 1-year spin-up. The comparison dataset consists of 3 moorings W1, W2, and W3, deployed between 2200 m and 2600 m depth across a 20-km wide canyon located around 67.7 S – 66.7 E (Fig. 1). The moorings were deployed in February 2019 and included CTD probes and current meters spread from 40 m to 300 m above the bottom, as well as ADCPs deployed at the bottom.

3. Results

The modelled cross-canyon structure of hydrographic properties and current velocity exhibits remarkable similarities with the observations. The model 2-D structure of along-flow velocity is consistent with observations, exhibiting a contrast between a bottom-intensified downslope current on the western flank of the canyon and an upslope current on the eastern side of the model (Fig. 2). The bottom-intensification of the upslope current could not be verified due to the absence of current measurement far above the bottom but is most likely accurate given the distribution of hydrographic properties and the geostrophic dynamics governing the flow within the canyon. Both the temperature, salinity and density isolines slope downward from west to east (Fig. 3), highlighting how the colder and denser water flows on the western flank of the canyons. While the model temperature is slightly colder than the observations, the modelled salinity closely matches the observations. Consequently, we could define the

newly-formed CDBW as the layer with σ_{2500} greater than 39.487 kg.m^{-3} , vs. 39.46 kg.m^{-3} for the observations (Mizuta et al., 2024). We note that the flow structure in this canyon, with a downslope flow (western flank) and a counter current (eastern flank) is common to all the sub-canyons of the Wild Canyon system according to our model.

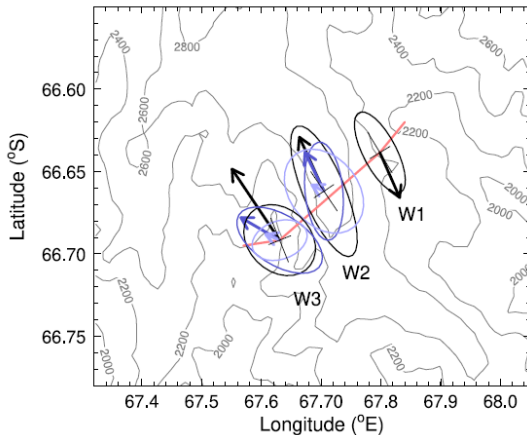


Fig. 1 Time-averaged current velocity at the 3 moorings W1-W2-W3 (Mizuta et al., 2024). represented by the colored lines.

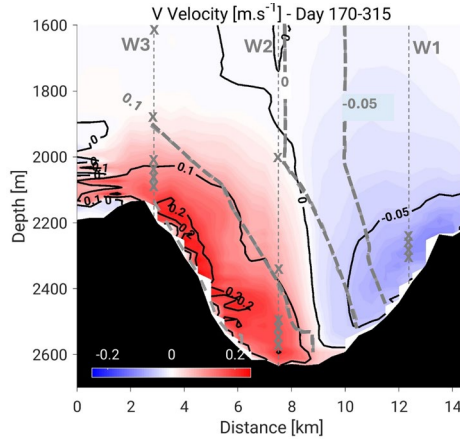


Fig. 2 Time-averaged current velocity section with the model results in color shade and black isolines, and the mooring results as dashed-gray isolines. Mooring measurement's locations are indicated by gray crosses.

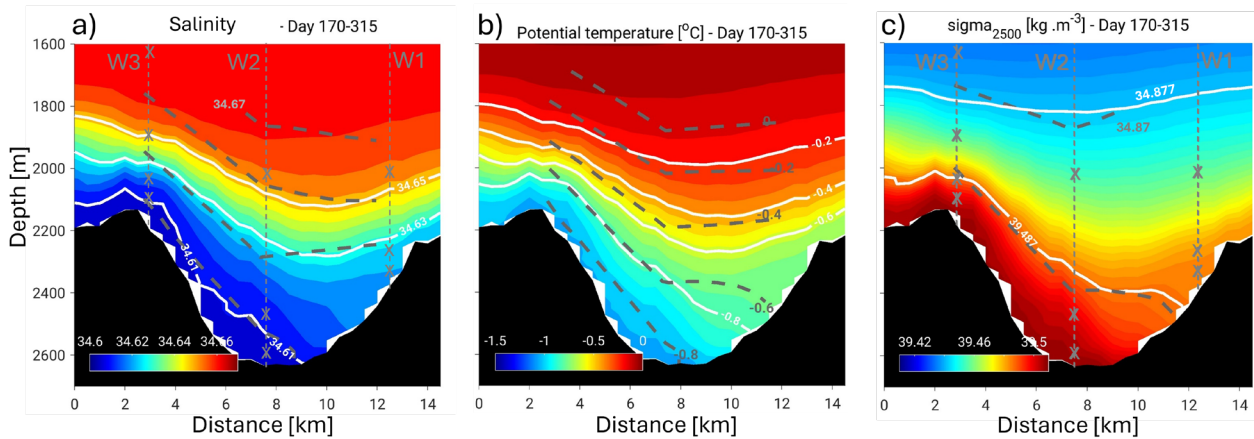


Fig. 3 Time-averaged cross-section of (a) Salinity, (b) Potential Temperature, and (c) σ_{2500} with the model results in color shade and white isolines, and the mooring results as dashed gray isolines.

4. Conclusion and future work

The comparison between mooring observations and our model in a narrow canyon yielded good results that enabled us to validate our model results and give us confidence about our previous model-based description of the downslope flow of DSW through the canyon system. Importantly, these findings allowed us to refine our definition of modelled CDBW. The downslope flow presents river-like features, with small tributaries (the narrow canyons) merging into rivers of increasingly large width (the larger canyons) before forming the main river (the largest downslope flow at the bottom of the canyon). We plan to submit a manuscript describing these findings this fiscal year. Once the works related to this topic and paper submission will be completed, we will focus our efforts on running a large-scale, high resolution ($\sim 4\text{km}$ at most) model in East Antarctica.

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.
- Mizuta, G., Ohshima, K. I., Takatsuka, T., Kitade, Y., Fujii, M., Nakayama, Y., & Ikehara, M., 2024. Circulation and production of Cape Darnley Bottom Water on the continental slope off the Cape Darnley polynya, East Antarctica. Deep Sea Research Part I, 211, 104362.

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, 鎌田 有紘, 狩生 宏喜, 古林 未来, 池田 有里, 鹿志村 樹, 佐藤 礼一,
東北大・理, E-mail: tkuroda(at)tohoku.ac.jp (黒田)
小玉 貴則, 東京科学大・地球生命研究所
佐藤 正樹, 阿部 彩子, 東大・大気海洋研
Takeshi Kuroda, Arihiro Kamada, Hiroki Karyu, Mirai Kobayashi, Yuri Ikeda, Itsuki Kashimura,
Reiichi Sato, Graduate School of Science, Tohoku University
Takanori Kodama, Komaba Institute for Science, The University of Tokyo
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計算から求めた地下水分分布の空間不均一性について論文発表し(Kobayashi et al., 2025), また最近 100 万年の火星においてレゴリス水吸着と軌道傾斜角変動を導入した地下水環境の計算, さらに初期火星に導入していた全球気候・地表流水・氷床カップリング計算の太陽系外惑星(TRAPPIST-1e)環境への適用について進展があったので, それらを紹介する.

1. はじめに

我々はいかねてから, 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 Moons eXploration) ミッション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_2 の混合比に応じた液体の降雨が存在する温暖なケース(H_2 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_2 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_2 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)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). 前年 2023 年度にはこれらの計算に約 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)を導入した改良を行い, 得られた地表流水・氷床分布と Valley Networks 分布との整合性が従前の軌道傾斜角固定計算より 4% ほど向上した(Kamada et al., 2023). この手法は異なる時代の火星, さらに太陽系外惑星などの異なる天体に適用することで, 汎惑星水環境・ハビタビリティの理解がより深まることが期待できる.

2. 問題設定・方法

MIROC4 をベースとした火星大気・表層水環境結合モデルの MIRAI (Mars climate model with water Interaction between the Regolith, Atmosphere, and pore Ice) (Kobayashi et al., 2025) を地下深さ 1 km まで拡張して, 水平分解能 T10 で長期積分を行った. 大気は鉛直 15 層(上端高度 60 km), 地表気圧 7 hPa で地下の温度と水輸送を 16 層で解き, 軌道要素変動(Lasker et al., 2004)を考慮した 100 万火星年前から現在までの積分計算を行った.

また, 太陽系外の赤色矮星を 0.028 AU の軌道長半径で 6.1 日周期で周回し, ハビタブルゾーンに位置していると考えられている惑星 TRAPPIST-1e (Gillon et al., 2017) について, 初期火星と同様に GCM による気候計算と地表流水・氷床生成をカップリングさせた水環境の推定計算を行った. 潮汐固定(公転周期=自転周期)の設定で, まずモデル間相互比較のプロトコル(Faucher et al., 2020)に従い, 水平分解能 T21, 鉛直 30 層, 地表気圧 1 bar で $N_2 + 400$ ppm CO_2 大気と純粋 CO_2 大気の計算をそれぞれ地表全球陸面及び全球海面(海洋循環なし)の場合について計算した. 続けて昼面を海, 夜面を陸として CRIS・ALICE とカップリングさせ, また液体水の地中への浸透も考慮して 10 万周回分時間積分した「現実的水環境計算」を行った.

3. 結果と考察

図 1 と図 2 にそれぞれ 100 万火星年前~現在の長期積分計算で得られた地下水量の水平(カラム量)及び緯度-深さ分布を示す. 100 万火星年計算の間において年平均地表気温に大きな変化は見られなかったが, 軌道傾斜角が 30 度以上になると極地の夏が暖くなる影響で全球での水蒸気量が増加し, それに伴い地下への水の輸送も促進される様子が見られた. 地下水量は低~中緯

度では 1 cm 以内の浅い部分に東西平均で最大 50 kg m^{-3} , 中～高緯度では深さ 0.5~5 m をピークに最大で 200 kg m^{-3} を超えて存在することが示された。また深さ 1.5 m までのカラム量で見ると緯度 30 度以上の中～高緯度では 100 kg m^{-2} を超える一方で、それ以下の低緯度では $0.1\sim 1 \text{ kg m}^{-2}$ に留まった(Kamada et al., 2024a)。表層数 cm 程度の浅い地下水量は、約 12 万年周期で変動する軌道傾斜角の変化に伴う大気水蒸気量・表層環境変化の変動の影響を強く受ける。一方で数 m 程度のより深い地下の水量はこれらの影響を受けにくく、我々の研究結果はこの深さの地下水(氷)は 10 万年スケール以上の長期にわたって安定して存在しうることを示した。Mars Odyssey 搭載ガンマ線分光計(GRS)によって観測された地下の水素(水に相当)量(Feldman et al., 2004)と比較しても、我々のモデルが示した地下水カラム量は定性的によく整合していた。

TRAPPIST-1e の気候計算についても、得られた温度場の結果は他モデルの相互比較(Turbet et al., 2022; Seegeev et al., 2022)と概ね整合し、「現実的水環境計算」の初期結果では夜面(陸面)での氷床の形成が見られ、特に温暖な純粋 CO_2 大気を仮定した計算では地表流水も再現された(Kamada et al., 2024b)。

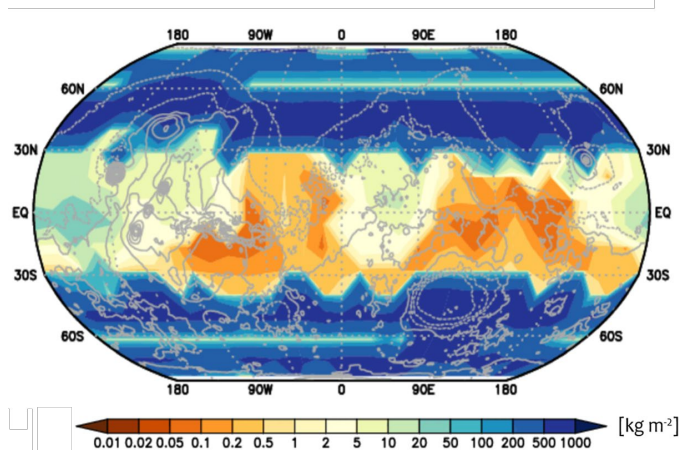


Fig. 1: Simulated amount distribution of subsurface water (sum of adsorbed water and ice) in 0-1.5 m from the surface on Mars (in kg m^{-2}) after the recent 1-million-Martian-year calculation (Kamada et al., 2024a).

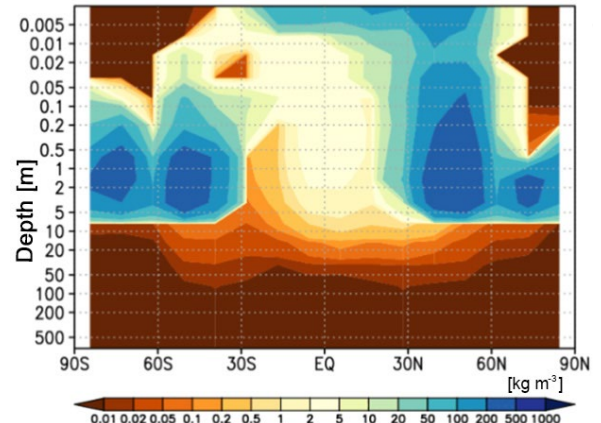


Fig. 2: Simulated latitude-ground depth distributions of zonal-mean subsurface water (sum of adsorbed water and ice) (in kg m^{-3}) after the recent 1-million-Martian-year calculation (Kamada et al., 2024a).

4. まとめと今後の展望

今後のモデル開発に向けた課題としては、GRS 観測による火星地下水量推定ではモデルで仮定した間隙率(~40%)を上回る水分量も示されており、これは含水粘土鉱物の存在を示唆している。よって岩石の水和反応によって地中に固定される水の影響も今後シミュレーションで考慮していく必要がある。またこれらの結果は、我々が進める初期から現在に至るまでの火星水環境進化の解明、さらにその惑星への展開に向けた途中経過であり、今後さらなる検証を行い将来探査・観測に貢献することを見込んでいる。

加えて初期から現在に至るまでの金星の気候進化シミュレーションにも着手しており、特に雲やエアロゾルの放射効果がマグマオーシャン状態からの惑星冷却にどの程度寄与するかについて研究を進めている。こちらの経過報告も次年度以降に行える見込みである。

参考文献

- (1) Kobayashi et al., 2025: Large Water Inventory in Highly Adsorptive Regolith Simulated with a Mars Global Climate Model. *J. Geophys. Res. Planets*, 130, e2024JE008697.
- (2) 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.
- (3) Kamada et al., 2021: Global climate and river transport simulations of early Mars around the Noachian and Hesperian boundary. *Icarus*, 368, 114618.
- (4) Kamada et al., 2022: Evolution of ice sheets on early Mars with subglacial river systems. *Icarus*, 385, 115117.
- (5) Kamada et al., 2023: Impact of the Obliquity Cycle on Early Martian Climate and Valley Network Formation. *AGU Annual Meeting 2023*, P21B-3009.
- (6) Lasker et al., 2004: Long term evolution and chaotic diffusion of the insolation quantities of Mars. *Icarus*, 170, 343–364.
- (7) Gillon et al., 2017: Seven temperate terrestrial planets around the nearby ultracool dwarf star TRAPPIST-1. *Nature*, 542, 456–460.
- (8) Kamada et al., 2024a: Modeling the evolution of water on Mars over the past millions of years. *JpGU 2024*, PPS06-12.
- (9) Feldman et al., 2004: Global distribution of near-surface hydrogen on Mars. *J. Geophys. Res.*, 109, E09006.
- (10) Fauchez et al., 2020: TRAPPIST-1 Habitable Atmosphere Intercomparison (THAI): motivations and protocol version 1.0. *Geosci. Model Dev.*, 13, 707–716.
- (11) Turbet et al., 2022: The TRAPPIST-1 Habitable Atmosphere Intercomparison (THAI). I. Dry Cases–The Fellowship of the GCMs. *Planet. Sci., J.*, 3, 211.
- (12) Seegeev et al., 2022: The TRAPPIST-1 Habitable Atmosphere Intercomparison (THAI). II. Moist Cases–The Two Waterworlds. *Planet. Sci., J.*, 3, 212.
- (13) Kamada et al., 2024b: Day-night water cycle dynamics on TRAPPIST-1e using an integrated global climate, hydrological, and glaciological model. *JpGU 2024*, PCG19-P10.

MIROC と NICAM を用いた潮汐固定地球型惑星の気候

Climates of tidally locked terrestrial planets with MIROC and NICAM

小玉 貴則, 東京科学大学・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, E-mail: tkuroda (at)tohoku.ac.jp
Takanori Kodama, Earth-Life Science Institute, Institute of Science Tokyo
Takeshi Kuroda, Tohoku University

要旨

観測技術の向上により、多くの系外惑星が検出され、その中には地球型惑星のような惑星も報告されている。しかしながら、現在は太陽型星のような恒星ではなく、より低質量の恒星がターゲットの中心となっており、低質量星周りの地球型惑星の理解が重要な研究テーマとして位置付けられている。このような地球型惑星は、恒星からの潮汐力の効果により、潮汐固定状態になっていると考えられる。よって、本研究課題では、潮汐固定された地球型惑星がどのような気候状態をとりうるのかに焦点を当て、気候モデル開発を行うことを目標とした。

1. はじめに

観測技術の向上により、既に5000天体を越える系外惑星が検出され、その中には、TRAPPIST1系やProxima Centauri bのような、ハビタブルゾーン内の地球型惑星と想定できる天体も報告されている。しかしながら、未だ太陽のようなG型星ではなく、より観測がしやすい低質量星(M型星)周りの地球型惑星が注目を集めており、観測も進んでいる。M型星はG型星に比べ低温で暗いため、ハビタブルゾーンは中心星近傍に位置している。そのため、M型星のハビタブルゾーンに位置すると考えられる軌道を持つ地球型惑星は、中心星からの潮汐力により、潮汐固定状態にあると想定される。潮汐固定状態とは、自転周期と公転周期が同期している状態であり、その惑星は恒久的な昼面と夜面を持つと考えられている。

このような潮汐固定された地球型惑星のハビタビリティや気候形成を検討することが、多くの観測計画において重要な課題であり、必要急務の課題として認識されている。これまでの惑星のハビタビリティの検討は、鉛直1次元モデルに基づいた全球平均的な検討が主流であったが、潮汐固定惑星のような空間的な非一様性を持つ環境の場合、3次元的な物理現象を捉える必要がある。近年の計算資源の増大により、3次元大気大循環モデルを用いた系外地球型惑星に関する気候シミュレーションが行われ始め、気候の特徴が理解されてきた。しかしながら、気候システムを構築するサブシステム(大気、海洋、氷床、大陸、雲など)の全球気候への影響を定量的に評価し、理解するためには大気海洋結合モデルや雲解像モデルの開発が重要な課題となる。

2. 目的と目標

大気海洋結合モデル(MIROC4m)を潮汐固定された地球型惑星に適用し、大気海洋結合モデル気候実験を行う。その後、NICAMも同様に潮汐固定された地球型惑星に適用し、気候実験が行えるように整備を行う。MIROC と NICAM の放射部分に関しては共通している箇所が多くあるため、系外惑星化における放射部分の改良は同時に行なった。恒星スペクトルに関しては、BT-Settle モデルを用いて、有効放射温度 2700[K]の恒星スペクトルを再現し、中心星放射と惑星放射をそれぞれ別々に扱えるようにコード整備を行なった。これは、中心星の有効放射温度が低い恒星スペクトルのウィーンピークが赤方よりになるため、これまでのようなある波長で区切る、恒星放射と惑星放射の取り扱いができなくなるからである。また、気体吸収テーブルの更新も行なった。

3. 結果と展望

MIROC と NICAM をベースとした潮汐固定された地球型惑星化の整備が完了した。今後、富岳やES4において、長期積分を実施する予定であり、エネルギー輸送の観点から全球気候における気候決定メカニズムの解析を行う予定である。

4200 年前の日射条件がメソポタミア地域の日降水強度に与える影響

Orbital Condition of 4.2 ka Modified Daily Precipitation Intensities in the Mesopotamia Region

木野 佳音, 東大・工学系, E-mail: kanon(at)hydra.t.u-tokyo.ac.jp
Kanon Kino, Graduate School of Engineering, The University of Tokyo

要旨

人間社会に影響を与えた半球規模の乾燥・冷却イベントである 4.2 ka イベントの原因は未だ十分に解明されていない。ミランコビッチ・サイクルによる日射条件の長期的変化が気候内部変動に影響した可能性が指摘されているが、日単位の降水特性に与える影響は不明である。本研究では、全球気候モデル

(MIROC6) を用いて、4.2 ka の日射条件がメソポタミア地域における日降水強度分布や無降水日の頻度に与えた影響を評価した。その結果、4.2 ka の日射条件は、総降水量が変わらない地域でも降水の頻度や強度に顕著な影響を与え、特に極端降水イベントの増加や降水の季節性の変化を引き起こした。

1. はじめに

気候変動が極端気象現象の特性に影響を及ぼすことは現代の気候研究から明らかである (Seneviratne et al., 2023)。しかし、古気候研究においては、短期的な降水特性に関する調査は依然として少ない (Kong et al., 2024)。日単位といった短時間スケールの降水イベントは、古気候プロキシ記録にバイアスを生じさせる可能性があるため (Kino et al., 2021, 2024)、各時代における降水特性を理解することは重要である。

完新世中期から後期への移行期にあたる約 4,200 年前 (4.2 ka; Walker et al., 2019) は、世界各地で大規模な干ばつが発生した「4.2 ka イベント」として知られている (Helama, 2024; Weiss, 2016)。特にメソポタミア地域では、この時期にアッカド帝国の崩壊が起こり、気候変動と社会変動の関連性を示す重要な事例となっている (Weiss, 2016)。しかし、その原因については未だ十分に解明されておらず、ミランコビッチ・サイクルによる長期的な日射条件の変化が気候内部変動に影響を及ぼした可能性など、さまざまな仮説が提唱され、議論が続いている (Bini et al., 2018; Bond et al., 1997; Booth et al., 2005; Cookson et al., 2019; Gomez et al., 2004; Mayewski et al., 2004; Nakamura et al., 2016; Renssen, 2022; Yan and Liu, 2019; Zanchetta et al., 2016)。

このように、4.2 ka の時代は、日射条件の変化が極端気象にどのような影響を与えたかを検討する上で、最適な対象時代であると考えられる。そこで本研究では、議論が続く 4.2 ka の時代に着目し、当時の日射条件が降水の頻度や強度にどのような影響を与えたのかを、全球気候モデルを用いて調査した。

2. 方法

全球大気海洋結合モデル (MIROC6; Tatebe et al., 2019) を使用し、産業革命前 (PI) および 4.2 ka の太陽放射条件下で準平衡応答実験を実施した。4.2 ka の日射条件には、第 6 次気候モデル相互比較プロジェクト (CMIP6; Eyring et al., 2016) のデフォルト値 (離心率 0.01672、気候的歳差角 102.04°、傾斜角 23.45°) および、Laskar et al. (2004) による計算値 (離心率 0.018264、気候的歳差角 31.87°、傾斜角 23.945°) を採用した。

解析対象地域は、メソポタミア地域に位置する鍾乳石サイト (Jeita Cave、Jerusalem West Cave、Gol-E-Zard Cave、Hoq Cave、Qunf Cave) および当時の古代都市 Tel Leilan とした。

3. 結果

4.2 ka の日射条件下では、北アフリカからインド亜大陸にかけて年間降水量が増加し、カスピ海およびその南東部 (アフガニスタン) では減少した。一方、地中海沿岸・内陸・カスピ海沿岸に位置するサイト (Jeita Cave、Jerusalem West Cave、Tel Leilan、Gol-E-Zard Cave) では、年間降水量に顕著な変化は見られなかった。

しかし、これらを含むすべての研究対象サイトにおいて、日降水強度分布には明確な変化が確認された。特に、地中海沿岸および内陸部 (Jeita Cave、Jerusalem West Cave、Tel Leilan) では、雨季初期から中期にかけて数十年に一度の極端降水イベントの強度が増加し、雨季末期には降水がより穏やかに持続する傾向が見られた。カスピ海沿岸に位置する Gol-E-Zard Cave では、春から夏にかけての降水量が顕著に増加し、冬季には降水強度が減少するとともに無降水日が大幅に増加するという特異な季節変化が観測された。また、インド洋沿岸 (Hoq Cave、Qunf Cave) では、極端降水の強度が弱まり、無降水日が減少することで、より穏やかな降水が見られるようになった。以上より、4.2 ka の日射条件は、メソポタミア地域各地において異なる降水特性をもたらしたことが明らかとなった。

4. 議論

本研究で得られた結果は、鍾乳石の酸素同位体比変動を解釈する上で重要な示唆を与える。低緯度地域における降水の酸素同位体比は、降水量が多いほど値が低くなる傾向が経験的に知られており (Yoshimura, 2015)、特に極端降水イベント時には酸素同位体比が低下すると考えられる。したがって、各サイトの降水特性を考慮する際には、鍾乳石記録の解釈において個別に補正を行う必要があることが示唆される。一方、Hoq Cave のように年降水量が約 30% 増加し、無降水日が約 5% 減少した例を除けば、今回確認された降水特性の変化は、古気候プロキシで要求される復元精度に対して概ね無視できると考えられる。ただし、これは空間解像度の粗い全球気候モデルの結果に基づくものであり、今後は高空間解像度の領域モデルを用いた追加検証が必要であ

る。

5. まとめと今後の展望

本研究では、4.2 ka の日射条件が、総降水量だけでなく降水イベントの強度や無降水日数にも大きな影響を与えたことを示した。また、得られた降水特性の変化はサイトごとに異なっており、鍾乳石の酸素同位体比などの古気候指標の解釈に重要な示唆を与えるものであった。高解像度領域モデルや水同位体モデルを用いて、これらの変化の詳細なメカニズムを解明し、他の古気候イベントや地域への応用を進める必要がある。

参考文献

- (1) Kino, K., A. Okazaki, A. Cauquoin, and K. Yoshimura, 2021: "Contribution of the southern annular mode to variations in water isotopes of daily precipitation at Dome Fuji, East Antarctica." *J. Geophys. Res. Atmos.*, 126(23), e2021JD035397. <https://doi.org/10.1029/2021jd035397>
- (2) Kino, K., A. Cauquoin, A. Okazaki, T. Oki, and K. Yoshimura, 2024: "Synoptic moisture intrusion provided heavy isotope precipitations in inland Antarctica during the Last Glacial Maximum." *Geophys. Res. Lett.*, 51(8), e2024GL108191. <https://doi.org/10.1029/2024gl108191>
- (3) Kong, X., Q. Yan, and T. Wei, 2024: "Weakened and lowered sensitivity of extreme precipitation over the global land monsoon regions during the Last Glacial Maximum." *Geophys. Res. Lett.*, 51(23). <https://doi.org/10.1029/2024gl110867>
- (4) Seneviratne, S. I., X. Zhang, M. Adnan, W. Badi, C. Dereczynski, A. Di Luca, et al., 2023: "Weather and climate extreme events in a changing climate." In V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, et al. (Eds.), *Climate Change 2021 – The Physical Science Basis*, Cambridge University Press, 1513–1766. <https://doi.org/10.1017/9781009157896.013>
- (5) Walker, M., M. J. Head, J. Lowe, M. Berkelhammer, S. Björck, H. Cheng, et al., 2019: "Subdividing the Holocene Series/Epoch: Formalization of stages/ages and subseries/subepochs, and designation of GSSPs and auxiliary stratotypes." *J. Quat. Sci.*, 34(3), 173–186. <https://doi.org/10.1002/jqs.3097>
- (6) Weiss, H., 2016: "Global megadrought, societal collapse and resilience at 4.2–3.9 ka BP across the Mediterranean and West Asia." *Past Global Change Mag.*, 24(2), 62–63. <https://doi.org/10.22498/pages.24.2.62>
- (7) Yoshimura, K., 2015: "Stable water isotopes in climatology, meteorology, and hydrology: A review." *J. Meteor. Soc. Japan*, 93(5), 513–533. <https://doi.org/10.2151/jmsj.2015-036>
- (8) Bini, M., G. Zanchetta, A. Perçoiu, R. Cartier, A. Català, I. Cacho, et al., 2018: "The 4.2 ka BP Event in the Mediterranean region: An overview." *Clim. Past*, 15(2), 555–577. <https://doi.org/10.5194/cp-15-555-2019>
- (9) Bond, G., W. Showers, M. Cheseby, R. Lotti, P. Almasi, P. deMenocal, et al., 1997: "A pervasive millennial-scale cycle in North Atlantic Holocene and glacial climates." *Science*, 278(5341), 1257–1261. <https://doi.org/10.1126/science.278.5341.1257>
- (10) Booth, R. K., S. T. Jackson, S. L. Forman, J. E. Kutzbach, E. A. Bettis III, J. Kreigs, and D. K. Wright, 2005: "A severe centennial-scale drought in midcontinental North America 4200 years ago and apparent global linkages." *Holocene*, 15(3), 321–328. <https://doi.org/10.1191/0959683605hl825ft>
- (11) Cookson, E., D. J. Hill, and D. Lawrence, 2019: "Impacts of long term climate change during the collapse of the Akkadian Empire." *J. Archaeol. Sci.*, 106, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2019.03.009>
- (12) Gomez, B., L. Carter, N. A. Trustring, A. S. Palmer, and A. P. Roberts, 2004: "El Niño–Southern Oscillation signal associated with middle Holocene climate change in intercorrelated terrestrial and marine sediment cores, North Island, New Zealand." *Geology*, 32(8), 653. <https://doi.org/10.1130/G20720.1>
- (13) Mayewski, P. A., E. E. Rohling, J. Curt Stager, W. Karlén, K. A. Maasch, L. D. Meeker, et al., 2004: "Holocene climate variability." *Quat. Res.*, 62(3), 243–255. <https://doi.org/10.1016/j.yqres.2004.07.001>
- (14) Nakamura, A., Y. Yokoyama, H. Maemoku, H. Yagi, M. Okamura, H. Matsuoka, et al., 2016: "Weak monsoon event at 4.2 ka recorded in sediment from Lake Rara, Himalayas." *Quat. Int.*, 397, 349–359. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2015.05.053>
- (15) Renssen, H., 2022: "Climate model experiments on the 4.2 ka event: The impact of tropical sea-surface temperature anomalies and desertification." *Holocene*, 32(5), 378–389. <https://doi.org/10.1177/09596836221074031>
- (16) Yan, M., and J. Liu, 2019: "Physical processes of cooling and mega-drought during the 4.2 ka BP event: Results from TraCE-21ka simulations." *Clim. Past*, 15(1), 265–277. <https://doi.org/10.5194/cp-15-265-2019>
- (17) Zanchetta, G., E. Regattieri, I. Isola, R. Drysdale, M. Bini, I. Baneschi, and J. Hellstrom, 2016: "The so-called '4.2 event' in the central Mediterranean and its climatic teleconnections." *Alpine Mediterr. Quat.*, 29(1), 5–17. Retrieved from <https://amq.aiqua.it/index.php/amq/article/view/91>

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。金星大気の物理過程（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を拡張し、雲物理モデルの開発を進めた。平行して短波放射輸送モデルの開発および長波放射輸送モデルの改良を行った。雲頂高度のアルベド変動に伴う大気大循環の長期変動メカニズムを調べ、スーパーローテーションの風速変動が主に熱潮汐波によって作られていることを明らかにした。金星大気の下部雲層中で発見された総観規模の渦を数値モデルで再現することにより、渦の成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、昨年度までに開発した大気化学モデルを拡張し、新たな雲物理モデルの開発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、金星大気の下部雲層中に存在する総観規模渦の解析を行った。

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、大気の大気構造や大循環に極めて大きな影響を与えている。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（H₂SO₄）を中心とする大気化学・雲物理モデルを構築することにより、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。今年度は、大気主成分である二酸化炭素 CO₂ 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 SO₃ と水 H₂O の反応による硫酸ガス H₂SO₄ の生成反応に加えて、我々の過去の研究（Ando et al., 2020, 2021）に基づく雲物理プロセスの改良に着手した。従来のモデルでは濃硫酸エアロゾルの濃度を固定していたために、上部雲層の雲量が過小評価されるという問題があった。今回は硫酸エアロゾルの濃度を

モデルの中で適切に決定するため、より現実的な雲分布が再現されるものと期待される。現在、モデルの実装作業をほぼ完了し、モデルパラメータのチューニングを行っているところである。

短波放射輸送モデルの開発を進め、先行研究 (Haus et al., 2015) をほぼ再現するモデルの開発に成功した。現在、研究論文を準備中である。一方、これまでに開発した長波放射モデルを GCM に組み込んでテストを行った結果、金星上層の温度構造に観測と整合しない、やや不自然な結果が得られた。この点を改良すると同時に、準拠している吸収線データベースの更新し、モデルの再構築を図っているため、完成までにはもう少しばかり時間を要する見込みである。また、放射輸送モデルをニュートン冷却近似すると、どうしても下部雲層の低安定度層が再現できないこともわかった。そこで代替策として、現在放射輸送過程を金星大気にあわせてチューニングした灰色大気の放射輸送モデルで表現する作業を進めており、これを金星版 NICAM に組み込む作業も開始した。今後、精密な長波放射モデルの開発と並行して、この新しい数値モデルを用いた熱潮汐波の鉛直伝播に関する数値実験を進める予定である。

金星探査機あかつきに搭載された IR2 カメラの金星夜面観測によって、低緯度の下部雲層（高度 50–60 km 付近）に総観規模スケールの渦構造が発見された。渦の中心領域には明瞭な雲（雲の光学的厚さ）のコントラストがみられ、雲の模様から推定された水平風速の分布は、この渦が低気圧性の回転をしていることを示している。本研究では、この総観規模渦を金星 GCM を用いて再現し、その構造および成因を詳しく調べた (Imai et al., 2025)。その結果、この渦は中緯度ジェットの南北シアによる順圧不安定によって励起されることがわかった。線型安定性解析の結果、最大成長率モードが観測された渦の水平スケールや成長時間を説明することが示された。渦は南北温度傾度の大きい緯度帯で発生し、渦の存在する領域では等温位面が大きく南北に傾いている。渦に伴う水平風は等温位面に沿って運動するため、 z 座標あるいは p 座標でみると南風領域で上昇流、北風領域で下降流が作られる。この鉛直流に伴う断熱変化により空気塊には大きな温度偏差が作られ、雲の凝結・蒸発が生じるために、大きな光学的厚さのコントラストが作られるものと考えられる。北半球で中緯度ジェットが発達すると、順圧不安定によって渦が作られる。こうして北半球で渦が発達すると、それが南半球で減衰しつつある古い渦とカップリングすることにより、赤道を越える南向きの角運動量輸送が引き起こし、南半球の中緯度ジェットを強めると同時に、北半球の中緯度ジェットを弱める。南半球で中緯度ジェットが発達すると、順圧不安定によって渦が作られる。南半球で渦が発達すると、それが北半球で減衰しつつある古い渦とカップリングすることにより、赤道を越える北向きの角運動量輸送が引き起こされる。このような南北両半球の渦と中緯度ジェットの相互作用により、60 地球日程度の準周期的な総観規模渦と中緯度ジェットの変動が引き起こされる。また、GCM の結果から、この現象は 5.8 日波 (Takagi et al., 2022, 2023) の活動とも密接な関係を持っていることが示唆された。今後は、観測との比較により準周期変動の検証を行うとともに、南北両半球の渦の力学的な結合メカニズムについても検討する予定である。

金星雲頂付近の紫外アルベドが数年から 10 年スケールで長期変動し、これと同期して雲頂高度の平均東西風（大気スーパーローテーション）が 20–30 m/s の振幅で変動している可能性が指摘されている。この金星上層大気の大規模な気候変動の原因を解明するため、紫外アルベドの変化に伴う太陽加熱強度の変動を大気大循環モデル (GCM) に組み込み、平均東西風の時間変動を再現することに成功した。解析の結果、平均東西風の変動は主に熱潮汐波の鉛直角運動量輸送によって引き起こされていることを明らかにした。現在、研究論文を準備中である。

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、金星下部雲層の総観規模渦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) Imai et al., 2025: A GCM study of synoptic-scale vortices in the lower cloud layer on Venus. *Icarus*, 433, 116523. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2025.116523>
- (2) 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>
- (3) 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>

熱帯域の海洋変動過程に関する研究

Research on Oceanic Processes in Tropical Regions

升本 順夫, 東大・理学系研究科, E-mail: masumoto (at) eps.s.u-tokyo.ac.jp
久住 空広, 東大・理学系研究科, E-mail: kusumi (at) eps.s.u-tokyo.ac.jp
寺田 雄亮, 東大・理学系研究科, E-mail: terada (at) eps.s.u-tokyo.ac.jp
穴見 武司, 東大・理学系研究科, E-mail: anami (at) eps.s.u-tokyo.ac.jp
岩佐 優輝, 東大・理学系研究科, E-mail: hiwasa (at) eps.s.u-tokyo.ac.jp
Yukio Masumoto, Graduate School of Science, The University of Tokyo
Takahiro Kusumi, Graduate School of Science, The University of Tokyo
Yusuke Terada, Graduate School of Science, The University of Tokyo
Takeshi Anami, Graduate School of Science, The University of Tokyo
Hiroki Iwasa, Graduate School of Science, The University of Tokyo

要旨

熱帯域起源の気候変動現象や大規模な海洋循環変動を理解し予測するためには、海洋内部の変動過程の理解も不可欠である。本研究では、さまざまな複雑さを持つ数値モデルを用いて、太平洋とインド洋の熱帯海洋で見られる変動現象のメカニズムを明らかにする。今年度は、インド洋のアラビア海西部における北半球夏季の海面水温の経年変動機構および東部太平洋赤道域の海洋中層における東西平均流の励起機構の研究を行なった。その結果、アラビア海西部の海面水温変動では、局所的な湧昇過程に加えて遠隔的なロスビー波伝播の影響が重要であること、東部太平洋赤道域の中層東西流では、柳井波の鉛直伝播によるエネルギー輸送および柳井波と背景流との相互作用によって平均的な西向き流が励起されていることが明らかになった。

1. はじめに

熱帯域の大気海洋相互作用やそれに関連する表層海洋の変動過程は、熱帯域起源の気候変動現象を理解し、予測するために重要である。また、海洋の中深層での変動は、大規模で長期の海洋循環変動に関連し、気候の準定常状態や長周期の変動や変化を考える際に不可欠である。そこで本共同研究では、高解像度の海洋循環モデルから比較的簡単なモデルまでの多様なモデルを用いて、熱帯域を中心とした様々な時空間規模の海洋変動を対象として、それらの発生機構や維持・変動機構を明らかにすることを目的とする。特に太平洋・インド洋域に着目し、アラビア海西岸境界流の変動過程および太平洋赤道域の中層東西ジェット構造の励起と維持機構について研究を行なった。

2. アラビア海西部における夏季海面水温の経年変動

夏季アジアモンスーンの経年変動には、アラビア海西部の海面水温偏差が大きく影響を与えていることが知られている。特にソマリア沿岸の湧昇域においては、モンスーンが弱い年には沿岸湧昇も弱まることで、正の海面水温偏差が現れることが示唆されている。しかし、アラビア海の西部に位置するソマリア沖湧昇域は、惑星波の伝播によりアラビア海全体の影響を受けるとともに、強い西岸境界流に伴う変動の影響も受けるため、そこでの海面水温の経年変動機構の詳細は明らかになっていない。そ

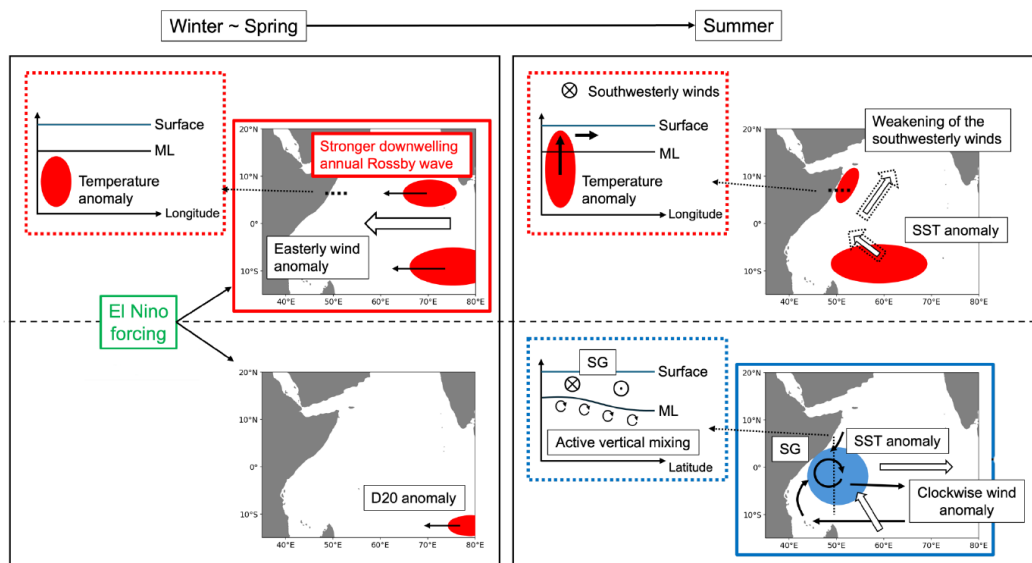


Fig. 1 Schematic diagrams illustrating the key findings. The upper panels show development of interannual positive SST anomaly and associated oceanic processes, while the lower panels indicate interannual evolution of cooler Southern Gyre and its related ocean processes.

こで、高解像度の領域海洋モデルを構築し、経年変動の再現結果の解析と、風応力を変えた感度実験を行うことで、ソマリア湧昇域での海面水温の経年変動をもたらす鍵となる海洋内部の変動メカニズムを調べた。

用いたモデルは領域海洋モデル ROMS をベースとしてアラビア海に適用したもので、水平格子間隔は 0.1 度、鉛直方向には 42 シグマレベルとして、ソマリ海流系や沿岸湧昇、海洋表層混合層が現実的に再現できるよう、各種のパラメータを設定した。この領域モデルを用い、JRA55-do を海面境界条件、ORAS5 のデータを海洋内の側面境界条件として与えた再現実験を行うとともに、海洋波動の励起源と考えられる風応力分布を修正した外力で駆動する感度実験も行った。

その結果、ソマリア湧昇域での海面水温が正の偏差を示す年には、夏季モンスーン発達期前の冬から春にかけてアラビア海東部から伝播して来る年周期ロスビー波の経年変調により、ソマリア沿岸域では 4～5 月頃に水温躍層付近に正の水温偏差が形成されること、その後、モンスーンの開始に伴って季節的な沿岸湧昇が活発化することにより、亜表層の水温偏差が表層混合層に取り込まれることで正の海面水温偏差をもたらしていることが分かった。この過程によって、ソマリア湧昇域北部での海面水温偏差の 8 割程度が励起され、局所的な南西モンスーンの弱化による沿岸湧昇の弱まりが作る海面水温偏差は 2 割程度であることが示された。また、ソマリア湧昇域が正の水温偏差を示す年には、その南側の赤道域では負の水温偏差を示すことが分かった。この負偏差は、春から夏にかけて発達する Southern Gyre がソマリア海流系の南部に停滞し、その北側で励起される湧昇に伴う冷水の移流に加え、ソマリ海流の強化によって鉛直混合が活発になることで励起されていることが明らかになった。(図 1)

3. 東太平洋赤道域の海洋中層東西平均流の励起機構

東太平洋の赤道に沿う深さ 500m から 3000m 程度までの中層では、長期平均場として西向き流があることが知られている。また、鉛直方向に東向きと西向きの流れが数百 m 毎に現れ、その位相が十数年の周期で下向きに伝播する赤道中層ジェット構造の存在も知られている。さらに、表層で励起される柳井波が中層へと伝播することが、これらの中層平均流や赤道中層ジェットのエネルギー源として示唆されているものの、これらの関係についての詳細は分かっていない。

そこで本研究では、主に Argo フロートデータと米国 NOAA/PMEL が継続的に設置している太平洋赤道域の係留系データを解析に用いた。また、MITgcm を用いて太平洋熱帯域を模した簡略化モデルを構築し、理想的な外力や現実的な風応力に対する応答を詳しく調べた。モデルの水平格子間隔は 0.25 度として、鉛直方向には中層での解像度も高めた 100 レベル設け、表層の不安定波動、柳井波の鉛直伝播、中層の海流系が現実的に再現されていることを確かめている。その際、南北境界で観測データに基づく水温の鉛直構造を与えることにより、モデル内部での平均的な鉛直成層構造を維持し、密度躍層の状況に敏感な表層不安定波動や柳井波の伝播過程を適切に再現できるように工夫した。得られた結果を用い、柳井波の鉛直伝播の特性と、柳井波が中層の平均的な西向き流をもたらすメカニズムを調べた。

その結果、表層の海流系から励起される柳井モードの不安定波動から、東向き、鉛直下向きのエネルギー輸送を伴う柳井波が励起されることが分かった。また、様々な周期の波動が励起されているものの、柳井波の分散関係を満たす周期帯のうち、赤道域の強い密度躍層の影響を受けず、かつ比較的短い水平距離で中層まで伝播できる周期帯の柳井波が中層まで伝播しやすいことが示された。さらに、平均流の運動量収支解析から、赤道中層ジェットは太平洋の西側で西向き、東側で東向きに流れを加速する一方、太平洋の東部で顕著な柳井波は平均的な流れの西向き流を選択的に加速する特徴を持つことが明らかになった。東部太平洋においては、柳井波による西向き加速が赤道中層ジェットによる東向き加速よりも大きいため、中層において西向きの平均流を励起していることが示された。(図 2)

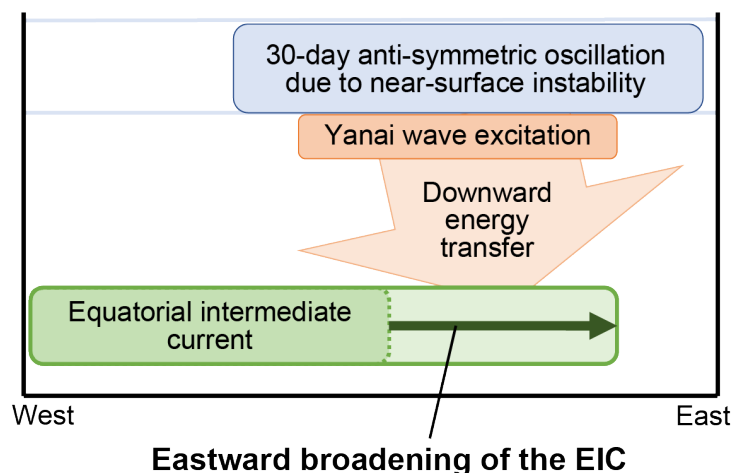


Fig. 2 A schematic diagram showing relations among the surface intraseasonal variability, Yanai wave propagation, and the Equatorial intermediate current in the equatorial Pacific Ocean obtained in the present study.

4. 今後の展望

アラビア海西部の海面水温変動については、ソマリ海流系に内在する不安定や強いソマリ海流に伴う非線形過程の影響なども海面水温変動に寄与していることも示唆されている。今後、領域モデルを用いたアンサンブル実験などを通じて、これらの影響の定量的な理解を進めることが必要である。

太平洋赤道域の中層平均流については、太平洋に特有の東部の西向き流の励起機構は明らかになったものの、西部で見られる強い西向き流のエネルギー源については未解明のままである。さらに、柳井波と平均流との相互作用には赤道中層ジェットと呼ばれる十数年周期で鉛直伝播する東西流変動が重要な役割を果たしているものの、この励起機構は必ずしも明らかではない。今後、これら未解明となっている変動についての研究を進めて行く必要がある。

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

今年度は、金星大気大循環モデルで見られた帯状平均場の内部変動について調査した。このモデルでは、帯状平均流や子午面循環が約1金星日周期で変動する。高緯度ジェットが極大に達したのち、24地球日遅れて赤道ジェットの極大が現れる。その高緯度ジェットと赤道ジェットの風速差は、赤道向き擾乱運動量フラックスの変動と同期する。赤道ジェットが極大に達した後、中低緯度の帯状平均南北流による極向き運動量フラックスが遅れて極大になる。その極向き運動量フラックスの増大時に、赤道ジェットと高緯度ジェットの風速差が強まる。この変動は、擾乱が主として駆動するのではなく、帯状平均子午面循環の脈動に伴うものである。

1. はじめに

さまざまな惑星探査の気象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、スーパーローテーションや大気波動の力学を明らかにする。本年度は、スーパーローテーションの長周期変動の3次元構造と運動量収支からみた成因を解明する。

(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, 2024)。今年度は、帯状平均流の加速率に基づき、スーパーローテーションの長周期変動の構造と成因を調査した。放射過程を簡略化した実験(Yamamoto 2024)では、ロスビー数のみを変化させる理想化実験を行った。

3. 結果と考察

金星大気大循環モデルで見られた帯状平均場の内部変動について調査した。「帯状平均東西風の最大値（高緯度ジェットの強度）の時系列」と「帯状平均赤道風の最大値（赤道ジェットの強度）の時系列」を比較すると、高緯度ジェットが極大に達したのち、24地球日のタイムラグで赤道ジェットの極大が現れる。その高緯度ジェットと赤道ジェットの風速差は、赤道向き擾乱運動量フラックスの変動と同期する。つまり、高緯度ジェットの影響が、擾乱を介して、遅れて赤道ジェットに伝わる様子が見られた。

次に、「雲頂の赤道ジェットがどのように高緯度に影響を与えるのか？」を明らかにするために、雲頂の「帯状平均南北流による運動量フラックス($\overline{uv}$)の時系列」を調べたところ、赤道ジェットが極大に達した後、中低緯度の帯状平均南北流による極向き運動量フラックスが遅れて極大になる。その極向き運動量フラックスの増大時に、赤道ジェットが減少し、高緯度ジェットが増大するので、赤道ジェットと高緯度ジェットの風速差が強まる。

帯状平均東西流($\overline{u}$)と帯状平均南北流($\overline{v}$)の変動は小さいが、その掛け合わせで算出される運動量フラックス($\overline{uv}$)の変動は大きい。他方、水平渦運動量フラックス($\overline{u'v'}$)は、赤道ジェットと高緯度ジェットの風速差を解消に寄与しているが、帯状平均南北流の運動量フラックスよりも一桁小さい。したがって、擾乱がこの内部変動を主として駆動するのではなく、帯状平均南北流による極向き運動量フラックスが、赤道ジェットと高緯度ジェットの風速差を強化し、帯状平均東西風の変動を維持する。この帯状平均流の変動は、地球・惑星でしばしば見られるQBOのような帯状平均流の長周期変動（波動-平均流の相互作用）と異なり、帯状平均子午面循環の脈動に伴う変動メカニズムである。

しかしながら、高緯度ジェットと子午面循環の変動の相関が弱まる時期が出現する。子午面循環の極向きの流れはジェットの低緯度側の帯状平均南北流による東西風加速率の変動と同期する。他方、ジェットの高緯度側の帯状平均南北流による東西風加速率では、1金星日周期変動がはっきりしない。これゆえ、高緯度ジェットの変動が、1金星日周期の子午面循環と常に高い相関を持つことが難しい。

高緯度ジェットと異なり、帯状平均赤道風と帯状平均子午面循環では、1金星日周期の変動が継続的に維持される。1金星日の帯状平均子午面循環の脈動は、長波放射の帯状平均冷却率の変動を伴う。赤道の高地が太陽直下になると上昇流や温度が変動し、長波放射の冷却率に影響を与える。地形を除いた実験では、1金星日周期の子午面循環の脈動は現れないことから、赤道域の地形が子午面循環の脈動を生み出す要因の一つであると考えられる。

4. まとめと今後の展望

金星大気大循環モデルの帯状平均場では、1金星日周期の内部変動が出現した。高緯度ジェットが極大に達したのち、24地球日遅れて赤道ジェットの極大が現れる。その高緯度ジェットと赤道ジェットの風速差は、南北擾乱運動量フラックスの変動と同期する。赤道ジェットが極大に達した後、中低緯度の帯状平均南北流による極向き運動量フラックスが遅れて極大になる。その極向き運動量フラックスの増大時に、赤道ジェットと高緯度ジェットの風速差が強まる。この変動は、擾乱が主として駆動するのではなく、帯状平均子午面循環の脈動によるものである。赤道風と帯状平均子午面循環の脈動は継続的に維持されるが、帯状流が極小になる時期では、高緯度ジェットの1金星日周期の変動が見えなくなる。

今後、金星大気大循環モデルに関しては、1金星日周期の変動に加えて、～10金星日スケールの大気大循環の変動も見られるので、これらの長周期変動についても調査しなければならない。放射過程を簡略化した実験に関しては、Global WRFを用いて、海洋ホットスポットに関してロスビー数のみを変化させる理想化実験を行なった(Yamamoto 2024)。今年度は、地球を対象にした二つ玉低気圧や爆弾低気圧の出現条件について調べたので、今後、惑星大気へ応用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) 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.
- (3) 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.
- (4) 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.
- (5) 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*, 62, 4001-4015.

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
Sachihiko Itoh, Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo
Eisuke Tsutsumi, Faculty of Fisheries, Kagoshima University

要旨

学術研究船新青丸 KS-22-11 航海において夏季三陸の鯧ヶ崎周辺で観測された沿岸冷水の形成機構を明らかにするため、三陸の海岸地形と津軽暖流を模した数値実験を行った。この簡略化した理想化実験は観測された沿岸冷水が定性的に再現され、また前年度までに実施した現実的な状況を再現した実験とも整合的であったことから、津軽暖流と三陸海岸地形間の接岸・剥離に伴い生じる沿岸湧昇が鯧ヶ崎周辺の沿岸冷水形成の主要因であることが明らかにされた。

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、重要な役割を果たしていると考えられる。研究代表者らは、三陸沖における高解像度観測から、津軽暖流と親潮の間にサブメソスケールの前線を見出し、鉛直混合強化と生態系への影響を提案した (Itoh et al. 2016; 2022)。しかし三陸海域のサブメソスケール流動の発生機構は未だ明らかでない。本研究課題では、沿岸—沖合移行帯の特徴の 1 つであるサブメソスケール構造の形成メカニズムと物質循環・生態系への影響を明らかにすることを目的として、数値モデルによる解明を行う。前年度までの研究では、大槌沖の津軽暖流フロント域においてサブメソスケール不安定の発生と鉛直輸送・拡散の発生を数値実験と現場観測の両面で示し、その要因として津軽暖流と三陸陸岸地形間の相互作用を考えた。ただし実験は現実的な状況を考えて実施したため、三陸沖の黒潮や親潮および潮汐流といった津軽暖流以外の顕著な流れの影響もあり、津軽暖流の役割の解釈が困難であった。そこで本年度は三陸の地形と津軽暖流のみを考慮した理想化実験を実施し、夏季～秋季の三陸沿岸のサブメソスケール流動機構を調べた。

2. 問題設定・方法

海洋大循環モデル Massachusetts Institute of Technology General Circulation Model (Marshall et al. 1997) を使い、三陸沖を流れる津軽暖流を理想化した数値シミュレーションを行った。計算領域は東西方向に 288 km、南北方向に 864 km とした。三陸の海岸地形をガウシアン関数で近似し、地形の東西スケール（ガウシアンの振幅）を 50 km、南北スケール（標準偏差）を 60 km とした岸（壁面）を計算領域の西側に設定した。比較のために東西スケールを半分の 25 km および 0 km（直線の海岸線）とした実験も行った。また、岸から東側に約 60 km の範囲では大陸棚を模し水深 200 m とし、そこから大陸棚斜面を模して沖側に tanh 関数で滑らかに水深を 1000 m に大きくした。水平と鉛直の格子幅はそれぞれ 500 m と 10 m とした。津軽暖流は簡単のために順圧流とし、東西方向にスケール 10 km のガウス型の流速分布を持つ形で与え、その最大流速は 0.5 m s^{-1} と 0.1 m s^{-1} の 2 ケースを考えた。成層は水温のみで与え、初期場は浮力振動数 $N = 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ の一様成層とした。地球自転の効果は f 面近似で考慮し、北緯 39.5 度のコリオリ周波数 ($f = 6.77 \times 10^{-5} \text{ rad s}^{-1}$) を与えた。加えて、負のコリオリ周波数 ($f = -6.77 \times 10^{-5} \text{ rad s}^{-1}$) を与え、コリオリ力と地形の位置関係の影響を見る実験も行った。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、鉛直対流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。津軽暖流は南北の開境界の陸棚上で強制的に緩和する形で与え、それ以外の場所では境界における擾乱の反射を防ぐため水温、流速、海面高度を初期条件に緩和した。なお、津軽暖流を傾圧流で模した傾圧性の影響を見る予備実験も行ったが、本報告書で述べる結果との間に本質的な違いは見られなかった。

3. 結果と考察

流速 0.5 m s^{-1} 、地形の振幅 50 km の実験ケースの計算結果の一例（計算開始後 42 日目）を図 1 に示す。この基準実験では昨年度までの研究で得られていた地形先端（鯧ヶ崎）周辺における津軽暖流の接岸と剥離、それに伴う水平境界層（顕著な負の渦度層）の形成、および岸に沿った海面水温の低下を定性的に再現していたため、夏季～秋季三陸沿岸における冷水帯の主要な形成メカニズムは津軽暖流と三陸地形間の相互作用にあると考えられる。地形先端周辺の岸沿いでは鉛直拡散フラックスよりも鉛直移流フラックスが卓越しており、湧昇が生じるために水温が低下していた。また、地形先端より下流側では流れは不安定となり、直径が数十キロメートル程度でロスビー数が 1 を超えるサブメソスケールの高気圧性渦列が形成された。また剥離境界層内では二次流と沿岸が相互作用することで低気圧性渦度境界と湧昇を生じていた（図 1, $x = 30 \text{ km}$, $y = -80 \text{ km}$ ）。流速を 0.1 m s^{-1} としたケースでは流れは海岸地形を追従するため剥離や渦列は形成されず、岸での海面水温低下も顕著ではなかった。流速 0.5 m s^{-1} で地形の振幅をゼロとした直線海岸のケースでは上述した現象は起きず、また振幅を半分としたケースでは地形先端にお

る剥離とそれに伴う水温低下は穏やかになった (ただし剥離層内部の二次循環による高気圧渦度の形成と沿岸湧昇の発生は顕著に見られた)。以上のように地形先端で生じる流れの剥離が地形周辺における湧昇を駆動しているという結果が得られたが、コリオリ周波数を負とした (流れに対して左側に海岸があると仮定した) 実験では、流れが地形先端で剥離し難くなる傾向が顕著に見られた。三陸のように流れに対して右側に海岸がある場合に流れの剥離が生じる例はジブラルタル海峡などで報告されており、これは回転が流れの剥離臨界条件に影響を及ぼすためであることが理論的に説明されている (例えば Pratt and Whitehead 2007)。

4. まとめと今後の展望

本研究によって、夏季三陸沿岸で湧昇を発生させるメカニズムとしては、地形先端周辺における流れの剥離が重要で、それには地形の曲率や流れの流速、またコリオリ周波数 (緯度) が影響することが明らかにされた。今後は実験で見られた剥離と既存理論との整合性について調べる予定である。

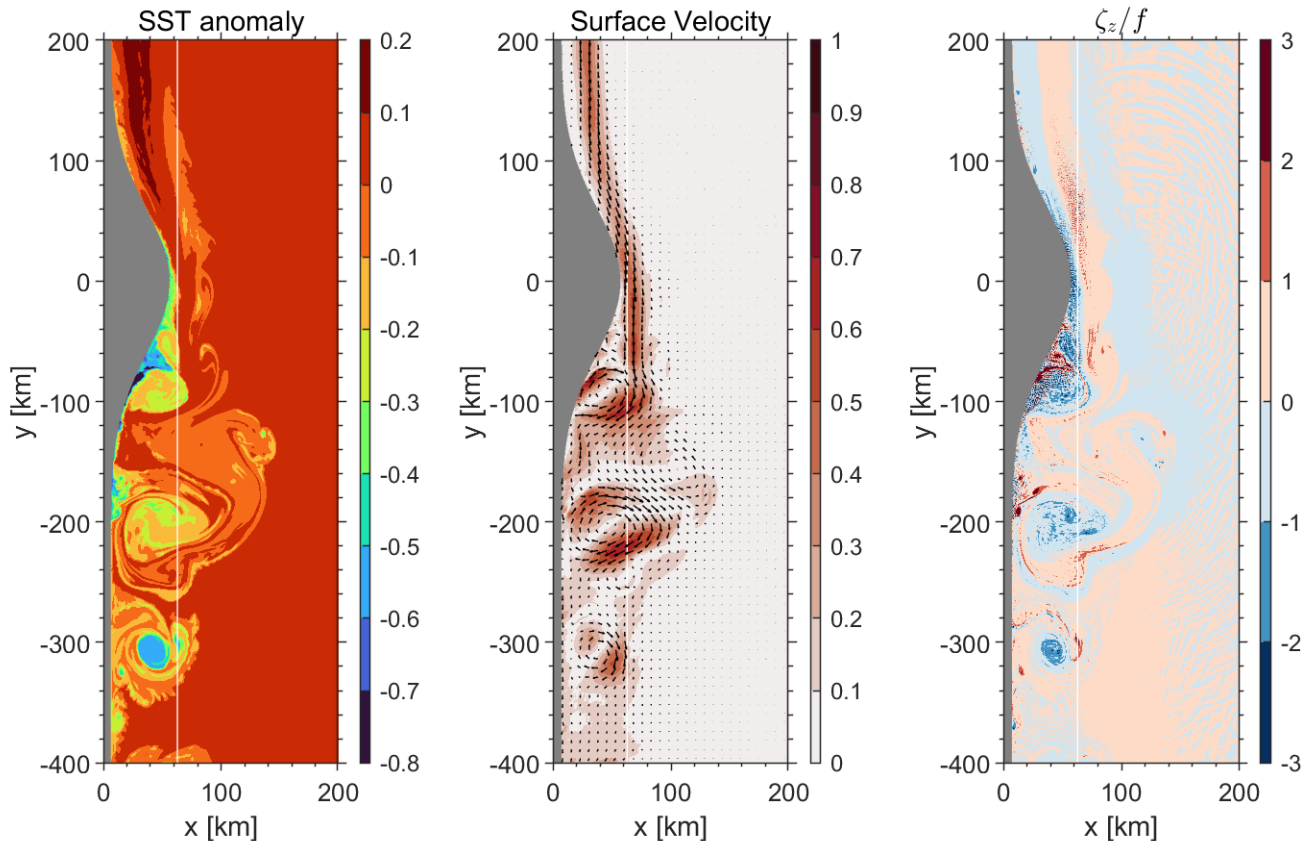


図 1. 基準実験 (地形の振幅 50 km、流速 0.5 m s^{-1}) の $t = 42 \text{ day}$ における海面水温偏差 [$^{\circ}\text{C}$]、海面流速 [m s^{-1}]、ロスビー数 ζ_z/f [無次元] の分布。白線はモデル地形の大陸棚 (水深 200 m) 縁辺の位置を示す。

参考文献

- (1) Itoh, S., H. Kaneko, M. Ishizu, D. Yanagimoto, T. Okunishi, H. Nishigaki, and K. Tanaka, 2016, Fine-scale structure and mixing across the front between the Tsugaru Warm and Oyashio Currents in summer along the Sanriku Coast, east of Japan. *Journal of Oceanography*, 72, 23–37, <https://doi.org/10.1007/s10872-015-0320-6>.
- (2) Itoh, S., Tsutsumi, E., Masunaga, E., Sakamoto, T. T., Ishikawa, K., Yanagimoto, D., Hoshiba, Y., Kaneko, H., Hasegawa, D., Tanaka, K., Fukuda, H., Nagata, T., 2022, Seasonal cycle of the confluence of the Tsugaru Warm, Oyashio, and Kuroshio currents east of Japan. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 127, e2022JC018556. <https://doi.org/10.1029/2022JC018556>.
- (3) 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>.
- (4) 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>
- (5) Pratt, LJ and JA Whitehead 2007, *Rotating Hydraulics*, Springer, pp 589.

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/regional CR

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, 国立環境研究所

荒金 匠, 台湾中央研究院

菰澤 雄太朗, 東京大学大気海洋研究所

中井 舜乃祐, 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

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

Shunnosuke Nakai, Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of
Tokyo

要旨

The prediction of sea surface temperature and sea ice may influence the forecast of extreme weather events. However, in experiments using COCO with a horizontal resolution of 0.25° , there was a bias in which the Kuroshio current overshoot as far as off the coast of Tohoku. In this study, we conducted experiments using COCO with a horizontal resolution of 0.1° . As a result, we found that increasing the horizontal resolution of the ocean model improved the overshooting of the Kuroshio. Furthermore, by applying tuning, the underestimation of sea ice was also improved.

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 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。2023 年度は 2023 年の季節予測実験を行い、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とを報告した。近年、黒潮が東北沖にまで到達し、周辺の気候や極端気象の発生に影響しているのではないかと指摘されている。 0.25 度のモデルは中規模渦を完全には再現せず、黒潮の東北沖へのオーバーシュートが常に発生するバイアスがあり、このような気候変化を議論することができない。そこで今年度は、 0.1 度の COCO を結合した実験を行った。

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。雲微物理過程を陽に解き、積雲パラメタリゼーションは用いない。パラメータ設定などは Takasuka et al. (2024) と同じであるが、Leonard 項は導入していない。海洋モデル COCO の水平解像度は 0.1 度、鉛直層数は 63 とした。NICAM の初期値は ALERA2 (Enomoto et al., 2013) から作成した。ALERA2 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、初期値には最初のメンバーから作成した。COCO の初期値は COCO を JRA55-do (Tsuji no et al., 2018) で初期時刻まで駆動することで作成した。将来的にアンサンブル実験を行うことを目論んでいるが、本報告ではアンサンブル実験は実施していない。2015 年 5 月 20 日 00UTC を初期時刻とし、2015 年 11 月 1 日 00UTC まで時間積分した。実験では COCO のパラメータを変更した実験も行った。1 つは従来から NICOCO のデフォルトとされているパラメータを用いたもの (org 実験)。2 つ目は、COCO の開発グループによる海氷の再現性向上の成果を取り込んだもの (ソースコードの改変も含む、ice 実験)、3 つ目は MIROC で用いられているパラメーターに COCO のパラメータをなるべく合わせたものである (ice2 実験)。なお、比較のため、 0.25 度の COCO を結合した実験とも比較した (025 実験)。また比較する観測データとして OISSTv2.1 (Huang et al., 2021) を用いる。

3. 結果と考察

2010 年 11 月 1 日の北西太平洋域の SST 分布を図 1 に示す。0ISSST では黒潮が関東沖から東方に離岸している。0.1 度の COCO を結合した実験でもその様子が見られる。しかし、0.25 度の COCO を結合した実験では、黒潮が紀伊半島沖で大蛇行しており、また、東北沖までオーバーシュートしている様子が見える。

2010 年 8 月 1 日の北極域の海氷密度分布を図 2 に示す。0rg 実験と ice 実験では観測に比べて海氷面積が過小評価となっているが、ice2 では観測と同程度に海氷が残っている。0.25 度の NICOCO でも海氷を過小に評価しており、今後修正をする必要がある。

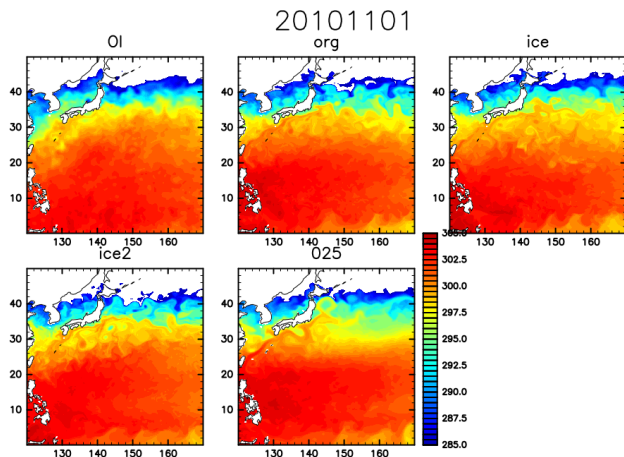


図 1 2015 年 11 月 1 日の海面水温の分布。

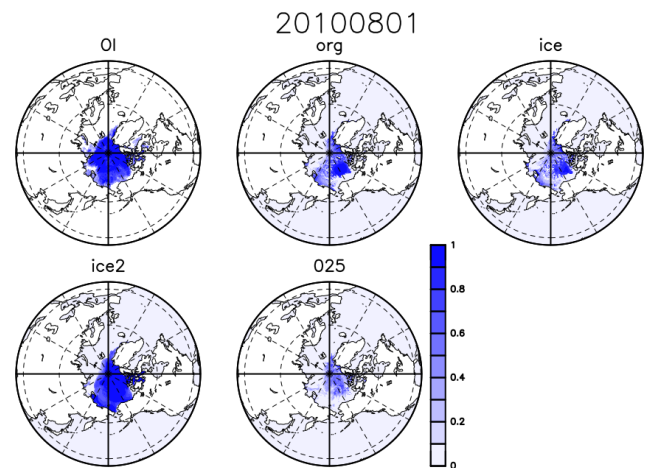


図 2 2015 年 8 月 1 日の海氷密度の分布。

4. まとめと今後の展望

0.1 度の COCO を結合し、チューニングを行うことで、0.25 度の COCO を結合した実験に比べて黒潮のオーバーシュートバイアスが修正され、また、海氷の分布も良くなることがわかった。これらの海洋変数の改善により極端気象予測も改善することが期待されるため、今後詳細に調べていく予定である。

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) Takasuka, D., ., C. Kodama, T. Suematsu, T. Ohno, Y. Yamada, T. Seiki, H. Yashiro, M. Nakano, H. Miura, A. T. Noda, T. Nasuno, T. Miyakawa, R. Masunaga, 2024: How Can We Improve the Seamless Representation of Climatological Statistics and Weather Toward Reliable Global K-Scale Climate Simulations?, *J. Adv. Model. Earth Syst.* 16, e2023MS003701, doi:10.1029/2023MS003701
- (3) Enomoto, T., T. Miyoshi, Q. Moteki, J. Inoue, M. Hattori, A. Kuwano-Yoshida, N. Komori, S. Yamane, 2013: Observing-system research and ensemble data assimilation at JAMSTEC. In *Data Assimilation for Atmospheric, Oceanic and Hydrologic Applications (Vol. II)*, S. K. Park and L. Xu (eds.), chapter 21, pp. 509–526, Springer, doi:10.1007/978-3-642-35088-7_21.
- (4) 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

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

SATOH 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ている。再解析 ERA5 の解析も同時に進めており、それらより分割発生後の雲帯について、以下の結果を得た。分割後の帯の理解には、2つのスケールの浅い南北循環を考えることが有効である。ひとつは雲域周辺の小さいスケールの浅い循環で、雲域内の継続的な凝結から生成されている。もう一つは2本の雲帯の間に広がる 400 hPa と 200 hPa 付近に逆の風向をもつ規模の大きい循環であり、帯の継続的な移動に関係していると考えられる。

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)。これまでに、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てきた。昨年度は、1例ではあるが、分割現象を比較的良好に再現した実験結果を用いて、現実の現象との詳細な比較を行った。その結果、実験で得られた分割後の雲域が、現実の現象にみられる南北方向に傾いた構造を示さないにもかかわらず、分割現象が再現していることがわかった。本年度は、この結果を受けて、分割後の雲の形態やその移動について、主にデータ解析による研究を行った。NICAM 実験としては、非断熱加熱を分割現象の途中で切断する実験を行ったが、この実験はまとまった結果を得ておらず、翌年度も継続して行う計画である。

2. 実験方法および結果

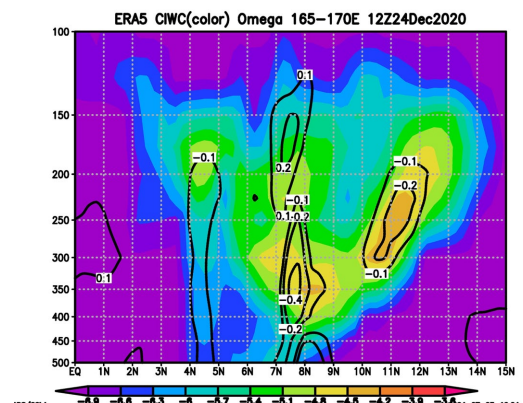


図1 2020年12月24日12Zにおける165-170E平均の、雲水量(常用対数 kg/kg, 色)と鉛直P速度 (Pa/s, 等値線)の緯度高度断面

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)の実験を試みている。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ている。雲物理スキームには、NICAM Single Moment Water 6class Scheme (NSW6)を用いた。

NICAM の実験での再現に成功している 2020 年 12 月 24 日の事例について、ERA5 の解析を行った。その結果、浅い構造をもつ 2 つのスケールの循環が、分割後の雲帯(以降、分割帯)の維持・移動に役割を果たしている、と考える事が構造の理解を助けると考えた。以下に、スケール毎の特徴を詳述する。

(1) 雲帯付近の小さな循環

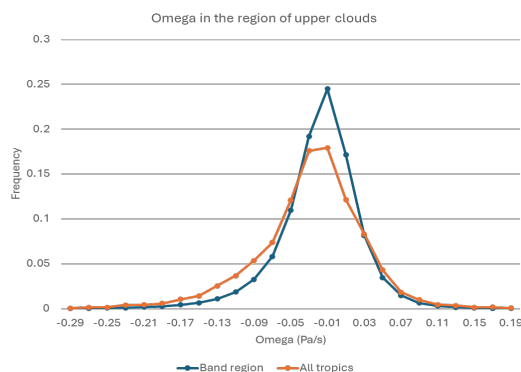


図 2 2020 年 12 月 24 日 00, 06, 12, 18 時における、上層雲領域 (200hPa に雲氷が検出され、400hPa ではされない) における鉛直流の頻度分布。20S-20N の全熱帯 (橙線) および、分割事例周辺 (0-15N, 165-170E, 青線)。

図 1 は、分割進行中の雲氷量と鉛直流の緯度高度断面である。10-13N 付近の雲氷存在域が北側の分割帯である。250hPa 付近で雲氷量が最大になるとともに、そこで上昇流(負が上昇である)も最大になっている。 $-0.1 \sim -0.2$ Pa/s という上昇流の大きさが、熱帯の上層雲としてどのような値なのかを示すために、熱帯の上層雲存在域における鉛直流のヒストグラムを作成した(図 2)。その結果、平均的な値は -0.02 Pa/s 程度であり、 -0.1 Pa/s よりも強い上昇流の頻度は大きくないことがわかった。つまり、進行中の分割雲における上昇流は、一般的な上層雲に比べてかなり大きく、これは凝結が継続的に起こっていることを示唆しており、ときに時間とともに雲帯内の凝結物量が増加しているという観測事実と整合的である。この明瞭な上昇流に対応して、300 hPa 付近の南北収束と 150 hPa 付近の南北発散がみられる。つまり、小スケールの南北循環は、継続的な凝結の発生がもたらしているとみられる。分割雲内で、なぜまとまった量の凝結が起こり続けるのかはまだわからないが、ここで扱う分割現象では、雲域はバンド状の構造を保ちつつ南北方向にのみ拡大するため、水平方向にほぼ円形に拡大していく多くのクラスターに比べて、より高密度の凝結物を保持しやすく、それが雲形成の促進や上昇流の継続的な発達に寄与している可能性がある。

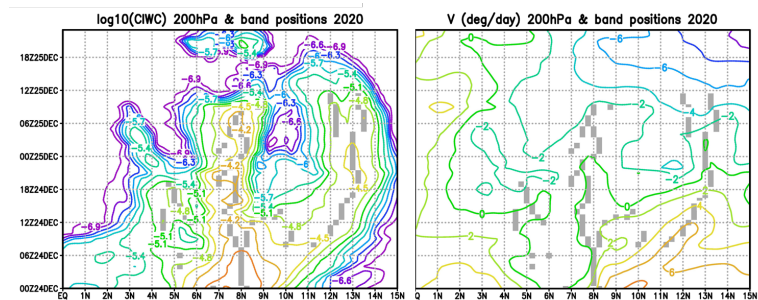


図 3 2020 年 12 月 24-25 日, 165-175E 平均の 200hPa における緯度時間断面。(左) 雲氷量(常用対数 kg/kg) およびそれから求めた南北方向における極大値(短線)(右) 南北風。雲氷量の南北方向の極大位置(短線)も合わせて表示。

(2) 雲帯より大きいスケールの循環

雲帯間の距離の継続的な拡大が、どのような機構によってもたらされているのだろうか。当初は、伝播する波動位相の上昇流部分が雲帯であるとして、波動の伝播で説明しようと試みたが、うまくいかなかった。そこで、何らかの理由で起きた南北発散風によって雲帯が移流されているという仮説をたてた。図 3 は、雲氷量で示す雲帯の位置の変化と、南北風を同じ事例について示したものである。図から読み取った、分割後の雲帯の南北方向への移動速度と、その付近での南北風の変化をいくつかの事例で調べた結果を表 1 に示す。両者がおおむね良い一致を示すことから、雲帯の移動を移流によるものだと考える事は妥当であろう。この南北風がどのようにして生成されているか、が問題である。400 hPa 付近で継続的な南北収束が帯間の狭い緯度帯で継続的に観測されることがあるため、200-400 hPa の鉛直スケールをもつ大きな浅い循環が想定される。しかし、400 hPa 付近の逆向きの風はきれいには認められないこと、また雲帯を流しているとみられる南北風の強さは、広域で一定値ではなく、雲帯の存在する付近で極大をもつ特徴的な南北分布を示していることから、この大規模な浅い循環の構造と成因については、まだ十分な結論が得られたとは言えない。

3. まとめと今後の展望

分割後の雲帯の特徴について、いくつかの興味深い特徴が得られたが、それらが生成する原因についてはまだ十分にわかっていないので、次年度もその究明を行っていききたい。NICAM 実験での現象の再現率は低いままなので、凝結物量を Nudging することによって、再現性を高めるなどの試みも行いう予定である。

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.

表 1 いくつかの事例における雲帯の移動速度(度/日)および、雲帯付近の南北風(度/日)。

Case	Date	Movement (deg/day)	V (deg/day)
N-Band 177E	18Z15Mar2024	+8	+8
S-Band 177E	18Z15Mar2024	(+6)	+3
N-Band 170E	12Z24Dec2020	+8	+6.5
	00Z25Dec2020	0	0
S-Band 170E	12Z24Dec2020	0	0
	00Z25Dec2020	+2	0
N-Band 200E	12Z08Feb2016	+8	+7
	00Z09Feb2016	+1	+1
S-Band 200E	06Z08Feb2016	-6	-3
	06Z08Feb2016	0	+4

トレーサー・粒子複合海洋低次栄養段階生態系モデルの開発

Development of a combined Eulerian tracer and Lagrangian particle ocean ecosystem model

干場 康博, 海洋研究開発機構, E-mail: hoshibay(at)jamstec.go.jp
松村 義正, 東大・大気海洋研, E-mail: ymatsu(at)aori.u-tokyo.ac.jp
中村 知裕, 北大・低温研, E-mail: Nakamura(at)lowtem.hokudai.ac.jp
木田 新一郎, 九大・応力研, E-mail: kida(at)riam.kyushu-u.ac.jp
大橋 良彦, 国立極地研, E-mail: ohashi.yoshihiko(at)nipr.ac.jp
伊藤 薫, 東大・大気海洋研, E-mail: ka-ito(at)g.ecc.u-tokyo.ac.jp

Yasuhiro Hoshiba, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology
Yoshimasa Matsumura, Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo
Tomohiro Nakamura, Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University
Shinichiro Kida, Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University
Yoshihiko Ohashi, National Institute of Polar Research
Kaoru Ito, Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo

要旨

オイラー型有限体積法とラグランジュ型粒子追跡法の長所を組み合わせた、新しい低次栄養段階の海洋生態系モデルを開発する。新モデルのオイラー部では、物質濃度の時空間分布計算を主に担当し、ラグランジュ部は物質の履歴に関する情報出力を担当する。その結果、物質のライフサイクル (NPZD: 栄養塩、植物プランクトン、動物プランクトン、デトリタス) や物質の軌跡、起源、年代などの履歴とともに、正確な物質濃度、フラックスや収支を同時に取得することができる。従来の生態系モデルでは困難であった、物質循環の時空間分布と履歴の両方を同時に捉えることが可能な、全球および沿岸小領域でのシミュレーション例を紹介する。

1. はじめに

海洋の数値モデリング手法は、主に二つに大別される。オイラー有限体積法 (トレーサー法) と、ラグランジュ粒子追跡法 (粒子追跡法) である。トレーサー法は領域全体に分布する変数 (水温や塩分など) を計算する際に効率が良くとされる。既存の海洋大循環モデルとの結合が容易であることや、海洋全体に分布する窒素などの栄養塩挙動を計算するのに優れていることから、低次栄養段階の海洋生態系モデルに広く適用されている (例、Moore et al., 2013)。対して、粒子追跡法は領域の一部に遍在するもの (特定魚種など) のシミュレーションに効率が良い。粒子の動きを追跡することで、物質の軌跡、起源、年齢などの履歴を逐次記録することができる。この手法は、物質の履歴を調査するために、プランクトンモデルや海洋生態系モデルで利用されている (例、Kida and Ito, 2017)。本研究代表者と分担者は、上記のトレーサー法と粒子追跡法の長所を可能な限り享受しつつ、相対的に小さな計算機リソースで駆動できる新たなトレーサー・粒子複合海洋生態系モデルを開発する。トレーサー法と粒子追跡法が、同様の物質循環サイクル全体を同時に計算する本研究のようなモデルは、われわれが知る限り世界初である。

2. 問題設定・方法

新モデルのトライアルとして、NPZD (Nutrient, Phytoplankton, Zooplankton, Detritus) のシンプルな低次栄養段階の生態系モデルで計算を行う。オイラートレーサー部とラグランジュ粒子部の主に二つで構成される本モデルは、海洋モデル kinaco (Matsumura and Hasumi, 2008) の一部として扱われる。

対象領域は全球と、日本沿岸の小領域を想定したシミュレーションを行う。全球設定では水平解像度が 1° で 5 年間本計算を行う。日本沿岸領域では水平解像度 $80\sim 100\text{m}$ で 30 日間本計算を行う。それぞれ物理場は Kawasaki et al. (2021) と Hoshiba et al. (2021) で使用されたデータと同様のものであり、それらを用いて生態系モデルはオフラインで駆動する。

3. 結果と考察

概ね意図したシミュレーション結果が得られている。つまり、オイラートレーサー部とラグランジュ粒子部で計算した結果が概ね同様の時空間分布を出力できるということである。全球 (Fig. 1)、沿岸小領域 (Fig. 2) どちらの設定でも確認できる。これにより、トレーサー部で物質濃度、フラックスや収支計算を主に担当させ、ラグランジュ粒子部で物質の履歴追跡を担当させることで両者の長所を享受することができる。

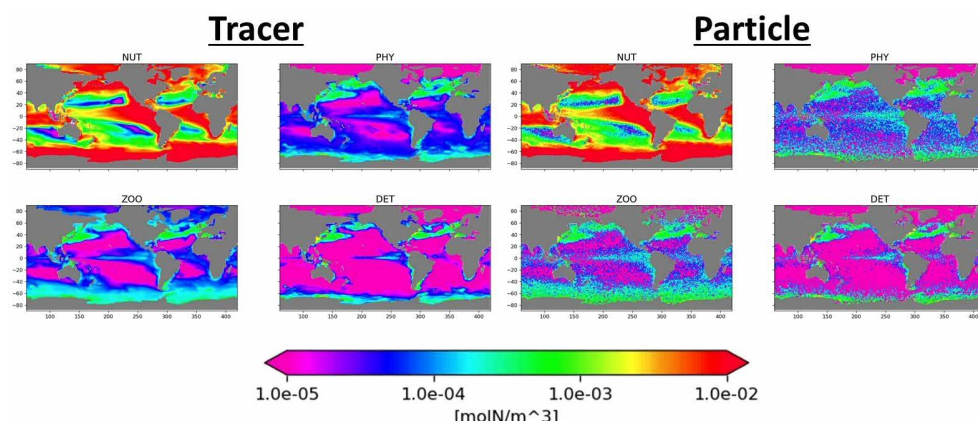


Fig. 1 Horizontal mean distributions of NUT, PHY, ZOO and DET from 0 to 208 m depth after 5 years of calculation in the global setting. (Left) Tracer concentrations. (Right) Gridded from the location of the particles and estimated concentration.

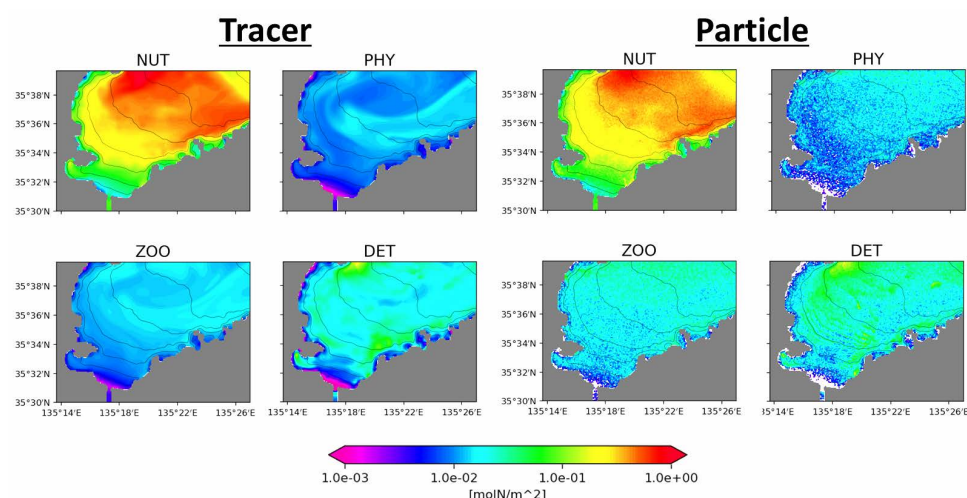


Fig. 2 Vertically integrated distributions of NUT, PHY, ZOO and DET after 30 days of calculation in the regional-coastal setting. (Left) Tracer distribution. (Right) Gridded from the location of the particles and estimated distribution.

4. まとめと今後の展望

トレーサー法と粒子追跡法の長所を組み合わせた、新しい低次栄養段階の海洋生態系モデルの開発が進展した。本ハイブリッドモデルでは、オイラートレーサー部により正確な濃度、フラックスと収支が出力される。一方、NPZD 相転移、軌跡、年齢などの物質の履歴情報はラグランジュ粒子部によりもたらされる。現状では生態系 NPZD 粒子は計算領域全体に設置され、一つの粒子に対し一定の窒素量が割り当てられている。今後は計算資源をさらに効率的に使用するため、粒子を特定領域にのみ配置することや、計算領域箇所によって一つの粒子がもつ窒素量を変化させる開発が期待される。

参考文献

- (1) Moore, J. K., Lindsay, K., Doney, S. C., Long, M. C. and Misumi, K., 2013: Marine ecosystem dynamics and biogeochemical cycling in the Community Earth System Model [CESM1 (BGC)]: Comparison of the 1990s with the 2090s under the RCP4. 5 and RCP8. 5 scenarios, *J. Clim.*, 26, 9291-9312, <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00566.1>.
- (2) Kida, S. and Ito, T., 2017: A Lagrangian view of spring phytoplankton blooms, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 122, 9160-9175, <https://doi.org/10.1002/2017JC013383>.
- (3) Matsumura, Y. and Hasumi, H., 2008: A non-hydrostatic ocean model with a scalable multigrid Poisson solver, *Ocean Modelling*, 24, 15-28, <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2008.05.001>.
- (4) Kawasaki, T., Hasumi, H. and Tanaka, Y., 2021: Role of tide-induced vertical mixing in the deep Pacific Ocean circulation, *J. Oceanogr.*, 77, 173-184, <https://doi.org/10.1007/s10872-020-00584-0>.
- (5) Hoshiba, Y., Hasumi, H., Itoh, S., Matsumura, Y. and Nakada, S., 2021: Biogeochemical impacts of flooding discharge with high suspended sediment on coastal seas: a modeling study for a microtidal open bay, *Scientific Reports*, 11, 21322, <https://doi.org/10.1038/s41598-021-00633-8>.

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、今年度は特に中緯度惑星規模大気海洋結合モードの研究を行った。以下、投稿中の論文 (Kohyama et al. 2025, submitted) に基づいて報告する。

まず、北半球環状モード(NAM)と太平洋十年規模変動(PDV)は、相互作用環状モード(iAM)と呼ばれる大気海洋結合システムとして機能することを示した。特異値分解解析により、SST 前線と大気ジェット気流の同期した南北移動が最も支配的な共変動として抽出された。このモードは正のフィードバックループによって維持され、2024 年の記録的熱波との関連も示された。iAM 理解の深化は気候予測の改善や極端気象イベントの予測に貢献すると考えられる。

1. はじめに

大気ジェット気流は中緯度の気象・気候変動において重要な役割を果たしている。近年、2024 年の北半球における記録的な熱波は、夏季のジェット気流が異常に北偏した際に発生した。ジェット気流の南北変動に関する主要な気候変動モードとしては北半球環状モード(NAM)があり、また熱帯太平洋の海面水温(SST)変動に伴う潜熱加熱がジェット気流の位置に影響を与えることも知られている。さらに、西岸境界流域における非断熱加熱の分布がストームトラックやジェット気流の位置を決定づける可能性も示唆されている。本研究では、NAM と太平洋十年規模変動(PDV)の低周波変動が、相互作用環状モード(interactive Annular Mode; iAM)という大気海洋結合系として理解できることを示した。

2. 問題設定・方法

本研究では、複数の観測・再解析データセットを用いて、北半球中緯度における海洋と大気の共変動性を調査した。主要データとして、NOAA OISST 海面水温データ、ERA-5 再解析による東西風速場、NAM 指数、PDV 指数を使用し、1982 年から 2024 年までの期間を解析した。統計解析においては、月平均気候値と線形トレンドを除去した偏差を用い、特異値分解(SVD)解析によって最も支配的な共変動パターンを抽出した。

また、Yamagami et al. (2025)の方法に基づき、高解像度全球気候モデル(MIROC6subhires)を用いたペースメーカー実験も実施した。この実験では、2つの境界流域のSSTをコントロールランに強く緩和し、それ以外の領域では大気海洋が自由に時間発展するよう設定して、海洋から大気への影響を検証した。

3. 結果と考察

SVD 解析の結果、北太平洋-大西洋領域(35° N- 55° N, 120° E- 0°)におけるSSTと東西風の第1モード(SVD1)が抽出され、このモードはPDV的なSST変動性とNAM的な東西風変動性を示した。SVD1のSST時系列と従来のPDV指数との相関は0.71、東西風時系列とNAM指数との相関は0.72であり、これらの変動は分散の48%を共有していた。

この相互作用環状モード(iAM)の物理メカニズムは、正のフィードバックループとして説明できる。正のiAMイベント時には、北偏したジェット気流が太平洋および大西洋での負の風応力カーネル偏差を生じ、南向きのスベルドラップ輸送を駆動する。これに応答して西岸境界流が強化され暖水移流が増加する。暖まったSSTは表面熱放出を促進し、大気の傾圧性を強化してジェット気流のさらなる北偏を促す。

ペースメーカー実験では、境界流域で与えられたSST変動が環状モードに特徴的な大気応答を作り出すことが示された。特に、モデル実験におけるiAM-Atmos指数は与えられたiAM-Ocean指数と統計的に有意な時間相関(0.39)を示し、SST前線による加熱への大気応答が比較的速やかであることが示唆された。

4. まとめと今後の展望

本研究は、中緯度の低周波変動を支配する物理モードとしてのiAMについて仮説を提唱した。NAMとPDVの低周波成分の大きな部分が、この単一の結合システムによって説明できることを示唆したことにより、気候予測の改善や極端気象イベントの理解が進む可能性がある。

iAM-Ocean指数には明確な上昇トレンドが見られ、これは西岸境界流域での増幅された昇温と整合的である。2024年の極端な

熱波は記録的な正の iAM 値と関連しており、iAM-Ocean 指数の正のトレンドを考慮すると、同様の極端熱波イベントは今後 10 年間でより頻繁に発生する可能性がある。

今後の研究課題として、人為起源強制下での iAM の挙動をより深く理解するため、中緯度海洋観測の強化と高解像度全球気候モデルの継続的な開発が重要である。また、iAM の変動性が西岸境界流の変調を通じて海洋生態系に与える影響についてもさらなる調査が必要である。

参考文献

- (1) Kohyama, T., Y. Yamagami, S. Kido, F. Ogawa, and H. Miura (2025), Interactive annular mode links jet stream-ocean coupling to decadal Northern Hemispheric warmth, Preprint: <https://doi.org/10.31223/X5742Q>
- (2) Yamagami, Y., H. Tatebe, T. Kohyama, S. Kido, and S. Okajima (2025), Gulf Stream drives Kuroshio behind the recent abnormal ocean warming, Preprint: <https://arxiv.org/abs/2503.01117>

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

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) を大気再解析データを用いて駆動することにより行った太平洋熱帯域の経年変動再現実験に基づき、エルニーニョもどき現象 (東太平洋赤道域に正の海面水温偏差のピークが現れる古典的なエルニーニョ現象とは違い、中央太平洋赤道域に正の海面水温偏差のピークが現れる現象) に伴う正の海面水温偏差の形成機構を鉛直乱流混合が果たす役割に着目して調べた。その結果、正の温度躍層深偏差に伴い、混合層の底付近での鉛直水温勾配が弱まるため、鉛直混合による冷却効率が低下する効果と南赤道海流と赤道潜流の間の流速シアが弱まることにより、混合層の底付近での鉛直拡散係数が減少し、鉛直混合による冷却が弱まる効果が重要な役割を果たすことが明らかになった。また、経度依存性も調べたところ、先行研究でその重要性が指摘されていた東西移流も正の海面水温偏差の西側部分では、鉛直乱流混合と同程度の寄与をしていることも明らかになった。

1. はじめに

世界各地に異常気象を引き起こす太平洋熱帯域の経年的な気候変動現象であるエルニーニョ・南方振動現象 (ENSO; Yeh et al., 2018) には、東部太平洋赤道域に正の海面水温 (SST) 偏差が現れる標準的なイベント (canonical El Niño) と中部太平洋赤道域に正の SST 偏差、西部・東部太平洋赤道域に負の SST 偏差が現れ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)。前年度までの研究で、古典的なエルニーニョ現象だけでなく (Nakamura et al., 2024)、エルニーニョもどきに伴う正の SST 偏差の形成において、鉛直乱流混合が重要な役割を果たすことを明らかにした。そこで、本年度の研究では、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) を大気再解析データを用いて駆動することにより行った太平洋熱帯域の経年変動再現実験に基づき、エルニーニョもどき現象に伴う正の SST 偏差の形成に関わる鉛直乱流混合についてさらに詳しい解析を行った。

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° E- 67° W, 25° S- 25° 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 スキームを元を開発された Furuichi et al. (2012) を使用した。月平均気候値を用いて 20 年間のスピナップを行った後、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

混合層熱収支式において、鉛直混合項は、混合層厚と混合層の底における鉛直水温勾配・鉛直拡散係数から構成されるため、これら 3 つの要素について調べた (図 1)。その結果、主に西部太平洋赤道域の西風偏差により励起された沈降ケルビン波が、中部太平洋赤道域に到達し、温度躍層が平年よりも深くなるため、混合層の底付近での鉛直水温勾配が弱まり、鉛直混合による冷却効率が低下することが明らかになった。また、エルニーニョもどき現象の発達に伴う貿易風の弱化に伴い、海洋表層を西向きに流れる流れる南赤道海流と亜表層の温度躍層付近を東向きに流れる赤道潜流がともに減速し、流速シアが弱まることにより、混合層の底付近での鉛直拡散係数が減少して、鉛直混合による冷却が弱まる効果が重要な役割を果たすことが明らかになった。一方、古典的なエルニーニョ現象とは異なり (Nakamura et al., 2024)、中部太平洋赤道域に有意な混合層厚偏差は見られず、混合層の熱容量の変化に伴う効果は、正の SST 偏差には、寄与しないことが明らかになった。

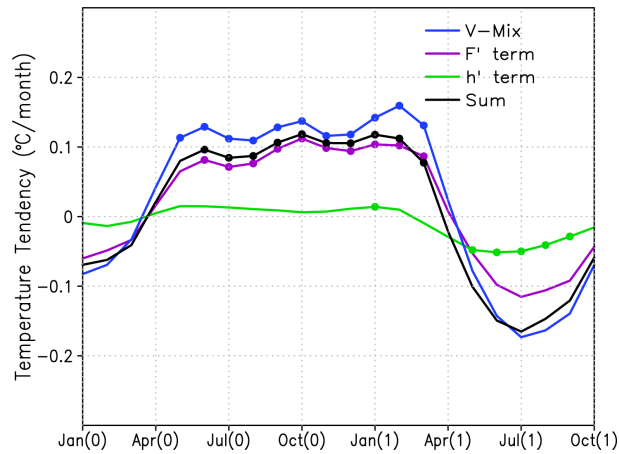


Fig. 1 Decomposition of the composited anomalous vertical mixing term averaged over the central equatorial Pacific (165° E-140° W, 1° S-1° N) for El Niño Modoki events. Composites of anomalies in the vertical mixing term (V-mix; blue), the contribution from vertical heat flux anomalies (F' term; purple), the contribution from MLD anomalies (h' term; green), and the sum of F' and h' terms (black) are shown. Dots indicate anomalies significant at the 95% confidence level by a two-tailed t-test.

4. まとめと今後の展望

本研究課題では、3年間にわたって、古典的なエルニーニョ現象とエルニーニョもどき現象に伴う正の SST 偏差の形成メカニズムを調べてきた。古典的なエルニーニョ現象では、鉛直移流が支配的な役割を果たすと考えられてきたが、その直接的な寄与は小さく、鉛直混合の寄与が支配的であることが明らかになった。一方、エルニーニョもどき現象では、先行研究でその重要性が指摘されてきた東西移流に加え、鉛直混合が重要な役割を果たすことが初めて示された。特に、混合層の底での鉛直水温勾配が、温度躍層の深化に伴い、弱まる効果が両現象で重要であることがわかった。ただ、鉛直混合が正の SST 偏差に寄与するメカニズムは全て同じではなく、古典的なエルニーニョ現象では、混合層厚が平年に比べて厚くなり、鉛直混合による冷却効果が小さくなる影響も重要であったのに対し、エルニーニョもどき現象では、有意な混合層厚偏差は、見られなかった。また、エルニーニョもどき現象では、主に南赤道海流と赤道潜流の間の鉛直シアが弱まることにより、鉛直拡散係数が小さくなる効果が重要であったが、古典的なエルニーニョ現象では、有意な鉛直拡散係数は見られなかった。これらの違いは、東部太平洋赤道域と中部太平洋赤道域における海洋成層や海流の基本場の違いに起因するものと考えられる。

古典的なエルニーニョ現象とエルニーニョもどき現象では、日本を含む中高緯度への遠隔的な影響が異なることが知られていることから (Yeh et al., 2018)、今後、本研究課題で得られた新たな視点から、ENSO に関する予測可能性の研究を推進することにより、ENSO の影響の軽減に貢献することが期待される。

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) Nakamura, K., S. Kido, T. Ijichi, and T. Tozuka, 2024: Generation mechanisms of SST anomalies associated with the canonical El Niño focusing on vertical mixing. *Journal of Climate*, 37, 3593-3612.
- (7) 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.
- (8) 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.
- (9) Tsujino, H. et al. (2018). JRA-55 based surface dataset for driving ocean-sea-ice models (JRA55-do). *Ocean Modelling*, 130, 79-139.
- (10) Yeh, S.-W. et al. (2018). ENSO atmospheric teleconnections and their response to greenhouse gas forcing. *Reviews of Geophysics*, 56(1), 185-206.

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

本研究では、南極・昭和基地に設置された大型大気レーダーで観測された鉛直風および運動量フラックスの特徴が、様々な水平格子間隔の数値シミュレーションにおいてどの程度再現されるかを検証した。成層圏下部においては、水平格子間隔 (Δx) が 0.5 km および 0.25 km のシミュレーションで、レーダー観測された鉛直風を良好に再現することができた。対流圏では、 $\Delta x=0.5$ km および 0.25 km のシミュレーションが強い鉛直風変動をある程度捉えたものの、特に周期が 2 時間未満の成分については変動の振幅を過小評価した。重力波に伴う運動量フラックスは、 $\Delta x \leq 2.5$ km のシミュレーションで定量的に再現された一方、 $\Delta x=22.5$ km のシミュレーションでは大きく過小評価されていた。これらの結果は、運動量フラックスが $\Delta x=2.5$ km 以下のシミュレーションで収束することを示唆している。

1. はじめに

鉛直風は、子午面循環や、総観規模擾乱に伴う非地衡流、さらには重力波 (GW) や対流に起因する小規模な鉛直風変動など、さまざまなスケールの大気現象の力学において重要な役割を担っている。しかし、鉛直風の振幅は小さいため、その観測は困難であることが広く認識されている。これまで、大気レーダーは自由大気における鉛直風および水平風を観測する手段として伝統的に利用されてきた。南極昭和基地大型大気レーダー (PANSY レーダー; Sato et al., 2014) は、鉛直風を含む三次元風ベクトルや水平運動量の鉛直フラックスを正確に推定可能な MST (Mesosphere-Stratosphere-Troposphere) レーダーである。本研究では、昭和基地周辺を対象とした様々な水平解像度の数値シミュレーションを実施し、PANSY レーダーで観測された鉛直風変動やその周波数スペクトル、そして運動量フラックスの再現性を検証した。

2. 観測データ

PANSY レーダーは南極昭和基地 (69.0° S, 40.5° E) に設置されており、47 MHz を中心周波数とするクロス八木アンテナ 1045 素子で構成されている。レーダー観測の時間分解能は約 80 秒だが、対流圏・下部成層圏と中間圏の観測を交互実施しているため、サンプリング間隔はおおよそ 200 秒となっている。鉛直分解能 (レンジ分解能) は 150 m である。本研究では、2016 年 5 月 16 日 00UT から 5 月 22 日 12UT までの期間を対象として解析を行った。

3. 数値計算

南極昭和基地周辺の数値シミュレーションには、WRF (v. 4.3.1; Skamarock et al., 2019) を用いた。地形データには、水平解像度 200 m の Radarsat Antarctic Mapping project v2 (Liu et al., 2015) を採用した。モデルの水平格子間隔依存性を調べるために、水平格子間隔 (Δx) を 22.5 km (D1)、2.5 km (D2)、0.5 km (D3)、0.25 km (D4) とする 4 つの水平ネスティングドメインを用意した。水平格子間隔 22.5 km のドメイン D1 の側面境界条件には ECMWF 再解析データ (ERA-5; Hersbach et al., 2020) を用い、内側のドメインについては一方向ネスティングを用いた。鉛直座標はハイブリッドシグマ - 気圧座標系を採用し、最上層 5 hPa までを 124 層に分割している。モデルは 2016 年 4 月 17 日 00UT を初期時刻とし、6 日間積分を行った。

3. 結果

2016 年 5 月の重力波事例に対する領域モデルシミュレーションの結果を図 1 に示す。運動量フラックスに関しては、 $\Delta x \leq 2.5$ km の計算が観測を定量的によく再現していることが確認された (図 4)。具体的には、高度 9 km 付近および下部成層圏で観測された最大の負の南北方向運動量フラックス ($-0.1 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$) がよく再現されている。このことは、下部成層圏におけるシミュレーション上の運動量フラックスが、 $\Delta x \leq 2.5$ km で収束している可能性を示唆している。この結果は、数値モデルにおいて地形性重力波に伴う運動量フラックスを取り扱った先行研究 (例えば Fritts et al., 2022) とも整合的である。また、 $\Delta x=0.5$ km のシミュレーションでは鉛直風分散が $\Delta x=2.5$ km に比べて大きい、 $\Delta x=0.5$ km と $\Delta x=0.25$ km の間には顕著な差は見られなかった。

図 2 に、高度 5~10 km、10~15 km、15~20 km の高度領域の鉛直風のパワースペクトルを示した。高度 5~10 km において、 $\Delta x=22.5$ km のシミュレーションは、全ての周波数帯で観測されたスペクトルを大きく過小評価している。一方、 $\Delta x \leq 2.5$ km のシミュレーションでは、周期が 3 時間を超える低周波数帯では観測とよく一致するが、 $\Delta x=0.25$ km の場合でも高周波数帯のスペクトル密度は大きく過小評価される傾向がみられる。さらに、5~10 km 高度において $\Delta x=0.5$ km と 0.25 km で得られたスペクトルは、周波数帯全体を通して非常によく似ている。高度 10~20 km において、観測された 1 時間以上の周期成分のスペクトル

ル密度は、5～10 km に比べて小さい。これは、対流圏からの総観規模地衡擾乱の上方伝播が抑制されるためであると考えられる (Charney & Drazin, 1961)。一方で、1 時間未満の周期成分については、高度 5～10 km の方が 10～20 km に比べてスペクトル密度の傾きが急である。

$\Delta x \leq 0.5$ km のシミュレーションでは、20 分から 12 時間の周期帯において観測と同程度のパワースペクトルが再現された。また、 $\Delta x=0.5$ km と 0.25 km のスペクトル密度の差が 1 オーダー以内であることは、下部成層圏における鉛直風の周波数スペクトルが $\Delta x \leq 0.5$ km のシミュレーションで収束している可能性を示唆している。これらの結果から、特に高周波成分を含む鉛直風変動の再現性は、水平格子間隔に大きく依存することが示された。

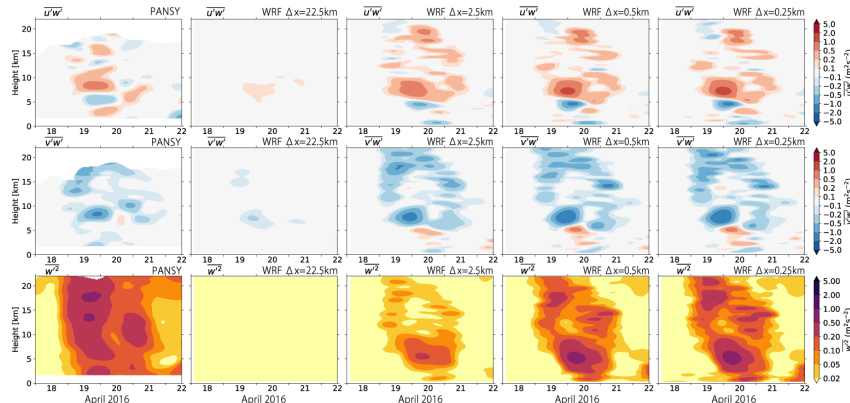


図 1. 昭和基地上空の時間高度断面。上段： $\overline{u'w'}$ 、中段： $\overline{v'w'}$ 、下段： $\overline{w'^2}$ 。左列は PANSY レーダーによる観測。右列は左から右に向かってそれぞれ $\Delta x=22.5$ km (D1)、2.5 km (D2)、0.5 km (D3)、0.25 km (D4) の解像度で計算された数値シミュレーションの結果を表す。

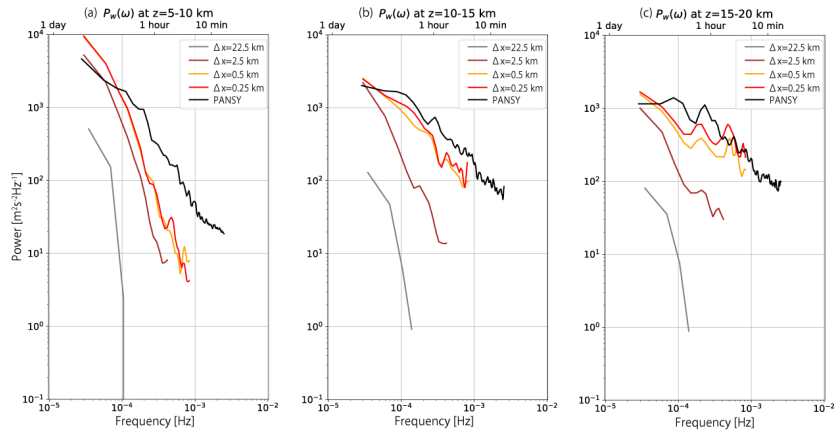


図 2. 高度 (a) 5～15km、(b) 10～15km、(c) 15～20km における鉛直風の周波数スペクトル密度。黒線が PANSY レーダーによる観測を表す。灰色、茶色、橙、赤線がそれぞれ $\Delta x=22.5$ km (D1)、2.5 km (D2)、0.5 km (D3)、0.25 km (D4) の結果を表す。

4. まとめ

本研究では、さまざまな水平格子間隔を用いた数値シミュレーション結果と南極昭和基地に設置された大型大気レーダー (PANSY レーダー) によって観測された鉛直風の特徴との比較を行い、鉛直風擾乱の再現性の水平解像度依存性を調査した。本研究の意義は、大型大気レーダーによる運動量フラックスおよび鉛直風の観測値と、一連の数値シミュレーションの結果を直接比較できる点にある。結果、下部成層圏における運動量フラックスは、 $\Delta x=2.5$ km 以下のシミュレーションによって定量的によく再現されることが示唆された。言い換えれば、下部成層圏の運動量フラックスは $\Delta x \leq 2.5$ km のシミュレーションで収束する可能性が高い。一方、下部成層圏の鉛直風の周波数スペクトルは、 $\Delta x \leq 0.5$ km のようなより細かい解像度のシミュレーションで観測とよく一致した。しかし、対流圏においては、 $\Delta x=0.25$ km のシミュレーションでも、高周波数帯におけるパワースペクトル密度がレーダー観測よりも過小評価される傾向がみられた。

参考文献

- (1) Sato, K., Tsutsumi, M., Sato, T., Nakamura, T., Saito, A., Tomikawa, Y., Nishimura, K., Kohma, M., Yamagishi, H., & Yamanouchi, T. (2014). Program of the Antarctic Syowa MST/IS radar (PANSY). *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 118, 2–15.
- (2) Fritts, D. C., Lund, A. C., Lund, T. S., & Yudin, V. (2022). Impacts of Limited Model Resolution on the Representation of Mountain Wave and Secondary Gravity Wave Dynamics in Local and Global Models. 1: Mountain Waves in the Stratosphere and Mesosphere. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 127(9), e2021JD035990.

衛星データを利用した可降水量解析と短時間降水予測深層学習モデルの開発

Development of a Deep Learning Model for Short-term Precipitation Forecasting and Precipitable Water Analysis from Satellite Data

金子 凌, 千葉大学・環境リモートセンシング研究センター, E-mail: rkaneko (at) chiba-u.jp
島袋 琉, 熊本大学大学院・自然科学教育部, E-mail: 234d9062 (at) st.kumamoto-u.ac.jp
小槻 峻司, 千葉大学・国際高等研究基幹, E-mail: shunji.kotsuki (at) chiba-u.jp

Ryo Kaneko, Center for Environmental Remote Sensing, Chiba University
Ryu Shimabukuro, Graduate School of Science and Technology, Kumamoto University
Shunji Kotsuki, Institute for Advanced Academic Research, Chiba University

要旨

この研究は、AI モデルを使った豪雨予測の可能性を探るもので、日本領域での適用を検討している。2 つの目標を設定して研究を進めた。目標 A では、解析雨量や AMeDAS、衛星観測データを用いて深層学習モデルを構築し、長いリードタイムでの大雨予測の精度向上を目指した。その結果、令和 2 年 7 月豪雨において、気象庁モデルが予測できなかった大雨を、深層学習モデルが予測できる可能性を示した。目標 B では、制限付きボルツマンマシンを用いて降水量の超解像を試み、2 層構造の小さなモデルでも、ある程度の精度で超解像が可能であることを示した。今後は、学習データの追加やモデルの改良によって、さらなる精度向上を目指し、効率的な学習手法の開発が期待される。

1. はじめに

豪雨を予測することは、国民の生命・財産を守る上で重要であるが、未だその予測は難しい。近年では、これを AI モデル（深層学習モデル・機械学習モデル）で予測する試みも行われ始めており¹⁾、物理モデル以外のアプローチによる予測精度改善も期待されている。一方、これらを日本領域で適用した事例は未だ少なく²⁾、検討の余地を残している。そこで本研究では、以下の 2 つの目標をもとに研究を行い、適用可能性を検討した。

【目標 A：広域の衛星観測データを活用した、深層学習モデルによる長リードタイムの大雨予測可能性の検討】

物理モデルを用いた線状降水帯の予測性能は、最新の数値気象モデルでも未だ十分ではない。例えば、令和 2 年 7 月豪雨発生時において、気象庁の提供する降水短時間予報は、50 mm/h を超える大雨を過小評価した。本研究は、解析雨量・AMeDAS・衛星画像のように、再解析データと観測データのみを用いて AI モデルを構築し、6 時間先以上の豪雨予測可能性を向上させることを目的とする。

【目標 B：制限付きボルツマンマシンによる降水超解像】

AI 気象モデルは世界的に大規模化が進み、より精度の良いモデルを得るための学習や検証を行うのが、困難になってきている。そこで本目標では、わずか 2 層構造の制限付きボルツマンマシン³⁾を用いることにより、降水量分布の超解像（ダウンスケーリング）が可能か検証する。モデルが 2 層構造と、近年のモデルよりも非常に小さく、このダウンスケーリングが可能となるならば、様々な物理モデルの出力結果から効率良く局所的な豪雨を見つけられる可能性がある。

2. 問題設定・方法

目標 A：学習・解析対象の領域を九州地方とする。この領域の解析雨量・AMeDAS・衛星画像を入力として、1 時間降水量を予測するモデルを構築した。リードタイムは 3 から 12 時間先までで、1 時間ごとに予測を行っている。その精度を同時刻の解析雨量を用いて評価した。

目標 B：日本領域の解析雨量を 28 グリッド四方のパッチに分割し、2006 年から 2017 年までのデータを学習に用い、2018 年から 2023 年までのデータを検証に使った。ビンニングを用い、4 分の 1 に縮小した 7 グリッド四方のデータから、元のデータが復元できるかを検証した。

3. 結果と考察

目標 A：

令和 2 年 7 月豪雨で、線状降水域が最も強まった時刻である 2020 年 7 月 4 日午前 4 時（JST）の大雨イベントに対して、深層学習モデルおよび気象庁モデル（降水短時間予報）の 3 時間～12 時間先の予測結果を Fig. 1 に示す。上図左端は、正解値を示す解析雨量（気象庁定義に従った 5 カテゴリ）であり、それから右側の上段が深層学習モデルによる予測結果、下段が気象庁モデルの予測結果を示す。6 時間先予測における気象庁モデルが、視界不良や土砂災害をもたらす基準値とされる非常に

激しい雨 (≥ 50 mm/h) を全く予測できていなかったのに対し、本研究の深層学習モデルでは、海上まで線状に伸びた大雨領域を予測している。一方、陸上では塊状の大雨を予測しているため、無降水・弱い雨域を過大評価してしまう課題が残る。しかし、防災上の観点からは災害級の大雨を見逃さないことがより重要であり、本モデルはリアルタイムという利点も相まって、今後の防災実務への適用が期待される。

全体的に過大評価の傾向があるものの、100 mm/h 以上を記録した熊本の線状豪雨域を12時間前に予測していることは有用であると考えられる。

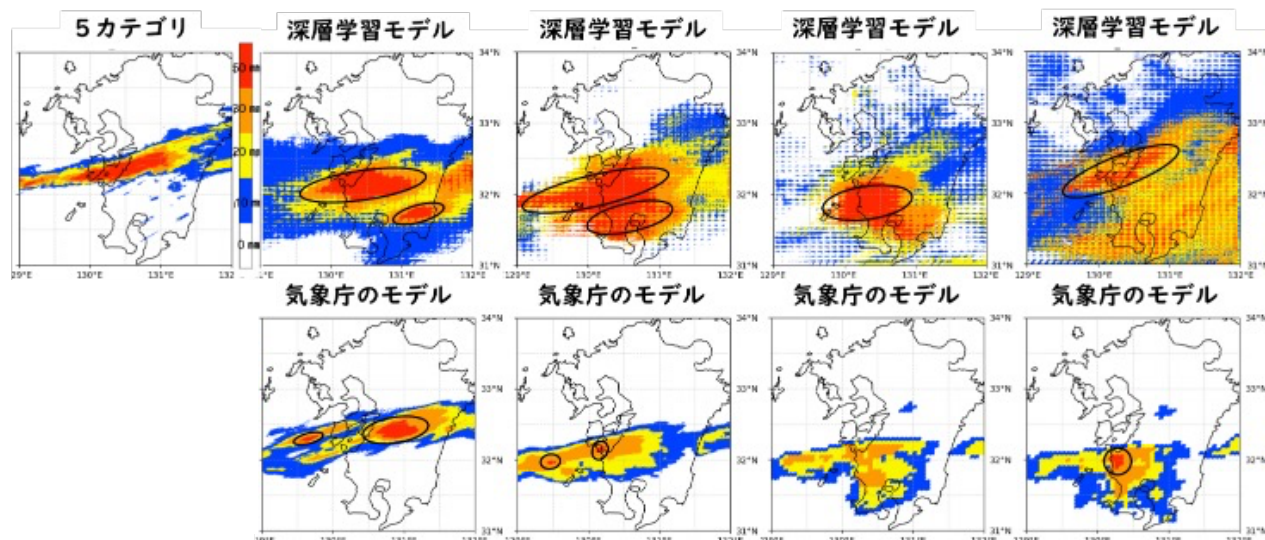


Fig. 1 Prediction examples of heavy rainfall (4 a.m. (JST), July 4th, 2020.)

目標 B :

Fig. 2 は超解像の結果の1つである。左から、入力降水量、出力降水量、真値である。入力の際には存在しないような、強い降水の領域が復元できることもあることが明らかとなった。他に、地形性降雨をより精度良く超解像できる事例も存在することが明らかとなった。過大評価、過小評価の傾向、そしてノイズの発生は散見されるが、平年値のような傾向は学習できていると考えられ、わずか2層のモデルの性能としては、今後の成果に期待できる可能性がある。

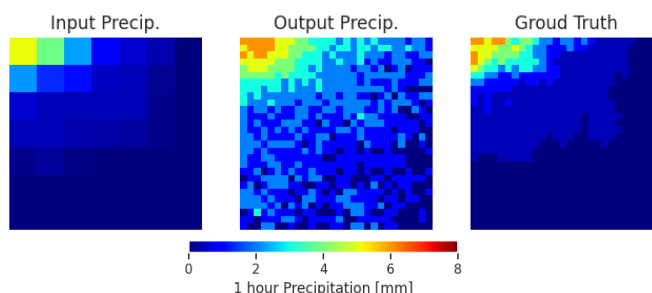


Fig. 2 Super resolution example of restricted Boltzmann machine.

4. まとめと今後の展望

本研究では、降水短時間予報と超解像（ダウンスケーリング）を主に解析雨量を元に行い、豪雨予測の可能性や、小規模モデルでの超解像の可能性を示唆した。今後は、学習データの追加による精度向上や、モデルの構造・学習手法をブラッシュアップし、衛星データなども用いた効率的な学習を目指すことを検討する必要がある。この際に、目標Bで得た、効率的なモデルの学習手法を降水短時間予報にも取り入れるなど、融合的な検討を行うことが、精度向上の為の1つの突破口になることが考えられる。

参考文献

- (1) Price, I., & Rasp, S., 2022: Increasing the accuracy and resolution of precipitation forecasts using deep generative models, Proceedings of Machine Learning Research, 151, 10555–10571.
- (2) 金子凌, 芳村圭, 2024: “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, 16.
- (3) Liao, R., Kornblith, S., Ren, M., Fleet, D. J., & Hinton, G. 2022: Gaussian-Bernoulli RBMs without tears. arXiv.Org. <https://doi.org/10.48550/ARXIV.2210.10318>

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

許 浩東, 東大・大気海洋研, E-mail: yabe.itsuka(at)aori.u-tokyo.ac.jp

王 子欽, 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

Haodong Xu, Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo

Ziqin Wang, Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo

要旨

魚類成長－回遊モデルとしてマサバのモデル改良を進め、回遊を行う中で、マサバの経験環境が決定され、その環境をもとでマサバの成長が決まり、その結果計算される体長が死亡率に影響するモデルを構築した。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、沈降性マイクロプラスチックの北太平洋規模での分布を提示した。

1. はじめに

北西太平洋は魚類生産が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と比較することにより、モデルの改良方針を示す。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、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水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続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、成魚まで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 (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示された (Wang et al., 2023)。また、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生息適地を示した (Xie et al., 2024)。本年度は、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の試験を継続するとともに、魚類成長－回遊モデルとしてマサバのモデル改良を進めた。さらに、沈降性マイクロプラスチックの北太平洋規模での分布を提示し、査読論文として発表した。

3. 結果と考察

マサバの魚類成長一回遊モデルの改良を進め、回遊に伴い経験環境が決定され、成長が決まり、その結果計算される体長が死亡率に影響するモデルを構築した。気候値を用いてこのモデルをチューニングし、黒潮域で孵化したマサバが、黒潮続流域を生育場とし、夏季に索餌場となる亜寒帯前線域へ回遊し、越冬のため黒潮続流域に南下する季節回遊を再現できるようにした。この際、索餌場としては、北海道南東海域に加え、近年注目されている **Isoguchi Jet** の終端部分に相当する海域への集積がモデル内で再現された。これらマサバの生息域では、2017 年 8 月から黒潮大蛇行が発生しており、マサバの成長、回遊、生残に影響を与えていることが推測される。また、近年マサバの体重が減少していることを報告されている (Kamimura et al., 2021; Lin and Ito, 2024)。このため、開発してモデルを、黒潮大蛇行が発生した 2017 年以降の海洋条件で駆動し、黒潮大蛇行の影響を調べた。黒潮大蛇行後は、マサバの分布が沖合化する傾向を示し、体重が減少する傾向を示した。現在、これらの要因を詳しく調べている。

また、マイクロプラスチックの海洋中での輸送実験を継続し、1950 年から 2015 年の 65 年間に渡る沈降性マイクロプラスチックの北太平洋規模での動態を調べた。沈降性マイクロプラスチックの多くは流出源である河口域周辺の陸棚域の海底へと蓄積するが、近辺に黒潮などの強流帯が存在する場合は、沈降速度の遅い小粒径の沈降性マイクロプラスチックを中心に沖合へと輸送され、100km 以上離れた海域に輸送されることが示された。また、流出源となる国・地域をもとに 65 年間の間に蓄積したマイクロプラスチックの組成をクラスター解析した結果、北太平洋は 6 つの海域に区分され、そのうち 4 つは沿岸地域からの流入が主体であったが、2 つの海域区分では黒潮続流および北赤道海流による遠隔輸送が支配的であることが明示され、強流帯域に接する地域でのプラスチック廃棄物管理の重要性が示された。これらの内容は Xu et al. (2025) として発表した。

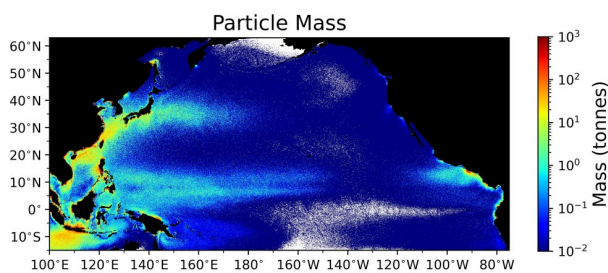


Fig. 1 Seafloor deposited heavy microplastics during 1950–2015 simulated by the model. From Xu et al. (2025, Marine Pollution Bulletin).

4. まとめと今後の展望

魚類成長一回遊一個体群動態結合モデルの開発を進め、黒潮大蛇行の影響を調べた。また、北太平洋規模のマイクロプラスチックの動態を調べた。両者を合わせることで、マイクロプラスチックと魚類の遭遇リスクを評価する準備が整った。

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.pocean.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>
- (9) Lin Z., S. Ito, 2025, Fish weight reduction in response to intra- and interspecies competitions under climate change. *Fish and Fisheries*, 25, 455–470. <https://doi.org/10.1111/faf.12818>
- (10) Xu H., Y. Matsumura, R. Yamashita, H. Nakano, S. Ito, 2025, Seafloor deposition of heavy microplastics in the North Pacific estimated over the past 65 years by simulation of a Lagrangian tracking model. *Marine Pollution Bulletin*. 117536

数値モデルを用いた大気循環の変動力学の探究

Numerical study on dynamics of atmospheric circulation variability

小坂 優, 東大・先端研, E-mail: ykosaka(at)atmos.rcast.u-tokyo.ac.jp
戸田 賢希, マックス-プランク気象研, E-mail: masaki.toda(at)mpimet.mpg.de
宮本 歩, カリフォルニア大・スクリプス海洋研, aymiyamoto(at)ucsd.edu
渡部 雅浩, 東大・大気海洋研, hiro(at)aori.u-tokyo.ac.jp

Yu Kosaka, Research Center for Advanced Science and Technology, The University of Tokyo
Masaki Toda, Max-Planck Institute for Meteorology
Ayumu Miyamoto, Scripps Institution of Oceanography, University of California San Diego
Masahiro Watanabe, Atmosphere-Ocean Research Institute, The University of Tokyo

要旨

過去 40 年間の太平洋ウォーカー循環強化に対する熱帯外の海面水温変動からの影響を、気候モデルを用いたペースメーカー実験により評価した。気候モデルを放射強制力のみで駆動した実験では観測された強化の再現は困難であるのに対し、熱帯外の海面水温変動を観測された変動に束縛することで、強化をよく再現できることが分かった。更なる実験から、この熱帯外からの影響の半分強が亜熱帯南太平洋からの影響であること、またそれ以外にも北太平洋やそれ以外の海域からの影響もあることが分かった。特に亜熱帯南東太平洋において、CMIP6 気候モデルはいずれも観測された海面水温変化を捉えておらず、これが太平洋ウォーカー循環変化の再現を困難にしていることが示唆された。

1. はじめに

包括的な衛星観測データが利用できる 1980 年代以降、熱帯太平洋のウォーカー循環は強化傾向にあり、対応して同じ期間の熱帯太平洋の海面水温はラニーニャ的な変化を示す (Wills et al. 2022)。これは東アジアを含む全球の気候に影響していると考えられる。ところが、歴史的放射強制要素で駆動した気候モデルシミュレーションは、最新の CMIP6 においても平均的にはウォーカー循環の弱化とエルニーニョ的な変化を示し、観測データはマルチモデルアンサンブルの端に辛うじて捉えられる程度である (Eyring et al. 2021)。このことが、ウォーカー循環強化の要因の定量化を困難にしている。

このウォーカー循環強化に対し、近年の研究は特に南半球の熱帯外からの遠隔影響を示唆している (Kim et al. 2022; Dong et al. 2022)。一方で、特に今世紀初めの地球温暖化の停滞に関する研究は熱帯大西洋・インド洋からの海盆間影響の寄与も示唆される (Li et al. 2016; Luo et al. 2012; McGregor et al. 2014)。そこで本研究は、大気海洋結合モデルを用いた各種ペースメーカー実験により、これらの熱帯太平洋外の海面水温変動が太平洋ウォーカー循環強化に及ぼす影響を調査した。なお、詳細は Toda et al. (2024)に報告されている。

2. モデル実験と解析手法

米国地球流体力学研究所結合気候モデル CM2.1 (Delworth et al. 2006) を用いたアンサンブルシミュレーションを用いた。HIST 実験は CMIP5 の歴史的放射強制力を RCP4.5 シナリオで延長したもので、40 メンバーからなる。これに加えて、指定した海域の海面水温変動を観測されたものに一致させるペースメーカー実験を行った。ペースメーカー実験では、指定した海域で海面水温偏差を観測値へと緩和するもので、海洋上層 50 m を 10 日で緩和するように海洋への顕熱フラックスを上書きすることで行う。この緩和領域の外には、緩和強度を線形にゼロまで減少させるバッファ領域を置いた。海面水温の観測データとして ERSSTv5 (Huang et al. 2017)を用いた。熱帯外ペースメーカー実験 (XTOGA 実験) 実験では、熱帯の外の海面水温変動を観測値に一致させた実験である。このうち XTOGA15 実験では、南北太平洋で緯度 15° より極側の海面水温偏差を緩和し、緯度 15° から 10° までにバッファ領域を置く。XTOGA25 実験では、緩和領域を緯度 25° より極側に、バッファ領域を緯度 25° から 20° までとした。いずれも、インド洋・大西洋では緯度 35° より極側を緩和域、緯度 30°~35° をバッファ領域とした。それ以外のペースメーカー実験については後述する。いずれのペースメーカー実験も、シミュレーションは 1940 年から 2020 年まで、それぞれ 20 メンバーアンサンブルで実施した。また比較する観測値として大気再解析 ERA5 及び JRA-55 を使用した。

太平洋ウォーカー循環の強度は、赤道東太平洋 (5° S–5° N, 160°–80° W) とインド洋-西太平洋 (5° S–5° N, 80°–160° E) の間の海面気圧差で評価した。本研究は 1980-2020 年のトレンドを主に評価したが、IPCC 第 6 次評価報告書と同じ 1980-2014 のトレンドについても同様の結果を確認している。

3. 結果と考察

HIST 実験は平均的にはウォーカー循環の弱化とエルニーニョ的な変化を示す。一方、XTOGA15 実験はウォーカー循環強化をよく再現し、アンサンブル平均は観測値と近い値となった (表 1)。XTOGA15 実験は CMIP6 世代である気候モデル MIROC6 (Tatebe et al. 2019) でも実施し (放射強制力は CMIP6 の歴史的放射強制力を SSP2-4.5 シナリオで延長)、CM2.1 とよく一致する結果を得た (表 1)。太平洋における緩和領域を狭め亜熱帯南北太平洋での大気海洋相互作用を許した XTOGA25 実験では、平均的なトレンドの改善は小さくなるものの、観測値をアンサンブルの範囲内によく捉えている。以上の結果は、熱帯外からの影響が実際に過去 40 年間のウォーカー循環強化に重要な寄与を果たしたことを示している。

海面水温や海上風速のトレンドから、重要な寄与が南太平洋からもたらされていることが示唆された（図は省略）。そこで、XTOGA15 をベースに、緩和領域から北太平洋を除外した（つまり熱帯に加えて北太平洋で完全な大気海洋相互作用を許す）XNPTOGA15 実験を実施したところ、HIST と比べた XTOGA15 におけるウォーカー循環変化トレンドの上昇のうちの 75%が北太平洋以外の影響で説明されることが分かった（表 1）。またさらに、南太平洋亜熱帯のみで海面水温変動を束縛する SPOGA 実験も行った（緩和領域：太平洋の 30°S-15°S、その南北に幅 5° のバッファ領域）ところ、HIST を基準とした XTOGA15 におけるウォーカー循環変化トレンド上昇幅のうちの 57%が亜熱帯南太平洋からの影響のみで説明されることが分かった（表 1）。特に重要と考えられる亜熱帯南東太平洋域（30°-15°S, 90°-70°W）の海面水温トレンドに着目し、そのトレンドを CM2.1 HIST 及び CMIP6 historical-SSP2-4.5 実験データ（利用可能な 245 のアンサンブルメンバー）と比較したところ、観測では 3 つのデータセット（ERSSTv5, COBE-SST2, HadISST）いずれも低温下トレンドを示すが、どのメンバーもこれを捉えていないことが分かった。このことは、亜熱帯南東太平洋域の海面水温トレンドの再現がウォーカー循環強化の再現の鍵であることを示唆する。

最後に熱帯海盆間影響を、XPOGA 実験で評価した。XPOGA は XTOGA 実験をベースとしつつ、熱帯インド洋・太平洋の海面水温変動を追加で束縛し、熱帯太平洋域のみで完全な大気海洋相互作用を許す実験である。XPOGA15・XPOGA25 実験の太平洋における緩和領域設定はそれぞれ XTOGA15・XTOGA25 に準ずる。いずれの XPOGA 実験も、XTOGA 実験に比べて観測変動と一致させる領域が拡大されているにもかかわらず、ウォーカー循環強化トレンドの再現性は低下した（表 1）。これは、ウォーカー循環強化に対する熱帯大西洋やインド洋昇温による影響を示した先行研究と一見すると矛盾する。さらに詳しく調査したところ、CM2.1 では放射強制力に対する熱帯インド洋・大西洋の昇温が観測値より強く、XPOGA 実験では観測値に合うように昇温を抑制していることが、海盆間影響を逆向きに駆動しウォーカー循環の弱化をもたらしていたことが分かった。なお、海盆間影響をペースメーカー実験で調査した研究の多くでは、放射強制力を一定としていたことを付記しておく。

4. まとめ

本研究は近年のウォーカー循環強化及びその気候モデル再現性が低い問題の要因を、様々なペースメーカー実験で調査したものである。ペースメーカー実験の結果から、熱帯外からの影響が観測されたウォーカー循環強化に重要な寄与を持つこと、その主要な影響が亜熱帯南太平洋からもたらされることが分かった。特に亜熱帯南東太平洋では海面水温の低下トレンドが観測されているが、CMIP6 モデルはこれを捉えておらず、この海域の海面水温変化の再現がウォーカー循環強化の再現の鍵であることが示唆された。一方で、北太平洋からの影響も無視できないことも示唆された。他方、熱帯海盆間影響は放射強制力による昇温との相対的な強さに依存するため変化の向きはモデルに依存する。以上の結果は、熱帯太平洋内の気候過程の再現よりも、熱帯外、特に亜熱帯における気候再現がウォーカー循環変化の再現に重要であることを示唆する。

参考文献

- (1) Wills, R. C. J., Dong, Y., Proistosescu, C., Armour, K. C. & Battisti, D. S. Systematic climate model biases in the large-scale patterns of recent sea-surface temperature and sea-level pressure change. *Geophys. Res. Lett.*, **49**, e2022GL100011 (2022).
- (2) Eyring, V. et al. Human influence on the climate system. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis* (eds Masson-Delmotte, V. et al.) 423–552 (IPCC, Cambridge Univ. Press, 2022).
- (3) Kim, H., Kang, S. M., Kay, J. E. & Xie, S.-P. Subtropical clouds key to Southern Ocean teleconnections to the tropical Pacific. *Proc. Natl Acad. Sci. USA*, **119**, e2200514119 (2022).
- (4) Dong, Y., Armour, K. C., Battisti, D. S. & Blanchard-Wrigglesworth, E. Two-way teleconnections between the Southern Ocean and the tropical Pacific via a dynamic feedback. *J. Climate*, **35**, 6267–6282 (2022).
- (5) Li, X. et al. Atlantic-induced pan-tropical climate change over the past three decades. *Nature Climate Change*, **6**, 275–279 (2016).
- (6) McGregor, S. et al. Recent Walker circulation strengthening and Pacific cooling amplified by Atlantic warming. *Nature Climate Change*, **4**, 888–892 (2014).
- (7) Luo, J.-J., Sasaki, W. & Masumoto, Y. Indian ocean warming modulates Pacific climate change. *Proc. Natl Acad. Sci. USA*, **109**, 18701–18706 (2012).
- (8) Toda, M., Kosaka, Y., Miyamoto, A., & Watanabe, M. Walker circulation strengthening driven by sea surface temperature changes outside the tropics. *Nature Geosci.*, **17**, 858–865.
- (9) Delworth, T. L. et al. GFDL's CM2 global coupled climate models. Part I: formulation and simulation characteristics. *J. Climate*, **19**, 643–674 (2006).
- (10) Huang, B. et al. Extended reconstructed sea surface temperature, version 5 (ERSSTv5): upgrades, validations, and intercomparisons. *J. Climate*, **30**, 8179–8205 (2017).
- (11) 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.

モデル/カテゴリー	データセット/実験	アンサンブルサイズ	トレンド (hPa/100 年)
再解析	ERA5		1.14
	JRA-55		1.39
CM2.1	HIST	40	-0.46 ± 0.93
	XTOGA15	20	1.11 ± 0.71
	XTOGA25	20	0.42 ± 0.67
	XPOGA15	20	0.25 ± 0.91
	XPOGA25	20	-0.56 ± 1.28
	XNPTOGA15	20	0.71 ± 0.46
	SPOGA	20	0.44 ± 0.53
MIROC6	XTOGA15	20	1.10 ± 0.73

表 1. ウォーカー循環強度の 1980~2020 年のトレンド。モデル実験についてはアンサンブル平均±アンサンブル単位標準偏差で表記。

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、昨年度に引き続き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、再解析データとの比較を通して解析を行った。結果より、半球間濃度差の年々変動をよく再現する時期とそうでない時期があることが示され、また輸送解析からは北半球の冬季に熱帯上部対流圏に現れる大規模渦輸送プロセスに伴う南半球への高濃度 CO₂ 輸送経路の年々変動だけでは半球間濃度差の年々変動の再現失敗を説明することができなかった。また、本研究で NICAM を用いて行なったシミュレーションは再解析データと比較して、熱帯域での大規模渦輸送プロセスに伴う半球間 CO₂ 輸送が過大傾向にあることが示された。

1. はじめに

全球規模の炭素循環を理解する上で、温室効果ガスの半球間濃度差 (Inter-Hemispheric Gradient: IHG) を解析し、その変動の成因を明らかにすることは有用である。二酸化炭素 (CO₂) の IHG は人為起源の排出量及び陸域生態系による吸収量の地理的偏在の影響を大きく受け、常に北半球の方が濃度が高いという勾配を維持しつつ、それらの吸排出源の年々変動が勾配の時系列的な変化に影響していると考えられる。さらに、赤道をまたぐ CO₂ の正味輸送量の変化についても、勾配の年々変動に大きく寄与する。赤道をまたぐ北半球から南半球への CO₂ の輸送経路としては、熱帯域での対流活動に伴って対流圏上部に運ばれた北半球起源の CO₂ を多く含む気塊が、さらに熱帯上空、特に中央太平洋域で 10 月から 4 月にかけて西風偏差をもつ東西風によって効率よく運ばれることが先行研究 (Francey and Frederiksen, 2016) によって明らかにされており、この領域は「西風ダクト」と呼ばれている。エルニーニョ・ラニーニャの期間と連動して、中央太平洋域での西風偏差が極端に弱まる「西風ダクトの閉塞」が起こった場合、半球間輸送は阻害され、IHG は拡大することが期待される。今年度の研究では、IHG の観測結果と化学輸送シミュレーション、解析プロダクトを比較し、その再現性について議論するとともに、輸送に関する帯状平均場の解析を行った。

2. CO₂ 半球間濃度勾配 (IHG) の解析とその結果

CO₂ の観測データには、温室効果ガス世界資料センター (WDCGG) より配布されている、オーストラリア連邦科学産業研究機構 (CSIRO) によるハワイ・マウナロア (MLO) と南極点 (SPO) での系統的長期地上観測データを用いた。シミュレーションには NICAM を用い、2008 年から 2020 年までの CO₂ 輸送シミュレーションを風速をグリッドナッジングで与えながら計算した。ナッジングのための参照データにはヨーロッパ中期予報センター (ECMWF) が配布する気象再解析データセット ERA5 を用いた。空間解像度は 224km、鉛直層数は 78 層であり、CO₂ フラックスには NISMOM-CO₂ データセット (Niwa et al., 2022) を用いた。解析には ECMWF が配布する CO₂ 濃度を含む再解析データ

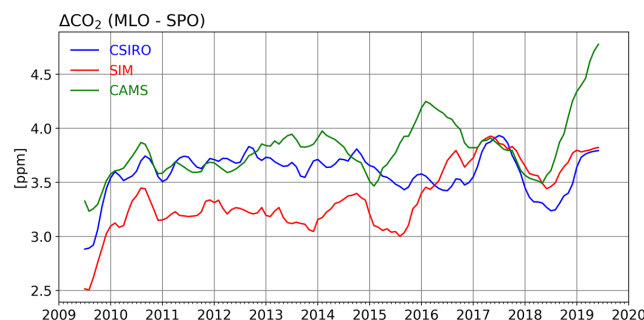


図 1. ハワイ・マウナロア観測点 (MLO) と南極点 (SPO) の濃度差の時系列。それぞれ地上観測結果 (CSIRO)、NICAM によるシミュレーション結果 (SIM)、長期再解析データの結果 (CAMS) を表す。CO₂ 濃度は月平均値を用い、シミュレーションと再解析データは観測点に最も近い格子点の大気最下層の値を用いた。

セットである CAMS も利用した。図 1 に地上観測、シミュレーション (NICAM)、再解析データ (CAMS) による IHG (MLO 地点の 大気最下層月平均 CO₂ 濃度から同じく SPO 地点の濃度を引いた値) の時系列を示す。2009 年から 2019 年の 10 年間に おいて半球間の CO₂ 濃度差は平均で 3.5ppm 程度あり、特に顕著な年々変動としては 2009 年秋から 2010 年春にかけて、2017 年の 冬から春にかけて、そして 2018 秋から 2019 年春にかけて 0.5ppm 程度の濃度差拡大が起こっている。逆に 2017 年夏から冬 にかけては濃度差が 0.7ppm 程度小さくなる時期が見られるが、これは直前の濃度差拡大を解消したような変動であると捉え られる。一方で、モデルシミュレーションは平均濃度差が観測結果より 0.5ppm 程度小さく、現実大気よりも半球間交換が強い、または CO₂ 排出量の南北間での差が現実よりも小さい可能性を示唆する結果となった。年々変動の再現性においては、 2009 年、2017 年、2018 年の変動の傾向をよく再現することがわかったが、2015 年秋から 2016 年春にかけて、観測では見ら れない半球間濃度差の拡大時期が現れた。再解析データの結果はより観測に近い結果を示しているが、2015 年から 2016 年 にかけて濃度差が顕著に拡大する時期が存在し、観測とは異なる年々変動を示す期間があることがわかった。

3. 帯状平均した輸送解析とその結果

次に半球間輸送の経路を多角的に調査するために、領域平 均した CO₂ 濃度の月々の変化分を計算した。図 2 に 0°-30°S の緯度帯で帯状平均した結果を示す。再解析データの結果 (図 2 下) では、冬季に上部対流圏を入り口として北半球の 高濃度気塊が大規模渦輸送によって南半球に流入し、やがて 南半球自由対流圏の全高度に拡がっていく傾向をよく再現 しており、また 2009 年から 2010 年にかけての流入の弱まり も見られた。観測には見られない IHG の拡大時期であった 2015 年については、対応すると期待される流入の弱まりは顕 著ではなく、この時期の IHG 変動の再現性の悪さが南半球へ の気塊輸送の変化では説明できないことが示された。一方で シミュレーション結果に基づくテンデンスの時系列(図 2 上) は、濃度増加・減少の幅が再解析データより大きく、冬季の 高濃度気塊の流入だけでなく、夏季後半の北半球からの低濃 度気塊の流入についても過大であることが示唆された。こち らの結果においても 2015-2016 年にかけての IHG の拡大を説 明できるような濃度変化は検出できず、むしろ最も濃度が 大きく増加(流入)している年であったことが示された。

この CO₂ 濃度の流入において、大規模平均流と大規模渦輸 送のどちらが卓越しているかを調べるために、変形オイラー 平均 (TEM) を用いて子午面における CO₂ 濃度の帯状平均輸送 を解析した。解析は Miyazaki et al. (2008) によって温位面 での質量重み付き帯状平均(MIM)を用いて適用された手法を 参照したものである。ただし、本研究では MIM の代わりに TEM を用いた。0°-30°S の緯度帯を対象にした解析を行なった結果、再解析データでは 200-400hPa 高度で冬季に大規模渦による 輸送が卓越することが確認され、上述の輸送経路の説明ともよく一致した。また年々変動として 2009-2010 年と 2015-2016 年の時期に渦輸送のテンデンスが弱まっており、そのみの効果では両時期に IHG を拡大させることに寄与していることが わかった。しかし、2015-2016 年の IHG 変動の観測との不一致、また同時期に流入した総 CO₂ 濃度との傾向不一致はそれぞれ 説明できず、別の要因がより強い影響を及ぼしていることが示唆された。シミュレーションではこの高度帯での渦輸送が初 秋から春までずっと強く現れる結果を示し、大規模渦輸送のバイアスが温室効果ガスの半球間交換を過大にしている主要因 であることが示唆された。

4. まとめと今後の展望

CO₂ の IHG を観測、再解析データ、シミュレーションの 3 者間で比較解析し、また半球間の輸送経路と輸送プロセスについ ての解析を行なった結果、一部の IHG の年々変動は再解析データとシミュレーションにおいてよく再現され、また対流圏内 の大規模輸送プロセスによって説明可能であることが示されたが、一部は観測とは異なる IHG の挙動を示し、またその不 一致の要因を半球間の輸送プロセスの再現性の欠如だけでは説明できないことが示された。今後はさらに解析を進め、CO₂ の地 表面フラックスの年々変動や地理的分布が及ぼす影響についても感度実験を実施したい。また、NICAM シミュレーションに おけるバイアスについて、高解像度化や物理プロセスのチューニングによって改善を進めていく。

参考文献

- (1) Francey, R. J., and J. S. Frederiksen. "The 2009-2010 step in atmospheric CO₂ interhemispheric difference". *Biogeosciences* 13.3 (2016): 873-885.
- (2) Niwa, Y., K. Ishijima, A. Ito, and Y. Iida. "Toward a long-term atmospheric CO₂ inversion for elucidating natural carbon fluxes: technical notes of NISMOM-CO₂ v2021. 1." . *Progress in Earth and Planetary Science* 9.1 (2022): 1-10.
- (3) Miyazaki, K., P. K. Patra, M. Takigawa, T. Iwasaki, and T. Nakazawa (2008), Global-scale transport of carbon dioxide in the troposphere, *J. Geophys. Res.*, 113, D15301, doi:10.1029/2007JD009557.

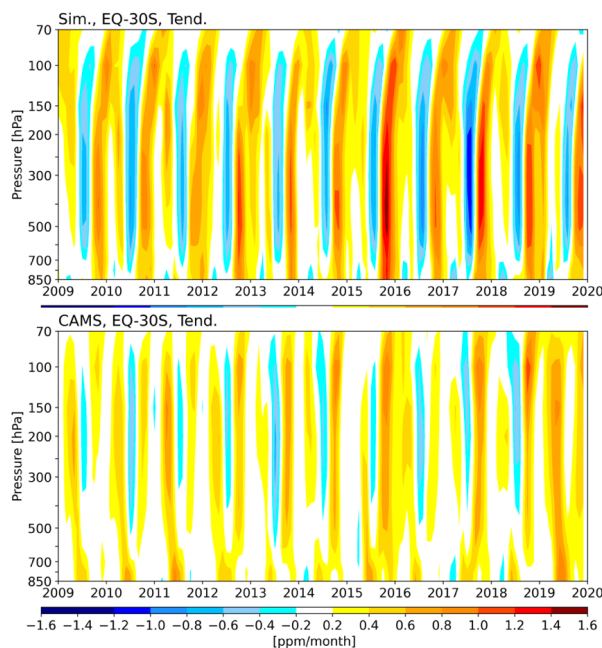


図 2. 赤道から南緯 30 度の緯度帯において、月平均 CO₂ 濃度の変化率 (ppm/month)を領域平均した値の高度-時間断面図。それぞれシミュレーション (上) と再解析データ (下) に基づく結果を表す。

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 長波版の精度を向上させ、33 バンド 89 点としたテーブルを作成した。この更新をさらに推し進め、33 バンド 125 点のテーブルを作成した。これにより、指摘されていた地表面での放射フラックスや対流圏での冷却率の誤差が大幅に改善された。

1. はじめに

MSTRN は、放射グループで開発・維持されているブロードバンドモデルであり、国内気候モデルである MIROC や NICAM をはじめ、J-simulator にも導入されている。また、MSTRN の気体吸収テーブルは、高速計算を必要とする放射伝達モデルである MCSTAR にも使用され、その精度向上は気候予測計算や衛星解析など、さまざまな研究分野における発展に貢献することが期待されている。

MSTRNX の気体吸収テーブルは、29 バンド 111 チャンネル版（以下、温暖化対応版）として広く使用されており、このテーブルは二酸化炭素の倍増状態やメタン、一酸化二窒素の増加を再現するよう最適化されている。しかし、二酸化炭素が4倍増したケースにおいて、放射強制力の精度が不十分であることが指摘されており(1)、また、短波領域における水蒸気吸収が過小評価されていることが明らかとなっている(2)。これらの問題の原因として、現在使用されている温暖化対応版のデータベースが HITRAN2004(3)であることが挙げられ、HITRAN2012(4)以降に追加された近赤外域の水蒸気吸収線が考慮されていないことが影響していると考えられる。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。

これらの課題を解決するため、従来は同一のコードで計算していた太陽放射と地球放射を別々に計算する手法に変更し、MSTRN11-SW および MSTRN11-LW を開発した。本研究では、これらのコードのさらなる精度向上を目指している。

2. 問題設定・方法

昨年度、33 バンド 89 点の地球放射領域における吸収テーブルが構築されたが、CKDMIP(5)の現在の大気状態の評価プロファイル 100 点を用いたこのテーブルの平均誤差は、大気上端では約 $0.5\text{W}/\text{m}^2$ 程度であるが地表面で約 $2.0\text{W}/\text{m}^2$ 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。そのため、今年度はその精度向上に注力した。

昨年度の更新では、高高度での冷却率の精度向上のため、主に CO_2 の強吸収帯で k -分布の積分点の調整を行った。高高度では温室効果気体の濃度が低いため、フラックスの差から計算される冷却率の精度が特に重要である。また、バンド内で吸収線を並べ替えて得られる k -分布のピーク領域では積分位置に対する感度が高いため、従来の機械学習手法では推定が難しいという問題がある。このため、今年度は誤差が大きいバンドに対して特に詳細に積分点及び位置の調整を行った。冷却率の誤差が大きいのはバンド 1, 2, 4, 5 などの水蒸気の吸収が比較的大きい波長域、6 から 11 の二酸化炭素の 15 ミクロン帯を含む強い波長域である。これらのバンドについて一つずつ冷却率プロファイルを確認し、高高度における冷却率の誤差を改善しつつフラックスや対流圏の冷却率の再現性も維持するように努めた。このようにして、33 バンド 125 点の吸収テーブルを新たに構築した。表 1 に各バンドの波長領域、積分点数及び吸収気体を示す。

表 1: 長波領域におけるバンド領域と考慮する吸収気体及び吸収点数

#g	Band range	gas	#g	Band range	gas
1	11 20 – 160	H2O, O3, O2, N2	18	2 1110 – 1180	H2O, O3, N2O, CH4, CFC-12
2	9 160 – 350	H2O, N2	19	2 1180 – 1250	H2O, CO2, O3, N2O, CH4
3	8 350 – 450	H2O	20	4 1250 – 1340	H2O, CO2, N2O, CH4
4	5 450 – 520	H2O, CO2	21	2 1340 – 1450	H2O, CO2, CH4, O2
5	5 520 – 560	H2O, CO2, N2O	22	2 1450 – 1650	H2O, CH4, O2
6	8 560 – 600	H2O, CO2, O3, N2O	23	1 1650 – 1850	H2O, O3, O2
7	8 600 – 630	H2O, CO2, O3, N2O	24	1 1850 – 1910	H2O, CO2, O3, N2O
8	8 630 – 670	H2O, CO2, O3	25	2 1910 – 2080	H2O, CO2, O3

9	10	670 – 710	H2O, CO2, O3	26	1	2080 – 2270	H2O, CO2, O3, N2O, N2
10	9	710 – 740	H2O, CO2, O3	27	1	2270 – 2400	H2O, CO2, N2
11	6	740 – 780	H2O, CO2, O3	28	1	2400 – 2620	H2O, CO2, N2O, CH4, N2
12	2	780 – 830	H2O, CO2, O3	29	1	2620 – 2750	H2O, CO2, O3, CH4, N2
13	2	830 – 860	H2O, CO2, O3, CFC-11eq	30	1	2750 – 2830	H2O, CO2, O3, N2O, CH4, N2
14	2	860 – 940	H2O, CO2, CFC-12	31	1	2830 – 2900	H2O, CH4, N2
15	4	940 – 1060	H2O, CO2, O3	32	1	2900 – 3100	H2O, O3, CH4
16	2	1060 – 1080	H2O, CO2, O3, CFC-11eq	33	1	3100 – 3260	H2O, CO2, O3, CH4
17	2	1080 – 1110	H2O, CO2, O3, CFC-11eq, CFC-12				

3. 結果と考察

図1に最適化に用いた24プロファイル（AFGL標準大気6種類を通常状態、産業革命前、2100年、水蒸気1.2倍にしたもの）を用いて計算した、大気上端（青）と地表面（橙）での誤差を示す。すべてのプロファイルで誤差が 0.8W/m^2 を下回っており、精度が向上していることが示されている。また、RFMIPのPresent Dayの100プロファイルの1番目を用いて計算した正味の放射フラックスとLBLRTMとの差を図2に示す。大気上端でのOLRがMstrnX(紫)より改善されていること、33バンド89点版(水色)の対流圏における差のピークが、33バンド125点版(緑)ではかなり抑えられていることがわかる。放射フラックスはPresent Dayの100プロファイルの差の平均が33バンド125点版で $-0.26(\text{TOA})$ 、 -1.76W/m^2 (地表面)であった。それぞれ -0.36 、 -1.84W/m^2 であった33バンド89点版より精度が向上している。ただし、MstrnXではそれぞれ 0.76 、 -0.19W/m^2 であり、地表面の誤差が拡大している。二酸化炭素八倍の大気状態ではMstrnXよりも誤差が改善しているが、その他の実験大気を用いた結果では同様の傾向、つまり大気上端での上向き放射フラックスの過大評価傾向は改善されているが、地表面では誤差が拡大しているため、今後も修正していく必要がある。

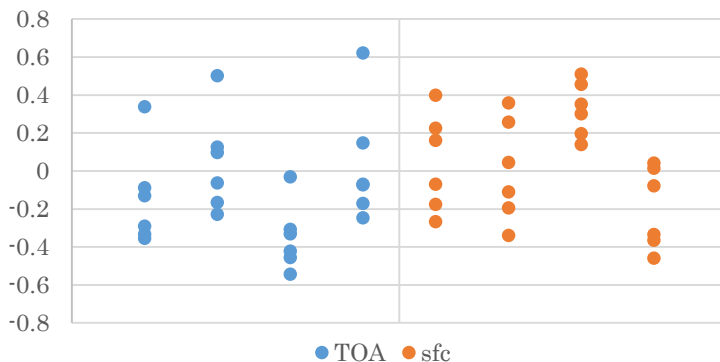


図1：最適化に用いた24種類の大気プロファイルの大気上端（青）と地表面（橙）での誤差

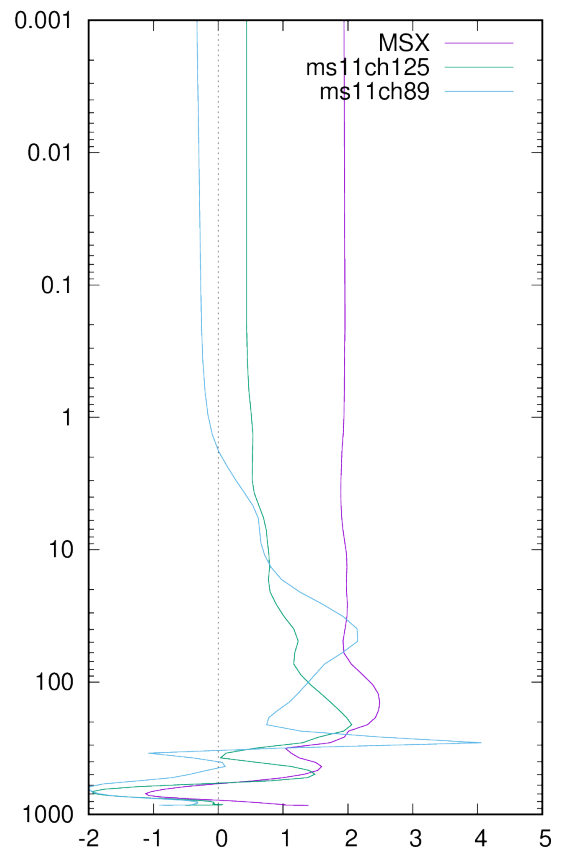


図2：RFMIP、Present Dayの100プロファイルの1番目の大気状態を用いてMstrnX(紫)、Mstrn11(33バンド125点版(緑)、89点版(水色))で計算した正味放射フラックスのLBLRTMとの差。

4. まとめと今後の展望

今後は、さらなる精度向上を目指し、機械学習や深層学習を利用した積分点の最適化を進める予定である。

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.

シミュレータ ILS の開発及び較正・検証

Development, Calibration, and Verification of the Integrated Land Simulator

Wenpeng Xie, 東大・生研, E-mail: wenpeng(at)iis.u-tokyo.ac.jp

Kei Yoshimura, 東大・生研, E-mail: kei(at)iis.u-tokyo.ac.jp

Hongmei Li, 東大・生研, E-mail: lihm(at)iis.u-tokyo.ac.jp

要旨

Land Surface Models (LSMs) are indispensable for simulating land-atmosphere energy balance, yet they remain hampered by uncertain vegetation and soil parameters. Traditional calibration—manual tuning or data assimilation—requires thousands of full model runs, rendering high resolution, multi-site calibration impractical. To overcome this, we introduce a Multi-Task Differentiable Parameter Learning (MdPL) framework that leverages artificial intelligence to co-calibrate both sensible heat and latent heat outputs of the Integrated Land Simulator (ILS). A unified neural surrogate faithfully emulates ILS's energy flux predictions, while a differentiable generator infers optimal parameter sets from site characteristics and past observations via gradient-based optimization. Applied at sixteen PLUMBER2 sites spanning forests, grasslands, and croplands, MdPL-calibrated ILS (ILS_dPL) reduces half-hourly RMSE of sensible heat from ~ 53 W/m² to ~ 42 W/m² and of latent heat from ~ 50 W/m² to ~ 40 W/m² compared to default ILS. Against benchmark models—including four leading LSMs (CLM5, JULES, GFDL, Noah), a pure deep learning model LSTM surrogate, and a simple empirical flux estimator—ILS_dPL achieves roughly 5% lower RMSE at the native resolution, with gains amplifying under hourly and monthly aggregation. Computational cost is reduced by an order of magnitude relative to standard evolutionary calibration, making large-scale, high-fidelity calibration feasible. Remaining challenges include expanding calibration targets beyond energy fluxes and incorporating dynamic vegetation representations.

1. はじめに

Accurately representing land-atmosphere exchanges of energy, water, and carbon hinges on LSMs, which resolve physical processes such as canopy radiation transfer, evapotranspiration, and soil heat conduction. (Cardinale et al., 2012) Yet, LSMs rely on many poorly constrained parameters—particularly those governing plant physiology (e.g., leaf boundary conductance, photosynthetic capacity) and soil hydraulics (e.g., porosity, conductivity). Inadequate calibration of these parameters leads to systematic biases in simulated energy balance fluxes, undermining weather prediction, climate projection, and hydrological forecasting. Traditional approaches—manual parameter tuning or Parameter Data Assimilation (PDA)—demand thousands of full-model simulations, making high-resolution, multi-site calibration impractical. Evolutionary algorithms can explore complex parameter spaces but incur prohibitive computational costs for large-scale applications. (Bacour et al., 2023)

Recent advances in AI—specifically Differentiable Parameter Learning (dPL)—offer a way forward by embedding a fast, differentiable surrogate of an LSM within a gradient-based optimization loop. (Tsai et al., 2021) However, most dPL implementations target a single output (e.g., only sensible heat), neglecting the intrinsically coupled nature of multiple energy fluxes. A calibration that improves one flux at the expense of another yields suboptimal energy balance. To address this, we extend dPL to a MdPL that co-calibrates sensible heat and latent heat simultaneously, ensuring a balanced energy budget and efficient convergence.

2. 問題設定・方法

The core objective is to improve ILS's fidelity in simulating the land-atmosphere energy balance—specifically sensible heat and latent heat across diverse ecosystems while reducing computational cost. We pose the problem as:

How can we efficiently calibrate ILS to produce physically consistent energy fluxes across multiple sites with minimal model runs?

A single neural surrogate approximates ILS's predictions of both sensible heat (Q_h) and latent heat (Q_{le}) using as inputs (a) half-hourly meteorological forcings—shortwave and longwave radiation, air temperature, humidity, wind speed—(b) a seasonal encoding via sine and cosine of day-of-year to capture phenological cycles, and (c) a candidate 12-dimensional parameter vector representing vegetation and soil properties. The surrogate's lower layers extract shared spatiotemporal features through stacked recurrent and fully connected layers, and then branch into two task-specific heads that individually predict Q_h and Q_{le} . Pretraining is conducted on synthetic data generated by perturbing each of the twelve most sensitive parameters—identified from prior sensitivity analysis—around their default values; these perturbed parameter sets are passed through the full ILS to produce reference

flux outputs. By minimizing mean squared error between surrogate predictions and these synthetic ILS outputs, the surrogate learns to emulate ILS behavior across the plausible parameter space, ensuring that subsequent gradient-based calibration remains faithful to the original model's dynamics.

The differentiable parameter generator is a compact neural network that ingests site attributes—one-hot encoded plant functional type, soil texture class, latitude, and longitude—alongside recent observed flux-forcing sequences (Q_h , Q_{le} , and corresponding meteorological variables) over a sliding window of half-hourly timesteps. Its output is a candidate 12-element parameter vector, which is then fed into the pretrained surrogate to produce flux predictions. Training proceeds by minimizing a combined loss function—summing mean squared errors for both Q_h and Q_{le} —computed over a calibration dataset comprising 70% of each site's data. Gradients flow from the surrogate back into the generator, enabling end-to-end differentiable optimization via gradient descent. Validation uses the remaining 30% of each site's data: the calibrated parameters generated by the network are applied in the full ILS, and the resulting flux outputs are compared against observations to confirm that the surrogate-based calibration generalizes to the original model.

3. 結果と考察

Across all sixteen PLUMBER2 sites, ILS_dPL achieved the lowest errors in energy flux simulation. At the native half-hourly resolution, sensible heat RMSE dropped from approximately 53 W/m² with default ILS to about 42 W/m², outperforming the LSTM surrogate (~44 W/m²) and outclassing CLM5, JULES, GFDL, and Noah (all ≥ 58 W/m²). Latent heat RMSE decreased from ~50 W/m² to ~40 W/m², matching or surpassing LSTM (~39 W/m²) and outperforming other LSMs (≥ 52 W/m²). Across temporal scales, MdPL yields roughly 5% lower RMSE than the best pure-AI surrogate (LSTM) and 25%–35% lower RMSE than leading LSMs.

Pearson correlation coefficients for ILS_dPL range from ~0.75 at half-hourly to ~0.88 monthly, whereas LSTM declines from ~0.72 to ~0.80. Kling-Gupta Efficiency similarly favors ILS_dPL, maintaining ~0.50–0.60 across scales, compared to LSTM's decline to ~0.35–0.52. These metrics confirm that the multi-task surrogate preserves physically consistent energy balance relationships, particularly under aggregation where pure data-driven approaches falter.

4. まとめと今後の展望

In this report, we present a Multi-Task Differentiable Parameter Learning (MdPL) framework that uses AI to co-calibrate sensible and latent heat outputs of the Integrated Land Simulator (ILS) across sixteen PLUMBER2 sites. By combining a shared neural surrogate with a differentiable parameter generator, ILS_dPL reduces half-hourly RMSE for sensible heat from ~53 to ~42 W/m² and for latent heat from ~50 to ~40 W/m², outperforming an LSTM surrogate and four leading LSMs (CLM5, JULES, GFDL, Noah).

The most critical next step is to extend our calibration framework beyond energy balance to include soil moisture and surface temperature, thereby achieving a comprehensive land-surface performance. Additionally, integrating dynamic vegetation representations—allowing parameters to evolve with phenology—will enhance accuracy for croplands and seasonal ecosystems. By embedding a fully differentiable surrogate within a multi-task AI framework, we have demonstrated a scalable path to high-fidelity LSM calibration, paving the way for real-time, large-scale applications in climate and hydrological modeling.

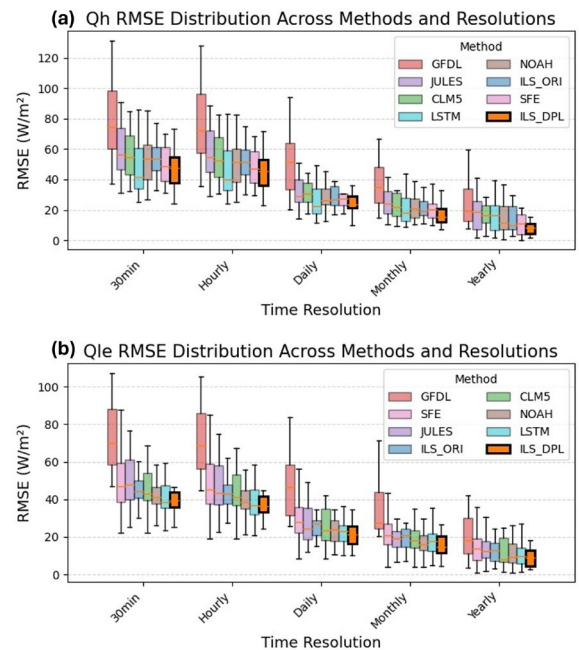


Figure 1. Comparison of RMSE for Sensible and Latent Heat Fluxes across methods and resolutions.

参考文献

- (1) Cardinale, B. J., Duffy, J. E., Gonzalez, A., Hooper, D. U., Perrings, C., Venail, P., Narwani, A., MacE, G. M., Tilman, D., Wardle, D. A., Kinzig, A. P., Daily, G. C., Loreau, M., Grace, J. B., Larigauderie, A., Srivastava, D. S., & Naeem, S. 2012. Biodiversity loss and its impact on humanity. *Nature*, 486(7401), 59–67.
- (2) Bacour, C., Macbean, N., Chevallier, F., Léonard, S., Koffi, E. N., & Peylin, P. 2023. Assimilation of multiple datasets results in large differences in regional-to global-scale NEE and GPP budgets simulated by a terrestrial biosphere model. *Biogeosciences*, 20(6), 1089–1111.
- (3) Tsai, W. P., Feng, D., Pan, M., Beck, H., Lawson, K., Yang, Y., Liu, J., & Shen, C. (2021). From calibration to parameter learning: Harnessing the scaling effects of big data in geoscientific modeling. *Nature Communications*, 12 (1)