

共同研究報告書

令和2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2年度共同研究報告書の発行にあたって

令和2年度共同研究応募及び配分一覧

【特定共同研究】

1. ①衛星データと数値モデルの融合による雲の素過程の研究
②全球雲解像モデルの開発及びデータ解析
分担課題：大気粒子と短寿命気体及び雲との相互作用に関するモデリング研究..... 5
2. 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..... 7
3. 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..... 9
4. 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.....11
5. 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
分担課題：温室効果ガス計測データの解析 13
6. 全球雲解像モデルの開発及びデータ解析
分担課題：全球非静力学モデルの高度化および気象予測研究への応用..... 15
7. 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 ... 17
8. 古海洋研究のためのモデル開発および数値シミュレーション
分担課題：海洋堆積物における脱窒が窒素同位体比に与える影響の見積もり 19

【一般共同研究】

1. トッテン棚氷の海洋シミュレーション.....	21
2. 気候変動予測の不確実性低減に資する海洋大循環モデルの精緻化.....	23
3. 雲解像モデルを用いた雲・雷モデルの開発と高度化.....	25
4. ケープダンレー沖での南極底層水形成に関するモデルと観測の融合研究.....	28
5. 気象・気候シミュレーションを用いた惑星規模現象のメカニズムに関する研究.....	30
6. 海洋再生出現過程に関する研究.....	32
7. NICAM 及び MIROC モデルを用いた地球惑星大気の物質輸送と気候変動の研究....	34
8. 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.....	36
9. 惑星中層大気大循環の力学.....	38
10. 気候モデル・全球雲解像モデルを用いた熱帯大気研究 対流自己組織化における大規模強制力の役割.....	40
11. 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.....	42
12. 衛星降水レーダと静止衛星高頻度観測を組み合わせた降水システムのライフサイクル に関する研究.....	44
13. 放射収支算定のための放射スキームの高速・高精度化.....	46
14. 金星気象現象の全球非静力学モデル NICAM による解明.....	48
15. 全球雲解像モデルデータを用いた熱帯雲活動の解析.....	50
16. アジアモンスーン降水の将来変化と海面水温変化パターンとの関係.....	52
17. 海洋における循環・水塊形成・輸送・混合に関する数値的研究.....	53
18. 次世代海洋生態系モデルを用いた気候変動が海洋生態系に与える影響の予測.....	55
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.....	57

20. 非静力学海洋モデルの汎用化と OGCM とのシームレスな接続	60
21. 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	62
22. 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	64
23. 大気海洋マルチスケール変動に対する数値的研究	65

令和2年度共同研究報告書の発行にあたって

昨年度のこの場で令和元年度の終盤から始まった新型コロナウイルスの蔓延という世界的災禍に言及いたしました。そこから1年が過ぎた今、世界は何度も繰り返すパンデミックの大波に未だに苦しめられています。そして相変わらずその間にも地球温暖化に伴う気候変動は着々と進行しています。近年繰り返す、豪雨、巨大台風、猛暑などの極端現象による災害は、気候変動との関係が指摘されています。人間社会はコロナウイルスとの闘いの中で、さらに度重なる自然災害に対処すると共に、その原因を作り出す気候変動のより精確な理解の下に具体的な対策を急がなければならないことは確実です。

日本においては2018年12月に気候変動適応法が施行されました。気候変動問題は、その実態解明とともに適切な適応計画の策定が重要な課題となっています。2021年1月に就任した米国のバイデン大統領は、4月にバーチャル開催された気候変動サミットにおいて、「今が気候変動問題への取り組みにおける「勝負の10年」である」とし、気候変動問題に取り組む強い決意を表明し、世界が一丸となってこの問題に取り組む体制が整いました。

本共同研究は、「気候」に係るシームレスな現象のメカニズム解明および予測に関して幅広いテーマで参加いただいています。気候の成り立ちと気候変動を語るには、微物理スケールから古気候スケールまで様々な時空間スケールの現象の相互作用解明、同化やプロセス研究を通じた、衛星などの新しい観測データと数値モデル研究の融合等、様々なアプローチが必要です。IPCC第6次評価報告書のWG1報告書もまもなく発表されますが、本共同研究にご参画の皆さまの研究成果に基づく新しい知見が多く引用されていることと考えられます。本共同研究が、これからも引き続き、気候システムの理解と気候変動対策への一助となる最先端の研究の場を提供できましたら幸いです。

令和3年6月

東京大学大気海洋研究所 気候システム研究系 系長
高薮 縁

令和2年度 気候システムに関する共同研究 応募及び配分一覧

研究 区分	研 究 課 題	研 究 組 織	気候系 担当 教員	配 分 額				
				ノード時間	消耗品 千円	旅 費 千円	合 計 千円	
特定 研究 1	①衛星データと数値モデルの融合による雲の素過程の研究 ②全球雲解像モデルの開発及びデータ解析	国立環境研究所 北海道大学大学院理学研究院	五藤 大輔 主任研究員 佐藤 陽祐 特任准教授	佐藤 正樹	100,000	0	0	0
特定 研究 2	全球雲解像モデルの開発及びデータ解析	富山大学	安永 数明 教授	佐藤 正樹	90,000	50	70	120
特定 研究 3	海洋モデルにおけるサブグリッド現象のパラメータ化	東京大学大学院理学系研究科	日比谷 紀之 教授 田中 祐希 助教 永井 平 特任研究員 張 愛琦 大学院生 平野 雄介 大学院生	羽角 博康	200,000	0	0	0
特定 研究 4	高分解能大気モデル及び領域型気候モデルの開発	気象庁予報部数値予報課	坂本 雅巳 予報官 米原 仁 予報官 下河邊 明 技術専門官 横田 祥 技術専門官 齊藤 慧 技術主任 松川 知紘 技官 黒木 志洸 技官 鍋谷 堯司 技官	木本 昌秀	16,000	0	0	0
特定 研究 5	衛星データと数値モデルの複合利用による温室効果気体の解析	鹿児島大学 地球環境学研究所	大橋 勝文 准教授 川崎 昌博 京都大学名誉教授	今須 良一	3,000	15	60	75
特定 研究 6	全球雲解像モデルの開発及びデータ解析	海洋研究開発機構 埼玉県環境科学国際センター 海洋研究開発機構 海洋研究開発機構	那須野 智江 主任研究員 原 政之 研究員 山田 洋平 ポストドクトラル研究員 中野 満寿男 技術研究員	佐藤 正樹	40,000	0	0	0
特定 研究 7	世界海洋大循環モデルの相互比較	気象庁気象研究所	中野 英之 主任研究官 辻野 博之 室長 豊田 隆寛 主任研究官 坂本 圭 主任研究官 浦川 昇吾 主任研究官	羽角 博康	43,200	0	0	0
特定 研究 8	古海洋研究のためのモデル開発および数値シミュレーション	海洋研究開発機構	重光 雅仁 技術研究員 吉川 知里 技術研究員	岡 顕	1,000	0	0	0

令和2年度 気候システムに関する共同研究 応募及び配分一覧

研究区分	研究課題	研究組織	気候系担当教員	配分額			
				ノード時間	消耗品千円	旅費千円	合計千円
一般研究1	トッテン棚氷の海洋シミュレーション	北海道大学低温科学研究所 中山 佳洋 助教 青木 茂 准教授	阿部 彩子	32,000	30	90	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 建部 洋晶 主任技術研究員 小室 芳樹 技術研究員 黒木 聖夫 特任技術研究員 草原 和弥 研究員 渡辺 路生 特任研究員	羽角 博康	300,000	0	0	0
一般研究3	雲解像モデルを用いた雲・雷モデルの開発と高度化	北海道大学大学院理学研究院 東京大学理学系研究科 富山大学学術研究部 高知工科大学環境理工学群 佐藤 陽祐 特任准教授 三浦 裕亮 准教授 濱田 篤 准教授 端野 典平 准教授	佐藤 正樹	40,000	0	0	0
一般研究4	ケーブダンレー沖での南極底層水形成に関するモデルと観測の融合研究	北海道大学低温科学研究所 大島 慶一郎 教授 Mensah, Vigan 博士研究員 中山 佳洋 助教	羽角 博康	25,000	30	90	120
一般研究5	気象・気候シミュレーションを用いた惑星規模現象のメカニズムに関する研究	お茶の水女子大学 神山 翼 助教 大和田 真由 大学院生 小川 公子 大学院生	渡部 雅浩	8,000	0	0	0
一般研究6	海洋再生出現過程に関する研究	東京大学大学院理学系研究科 東塚 知己 准教授 村田 壱学 大学院生 楠 秀大 大学院生	渡部 雅浩	15,000	0	0	0
一般研究7	NICAM及びMIROCモデルを用いた地球惑星大気物質輸送と気候変動の研究	東北大学大学院理学研究科 黒田 剛史 助教 寺田 直樹 教授 笠羽 康正 教授 早坂 忠裕 教授 中川 広務 助教 Pradeep Khatri 助教 情報通信研究機構 京都産業大学 大阪府立大学 笠井 康子 上席研究員 佐川 英夫 准教授 前澤 裕之 准教授	佐藤 正樹 阿部 彩子	100,000	0	25	25
一般研究8	沿岸一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 伊藤 幸彦 准教授 堤 英輔 特任助教	羽角 博康	51,840	0	0	0
一般研究9	惑星中層大気大循環の力学	九州大学応用力学研究所 九州大学総理工 九州大学総理工 山本 勝 准教授 廣瀬 拓海 大学院生 太田 圭駿 大学院生	佐藤 正樹	2,000	0	60	60
一般研究10	気候モデル・全球雲解像モデルを用いた熱帯大気研究	東京大学大学院理学系研究科 三浦 裕亮 准教授 神野 拓哉 大学院生 Ching-Shu Hung 大学院生 山崎 一哉 大学院生 寺田 真未子 大学院生	渡部 雅浩	200,000	50	0	50
一般研究11	衛星データ活用による全球炭素収支推定に向けた大気モデル開発研究	国立環境研究所 八代 尚 主任研究員 丹羽 洋介 主任研究員 齊藤 誠 主任研究員 佐伯 田鶴 高度技能専門員 村上 和隆 特別研究員	佐藤 正樹	50,000	0	0	0
一般研究12	衛星降水レーダと静止衛星高頻度観測を組み合わせた降水システムのライフサイクルに関する研究	富山大学学術研究部都市デザイン学系 富山大学学術研究部都市デザイン学系 濱田 篤 准教授 安永 数明 教授	高薮 縁	200	30	60	90
一般研究13	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 准教授	鈴木 健太郎	500	75	22	97
一般研究14	金星気象現象の全球非静力学モデルNICAMによる説明	京都産業大学 京都産業大学 慶応義塾大学 東京海洋大学 京都産業大学 国立環境研究所 高木 征弘 教授 佐川 英夫 准教授 杉本 憲彦 准教授 関口 美保 准教授 安藤 紘基 助教 八代 尚 主任研究員	佐藤 正樹	120,000	0	100	100
一般研究15	全球雲解像モデルデータを用いた熱帯雲活動の解析	福岡大学理学部 富山大学学術研究部 東京大学大学院理学系研究科 西 憲敬 教授 濱田 篤 准教授 三浦 裕亮 准教授	佐藤 正樹	6,000	0	80	80
一般研究16	アジアモンスーン降水の将来変化と海面水温変化パターンとの関係	東京都市立大学 高橋 洋 助教 神澤 望 特任研究員 北林 翔 大学院生	渡部 雅浩	2,000	30	0	30
一般研究17	海洋における循環・水塊形成・輸送・混合に関する数値的研究	東京大学大気海洋研究所 安田 一郎 教授 川口 悠介 助教 矢部 いつか 大学院生D3 佐々木 雄介 大学院生M2 松浦 知徳 特任研究員	羽角 博康	6,000	0	0	0
一般研究18	次世代海洋生態系モデルを用いた気候変動が海洋生態系に与える影響の予測	北海道大学北極域研究センター 増田 良帆 博士研究員 山中 康裕 教授	岡 顕	25,000	0	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 教授 松村 義正 助教 郭 晨穎 大学院生 佐々木 千春 学術支援職員	羽角 博康	20,000	0	0	0
一般研究20	非静力学海洋モデルの汎用化とOGCMとのシームレスな接続	東京大学大気海洋研究所 北海道大学低温科学研究所 東京海洋大学 Scripps Institution, UCSD 松村 義正 助教 中村 知裕 講師 大橋 良彦 特任研究員 桂 将太 JSPS海外特別研究員	羽角 博康	50,000	0	40	40

令和2年度 気候システムに関する共同研究 応募及び配分一覧

研究 区分	研 究 課 題	研 究 組 織	気候系 担当 教員	配 分 額					
				ノード時間	消耗品 千円	旅 費 千円	合 計 千円		
一般 研究 21	数値モデルを用いた東アジア大気循環の変動力学の探究	東京大学先端科学技術研究センター 中村 尚 教授 小坂 優 准教授 宮坂 貴文 特任助教 岡島 悟 学術支援職員	渡部 雅浩	50,000	0	0	0		
一般 研究 22	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気循環の階層構造の解明	東京大学大学院理学系研究科 佐藤 薫 教授 南原 優一 大学院生 水越 将敏 大学院生	高菽 縁 羽角 博康	100,000	0	0	0		
一般 研究 23	大気海洋マルチスケール変動に対する数値的研究	北海道大学 大学院理学研究院 佐々木 克徳 准教授 北海道大学 大学院地球環境科学研究科 松村 伸治 博士研究員 北海道大学 大学院地球環境科学研究科 堀之内 武 准教授 北海道大学 大学院理学研究院 見延 庄士郎 教授 北海道大学 大学院理学研究院 稲津 将 教授 北海道大学 大学院理学院 丹治 星河 大学院生	高菽 縁 羽角 博康	60,000	0	0	0		
特 定 共 同 合 計				8	件	493,200	65	130	195
一 般 共 同 合 計				23	件	1,263,540	245	567	812
合 計				31	件	1,756,740	310	697	1,007

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・地球惑星科学部門,
E-mail: yosuke.sato(at)sci.hokudai.ac.jp
Daisuke Goto, National Institute for Environmental Studies
Yosuke Sato, Faculty of Science, Department of Earth and Planetary Sciences
Hokkaido University

要旨

これまでの成果から、NICAM-Chem を用いた全球高分解能エアロゾルシミュレーションでは、エアロゾルの特徴的な時空間変動をうまく再現することができたため、本年度は特にエアロゾルと雲の相互作用を介した速い大気応答に着目した。本研究ではブラックカーボンおよび SO₂ に関連する人為起源排出量を変化させる数値実験を実施し、雲・放射フラックスがどのように変化するかを調べた。NICAM-Chem の結果は、MIROC モデルを用いて得られた先行研究の結果に比べると、ブラックカーボンおよび SO₂ の変化量に対する放射フラックスの変化は概ね整合的であったが、ブラックカーボンの曇天での放射フラックスの変化は、MIROC とは異なる値を示した。このことは、従来の気候モデルでは解像できない雲を介した応答を直接的に考慮することで、ブラックカーボンのより正しい気候応答を得られることが示唆される。さらに、実施した感度実験結果で様々な領域に注目し、様々な物理量の変化を解析した。その結果、SO₂ の排出量変化による感度実験では、全球平均値は、硫酸塩エアロゾル増加に伴う冷却効果の増加と、硫酸塩エアロゾルが雲核となることに伴う雲短波放射強制力の増加によって、大きな冷却効果が見られたが、例えばアジアの陸上では雲応答が全球平均値とは異なり、SO₂ の排出量増加に伴う冷却効果は抑制されることが示唆された。

1. はじめに

大気中に浮かぶ粒子（大気粒子、あるいは、エアロゾル）は、大気環境だけではなく、気候にも影響を与えている。本研究では、主に用いられる全球雲解像モデル（NICAM）¹⁾に結合したエアロゾル化学統合モデル（NICAM-Chem）²⁾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

全球雲解像モデル NICAM と結合した大気汚染物質輸送モデルである NICAM-Chem を用いて、本年度は全球 56km 解像度に設定し、雲微物理過程を計算できる NSW6³⁾モジュールを用いた雲解像モードと、NSW6 を用いない非雲解像モード（大規模凝結過程と積雲パラメタリゼーション）を別々に用いた数値実験を行った。積分期間は 4 年間で、最初の 1 年間はスピニアップ期間として解析はしない。なお、非雲解像モードは大気海洋結合モデル MIROC-SPRINTARS (MIROC) の結果と比較するために実行した。本研究ではブラックカーボンおよび SO₂ に関連する人為起源排出量を 1 倍（標準実験）、2 倍、5 倍、10 倍とした感度実験を実施したが、本報告では標準実験と 10 倍実験の差のみを議論する。

3. 結果と考察

表 1 には、MIROC と NICAM-Chem で計算された全球年平均でのエネルギー収支を示した (SO₂ の感度実験結果は表では省略)。NICAM は大気の影響を考慮していないので、解析では大気のみに着目した。NICAM-Chem の結果は、MIROC の結果⁴⁾に比べると、ブラックカーボンおよび SO₂ の変化量に対する放射フラックスの変化は概ね整合的であったが、ブラックカーボンの曇天での放射フラックスの変化は、MIROC とは大きく異なる値をとった。これまでの知見では、ブラックカーボンが存在することで光吸収が強くなり、対流が起こりやすくなり、雲に与える影響が大きいことが知られており、NICAM-Chem を用いることでブラックカーボンの雲を介した速い応答に関する新しい知見が得られる可能性が示唆された。

さらに、実施した感度実験結果で様々な領域に注目し、様々な物理量の変化を解析した (図 1)。その結果、SO₂ の排出量変化による感度実験では、全球平均値は、硫酸塩エアロゾル増加に伴う冷却効果の増加と、硫酸塩エアロゾルが雲核となることに伴う雲短波放射強制力の増加によって、大きな冷却効果が見られたが、例えばアジアの陸上では雲応答が全球平均値とは異なった。すなわち、硫酸塩エアロゾル増加に伴う効果は、雲解像モードで中国の陸上では -8.5 Wm⁻² であり、全球の陸上では -2.4 Wm⁻² であったので、どちらも大きな冷却効果が見られたが、硫酸塩エアロゾルが雲核となることに伴う雲短波放射強制力は、雲解像モードで中国の陸上では +5.2 Wm⁻² であり、全球の陸上では -0.4 Wm⁻² であり、中国の陸上では冷却効果が減少した。詳細な解析は継続中であるが、考えられる理由としては、中国の陸上では特にエアロゾルが多いため、エアロゾル増加によって雲に当たる短波フラックス量が減少し、感度実験間での比較をすると、雲短波放射強制力が正に大きくなったことが挙げられる。本年度の解析から、少なくとも雲の応答が領域ごとに異なることが明らかとなったので、今後はさらに解析を進めたい。

表 1 大気海洋結合モデル MIROC と全球雲解像モデル NICAM-Chem で計算された全球年平均でのエネルギー収支 (BC を 10 倍にした実験と標準実験の差分)。大気上端での瞬時放射強制力の値を-1.0 として、その他の放射フラックス変化量は相対的な値として示している。MIROC の値は Suzuki and Takemura (2019)を参照している。

	MIROC			NICAM-Chem		
	大気上端	大気	地表面	大気上端	大気	地表面
瞬時強制力	-1.0	+2.85	-1.85	-1.0	+3.09	-2.09
速い応答 (晴天)	-0.2	-0.45	+0.25	-0.09	-0.47	+0.38
速い応答 (曇天)	-0.3	-0.3	~0	-0.89	-0.53	-0.36
速い応答 (顕熱あるいは降水)		-1.45	+1.45		-1.25	+1.25
速い応答 (潜熱)		-0.65	+0.65		-0.74	+0.74

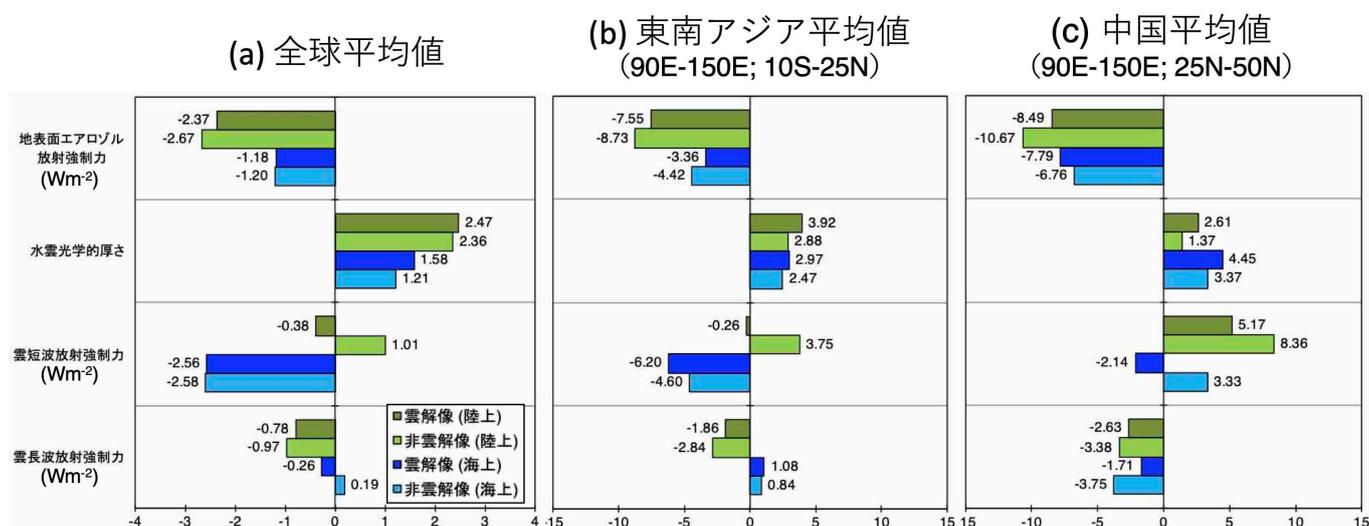


Fig. 1 地表面エアロゾル放射強制力 (Wm⁻²)、水雲光学的厚さ (単位なし)、雲短波放射強制力 (Wm⁻²)、雲長放射強制力 (Wm⁻²) に関して、NICAM-Chem の雲解像モードと非雲解像モードで計算した、陸上と海上における(a)全球平均値、(b)東南アジア平均値、(c)中国平均値。

4. まとめと今後の展望

雲解像できる NICAM-Chem モデルを用いて、エアロゾルの変化に対する放射・雲を介した大気応答を直接的に考慮することで、ブラックカーボンのより正しい気候応答を得られることが示唆された。さらに、その変化は領域的な違いがあり、SO₂ の排出量変化による感度実験では、全球平均値とアジアの陸上では雲応答が異なり、予想された SO₂ の排出量増加に伴う冷却効果が場所によっては抑制されることが示唆された。今後は解析をさらに進めて、領域毎の速い応答を解析し、MIROC と NICAM の 2 つのモデル差の要因を追究したい。

参考文献

- (1) Satoh, M., Tomita, H., Yashiro, H., Miura, H., Kodama, C., Seiki, T., Noda, A.T., Yamada, Y., Goto, D., Sawada, M., Miyoshi, T., Niwa, Y., Hara, M., Ohno, T., Iga, S., Arakawa, T., Inoue, T., and Kubokawa, H. (2014) The non-hydrostatic icosahedral atmospheric model: description and development, *Prog. Earth Planet. Sci.* 1, 18-49, <https://doi.org/10.1186/s40645-014-0018-1>.
- (2) Goto, D., Nakajima, T., Dai, T., Yashiro, H., Sato, Y., Suzuki, K., Uchida, J., Misawa, S., Yonemoto, R., Trieu, T. T. N., Tomita, H., and Satoh, M. (2018) Multi-scale Simulations of Atmospheric Pollutants Using a Non-hydrostatic Icosahedral Atmospheric Model, in: *Land-Atmospheric Research Applications in South and Southeast Asia*, edited by: Vadrevu, K., Ohara, T., and Justice, C., Springer Remote Sensing/Photogrammetry, Springer, Cham.
- (3) Tomita, H. (2008) New microphysics with five and six categories with diagnostic generation of cloud ice, *J. Meteorol. Soc. Jpn.*, 86A, 121-142.
- (4) Suzuki, K., and Takemura, T. (2019) Perturbations to global energy budget due to absorbing and scattering aerosols, *J. Geophys. Res. Atmos* 124, 2194-2209, doi:10.1029/2018JD029808

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

要旨

本研究は、熱帯擾乱をターゲットとして、その発達過程における雲微物理過程のパラメタリゼーションの影響を、緯度（コリオリパラメータ）に関連付けながら、理想的な条件下で調べることを目的としている。ここでは、熱帯擾乱の発達に伴う対流の組織化を定量的に評価するために、鉛直積算した湿潤静的エネルギーを空間方向に（2次元）波数展開して、その低波数成分のエネルギーの時間発展を調べた。本年度は、数値モデルのコリオリパラメータに伴うモデルの対流の再現性の違いを確認するために、緯度0度、1.5度、3度、4.5度、6度、7.5度を仮定した6つの80日間積分実験を行い、結果の違いを比較した。0度、1.5度、6度、7.5度の4つの実験で対流の組織化が見られ、それと共に湿潤静的エネルギーの低波数成分のエネルギー（振幅の2乗値）が強くなることが確認された。一方で緯度3度と4.5度の実験では、顕著な対流の組織化は見られず、湿潤静的エネルギーの低波数成分のエネルギーに大きな変化はなかった。こうした違いにおける雲微物理過程の影響については、今後の課題である。

1. はじめに

雲解像モデルに含まれる物理過程パラメタリゼーションには、様々な経験的な式や経験的な係数が用いられている。それらは過去の実験・観測データに基づいたものであるが、様々な場所の様々なタイプの雲降水システムにおいて同じように使えるわけではなく、対象とする現象に合わせて異なる物理過程パラメタリゼーションを選択したり、係数のチューニングを行ったりする必要がある。本研究課題では、熱帯域から中緯度までの様々なタイプの雲降水システムに関して数値実験を行うと共に、色々な感度実験を行うことで、より適した物理過程パラメタリゼーションの選択や係数の選択に関する知見を得ることが期待できる。こうした知見は、様々な雲降水システムの発生・発達・維持・減衰といった一連の物理メカニズムの理解という点で科学的に重要であるだけでなく、台風や豪雨・豪雪といった気象災害のより精度の高い予測にも役立つと考える。また雲-降水-放射過程フィードバックは、人為起源CO₂の増加による気候変動の予測における大きな不確定要素の1つであり、本研究の熱帯の降水システムに関する数値実験から得られる知見は、将来の気候変化を高い確度で予測する上でも重要な意味を持つ。

2. 問題設定・方法

本課題では、東京大学・海洋研究開発機構・理化学研究所において共同開発している全球雲解像モデルNICAMや、理化学研究所において開発している雲解像モデルSCALEを用いて、様々なタイプの雲降水システムを対象に水平格子間隔数kmの数値計算を行う。その数値計算の結果を観測データと比較することで、幅広い地域における雲降水過程の数値モデルによる再現性について調べる。また色々な感度実験を行い、それらの結果を相互に比較することで、様々な物理過程（雲微物理、乱流、放射等々）の高度化・精緻化への課題を明らかにする。

昨年度までは現実的な状況をターゲットとして、海洋大陸の西端に位置するスマトラ島の西岸の沿岸降水帯の再現性を、雲微物理過程のパラメタリゼーションに着目しながら調べた。そこでは、上層の雲氷の混合比を増加させ、その平均粒径を温度依存させるようにした実験において沿岸降水帯の再現性の向上がみられた。一方で、雲水、雨水、雪、雹に関するパラメータを変化させた場合では、その再現性は不十分であった。更に、計算期間の平均的な日周期の様子を詳しく調べたところ、陸域における対流活動の日周期を起源とする雲氷が上層の東風によって海上に移流され、それに伴い沿岸域で水蒸気と降水が増加するという沿岸降水帯の形成メカニズムが示唆された。

2020年度は、熱帯擾乱の発達過程における雲微物理過程のパラメタリゼーションの影響を、緯度（コリオリパラメータ）に関連付けながら、理想的な条件下で調べることを目的とした。ここでは、理化学研究所において開発している雲解像モデルSCALEを用いた。水平解像度は、水平方向に4km（東西512×南北512格子）とし、計算領域は2048km×2048kmで、側面に周期境界条件を課した。鉛直層数は80層で、最下層50m、最上層1250mの上層に向けて粗くなるストレッチグリッドを使用した。モデル上端は高度約27kmとし、音波や重力波の反射を軽減するため上層約10kmに、レイリー摩擦によるスポンジ層を設定した。計算の初期場には、狭領域（128km×128km）で100日程度モデルを走らせて、その最終日のデータを広領域の2048km×2048kmに水平一様に与えた。更に、下端の境界値として、30°Cで一般的な海面温度を与えた。本年度は、緯度0度、1.5度、3度、4.5度、6度、7.5度を仮定したコリオリパラメータを用いた6つの実験を行った。

3. 結果と考察

数値実験における80日後の可降水量（鉛直積算した総水蒸気量）の分布が、図1に示されている。0度、1.5度、6度、7.5度の4つの実験で、高可降水領域が1つの大きな塊となっている方で、3度、4.5度の実験では、高可降水の領域の極大値は相対的

に小さく、さらに領域全体的に広がっている様子が確認できる。また前者の高可降水量の領域は、対流活動（降水活動）と共に、それに対応した循環場を伴ったもので、平均的な水平風、鉛直風の値も大きくなっている（図略）。これらの結果は、0度、1.5度、6度、7.5度の実験では、対流の組織化とそれに伴う大気擾乱の発達が生じている一方で、3度、4.5度の実験ではそのような擾乱の発達が抑制されていることを意味する。即ち、対流の組織化とそれに伴う大気擾乱が発達メカニズムは、緯度によって異なることが示唆される。これ自体は先行研究である Carstens and Wing (2020)⁽¹⁾と同様の結果であるが、先行研究では結果の違いを客観的に示すことはできていない。本研究では結果を定量的に示すために、鉛直積算した湿潤静的エネルギー（MSE）に着目する。湿潤静的エネルギーは、

$$h = c_p + gz + L_v q_v - L_f q_i$$

と表される物理量で、低緯度域では大気中の水蒸気量を表す指標として使用可能である。ただし降水過程に関して保存するため、降水過程を伴うような現象に関しては、水蒸気量よりも扱いやすいという性質を持つ。上式で h は、（凍結）湿潤静的エネルギー、 c_p は定圧比熱、 g は重力加速度、 z は高度、 L_v は水の潜熱、 q_v は水の混合比、 L_f は融解熱、 q_i は氷の混合比である。本研究では、この鉛直積算したMSEを水平方向に2次元の波数分解して、スケールごとのエネルギーを調べた。これを更に波数の絶対値を計算して、波数ごとのエネルギーの時間変化を示したものが図2になる。図2から緯度が上がるにつれて、高波数（小さなスケール）の変動エネルギーが大きくなるのが分かる。更に、低波数成分（大きなスケール）の変動に着目すると、対流の組織化とそれに伴う大気擾乱の発達が生じた実験（0度、1.5度、6度、7.5度）では、生じなかった実験（3度、4.5度）に比べて、エネルギーが平均的に大きくなっている様子も確認できる。即ち、鉛直積算した湿潤静的エネルギー（MSE）の方程式（波数展開したものを）を用いることで、組織化のメカニズムの違いを定量的に評価できることが期待できる。

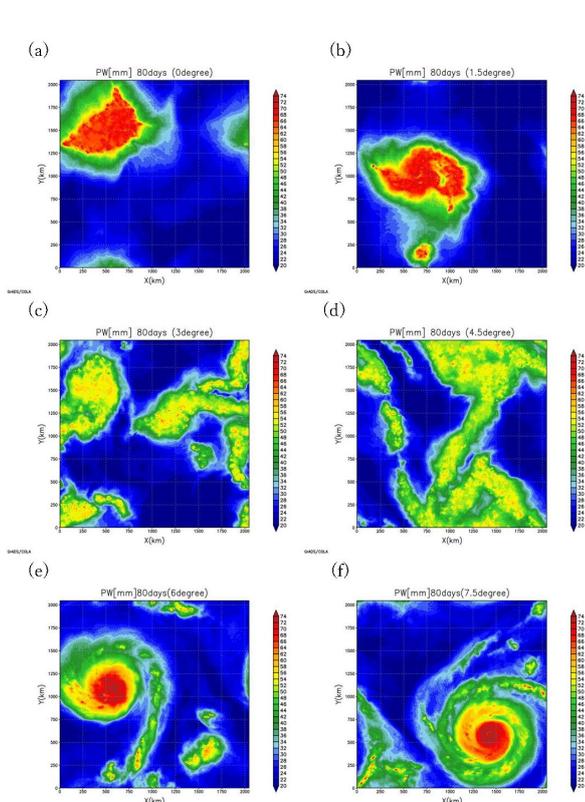


Fig.1. Distributions of the column-integrated water vapor in the experiments at the latitudes of 0° (a), 1.5° (b), 3° (c), 4.5° (d), 6° (e), 7.5° (f).

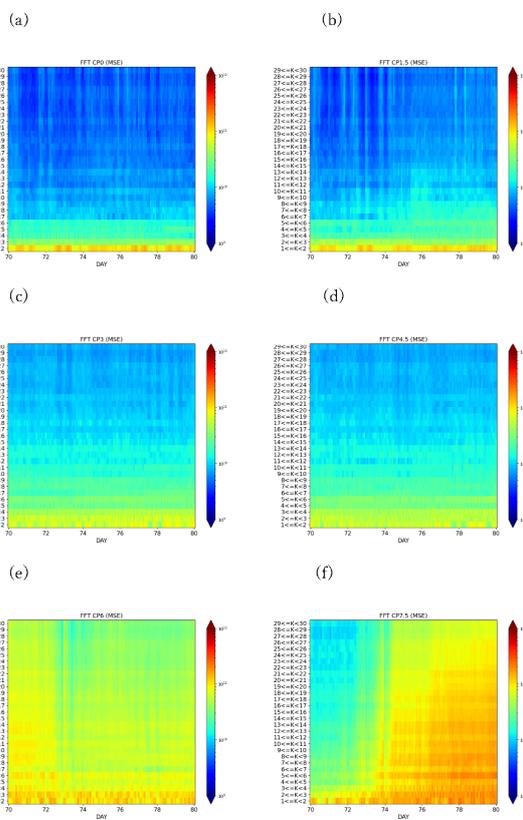


Fig.2. Time-wavenumber cross-section of the column-integrated moist static energy in the experiments at the latitudes of 0° (a), 1.5° (b), 3° (c), 4.5° (d), 6° (e), 7.5° (f).

4. まとめと今後の展望

熱帯擾乱の発達過程における雲微物理過程のパラメタリゼーションの影響を、理想的な条件下で調べた。ここでは、理化学研究所において開発している雲解像モデル SCALE を用いて 80 日積分を行い、擾乱の発達の様子の緯度ごとの違いに着目した。熱帯擾乱の発達に伴う対流の組織化を定量的に評価するために、鉛直積算した湿潤静的エネルギーを空間方向に（2次元）波数展開して、その低波数成分のエネルギーの時間発展を比較したところ、0度、1.5度、6度、7.5度の4つの実験で対流の組織化が見られ、組織化と共に湿潤静的エネルギーの低波数成分のエネルギー（振幅の2乗値）が強くなるのが確認された。一方で緯度3度と4.5度の実験では、顕著な対流の自己組織化は見られず、湿潤静的エネルギーの低波数成分のエネルギーに大きな変化はなかった。こうした違いの原因や、雲微物理過程の影響については、今後の課題である。

参考文献

- (1) Carstens D, Wing A 2020: Tropical Cyclogenesis From Self - Aggregated Convection in Numerical Simulations of Rotating Radiative - Convective Equilibrium. Journal of Advances in Modeling Earth Systems, Volume 12, Issue 5, article id. e02020.

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

日比谷 紀之, E-mail: hibiya@eps.s.u-tokyo.ac.jp

田中 祐希, E-mail: y-tanaka@fpu.ac.jp

永井 平, E-mail: nagai_t@eps.s.u-tokyo.ac.jp

高橋 杏, E-mail: anne@eps.s.u-tokyo.ac.jp

平野 雄介, E-mail: hirano@eps.s.u-tokyo.ac.jp

Toshiyuki Hibiya, Graduate School of Science, The University of Tokyo

Yuki Tanaka, Faculty of Marine Science and Technology, Fukui Prefectural University

Taira Nagai, Graduate School of Science, The University of Tokyo

Anne Takahashi, Graduate School of Science, The University of Tokyo

Yusuke Hirano, Graduate School of Science, The University of Tokyo

要旨

深海底凹凸地形上で形成される乱流ホットスポットの鉛直減衰スケールをコントロールする物理機構を明らかにすることを目的として、顕著な内部波の励起源であり、かつ高解像度の海底地形データが存在する伊豆-小笠原海嶺において実施された乱流観測の2測点を対象に、高解像度の鉛直2次元非静水圧モデルを用いた数値実験を行った。数値実験結果は観測で得られた乱流強度の減衰スケールの特徴をよく再現できていた。すなわち、高波数の海底地形が連なる Station 1 では潮流振幅の増加に伴って減衰スケールが大きくなる傾向を示したのに対し、単一の海山が顕著な Station 2 では潮流振幅の増加に伴って減衰スケールは小さくなる傾向を示した。励起される内部波の性質を詳細に調べた結果、Station 1 では潮汐の整数倍の周波数を持つ内部風下波の生成が認められ、これが乱流強度の鉛直構造の潮流振幅依存性の主要因であることが示された。一方、Station 2 では有限振幅海底地形に伴う海底近傍における密度逆転が確認され、これが乱流生成の主要な物理過程であるため、Station 1 とは異なる潮流依存性を持つことが示された。以上の結果は、深海底凹凸地形上における乱流ホットスポットの正確なパラメタリゼーションには、細かいスケールの海底地形の情報や大潮-小潮変動に伴う潮流振幅の時間変化を考慮することが不可欠であることを意味している。

1. はじめに

海洋深層の鉛直乱流混合は、長期の気候変動に大きな影響を及ぼす深層海洋大循環をコントロールする重要な物理過程の一つである。しかしながら、現在の海洋大循環モデルで用いられている乱流混合過程のパラメタリゼーションは、現実の海洋観測の結果を十分に反映しているものとは言い難い。特に、深層循環を再現する際に最も重要となる粗い海底地形直上の乱流混合に関して現在最も広く用いられているパラメタリゼーションでは、乱流強度は海底から鉛直上方へ全球一様に500 mのスケールで減衰するものと仮定されている (St. Laurent et al. 2002 など)。しかしながら、近年の理論的・観測的研究によれば、この減衰スケールは海底地形の凹凸や潮流振幅に依存して大きく変動することが示唆されている (Hibiya et al. 2017 など)。

研究代表者らは最近、顕著な内部波の励起源であり、かつ高解像度の海底地形データが存在する伊豆-小笠原海嶺において、最新の超深海乱流計 VMP-X を用いて、異なる地形的特徴を持つ2測点で乱流観測を実施した。得られた乱流エネルギー散逸率の鉛直構造は、Station 1 では潮流振幅の増加に伴い減衰スケールが大きくなる傾向を示し、これは Hibiya et al. (2017) によって示された内部風下波の生成に伴う乱流散逸率の鉛直構造と整合的であった。これに対して、Station 2 では減衰スケールは Station 1 と逆の傾向を示し、先行研究で示されている内部潮汐波と内部風下波の作る乱流鉛直構造のどちらでも説明することのできないものとなっていた。

そこで本研究では、深海底凹凸地形上で形成される乱流ホットスポットの鉛直減衰スケールをコントロールする物理機構を解明することを目的として、この2測点を対象に、高解像度の鉛直2次元非静水圧モデルを用いた数値実験を行った。

2. 数値実験

伊豆-小笠原海嶺の2つの乱流観測点 (Station 1, Station 2) において卓越する内部波の性質を同定し、乱流強度の鉛直構造の時間変動を引き起こす要因を明らかにするために、高解像度 (水平 50 m, 鉛直 5 m) の鉛直2次元非静水圧モデルを用いた数値実験を実施した。両観測点において、マルチビーム観測によって得られている高解像度の海底地形データをそのまま用いた実験 (MB 実験) に加え、それを5 km スケールで平滑化したデータを用いた実験 (SMTH 実験) を行うことで、高波数の内部波応答の同定を試みた。主要16分潮の順圧潮流をモデルの境界条件として与え、15日間のスピンアップの後に大潮-小潮変動の1周期に相当する15日間の計算を行った。基本密度成層は各観測点における World Ocean Atlas のデータに基づいて与えた。

3. 結果と考察

図1はMB実験で得られた両観測点における鉛直流速のスナップショットである。高波数の海底地形が連なる Station 1 では領域全体に擾乱が広がっているのに対し、単一の海山が顕著な Station 2 では海山の山頂付近に擾乱が留まっている様子が見取れる。図1の黒破線 (観測線) に沿って深度ごとに流速の周波数スペクトルを計算した結果を図2に示す。Station 1 においては、潮汐外力の整数倍の周波数に顕著なスペクトルピークが見られ、それが水中全体に広がって分布していることがわかる。周

波数-鉛直波数 2 次元スペクトルを詳細に調べた結果、これらの倍周波数の内部波は内部風下波の分散関係式をよく満たしていることが確認された。このことから、Station 1 における内部波は Bell (1975) によって求められた「潮汐外力の整数倍の周波数を持つ内部風下波」であると結論づけられる。一方、Station 2 においては、海底地形近傍でのみ高周波数の内部波エネルギーが卓越していることがわかる。この傾向は特に大潮時に顕著であった。この内部波の時間発展を詳細に調べたところ、大潮期の最大潮流の直後に、潮流の下流側において等密度面の沈み込みが急成長し、密度逆転を生み出していることが確認された。これは、Legg et al. (2008) によって示された有限振幅地形背後の「内部跳水」に伴う密度逆転と類似している。

数値実験結果に基づいて計算される乱流エネルギー散逸率の減衰スケールは、観測で得られた減衰スケールの特徴をよく再現できていた。すなわち、Station 1 では潮流振幅の増加に伴って減衰スケールが大きくなる傾向を示したのに対し、Station 2 では潮流振幅の増加に伴って減衰スケールは小さくなる傾向を示した (図 3)。

このような乱流エネルギー散逸率の鉛直減衰スケールの潮流振幅依存性は、上で述べた両観測点で励起される内部波の性質の違いによって矛盾なく説明することが可能である。Station 1 においては内部風下波が支配的であるため、潮流振幅が大きくなると、より高周波数で鉛直群速度の大きい内部波が励起されるようになり、エネルギーがより上方へと伝播するようになる結果、減衰スケールも大きくなる。一方、Station 2 においては有限振幅地形による「内部跳水」が支配的であるため、潮流が大きくなると海底近傍の乱流が顕著に強くなり、潮流振幅の増加に対して減衰スケールは小さくなる。

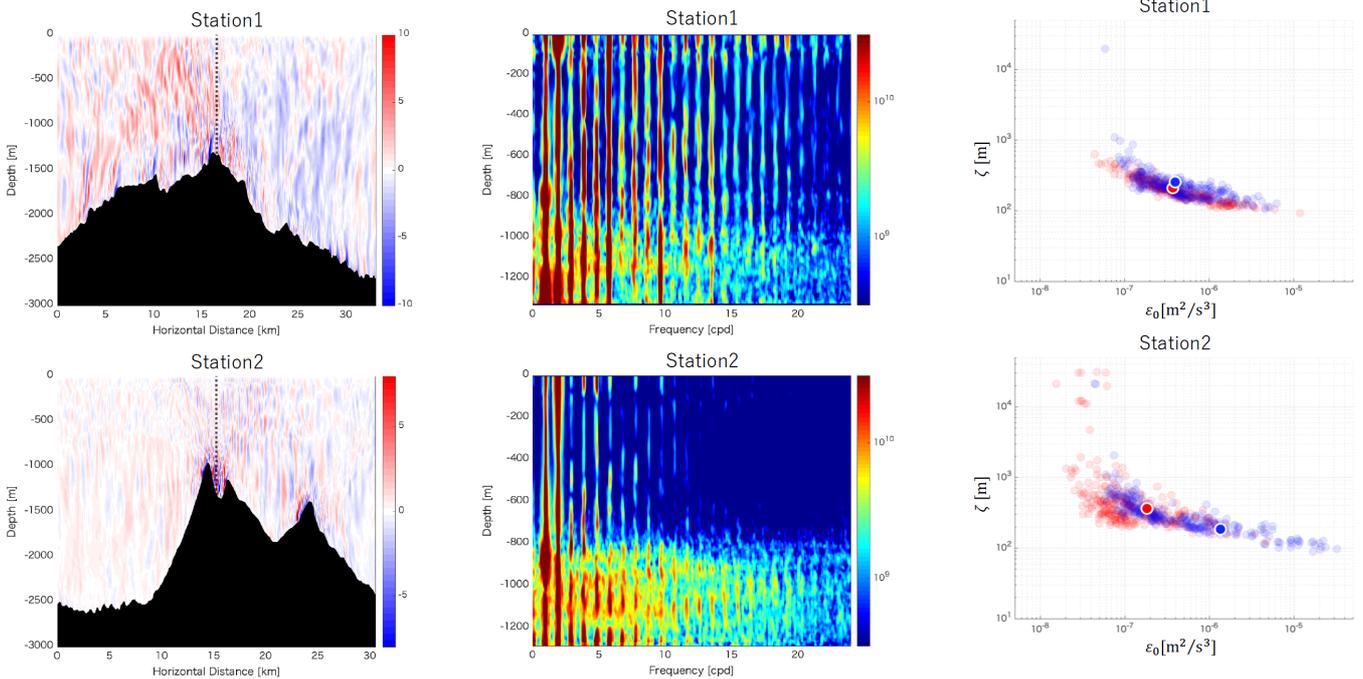


図 1: (上) Station 1, (下) Station 2 における鉛直流速のスナップショット。

図 2: (上) Station 1, (下) Station 2 の各深さにおける流速の周波数スペクトル。

図 3: (上) Station 1, (下) Station 2 における乱流エネルギー散逸率の海底直上での値 ϵ_0 と鉛直方向の減衰スケール ζ 。赤と青はそれぞれ小潮期と大潮期を表す。

4. まとめと今後の展望

以上の議論をまとめると、潮流と海底凹凸地形の波数がともに大きく、高周波数の内部波が励起される場合においては、乱流散逸を決定づける物理機構は海底地形の特徴によって 2 通りの場合に分類できることが示唆された。海底地形の勾配が小さいときは、潮汐外力の整数倍の内部風下波が卓越し、潮流振幅の増加に対して乱流強度の鉛直構造の減衰スケールは大きくなる変化を見せる。一方、海底地形の勾配が大きいときは、生じた内部波が海底近傍において密度逆転を引き起こし、その場で砕波するため、潮流振幅の増加に対して乱流強度の鉛直構造の減衰スケールは小さくなる変化を見せる。

現在の海洋大循環モデルで用いられている海底凹凸地形の解像度はせいぜい数 km である。潮流が強く、海底凹凸地形が粗い乱流ホットスポットと呼ばれる領域の乱流パラメタリゼーションには、より細かいスケールの海底地形や潮流振幅の時間変化も考慮していくことが必要不可欠である。

参考文献

- (1) Bell, T. H., 1975: Lee waves in stratified flows with simple harmonic time dependence, *J. Fluid Mech.*, **67**, 705–722.
- (2) Hibiyu, T., T. Ijichi, and R. Robertson., 2017: The impacts of ocean bottom roughness and tidal flow amplitude on abyssal mixing, *J. Geophys. Res.*, **122**, 5645–5651.
- (3) Legg, S., and J. Klymak, 2008: Internal hydraulic jumps and overturning generated by tidal flow over a tall steep ridge, *J. Phys. Oceanogr.*, **38**, 1949–1964.
- (4) St. Laurent, L. C., H. L. Simmons, and S. R. Jayne, 2002: Estimating tidally driven mixing in the deep ocean, *Geophys. Res. Lett.*, **29**, 2106.

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, 宮岡 健吾, 横田 祥, 齊藤 慧, 市川 悠衣子, 松川 知紘, 黒木 志洸
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, Kengo Miyaoka, Sho Yokota, Kei Saitou, Yuiko Ichikawa, Chihiro
Matsukawa and Yukihiro Kuroki

Numerical Prediction Division,

Information Infrastructure Department, Japan Meteorological Agency,

要旨

気象庁全球数値予報システムの予測精度向上のため、全球モデル(GSM)の鉛直層の100層から128層への増強、積雪深・土壌水分の初期値作成手法の改良、全球解析におけるアンサンブル予報に基づく背景誤差の利用方法の改良を行った。改良を施した数値実験からは、鉛直層増強は離散化誤差の減少や衛星観測と第一推定値との整合性向上を通じた全般的な予測精度向上、地表面解析の高度化は、北半球の下層気温や500hPa高度などの予測精度の改善をもたらすことを確認した。これらの改良について、2021年3月末に現業全球数値予報システムへ導入予定である。

1. はじめに

気象庁は現在格子間隔約20km(TL959)鉛直100層(0.01hPaまで)の全球モデル(GSM)を現業運用して天気予報や台風予報等を行っている。予測精度の向上は物理過程の高度化とデータ同化手法の開発に大きく依存している。数値予報モデルの鉛直解像度は、離散化誤差の減少や物理過程のより精緻な表現を通じて、モデルの予測に影響する。さらに、モデルの鉛直高解像度化は、データ同化サイクルにおける第一推定値の精度向上を通じた予測精度向上にも資する。また、積雪、土壌等地表面状態の初期値は予測に大きな影響を与えることが知られている。これらの点から、今年度は、GSMの鉛直層数の100層から128層への増強、及び地表面解析の高度化に向けた開発を重点的に実施した。また、四次元変分法・LETKFのハイブリッド同化における、LETKFのメンバー数増等の全球解析の各種改良もあわせて実施した。

2. 改良の概要

2.1 GSMの鉛直層増強

GSMの鉛直層数を100層から128層に増強した。鉛直層増強にあたっては、モデル最上層(0.01hPa;高度約80km)及び最下層(約8m)高度は現行と同程度に保ちつつ、大気全体にわたり概ね均等に高解像度化した。これは、GSMの主な予測対象は対流圏・成層圏の現象であること、これら大気現象やそれらを表現する物理過程は、海面過程、境界層、雲、積雲等、地表面から大気の上層まで鉛直方向に広い範囲に渡ることを考慮したためである。この変更により、対流圏から成層圏で、概ね1.2倍~1.3倍程度鉛直層数が増強される。

2.2 地表面解析の高度化

積雪深解析において、日々の積雪分布をより適切に初期値に反映させるため、第一推定値について、気候値からモデル予測値を衛星観測データによる積雪域で修正したものに変更した。また、地上観測を最適内挿法で同化する際の空間誤差相関の見直しもあわせて行った。土壌水分については、日々の土壌水分の変動を表現するため、気候値を初期値とする手法から、地上気温、相対湿度観測を利用した土壌水分解析(Mahfouf 1991; de Rosnay et al. 2012)を用いる手法に変更した。

2.3 全球解析の改良

流れに依存する背景誤差の扱いの高度化を狙い、四次元変分法・LETKFのハイブリッド同化(Kadowaki et al. 2020)における、LETKFのメンバー数増(50から100)、局所化の見直し、LETKF由来の背景誤差の重みの増加を行った。また、LETKF解析値の力学的バランスを保つための初期値化の改良、気候値由来の背景誤差の更新等の各種改良を行った。さらに、GSMの鉛直層増強に合わせて、四次元変分法に用いる非線形モデル、接線形モデル、随伴モデルの鉛直層数も100層から128層に増強した。

3. 改良のインパクト

本報告で示した改良によって、予測精度の全般的な向上、下層大気を中心とした精度向上を得た。ここでは、冬期(2019年12月-2020年2月)、夏期(2019年7月-9月)を対象にした解析予報サイクル実験の結果を示す。

GSMの鉛直層増強により、力学過程における空間離散化誤差が大きく減少することを、理想実験等で確認した(図略)。また、鉛直層増強にともなう大気の表現能力向上と全球解析の改良により、データ同化サイクルにおける、観測値と第一推定値の整合性が向上した。Fig. 1に冬期実験におけるマイクロ波サウンダによる輝度温度に対する、観測値と第一推定値の標準偏差の改良前後での差を示す。改良後は、北半球ではAMSU-Aのチャンネル10-チャンネル14といった、大気上層の気温に感度のあるセン

サについて、観測値と第一推定値の整合性向上が顕著である。また、MHS のチャンネル3-チャンネル5 といった、水蒸気に感度のあるセンサについても、整合性向上が見られた。これらの観測値と第一推定値の整合性向上は、予測精度の改善に寄与していた。

地表面解析の高度化は、積雪や土壌水分といった下部境界の初期値の表現の改善を通じて、大気下層を中心に予測精度の改善をもたらす。夏期アジア域における改善の例として、比湿系統誤差の鉛直プロファイルを図. 2 に示す。改良後は、中層の乾燥バイアスが減少した。また、夏期、冬期ともに北半球域の気温の低温バイアスが減少した(図略)。

これら改良の総合的な結果として、北半球の循環場の予測精度の指標である、北半球の 500hPa 高度の平方根二乗平均誤差の変化を図. 3 に示す。夏期、冬期ともに、500hPa 高度の誤差の減少が見られる。

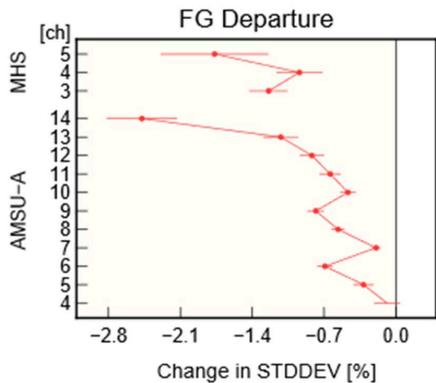


Fig. 1 冬期実験におけるマイクロ波サウンダによる輝度温度について、観測値と第一推定値の差の改良前後での変化率 [%]。負の値は改良後の方が観測値と第一推定値の差が小さいことを表している。縦軸は気温サウンダである AMSU-A と水蒸気サウンダである MHS のチャンネル番号を示している。

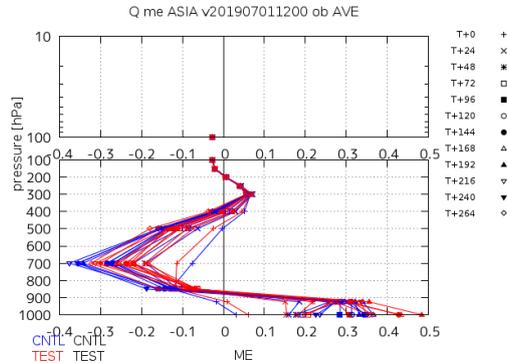


Fig. 2 夏期実験における、比湿 [g/kg] のラジオゾンデ観測に対する比湿の系統誤差 [g/kg] の予報時間別 (初期時刻から 264 間予報 までの 24 時間毎) の鉛直プロファイル。青：改良前、赤：改良後。

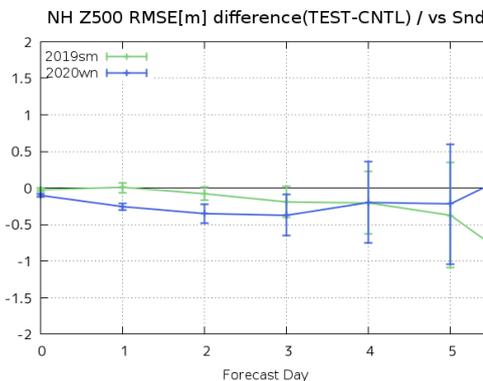


Fig. 3 北半球 500hPa 高度のラジオゾンデ観測に対する平方根二乗平均誤差の改良前後の差 [m]。横軸は予報時間 (日) で、青実線、緑実線はそれぞれ、冬期、夏期実験を示す。

4. まとめと今後の展望

GSM の鉛直層数数の 100 層から 128 層への増強、及び全球解析の各種改良により、第一推定値と大気鉛直プロファイルに関わる衛星観測との整合性向上を通じて、全般的な予測精度向上を得た。また、積雪深解析の高度化、土壌水分解析の導入により、初期値における積雪域の分布や土壌水分の日々の変化の表現向上を通じた下層大気予測精度向上を得た。これらの改良は、2021 年 3 月末に現業数値予報システムへ導入予定である。

今後は、GSM の水平高解像度化とそれに対応した物理過程の開発、データ同化手法の改良を継続して進めていく。

参考文献

- (1) Mahfouf, J.-F., 1991: Analysis of Soil Moisture from Near-Surface Parameters: A Feasibility Study. *J. Appl. Meteor.*, 30, 1534-1547.
- (2) de Rosnay, P., M. Drusch, D. Vasiljevic, G. Balsamo, C. Albergel, and L. Isaksen, 2012: A simplified Extended Kalman Filter for the global operational soil moisture analysis at ECMWF. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 139, 1199-1213.
- (3) Kadowaki, T., Y. Ota, and S. Yokota, 2020: Introduction of a new hybrid data assimilation system for the JMA Global Spectral Model. *WGNE. Res. Activ. Earth. Sys. Modell.*, 50, 1.9-1.10.

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

川崎 昌博, 総合地球環境学研究所, E-mail: masahiro.kawasaki.26u@st.kyoto-u.ac.jp

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

Masahiro Kawasaki, Research Institute for Humanity and Nature

要旨

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

1. はじめに

近年、温室効果ガスの二酸化炭素量の大气中の濃度の増加が問題になっている。この二酸化炭素濃度の分布と変化の把握が重要になっている。海外では OCO-2 などの衛星による観測や Fourier Transform Spectrometers (FTS)を世界各地に設置して組織的に計測している Total Carbon Column Observing Network (TCCON)らによって行われている。日本では、今須教授らにより GOSAT や GOSAT-2 の GOSAT シリーズによる温室効果ガスの分布の把握に努めている。一方、大橋、川崎らは、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。

Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC) [1]の再解析データから観測地・観測時間で内挿した値から高度・気象データを算出して、さらに気象庁が提示している観測場所・観測場所付近の地上の気象データ[2]で、補正を行った高度・気象データにより観測地の吸収スペクトルをシミュレートすることで観測データを解析した。データ解析には東京大学大気海洋研究所のスパコン等を用いた。

南鳥島での観測を行う前に国立環境研の FTS との同時計測を行い、その結果とを比較することで、南鳥島に設置した計測器の Scale Factor を 0.990 と見積もり、南鳥島の観測データを補正した。

3. 結果と考察

2018 年 7 月 22 日から 2020 年 7 月 31 日まで、南鳥島における計測データを解析し、太陽が南中する時刻を正午とする Solar Time10 時から 14 時の感度補正後の平均値を●とし、その日の Solar Time10 時から 14 時の感度補正後の値の標準偏差をエラーバーとして示した (図 1)。地上から成層圏に向けて二酸化炭素が拡散することを示すために、気象庁のデータベースから南鳥島の地上で計測したデータを図 1 に重ねた。平均カラム量は地上の計測データに比べて 3 ppm 少ない値を示した。この違いから、地表近くで起きている現象に関する情報が得られる可能性があるため、南鳥島や関東平野の詳細な大気流解析を考えている。さらに、季節変動を把握するため、Ref.[3]を参考に 2 種類の周期関数と 1 次関数を組み合わせた式(1)で Fitting し、赤色の曲線で示した。2014~2016 年に東京学芸大学附属高校で行った結果[4]と同時期の国立環境研での観測データ[5]と Mauna Loa の地上の観測データ[6]とを比較した (表 1)。夏場は植物の光合成により全ての場所は 9 月に二酸化炭素量が少なくなった。二酸化炭素の発生源に近い東京やつくばは 2 月頃に最大値を示すが、南鳥島まで拡散するため南鳥島では 5 月が一年で最も多くなった。式(1)の Fitting 曲線から、年間 2.87ppm の二酸化炭素濃度の上昇が明らかになった。この値は世界の標準としている Mauna Loa の 2.55 に近い値していた。

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

図1にGOSATにて観測したデータを重ねた。赤色で示した Fitting 曲線をはさむように青三角の GOSAT データが分布していることから、両計測が正しく行われていると判断した。

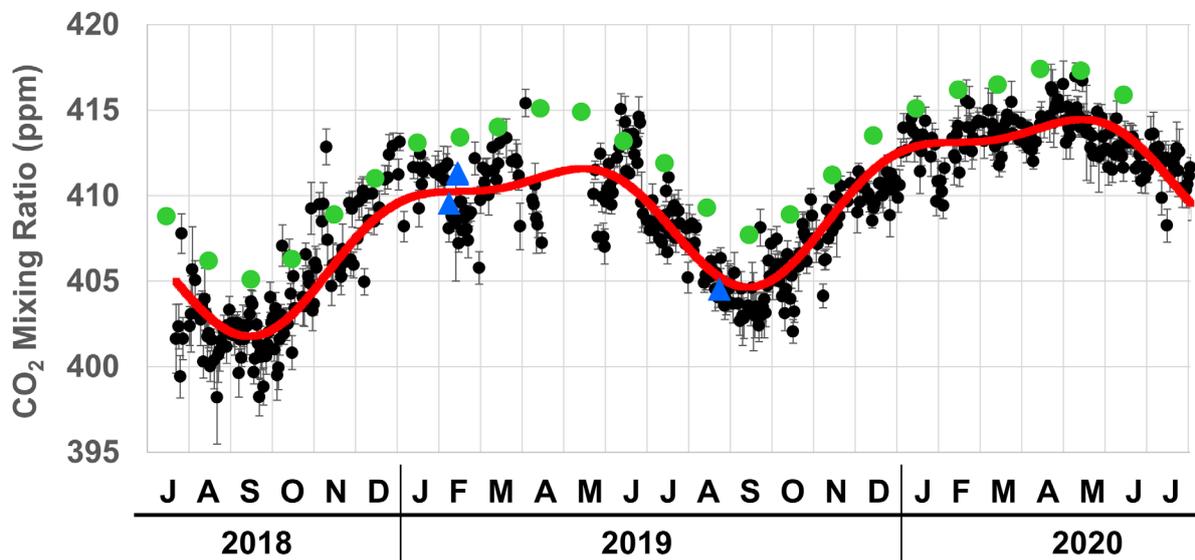


図1 南鳥島の CO₂ 平均カラム量解析結果
 ●FES-C 補正值(SF 0.990), 赤線 Fitting 曲線, ▲GOSAT 観測値, ●気象庁観測の地上 CO₂ 量

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.
南鳥島	393.3	2.87	3.62	1.45	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

南鳥島に FES-C を設置して計測したデータを解析した結果、気象庁が南鳥島の地上で計測している二酸化炭素量から約 3 ppm 下がった濃度となっていた。GOSAT データと南鳥島に FES-C を設置して計測したデータとが、ほぼ一致した結果を得ることができた。まだ計測と解析が続いているため、今後、計測されるデータとの比較を進めていく。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のデータ解析を行う。

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/>

全球雲解像モデルの開発及びデータ解析

全球非静力学モデルの高度化および気象予測研究への応用

Advancement and application of a global nonhydrostatic atmospheric model toward numerical weather prediction research

那須野 智江, 海洋研究開発機構, E-mail: nasuno(at)jamstec.go.jp

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

山田 洋平, 海洋研究開発機構, E-mail: yoheiy(at)jamstec.go.jp

原 政之, 埼玉県環境科学国際センター, E-mail: hara.masayuki(at)pref.saitama.lg.jp

Tomoe Nasuno, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

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

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

Masayuki Hara, Center for Environmental Science in Saitama

要旨

海大陸研究強化年 (YMC) の一環として、2017年冬季にスマトラにおいて実施された YMC-Sumatra2017 集中観測期間を対象とする、全球非静力学大気モデル NICAM を用いた数値実験を行い、雲の微物理過程が海大陸における日周期変動と季節内振動に及ぼす影響について調べた。海大陸では、活発な対流活動が季節内振動を弱めることが知られており、両者の関係を適切にモデルで表現することは、季節内振動の理解と予測において重要である。2つの雲微物理過程の設定：(1) 季節内予測に適した設定、(2) 気候計算用に改善された最新の設定を用いた一連の数値実験を行い、結果を比較した。(2) では(1) に比べ局所的な強い上昇流・水蒸気輸送の出現頻度が高く、これにより陸上降水の過少バイアスが改善された。陸上での上昇流強化は、周辺海洋上での上昇流抑制を伴う(季節内振動にとって不都合)が、季節内振動の対流活発前の期間には、海上でも日周期変動が活発化することで、水蒸気輸送が促進され、日周期変動と季節内振動が相乗的に働くことが分かった。

1. はじめに

本課題では、全球雲解像モデル Nonhydrostatic Icosahedral Atmospheric Model (NICAM; Satoh et al. 2014) を用いた数 km~十数 km メッシュの数値実験および解析を行うことにより、雲降水現象のメカニズムや異なるスケール間の相互関係を理解し、再現性の向上に向けた知見を得ることを目的としている。これまで、国際プロジェクト Years of the Maritime Continent (YMC; 海大陸研究強化年, Yoneyama and Zhang 2020) 集中観測期間を対象とする研究を行ってきた。海大陸 (インドネシア周辺域) では、入り組んだ海陸分布や局地循環に起因する降水の日周期変動が卓越し、熱帯の代表的な大規模擾乱である季節内振動の通過を妨げる傾向を示す。両者の相互関係を正確にシミュレートすることは、最先端の全球モデルにおいても大きな課題となっている。本年度は、これらに深く関わるプロセスとして、雲微物理過程に注目し、2つの代表的な物理設定について、一連の比較計算を行い、降水日周期の再現性や、季節内振動と降水日周期との関係に対する影響を明らかにした (Nasuno 2021)。

2. 問題設定・方法

NICAM を用いて YMC-Sumatra2017 集中観測中に発生した季節内振動事例 (2017年11月9日-12月9日) を対象とする全球 7 km メッシュ 7 日計算 (0000 UTC 初期時刻, 31 ケース) をそれぞれの雲微物理設定について行った (2 セット)。初期値データは NCEP final analysis から内挿し、海面水温は気候値に初期日の偏差を加えた時系列を与えた (実験設定の詳細は Nasuno 2019 参照)。雲微物理過程 (NSW6; Tomita 2008) については、代表的な 2 つの設定 (1) 季節内変動の予測に適用 (Miura et al. 2015; Miyakawa et al. 2014) (2) 気候の再現性を重視 (Kodama et al. 2021) を採用した。(1) では、組織化した大規模な雲の形成維持の再現性を高めるため、降水物質の落下速度を抑制している点に特長があり、(2) では衛星観測との比較検証に基づき、霰の過剰な成長を抑制し、氷雲の生成維持過程を考慮する点に特長がある。季節内振動の発生発達において、水蒸気変化が重要であることから、本稿では、主に水蒸気輸送についての結果を示す。時間変化の解析には、初期時刻の異なるデータを重ね合わせて作成した時系列データを用いた。(1) (2) を用いた計算をそれぞれ CTL, MOD と称す。

3. 結果と考察

Fig. 1 に海大陸西部における期間平均の降水分布の比較を示す。どちらの設定でも、海陸での日内位相の反転や (Fig. 1, 右列)、陸上や内海で日較差の振幅が大きく平均降水量も多い、といった特徴が再現されている。CTL では衛星観測に比べ日較差が小さく、陸上降水の過少傾向があるが、MOD ではこのバイアスが緩和されている。2つの計算の差異の季節内振動への影響を見るため、Fig. 2 に対象域 (Fig. 1 囲み域) で平均した水蒸気輸送量 (水平成分・鉛直成分の和) の高度-時間断面を示す (期間平均値からの偏差)。MOD では、陸上 (Fig. 2 右) において海上 (Fig. 2 左) よりも短周期変動の振幅が大きく、季節内振動の開始前の陸上での湿潤化 (海上での乾燥化) 傾向が強くなる。一方、季節内振動の活発期後半には、海上より陸上で乾燥化傾向が強くなる。これらは、MOD では CTL よりも小スケールの強い対流が発生し易く、季節内振動開始前 (活発期後半) の日射による強制が強い (弱い) 時期に、対流活動が活発化 (不活発化) し易いことを反映している。一方、季節内振動に伴う大規模な対流活動の持続 (継続的な湿潤化を伴う) は CTL の方でよりよく表現される (Fig. 2, 11 月末-12 月 5 日頃)。季

節内振動の開始期においては、陸上でも海上でも MOD による湿潤化の強化が明瞭である。これは、日周期変動に伴う小スケールの対流が陸上・海上どちらでも季節内振動の発達を助長することを示唆する。陸上と海上での対流活動の関係を確認するため、Fig. 3 に期間平均水蒸気輸送量の比較を示す。平均的には、陸上の小スケールの対流活動（午後遅い時刻にピーク；Fig. 3a 赤線）は補償下降流を通して周辺海域の対流活動を抑制する（乾燥化傾向を強める；Fig. 3a 青線）ことが分かる。ただし、季節内振動の開始期には（Fig. 3c, d）全体的に MOD による湿潤化傾向が増加し、海上でも日較差が拡大しており（青線）、特に海上の降水ピーク時刻（現地時刻の朝；Fig. 3d）には海上でも MOD による湿潤化が傾向が見られる。

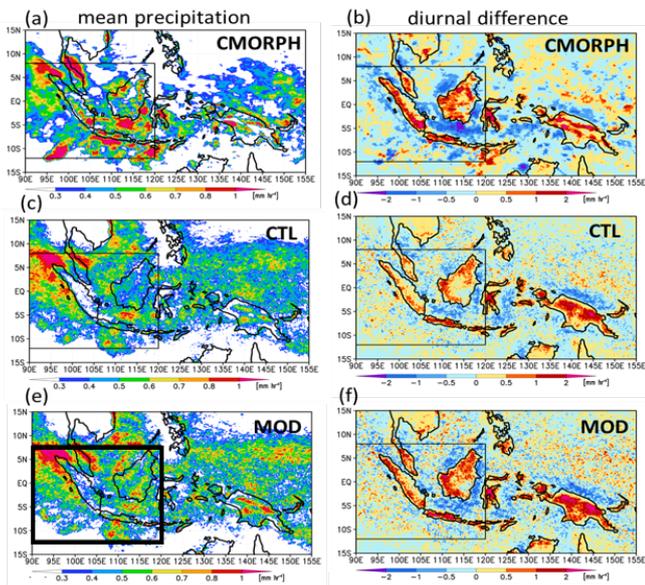


Fig. 1 Mean precipitation (left) and diurnal difference (1200 UTC-0000 UTC) (right) in (a) (b) CMORPH, (c) (d) CTL, (e) (f) MOD. (Reproduced from Fig. 2 of Nasuno 2021, SOLA.)

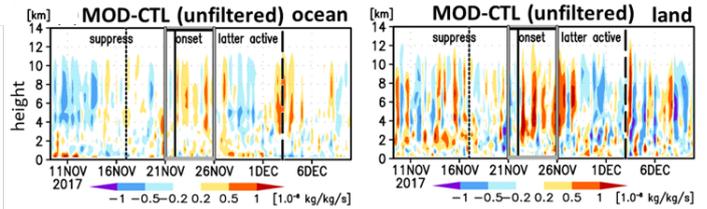


Fig. 2 Time-height section of moisture advection difference (MOD-CTL) over ocean (left) and land (right) in the target domain (box in Fig. 1) Anomalies from the period-mean profiles are drawn. (Reproduced from Fig. 4 of Nasuno 2021, SOLA.)

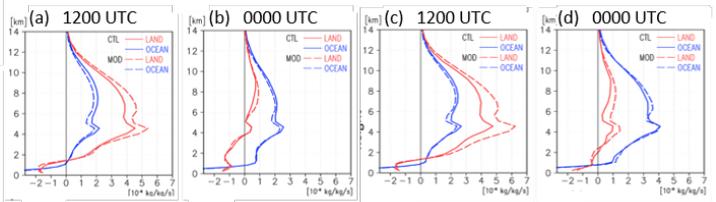


Fig. 3 Vertical profiles of moisture advection for CTL (solid) and MOD (dashed) over land (red) and ocean (blue) in the target domain at (a) (c) 1200 UTC, and (b) (d) 0000 UTC. Averages for (a) (b) the total period and (c) (d) the onset period. (Reproduced from Fig. 5 of Nasuno 2021, SOLA.)

4. まとめと今後の展望

海大陸における降水日周期変動の再現性およびその季節内振動との関係に対する雲微物理過程の影響を理解することを目的として、YMC 集中観測期間中に発生した季節内振動事例を対象とする NICAM を用いた感度実験 (CTL, MOD) を行った。どちらの設定でも、海陸の降水日周期の特徴や、季節内振動に伴う水蒸気変化は概ね再現されており、小スケールの強い対流が発達し易い（組織化した雲が維持され易い）MOD (CTL) の設定では、日周期変動がより強く（弱く）現れた。この傾向は特に陸上で大きく、その結果海上では平均的に対流が抑制される傾向を伴うが、季節内振動の開始期には海上でも対流の日周期変動が強まることで全体に湿潤化が促進されることが分かった。本研究では、1 週間程度の実験データを重ね合わせて雲微物理過程の基本的な影響を抽出したが、今後はより長い積分期間の数値実験を行い、基本場と対流活動の相互作用を含めた影響を明らかにしたい。

謝辞

NICAM の計算には地球シミュレータを用い、池田美紀子氏にご協力頂いた。CMORPH は NOAA Climate Prediction Center から提供された。

参考文献

- (1) Satoh, M., et al., 2014: The Non-hydrostatic Icosahedral Atmospheric Model: Description and Development. *Progress in Earth and Planetary Science*, 1, 18.
- (2) Yoneyama, K., and C. Zhang, 2020: Years of the Maritime Continent. *Geophys. Res. Lett.*, 47, e2020GL087182.
- (3) Tomita, H., 2008: New microphysics with five and six categories with diagnostic generation of cloud ice. *J. Meteor. Soc. Japan*, 86A, 121-142.
- (4) Nasuno, T. 2021: Impacts of cloud microphysics modifications on diurnal convection and the ISO over the Maritime Continent: A case study of YMC-Sumatra 2017, SOLA, <https://doi.org/10.2151/sola.2021-003>.
- (5) Nasuno, T. 2019: Moisture transport over the western Maritime Continent during the 2015 and 2017 YMC Sumatra campaigns in global cloud-system-resolving simulations, SOLA, 15, 99-106.
- (6) Miura, H., T. Suematsu, and T. Nasuno, 2015: An ensemble hindcast of the Madden-Julian Oscillation during the CINDY2011/DYNAMO field campaign and influence of seasonal variation of sea surface temperature. *J. Meteor. Soc. Japan*, 93A, 115-137.
- (7) Miyakawa, T. et al., 2014: Madden-Julian Oscillation prediction skill of a new-generation global model. *Nature Commun.*, 5, 3769. doi:10.1038/ncomms4769.
- (8) Kodama, C., et al., 2021: The non-hydrostatic global atmospheric model for CMIP6 HighResMIP simulations (NICAM16-S): Experimental design, model description, and impacts of model updates, *Geosci. Model Dev.*, 14, 795-820, <https://doi.org/10.5194/gmd-14-795-2021>.

大気海洋研究所および気象研究所の世界海洋大循環モデルの相互比較

Ocean model intercomparison of AORI and MRI

中野 英之、気象研, E-mail: hnakano(at)mri-jma.go.jp

辻野 博之、気象研, E-mail: htsujino(at)mri-jma.go.jp

坂本 圭、気象研, E-mail: ksakamot(at)mri-jma.go.jp

浦川 昇吾、気象研, E-mail: surakawa(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

Hideyuki Nakano, Meteorological Research Institute

Hiroyuki Tsujino, Meteorological Research Institute

Kei Sakamoto, Meteorological Research Institute

Shogo Urakawa, Meteorological Research Institute

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

要旨

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」の相互比較を定期的に行うための環境を、両モデル開発グループの協力で新たに構築した。複数モデルの相互比較により、今後のモデル開発方針において有益な情報が得られると期待される。

1. はじめに

我々、気象研究所および大気海洋研究所は海洋大循環モデル(以下 OGCM)を長年にわたって開発してきた。OGCM は気候システムモデルの主要なコンポーネントとして組み込まれ、IPCC 報告を始め気候変動予測に貢献してきた。OGCM の挙動が気候システムモデルの結果を左右することから、海洋モデル相互比較プロジェクト「OMIP」が策定され、世界の主要な OGCM が網羅的に相互比較されている(Tsujino et al. 2020)。OMIP による各モデルの長所や短所の情報は、OGCM 開発者にとって開発の指針となっている。

OMIP で示されたモデル開発における相互比較の成果は、現在進行中のモデル開発においても複数モデル相互比較から有益な情報が得られる可能性を示している。例えば、あるスキームの有効性を調べる際に、従来のように個別モデルに組み込んだ結果だけではなく、複数モデルによる結果が得られれば、より正確な有効性検証になりうる。また、モデルの高速化や堅牢化の工夫が情報共有できれば開発の効率化につながる。さらには、モデル間の差に注目すれば、気候予測にとって不可欠なモデル不確実性の情報も得られる。日本国内の主要な OGCM である 大気海洋研究所の「COCO」と気象研究所の「MRI.COM」について、最新ソースコードによる実験相互比較が容易になれば、開発に対して大きく貢献すると期待される。

実際、モデル開発における相互比較の活用は新しい意見ではなく、例えば日本国内の主要 OGCM 開発グループによる 2012 年からの共同研究でも目指されていた。しかし従来の共同研究では、知見の共有に焦点が当てられ、比較のためのモデル実験や解析ツールの共有化はあまり進まなかった。これは国内の複数の開発チームを横断して共同作業する環境がなかったためと考えられる。本課題は、相互比較をモデル開発プロセスに組み込むための第一歩として、COCO と MRI.COM の開発者が解析ツールや実験結果を共有する環境の構築を目的とする。我々は、本課題を海洋モデル相互比較プロジェクト日本版「OMIPj」と名付けた。

2. 共同開発基盤の確立

OMIPj は解析ツールと相互比較実験仕様の二つから構成される。

解析ツール 実験結果を解析する Python ツールパッケージ。COCO と MRI.COM ではモデル出力フォーマットが異なるためデータ読み込みモジュールは各モデルに用意するが、その呼び出し関数名を共通化することで、同じツールで両モデルの出力を扱えるように工夫した。ソースコード共有に広く使われている Web サイト「GitHub」を利用し、モデル開発者が共同で開発できる環境を構築した(図 1)。

実験仕様 相互比較のためには事前に実験仕様をす

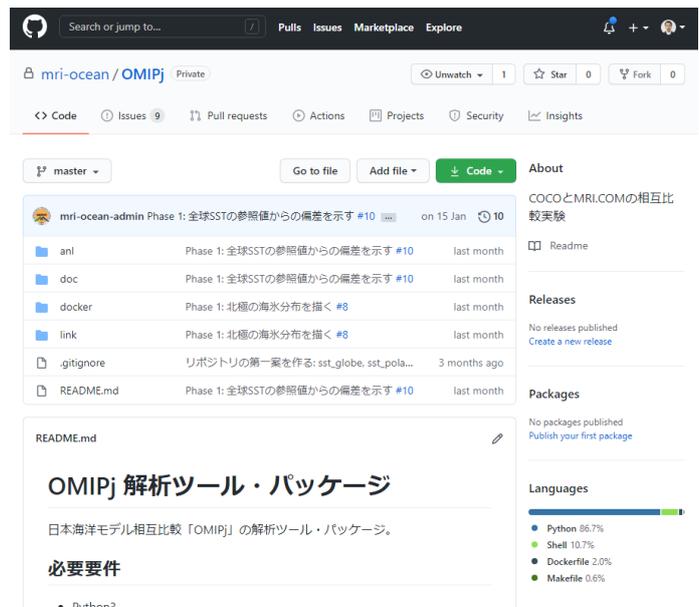


Fig. 1 OMIPj page on GitHub, a source code sharing site. In addition to sharing analysis tools, the “Issues” tab provides a summary of comparison results and task management. At the time of writing, this page is only available to developers.

り合わせておく必要がある。本稿執筆の時点で以下の2つの仕様を策定した。

- フェイズ1 (2020年10~12月) OMIPに提供したモデル実験結果の比較
 - フェイズ2 (2021年1~3月) 最新のソースコードでOMIP実験の再実行
- フェイズ3以降は2021年度に行う予定である。単純な領域を用いた理想実験や、海水再現性に焦点を当てた実験を検討している。

その他のコミュニケーション 解析ツールの作成にしる、実験仕様の策定にしる、両モデル開発者の議論が常に必要である。情報共有とコミュニケーションを以下の手段で定期的に行っている。

- オンラインミーティング 月1回のペースで開催。ツールや実験仕様に加えて、モデル開発方針の率直な意見交換も行う。
- GitHub Issues 上で述べたGitHubのタスク管理ツールで作業工程管理と結果の比較を行っている。使い方はMRI.COMの開発管理(坂本ほか, 2018)になっている。

3. 比較結果

比較の一例として、フェイズ1で描画したCOCOとMRI.COMの北極周辺の海水分布を図2に示す。まず地形の表現に両者で相違点があるのが分かる。図2aの赤矢印の水路はCOCOでは閉じているがMRI.COMでは開いている。(図2bではMRI.COM中の海水の定義点の扱いにより海域が半グリッドだけ陸側へ広く描画されていることに注意。)一方、海水分布は両者でよく似ており、これは両モデルともよくチューニングされた結果だろう。それでも分布を細かく見ると、2000年3月ではCOCOよりMRI.COMの方が海水は広く張り出していた。例えば、図2a赤矢印のフランツヨーゼフ諸島では、前者では密接度が低いが後者ではほぼ結氷していた。現在はツール共有化を目的としており結果の比較は試行の段階であるものの、これから結果の違いとモデル仕様の違いの関係を調べていきたい。

4. まとめと今後の展望

OMIPで示された相互比較の利点をOGCM開発により直接に利用するために、国内の主要2モデル(大気海洋研究所中心のCOCOと気象研究所中心のMRI.COM)の相互比較を定期的に行う「OMIPj」を開始した。本プロジェクトにより、両モデル開発グループでPython解析ツールと比較実験仕様を共有する環境をはじめて構築できた。今後は本プロジェクトを継続し、最新モデル結果を多様な点から比較していく予定である。

参考文献

- (1) Tsujino, H., L. S. Urakawa, S. M. Griffies, G. Danabasoglu, A. J. Adcroft, A. E. Amaral, T. Arsouze, M. Bentsen, R. Bernardello, C. W. Böning, A. Bozec, E. P. Chassignet, S. Danilov, R. Dussin, E. Exarchou, P. G. Fogli, B. Fox-Kemper, C. Guo, M. Ilicak, D. Iovino, W. M. Kim, N. Koldunov, V. Lapin, Y. Li, P. Lin, K. Lindsay, H. Liu, M. C. Long, Y. Komuro, S. J. Marsland, S. Masina, A. Nummelin, J. K. Rieck, Y. Ruprich-Robert, M. Scheinert, V. Sicardi, D. Sidorenko, T. Suzuki, H. Tatebe, Q. Wang, S. G. Yeager, and Z. Yu, 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, 2020.
- (2) 坂本圭, 辻野博之, 中野英之, 浦川昇吾, 山中吾郎, *GitとRedmineを用いた気象研究所共用海洋モデル「MRI.COM」の開発管理*, 海の研究, 27(5), 175-188, 2018.

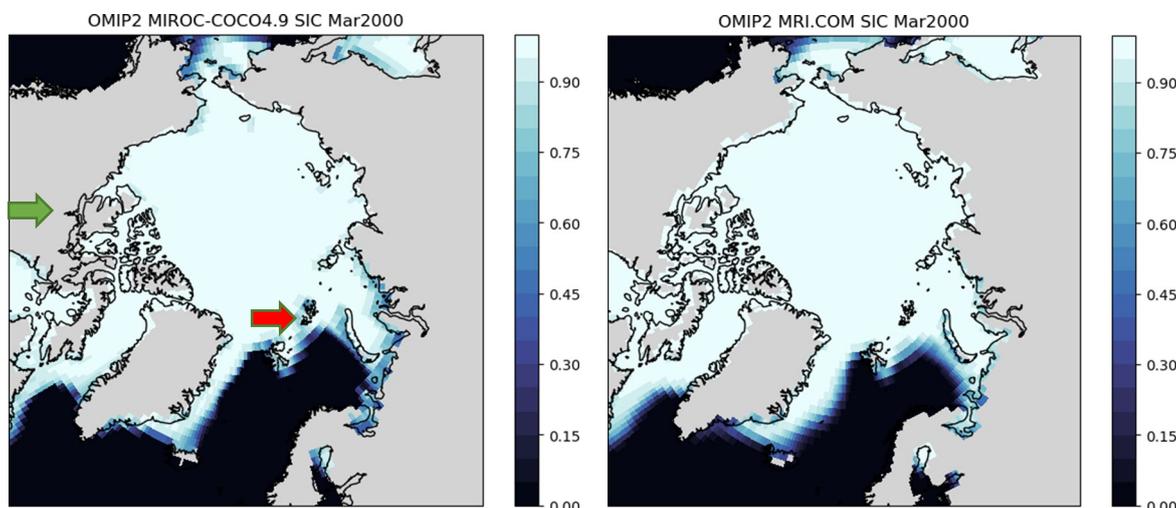


Fig. 2 Sea ice concentration distributions for (a) COCO and (b) MRI.COM in March 2000, drawn using the common Python tool developed by OMIPj from the experimental results provided to OMIP. The two arrows in the figure indicate areas where topography and sea ice distribution are notably different.

海底堆積物における脱窒が窒素同位体比に与える影響の見積もり

Estimating the effect of sedimentary denitrification on $\delta^{15}\text{N}$ of oceanic nitrate

重光 雅仁, 海洋研究開発機構, E-mail: ma-shige(at)jamstec.go.jp
吉川 知里, 海洋研究開発機構, E-mail: yoshikawac(at)jamstec.go.jp
Masahito Shigemitsu, JAMSTEC
Chisato Yoshikawa, JAMSTEC

要旨

海底堆積物で起こる脱窒過程が窒素栄養塩の窒素同位体比に与える影響を明らかにするため、初期続成過程を考慮した堆積物モデルに窒素同位体比計算を組み込んだ。海底への有機炭素フラックスを変動させた計算結果の解析より、有機物分解によるアンモニウム塩の生成、生成したアンモニウム塩の硝化過程による硝酸塩への酸化、溶存酸素の消費やそれに続く脱窒による有機物分解等が妥当に計算されていることを確認した。また同位体分別を伴う硝化、脱窒過程の影響も妥当に計算されていることを確認した。次年度はこのモデルを全球物質循環モデルに実装し、全海洋の窒素栄養塩の窒素同位体比に海底堆積物の脱窒が与える影響を定量的に把握する。

1. はじめに

海洋の生物利用態窒素（窒素栄養塩）は、生物生産を制限・律速していると考えられている。したがって、氷期-間氷期間の窒素栄養塩の除去源及び供給源の量の変動は、その間の生物生産変動に影響する。窒素栄養塩の除去源および供給源それぞれの生物過程は異なる同位体分別効果を有しており、海底堆積物に記録された窒素同位体比の変動から、氷期-間氷期間の除去・供給源それぞれの量の変動を推察することができる。考慮すべき生物過程として、窒素栄養塩の存在量に影響する除去源としての「水柱で起こる脱窒」および「堆積物で起こる脱窒」、また供給源としての「窒素固定」が挙げられる。さらに海洋内部で窒素栄養塩を再分配するのが「海洋表層での生物生産」および「有機物の分解」である。これらすべての過程が同位体分別を引き起こす。しかし、これらの生物過程のうち「堆積物で起こる脱窒」の同位体分別は極めて小さいと考えられている（例えば、Somes et al., 2010）。それは、海洋表層から海底堆積物に到達した有機物分解起源の窒素栄養塩が堆積物内で脱窒の影響を受けて海底直上に回帰することはほとんどないと考えられているからである。しかし海底堆積物中の間隙水の測定結果によると、脱窒の影響を受けた窒素栄養塩が海底直上水に回帰し、ある程度の同位体分別を考慮すべきであるとの結果もある（例えば、Lehman et al., 2007）そこで、本研究では海底堆積物で起こる脱窒が窒素栄養塩の窒素同位体比にどのような影響を与えるのかを明らかにすることを目的とする。

2. 問題設定・方法

窒素同位体比計算を導入した全球物質循環モデルに堆積物中の初期続成過程を考慮できるモデルを結合することを考える。全球モデルに結合することを鑑みると、初期続成過程を考慮できる堆積物モデルとして、必要最低限の予報変数のみを考慮するモデルを使用することが望ましい。そこで、必要最低限の予報変数として、固相の「分解速度の速い有機炭素」、「分解速度の遅い有機炭素」、液相の「硝酸塩」、「アンモニウム塩」、「溶存酸素」、「oxygen demand unit (ODU)」を考慮するモデルを考えた。ODUは、貧酸素な状態で酸化マンガン、酸化鉄および硫酸塩によって有機物が分解を受け、その結果生成される還元物質をひとまとめにしたものをモデル中で表現している。基本的には Soetaert et al. (1997)のモデルと同等である。このモデル中の窒素を含む硝酸塩とアンモニウム塩において ^{15}N を予報した。同位体分別を考慮すべき生物過程は硝化と脱窒であり、それぞれ同位体分別効果として5パーミルを与えた。固相においては沈降粒子の体積（移流）と生物による攪乱（混合）、液相においても移流・混合を考える。本報告書では、例として10cmの堆積物を考え、Fig.1の「空隙率」と「生物擾乱による固相の混合」を条件として与えた計算結果を示す。空隙率は深度とともに減少し、生物擾乱は上部5cmで均一に起こり、下層に行くにつれて徐々に減少する設定とした。境界条件として、10cm深での各予報変数の濃度勾配はゼロであると仮定し、表層では直上水との濃度勾配を与えた。

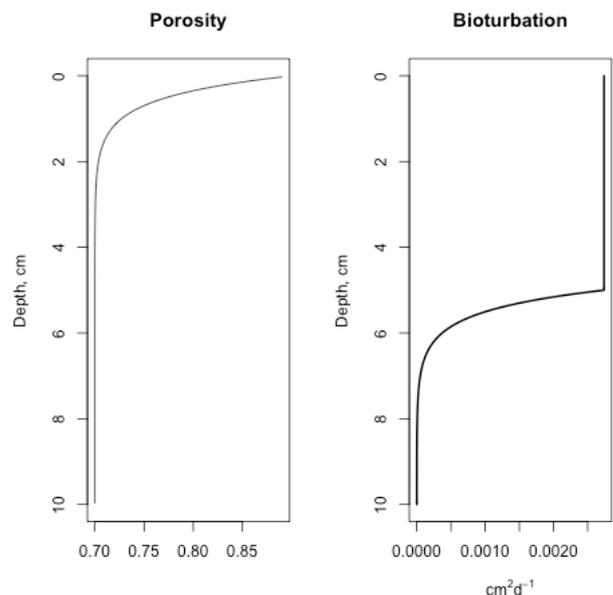


Fig.1 Porosity and bioturbation ($\text{cm}^2 \text{d}^{-1}$) considered in this study

3. 結果と考察

水深 200m、500m、1000m 程度を想定して、海底面における有機炭素フラックスを以下の 3 case に設定した計算結果を示す (Fig. 2)。Case1: $0.4 \text{ mmol cm}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 、Case2: $0.15 \text{ mmol cm}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 、Case3: $0.05 \text{ mmol cm}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 。

Case1 では有機炭素フラックスが多いため海底から 1cm 弱で無酸素になるが、有機炭素フラックスが少ない Case2 では約 2cm で無酸素となり、さらに有機炭素フラックスが少ない Case3 では 10cm まで酸素は残存する。酸素があると硝化過程によってアンモニウム塩が硝酸塩に酸化されるため Case3 ではアンモニウム塩はほとんど見られないが、無酸素である場合、硝化が起こらないため Case1,2 では深度方向に上昇する。一方、無酸素である場合、脱窒過程により硝酸塩は消費されるため Case 1,2 では無酸素になる層で深で硝酸塩がほぼなくなる。一方、酸素が残る Case3 では硝酸塩は脱窒により消費されず硝化により硝酸塩が供給されるため深度方向に上昇する。無酸素状態で有機物分解に使用された酸化マンガン、酸化鉄および硫酸塩は、ODU として溜まっていくため酸素がなくなる Case1,2 では深度方向に上昇する。しかし、酸素が残存する Case3 ではほとんどないことになる。

硝酸塩の窒素同位体比 ($\delta^{15}\text{N}$) をみてみると、酸素がなくなる Case1,2 では有機物分解が脱窒によって起こり、また脱窒過程は同位体分別を伴うため、深度とともに $\delta^{15}\text{N}$ は上昇する。一方酸素の残存する Case3 は、有機物分解起源のアンモニウム塩 (6 ‰) が硝化によってほぼ全量が硝酸塩になるため硝化の同位体分別の影響はみられない。

アンモニウム塩の $\delta^{15}\text{N}$ を見てみると、case1,2 は酸素が残存する表層数 cm で有機物分解起源のアンモニウム塩が硝化に使用されるものの残存するため硝化の同位体分別の影響が現れ $\delta^{15}\text{N}$ が高くなる。無酸素の層では硝化が起こらないため、有機物分解起源の $\delta^{15}\text{N}$ 値になる。酸素が残存する Case3 ではすべての層で硝化の同位体分別の影響が見られ $\delta^{15}\text{N}$ 値が高くなる。

これらの結果、初期続成過程モデルは正常に計算され、また $\delta^{15}\text{N}$ 値も妥当な計算結果が得られていると言える。

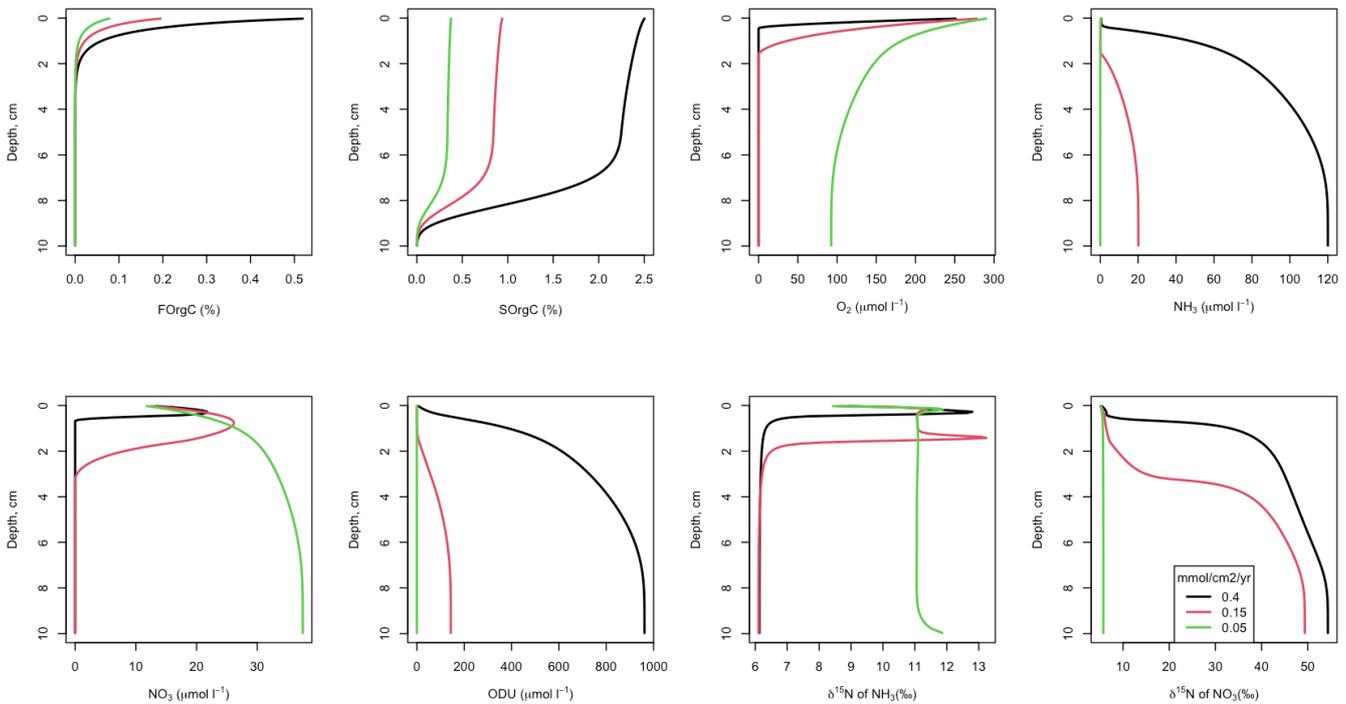


Fig.2 Model results. FOrgC and SOrgC are fast-and slow-decayed organic carbon, respectively.

4. まとめと今後の展望

本年度は窒素同位体比計算を組み込んだ堆積物モデルを開発し、その動作確認を行うとともに、全球物質循環モデルに結合し始めた。来年度は上記の堆積物モデルを全球物質循環モデルに結合し、そのモデルを用いて堆積物の脱窒が海洋内部の硝酸塩の $\delta^{15}\text{N}$ に与える影響を明らかにすることで、より高精度な古海洋復元研究に資することができるようになると思われる。

参考文献

- (1) Somes, C. J., et al. (2010). Simulating the global distribution of nitrogen isotopes in the ocean, *Global Biogeochem. Cycles.*, 24, GB4019, doi:10.1029/2009GB003767.
- (2) Lehmann, et al., (2007). The distribution of nitrate $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ in marine sediments and the impact of benthic nitrogen loss on the isotopic composition of oceanic nitrate, *Geochim. Cosmochim. Acta*, 71, 5384–5404.
- (3) Soetaert et al. (1996). A model of early diagenetic processes from the shelf to abyssal depths, *Geochim. Cosmochim. Acta*, 60, 1019–1040.

トッテン棚氷の海洋シミュレーション

Development of ocean simulation with focus on the Totten Ice Shelf

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

青木 茂, 北海道大学・低温科学研究所, E-mail: Shigeru.Aoki (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

Yoshihiro Nakayama, Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University

Shigeru Aoki, Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University

Hyogo Shuntaro, School of Environmental Science, Hokkaido University

要旨

東南極に位置するトッテン棚氷は、近年、氷厚が減少していることが知られ、将来的に棚氷の融解、氷河による氷の海への流出の加速によって、海面上昇に大きく寄与しうることが指摘されている。オーストラリア、アメリカ、日本によって行われた海洋観測では、トッテン棚氷下部に約 -0.5°C 程度の暖かい水塊(modified Circumpolar Deep Water (mCDW))が存在することが示された。しかし、トッテン棚氷に着目した数値モデル研究は少なく、mCDWの流入経路といった基本的なこともまだよくわかっていない。本研究では、トッテン棚氷へのmCDWの流入、トッテン棚氷からの氷河融解水の流出などに着目して数値シミュレーションを行った。シミュレーションの結果から、トッテン棚氷下部へと流れ込むmCDWの経年変動は、沿岸を流れるAntarctic Slope Current (ASC)によって強く支配されることが示された。この結果は、東南極域の棚氷融解の経年変動のメカニズムを初めて示唆し、この海域の南極氷床の海面上昇への寄与をより現実的に見積もる上で欠かせない。

1. はじめに

トッテン氷河は、近年氷厚が減少していることが知られている。継続的な棚氷厚の減少が続けば、氷河流動が加速し、海面上昇へ大きく寄与しう。本研究では、海洋数値モデルMITgcm(Massachusetts Institute of Technology General Circulation Model)を用いて、東南極に位置するトッテン棚氷への暖かい水塊(mCDW)の流入、トッテン棚氷からの氷河融解水の流出などに着目したモデル開発を行った。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))を境界条件として利用することで、領域モデルまたは全球海洋モデルと比べて、観測データの再現性が格段に高いことがこの研究の大きな特徴である。

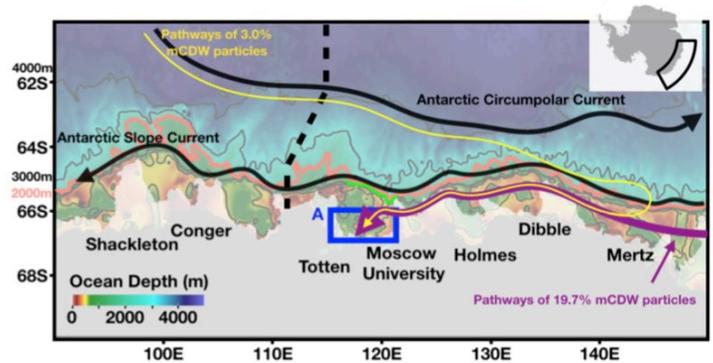


Figure 1: Model bathymetry and origins of mCDW towards the TIS front. Model bathymetry (color) with black arrows indicating the Antarctic Circumpolar Current (ACC) and Antarctic Slope Current (ASC). Bathymetric contours of 500, 1000, 3000, and 4000 m are shown in black and the bathymetric contour of 2000 m is shown in pink. The inset (top right) shows Antarctica with the region surrounded by the black line denoting the model domain. Yellow and purple arrows indicate the pathways of particles onto the continental shelf off the TIS into the box A enclosed by blue lines.

2. 問題設定・方法

モデルの解像度は、水平方向約4 km、鉛直方向には50層である。モデルの初期値は、January World Ocean Atlas 2009の水温と塩分から25年スピニアップしたものを用いる。海底地形はInternational Bathymetric Chart of the Southern Ocean (IBCSO)を用い、棚氷形状は、Antarctic Bedrock Mapping (BEDMAP-2)を用いる(Figure 1)。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用いる。海洋モデルを駆動するための大気境界条件には、Era-interimを用いる。

3. 結果と考察

トッテン棚氷沖に着目した海洋数値モデルを開発した。これまでも、トッテン棚氷域の海洋モデル開発は行われてきたが(e.g., Gwyther et al., 2014, Gwyther et al., 2018, Silvano et al., 2019)、本研究では、海洋モデルの壁面の境界条件として、時間変動を含むデータ同化プロダクトを用いることで、モデル領域内の海洋変動の観測データの再現性を高められることが期待される。

モデル領域には、沖合に東向きに流れる Antarctic Circumpolar Current (ACC)が、陸棚斜面には、水深500-1500m 程度の等深線を沿うように、西向きに流れる Antarctic Slope Current (ASC)が存在する (Figure 1)。例えば、1993年の8月から11月に着目すると、水深477mにおける陸棚上の水塊の水温は、8月の時点では、約 -0.3°C であったが、11月の時点では、約 0.2°C となった。この高温の水塊は、沖から大陸棚上へと流入し、大陸棚上の等深線を沿うように、トッテン棚氷方面へと流れている (Figure 2)。 119°E に沿った断面図に着目すると、1993年の8月から11月にかけて、大陸棚上への高温のmCDWの流入が確認できる。この水塊は、高温、高密度で、8月-11月の4ヶ月の期間で、約50km程度、南下している。同時に、ASCの強さは、8月から11月にかけて、 -0.2 m s^{-1} から -0.1 m s^{-1} と変化し、西向きの流れが弱体化している (Figure 2)。

さらに、投稿中の結果なので、詳細を示すことができないが、NASA ジェット推進研究所の共同研究者らとともに、人工衛星のリモートセンシングに基づいたトッテン棚氷の融解量の時間変化を見積もった。また、本モデルから計算された、1992年から2016年までの期間の棚氷融解量の時間変動、高温の水塊の陸棚上への流入と比較した。現在は、東南極域における、棚氷融解をコントロールする海洋プロセスを特定することを目的とした論文を投稿中である。

4. まとめと今後の展望

本モデルでは、トッテン氷河/棚氷域の海洋モデルを開発し、ASCが陸棚上への高温の水塊の流入を決定する上で、重要であることを示唆したが、未だ、大陸棚上の観測データの再現性には課題が多い。例えば、(1)南極地域観測隊 (JARE61) で得られた新しい海底地形データの導入、(2)水温躍層の水深の再現性を高めるためのモデルパラメータのチューニングなどである。来年度以降は、観測データの再現性を高め、東南極域の氷床による将来的な海面上昇への寄与を見積もるために、開発を継続する。

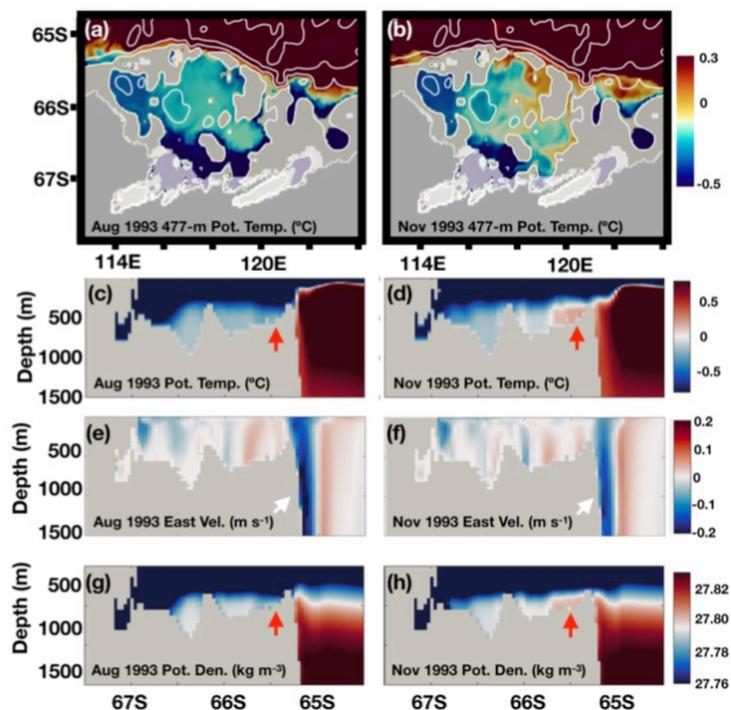


Figure 2: Horizontal and vertical distributions of mCDW in August and November 1993. Monthly mean 552 m potential temperature for the close-ups of the continental shelf region off the TIS in (a) August 1993 and (b) November 1993 for the CTRL case. Bathymetric contours of 500, 1000, 2000, 3000, and 4000 m are shown in white. Simulated vertical sections of (c,d) potential temperature, (e,f) eastward current, and (g,h) potential density along 119°E in August and November 1993 are shown, respectively. Red and white arrows highlight the simulated mCDW inflow and the changes in the ASC strengths, respectively.

参考文献

- (1) Greene, C. A., Blankenship, D. D., Gwyther, D. E., Silvano, A., and van Wijk, E., 2017: Wind causes Totten Ice Shelf melt and acceleration. *Science Advances*, 3(11).
- (2) Gwyther, D. E., Galton-Fenzi, B. K., Hunter, J. R., and Roberts, J. L., 2014: Simulated melt rates for the Totten and Dalton ice shelves. *Ocean Science*, 10(3), 267-279.
- (3) Gwyther, D. E., O'Kane, T. J., Galton-Fenzi, B. K., Monselesan, D. P., and Greenbaum, J. S., 2018: Intrinsic processes drive variability in basal melting of the Totten Glacier Ice Shelf. *Nature Communications*, 9(1), 3141.
- (4) Silvano, A., Rintoul, S. R., Kusahara, K., Peña-Molino, B., van Wijk, E., Gwyther, D. E., and Williams, G. D., 2019: Seasonality of warm water intrusions onto the continental shelf near the Totten Glacier. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 124(6), 4272-4289.

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

建部洋晶, 海洋研究開発機構, E-mail: [tatebe\(at\)jamstec.go.jp](mailto:tatebe(at)jamstec.go.jp)
小室芳樹, 海洋研究開発機構, E-mail: [komuro\(at\)jamstec.go.jp](mailto:komuro(at)jamstec.go.jp)
黒木聖夫, 海洋研究開発機構, E-mail: [m_kurogi\(at\)jamstec.go.jp](mailto:m_kurogi(at)jamstec.go.jp)
渡辺路生, 海洋研究開発機構, E-mail: [michiow\(at\)jamstec.go.jp](mailto:michiow(at)jamstec.go.jp)
草原和弥, 海洋研究開発機構, E-mail: [kazuya.kusahara\(at\)jamstec.go.jp](mailto:kazuya.kusahara(at)jamstec.go.jp)
Hiroaki Tatebe, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC)
Yoshiki Komuro, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC)
Masao Kurogi, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC)
Michio Watanabe, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC)
Kazuya Kusahara, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC)

要旨

海洋は地球の表面積の約七割を覆っていることと、莫大な熱容量を持っているという二つのことから、気候形成・変動を理解する上で極めて重要なサブシステムである。これは、地球気候をコンピュータ上でシミュレートする気候モデルにおいて、海洋モデルの再現性が重要であることも意味する。本共同研究は、気候モデルを用いた気候変動予測の不確実性を低減していくために、海洋大循環モデルの精緻化を目的とするものである。本研究チームでは、全球海洋モデルをはじめ、北極海、北太平洋、日本沿岸、南大洋をターゲットとした種々の海洋モデリング整備し、海洋モデリング研究に利用している。本年度は、南極沿岸の大陸棚上への南極周極深層水の流入プロセスに着目した数値モデリングを実施した。昭和基地のあるリュツォ・ホルム湾の南端にある白瀬氷河舌、東経 116 度付近にあるトッテン棚氷をターゲットとした南極周極領域モデルを新たに整備し、それぞれ数十年間の数値実験を実施した。東南極沿岸域は冷たい水塊で覆われおり、そのため棚氷底面融解は全体としてはそれほど高くない。そのような物理環境下のなか、この二つの海域では例外的に、大陸棚斜面から海底地形にそって、棚氷下まで暖かい周極深層水が流入し、非常に活発な棚氷底面融解が起きている。以下では、今年度実施した昭和基地のあるリュツォ・ホルム湾での沖合からの暖水の流入・白瀬氷河舌の底面融解モデリング結果について報告する。

1. はじめに

南極氷床・棚氷と南大洋との相互作用は気候システム形成・変動を考える上で極めて重要なサブシステムである。南極氷床は南極大陸上の積雪によって成長し、棚氷末端での氷山形成と棚氷底面での融解の二つの過程によって消耗する。最近の衛星データによる棚氷の流動収支解析から、棚氷底面での融解が南極氷床/棚氷の支配的な消耗プロセスであることが明らかになってきている (Depoorter et al. 2013; Rignot et al. 2013)。南極棚氷およびその周辺の氷床の薄化、流出速度の加速が衛星データの解析から報告されており (Rignot et al. 2008; Pritchard et al. 2012; Paolo et al. 2015)、この氷床末端及び棚氷の変化の原因として、南大洋による棚氷底面融解の増加が指摘されている (Jacobs et al. 2011; Jenkins et al. 2018)。

棚氷底面融解は棚氷下に流入してきた水塊によって引き起こされる。棚氷底面融解を引き起こす水塊のうち、南極周極深層水 (CDW, Circumpolar Deep Water) は、南大洋の中層に存在し、非常に暖かい水塊である。この水塊が大陸棚上に流入し、さらに棚氷下へと流れ込むと、非常に活発な棚氷底面融解が起こる。このような CDW による棚氷底面融解過程は、主に西南極域のアムンゼン海で観測されている。半極側である東南極域は全体として冷たい水塊が大陸棚上を覆っている。近年の海洋観測から、この冷たい海域である東南極域においても、東経 116 度付近のトッテン棚氷やリュツォ・ホルム湾 (LHB) にある白瀬氷河付近では、例外的に CDW が流入する海域であることがわかってきた (Hirano et al. 2020)。

本報告で着目する LHB 内には日本の南極観測所である昭和基地があり、日本南極観測隊の主要なプラットフォームである。LHB は、東側を南北方向の海岸線、西側を北西・南東方向の海岸線・棚氷で過去まれ (図 1)、北側に開いた半閉鎖型の湾構造をしている。ごく最近まであまり認識されていなかったが、海洋観測結果や最新の海底地形から総合的に判断して、LHB は棚氷・氷河-海洋間相互作用を調べるのに適した場所であると示唆されている (Hirano et al. 2020)。本研究では、LHB における CDW の流入とその南端にある白瀬氷河の底面融解に関する数値モデリングを実施した。特に、大陸棚斜面から湾内への CDW 流入プロセスと白瀬氷河の底面融解の季節的・経年変動について詳しく調べた。また、本報告では割愛するが、定着氷の海氷海洋場への影響も数値モデリングから評価した (Kusahara et al. 2021)。

2. 問題設定・方法

本研究では、海洋研究開発機構 (JAMSTEC) と東京大学大気海洋研究所で共同開発・運用されている海氷海洋結合モデル (COCO) に棚氷要素を導入した数値モデルを利用した。海洋モデルの特異点 2 つを東南極大陸上に配置することにより、モデル領域を南大洋全体としつつ、対象領域の LHB 周辺の水平解像度を局所的に高解像度化 (2-3 km) させた。この領域高解像度海氷海洋棚氷結合モデルを大気の大気再解析データ (ERA-Interim, 2005-2018 年) を用いて駆動し、そのモデル出力を解析した。

3. 結果と考察

本数値モデルは、大陸棚外縁から白瀬氷河までの CDW の流入を現実的に再現することができた (図 1)。高温・高塩分の CDW シグナルは海底に沿って白瀬氷河舌まで流入しており、再現された水温・塩分の二層構造は観測結果と整合的なものである (図 2)。CDW の LHB への流入は年間を通じてみられるが、その流入量は夏に最大、秋から冬にかけて最小となる。この CDW の季節変動によって、白瀬氷河の底面融解の季節変動がコントロールされていることを確認した。数値モデルで再現された白瀬氷河舌の年間平均底面融解率は 8.8 m yr^{-1} であった。これは衛星観測を基にして推定した南極棚氷の平均の底面融解率は数十 cm yr^{-1} から 1 m yr^{-1} であることを考慮すると、白瀬氷河舌は非常に活発な氷床融解域である。LHB・白瀬氷河舌は CDW の流入によって活発な棚氷・氷河舌-海洋相互作用のホットスポットであることが数値モデリングから示された。

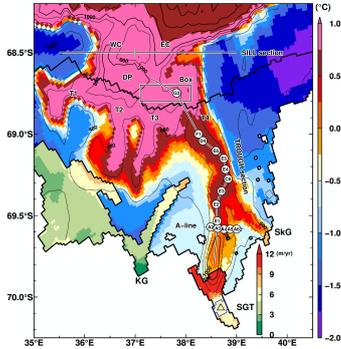


図 1. 1 月の海底での水温分布と棚氷・氷河舌での年間融解量 (どちらも気候値)。

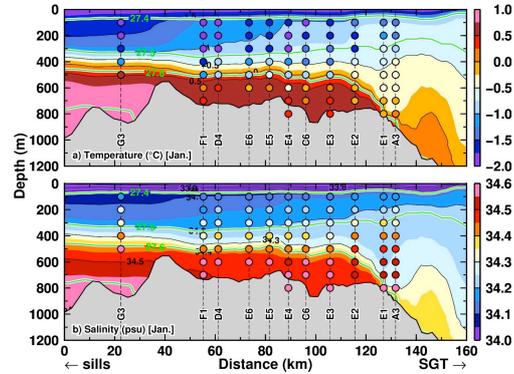


図 2. LHB を縦断する観測線沿いの水温・塩分の鉛直分布 (1 月気候値)。丸は観測値。

4. まとめと今後の展望

研究対象領域(LHB)のモデル水平解像度を数 km とした高解像度モデリングを実施し、LHB における CDW の流入及び白瀬氷河の底面融解プロセスについて調べた。東南極域には、活発な棚氷融解が起こる場所としてトッテン棚氷がある。ここについても現在同様な数値モデリングを実施中である。また、本報告の棚氷-海洋相互作用の領域モデリングの発展として、棚氷要素を全球海洋モデルにも適応し、氷床起源の淡水が全球海洋環境場にどのような影響を与えるかも調べていく予定である。

参考文献

- (1) Depoorter, M. A., J. L. Bamber, J. A. Griggs, J. T. M. Lenaerts, S. R. M. Ligtenberg, M. R. van den Broeke, and G. Moholdt, 2013: Calving fluxes and basal melt rates of Antarctic ice shelves. *Nature*, **502**, 89-92, doi:10.1038/nature12567. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/24037377>.
- (2) Hirano, D., and Coauthors, 2020: Strong ice-ocean interaction beneath Shirase Glacier Tongue in East Antarctica. *Nat. Commun.*, **11**, 4221, doi:10.1038/s41467-020-17527-4. <http://www.nature.com/articles/s41467-020-17527-4>.
- (3) Jacobs, S. S., A. Jenkins, C. F. Giulivi, and P. Dutrieux, 2011: Stronger ocean circulation and increased melting under Pine Island Glacier ice shelf. *Nat. Geosci.*, **4**, 519-523, doi:10.1038/ngeo1188.
- (4) Jenkins, A., D. Shoosmith, P. Dutrieux, S. Jacobs, T. W. Kim, S. H. Lee, H. K. Ha, and S. Stammerjohn, 2018: West Antarctic Ice Sheet retreat in the Amundsen Sea driven by decadal oceanic variability. *Nat. Geosci.*, doi:10.1038/s41561-018-0207-4.
- (5) Kusahara, K., D. Hirano, M. Fujii, A. D. Fraser, and T. Tamura, 2021: Modeling intensive ocean-cryosphere interactions in Lützow-Holm Bay, East Antarctica. *Cryosphere*, doi:10.5194/tc-15-1697-2021.
- (6) Paolo, F. S., H. A. Fricker, and L. Padman, 2015: Volume loss from Antarctic ice shelves is accelerating. *Science*, **348**, 327-331, doi:10.1126/science.aaa0940.
- (7) Pritchard, H. D., S. R. M. Ligtenberg, H. A. Fricker, D. G. Vaughan, M. R. van den Broeke, and L. Padman, 2012: Antarctic ice-sheet loss driven by basal melting of ice shelves. *Nature*, **484**, 502-505, doi:10.1038/nature10968.
- (8) Rignot, E., J. L. Bamber, M. R. van den Broeke, C. Davis, Y. Li, W. J. van de Berg, and E. van Meijgaard, 2008: Recent Antarctic ice mass loss from radar interferometry and regional climate modelling. *Nat. Geosci.*, **1**, 106-110, doi:10.1038/ngeo102.
- (9) Rignot, E., S. Jacobs, J. Mouginot, and B. Scheuchl, 2013: Ice-shelf melting around Antarctica. *Science*, **341**, 266-270, doi:10.1126/science.1235798. <http://www.sciencemag.org/cgi/doi/10.1126/science.1235798>.

雲解像モデルを用いた雲・雷モデルの開発と高度化

Development of lightning component based on cloud resolving model

佐藤 陽祐, 北海道大学・理学研究院, E-mail: yousuke.sato@sci.hokudai.ac.jp

三浦 裕亮, 東京大学・理学系研究科, E-mail: h_miura@eps.s.u-tokyo.ac.jp

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

端野 典平, 高知工科大学環境理工学群, E-mail: hashino.tempei@kochi-tech.ac.jp

要旨

本研究では昨年度に開発を行った、雷を直接扱う雷コンポーネントを実装した次世代気象気候ライブラリ SCALE を用いて台風に関する理想実験を行い、台風周辺で発生する雷発生頻度と台風の強度変化の関係についての考察を行った。数値実験の結果から、台風が発生してから定常に達するまでの一連のライフサイクルの中で、台風が急発達する直前に発雷頻度が最大となり、発達初期は主に外側降雨帯で雷が発生していること、台風が発達するにつれて台風の壁雲付近で雷が発生しているが、頻度は少なくなることが示された。これらの結果は観測に基づく先行研究によって報告されている結果と整合的であった。

1. はじめに

雷は高度に電子化された現代社会において、大きな被害をもたらすため、その精度良い予測が求められている。しかしながら日々の数値天気予報に用いられる数値気象モデルをはじめとした、ほとんどの数値気象モデルは、雷を直接扱う計算には対応していない。また一部の数値モデルで雷を直接取り扱った計算が行われているが、計算コストが高く広く用いられていない。そこで本研究では、昨年度、次世代の気象気候ライブラリ (Scalable Computing for Advanced Library and Environment: SCALE, Nishizawa et al. 2015, Sato et al. 2015) に雷モデルを実装して、大型計算機で実行可能な気象雷モデルの開発を行った。本年度は開発された気象雷モデルを用いて台風を対象とした理想化実験によって、台風の発生から定常状態に達するまでの一連の台風のライフサイクルを通じた数値実験を行い、台風周辺で発生する雷の頻度と台風の強度変化に関して考察を行った。台風周辺で発生する雷の頻度と台風の強度変化について観測学的な研究によって、特徴的な関係が報告されている。それは「1、台風が急発達 (Rapid Intensification: RI) する直前に雷の頻度が最大になる (Price et al. 2009)」、「2、台風の外側降雨帯で雷頻度が大きい時はその 24 時間後に台風は RI する (DeMaria et al. 2012)」、「3、台風の壁雲付近で雷が発生している台風は勢力が強くない (Stevenson et al. 2016)」、「4、勢力が弱まる台風は、その壁雲付近で雷に頻度が高いことが多い (Thomas et al. 2010)」などである。しかしながらこれらの結果は全て観測に基づくものであるため、データの時空間分解能の制約から、台風の強度変化と雷頻度の関係が生じる理由についての考察が十分とは言えない。数値モデルによる実験は、計算領域内の全ての場所で 3 次元的に物理量を取得することができるため、このような台風の強度変化と雷頻度の関係が生じる理由について調べる有効なツールである。数値実験によってこの関係について調べた先行研究が存在するが (Fierro and Mansell 2017)、台風の発生から定常に至るまでの一連のライフサイクルを網羅した計算ではないため、ライフサイクル全てを網羅した数値実験による解析が求められていた。そこで、本研究では昨年度開発した気象雷モデルを用いて、台風の発生から定常状態に達するまでの一連の台風のライフサイクルを通じた数値実験を行い、台風周辺で発生する雷の頻度と台風の強度変化に関して考察を行った。

2. 問題設定・方法

実験設定は昨年度に行った実験設定と同様である。実験設定は Miyamoto and Takemi (2013) に従い、西インドで観測された気象場の鉛直プロファイルを手本として 3000 km 四方の計算領域に与え、初期に領域の中心に渦を置いて実験を行なった。外力として、一定のコリオリ力 ($f = 10^{-5} \text{ s}^{-1}$) と海水温一定 (300 K) の地表面からの潜熱・顕熱フラックスを与え、放射の効果は無視した。空間解像度は 2 km、鉛直解像度は 200 m から 1040 m (下層ほど細かい) で、高度 21 km までを 40 層に分割した。積分時間は台風が定常に達する 196 時間まで行った。昨年度は計算の最後 24 時間のみを解析したが、本年度は台風の発生から定常に達するまでを対象としたため、196 時間全てを解析対象とした。雲微物理モデルはダブルモーメントバルク法 (Seiki and Nakajima 2014: SN14) を用いた。実験設定の詳細は Sato et al. (2021) を参照されたい。

3. 結果と考察

図 1 は計算された台風の強度変化の指標となる高度 1 km での最大風速と発雷頻度の時間変化である。計算された台風は計算開始後 60 時間 ($t = 60 \text{ h}$) 程度から RI を始め、 $t = 135 \text{ h}$ で定常状態に達している。雷頻度の時間変化に着目すると、RI する直前の $t = 45 \text{ h}$ あたりで雷の頻度が最大となり、観測による先行研究 (Price et al. 2009) の結果と整合的である。

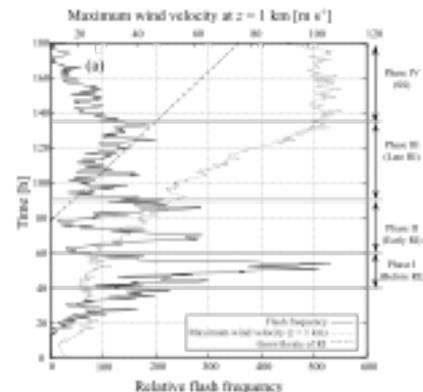


Fig. 1: Temporal evolution of lightning frequency (solid line) and maximum wind velocity at $z = 1 \text{ km}$ (dotted line) (Sato et al. 2021). Dashed line indicates the growth rate of the rapidly intensifying TC defined by Kaplan and DeMaria (2003)

次に台風のライフサイクルごとに雷が発生している位置を調べるために、ライフサイクルを図 1 に示した 4 つの Phase (Phase I: RI 前、Phase II:RI 初期、Phase III:RI 後期、Phase IV:定常) に分けて解析を行った。図 2 は各 Phase における雲 (鉛直積算雲水量) の分布と雷が発生した場所である。これによると、RI 前は台風を中心位置からの距離にかかわらず雷が高頻度で発生しており、この場所にかかわらず高頻度で発生する雷によって Phase I での雷の最大頻度につながっていた。Phase II をみると主に外側降雨帯で雷が発生していた。そして外側降雨帯で雷が発生していた 24 時間後には台風が発達しており、これは先行研究 (DeMaria et al. 2012) と矛盾しない。さらに、台風が定常になってこれ以上勢力が強くない Phase IV では主に台風の壁雲で雷が発生しており、このことも観測に基づく先行研究 (Stevenson et al. 2016) と矛盾しない。このことから本研究で開発したモデルは観測される台風のライフサイクルと雷頻度の関係を再現できたと考えられる。この結果をさらに解析したところ、Phase I、Phase II において発生する雷は、主に対流不安定条件下で有効対流位置エネルギー (CAPE) を消費して発生する寿命が短い強い対流にともなって発生していた。一方、Phase IV において発生する雷は台風の 2 次循環によってできる対流雲で CAPE を消費して発生する対流よりは弱く雷頻度も低かった。台風のライフサイクルにおいて、急発達前には、CAPE を消費して発生する対流雲が発達前に繰り返し発生して、上層を湿らせるプロセスが働くことが知られている (Pre-conditioning: Nolan 2007)。計算の結果とこの Pre-conditioning の存在を考慮すると、RI 前に雷頻度が最大になるのは、この Pre-conditioning 時に繰り返し発生する積乱雲が雷によって可視化されていたと考えるのが妥当であると言える。これらは Sato et al. (2021) として出版済みである

4. まとめと今後の展望

本研究では開発した気象雷モデルを用いて台風と雷頻度に関する数値実験を行い台風の強度変化と雷頻度の関係について考察を行った。このような考察は雷モデルを持ちこすることで初めて可能になった研究である。ただしこれは理想実験による 1 つの台風についての考察に過ぎない。今後はこの雷気象モデルを現実事例に適用させてモデルの検証を重ね、様々な台風に対して同様の実験を行うことで台風の強度変化と雷頻度の関係についてより深い考察を行うことが必要である。

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.*, 10, 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 Plan. Sci.*, 2(1), doi:10.1186/s40645-015-0053-6
- (3) Price, C., M. Asfur, and Y. Yair, 2009: Maximum hurricane intensity preceded by increase in lightning frequency. *Nat. Geosci.*, 2, 329-332, doi:10.1038/ngeo477.
- (4) DeMaria, M., R. T. DeMaria, J. A. Knaff, and D. Molenaar, 2012: Tropical cyclone lightning and rapid intensity change. *Mon. Wea. Rev.*, 140, 1828-1842
- (5) Stevenson, S. N., K. L. Corbosiero, and S. F. Abarca, 2016: Lightning in eastern north Pacific tropical cyclones: a comparison to the north Atlantic. *Mon. Wea. Rev.*, 144, 225-239
- (6) Thomas, J. N., N. N. Solorzano, S. A. Cummer, and R. H. Holzworth, 2010: Polarity and energetics of inner core lightning in three intense north Atlantic hurricanes. *J. Geophys. Res. Sp. Phys.*, 115, doi:10.1029/2009JA014777.
- (7) Fierro, A. O., and E. R. Mansell, 2017: Electrification and lightning in idealized simulations of a hurricane-like vortex subject to wind shear and sea surface temperature cooling. *J. Atmos. Sci.*, 74, 2023-2041
- (8) Miyamoto Y. and T. Takemi 2013: A Transition Mechanism for the Spontaneous Axisymmetric Intensification of Tropical Cyclones, *J. Atmos. Sci.*, 70, 112-129.
- (9) Seiki and Nakajima, 2014: Aerosol Effects of the Condensation Process on a Convective Cloud Simulation, *J. Atmos. Sci.*, 71, 833-853.
- (10) Sato, Y., Y. Miyamoto, and H. Tomita, 2021: Lightning Frequency in an Idealized Hurricane-Like Vortex from Initial to Steady-State Using a Coupled Meteorological and Explicit Bulk Lightning Model, 149, 753-771.
- (11) Kaplan, J., and M. DeMaria, 2003: Large-scale characteristics of rapidly intensifying tropical cyclones in the north Atlantic basin. *Wea. Forecast.*, 18, 1093-1108.
- (12) Nolan, D. S., 2007: What is the trigger for tropical cyclogenesis? *Australian Meteorological Magazine*.

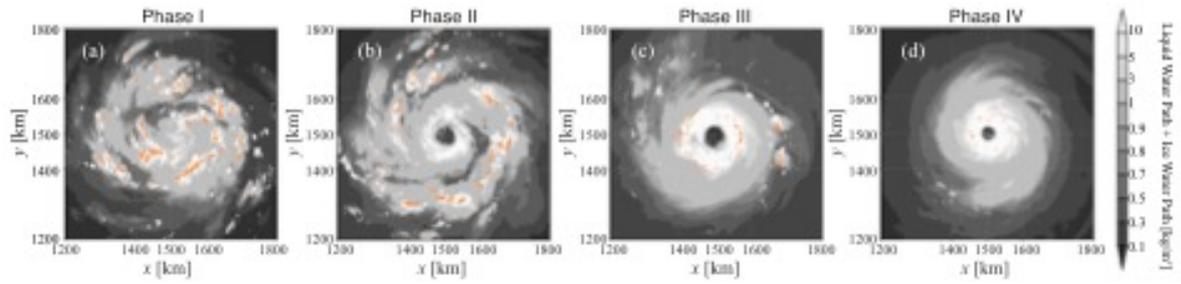


Fig. 2: Sum of the liquid water path and ice water path (shaded) and (bottom) convective available potential energy (CAPE; shaded) at $t =$ (a), 51; (b) 86.5; (c) 110; and (d) 169 h. The orange crosses show the locations of flashes. (Sato et al. 2021)

ケープダナンレー沖での南極底層水形成に関するモデルと観測の融合研究

Integrated study of modelling and observation on Antarctic bottom water formation off Cape Darnley

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

Abstract:

We simulated the formation and descent of Dense Shelf Water (DSW) off Cape Darnley Polynya (East Antarctica) and investigated the model sensitivities to horizontal and vertical grid spacings. Horizontal model resolutions equal to or higher than 2 km were required to simulate the descent of DSW and a realistic Antarctic Bottom Water (AABW) production, as well as bottom flow properties (temperature, current velocity) consistent with observations. Vertical resolution had little influence on model performance in this region. We also found that high-resolution bathymetry datasets are crucial because the newly formed AABW volume was reduced by 20% when a 16-km resolution bathymetry was interpolated onto a 2-km resolution grid.

1. Introduction

The formation of Dense Shelf Water (DSW) and Antarctic Bottom Water (AABW) in the Southern Ocean is an essential part of the thermohaline circulation, and understanding this phenomenon is crucial for studying the global climate. DSW is a dense water mass formed in winter following brine rejection in coastal polynyas, and AABW is formed as DSW flows down the continental slope and mixes with the surrounding waters. However, DSW formation and its descent remains a poorly resolved issue in many global climate models which yield unrealistic AABW properties. Finer resolution models yield significant underestimate of the dense water volume transport and variability, possibly because their resolution may still be insufficient to resolve the canyons and troughs through which the DSW flows. Here we sought to simulate the formation and descent of DSW and investigate its sensitivities to horizontal and vertical grid spacings. We focused on the Cape Darnley Polynya (CDP) region in East Antarctica, as this is one of the main regions of AABW formation, with numerous observations to compare our model results with (Ohshima et al., 2013).

2. Methods and model setup

We used an eddy-resolving regional configuration of the Massachusetts Institute of Technology general circulation model (MITgcm) for the CDP region with hydrostatic approximation and dynamic/thermodynamic sea ice. Our configuration is an improvement of Nakayama et al.'s (2014) setup for the CDP region, as we included sea-ice modeling and wind forcing. We also improved the quality of the bathymetric dataset by including newer, high-resolution bathymetry data. We designed various experiments using different horizontal (1-, 2-, 4-, 8-, 16-km) and vertical resolutions. The coarsest vertical resolution was that of the ECCO product (50 layers, from 10-m wide at the surface to 465-m wide at 5,000 m). The 40-m vertical grid had the same resolution as the ECCO grid for those cells whose width was smaller than 40 m, and all other grid cells had a width of 40 m. The 20-m and 10-m grid were built following the same principle. We also ran a 40-m vertical, 2-km horizontal resolution experiment with a 16-km resolution bathymetry linearly interpolated to the 2-km resolution grid to assess how the accuracy of the bathymetric data may affect the downslope pathways of DSW.

3. Results

The time series of AABW volume obtained from different horizontal resolutions suggest that resolutions of 2 km or better can produce AABW in reasonable amounts that reaches the bottom of the continental slope (Fig. 1 a). The maximum AABW volume was strongly dependent on resolution, increasing from 5,200 km³ (16-km) to 15,000 km³ (1-km). The time series of the 2-km and 1-km cases were comparable and yielded a similar maximum AABW

volume, suggesting a 2-km resolution threshold. Reducing the quality of the bathymetric dataset significantly yielded a 20% decrease of AABW production compared to the standard 2-km resolution. The vertical resolution has little influence on the AABW volume produced, as the time series for all four different vertical resolutions at a fixed 2-km horizontal resolution exhibited no significant difference (Fig. 1b).

The bottom variability of ocean current and hydrographic properties at the mooring M3 is characterized by an approximately 5-day periodic flow of cold, dense water down the slope (Ohshima et al., 2013), with oscillations of $\sim 0.5^\circ$ amplitude preceded by an abrupt drop of $\sim 0.5^\circ\text{C}$ in May. The temperature time series outputs with 1-km and 2-km resolutions (Fig. 2b–c) exhibit a temperature drop and high-frequency oscillations consistent with those of the observations (Fig. 2a). A 4-km resolution failed to replicate observations (Figs. 2d), as the temperature dropped only by -0.3°C and exhibited minor variations. The amplitude and frequency of the temperature variations in the 2-km smoothed case (Magenta line in Fig. 2c) generally resembled those at 4-km resolution. The 8-km and 16-km outputs compared poorly to observations, presenting no significant variability. This resulted in inaccurate properties for AABW.

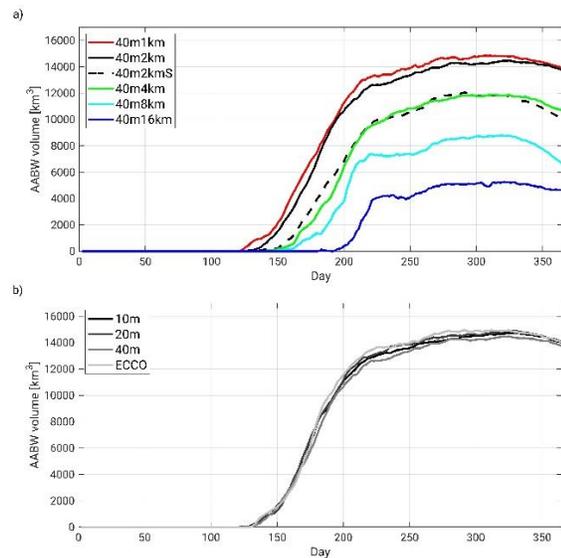


Fig. 1 Time series of AABW volume below 2000 m for (a) all horizontal resolutions (40m vertical), and (b) all vertical resolutions (2-km horizontal).

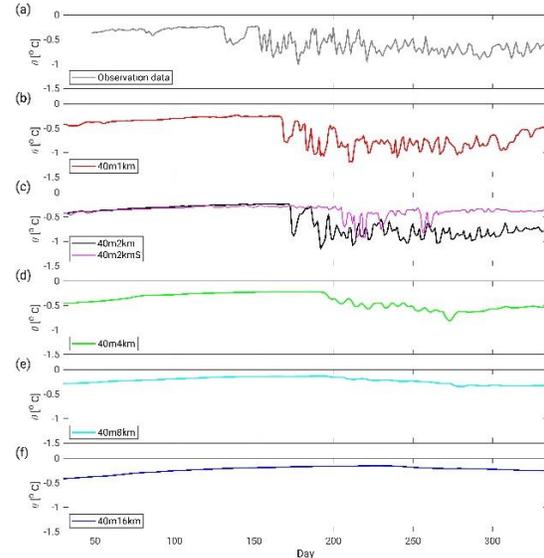


Fig. 2 Time series of potential temperature at mooring M3 (2,600 m) from (a) observations, and model at (b) 1-km, (c) 2-km, (d) 4-km, (e) 8-km, (f) 16-km resolutions.

4. Conclusions and future works

The essential criterion controlling downslope flow in our model was horizontal resolution. For resolutions equal to or higher than a 2-km threshold, the simulations yielded realistic downslope flow volume (Fig. 1), AABW properties, and bottom current and hydrographic properties variability (Fig. 2), all consistent with observations in the region. Lower resolutions, and high-resolution grid with poor bathymetric data quality yielded significantly lower AABW volumes, and did not reproduce bottom flow properties accurately (Fig. 2), leading to misestimates of AABW properties (not shown). While we found that vertical resolutions did not affect the model performance in the CDP region, we are now in the process of verifying whether this conclusion applies to other AABW production regions. Specifically, we verify whether different slope inclination and plume thickness could affect the resolution needed to properly reproduce AABW formation in other locations. We are also running a 25-yr long simulation to examine the variability of AABW production in the CDP region.

References:

Ohshima, K.I., Fukamachi, Y., Williams, G.D., Nihashi, S., Roquet, F., Kitade, Y., Hindell, M., 2013. Antarctic Bottom Water production by intense sea-ice formation in the Cape Darnley polynya. *Nat. Geosci.* **6** (3), 235 – 240.
 Nakayama, Y., Ohshima, K. I., Matsumura, Y., Fukamachi, Y., Hasumi, H., 2014. A Numerical Investigation of Formation and Variability of Antarctic Bottom Water off Cape Darnley, East Antarctica. *J. Phys. Oc.*, **44**, 2921–2937.

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
 末松 環, 東大・大気海洋研, E-mail: suematsu(at)aori.u-tokyo.ac.jp
 三浦 裕亮, 東大・理学系, E-mail: h_miura(at)eps.s.u-tokyo.ac.jp
 高須賀 大輔, JAMSTEC, E-mail: dtakasuka(at)jamstec.go.jp
 大和田 真由, お茶大・情報科学, E-mail: owada.mayu(at)is.ocha.ac.jp
 小川 公子, お茶大・情報科学, E-mail: ogawa.kimiko(at)is.ocha.ac.jp
 Tsubasa Kohyama, Department of Information Sciences, Ochanomizu University
 Tamaki Suematsu, Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo
 Hiroaki Miura, Department of Earth and Planetary Science, The University of Tokyo
 Daisuke Takasuka, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology
 Mayu Owada, Department of Information Sciences, Ochanomizu University
 Kimiko Ogawa, Department of Information Sciences, Ochanomizu University

要旨

太平洋上の下降流の幅は東西方向に 90 度程度であるのに対し、インド洋上のウォーカー循環の下降流の幅は 20 度程度である。夏のアジアモンスーンのような、惑星スケールよりも小さな大気の変動が、この下降流を介して惑星スケールのウォーカー循環と相互作用することができるため、インド洋上のウォーカー循環の下降流の狭さは注目に値する。また、湿潤循環の性質として、この下降流の狭さは、北東アフリカ上空において、熱帯降水バンドの東西不連続性として現れている。そこで本研究では、この狭い下降流を大気の「壁」と呼び、その存在理由を明らかにした。全球雲解像モデル NICAM を用いた実験の結果は、東アフリカの山岳波による鉛直混合が「壁」の維持に必要であることを示唆する。また、東アフリカの地形を平坦にすると、熱帯降水バンドの東西不連続性が失われる。

1. 背景

ウォーカー循環は、最も顕著な東西方向の惑星規模熱帯大気循環である。ウォーカー循環に関連する鉛直運動は、第一近似的には、比較的暖かい海面（西太平洋の暖水プール等）での上昇流域と、比較的冷たい海面（東太平洋の冷舌等）での上昇流域で構成されていることが理解されている。気候変動との関連では、ウォーカー循環のトレンドや経年変動が、気候モードや温室効果ガス強制との関連で古くから研究されている。特に、ウォーカー循環の太平洋側の循環は、その経年変動が地球上で最も支配的な経年気候モードであるエルニーニョ南方振動 (ENSO) の大気側の変動となっているゆえ注目されている。

しかし気候値を見ると、インド洋西部上空のウォーカー循環の下降流域も強い沈降を示しており、これは少なくとも太平洋の下降流に匹敵する強さである。図 1 は、年平均の赤道上の鉛直運動、外向き長波放射、降水量の年平均値を示している。インド洋の西端上 (40° E-60° E) には強く狭い下降流が存在するのに対し、東太平洋 (90° W-150° W) には弱くて広い下降流が存在する。

2つの海盆の大きさを考えると、この海盆間のコントラストは必ずしも直感的ではない。

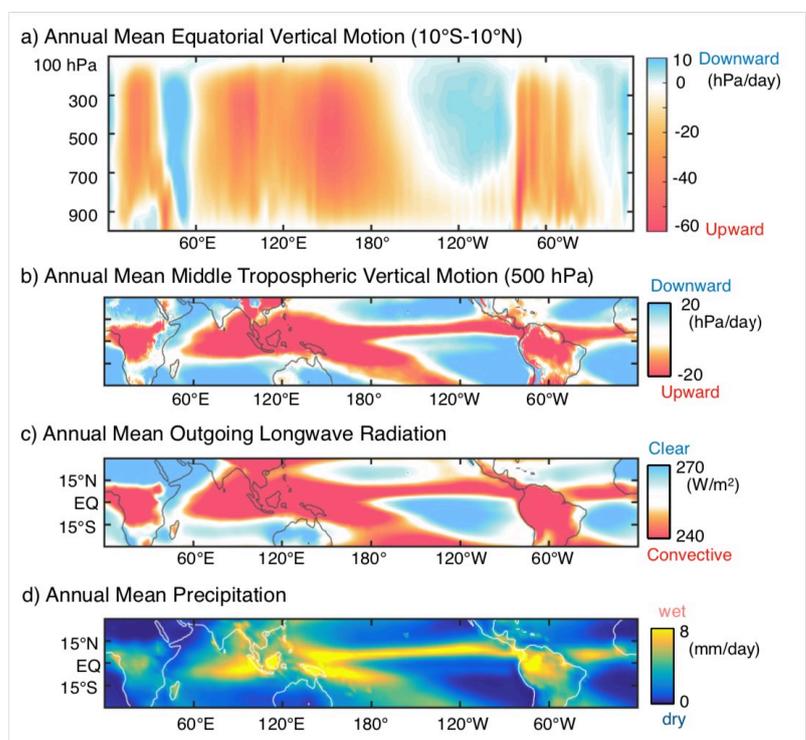


図 1 赤道域における鉛直運動、外向き長波放射、降水量の年平均値。

2. 問題設定・方法

本研究では、OakForestPACS 上における気象シミュレーションを用いて、インド洋西端に「先鋭な下降流」が存在せねばならない理由を、大気循環モデル (AGCM) 用いて明らかにした。以下にその詳細を記述する。

定常的に下降流が実現されるには、断熱圧縮を相殺する何らかの冷却源が必要である。熱帯の大部分では、大規模下降流は放射冷却の存在によって実現される。しかし、インド洋の下降流域は強く先鋭であり、放射冷却のみでは定量的にこの下降流の強さを説明できないため、インド洋上空の大気を「引きずり下ろす」他の原因が存在すると推論せざるを得ない。そこで、山岳波にともなう混合によって上空の大気が冷却されているという仮説を立て、全球雲解像モデル NICAM による数値実験を試みた。東アフリカ域 (30° S-30° N, 30° E-50° E) の標高を 1 m とした FLAT_EAST_AFRICA 実験、標高を現実のままとした CONTROL 実験を、2013 年、2016 年の 7 月-9 月について行った。

3. 結果と考察

FLAT_EAST_AFRICA 実験では、CONTROL 実験と比較して、インド洋上の下降流域が弱まった。その一端として、外向き長波放射が強まり、降水量が増えた (図 2)。またエネルギー収支の解析により、地形の役割は大規模な循環に反応して山岳波を発生させること、すなわち静止した鉛直混合により鉛直熱交換が促進されて対流圏上部が冷やされる効果が重要であると結論づけた。これらの結果から、壁の存在には東アフリカの地形が必要であると結論づけた。

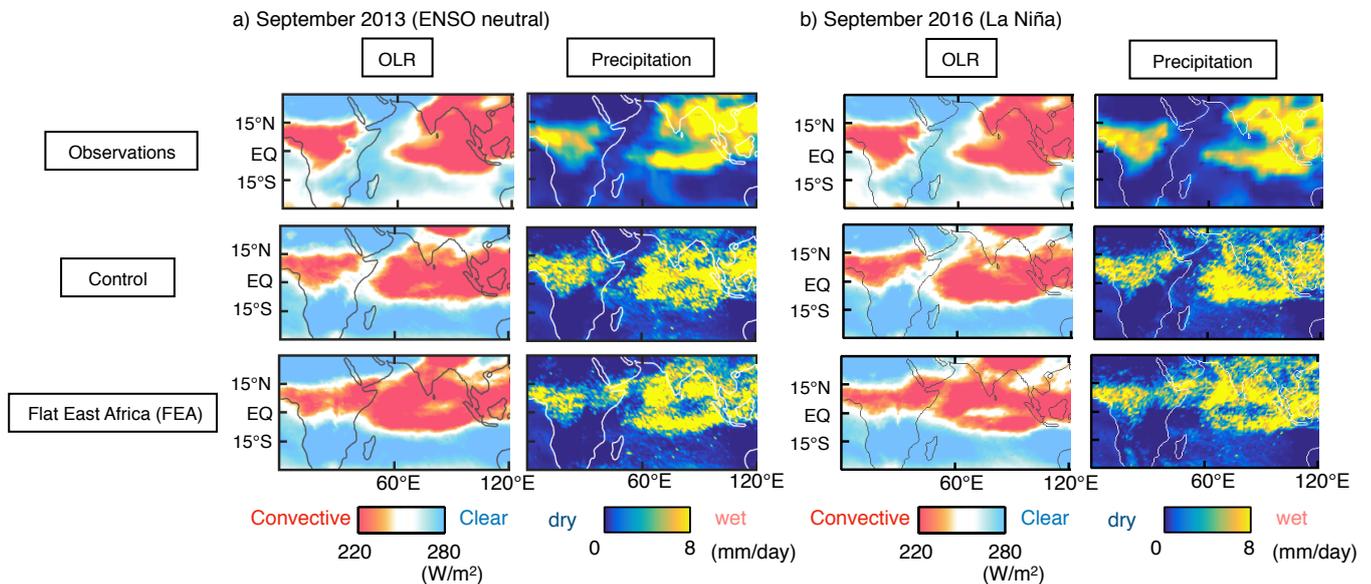


図 2 外向き長波放射と降水量について、観測 (上段)、CONTROL 実験 (中段)、FLAT_EAST_AFRICA 実験 (下段) の比較。

4. まとめと今後の展望

東太平洋とは対照的に、インド洋西端に位置する Walker 循環の下降流の存在理由として、放射冷却は支配的ではない (本結果は、先行研究である Naiman et al. 2017 とも整合する)。特に、最新の全球気候モデルにおける「アフリカの角」と呼ばれる地域における降水の季節性の再現性が低い理由は、山岳波の再現性の低さによって説明される可能性がある。

本研究結果は、現在査読付き国際論文雑誌 Journal of Geophysical Research, Atmospheres に投稿し、現在改訂中である (Kohyama et al., in revision)。

参考文献

- (1) Naiman, Z., Goodman, P. J., Krasting, J. P., Malyshev, S. L., Russell, J. L., Stouffer, R. J., & Wittenberg, A. T. (2017). Impact of mountains on tropical circulation in two Earth system models. *Journal of Climate*, 30(11), 4149-4163.
- (2) Kohyama, T., Suematsu, T., Miura, H., & Takasuka, D. (2021). A Wall-like Sharp Downward Branch of the Walker Circulation above the Western Indian Ocean, *Journal of Geophysical Research, Atmospheres*, in revision.

海洋再出現過程に関する研究

A study on the oceanic reemergence mechanism

東塚 知己, 東大・理学系研究科, E-mail: tozuka(at)eps.u-tokyo.ac.jp
村田 彦学, 東大・理学系研究科, E-mail: KazuMurata(at)eps.u-tokyo.ac.jp
楠 秀大, 東大・理学系研究科, E-mail: kusunoki(at)eps.u-tokyo.ac.jp
Tomoki Tozuka, Graduate School of Science, The University of Tokyo
Kazumichi Murata, Graduate School of Science, The University of Tokyo
Hidehiro Kusunoki, Graduate School of Science, The University of Tokyo

要旨

西岸境界流付近に比べて比較的、海流の弱い北太平洋中・東部における冬季海面水温偏差再出現過程の発生メカニズムと太平洋十年規模振動における役割を研究するために、領域海洋モデルを用いた経年変動積分を行なった。この積分結果は観測データとの比較によって、水温偏差や混合層厚偏差の再現性が高いものであると確かめられた。このモデルの水温変化式の各項をオンラインで保存しているため、完全に閉じる熱収支解析を行うことができ、より詳細な冬季海面水温偏差再出現過程のメカニズムを検証することや太平洋十年規模振動との関わりを定量的に議論することができると期待される。

1. はじめに

前年の冬に生じた冬季海面水温偏差が夏季に一度消滅し、次の冬季で再出現するプロセスを冬季海面水温偏差再出現過程(以下、海洋再出現過程)という(Namias and Born, 1970, 1974; Alexander et al., 1995)。このメカニズムは従来、「中緯度海洋の海洋表層の混合層は季節変化に伴う変動が顕著であり、夏季混合層の下に取り残され、秋季から冬季にかけて混合層が再び厚くなるのに伴い、エントレインメントを通じて前年の冬と整合的な海面水温偏差が再出現する」と考えられてきたが(Deser et al., 2001)、北太平洋の一部の海域で風応力偏差に伴う南北移流行偏差や海面熱フラックス偏差が重要な役割を果たしていることが指摘された(Murata et al., 2020)。また、海洋再出現過程は中緯度の冬から冬への水温偏差維持機構として考えられることから、太平洋十年規模振動(Mantua, 1996)において重要な役割を果たしていると考えられている(Newman et al., 2016)が、その定量的な理解を目指した研究は少ない。そこで、本研究において、鉛直プロセスが水平プロセスに比べて重要に働くと考えられる北太平洋中・東部における海洋再出現過程のメカニズムの理解を目指すとともに、北太平洋十年規模振動との定量的な理解を目指した。

2. モデル

本研究で使用したモデルは、領域海洋モデル ROMS (Shchepetkin and McWilliams 2005) である。積分領域は北太平洋中・東部 (180° E-100° W, 10° N-55.5° N) で水平解像度 $1/4^\circ \times 1/4^\circ$ 、鉛直 40 レベルである。World Ocean Atlas 2013 の水温・塩分場を初期値とし、大気再解析データ JRA55-do (Tsuji et al. 2018) の 3 時間間隔データの気候値を用いて、20 年間スピニングアップした。その後、1958 年から 2015 年まで JRA55-do の 3 時間間隔データで駆動した。側壁境界条件は、海洋同化データ ORAS4 (Balmaseda et al. 2013) の月平均値を使用した。本研究で再現した水温と密度で定義した混合層厚の変動は ORAS4 をよく再現していることが確認できた。

3. 結果

モデルの再現性を各変数の偏差の相関解析で確認したところ(図 1)、水温偏差は積分領域北西部、南東部を除いてよく再現できている。一方で、混合層厚に関しても水温ほど相関係数は高くないものの、水温偏差で見られた相関係数の高い海域上での再現性が有意担っていることがわかる。再現性の悪かった海域の原因としては、北西部の海域に関しては側面境界によるもの、特に黒潮続流による水温前線の影響を強く受けていたことが積分範囲を変えた結果より推察される。一方、南東部では積分の解像度に依存していない点から、大気強制によることが原因の一つであると考えられる。この積分では各時間ステップで温度変化項の各項を保存しているため、完全に閉じる混合層熱収支解析を行うことができる。

4. まとめと今後の展望

本研究では、北太平洋中・東部における海洋再出現過程のメカニズムの解明と太平洋十年規模振動に対する役割の定量的理解を目指して、領域海洋モデル ROMS を大気再解析データによって駆動し、北太平洋中・東部の大部分の領域の水温偏差の再現性を確認した。また、海洋混合層に関しても比較的再現性が高いことが確認もされた。今後は、この積分結果を用いて鉛直プロセスが前年の冬の水温偏差の再出現に対してどれくらいの寄与を担っているのかを定量的に調べるとともに、このメカニズムが太平洋十年規模振動においてどのような役割を果たしているのかを調べていく予定である。

(a) SST

(b) MLD

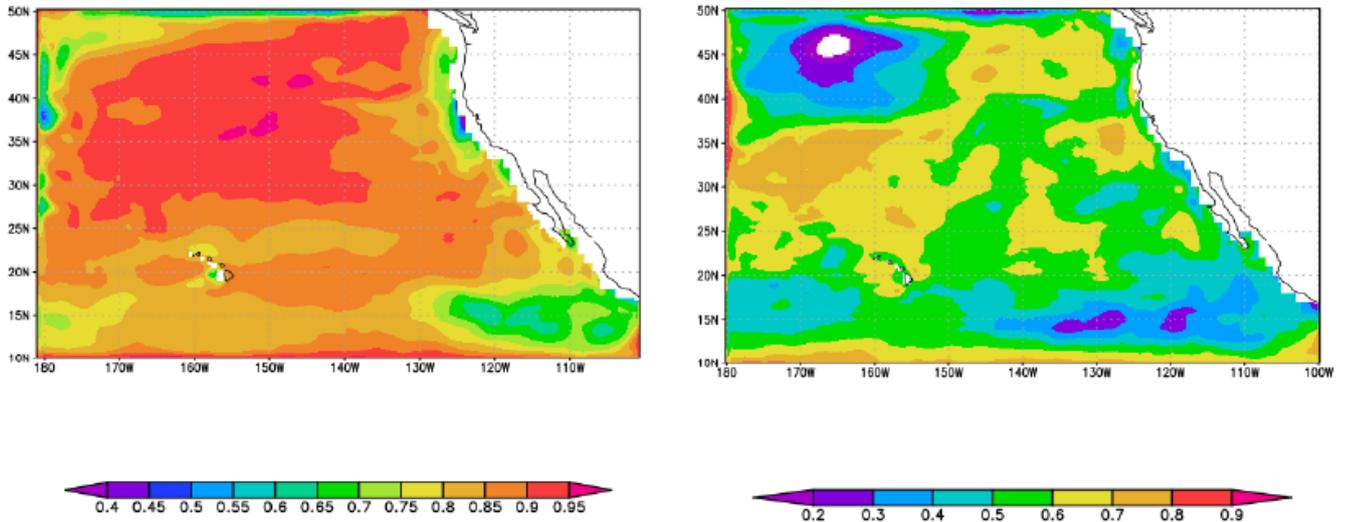


図1 ORAS4 とモデル出力結果の相関係数, (a)海面水温偏差 (Sea Surface Temperature, SST), (b)混合層厚偏差 (Mixed layer Depth, MLD). 色付きは t 検定で信頼区間 99%以上を示す.

参考文献

- (1) Namias, J., & Born, R. M. (1970). Temporal coherence in North Pacific sea-surface temperature patterns. *Journal of Geophysical Research*, **75**, 5952-5955. doi:10.129/JC075i030p05952
- (2) Namias, J., & Born, R. M. (1974). Further studies of temporal coherence in North Pacific sea surface temperatures. *Journal of Geophysical Research*, **79**, 797-798. doi:10.1029/JC079i006p00797
- (3) Alexander, M. A., & Deser, C. A. (1995). Mechanism for the recurrence of wintertime midlatitude SST anomalies. *Journal of Physical Oceanography*, **49**, 122-137. doi:10.1175/1520-0485(1995)025<0122:AMFTRO>2.0.CO;2
- (4) Deser, C., Alexander, M. A., & Timlin, M. S. (2001). Understanding the persistence of sea surface temperature anomalies in midlatitudes. *Journal of Climate*, **16**, 57-72. doi:10.1175/1520-0442(2003)016<0057:UTPOSS>2.0.CO;2
- (5) Murata, K., Kido, S., & Tozuka, T. (2020). Role of reemergence in the central North Pacific revealed by a mixed layer heat budget analysis. *Geophysical Research Letters*, **47**. doi:10.1029/2020GL088194
- (6) Newman, M., Alexander, M. A., Ault, T. R., Cobb, K. M., Deser, C., Di Lorenzo, E., et al. (2016). The Pacific Decadal Oscillation, revisited. *Journal of Climate*, **29**, 4399-4427. doi:10.1175/JCLI-D-15-0508.1
- (7) Shchepetkin, A. F., & McWilliams, J. C. (2005). The Regional Oceanic Modeling System (ROMS): A split-explicit, free-surface, topography-following-coordinate ocean model. *Ocean Modelling*, **9**, 347-404. doi:10.1016/j.ocemod.2004.08.002
- (8) Tsujino, H., Urakawa, S., Nakano, H., Small, R. J., Kim, W. M., Yeager, S. G., et al. (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
- (9) 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**, 1132-1161. doi:10.1002/qj.2063

NICAM 及び MIROC モデルを用いた地球惑星大気の物質輸送と気候変動の研究

Study of the material transport and climate change of Earth and planetary atmosphere using NICAM and MIROC models

黒田 剛史, 寺田 直樹, 笠羽 康正, 早坂 忠裕, 中川 広務, Pradeep Khatri, 鎌田 有紘, 狩生 宏喜, 鄒 宇傑, 東北大・理, E-mail: tkuroda(at)tohoku.ac.jp (黒田)

笠井 康子, 情報通信研究機構

佐川 英夫, 京都産業大・理

前澤 裕之, 大阪府立大・理

佐藤 正樹, 阿部 彩子, 東大・大気海洋研

Takeshi Kuroda, Naoki Terada, Yasumasa Kasaba, Tadahiro Hayasaka, Hiromu Nakagawa, Pradeep Khatri, Arihiro Kamada, Hiroki Karyu, Yujie Zou, Graduate School of Science, Tohoku University

Yasuko Kasai, National Institute of Information and Communications Technology

Hideo Sagawa, Faculty of Science, Kyoto Sangyo University

Hiroyuki Maezawa, Graduate School of Science, Osaka Prefecture University

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

要旨

NICAM を用いた大気エアロゾルシミュレーション, 及び 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・微量物質循環のシミュレーションを行い, 観測との十分な連携を通して地球惑星大気の物質輸送と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の火星及び太陽系外惑星 TRAPPIST-1e のシミュレーションについて進展があったため, それらを報告する. 具体的には 2018 年に火星で発生した全球ダストストームが重力波の励起と伝播にどのような影響を及ぼすかを水平高分解能(T106)計算から示し(Kuroda et al., 2020), また地表 1 気圧・潮汐固定軌道を想定した TRAPPIST-1e の気候シミュレーションについて国際的な GCM 結果相互比較に参画した.

1. はじめに

我々がかねてから火星化した MIROC モデル(DRAMATIC MGCM: Dynamics, Radiation, MAterial Transport and their mutual Interactions Mars Global Climate Model)を用いて, 地表面から高度約 80km までの重力波の励起と伝播について水平分解能 T106 (緯度・経度分解能約 $1.1^{\circ} \times 1.1^{\circ}$, 赤道での水平格子間隔約 67km)の重力波抵抗パラメタリゼーションを用いない計算から検証を行い, 水平波数 $s=61\sim 106$ (波長約 200~350km)の波動が火星の中層大気の流れ場に大きな影響を与えることを示してきた(Kuroda et al., 2015, 2016). そのような中, 2018 年に火星で全球を覆い尽くす規模のダストストームが 11 年ぶりに発生し, 火星周回機 Mars Reconnaissance Orbiter 搭載 Mars Climate Sounder によるデータ解析からその間の地表付近の重力波の励起が大幅に抑えられていることが示唆された(Heavens et al., 2020). そこで我々は観測に基づくこの時のダスト濃度の時空間変動(Montabone et al., 2020)を導入した T106 計算を行い, 全球ダストストームがない場合の通年計算結果(Kuroda et al., 2019)と比較することで, 重力波の励起におけるダストストームの影響を調べた.

また, TRAPPIST-1 恒星はみずがめ座方向へ約 40 光年離れた先にある木星よりわずかに大きいサイズの赤色矮星で, 7 つの地球に似たサイズの惑星が軌道長半径 0.06AU 以内に発見されている. 特に第 4 惑星の TRAPPIST-1e は推定される恒星放射の量から最もハビタブルな条件に合致すると考えられており, その気候を探る GCM 研究が海外のチームにより行われ(Wolf, 2017; Turbet et al., 2018), GCM 相互比較プロジェクトも進行中である(Faucher et al., 2020a). GCM 相互比較は参画モデルが増えるほど理解の深まりが期待できるため, MIROC でも同様の計算に着手した.

2. 問題設定・方法

DRAMATIC MGCM を用いて, 水平分解能 T106, 鉛直 σ レベル 49 層, 大気上端高度は 80-90 km で計算を行った. 重力波抵抗パラメタリゼーションは含まず, 二酸化炭素大気放射はすべての高度で局所熱力学平衡(LTE)を仮定している. 全球ダストストームなし計算(“lowdust”, Kuroda et al., 2019)と 2018 年の全球ダストストームを想定した計算(“MY34”, Kuroda et al., 2020)で定義されたダスト濃度の季節・緯度変動は図 1 の通りである.

TRAPPIST-1e の気候計算は, 基本設定は Faucher et al. (2020a) の GCM 相互比較プロジェクトに基づき, 太陽(恒星)放射を 2600K のプランク関数に置き換えた放射コードを構築, 地表 1 気圧の N_2 大気及び CO_2 大気について, それぞれ表層が全球陸の陸惑星(水循環なし)と全球海の世界惑星(Relaxed Arakawa-Schubert 積雲対流と大規模凝結による雲生成と雲の放射効果を考慮)の場合について計算を行った. 水平分解能は T21, 鉛直 σ レベル 20 層, 大気上端 $\sigma \sim 0.01$ で設定した.

3. 結果と考察

T106 火星計算について, 重力波(水平波数 $s=61\sim 106$ の成分)の kinetic energy と potential energy の和における全球ダストストームありなしでの差(下層大気とモデル上端付近)を図 2 に示す. 全球ダストストームにより下層大気では大気の安定度が高まった影響で重力波の励起が抑えられている一方で, 上層(高度約 70km)ではダストストームに伴う大気加熱が大気大循環と流速場に

変化をもたらすこと様々な位相速度の重力波が上層に伝播しやすくなり、その結果重力波のエネルギーが大幅に増加している。この変動は観測データの解析結果(Heavens et al., 2020)とも一致する。詳しい議論は Kuroda et al. (2020)を参照されたし。

また、図3に潮汐固定を仮定した TRAPPIST-1e の気候計算結果(地表温度と 250hPa 風速場)を記す。陸惑星計算では相互比較対象の 4 種の GCM の結果(Turbet et al., 2020)と結果が概ね一致した一方で、海惑星計算では下層の温度が他の GCM の結果(Faucher et al., 2020b)より最大 30K 程度高い結果となっており、H₂O 気体放射の感度や水平拡散の e-folding 時間設定を検証する必要があると考えられる。水蒸気量・雲量も温度の違いが影響して他 GCM と定量的な差異がみられるが、雲分布は相互比較対象の GCM の間でも定性的なバラツキは大きい(Faucher et al., 2020b)ため、相互比較の中で今後さらに詳しく検証する。

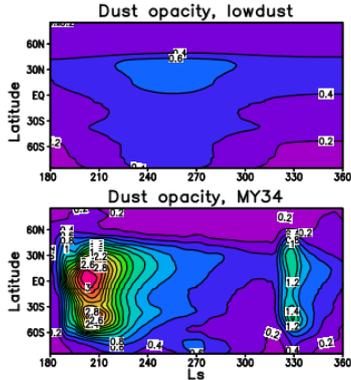


Fig. 1: Seasonal-latitude cross-sections of dust opacity implemented into the T106 MGCM, for “low-dust” (top, in Kuroda et al., 2019) and “MY34” (bottom, in Kuroda et al., 2020, data from Montabone et al., 2020) scenarios.

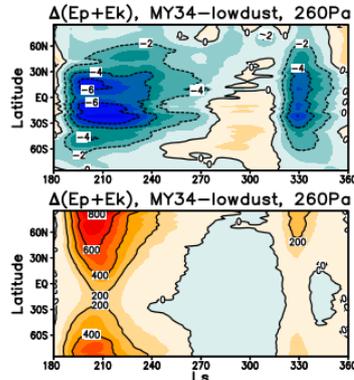


Fig.2: Seasonal-latitude cross-sections of the differences of the sum of potential and kinetic energy per unit mass by gravity waves ($s=61-106$) between “MY34” and “low-dust” scenarios in the T106 MGCM, for 260Pa (~ 5 km, top) and 0.1Pa (~ 70 km, bottom) altitudes.

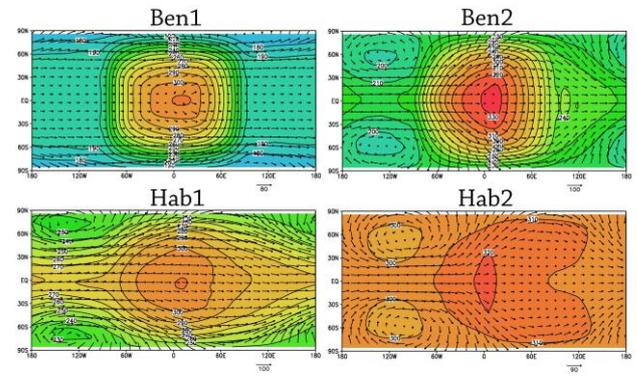


Fig. 3: Horizontal distributions of preliminary simulated surface temperatures and 250Pa winds for N₂ land (“Ben1”, left top), CO₂ land (“Ben2”, right top), N₂ aqua (“Hab1”, left bottom) and CO₂ aqua (“Hab2”, right bottom) settings of tidally-locked TRAPPIST-1e, as defined in Faucher et al. (2020a), by MIROC. Surface pressures of all simulations are set to 1 bar. The sub-solar point for all simulations is the center of the figure (0° longitude on equator).

4. まとめと今後の展望

DRAMATIC MGCM はここで示した結果からも火星 GCM としての信頼性の高さが実証されており、T106 計算は全球ダストストーム時に地上望遠鏡から観測された強い東風ジェットの科学的解釈、表層に見られる RSL (Recurring Slope Lineae)からの水蒸気放出の観測可能性の検証などに用いられて、それぞれ投稿論文準備中の段階である。また本報告書では詳細は割愛したが、MIROC を用いた火星古気候の地表流量推定、金星大気雲・化学シミュレーション、NICAM を用いたエアロゾル分布予測とその火星等への適用などのトピックについてもそれぞれ研究は進行中で、特に金星大気シミュレーションは CHASER をベースにした化学過程の導入にも着手しており、来年度以降の成果創出が期待される。

参考文献

- (1) Kuroda et al., 2020: Gravity wave activity in the atmosphere of Mars during the 2018 global dust storm: simulations with a high-resolution model. *J. Geophys. Res. Planets*, 125, e2020JE006556.
- (2) Kuroda et al., 2015: A global view of gravity waves in the Martian atmosphere inferred from a high-resolution general circulation model. *Geophys. Res. Lett.*, 42, 9213–9222.
- (3) Kuroda et al., 2016: Global distribution of gravity wave sources and fields in the Martian atmosphere during equinox and solstice inferred from a high-resolution general circulation model. *J. Atmos. Sci.*, 73, 4895–4909.
- (4) Heavens et al., 2020: A multiannual record of gravity wave activity in Mars’s lower atmosphere from on-planet observations by the Mars Climate Sounder. *Icarus*, 341, 113630.
- (5) Montabone et al., 2020: Martian year 34 column dust climatology from Mars Climate Sounder observations: Reconstructed maps and model simulations. *J. Geophys. Res. Planets*, 125, e2019JE006111.
- (6) Kuroda et al., 2019: Annual cycle of gravity wave activity derived from a high-resolution Martian general circulation model. *J. Geophys. Res. Planets*, 124, 1618–1632.
- (7) Wolf, 2017: Assessing the habitability of the TRAPPIST-1 system using a 3D climate model. *Astrophys. J. Lett.*, 839, L1
- (8) Turbet et al., 2018: Modeling climate diversity, tidal dynamics and the fate of volatiles on TRAPPIST-1 planets. *Astron. Astrophys.*, 612, A86.
- (9) Faucher et al., 2020a: TRAPPIST-1 Habitable Atmosphere Intercomparison (THAI): motivations and protocol version 1.0. *Geosci. Model Dev.*, 13, 707–716.
- (10) Turbet et al., 2020: TRAPPIST Habitable Atmosphere Intercomparison (THAI) Benchmark cases Ben1 and Ben2. THAI Workshop. <https://www.youtube.com/watch?v=B8a2-G8NmMA>
- (11) Faucher et al., 2020b: TRAPPIST Habitable Atmosphere Intercomparison (THAI) Habitable cases Hab1 and Hab2. THAI Workshop. https://www.youtube.com/watch?v=kYLbp_BrJFs

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, 東大・大気海洋研, E-mail: tsutsumi(at)aori.u-tokyo.ac.jp
Sachihiko Itoh, Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo
Eisuke Tsutsumi, Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo

要旨

三陸の沿岸-沖合移行領域の環境と流動場に見られるサブメソスケール構造を対象として、数値シミュレーションを実施した。津軽暖流がジャイアを形成する秋季について、気候値的なメソスケール流動場を与え数値実験を行った結果、津軽暖流-親潮前線域で現場観測結果と整合的なサブメソスケール構造が再現された。サブメソスケール構造は、津軽暖流・親潮および黒潮によるメソスケール場の密度前線変形に起因して発達する他、津軽暖流と沿岸地形・海底地形間の相互作用によって生じている可能性が示唆された。

1. はじめに

日本は EEZ 内に河川と複雑な海岸地形で特徴付けられる多様な沿岸域を有する一方で、その沖合には黒潮や親潮、対馬暖流、宗谷暖流といった特徴的な海流が流れる。沿岸と沖合の間には環境の勾配が大きい「移行帯」が形成され、物質交換と生物生産、生物多様性のホットスポットとなっている。このような沿岸-沖合移行帯の代表例として三陸の海域が挙げられる。三陸の海域を流れる津軽暖流は、沖合の親潮との間に前線を成し、海域の漁場形成に深く関与することが古くから知られているが、三陸移行帯では近年、サブメソスケール（海洋において 10 km 以下のスケール）流動が生態系に重要な役割を果たしている可能性が現場観測から示唆されている。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フロントを見出し、それに関連した鉛直混合強化機構と生態系への影響を提案した (Itoh et al. 2016)。また、申請者らが 2018~2019 年の新青丸航海 (KS-18-8, KS-19-4, KS-19-7, KS-19-20) によって季節毎の観測を実施した結果、三陸移行帯では水塊・流動の場に著しい季節変動が存在する一方で、夏季から秋季にかけて顕著なサブメソスケール変動が生じていた。これら一連の観測から、サブメソスケールの前線や渦構造が三陸移行帯域における物質輸送や生物生産に寄与している可能性が推察されるが、三陸海域のサブメソスケール構造の全容とその発生メカニズムには不明点が多い。そこで本研究では、三陸の沿岸-外洋移行帯域におけるサブメソスケール流動場の実態と機構、およびその物質輸送・生態系への影響を明らかにするために、船舶による現場観測と有機的に連携した数値実験を行う。その第一段階として本年度は、津軽暖流の勢力が最大となり津軽ジャイアを形成する秋季の津軽暖流を対象とした流動場の数値実験を実施し、その気候値的なサブメソスケール構造場を明らかにする。

2. 問題設定・方法

海洋循環モデル MITgcm (Massachusetts Institute of Technology General Circulation Model, Marshall et al. 1997) を用い、津軽海峡から三陸にかけての津軽暖流域を対象とした流動場の数値シミュレーション（静水圧近似）を行った。計算領域を $38^{\circ} 30' - 43^{\circ} 00' N$, $139^{\circ} 45' - 145^{\circ} 00' E$ とし、津軽暖流-親潮境界域で特徴的に現れる微細な流動場 (Itoh et al. 2016) を解像するため、格子幅を $39^{\circ} 15' - 42^{\circ} 00' N$, $141^{\circ} 15' - 143^{\circ} 30' E$ の領域で 300 m に高解像度化し、その外側では開境界での格子幅 1.5 km へ徐々に拡張した。鉛直格子幅は、表層 200 m では 3 m、それ以深では徐々に拡張し最下層で 690 m とした（計 170 層）。鉛直拡散・粘性係数はともに背景の値を $1 \times 10^{-5} m^2 s^{-1}$ とし、不安定等によって鉛直的に密度逆転が生じた層ではその値が 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 $1 m^2 s^{-1}$ とした。初期条件は北西太平洋海洋長期再解析 FORA-WNP30 (Usui et al. 2017) の水温・塩分・流速・海面高度の 9 月の気候値をモデルの格子へ補間して与え、開境界における水温・塩分・流速・海面高度を同気候値に強制的に緩和しモデルを駆動した（潮汐無し実験）。これに加え、開境界から潮汐モデル TPXO8-atlas (Egbert & Erofeeva 2002) の半日周期 (M_2) 順圧潮汐流で駆動する実験（潮汐有り実験）も実施した。なお、海面からの強制（風応力、熱・淡水フラックス）は与えていない。

3. 結果と考察

図 1a, b に潮汐無し実験結果の海面水温と海面相対渦度の分布を示す。計算された三陸沖の流動場には、ジャイア状の津軽暖流と北上する黒潮の間に北東から親潮が差し込む様子が見られる（図 1a）。この親潮は、北緯 40 度周辺で三陸沿岸に接岸するとともに南北に分岐し三陸沿岸に広く波及していた。申請者らが岩手県洋野町（北緯 40 度 25 分周辺）で漁業者の協力を得て実施している水温・塩分の年間を通じたモニタリング調査では、このような親潮系水塊の沿岸波及が 9 月から 10 月にかけて明瞭に捉えられている。加えて、数値モデル結果には三陸沖陸棚斜面域周辺の津軽暖流・親潮前線域の亜表層において 3 次元的なフィラメント構造が見られたが（図は省略）、同様の構造は 2020 年 10 月に申請者らが新青丸 KS-20-15 leg1 航海で実施した曳航式 CTD 観測でも捉えられており、本数値モデルが三陸移行帯域で観測されている流動と海洋構造の特徴を一定程度再現していることが確認された。サブメソスケール構造に関して、津軽ジャイアの縁に沿って顕著な前線構造が生じている様子が見られた（図 1b）。その外縁では、正の渦度が卓越しフィラメント構造が明瞭である一方で、内縁側では負の渦度が顕著であった。特に津軽暖流が地形と相互作用を生じる尻屋崎沖や襟裳岬沖では $\zeta/f < -1$ となるような負の渦度が生じる一方で、centrifugal instability と推測される不安定に起因した鉛直粘性・拡散の強化によって急速に渦度の消散が生じていた。また、三陸に接岸し

た親潮が南方へ分岐した後も境界部で $\zeta f < -1$ となる負の渦度が生じる様子が見られた。潮汐有り実験では、流れ-地形間相互作用に起因した負の渦度の生成に潮流による変調が見られたものの、サブメソスケール構造の特徴は潮汐無し実験と概ね同様であった。

4. まとめと今後の展望

秋季の三陸沿岸-外洋移行帯域のサブメソスケール構造を解像する数値実験を実施した。本モデルは、秋季の三陸移行帯域の現実的なメソ・サブメソスケール構造の特徴を再現することが確認された。サブメソスケール構造は、津軽暖流・親潮および黒潮のメソスケールの場の密度前線に起因して発達するとともに、津軽暖流と沿岸・海底地形との相互作用によっても生じている可能性が示唆された。これらのサブメソスケール構造の生成・消散は格子幅および格子スケールの粘性・拡散の取り扱いに依存すると考えられるため、今後それに関する感度実験を行う必要がある。それに加え、今後は詳細なサブメソスケール生成メカニズムを明らかにするとともに、他季節における計算を実施し、年間を通じた三陸移行帯域のサブメソスケール流動場の特徴と機構を調べていく。

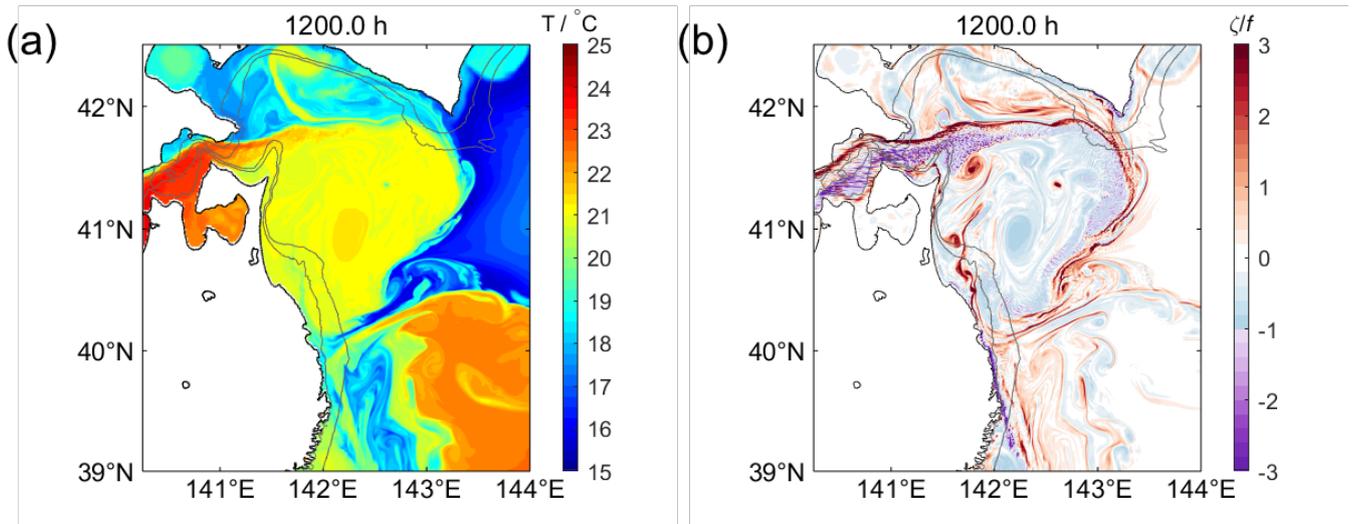


Fig. 1 潮汐無し実験結果の (a) 水温、(b) 慣性周波数 f で規格化した相対渦度の鉛直成分 ζ の最表層 ($z = -1.5$ m) におけるスナップショット ($t = 1200$ h)。黒線は海岸線 ($H = 0$ m) を示し、灰線は 100 m と 200 m の等深線を表す。

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. 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>.
3. Klymak, J. M., and S. M. Legg, 2010, A simple mixing scheme for models that resolve breaking internal waves. *Ocean Modelling*, 33(3–4), 224–234. <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2010.02.005>.
4. Usui, T. Y., and Coauthors, 2017, Four-dimensional variational ocean reanalysis: A 30-year high-resolution dataset in the western North Pacific (FORA-WNP30). *Journal of Oceanography*, 73, 205–233, <https://doi.org/10.1007/s10872-016-0398-5>.
5. Egbert, G. D., and S. Y. Erofeeva, 2002, Efficient inverse modeling of barotropic ocean tides. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 19, 183–204, [https://doi.org/10.1175/1520-0426\(2002\)019<0183:EIMOBO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0426(2002)019<0183:EIMOBO>2.0.CO;2).

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

現実的な金星大気大循環モデル(Yamamoto et al. 2021)では、「金星大気大循環, 潮汐波および定在波の構造」と「波の活動度, 渦熱フラックスおよび運動量フラックス」の地方時分布および地理分布を明らかにした。厚い雲で覆われた惑星の大気大循環の力学に関しては(Tsunoda et al. 2021), 惑星半径や自転を変えた実験に基づいて, 1 よりも高いロスビー数の大気大循環および惑星スケール波動の変動をエネルギー変換の観点から議論した。

1. はじめに

近年様々な惑星探査が行われている中, 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, これまで同様,

- (1) 金星放射伝達と地形を組み込んだ大気大循環モデルを用いて, 温度および大循環構造を Venus Express やあかつきの観測結果と比較する。
- (2) 金星下層大気で生じた擾乱が, 中層大気スーパーローテーションに及ぼす役割を明らかにする。
- (3) 惑星大気の大循環パターンについて, 自転と惑星半径を変えた理想化大気大循環モデル実験の解析を行い, ロスビー数と水平拡散係数に対する大気大循環の依存性を整理する。

と定めて, 本年度の研究を進めた。

2. 問題設定・方法

現実的な大気大循環モデル(上記の研究目的1と2)に関しては, Ikeda(2011)が東京大学大気海洋研究所で開発した放射伝達コードと地形を組み込んだ金星 GCM を T63L52 で計算し, 太陽座標と地理座標から見た「金星大気大循環および波動」について整理した。

上記の研究目的(3)に関連した「雲で覆われた惑星大気の大循環構造」に関して, 自転と惑星半径を変えた理想化大気大循環モデル実験を行い, 大気大循環構造, 熱・運動量輸送過程およびその変動の相似性を調査した。また, Global Weather Research and Forecasting モデルを用いて, Smagorinsky 2D モデルが地球型惑星対流圏の大気大循環構造に与える影響についても調査した。

3. 結果

3. 1. 放射コードを導入した金星大気大循環モデルから推測される金星大気大循環, 潮汐波および定在波について

金星放射伝達(Ikeda 2011)と地形を組み込んだ T63 の大気大循環モデルで, 大気大循環および波動の地理依存性と地方時依存性を明らかにした。昨年度の帯状平均場の解析に加え, 本年度は, 放射伝達によって強制される熱潮汐波や細かい地形で強制される定在波の三次元構造と熱・運動量フラックスを解析し, Venus Express やあかつきの観測と比較した。現実的な金星大気大循環モデルでは, 雲頂の赤道超回転は, 熱潮汐波の赤道向き水平運動量フラックスと鉛直運動量フラックスの両者によって駆動する。波動の活動度(気象要素の分散値)および運動量フラックスの地形依存性と地方時依存性は, 静的安定度が高く太陽光加熱が強い雲頂で, 顕著にみられる。雲頂の低緯度では夜から明け方で相対的に波の活動度が高く, 赤道鉛直流の分散は高地の上で相対的に高い値をもつ。また, 擾乱の熱および運動量フラックスの地方時依存性が強く, 雲頂の雲追跡から帯状平均フラックスを見積もるには注意が必要である。昨年度の成果(大気大循環と長周期波動の地理および地方時分布)と合わせて, 論文としてまとめた(Yamamoto et al., 2021 Icarus)。

上記 GCM の短周期擾乱の解析も行った。高度 69 km および高度 50 km で, 数日から 10 日のという比較的短い期間で大きく振幅が変動している。高度 69 km の赤道帯状風の短周期擾乱の強さの変化は, 極向き熱輸送を伴うロスビー波の南北非対称や振幅変調が関与している可能性が示唆された。また, 鉛直流において弓状の細かい雲模様(高度 69 km)と筋状構造(高度 50 km)が見られた。高度 69 km では, 赤道鉛直流について, 地形によって短周期擾乱が定在する構造が見られる。高度 50 km の帯状風について, 7.5 日赤道ケルビン波による赤道ジェットが再現された。しかしながら, モデルの帯状平均風速が弱いことを反映して, 7.5 日周期は観測値(～5.5 日)より長い(広瀬他, 九大応力研研究集会「地球流体における波動と対流現象の力学」)。

3. 2. 惑星の自転と半径を変えた理想化大気大循環モデル実験

雲で覆われた惑星大気の大循環構造に関して, エクマン数と無次元熱時定数を変えずに, 惑星半径と自転速度を同じ割合で変化させた実験(3, 8, 15 倍)を行い, 高ロスビー数の大気大循環構造および熱・運動量輸送過程やその変動の相似性を調査した。今年度は, 傾圧および順圧エネルギー変換率を算出し, どの擾乱が Gierasch メカニズムに寄与するのか? を明らかにした。高ロス

ビー数では、間欠的に傾圧波が帯状流を弱め、その後、帯状流が回復した時に順圧波が強い傾向が見られる。低ロスビー数の大気大循環では、強いジェットが形成される極域で傾圧不安定が起こるが、全球で平均すると超回転への寄与は小さく、全球的には順圧波が顕著であった。昨年度の成果（帯状流と運動量輸送と熱輸送のロスビー数依存性と相似構造）と合わせて、論文としてまとめた(Tsunoda et al., 2021 JGR).

地球型惑星対流圏大気大循環では、惑星半径が小さい($Ro \sim 1$)と、西風ジェットが極域で形成され、そのジェットが高緯度でよりサブグリッドスケール水平拡散の影響を受けやすい（東西波数 0 や 1 のレイノルズ数が極域で小さくなるため）。ロスビー数が 1 よりも大きい金星やタイタンでは、極域で発達したジェットがサブグリッドスケール水平拡散の影響を受けやすいことが示唆された(Lu and Yamamoto 2020 PSS, 盧・山本, 日本流体力学会年会 2020)。ロスビー数が 1 を超える大気大循環の長周期変動を調べたところ、サブグリッドスケール水平拡散は、変動周期や構造にも大きく影響を与えることが示された（太田・山本, 九大応力研研究集会「地球流体における波動と対流現象の力学」）。

4. まとめと今後の課題

現実的な金星大気大循環モデルでは、太陽座標と地理座標から見た「金星大気大循環、潮汐波および定在波の構造」を明らかにした。今後、短周期擾乱の構造や運動量・熱フラックスを詳しく調査しなければならない。また、帯状流の変動とそれに伴う波動構造も明らかにしなければならない。

厚い雲で覆われた惑星の大気大循環の力学に関しては、昨年度に引き続き、惑星半径や自転を変えた実験に基づいて、1 よりも高いロスビー数の大気大循環構造、熱・運動量輸送過程およびその変動の相似性を整理した。さらに、波と平均場のエネルギー変換の解析に基づき、惑星日より短い周期の擾乱および大気大循環の変動を明らかにした。また、地球型惑星対流圏大気大循環の惑星半径依存性や水平拡散依存性も整理した。ロスビー数のみならず、サブグリッドスケール水平拡散から算出したレイノルズ数を用いて、なぜ高いロスビー数で極域ジェットが水平拡散の影響を受けやすいのか？について議論した。今後、長周期変動のロスビー数依存性についても調査しなければならない。

参考文献

- (1) Ikeda 2011: Development of radiative transfer model for Venus atmosphere and simulation of superrotation using a general circulation model, Ph.D. thesis, The University of Tokyo, Japan
- (2) Lu, L., & Yamamoto, M. 2020: Planetary-size dependence of zonal jets: Effects of horizontal diffusion in an idealized Earth-like general circulation model. *Planetary and Space Science*, 190, 104976. <https://doi.org/10.1016/j.pss.2020.104976>
- (3) Tsunoda, Y., Yamamoto, M., & Takahashi, M. 2021: Rossby number dependence of Venus/Titan - type superrotation and its related intermittency. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 126, e2020JE006637. <https://doi.org/10.1029/2020JE006637>
- (4) 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, 114154. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2020.114154>

対流自己組織化における大規模強制力の役割

The role of an imposed large-scale forcing on convective self-aggregation

洪 竟書, 東大院・理学系研究科, E-mail: hungchingshu(at)eps.s.u-tokyo.ac.jp

三浦 裕亮, 東大院・理学系研究科, E-mail: h_miura(at)eps.s.u-tokyo.ac.jp

Ching-Shu Hung, Graduate School of Science, The University of Tokyo

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

Abstract

The role of an imposed large-scale forcing on convective structures and self-aggregation is investigated in a three-dimensional cloud resolving model. Under large-scale upward motion, convective cloud systems become larger and stronger, while self-aggregation becomes hard to occur. Our result suggests that the boundary between scattered and aggregated state is very sensitive to the existence of large-scale motion.

1. Introduction

Radiative-convective equilibrium (RCE) is the statistical equilibrium state that the atmosphere and surface would reach in the absence of lateral energy transport, in which net radiative cooling is balanced by convective heating and surface sensible heat flux. It has been used as a simple idealization of the tropical climate in numerical modeling since 1960s. Recently, a unique feature known as convective self-aggregation (CSA) has been widely observed in RCE-type simulations by cloud-resolving models without prescribed wind shear or rotation. Initially scattered convections tend to organize into one or more spatially coherent clusters even under homogeneous boundary conditions and forcing. This instability of the RCE state arises due to interactions among convection, radiation, environmental moisture, and surface fluxes. In contrast to the RCE state that has no net vertical mass flux, tropical atmosphere is characterized by regimes of net vertical motion, which are often found in associated with convective activities. Large-scale motion acts to offset the thermodynamic imbalance between precipitation and radiation and modulates convective structures significantly. The goal of this study is to investigate how atmosphere in RCE will respond to upward motion associated with certain large-scale disturbance such as the Madden-Julien Oscillation (MJO) and how the behavior self-aggregation will change under large-scale forcing.

2. Model and simulation design

The cloud-resolving model used in this study is a regional atmospheric model constructed with Scalable Computing for Advanced Library and Environment (SCALE-RM Version 5.3.6; Nishizawa et al., 2015). The control experiments in RCE state follow the RCE_small configuration proposed in Wing et al. (2018), and the effects of large-scale motions are implemented into the RCE system using the method proposed by Warren et al. (2020). First, a time-invariant large-scale vertical velocity (W_{LS}) is specified through their eq. (4), where Z_{top} is the tropopause height and Z_{max} is the height of the maximum of vertical velocity (W_{max}). Then, the associated large-scale vertical advection is calculated using the model mean vertical potential temperature and water vapor gradients as in their eq. (2) and (3). To consider the increase of total mass from adding moisture, the term in equation (3) is also added into the continuity equation. Last, the same profiles of advective tendency are applied to the entire domain. Horizontal advection is not considered here, and vertical advection of momentum and liquid and ice condensate are also neglected.

In current study, simulations were performed with an SST of 300 K for W_{max} values of 1 cm/s, with Z_{top} and Z_{max} set to 15 km and 10 km respectively. These values were chosen to provide a reasonable match to monthly mean W_{LS} profiles during the TOGA-COARE, TWP-ICE, and DYNAMO field campaigns. A series of simulation with different horizontal resolution and domain size are performed to investigate the role of large-scale motion on both scattered and aggregated state. Several sensitivity experiments are also carried out, and the detail will be discussed in the result section.

3. Results

The role of an imposed large-scale forcing on convective structures and self-aggregation is investigated by comparing the RCE control runs and their counterparts with large-scale forcing.

When large-scale upward motion is imposed, lower to middle troposphere becomes moister and warmer, while upper troposphere is drier and colder. To balance the moistening and adiabatic cooling from large-scale forcing, an equilibrium state of stronger precipitation and lower outgoing longwave radiation (OLR) are reached, and more liquid and ice water contents are produced. Domain-mean cloud fraction increases significantly in upper troposphere.

A cloud-partitioning algorithm developed by Tulich et al. (2007) is applied here. This method classifies grid

columns into three categories, i.e., shallow convective, deep convective, and stratiform, based on the maximum of vertical velocity, cloud-height, and cloud condensate path integrated over different levels. In the forced runs, cloud coverage of each cloud type is increased, and the area covering by deep convective objects is doubled. Convective cloud systems also become stronger and have larger size. On the other hand, as discussed in section 3.a, more ice clouds are generated in the forced runs. Those optically thicker and widely spreading high clouds change the distribution of longwave radiation and further modify the radiative driven circulations. The longwave radiative cooling near the top of boundary layer is weakened significantly in the anvil cloud region of the forced runs. The longwave radiative cooling near the top of boundary layer is considered as an important process that drives the shallow circulation between dry and moist region.

The dry patch fraction is used as an index to measure the degree of self-aggregation following Yanase et al. (2020). The result shows that dry patches are hard to maintain and expand under large-scale upward motion (Fig. 1). For all forced run, no distinct contrast between dry and moist area can be sustained when equilibrium is reached. As have been discussed in many previous research, the expansion of dry area is due to the subsidence driven by radiative cooling. However, in the forced runs, the moistening from large-scale upward motion outweighs the drying from radiative cooling (Fig. 2). Dry patches are then hard to maintain and expand. A sensitivity experiment with W_{LS} setting to 0.5 cm/s is carried out to test this reasoning. When the large-scale upward motion is halved, dry patches are able to sustain and expand. Another possible reason that self-aggregation is hard to occur under large-scale circulation is the weakening of longwave radiative cooling near the top of boundary layer over the anvil cloud region. The longwave radiative cooling near the top of boundary layer is considered as an important process that drives the shallow circulation between dry and moist region.

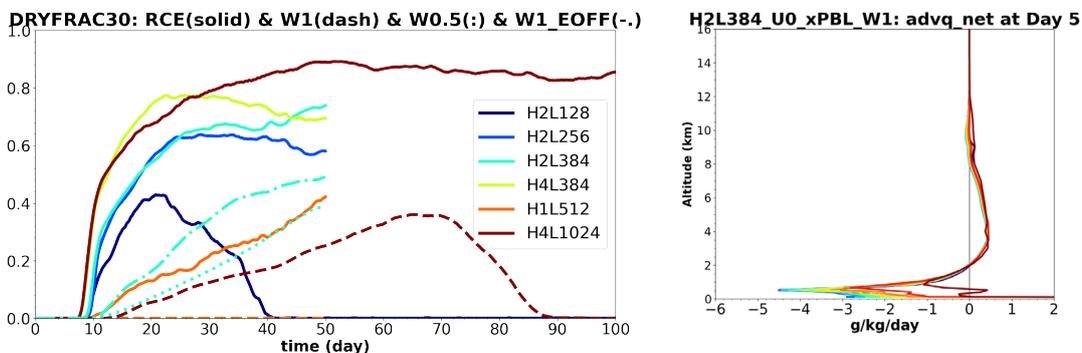


Fig. 1 (left): time evolution of dry patch fraction (area where PW is lower than 30mm)

Fig. 2 (right): vertical profile of net moistening between large-scale moistening and drying by radiative subsidence

4. Conclusion and discussion

In this study, the role of an imposed large-scale forcing on convective structures and self-aggregation is investigated in a three-dimensional cloud resolving model. Under large-scale upward motion, domain-mean precipitation in equilibrium is increased to balance the moistening and adiabatic cooling from large-scale forcing. Convective cloud systems also become stronger and have larger size. Widely spreading high clouds with larger optical depth is observed in the forced runs. Those optically thicker and widely spreading high clouds change the distribution of longwave radiation and further modify the radiative driven circulations.

Self-aggregation is difficult to occur when large-scale upward motion is imposed. The moistening from large-scale forcing outweighs the drying from radiative cooling. Dry patches are then hard to maintain and expand. The smaller longwave radiative cooling near the top of boundary layer also weakens the shallow circulation between dry and moist region. Our results show that the boundary between scattered and aggregated state is very sensitive to the existence of large-scale motion. Even a weak upward motion can change the behavior of self-aggregation significantly.

Reference

- (1) Nishizawa, S., Yashiro, H., Sato, Y., Miyamoto, Y., & Tomita, H., 2015: Influence of grid aspect ratio on planetary boundary layer turbulence in large-eddy simulations. *Geoscientific Model Development*, 8(10), 3393-3419.
- (2) Warren, R. A., M. S. Singh, and C. Jakob, 2020: Simulations of radiative-convective-dynamical equilibrium. *J. Adv. Model. Earth Syst.*, 12, e2019MS001734.
- (3) Wing, A. A., Reed, K. A., Satoh, M., Stevens, B., Bony, S., & Ohno, T, 2018: Radiative - Convective Equilibrium Model Intercomparison Project. *Geoscientific Model Development*, 11, 793-813.
- (4) Yanase, T., Nishizawa, S., Miura, H., Takemi, T., & Tomita, H., 2020: New critical length for the onset of self-aggregation of moist convection. *Geophysical Research Letters*, 47, e2020GL088763.

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
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

要旨

温室効果ガス観測技術衛星 2 号 GOSAT-2 は、主要な温室効果ガスである二酸化炭素 (CO₂) およびメタン等の時空間分布を観測するために 2018 年に打ち上げられた。本課題では、GOSAT-2 から得られた最初期版 CO₂ 気柱平均濃度データを使用した全球 CO₂ 吸排出量分布の推定を行い、その結果を他の推定結果等と比較する。解析結果から、現状の GOSAT-2 濃度データには導出過程において更なる改良が必要であることが判明するが、データ質の向上を図ることで、全球炭素収支推定に向けた有効な観測データとしての活用が期待される。

1. はじめに

産業革命以降、二酸化炭素 (CO₂)、メタン (CH₄)、一酸化二窒素等の大気中の温室効果ガス濃度は急速に増加し、また、現在も増加を続けている (WMO Greenhouse Gas Bulletin, 2020)。これらの温室効果ガスの増加が要因となって引き起こされる気候変動は、人間社会活動、陸域および海洋の生態系に多大な悪影響を及ぼすため、気候変動に関する国際連合枠組条約の下、世界各国が温室効果ガスの排出量を削減し、大気中の温室効果ガス濃度の安定化に向けた取り組みを実施している。また、温室効果ガスの濃度変動を監視するべく、各国の協力により全球規模での観測ネットワーク (e.g., Toon et al., 2009) や、また、観測データを公開するためのネットワーク (e.g., WMO WDCGG, 2020) が構築されている。

これらの背景を踏まえ、温室効果ガスの亜大陸スケールでの吸収・排出量の推定精度を高め、地域ごとの吸収・排出状況の把握や森林炭素収支の評価などの環境行政に貢献することを目指し、2009 年に温室効果ガス観測技術衛星 GOSAT が打ち上げられた。GOSAT は全球の CO₂ および CH₄ 濃度分布 (気柱平均濃度) を地上約 666 km 上空から観測する。2018 年 10 月には、GOSAT の後継機に当たる温室効果ガス観測技術衛星 2 号 GOSAT-2 が打ち上げられた。現在は GOSAT および GOSAT-2 による宇宙からの温室効果ガス観測が継続されている。これらの衛星観測データに基づき全球の炭素収支の時空間変動を評価するためには、ある初期条件を与えて大気濃度場をモデルシミュレーションし、観測と推定値との誤差が最小となるような最適な吸排出量を推定することになる。この一連の作業の中心を担うのが大気輸送モデルを中心とする各種モデルである。今年度、本課題は GOSAT-2 観測から得られた最初期版 CO₂ 気柱平均濃度データをもとに全球の CO₂ 吸排出量分布を推定し、その結果を他の推定結果と比較することで、今後取り組む必要がある課題について考察する。

2. 問題設定・方法

観測データには、GOSAT-2 に搭載されたフーリエ変換分光計 TANSO-FTS-2 センサによって観測された太陽光の地表面散乱光の輝度スペクトルのうち、短波長赤外域 3 バンドから導出した CO₂ 気柱平均濃度データ (吉田, 2019; V01.04) を使用した。観測データの対象期間は 2019 年 3 月から 2020 年 2 月までの 1 年間とする。また、GOSAT に搭載された TANSO-FTS によって観測された短波長赤外域 3 バンドから導出した CO₂ 気柱平均濃度データ (V02.95) を比較データとして使用する。

大気輸送モデルおよび逆解法には NICAM-TM 4D-Var (Niwa et al., 2017) を使用した。本課題では NICAM-TM 4D-Var を水平解像度 Glevel 5 (約 220 km)、鉛直 40 層、時間解像度 20 分で運用した。NICAM-TM 4D-Var の計算処理では、初めに気象庁再解析データ JRA-55 (Kobayashi et al., 2015) の水平風速をナッジングに用いたオンライン計算で全球の気象場を再現し、その気象場データを使用したオフライン計算で吸排出量の事後フラックスを推定した。吸排出量の事前フラックスには化石燃料起源排出量 (Oda et al., 2018)、陸域生態系の光合成による吸収量、呼吸量、その他の残渣項 (Ito, 2019)、森林火災排出量 (Shiraiishi and Hirata, 2021)、海洋による吸排出量 (Iida et al., 2020) を使用した。

モデルの動作確認および比較データとして、GOSAT プロジェクトが公開する全球 CO₂ 吸排出量プロダクト (Maksyutov et al., 2013) を使用する。このプロダクトは GOSAT CO₂ 気柱平均濃度データおよび地上観測データに基づいた吸排出量推定値である。

3. 結果と考察

モデル実験を行うに当たり、モデルシステムの動作について確認テストを実施した。このテストでは、GOSAT 全球 CO₂ 吸排出量プロダクト作成に使用する観測データおよび事前フラックスを用いて、NICAM-TM 4D-Var を使用して月別全球 CO₂ 吸排出量を推定し、その結果を GOSAT 全球 CO₂ 吸排出量プロダクトと比較した。解析期間は 2009 年から 2019 年までの 11 年間である。解析の結果、全期間における全球 CO₂ 収支に関しては両者の差は 1-2% 以内の範囲に収まった。また、全球 CO₂ 吸排出量の空間分布は、ユーラシア大陸北方帯で吸収が大きく、アジア域や北米大陸では排出量大きくなる等、両者は類似した分布を示した。その一方で、年毎の全球 CO₂ 収支に着目すると、エルニーニョ現象の影響が顕著であった 2015 年から 2016 年にかけては、年間の

全球 CO₂ 収支で 0.5 Pg C yr⁻¹ 程度の違いが確認された。この違いは、観測データの入力方法、および対象とする濃度変動の解析対象期間の違いに起因するものと考えられる。GOSAT 全球 CO₂ 吸収排出量プロダクトでは、衛星データは 5 度格子毎の月平均値に、地上観測データは観測点毎に月平均値に変換したデータをモデルに入力し、且つ、前 3 か月分の濃度変動にフィットする最適な事後フラックスを算出する。一方、NICAM-TM 4D-Var を用いた計算では、生の観測データを平均化せずに入力し、解析対象全期間に相当する 11 年間の濃度変動にフィットする事後フラックスを算出した。これらの違いが、濃度分布の時空間変動が大きい 2015-2016 年において、事後フラックス推定結果に影響を及ぼしたと考えられる。

2019 年 3 月から 2020 年 2 月までの GOSAT-2 および GOSAT CO₂ 気柱平均濃度データを使用し、月毎の CO₂ 吸排出量を空間解像度 2.5 度で推定した。その結果を GOSAT 全球 CO₂ 吸収排出量プロダクトの全球 64 領域に再配分した結果を Fig. 1 に示す。GOSAT データを使用した事後フラックスは、GOSAT 全球 CO₂ 吸収排出量プロダクトに比べると北半球高緯度側で吸収量、および熱帯域での排出量が若干大きくなる傾向が見られるが、全球での吸排出量の空間分布およびフラックスは両者でおおむね一致している。一方で、GOSAT-2 データを使用した事後フラックスにはアフリカ中央西部や南米中央部に非常に大きな排出源が、逆にアフリカ南東部や北アメリカ南東部では非常に大きな吸収源が見られる。例えば、アフリカ中央西部およびアフリカ南東部の事後フラックスは、GOSAT データで推定した値は 1.74 および 0.17 g C m⁻² dy⁻¹ であるのに対し、GOSAT-2 データによる推定値は 2.78 および -4.16 g C m⁻² dy⁻¹ であった。この両者の顕著な違いの原因を調べるために、これらの事後フラックスを用いて大気 CO₂ 濃度場をシミュレーションし、独立した観測データとの比較を行った。その結果、現バージョンの GOSAT-2 CO₂ 気柱平均濃度データには全球に渡って時空間方向に不均一なバイアスが乗っていることが判明した。特にアフリカ大陸中央部では CO₂ 濃度が高めに、逆に南部では低めになることが確認された。現在は、このバイアスの原因を調査すると共に、CO₂ 気柱平均濃度データ導出過程の改良、検証、およびバイアス補正手法など、複数の観点からデータ質を高めるための作業が進行中である。

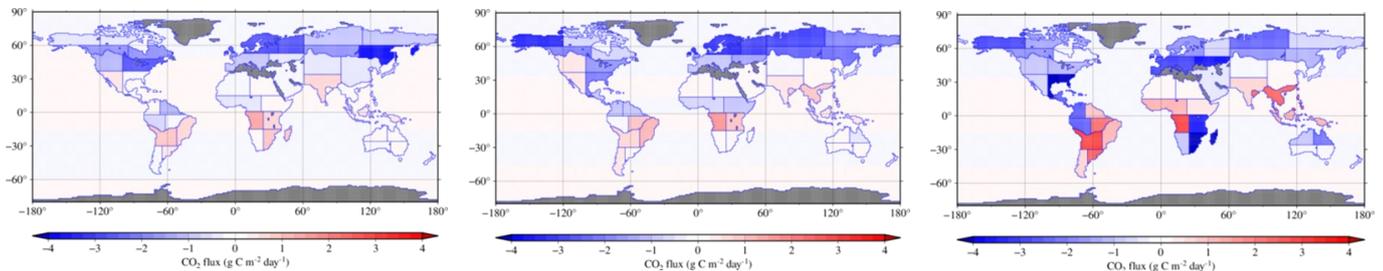


Fig. 1 Comparison of global CO₂ flux (g C m⁻² dy⁻¹) estimates in July 2019. Left panel shows GOSAT global CO₂ flux product, center and right panels show global CO₂ flux estimates using NICAM-TM 4D-Var with GOSAT and GOSAT-2 total column average dry-air mole fraction of CO₂ data.

4. まとめと今後の展望

事前フラックスの整備、モデルシステムの構築および動作試験を終え、本課題は最初期版 GOSAT-2 衛星観測データを使用した全球 CO₂ 吸排出量推定に着手した。現状の GOSAT-2 データには大きなバイアスが存在することが明らかになったが、導出手法の改良やバイアス補正等の作業に継続的に取り組み、データ質の向上を目指すとともに、次年度以降はそのデータを活用した全球 CO₂ および CH₄ 収支推定を実施し、全球炭素収支推定の精度を更に高めて行く予定である。

参考文献

- (1) WMO Greenhouse Gas Bulletin, 2020: The state of greenhouse gases in the atmosphere based on global observations through 2019.
- (2) Toon, G., J. Blavier, R. Washenfelder, D. Wunch, G. Keppel-Aleks, P. Wennberg, B. Connor, V. Sherlock, D. Griffith, N. Deutscher, and J. Notholt, 2009: Total Column Carbon Observing Network (TCCON). Fourier Transform Spectroscopy. Optical Society of America, JMA3.
- (3) WMO WDCGG, 2020: Data Summary No. 44. Japan Meteorological Agency. World Meteorological Organization, Tokyo, 1-95.
- (4) 吉田幸生, 2019: 解説 GOSAT-2 搭載温室効果ガス観測センサ 2 型 (TANSO-FTS-2) 短波長赤外レベル 2 処理概要. Journal of The Remote Sensing Society of Japan, 39 (1), 22-28.
- (5) Niwa, Y., H. Tomita, M. Satoh, R. Imasu, Y. Sawa, K. Tsuboi, H. Matsueda, T. Machida, M. Sasakawa, B. Belan, et al., 2017: A 4D-Var inversion system based on the icosahedral grid model (NICAM-TM 4D-Var v1. 0)-Part 1: Offline forward and adjoint transport models. Geoscientific Model Development, 10, 1157-1174.
- (6) Kobayashi, S., Ota, Y., Harada, Y., Ebata, A., Moriya, M., Onoda, H., Onogi, K., Kamahori, H., Kobayashi, C., Endo, H., et al., 2015: The JRA-55 reanalysis: General specifications and basic characteristics. Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II, 93, 5-48.
- (7) Oda, T., S. Maksyutov, and R. J. Andres, 2018: The Open-source Data Inventory for Anthropogenic CO₂, version 2016 (ODIAC2016): a global monthly fossil fuel CO₂ gridded emissions data product for tracer transport simulations and surface flux inversions. Earth System Science Data 10(1), 87-107.
- (8) Ito, A., 2019: Disequilibrium of terrestrial ecosystem CO₂ budget caused by disturbance-induced emissions and non-CO₂ carbon export flows: a global model assessment, Earth System Dynamics, 10, 685-709.
- (9) Shiraishi, T., and R. Hirata, 2021: Estimation of carbon dioxide emissions from the megafires of Australia in 2019-2020. Scientific reports, 11(1), 1-10.
- (10) Iida Y., Y. Takatani, A. Kojima, M. Ishii, 2020: Global trends of ocean CO₂ sink and ocean acidification: An observation-based reconstruction of surface ocean inorganic carbon variables. Journal of Oceanography, 77, 323-358.
- (11) Maksyutov, S., H. Takagi, V.K., Valsala, M. Saito, T. Oda, T. Saeki, D.A. Belikov, R. Saito, A. Ito, Y. Yoshida, and others, 2013: Regional CO₂ flux estimates for 2009-2010 based on GOSAT and ground-based CO₂ observations. Atmospheric Chemistry and Physics, 13, 9351-93

衛星降水レーダと静止衛星高頻度観測を組み合わせた

降水システムのライフサイクルに関する研究

A study on the life cycle of precipitation systems by a combined use of spaceborne precipitation radar and geostationary satellite infrared observations

濱田 篤, 富山大・学術研究部, E-mail: hamada@sus.u-toyama.ac.jp
安永 数明, 富山大・学術研究部, E-mail: yasunaga@sus.u-toyama.ac.jp
Atsushi Hamada, Faculty of Sustainable Design, University of Toyama
Kazuaki Yasunaga, Faculty of Sustainable Design, University of Toyama

要旨

将来気候変動の予測において雲や降水は大きな不確定要素となっているが、これは気候モデルが解像できる大規模場と実際に発生する雲・降水の関係性についての知見の不足によるところが大きい。そこで本研究課題では、静止衛星高頻度観測および衛星搭載降水レーダを用いて雲・降水システムを同定し、雲・降水システムの発生から終息までの一連の変化を統計的かつ時空間的に記述することを目的とした研究を行う。本年度は静止衛星高頻度観測による赤外輝度温度の時間変化と地上降雨の開始との関係に関する解析を行った。赤外輝度温度は地上降雨開始のおよそ 30 分前から下降し始めており、静止衛星高頻度観測によって地上降雨の開始が予測できる可能性が示された。また、輝度温度変化率の大小が、開始時の降雨強度と関係していることも見出された。

1. はじめに

温暖化による将来気候変動の予測において雲や降水は大きな不確定要素となっている。現行の気候モデルの殆どは、雲・降水に関わる物理過程を陽に解像せずパラメタ化して予測計算を行っている。しかし、気候モデルが解像できる大規模場と実際に発生する雲・降水の関係性について、観測に基づく知見が充分であるとは未だ言い難い。その大きな理由の一つは、雲・降水システムの発生から終息に至る一連の変化を、観測に基づいて、かつ全球的に、統計的・時空間的に記述する手段が得られなかったことである。全球的な観測を得るには地球観測衛星、特に静止気象衛星が不可欠となるが、これまでの静止衛星の観測時間間隔は 30 分～1 時間程度と長かったため、雲・降水システムの一生、特に発生初期を十分な時間分解能で追跡できなかった。しかし近年、数分～10 分程度の時間間隔での観測が現業的に得られるようになったことで、正確な追跡が行えると期待される。しかし静止衛星はその測器特性から雲・降水システムの内部構造を観測することができない。雲・降水システムの内部構造を全球的に観測できるのは、現在のところ全球降水観測計画 (Global Precipitation Measurement; GPM) 主衛星に搭載された 2 周波降水レーダ (Dual Precipitation Radar; DPR) だけである。しかし GPM 主衛星は周回衛星であるため、同じ降水システムを連続的に観測することができない。

そこで本研究課題では、GPM DPR による降水システムの瞬時的な立体観測と、静止気象衛星ひまわり 8 号による高頻度観測を相補的に用いて、雲・降水システムの発生から終息までの一連の変化を統計的かつ時空間的に記述することを目的とした研究を行う。

2. 問題設定・方法

ひまわり 8 号バンド 13 輝度温度 (空間分解能約 2 km、2.5 分毎) および気象庁全国合成レーダ (空間分解能約 1.4 km×0.9 km、10 分毎) を用いた。解析期間は日本域夏季陸上、2018 年 8 月である。ある注目点における地上での「降雨開始時刻」を、注目点における輝度温度および降雨強度が次の 4 つの条件を満たす時刻として定義する ; (1) 1 時間 30 分前から 10 分前までに降雨がない、(2) 10 分以上降雨が継続する、(3) 注目点の輝度温度が周囲 4 点の輝度温度より低い (極小点になっている)、(4) 1 時間 30 分前までの輝度温度の最高値が 270 K を上回る。抽出された降雨開始事例は 555 045 個であった。

3. 結果と考察

降雨開始事例の多くにおいて、降雨開始時刻以前の輝度温度が降雨開始の 1 時間以上前から低下していることが認められた。多数の事例を目視精査した結果、降雨開始以前の輝度温度の時間変化は、次の 4 通りの傾向を示すことが分かった。

- ・ パターン 1 : 降雨開始より 30 分以内に輝度温度が下がり始めるもの
- ・ パターン 2 : 降雨開始の 30 分以上前に大きく輝度温度が下がっているもの
- ・ パターン 3 : 降雨開始 30 分以内に輝度温度が下がり始めるが、変化が小さいもの
- ・ パターン 4 : 輝度温度が降雨開始前後を通して高く、かつほぼ変化しないもの

降雨開始事例を上記の 4 パターンに分類し、各パターンについて時刻毎の平均値と標準誤差を図 1 に示した。2018 年 8 月 27 日 05-06 JST の事例についての結果を示しており、横軸は降雨開始時刻を 0 とした相対時刻 (秒) である。4 パターンのうち、パターン 1 には孤立性降雨が含まれることがわかった。パターン 1 では輝度温度の低下が降雨開始の約 30 分前から見られる。この結果は、静止衛星高頻度観測によって地上降雨の開始が予測できる可能性を示している。

つぎに、降雨開始時点での地上降雨強度と、降雨開始以前の輝度温度との関係調べた。その結果、開始時点の降雨強度と、降雨開始以前の輝度温度時間変化率との間に正の相関関係が見出された。図2は、降雨開始10分前における輝度温度と輝度温度時間変化率の結合頻度分布を、強雨（開始時の降雨強度が5 mm/h以上）と弱雨（0.5~5 mm/h）の差として示したものである。輝度温度変化率0~-10 K/(2.5min)、輝度温度290~260 Kに正值域がみられる。これは、強雨事例の方が降雨開始以前の雲の発達速度が大きいことを示している。この正偏差域は降雨開始約20分前から見られ、地上降雨開始時点での降雨強度が、静止衛星高頻度観測によって予測できる可能性を示している。

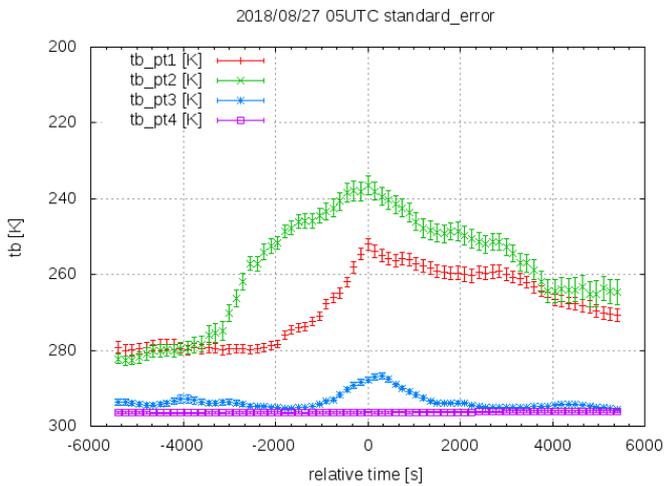


図1: 4パターンに分類した輝度温度時系列について、各時刻平均値と標準誤差を示した図。横軸は降雨開始時刻をゼロとした相対時間（秒）。赤：パターン1、緑：パターン2、青：パターン3、紫：パターン4。

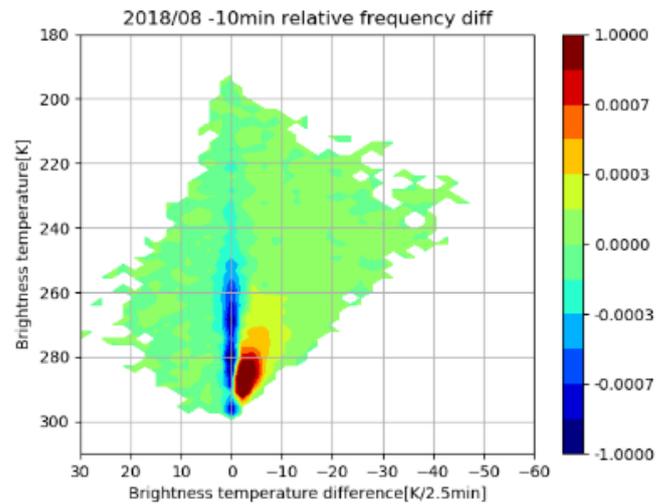


図2: 降雨開始10分前における、輝度温度と輝度温度変化率の結合頻度分布。降雨開始時の降雨強度が5 mm/h以上であった事例と0.5 mm/h以上5 mm/h未満であった事例についての、相対頻度の差を示している。縦軸は輝度温度（K）、横軸は輝度温度変化率（K/(2.5min)）を示す。

4. まとめと今後の展望

本年度は主に静止衛星高頻度観測による地上降雨開始予測可能性に焦点を当てた研究を行った。少なくとも孤立降雨事例については、降雨開始時刻だけでなく、開始時点での降雨強度が、静止衛星高頻度観測によって約10~30分前から予測できる可能性が示された。降雨開始前後の輝度温度時間変化は積乱雲の発達を良く捉えており、全球非静力学モデルのパフォーマンス検証や、気候モデルの積雲パラメタリゼーションの評価に役立つと期待される。

関連業績

- (1) 濱田 篤, 染谷 由樹, 安永 数明, 2021: 静止衛星高頻度観測を用いた降雨開始予測に関する統計的解析. 第23回 CEReS 環境リモートセンシングシンポジウム, オンライン開催, 2021年2月18日.
- (2) 染谷 由樹, 2020: 静止衛星高頻度観測を用いた降雨開始予測に関する統計的解析. 富山大学理学部 2019年度卒業論文, 42pp.
- (3) 川端 玲衣, 濱田 篤, 安永 数明, 2020: 衛星搭載降水レーダを用いた熱帯と中・高緯度における夏季降水特性の比較解析. 2020年度日本気象学会中部支部研究会, オンライン開催, 2020年12月15-16日.
- (4) 神谷 圭, 安永 数明, 濱田 篤, 2020: 熱帯海洋上の対流活動における大気成層とエアロゾルの影響. 2020年度日本気象学会中部支部研究会, オンライン開催, 2020年12月15-16日.

放射収支算定のための放射スキームの高速・高精度化

High-speed and high-accuracy radiation scheme for radiation budget calculation

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

要旨

MIROC に用いられている放射伝達モデル MstrnX の気体吸収過程の更新を行った。現在用いられている 29 バンド 111 チャンネルの気体吸収テーブルは波長 $4\mu\text{m}$ 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。そのため、新しい放射伝達モデルでは同じ波長でも太陽放射と地球放射を分けて扱うように変更を行った。また、この気体吸収テーブルは 4 倍増状態での誤差が大きいために指摘されているため、バンド分割をやり直し、様々な濃度での気体の吸収に対応できるように開発を行った。また、散乱過程において、非球形の鉱物性粒子として気象研究所が開発した Voronoi 粒子を導入した。Voronoi 粒子は観測される位相関数をよく再現しており、黄砂等の影響がより尤もらしく推定できると期待される。

1. はじめに

MIROC に用いられている放射伝達モデル MstrnX は気体吸収過程を 29 バンド 111 チャンネル版 (以下、温暖化対応版) が CMIP6 向けに採用されている。この気体吸収テーブルは二酸化炭素倍増状態やメタン、一酸化二窒素が増加した状態を再現するように最適化されており、二酸化炭素 4 倍増のケースで放射強制力の精度が不十分であることが指摘されている (1)。これを受けて、2017 年度に 29 バンド 147 チャンネルの二酸化炭素 4 倍増状態に対応した吸収テーブル (以下、4 倍増対応版) を作成したが、20 世紀の気温上昇の再現性が悪く、IPCC AR6 に提出する実験には採用されなかった。また、温暖化対応版は波長 $4\mu\text{m}$ で太陽放射領域と地球放射領域に分けて計算するように最適化を行っているため、波長 $4\mu\text{m}$ 前後で太陽放射と地球放射を同時に計算すると誤差が生じやすい。これらの問題を解決するため、バンドの波数範囲も新たに設定し直し、様々な濃度での気体の吸収に対応できる新しい気体吸収テーブルの開発を行った。

また、エアロゾルの中でも砂塵は球形でないことが知られている。そこで、散乱過程における鉱物性粒子の形状を非球形の Voronoi 粒子として仮定し、散乱パラメータを計算してテーブルに記載した。ここで、Voronoi 粒子とは気象研究所の石元博士らが開発した、黄砂観測時に採取したエアロゾルサンプルを参考に形状をモデル化したものである (2)。この粒子モデルを用いて散乱特性を計算したデータベース MRIDUST2 を MstrnX に導入する。これにより、より尤もらしい影響評価が可能になると考えられる。

2. 使用データ

吸収係数は HITRAN2012(3) を LBLRTM ver 12.7 を用いて、 H_2O , CO_2 , O_3 , N_2O , CH_4 , O_2 について計算した。吸収係数は気圧と気温に依存するため、気圧は $0.01 - 1050\text{hPa}$ の線型対数分割 (29 点)、気温は $150 - 330\text{K}$ の線型分割 (20 点) の格子点についてあらかじめ計算を行った。連続吸収帯は MT_CKD_3.2(4) を用いた。

Voronoi 粒子については、形状モデルの散乱特性を気象研オリジナルコードで計算したデータベース MRIDUST2 を用いた。MRIDUST2 では複素屈折率が実部 4 通り ($1.20, 1.35, 1.50, 1.60$)、虚部 5 通り ($1.0 \times 10^{-2}, 4.47 \times 10^{-2}, 2.0 \times 10^{-3}, 8.94 \times 10^{-3}, 4.0 \times 10^{-4}$) の 20 通り、サイズパラメータが $0.1 - 1000$ の 73 通り (線型対数分割)、について、消散係数、吸収係数と、位相関数について記載されており、散乱角の格子点は 112 点である。この複素屈折率の範囲は、波長 $0.2 - 18\mu\text{m}$ の土壌性粒子の複素屈折率を網羅している。Voronoi 粒子は 3 つの形状 (A, B, C) が、粒子サイズに依存する図 1 の比率で混合していると仮定している。図 2 に波長 $0.5\mu\text{m}$ 、等価体積半径 $1.0\mu\text{m}$ における 3 つの形状の位相関数を示す。単一の粒で構成される形状 A では極値が現れるのに対し、小粒子が凝集した形状 C ではより滑らかな位相関数が確認できる。

3. 結果と考察

気体吸収テーブルの開発において、まずバンド領域の再設定から行った。短波領域は波数 $1000 - 50000\text{ cm}^{-1}$ の範囲に設定した。この領域は全太陽放射エネルギーの 99.94% をカバーしている。また、長波領域は波数 $50 - 5000\text{ cm}^{-1}$ の範囲に設定した。この

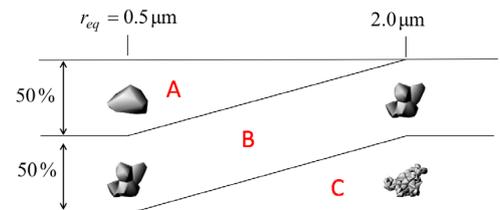


図 1 : MRIDUST2 の 3 つの形状の混合状態 (石元、personal communication)

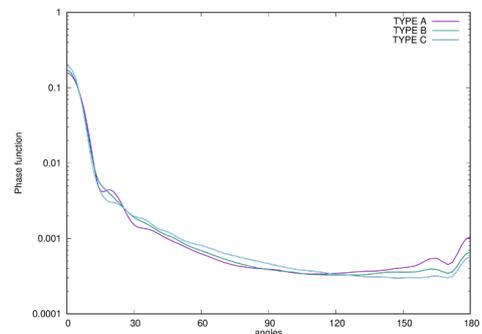


図 2 : MRIDUST2 の 3 つの形状の位相関数の比較

領域は 150K の黒体放射の 99.5%、330K の黒体放射の 99.96% をカバーしており、それぞれを地球大気の最低気温、最高気温と仮定した時に十分な波数範囲が設定されている。次にそれぞれの領域についてバンド分割を行った。放射フラックスの波数依存性を考慮する時、もっとも波数依存性が高いものは気体の吸収係数であるが、この波数依存性については相関 k -分布法で積分を行うため、その他の係数や変数がバンド内で大きく変化しないようにバンド範囲を設定した。ここで想定されるのは太陽放射スペクトル、プランク関数、雲・エアロゾル粒子による消散係数、レイリー散乱等である。また、バンド内で考慮する吸収気体の吸収線が途切れると k -分布が不連続になり積分が難しくなることから、気体吸収帯の境界をバンド境界とし、バンドごとに扱う吸収気体を分けるように設定した。さらに、中層・上層大気では比熱が小さく、フラックスの差から導出する冷却率が大きくなるため、誤差が拡大しやすい。フラックスを正しく計算するため上層の冷却率に影響のある、吸収が強いバンド（二酸化炭素 15mm 帯など）はバンド幅を小さく設定した。このようにして設定したバンドの波数領域および吸収係数を表 1、表 2 に示す。バンドの波数範囲は今後調整される可能性があるが、長波領域 24 バンド、短波領域 18 バンドの予定である。

表 1：長波領域におけるバンド領域と考慮する吸収気体

バンド番号	波数範囲 [cm ⁻¹]	吸収気体	バンド番号	波数範囲 [cm ⁻¹]	吸収気体
1	50 – 350	H ₂ O	13	830 – 920	H ₂ O, CO ₂ , O ₃
2	350 – 450	H ₂ O	14	920 – 980	H ₂ O, CO ₂ , O ₃
3	450 – 570	H ₂ O	15	980 – 1030	H ₂ O, CO ₂ , O ₃
4	570 – 600	H ₂ O, CO ₂ , N ₂ O	16	1030 – 1080	H ₂ O, CO ₂ , O ₃
5	600 – 630	H ₂ O, CO ₂	17	1080 – 1120	H ₂ O, CO ₂
6	630 – 650	H ₂ O, CO ₂	18	1120 – 1200	H ₂ O, CO ₂
7	650 – 670	H ₂ O, CO ₂	19	1200 – 1320	H ₂ O, N ₂ O
8	670 – 690	H ₂ O, CO ₂	20	1320 – 1370	H ₂ O, N ₂ O, CH ₄
9	690 – 710	H ₂ O, CO ₂	21	1370 – 1800	H ₂ O, CH ₄
10	710 – 740	H ₂ O, CO ₂	22	1800 – 2070	H ₂ O
11	740 – 780	H ₂ O, CO ₂	23	2070 – 2500	H ₂ O, CO ₂ , O ₃
12	780 – 830	H ₂ O, CO ₂	24	2500 – 5000	H ₂ O, CO ₂

表 2：短波領域におけるバンド領域と考慮する吸収気体

バンド番号	波数範囲 [cm ⁻¹]	吸収気体	バンド番号	波数範囲 [cm ⁻¹]	吸収気体
1	1000 – 2000	H ₂ O, CO ₂	10	7600 – 10000	H ₂ O
2	2000 – 2500	H ₂ O, CO ₂	11	10000 – 13000	H ₂ O, O ₃
3	2500 – 3200	H ₂ O	12	13000 – 14750	H ₂ O, O ₃ , O ₂
4	3200 – 4000	H ₂ O, CO ₂	13	14750 – 20000	H ₂ O, O ₃ , O ₂
5	4000 – 4700	H ₂ O	14	20000 – 25000	H ₂ O, O ₃ , O ₂
6	4700 – 5400	H ₂ O, CO ₂	15	25000 – 30000	O ₃ , O ₂
7	5400 – 6000	H ₂ O	16	30000 – 35000	O ₃ , O ₂
8	6000 – 7000	H ₂ O, CO ₂	17	35000 – 40000	O ₃ , O ₂
9	7000 – 7600	H ₂ O, O ₂	18	40000 – 50000	H ₂ O, CO ₂

現在積分点と重みを設定する最適化を各バンドで行っている。最適化する大気プロファイルは AFGL 標準大気 6 種類と、気体濃度を水蒸気が 1.2 倍増した状態、産業革命前(1750 年)における温室効果気体濃度、2100 年における推定の温室効果気体濃度を用いた。考慮する気体の種類によって異なるが、最大で 24 種類の気体状態について最適化を行う。バンド内で 2 種類以上の吸収気体を考慮している場合、初期値を 2 通り (completely correlated, uncompletely correlated)、積分点数を増加させていく、または減少させていく過程の 2 通り、計 4 通りの実験を行った。このようにして得られた結果において、各バンドにおけるしきい値は大気上端、地表面、対流圏界面（ここでは 200hPa とする）における正味の放射フラックスの誤差が 0.5 W/m² 以下、放射強制力が 0.1 W/m² 以下とし、これを満たすもっとも点数の少ない結果を採用した。現在、結果を調整中である。

鉍物性粒子の非球形形状の導入については、前述の消散・吸収係数および位相関数から散乱パラメータを導出し、MstrnX が読み込む散乱テーブルに格納した。本テーブルは九州大学の竹村教授の開発した SPRINTARS に導入していただいた。

4. まとめと今後の展望

吸収テーブルについては、結果調整し、精度の確認を行い次第、MIROC に導入し結果を検討したい。

参考文献

- (1) Pincus et al., 2015: Radiative flux and forcing parameterization error in aerosol-free clear skies, *Geophys. Res. Lett.*, 42, 5485–5492.
- (2) Ishimoto et al., 2010: Shape modeling of mineral dust particles for light-scattering calculations using the spatial Poisson-Voronoi tessellation, *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer.*, 111, 2434–2443.
- (3) Rothman et al., 2013: The HITRAN 2012 molecular spectroscopic database, *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer.*, 130, 4–50.
- (4) Mlawer et al., 2012: Development and recent evaluation of the MT_CKD model of continuum absorption, *Phil. Trans. R. Soc.*, 370, 2520–2556.

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

全球非静力学モデル NICAM を金星大気に適用する準備を行った。金星雲モデルの開発を進め、雲分布の形成に対する大気大循環および大気波動の重要性を明らかにした。また、新たに開発した赤外放射輸送モデルを用いて 1・2 次元放射対流平衡の計算を実施し、放射モデルの不確定性を考慮しても、金星大気の地面から 30-40 km では鉛直対流が生じ、対流圏が形成されることを示した。

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

全球非静力学モデル NICAM の力学部分を金星化する。物理過程に関しては、これまでの研究で開発してきた GCM 用のモデルを改良し、NICAM に組み込む。この作業と並行し、大規模スケールの大気現象 (主に熱潮汐波と大規模山岳波) の鉛直構造・鉛直伝播に焦点をあてた数値実験を行い、これらの波の構造に対する雲層中の対流層の影響を明らかにする。

今年度は NICAM を金星大気に適用するために必要な変更点を調査し、同時に金星雲物理モデルと赤外放射輸送モデルの開発を進めた。

3. 結果と考察

静力学 GCM を利用した予備的な研究により、濃硫酸エアロゾルの雲分布の形成に対する大気大循環および大気波動の重要性を明らかにした (Ando et al., 2020)。平均子午面循環の構造と強度を仮定した従来の 2 次元雲モデルでは、極域の厚い雲層を再現することができなかった。これに対し、GCM に組み込んだ新たな雲モデルでは、極域下部雲層高度の大気成層度の低い領域で活発な擾乱活動が生じ、水蒸気が高度 50 km 以下の下層大気から上方に輸送される結果、極域で観測と整合的な非常に厚い雲が形成される。また、低緯度の下部雲層では、その高度に存在する Kelvin 波的な惑星規模波動によって、東西波数 1 の雲の濃淡が作られる。モデルで得られた雲の光学的厚さを見積もったところ、金星夜面で観測される赤外線空間構造と時間変動をよく説明することが示された。従来、下層雲の濃淡は雲層下端付近の鉛直流によって作られると考えられてきたが、本研究では波に伴う気温変動が原因であることもわかった。波に伴う気温変動が数ケルビンに達するため、高温偏差の領域で雲の蒸発、低温偏差の領域で雲の凝結がおき、結果として東西波数 1 の雲構造が形成される。

大循環モデルのための放射モデルの開発をすすめ、1 次元放射対流平衡計算を組織的に行った。その結果、現実的な地面温度を再現することのできるパラメータ範囲においては、地面から高度 30-40 km と下部雲層の 2 つの鉛直領域において鉛直対流が生じることを明らかにした。東西鉛直の 2 次元面内での計算も実施しており、対流領域のローカルタイム依存性などが明らかになるものと期待される。金星大気中の短周期擾乱などについても研究を進めており、これらの成果を国際研究雑誌に投稿予定である。

4. まとめと今後の展望

NICAM による金星大気研究の準備を進めた。今後は NICAM に金星大気の物理過程を組み込み、あかつきが発見した新たな大気現象の解明を進めたい。

参考文献

- (1) Fukuhara et al., 2017: Large stationary gravity wave in the atmosphere of Venus. *Nature Geoscience*, 10, 85-89.
- (2) Kouyama et al., 2017: Topographical and local time dependence of large stationary gravity waves observed at the cloud top of Venus. *Geophys. Res. Lett.*, 44, 12098-12105.
- (3) Kouyama et al., 2019: Global structure of thermal tides in the upper cloud layer of Venus revealed by LIR onboard Akatsuki, *Geophys. Res. Lett.*, 46, 9457-9465.
- (4) Imai et al., 2019: Planetary-scale variations in winds and UV brightness at the Venusian cloud top: Periodicity and temporal evolution. *J. Geophys. Res.: Planets*, 124.
- (5) Kashimura et al., 2019: Planetary-scale streak structure reproduced in high-resolution simulations of the Venus atmosphere with a low-stability layer. *Nature Commun.*, 10, 23.
- (6) Peralta et al., 2020: A long-lived sharp disruption on the lower clouds of Venus. *Geophys. Res. Lett.*, 47, e2020GL087221.
- (7) Ando et al., 2020: Venusian cloud distribution simulated by a general circulation model. *J. Geophys. Res.: Planets*, 125, e2019JE006208.
- (8) 松田佳久, 高木征弘, 2021: 金星気象学の回顧と展望. *天気*, 68, 67-83.

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

NICAM 数値実験における実験設定のための予備調査として、再解析データ the ERA5 global analysis (文献 1: 以下 ERA5 と略す) の解析をおこなったところ、今までの再解析では十分に再現されていなかった、熱帯収束帯内でみられる大規模雲帯南北分割がかなり正しく表現されていることがわかった。このデータを初期値として NICAM 実験を行うことによって、モデル内でも現実世界にあるような現象が見いだされる可能性が示唆された。

1. はじめに

中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いる(文献 2)。この現象は衛星画像で形態が明瞭にとらえられるが、客観解析においては再現性がよくなく、それにとまらぬ力学場はうまくとらえることができないと考えられていた。また、昨年度までの NICAM 実験結果の解析でも、現象の一部分のみが再現されている印象であった。しかし、本年度、ヨーロッパ中期予報センターが最近公開をはじめた再解析 ERA5 を調べたところ、分割現象前後の雲の形態の変遷が驚くほど再現されていることがわかった。

2. 問題設定・方法

2020 年後半について、Global IR データの中部太平洋域を目視で調べ、典型的な形状の分割事例を探した。その結果、おもに 7, 9, 12 月にいくつかの事例を見つけることができた。これらについて、ERA5 の上層雲氷量を解析したところ、観測値の等価黒体温度の分布と非常によく一致を示した(図)。ここでは、ERA-5 の物理が正しいという前提に立って、ERA-5 データの中にみられた分割現象について、その発生をうながすとみられるいくつかのポイントをめぐる解析を試みた。

3. 結果と考察

東西に数千 km の長い雲帯が形成されることが現象発生の必要条件である。事例が良く検出された 7, 9, 12 月の共通点を調べたところ、これらの時期には ITCZ 付近の高水蒸気域の緯度方向の広がりが小さいことがわかった。ITCZ 付近ではおおむねいつも高水蒸気の領域が東西に広がって見いだされるが、時期によってはそれが緯度方向に大きな広がりをもっており、そのような時には東西に長い雲帯は形成されにくいようであった。

できあがった雲帯の分割をもたらす要因についても解析をおこなった。昨年度行った NICAM 実験の結果解析などでは慣性不安定の必要条件となる負の絶対渦度が北半球でも広く認められていたが、今回解析した事例(特に 12 月 24 日)では、まとまった負の絶対渦度はみとめられず、慣性不安定は否定的であった。一方、雲の日変化がきっかけではないかと考えさせる結果が得られた。東西に伸びた雲帯が、分割発生前に非常に背の高い積乱雲で満たされる時間を調べたところ、ほとんどの事例で朝の 06LT 頃であった。分割の開始はそれに比べると局所時固定はあいまいであったが、それでも昼から夕方頃が多かった。海洋上の雲の日変化をもたらす要因はいくつも知られ、議論は収束していないが、いずれかの理由による日変化が東西に長い雲帯の分割に寄与している可能性は大きいように思われ

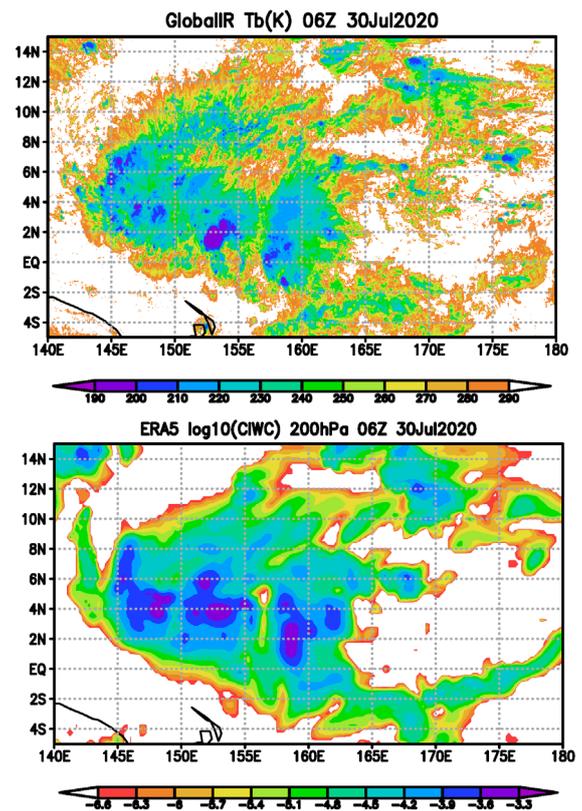


図: (上) 2020 年 7 月 30 日 06Z, 雲帯が南北に分割中の Global IR データの等価黒体温度 (K). (下) 同時刻の 200hPa における ERA-5 データの雲氷量 (対数表示).

た。
最後に、雲帯が分割していく過程をさまざまなパラメタで解析した。赤外画像の観察だけでは南北発散流による移流によって雲が北東および南東に流れているようにみえた。しかし、ERA5の南北鉛直断面での各物理量の変化からは、かなり強い内部重力波が認められ、その存在場所が南北および上方に移っていくように見えた。波数や周波数などの重力波のパラメーターが時間とともにどのように変化しているかまでは調べられなかったが、単に移流だけでなく内部重力波が雲帯の南北移動に関与している可能性が示唆された。

4. まとめと今後の展望

ここでは、ERA5の物理が正しいと考えて解析と考察を行った。しかし、それは確実なことではないので、多面的に検討を加えていく必要がある。そのひとつとして、EAR5でみられる事例について、NICAMを用いた再現・感度実験を行うことは有意義であると考えられる。来年度は、そのような数値実験を行っていきたいと考える。

参考文献

- (1) Hersbach H, Bell B., Berrisford P, et al., 2020: The ERA5 global reanalysis. *Q J R Meteorol Soc.* **146**: 1999-2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>
- (2) 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.

アジアモンスーン降水の将来変化と海面水温変化パターンとの関係

A relationship between future changes of the Asian monsoon precipitation and spatial pattern of sea surface temperature

高橋 洋, 都立大・地理, E-mail: hiroschi3(at)tmu.ac.jp
 神澤 望, 都立大・地理

Hiroshi Takahashi, Department of Geography, Tokyo Metropolitan University
 Nozomi Kamizawa, Department of Geography, Tokyo Metropolitan University

要旨

気候変動や年々変動において、アジアモンスーンの降水とそれに関わる大気水循環がどのように変化するかについて、陸面状態の影響に着目して解析を行った。大規模なアンサンブル実験データセット(d4pdf)を利用し、陸面状態の違いが、どの程度のアジアモンスーンの強度に影響するのかを調べた。今後は、どのような SST 偏差パターン時に、アジアモンスーン強度が影響されやすいかを議論する。

1. はじめに

気候変動や年々変動によりアジアモンスーンの降水とそれに関わる大気水循環がどのように変化するかについて、陸面状態の影響に着目して解析を行った。大規模なアンサンブル実験データセット(d4pdf)を利用し、陸面状態の違いが、どの程度のアジアモンスーンの強度に影響するのかを調べる。今後は、どのような SST 偏差パターン時に、アジアモンスーン強度が影響されやすいかを議論する。さらに、降水量変動の地域性を含めて調べる。

2. 方法

大規模なアンサンブル実験データセット(d4pdf; Mizuta et al., 2016)を利用した。インドモンスーンの強さを古典的な Webster and Yang (1992)のインデックスを用いて定義した。この報告では 2010 年の例を示す。2010 年の 100 メンバーの 6 月モンスーンの強さを計算し、上位 10 メンバーと下位 10 メンバーを選定し、上位平均と下位平均の差を調べた。6 月の循環場を確認し、アジアモンスーンの強度でうまく選定できていることを確認した。それぞれのメンバーの地上気温について、5 月、4 月、3 月と遡り、ラグコンポジット解析を行った。上位平均と下位平均の差を計算し、地表気温 (SAT) にシグナルが見られるかを調べた。変化の統計的な評価のために、差の大きさが、2010 年におけるメンバー間での標準偏差 (1σ) よりも大きい場合のみプロットした。

3. 結果と考察

図 1 では、アジアモンスーンの強度が強いメンバーの 1 ヶ月前には、チベット高原を中心としたユーラシア大陸で、正の偏差が見られることを示している。具体的には、大陸の地上気温が高くなっている。これは、アジアモンスーンを駆動する海陸の熱的コントラストが強い場合に、モンスーンが強くなる傾向があることを示していると考えられる。一方で、そのシグナルは、4 月以前には遡れない。よって、1 ヶ月程度前の陸面状態の影響は確認できるが、冬季から引き続くようなシグナルは、今のところ確認できていない。ただし、これは、2010 年の結果である。

さらに、異なる年を見ると (図は省略)、シグナルの強さなどに違いがあり、陸面状態の影響が顕著な年と、あまり影響が見られない年とがある。今後は、大気海洋振動の位相などによって、影響がどのように異なるのかを明らかにする。

composite based on Asian monsoon y2010

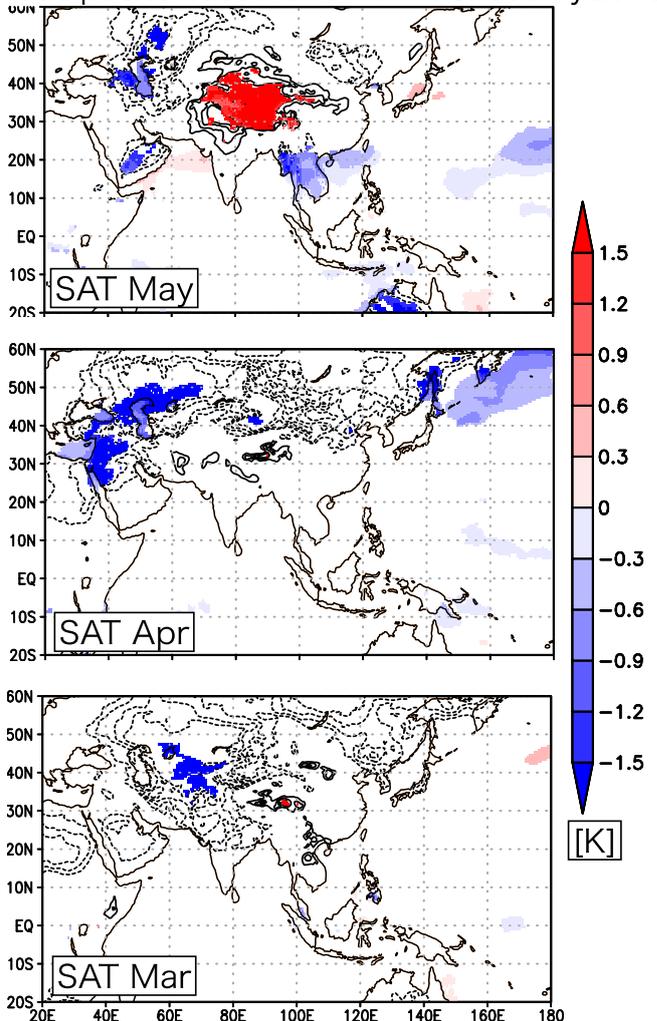


図 1: アジアモンスーンの強度が強い 10 メンバー平均と弱い 10 メンバー平均との差。

海洋における循環・水塊形成・輸送・混合に関する数値的研究： 南大洋における乱流・二重拡散、潮汐 18.6 年周期振動の海洋・気候影響

Numerical study on circulation, formation, transport and mixing of water-masses in the ocean: Impact of 18.6-yr period tidal cycle on ocean and climate

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

松浦 知徳, 東大・大気海洋研, E-mail: matsuura(at)aori.u-tokyo.ac.jp

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

濱本 真沙希, 東大・大気海洋研, E-mail: hamamoto(at)aori.u-tokyo.ac.jp

川口 悠介, 東大・大気海洋研, E-mail: ykawaguchi(at)aori.u-tokyo.ac.jp

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

Ichiro Yasuda, Tomonori Matsuura, Yusuke Sasaki, Masaki Hamamoto, Yusuke Kawaguchi, Itsuka Yabe, Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo

要旨: 本年度は、2018 年に実施したロシアとの共同研究航海においてベーリング海北部アナダイール海峡で得られた観測データに基づき、数値計算を行い、顕著な湧昇が海底境界層における海水輸送によって生じることが示された論文が、*Journal of Geophysical Research* に掲載された(1)。南極大陸周辺及び北太平洋亜寒帯海域で得られた微細構造観測データから、拡散型二重拡散が階段構造を発生させている可能性を指摘し、水平流速の弱いシアによって拡散型二重拡散の発生を促進していることが示唆され、発生するパラメータレンジなどを特定した(2)。来年度には、観測に対応する詳細な数値実験を計画している。北太平洋 10 年規模振動(Pacific Decadal Oscillation: PDO)の長期再構成データを解析し、潮汐 18.6 年周期に対応する変動、その 1.5 倍、3 倍周期、の 3 種の変動が数 10 年スケールで卓越し、それらが同期することで、気候ジャンプや気候レジームシフトが形成される可能性を示し、*Journal of Oceanography* に掲載された(3)。18.6 年潮汐変動に起因する鉛直混合変動を考慮した気候モデル計算結果について解析を進めており、次年度観測データを含めて成果を発表する。

1. はじめに

本研究課題では、海洋物質循環や生態系・気候に影響する海洋構造とその変動、特に鉛直混合を通じた水塊形成と変動に焦点を当てて研究を行っている。2020 年度は、2018 年度に実施したロシア船によるベーリング海北西部アナダイール湾からアナダイール海峡において観測された低温化現象を数値モデリングによって混合に伴う湧昇に起因することを明らかにした成果が国際誌に掲載された(1)。また、2019 年度に行った南大洋インド洋セクターを南北に南緯 30 度から南極大陸までの高速水温計観測データを解析し、初めて南極周極流を横切る海底までの詳細な乱流鉛直混合分布を明らかにした。南極周辺の冬季海水で覆われる海域での二重拡散による熱輸送評価を行い、拡散型二重拡散による熱輸送の重要性を指摘した(2)。さらに、PDO の長期プロキシデータに、潮汐 18.6 年周期対応成分、その 1.5 倍、3 倍周期成分が卓越し、それらが同期していることを明らかにした(3)。

2. 問題設定・方法

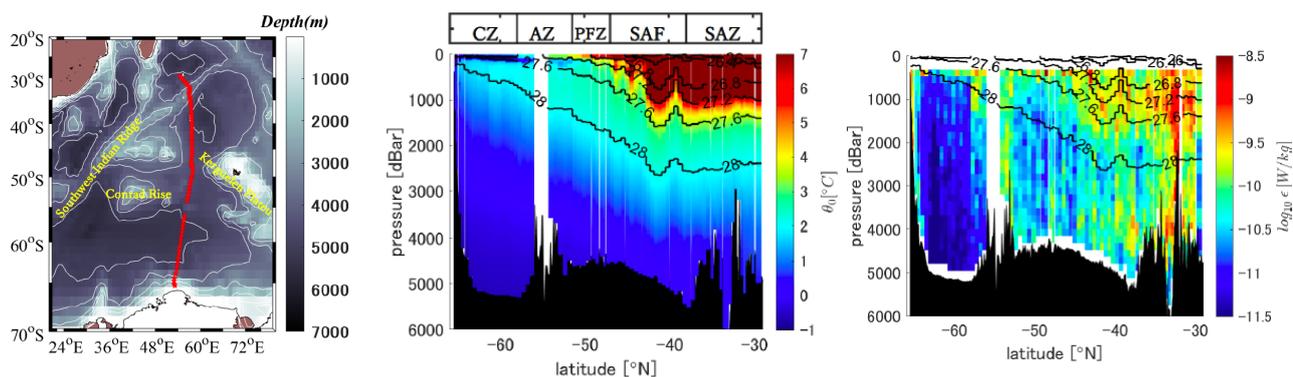


Fig. 1 (左) みらい MR-19-4 レグ 3 (2019/12-2020/2) 観測点分布、(中) ポテンシャル水温断面図 (コンタは中立密度)、(右) 高速水温計を CTD に搭載した観測から得られた乱流エネルギー散逸率常用対数分布

Goto et al. (2016; 2018; 2021) 及び Yasuda et al. (2021) において、CTD に搭載した高速水温計観測について、乱流エネルギー散逸率 10^{-11} から 10^{-8} W/kg の範囲で信頼できる観測が実施できる手法が確立された。この手法を用いて、南大洋南極周極流を横切り海底から海面までの乱流分布を図 1 のように明らかにした。

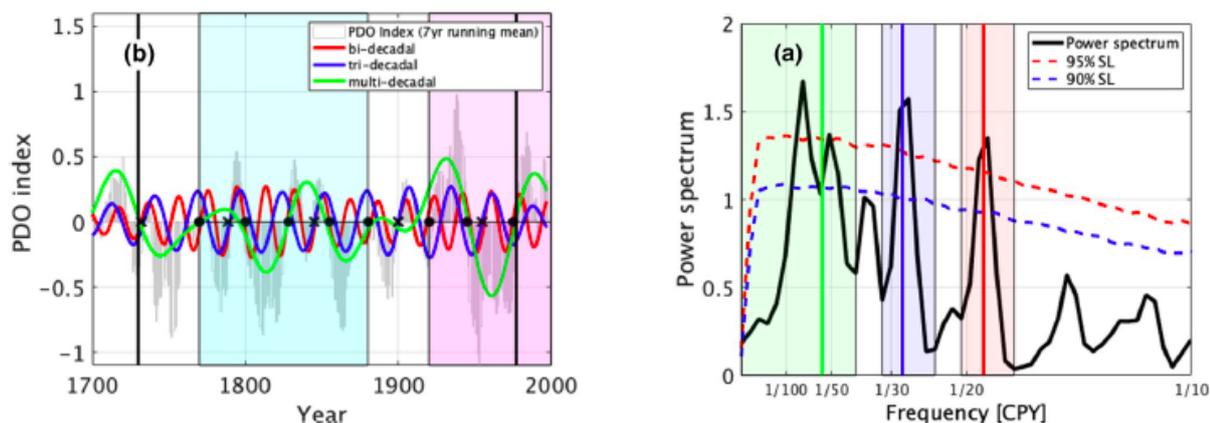


Fig. 2 (左) Darrigo 他 (2001) の木年輪などから再構成した 298 年間の PDO 指標の 7 年移動平均データ (灰色)、バンドパスフィルターで抽出した約 20 年周期成分 (赤線)、約 30 年周期 (青) 及び 40 年以上周期 (緑) 成分時系列。(右) PDO 指標のスペクトル。縦赤線: 18.6 年ピーク周期、縦青線: $18.6 \times 1.5 = 27.8$ 年周期ピーク、縦青線: $18.6 \times 3 = 55.8$ 年周期、薄赤・青・緑シェードはバンドパスした周期帯。

3. 結果と考察

南大洋南極周極流を横切り海底から海面までの乱流分布 (図 1) から、海底地形の変動が激しい海域において、海底から表層へ及ぶ強い乱流が生じていることが明らかとなった。また、成層強度に比例したエネルギー散逸率分布となっており、南緯 55 度以南の海域では、乱流が弱い。55 度以南の表層 100-300m の上むきに塩分が低下する海域では、冬季の海氷形成に伴い表層が低温、下に北大西洋深層水起源の高温・高塩分水が分布し、表層で水温が低い、水温逆転構造となっていた。この弱乱流海域での鉛直熱輸送は、海水の消長に影響があると考えられ、その定量化とモデル化が重要な課題である、この水温逆転海域では、拡散型二重拡散による効率的な鉛直熱輸送が存在する可能性があるため、拡散型二重拡散の指標である階段構造の検出手法を新たに考案し、階段構造を元にした熱輸送の見積もりを行った。

北太平洋 10 年規模振動 (Pacific Decadal Oscillation: PDO) の長期再構成データ (図 2 左) を解析し、潮汐 18.6 年周期に対応する変動 (図 2 右、縦赤線)、その 1.5 倍 (縦青線)、3 倍周期 (縦緑線)、の 3 種の変動が数 10 年スケールで卓越していることを明らかにした。18.6 年と 1.5 倍 (28 年) 周期は、時系列全体を通じて、1.5x2 倍周期での負から正への符号変化が 18.6 年と同期していた。18.6 年と 3 倍 (55.8 年) 周期は、1880-1920 年に同期の飛び、が見られたが、それ以外の期間で、3 倍周期の負から正及び正から負の符号変化が 18.6 年周期と同期していた。これらの同期は、ランダムな過程からは生じることはできない現象であり、何らかの物理的メカニズムが介在することが示唆された。数 10 年周期の変動の符号変化が同期することで、気候ジャンプや気候レジームシフトが形成される可能性を示している。

4. 今後の展望

南大洋の乱流・二重拡散については、それら成因と影響について数値的研究を展開してゆく。18.6 年潮汐変動に起因する鉛直混合変動を考慮した気候モデル計算結果について解析を進めており、次年度観測データを含めて成果を発表する予定である。

参考文献

- (1) Kawaguchi Y., J. Nishioka, S. Nishino, S. Fujio, K.J. Lee, A. Fujiwara, D. Yanagimoto, H. Mitsudera and I. Yasuda (2020) Cold Water Upwelling near the Anadyr Strait: Observations and Simulations. *J. Geophys. Res.* DOI: 10.1029/2020JC016238
- (2) 佐々木雄亮 (2021) 南大洋拡散型二重拡散領域における階段状構造の検出と鉛直熱輸送の評価。東京大学理学系研究科修士論文
- (3) Hamamoto M. and I. Yasuda (2021) Synchronized variations in the Pacific Decadal Oscillation. *J. Oceanogr.* <https://doi.org/10.1007/s10872-021-00592-8>
- (4) Y. Goto, I. Yasuda and M. Nagasawa (2016): Turbulence estimation using fast-response thermistors attached to a free-fall vertical microstructure profiler. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 33, 2065-2078. DOI: 10.1175/JTECH-D-15-0220.1
- (5) Y. Goto, I. Yasuda and M. Nagasawa (2018): Comparison of turbulence intensity from CTD-attached and free-fall microstructure profilers. *Journal of Atmosphere and Ocean Technology*, 35, 147-162, DOI: 10.1175/JTECH-D-17-0069.1
- (6) Goto Y., I. Yasuda, M. Nagasawa, S. Kouketsu, Toshiya Nakano (2021): Estimation of Basin-scale turbulence distribution in the North Pacific Ocean using CTD-attached thermistor measurements. *Scientific Reports*, 11:969, <https://doi.org/10.1038/s41598-020-80029-2>
- (7) Yasuda I., S. Fujio, D. Yanagimoto, K.J. Lee, Y. Sasaki, S. Zhai, M. Tanaka, S. Itoh, T. Tanaka, D. Hasegawa, Y. Goto and D. Sasano (2021) Estimate of turbulent energy dissipation rate using free-fall and CTD-attached fast-response thermistors in weak ocean turbulence. *J. Oceanogr.* DOI: 10.1007/s10872-020-005

次世代海洋生態系モデルを用いた気候変動が海洋生態系に与える影響の予測

Estimation of impacts of climate change on oceanic ecosystems using a next-generation ecosystem model

増田 良帆, 北大・地球環境, E-mail: masuda(at)ees.hokudai.ac.jp

山中 康裕, 北大・地球環境, E-mail: galapen(at)ees.hokudai.ac.jp

Yoshio Masuda, Faculty of Environmental Earth Science, Hokkaido University

Yasuhiro Yamanaka, Faculty of Environmental Earth Science, Hokkaido University

要旨

最新の植物プランクトン生理理論に基づいた次世代海洋生態系モデルを開発し、気候変動の海洋生態系への影響予測を行うことが本研究の大目的である。これまでに開発した次世代モデルでは、従来モデルに比べてクロロフィル分布の再現性が大きく向上し、鉛直方向のクロロフィル極大値（亜表層クロロフィル極大）の全球分布パターンを世界で初めて再現することに成功した。亜表層クロロフィル極大の形成要因は細胞内クロロフィル含有量が鉛直方向で 10 倍以上変化する馴化であり、全ての海域で共通だと明らかにした。我々の研究は細胞スケールの生理応答が全球クロロフィルの分布のメカニスティックな基礎だと示しており、この確固たる基礎の下で、海洋生態系の気候変動に対する応答が研究できるようになった。

1. はじめに

海洋の植物プランクトンは、光合成によって二酸化炭素を吸収するという点、海洋食物連鎖の基底となるという点において重要な役割を果たしている。気候変動によって、海洋植物プランクトンの一次生産や生態・種構成が変化すると、海洋全体の二酸化炭素吸収量が変化するのに加えて、食物連鎖を通じて漁業生産への影響が生じると考えられている。これらの影響評価を行う道具として、海洋大循環モデルと組み合わせた海洋生態系モデルが用いられてきた。海洋生態系モデルは計算した海表面クロロフィルが衛星観測で得られた結果に類似するようにチューニングされており、従来型の日本のモデル（NPZD, NEMURO, MEM）ではクロロフィル量と生物量が正比例するという仮定が置かれている。しかし、この仮定は細胞内クロロフィル含有量が海洋環境に応じて約 60 倍変化するという観測結果（Behrenfeld et al., 2005）と整合しない。我々のグループの開発している次世代 3D 海洋生態系モデル（FlexPFT-3D）には、植物プランクトン個体が環境に適応して、動的に細胞内クロロフィル含有量を変えるメカニズムが組み込まれている。このモデルでは海表面クロロフィルの再現精度が従来モデルに比べて大きく向上するだけでなく、これまで再現不可能だった鉛直方向のクロロフィル濃度のピーク（亜表層クロロフィル極大）を再現出来ることが分かった。本年度は亜表層クロロフィル極大の形成メカニズムを明らかにした論文を投稿した。

2. 問題設定・方法

海洋大循環モデルは気象研究所共用海洋モデル（MRI.COM）を用いており、海氷モデルも含まれている。計算領域は全球で、北極海以外の水平解像度は東西 1 度×南北 0.5 度である。生態系モデルは、植物プランクトン 1 種、動物プランクトン 1 種を設け、窒素・鉄循環を計算している。このモデルは Pahlow and Oschlies (2013)、Pahlow et al. (2013)、Smith et al. (2015) で提唱された理論に基づいて構築された。積分期間は 1985 年から 2004 年であり、最終年の結果を観測と比較した。

3. 結果と考察

我々のシミュレーション結果では亜表層クロロフィル極大は亜熱帯で 100m 以深、亜寒帯で 30~40m、赤道域で 60~70m に位置しており、観測結果と整合している。また、湧昇域では沿岸に近づくにつれて SCM 深度が浅くなるという観測結果も再現出来ている。海域によってクロロフィル極大の深度が極端に違う理由を調べた。クロロフィル濃度はバイオマスと細胞内クロロフィル含有量の積で表される。バイオマスは表層で最大値を取り深度増加に伴って減少する一方、細胞内クロロフィル含有量は深度増加に伴う光の減少に応じて増加しており、この両者のバランスがクロロフィル極大深度を決める。亜熱帯のある一地点では、表層から 118m の間で細胞内クロロフィル含有量が 50 倍に増加する一方、バイオマスは 1/3 に減少していた。この結果、クロロフィル濃度はバイオマスより細胞内クロロフィル含有量により強く依存し、細胞内クロロフィル含有量が最大値を取る 100m 以深に亜表層クロロフィル極大が形成される。亜寒帯のある地点では、表層から 82m の間に細胞内クロロフィル含有量は 5 倍に増加するが、バイオマスは 1/16 に減少する。結果、クロロフィル鉛直分布はバイオマスの影響をより強く受けており、表層に近い深度 (28m) に亜表層クロロフィル極大が形成される。

我々のモデルが細胞内クロロフィル含有量、ひいてはクロロフィルの鉛直分布を適切に再現出来る理由は、植物プランクトンが海洋環境に応じて生体リソースの配分を最適化する理論を導入したからである。リソースは葉緑体形成（炭素の獲得）と栄養塩吸収（窒素の獲得）に対して配分され、片方にリソースを割くともう片方がしわよせを受ける。この理論では、細胞内クロロフィル含有量は葉緑体内のクロロフィル含有量と葉緑体形成に割くリソース配分の積である。例えば、葉緑体内のクロロフィル含有量が 0.3 g chl/molC で、葉緑体形成へのリソース配分が 0.5 (無次元量) なら、細胞内クロロフィル含有量は 0.15 g chl/molC となる。葉緑体内クロロフィル含有量は深度増加に伴う光の減少に応じて増加する。リソース配分に関しては、どの海域でも 130m

以深では光が不足するので、ほぼ全てのリソースが葉緑体形成に配分される。130mより浅い深度では、リソース配分の海域による違いが顕著になる。表層の栄養塩濃度が高い亜寒帯ではリソースが葉緑体形成と栄養塩吸収にバランスよく配分される。一方、表層の栄養塩濃度が低い亜熱帯ではほぼ全てのリソースが栄養塩吸収に割かれるので、表層の細胞内クロロフィル含有量が他の海域に比べて極めて低くなる。結果、表層と100m以深では細胞内クロロフィル含有量が50倍も異なる。以上のように、細胞スケールの最適化がグローバルスケールのクロロフィル分布を決めることが示された。

4. まとめと今後の展望

植物プランクトンの光合成速度はクロロフィル濃度に大きく依存する。よって、光合成による一次生産量を正しくモデルで再現する為には、前提としてクロロフィル分布が正しく再現されていなければならない。全海洋の一次生産量は、最も基本的な量であるにも関わらず、世界各国のモデル間のばらつきが17~83 PgC/year (Laufkötter et al., 2015) と不確実性が非常に大きかった。このばらつきはクロロフィル鉛直分布の再現性の低さが原因と考えられる。われわれのモデルは高いクロロフィル鉛直分布の再現性によって、全海洋の一次生産量の不確実性を減らすのに貢献する。

来年度はこれまでの成果を論文に纏めることに重点を置く。亜表層クロロフィル極大に関する論文を改訂し、受理を目指す。また、北極海の生態系に関する論文を執筆する。この論文では、馴化過程の導入により北極海の水平・鉛直方向のクロロフィル濃度分布や栄養塩濃度分布の再現性が従来モデルに対して著しく改善され、一次生産量も大きく異なることを示す。

本年度は論文執筆と並行して、植物プランクトン156タイプを表現出来る多様性モデルの開発も進めており、プロトタイプは既に完成している。来年度は実験結果を解析し、環境と多様性の関係を明らかにする。さ来年度以降は温暖化実験を行い、植物プランクトンの種構成が気候変動に伴ってどのように変化するか明らかにする。

参考文献

- (1) Behrenfeld, M. J., E. Boss, D. A. Siegel, and D. M. Shea, 2005: Carbon-based ocean productivity and phytoplankton physiology from space. *Glob. Biogeochem. Cycles*, 19, GB1006.
- (2) Laufkötter, C. et al., 2015: Drivers and uncertainties of future global marine primary production in marine ecosystem models. *Biogeosciences*, 12, 6955-6984.
- (3) Pahlow, M., and A. Oschlies, 2013: Optimal allocation backs Droop's cell-quota model, *Marine Ecology Progress Series*, 473, 1-5, doi:10.3354/meps10181.
- (4) Pahlow, M., H. Dietze, and A. Oschlies, 2013: Optimality-based model of phytoplankton growth and diazotrophy, *Marine Ecology Progress Series*, 489, 1-16, doi:10.3354/meps10449.
- (5) Smith, S. L., M. Pahlow, A. Merico, E. Acevedo-trajes, Y. Sasai, C. yoshikawa, K. Sasaoka, T. Fujiki, K. Matsumoto, and M. C. Honda, 2015: Flexible phytoplankton functional type (FlexPFT) model: size-scaling of traits and optimal growth. *Journal of Plankton Research*, doi:10.1093/plankt/fbv038.

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

郭 晨穎, 東大・大気海洋研, E-mail: guochenying(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

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

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

Chenyang Guo, Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo

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

要旨 (明朝 9pt)

領域海洋モデル Regional Ocean Modeling System と低次栄養段階生態系モデルおよび魚類回遊モデルを結合させたモデルによって魚類生息環境の模算を計画した。領域海洋モデルの亜熱帯循環、黒潮、黒潮続流が南偏傾向を示したが、水平及び鉛直移流スキームを変更したことで亜熱帯循環、黒潮、黒潮続流の位置と強度が改善され、低次栄養段階生態系モデルおよび魚類回遊モデルと結合した現実的な実験が可能となった。

1. はじめに

北西太平洋は魚類生産が世界でも最も盛んな海域であるが、数値モデルによる魚類の生息環境の再現性が低く、過去の魚類資源変動および将来予測のボトルネックになっている。特に、小型浮魚類の餌料となる動物プランクトンの再現性が低いことが問題となっている。そこで本課題では、複数の海洋循環—低次栄養段階生態系結合モデルを用いて北西太平洋の魚類生息環境を模算し、それらの相互比較および観測結果と比較することによって、モデルの改良方針を明らかにする。

2. 問題設定・方法

領域海洋モデル Regional Ocean Modeling System (ROMS; Haidvogel et al., 2008) と低次生態系モデル NEMURO (North Pacific Ecosystem Model for Understanding Regional Oceanography; Kishi et al., 2007)、および魚類回遊モデル NEMURO.FISH (NEMURO For Including Saury and Herring; Ito et al., 2004) を結合させた ROMS-NEMURO.FISH (Rose et al., 2015) を北西太平洋を対象に構築、積算し、CCSR Ocean Component Model (COCO; Hasumi, 2006) 上で計算された低次生態系モデルと相互比較する。本年度は、サンマの成長—回遊モデルの改良を検討し、また、新たに北太平洋でも問題となってきたマイクロプラスチックの鉛直分布についての数値実験を開始した。

3. 結果と考察

サンマの成長—回遊モデルに関しては、これまでの数値実験で、2002年から2015年の期間について、毎年6月から7月に行われている漁期前—斉調査の調査結果を初期値として、翌年の同時期までのサンマの成長—回遊実験を実施した結果、2010年以降日本へのサンマの来遊量が減少する結果が得られておる。感度解析を行った結果、来遊量の変化は、初期値への依存性が高いことが示され、初夏のサンマの分布の沖合化が効いていることが判明していた。まずは、計算期間を延長するため、駆動力として用いている衛星海面水温、クロロフィルデータを整備し直した。衛星プロダクトが更新されていたため、2002年から2018年の期間について、計算を行った。その結果、2010年以降、来遊時期が遅れ、来遊量が減少し、近海存在量も減少する結果を得た。また、モデル計算結果から産卵量および産卵重心を解析できるように改良した。

これらの計算においては、サンマの単位体重当たりのエネルギー含有量を一定と扱ってきた。しかし、実際に現場で採集されたサンマの単位体重当たりのエネルギー含有量を調べたところ、明確な東西差があることが判明し、沖合のサンマが日本近海まで回遊してくる条件が整わないと産卵量が減少することが推測された。

また、新たに北太平洋でも問題となってきたマイクロプラスチックの鉛直分布についての数値実験を開始した。Kaiser et al. (2019, Mar. Poll. Bull.) を参考に終端速度を定義し、水より軽い PE, PP (910 kg/m³) と重い PET (139 kg/m³) を想定し、粒径 10 μm ($w \sim 0.01$ mm/s) から 5mm ($w \sim 10$ cm/s) までの 10bin を設定して、海上風を 0, 5, 10, 20 [m/s]、周期 10s 波浪の振幅を 0.000, 0.316, 1.000, 3.160 [m]、成層条件を夏・冬季と変化させた計 30 ケース (風・波ともに 0 のケースは除外) を実施した。各粒径粒子を表層格子中央に初期配置 (128x128 x 10bin = 163,840 粒子) して実施し、その結果、すべてのケースで混合層の底部までマイクロプラスチックは分布するが、混合層を突き抜けて下層に行く粒子は発生しないことを確認した。PE, PP (910 kg/m³) のケースでは、特に冬季に風速が速くなると混合層下部に粒径の小さなマイクロプラスチックが集積する (乱流下向き flux と浮力上向き flux が収束するため) 結果を得た。

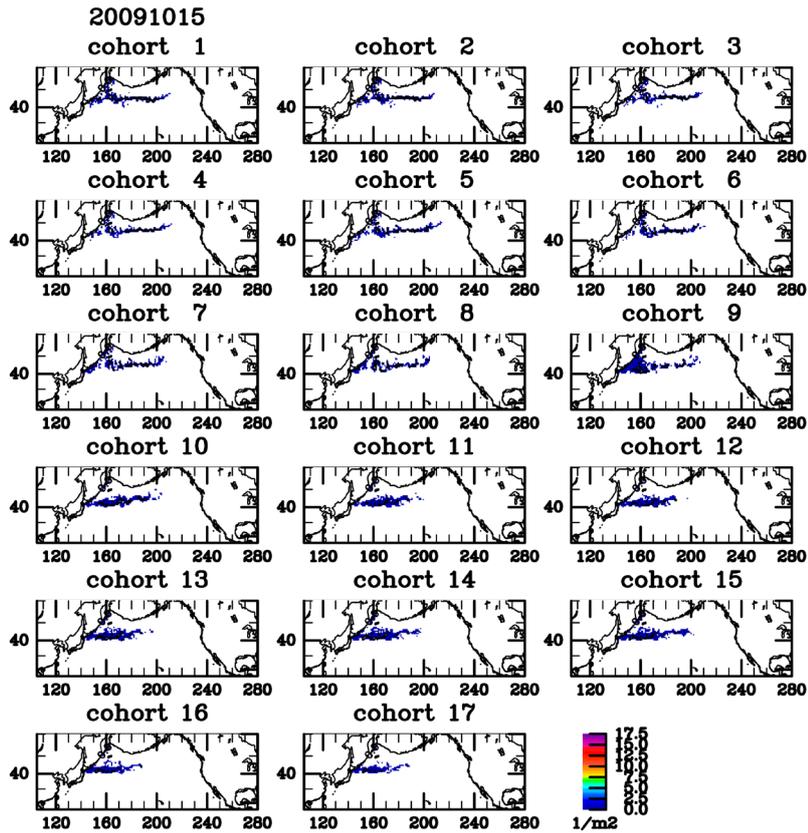


Fig. 1 Distribution of Pacific saury on 15th October 2019 simulated by the model. Cohort 1 to cohort 17 corresponds to 17 cm to 33 cm at the begging of the simulation.

4. まとめと今後の展望

サンマの卵は沈降性卵であり、浮遊物へ産卵することで、卵の沈降を抑えていることが指摘されている。マイクロプラスチックに産卵した場合に、マイクロプラスチックとともに水中を移動する可能性があり、マイクロプラスチックの挙動も含めた検討が必要となった。現段階では、それぞれ別のモデルとして計算を実施しているが、将来的には両者を統合する必要がある。また、微小マイクロプラスチックは動物プランクトンによって誤食されている可能性があり、サンマの主要餌料となる動物プランクトンの成長を阻害している危険性がある。この点も含め、将来的には両者の関係を総合的に評価する必要がある。

参考文献

- (1) Haidvogel D. B., H. Arango, W. P. Budgell, B. D. Cornuelle, E. Curchitser, E. Di Lorenzo, K. Fennel, W. R. Geyer, A. J. Hermann, L. Lanerolle, J. Levin, J. C. McWilliams, A. J. Miller, A. M. Moore, T. M. Powell, A. F. Shchepetkin, C. R. Sherwood, R. P. Signell, J. C. Warner and J. Wilkin (2008) Ocean Forecasting in Terrain-Following Coordinates: Formulation and Skill Assessment of the Regional Ocean Modeling System. *Journal of Computational Physics* , 227, 3595-3624.
- (2) Hasumi H., CCSR Ocean Component Model (COCO) version 4.0. CCSR Report No. 25, 103 pp., 2006.
- (3) 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.
- (4) Kishi M. J., M. Kashiwai, D. M. Ware, B. A. Megrey, D. L. Eslinger, F. E. Werner, M. N. Aita, T. Azumaya, M. Fujii, S. Hashimoto, D. Huang, H. Iizumi, Y. Ishida, S. Kang, G. A. Kantakov, H. Kim, K. Komatsu, V. V. Navrotsky, S. L. Smith, K. Tadokoro, A. Tsuda, O. Yamamura, Y. Yamanaka, K. Yokouchi, N. Yoshie, J. Zhang, Y. I. Zuenko, V. I. Zvalinsky (2007) NEMURO -a lower trophic level model for the North Pacific marine ecosystem. *Ecol. Model.* , 202, 12-25.
- (5) Rose, K. A., J. Fiechter, E. N. Curchitser, K. Hedstrom, M. Bernal, S. Creekmore, A. Haynie, S. Ito, S. Lluch-Cota, B. A. Megrey, C. A. Edwards, D. Checkley, T. Koslow, S. McClatchie, F. Werner, A. MacCall, and V. Agostini (2015) Demonstration of a fully-coupled end-to-end model for small pelagic fish using sardine and anchovy in the California Current. *Prog. in Oceanogr.*, 138, 348-380.

非静力学海洋モデルの汎用化と OGCM とのシームレスな接続 Development of Comprehensive Nonhydrostatic Ocean Modeling Platform

松村義正, 東大・大気海洋研, E-mail: ymatsu@ori.u-tokyo.ac.jp
中村知裕, 北大・低温科学研究所, E-mail: nakamura@lowtem.hokudai.ac.jp
大橋良彦, 東京海洋大学, E-mail: yohash0@kaiyodai.ac.jp

要旨

我々の研究グループが開発する海洋非静力学モデル kianco を用いて, 1) 氷河融解水の動態に関する数値モデリング研究, 2) サブグリッドスケール乱流パラメタリゼーションの改良 を実施した。

1)ではグリーンランド北西部フィヨルド群に流出する氷河融解水を対象に、従来より広範囲の数値シミュレーションを実施した。2)では海面混合層や海底境界層での LES 実験の高精度化を目的に、サブグリッド乱流パラメタリゼーションとして FSF モデルおよび WALE モデルを新たに実装し、両者ともに海面混合層にて Smagorinsky モデルより良い特性があることを確認した。

1. グリーンランド氷河融解水動態に関するモデリング研究

近年, グリーンランド氷床の質量損失に伴って, 海洋への融解水流出量が増加している。特に海洋に流れ出す氷河からの融解水流出は, 海水・懸濁物質・栄養塩を鉛直・水平的に輸送するため, 沿岸海洋の循環・物質輸送・生物生産に重要な影響を及ぼす可能性がある。本研究は現場観測が実施されているグリーンランド北西部 Bowdoin フィヨルドを含む, 複数の氷河が海洋に流れ込むフィヨルド群(Inglefield Bredning: 65.5°-70°W, 77.1°-77.8°N)を対象として, フィヨルドへの氷河融解水流出過程を数値モデル実験から明らかにすることを目的とする。音響測深に基づいた現実的な海底地形(Morlighem et al., 2017; 図 1a)を用いて数値実験を実施した。各領域において異なる氷河融解水トレーサーを導入し, それぞれの融解水の循環への寄与を調べた。各氷河からの融解水量は領域気候モデル RACMO の出力結果に基づいた最新のデータセットを使用した(Mankoff et al., 2020)。Bowdoin 氷河末端付近に着目すると, 融解水トレーサー濃度が最大となる深度が~60 m であり(図 1b), 融解水プルームは海表面に到達せず亜表層を広がっていくことが示された。一方で, 領域南東部や北東部の氷河末端では融解水が海表面に高濃度で広がっている様子も捉えられた。モデルの全領域に着目すると, 表層に占める氷河融解水トレーサーの割合は総トレーサー量の 10%程度であった。融解水の挙動の全容を把握するためには, 表層だけでなく亜表層も含めた融解水の鉛直的な広がりも調べる必要がある。今後は長期積分を行い, 各氷河融解水の鉛直的な広がりや表層の氷河融解水分布と衛星で検出される高濁度水との対応を詳細に解析していく予定である。

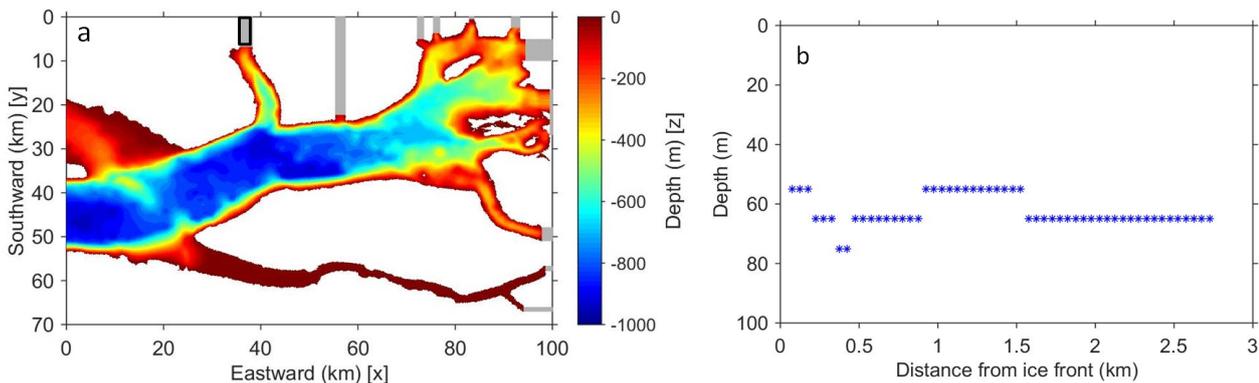


図 1(a)モデルの海底地形分布。(b) Bowdoin 氷河末端付近における氷河融解水トレーサー濃度が最大となる深度の分布(a の黒枠領域に位置する氷河融解水トレーサーの結果, 積分開始 3 日後)。

2. LES サブグリッドモデルの改良

非静力学海洋モデルは, 格子幅を十分小さくとり, かつ粘性及び拡散に適切なサブグリッドスケールモデルを適用することで large eddy simulation (LES) としての運用が可能である。我々のグループが開発する kianco においても, 特に粒子追跡手法と組み合わせ海面混合層や海底境界層での浮遊懸濁物質や晶氷粒子等の動態に関する LES 実験を実施してきた。LES として最も基本的な手法は渦粘性係数を $\nu = (C_s \Delta)^2 \sqrt{2S_{ij}S_{ij}}$ とする Smagorinsky モデル

であるが、これはモデル定数 C_s が事実上チューニングパラメタとなっていることに加え、境界付近で乱流強度を過剰に見積もる傾向があるため *wall function* を適用する必要がある等、アドホックな補正が要求されるという点で扱いづらい。海洋表層混合層の LES では Deardorff モデルが広く用いられているが、これも経験定数に依っており、海底や海氷/棚氷底面の境界層でも同様に適用可能かは検証されていない。これらに代わる手法として、*filtered structured-function (FSF)* モデル (Ducros et al., 1996) 及び *wall adoptive local eddy-viscosity (WALE)* モデル (Nicoud and Ducros, 1999) の2つを実装した。いずれのモデルも Kolmogorov 定数から一意に定まるパラメタのみに依っており、アドホックなチューニングを必要としない。前者は先行研究において海面混合層発達過程の数値実験で Deardorff モデルより良い特性を示すことが確認されている。後者は特に複雑な形状の境界近傍において特性が良好かつ実装が容易であるという特徴があり、工学分野での適用例は多い(例えば OpenFOAM 等)が、海洋物理研究での適用例は筆者が知る限りまだ無い。

本研究では海洋表層混合層内でのマイクロプラスチック粒子の分散過程(図 2)を対象に、Smagorinsky モデル、FSF モデル、WALE モデルの3ケースを比較した。特に Smagorinsky モデルでは不安定となった海上風が 20m/s を超える条件においても、新たに実装した FSF および WALE モデルは安定かつ良い特性を示した。FSF と WALE モデルはそれぞれ全く異なる理論背景をもとに構築されており、実装コードも著しく異なるが、渦粘性係数や散逸率において同等の値を算出し(図 3)、両者ともに正しく機能していることが示された。今後は海底や海氷/棚氷底面における境界層の LES にも適用し、その特性を確認する予定である。

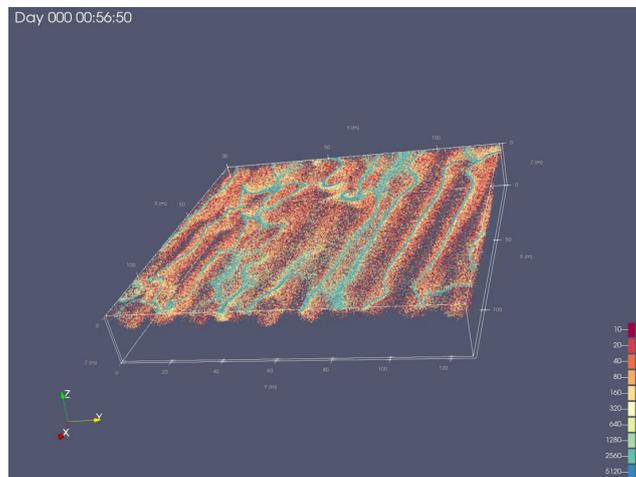


図 2: 海面混合層内のマイクロプラスチック粒子分散過程の LES 実験. Langmuir 循環様のロールが形成され、収束帯への粒子の集積によって筋状構造が可視化されている。色は粒子径 (10 μm – 5.12 mm)

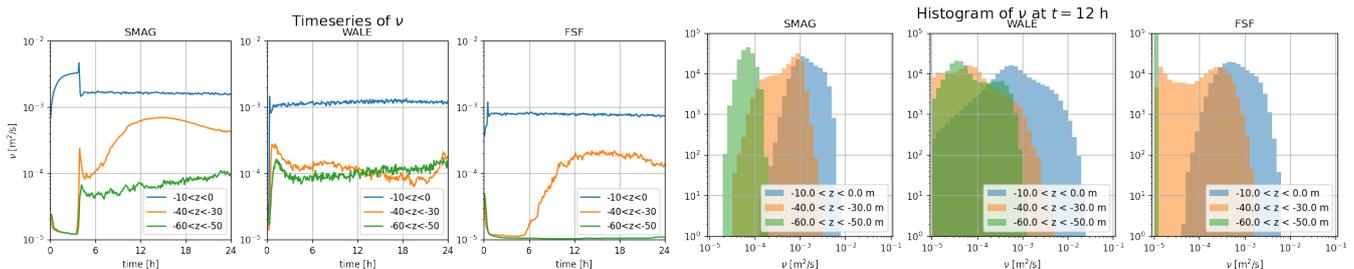


図 3: 海上風 10m/s, 海面波浪振幅 1.0 m を適用した海面混合層 LES 実験の結果. a) モデルで算出された渦粘性係数 (各深さでの平均値) の時間発展 b) $t=12\text{h}$ での渦粘性係数のヒストグラム. それぞれ左, 中央, 右が Smagorinsky モデル, WALE モデル, FSF モデル.

参考文献

Morlighem, M., et al. (2017). BedMachine v3: Complete bed topography and ocean bathymetry mapping of Greenland from multibeam echo sounding combined with mass conservation. *Geophys. Res. Lett.*, **44**, 11,051–11,061. <https://doi.org/10.1002/2017GL074954>

Mankoff, K. D., et al. (2020). Greenland liquid water discharge from 1958 through 2019. *Earth System Science Data* **12** (4), 2811–2841. <https://doi.org/10.5194/essd-12-2811-2020>

Ducros, F., et al. (1996). Large-eddy simulation of transition to turbulence in a boundary layer developing spatially over a flat plate, *J. Fluid Mech.*, **326**, 1-36.

Nicoud and Ducros, (1999). Subgrid-scale stress modelling based on the square of the velocity gradient tensor, *Flow, Turbulence and Combustion*, **62**, 183-200.

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

A numerical model study on the dynamics of atmospheric circulation variability over East Asia

中村 尚, 東大・先端研, E-mail: hisashi(at)atmos.rcast.u-tokyo.ac.jp
西井 和晃, 三重大, E-mail: nishii(at)bio.mie-u.ac.jp
田口 文明, 富山大, E-mail: taguchi(at)sus.u-toyama.ac.jp
岡島 悟, 東大・先端研, E-mail: okajima(at)atmos.rcast.u-tokyo.ac.jp
小坂 優, 東大・先端研, E-mail: ykosaka(at)atmos.rcast.u-tokyo.ac.jp
宮坂 貴文, 東大・先端研, E-mail: miyasaka(at)atmos.rcast.u-tokyo.ac.jp

Hisashi Nakamura, RCAST, The University of Tokyo
Kazuaki Nishii, Mie University
Bunmei Taguchi, Toyama University
Satoru Okajima, RCAST, The University of Tokyo
Yu Kosaka, RCAST, The University of Tokyo
Takafumi Miyasaka, RCAST, The University of Tokyo

要旨

2018年7月の我が国では、西日本を中心とする上旬の豪雨及び、その後の全国的な猛暑という、社会・経済への影響の大きな2つの極端現象が発生した。これらの極端現象は、日本周辺の大気循環偏差に伴って生じたと考えられるが、本研究では、大気大循環モデルのアンサンブル実験に基づき、それらの大気循環偏差に対する海面水温偏差の潜在的影響を評価した。7月上旬の日本東の高気圧性偏差とそれに伴う水蒸気輸送及び豪雨は、観測された海面水温を与えたアンサンブル実験では再現されず、観測された豪雨が主に大気の内部分動に伴う循環偏差に起因する事が示唆された。一方で、7月後半の日本を覆うような高気圧性偏差と高温偏差は、アンサンブル実験によって海面水温偏差に対する応答として良く再現された。これには、熱帯と中緯度北太平洋それぞれで観測された海面水温偏差が、北西太平洋上の大気循環の主要モードの強制を通じて寄与していた可能性がある。加えて、6月から7月にかけて持続した北西太平洋での亜熱帯ジェットの高気圧性傾向及び、北半球中緯度対流圏の高温偏差傾向に対して、観測された海面水温偏差が寄与していた可能性も示された。

1. はじめに

2018年7月、我が国では上旬に西日本を中心とする豪雨、そしてその直後の全国的な猛暑と、複数の気象災害が発生した。後に「平成30年7月豪雨」と命名された、7月上旬に発生した豪雨は、西日本を中心に広域で記録的な降水をもたらした。河川の氾濫や土砂崩れなどにより、犠牲者237名をはじめ甚大な被害を引き起こした。この「平成30年7月豪雨」に関しては、既に複数の調査が行われており、特に「西日本豪雨」と呼ばれる7月5日~7日をピークとする西日本の豪雨に対する水蒸気の輸送や収束の寄与について報告が行われている。例えば気象庁の全球大気再解析 JRA-55 に拠れば、西日本豪雨時には南西から流入した極めて多量の水蒸気が西日本全域で顕著に収束していた (Takemura et al., 2019)。実際、西日本の上空に流入した鉛直積算水蒸気量は過去60年において最大級で、かつ水蒸気収束量は過去最大であった。この収束をもたらした一因は、西日本付近に梅雨前線が停滞し続けたことであるが、これは上空の亜熱帯ジェット気流が朝鮮半島上空で南偏して本州東方海上で北偏するという蛇行が数日持続したことに伴っている (Shimpo et al. 2019)。さらに気象庁メソ解析データの活用により、「西日本豪雨」の記録的な降水を支えた多量の水蒸気流入偏差の大部分は強化された南風によるものであったが、それによる黒潮域からの蒸発増大がさらに水蒸気量に上乘せ効果をもたらしていた事も明らかとなった (Sekizawa et al. 2019)。「平成30年7月豪雨」の直後から8月まで持続した猛暑に関しては、下層の亜熱帯高気圧及び上層のチベット高気圧の強化 (Shimpo et al. 2019)に加えて、人為起源の地球温暖化の影響も指摘されている (Imada et al. 2019)。

しかし、これらの極端現象に対して日本周辺の海洋が果たした役割については不明な点が多い。特に、2018年7月には日本の南東海上から東海上において観測された+2度以上の暖水偏差は、観測されたような大気循環偏差の強制を通じて豪雨や猛暑に対して影響を及ぼし得ると考えられるが、その評価は十分に行われていない。

2. 問題設定・方法

上述の目的のために、本研究では、大気大循環モデルのアンサンブル実験に基づき、2018年7月の極端現象を引き起こした大気循環偏差に対する海面水温偏差の潜在的影響を評価した。大気大循環モデルとして AFES を水平解像度 T119 (~100km 格子)、鉛直56層で用い、全球に観測された SST をモデルの下方境界条件として与える GOGA 実験、熱帯域のみ観測された SST を与え他の海域を気候値 SST とする TOGA 実験、北太平洋中高緯度のみ観測された SST を与える MOGA 実験、全球で気候値 SST を与える CLM 実験の4アンサンブル実験を実施した。各実験のアンサンブルメンバー数は50で、2018年3/10から7/31まで計算を行った。SST データは OISST を用い、気候値は 1982-2013 年の平均として計算した。また、全球大気再解析データとして JRA-55 を

用いた。

3. 結果と考察

豪雨の期間 (6/28~7/8) の日本東の高気圧性偏差と、それに伴う水蒸気輸送及び豪雨は、観測された海面水温を与えたアンサンブル実験では再現されなかった。TOGA 実験及び GOGA 実験では、ともに日本の南海上の対流圏下層の低気圧性偏差の振幅が観測と比較して過大であり、それに伴って観測と異なる西向きの水蒸気フラックスが卓越していた。また MOGA 実験で得られた大気循環応答は非常に弱かった。7月上旬の豪雨をモデル実験が再現しない要因として、亜熱帯ジェット及び寒帯前線ジェットに沿って観測された波列が再現されていない点が挙げられるが、これらの波列は大気の内変動に伴って形成されていた可能性がある。

一方、猛暑の期間 (7/11~7/30) の日本を覆うような高気圧性偏差は、TOGA 実験において高温偏差と共に、アンサンブル応答としてよく再現された。TOGA 実験及び MOGA 実験においても日本周辺に高温偏差応答が見られ、その振幅は 0.7 度と 0.5 度と TOGA 実験の方がやや強いものの、MOGA 実験の応答の水平分布は観測された温度偏差により類似していた。観測及び各アンサンブル実験のメンバーに対して EOF 解析を行う事により、熱帯と中緯度北太平洋それぞれで観測された海面水温偏差が、北西太平洋上の大気循環の主要変動モードの強制を通じ、日本周辺の大気循環偏差の形成に寄与していた可能性を示唆する結果が得られた。加えて、6月から7月にかけて持続した北西太平洋での亜熱帯ジェットの北偏傾向及び、北半球中緯度対流圏の高温偏差傾向に対しても、これらの海面水温偏差の寄与の可能性が示された。

4. まとめと今後の展望

本研究では、大気大循環モデルのアンサンブル実験に基づき、2018 年 7 月の豪雨と猛暑を引き起こした大気循環偏差に対する海面水温偏差の潜在的影響を評価した。海面水温偏差に対する大気応答は 7月上旬の豪雨に伴う循環偏差を再現しなかったが、これは観測された豪雨が主に大気の内変動に伴う循環偏差に起因する事を示唆する。一方で、7月後半の日本周辺の大気循環偏差は大気大循環モデル実験の応答として再現され、観測された猛暑に対し、熱帯及び北太平洋中緯度の SST 偏差が少なくとも部分的には寄与していた事を示唆する。(Nishii et al. 2020)

本研究の結果は、2018 年 7 月の猛暑にある程度の予測可能性が存在する事を示すものであるが、アンサンブル実験においてその振幅は過小評価されている。それには大気モデルの解像度が不十分である可能性に加えて、アンサンブル実験で再現されなかった亜熱帯ジェット気流に沿った波列の寄与の可能性が挙げられるが、今後の更なる調査が必要である。

参考文献

- (1) Takemura, K., S. Wakamatsu, H. Togawa, A. Shimpo, C. Kobayashi, S. Maeda, and H. Nakamura, 2019: Extreme moisture flux convergence over western Japan during the heavy rain event of July 2018. SOLA **15A**, 49-54.
- (2) Shimpo, A., et al., 2018: Primary factors behind the Heavy Rain Event of July 2018 and the subsequent heat wave in Japan, SOLA, **15A**, 13-18.
- (3) Sekizawa, S., T. Miyasaka, H. Nakamura, A. Shimpo, K. Takemura, and S. Maeda, 2019: Anomalous moisture transport and oceanic evaporation during a torrential rainfall event over western Japan in early July 2018. SOLA **15A**, 25-30.
- (4) Imada, Y., M. Watanabe, H. Kawase, H. Shiogama, and M. Arai, 2019: The July 2018 high temperature event in Japan could not have happened without human-induced global warming. SOLA **15A**, 8-12.
- (5) Nishii, K., B. Taguchi and H. Nakamura, 2020: An AGCM assessment of oceanic impacts on extreme climatic events over Japan in July 2018. J. Climate Soc. Japan, **98(4)**, 801-820.

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 Hierarchical Structure of the Middle Atmosphere by Combining the PANSY Radar
Observation and High-resolution General Circulation Models

佐藤 薫, 東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻: kaoru@eps.s.u-tokyo.ac.jp
南原 優一, 東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻: minamihara@eps.s.u-tokyo.ac.jp
水越 将敏, 東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻: mizukoshi@eps.s.u-tokyo.ac.jp

Kaoru Sato, Graduate School of Science, The University of Tokyo
Yuichi Minamihara, Graduate School of Science, The University of Tokyo
Masatoshi Mizukoshi, Graduate School of Science, The University of Tokyo

要旨

論文投稿中につき、近日公開予定です。

大気海洋マルチスケール変動に対する数値的研究

Numerical research on multi-scale variability of atmosphere and ocean

佐々木 克徳, 北海道大学大学院理学研究院, E-mail: sasakiyo(at)sci.hokudai.ac.jp
松村 伸治, 北海道大学大学院環境科学研究院, E-mail: matsusnj(at)ees.hokudai.ac.jp
堀之内 武, 北海道大学大学院環境科学研究院, E-mail: horinout(at)ees.hokudai.ac.jp
見延 庄士郎, 北海道大学大学院理学研究院, E-mail: minobe(at)sci.hokudai.ac.jp
稲津 将, 北海道大学大学院理学研究院, E-mail: inaz(at)sci.hokudai.ac.jp
丹治 星河, 北海道大学大学院理学院, E-mail: seika(at)sci.hokudai.ac.jp
Yoshi N. Sasaki, Faculty of Science, Hokkaido University
Shinji Matsumura, Faculty of Environmental Earth Science, Hokkaido University
Takechi Horinouchi, Faculty of Environmental Earth Science, Hokkaido University
Shoshiro Minobe, Faculty of Science, Hokkaido University
Masaru Inatsu, Faculty of Science, Hokkaido University
Seika Tanji, Graduate School of Science, Hokkaido University

要旨 (明朝 9pt)

本研究の目的は、貴研究所の共同利用によって、大気海洋マルチスケール変動の解明を目的とした数値的研究を行うことである。本年度は特に東シナ海の温暖化に注目し、高解像度の領域海洋モデルと観測データを組み合わせた研究を行った。その結果、東シナ海の黒潮流軸付近と中国沿岸の大陸棚上の2か所の領域で20世紀の海表面水温の上昇トレンドが大きいことが明らかになった。また熱収支解析の結果、これらの水温上昇は海流の変動により生じていることがわかった。ただし、黒潮流軸付近の海流変動は東シナ海外の外力により生じているが、大陸棚上の海流変動は東シナ海上の局所的な大気変動により生じている。

1. はじめに

大気温暖化に伴い、海洋も温暖化が進んでいる。過去の観測データを用いた研究から20世紀の海表面水温の温暖化のスピードは、黒潮やメキシコ湾流などの西岸境界流域周辺で大きいことが明らかになっている(例えば、Wu et al., 2012)。本研究ではそのうち黒潮が流れる東シナ海に焦点を当てる。東シナ海の黒潮域も海表面水温の上昇トレンドが大きいことが報告されているが、その東シナ海の20世紀の海表面水温の上昇トレンドの詳細な空間構造や、そのメカニズムは明らかになっていない。観測データのみを用いてこれらの問題について解析を行う場合、衛星観測以前は観測による海表面水温データは空間解像度が低い、また20世紀前半は観測データそのものが少ないという問題がある。一方、数値モデルによるシミュレーションを行う場合、東シナ海は中国沿岸の浅い大陸棚や深い沖縄トラフが存在するなど海底地形が複雑で、外洋との接続している海峡も狭いため、空間的に高解像度のモデルが必要である。そこで本研究では、空間的に高解像度の領域海洋モデルを用いて東シナ海における20世紀の海面水温の再現実験と複数の感度実験を行い、水温上昇の詳細な空間構造とそのメカニズムを明らかにすることを目的として解析を行った。

2. 問題設定・方法

領域海洋モデルはROMS(Haidvogel et al. 2000)を使用した。領域は $23^{\circ}\text{N}\sim 41.5^{\circ}\text{N}$ 、 $116^{\circ}\text{E}\sim 132^{\circ}\text{E}$ であり、鉛直方向はシグマ座標で32層、空間解像度は $0.1^{\circ}\times 0.1^{\circ}$ である。期間は1871年から2010年までであるが、スピニングアップの期間を考慮し、解析には1901年から2010年を使用した。初期条件はWorld Ocean Atlas 2009の水温と塩分の気候値とし、流速、海面高度偏差はゼロである。大気境界条件はNOAAの20世紀再解析データの日平均データを使用した。海洋の側面境界条件は、海洋再解析データであるSODA 2.2.4の水温、塩分、東西・南北流速の月平均データを使用した。潮汐については、オレゴン州立大学提供の潮汐モデルの解を側面境界条件に追加して与えた。また長江による淡水流入はDai and Trenberth (2002)のデータの月気候値を用いて与えている。

海表面水温上昇のメカニズムを明らかにするために熱収支解析を行った。この熱収支式の各項(熱移流、拡散、大気からの熱フラックス、時間変化)については、モデル内でオンラインで計算を行った。また東シナ海の温暖化に対して、東シナ海上、あるいは東シナ海外からの外力が中であるかを明らかにするために、標準実験(CTLラン)に加えて、2種類の感度実験を行った。1種類目はモデルの側面境界条件を気候値にした実験である(以下、REMOTEラン)。もう1種類はモデル内の大気境界条件を日気候値にした実験である(以下、LOCALラン)。

3. 結果と考察

まずCTLランの海表面水温のトレンドについて、2種類の観測データとの比較を行った(Fig. 1a-c)。この結果、東シナ海の海表面水温上昇のトレンドが大きい領域は南西諸島西側の黒潮流軸付近と中国沿岸の大陸棚上の2か所存在することが明らかになった。またこの2つの領域におけるCTLランの水温上昇トレンドの振幅は、2種類の観測データの間位置し、モデルの結果は観測の水温上昇トレンドをよく再現している。なお、これらの水温上昇は季節的にみると冬に最も振幅が大きい。この2つの領域における水温上昇メカニズムを明らかにするために、海面から水深100mの水温変化について熱収支解析を行った。熱収支式の時間変化をもたらす要因を熱移流、拡散、大気からの熱フラックスの3つに分けて、どの影響が大きいのかについて解析を

行った結果、黒潮流軸付近と大陸棚上でも海洋内の熱移流の影響が大きいことがわかった。これに対して、大気からの熱フラックスはこの熱移流による水温上昇を妨げる方向に働いている。2つの領域のうち黒潮流軸付近では黒潮の水平流速の増加による熱移流の増加が水温上昇に最も寄与している。

また2種類の感度実験の結果、REMOTE ランは黒潮流軸付近の海表面水温上昇を再現することが(Fig. 1d)、LOCAL ランは大陸棚上の海表面水温上昇を再現することが明らかになった(Fig. 1e)。この結果は、この2つの領域の水温上昇のメカニズムが異なることを示す。すなわち、黒潮の水平流速の増加は、東シナ海上ではなく東シナ海外(モデル領域外)での外力の変動が重要であり、北太平洋上での風応力のトレンドを調べると、10°Nから20°Nの緯度帯で負のトレンドを示し、これが東シナ海での黒潮のトレンドに重要であることが示唆される。一方、大陸棚上の水温トレンドについては、東シナ海上における北風の弱体化傾向が、大陸棚上の循環を弱体化させている。

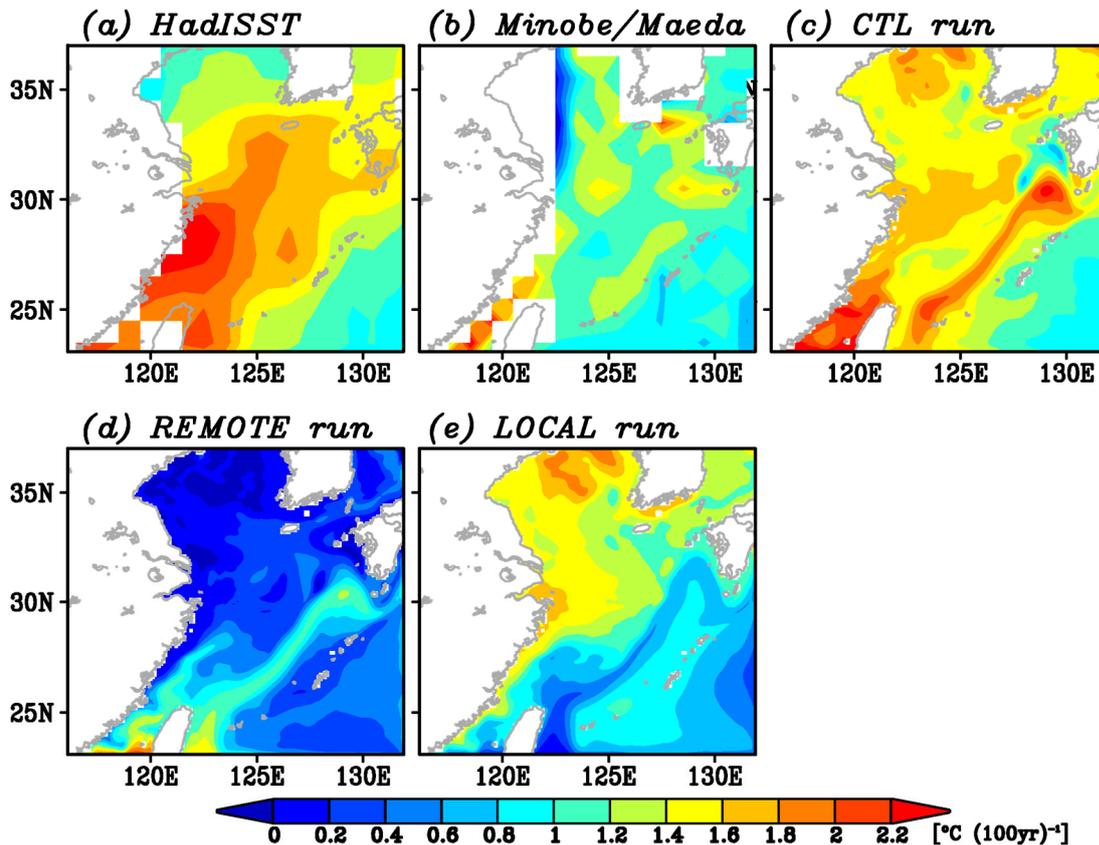


Fig. 1. Linear trend of sea surface temperature from (a) the HadISST dataset, (b) the Minobe/Maeda dataset, (c) the CTL run, (d) the REMOTE run, and (e) the LOCAL run. The HadISST dataset and the three model simulations cover the period from 1901 to 2010, while the Minobe/Maeda dataset covers that from 1901 to 2002.

4. まとめと今後の展望

本研究により、東シナ海では黒潮流軸付近と中国沿岸の大陸棚上の2か所の領域で20世紀の海表面水温の上昇トレンドが大きいことが明らかになった。またこれらの水温上昇は海流の変動により生じていることがわかった。ただし、黒潮流軸付近の海流変動は東シナ海外の外力により生じているが、大陸棚上の海流変動は東シナ海上の局所的な大気変動により生じている。なお以上の結果についてはSasaki and Umeda (2021)を元としている。来年度は、この東シナ海の温暖化に対する潮汐の影響について、より詳細に検討を行う予定である。

参考文献

- (1) Dai A, and K. E. Trenberth, 2002: Estimates of freshwater discharge from continents: latitudinal and seasonal variations. *J. Hydrometeorol.*, 3(6), 660–687.
- (2) Haidvogel, D. B., H. G. Arango, K. Hedstrom, A. Beckmann, P. Malanotte-Rizzoli, and A. F. Schepetkin, 2000: Model evaluation experiments in the North Atlantic Basin: simulations in nonlinear terrain-following coordinates. *Dyn. Atmos. Oceans*, 32, 239–281.
- (3) Sasaki, Y. N. and C. Umeda, 2021: Rapid warming of sea surface temperature along the Kuroshio and the China coast in the East China Sea during the 20th century. *Journal of Climate*, in press.
- (4) Wu, L. X., and Coauthors, 2012: Enhanced warming over the global subtropical western boundary currents. *Nat. Clim. Chang.*, 2, 161–166.