共 同 研 究 報 告 書

令和３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３年度共同研究報告書の発行にあたって

令和３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．世界海洋大循環モデルの相互比較
分担課題：大気海洋研究所および気象研究所の世界海洋大循環モデルの相互比較 7

３．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.....9

４．衛星データと数値モデルの複合利用による温室効果気体の解析
分担課題：温室効果ガス計測データの解析 11

５．全球雲解像モデルの開発及びデータ解析
分担課題：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.....13

６．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 15

７．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 17

８．総合気候・環境モデルの素過程モデル・モジュールの開発
分担課題：総合陸域シミュレータ ILS と MIROC の結合 19

９．高分解能大気モデル及び領域型気候モデルの開発
分担課題：アジアモンスーンの数値シミュレーションのための物理過程の高度化とデータ同化手法の開発.....21

【一般共同研究】

１．海洋モデルを用いたケープダンレー沖南極底層水の沈み込み過程の再現.....23

２．トッテン棚氷の海洋シミュレーション.....25

３．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.....27

４．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.....29

５．惑星中層大気大循環の力学.....31

６．海洋再出現過程に関する研究.....33

７．大気海洋マルチスケール変動に対する数値的研究.....35

８．金星気象現象の全球非静力学モデル NICAM による解明.....37

９．MIROC と NICAM を用いた地球型惑星における気候決定要因の理解.....39

１０．経年的な大気海洋変動が MJO の顕在化に果たす影響の定量的評価.....41

１１．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.....43

１２．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.....45

１３．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.....47

１４．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.....49

１５．気候モデル・全球雲解像モデルを用いた熱帯大気研究.....51

１６．全球雲解像モデルデータを用いた熱帯雲活動の解析.....53

１７．放射収支算定のための放射スキームの高速・高精度化 55

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.....57

１９．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.....59

２０．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.....61

２１．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.....63

２２．非静力学海洋モデルの汎用化と OGCM へのシームレスな接続 66

２３．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.....68

２４．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 69

令和3年度共同研究報告書の発行にあたって

気候変動に関する政府間パネル（IPCC） 第 6 次評価報告書 WGI 報告書が 2021 年 8 月に公表されました。産業革命以来の人為起源物質の放出による気候変動の確度がより顕在化したことに加え、熱波、干ばつ、豪雨などの極端現象の増加がより顕著になっていることが観測的事実からも指摘されました。2022 年のこの夏、欧州は山火事が発生するほどの記録的猛暑に見舞われ、ロンドンで史上初めて気温が 40℃を越すという事態になっており、地球温暖化に伴う気候変動影響の深刻さを物語っています。

一方で、2022 年 2 月に始まったロシアによるウクライナ侵攻を端緒とした戦争状態と、それに引き続くエネルギー不足や世界的な物価高騰、コロナパンデミックからの経済復興などが社会の関心の的となり、少なくとも日本では、7 月参議院選挙の論点として気候変動対策がほとんど議論されませんでした。気候変動問題は、取り返しのつかない状況を子孫にもたらすことを再認識し、科学的な理解の下に具体的な対策を急がなければなりません。

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。本報告書には、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、様々なアプローチによる研究成果が集められています。IPCC 第6次評価報告書にも本共同研究にご参画の皆さまの研究成果が多く引用されています。本共同研究が、これからも引き続き最先端の研究の場を提供すると共に、気候システムの理解を深め、社会の気候変動対策推進への一助ともなることを期待します。

令和4年7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

2021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	「衛星データと数値モデルの融合による雲の素過程の研究」 「全球雲解像モデルの開発及びデータ解析」	国立環境研究所 国立環境研究所・地球環境研究センター	五藤　大輔 打田　純也	主任研究員 特別研究員	鈴木　健太郎 佐藤　正樹	100,000	0	0	0
特定研究2	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 辻野　博之 豊田　隆寛 坂本　圭 浦川　昇吾	主任研究官 室長 主任研究官 主任研究官 主任研究官	羽角　博康	43,200	0	0	0
特定研究3	全球雲解像モデルの開発及びデータ解析	富山大学 富山大学	安永　数明 田中　瑞樹	教授 修士課程１年生	佐藤　正樹	120,000	40	80	120
特定研究4	衛星データと数値モデルの複合利用による温室効果気体の解析	鹿児島大学 地球環境学研究所	大橋　勝文 川崎　昌博	准教授 京都大学名誉教授	今須　良一	3,000	0	40	40
特定研究5	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 原　政之 山田　洋平 中野　満寿男	主任研究員 研究員 特任研究員 研究員	佐藤　正樹	40,000	0	0	0
特定研究6	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 永井　平 平野　雄介 Ying He	教授 特任研究員 大学院生 大学院生	羽角　博康	200,000	0	0	0
特定研究7	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	研究員	岡　顕	1,000	0	0	0
特定研究8	総合気候・環境モデルの素過程モデル・モジュールの開発	東京大学　生産技術研究所 東京大学大学院工学系研究科　社会基盤学 東京大学　生産技術研究所 東京大学　生産技術研究所 東京大学　生産技術研究所 東京大学　生産技術研究所 東京大学大学院工学系研究科　社会基盤学	芳村　圭 沖　大幹 山崎　大 Kim　Hyungjun 新田　友子 大沼　友貴彦 竹島　滉	教授 教授 准教授 特任准教授 助教 特任研究員 博士課程学生	渡部　雅浩	40,000	0	0	0
特定研究9	高分解能大気モデル及び領域型気候モデルの開発	気象庁情報基盤部　数値予報課 数値予報モデル技術開発室	氏家　将志 米原　仁 宮岡　健吾 木南　哲平 齊藤　慧 黒木　志洸 市川　悠衣子 須藤　康平	予報官 予報官 予報官 技術専門官 技術主任 技官 技官 技官	渡部　雅浩	16,000	0	0	0

2021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	海洋モデルを用いたケープダンレー沖南極底層水の沈み込み過程の再現	北海道大学低温科学研究所	大島　慶一郎	教授	羽角　博康	30,000	30	90	120
			中山　佳洋	助教					
			Mensah, Vigan	博士研究員					
一般研究2	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	阿部　彩子	35,000	30	180	210
			青木　茂	准教授					
		北海道大学大学院環境科学院	瓢子　俊太郎	大学院学生					
一般研究3	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	主任研究員	羽角　博康	300,000	0	0	0
			鈴木　立郎	研究員					
			草原　和弥	研究員					
			渡辺　路生	特任研究員					
			小室　芳樹	副主任研究員					
			小野　純	特任研究員					
			黒木　聖夫	特任准研究員					
一般研究4	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	東北大学大学院理学研究科	黒田　剛史	助教	佐藤　正樹	100,000	0	25	25
			寺田　直樹	教授	阿部　彩子				
			笠羽　康正	教授					
			早坂　忠裕	教授					
			Pradeep Khatri	講師					
			中川　広務	助教					
			狩生　宏喜	大学院生					
			小玉　貴則	特任助教					
		情報通信研究機構	笠井　康子	上席研究員					
		京都産業大学	佐川　英夫	教授					
		大阪府立大学	前澤　裕之	准教授					
一般研究5	惑星中層大気大循環の力学	九州大学応用力学研究所	山本　勝	准教授	佐藤　正樹	200	0	70	70
一般研究6	海洋再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	渡部　雅浩	15,000	0	0	0
			村田　壱学	大学院生					
一般研究7	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	高薮　縁	60,000	0	0	0
		北海道大学 大学院地球環境科学研究院	松村 伸治	博士研究員	羽角　博康				
		北海道大学 大学院地球環境科学研究院	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 將	教授					
		北海道大学 大学院理学院	丹治 星河	大学院生					
一般研究8	金星気象現象の全球非静力学モデルNICAMによる解明	京都産業大学	高木　征弘	教授	佐藤　正樹	120,000	0	210	210
		京都産業大学	佐川　英夫	教授					
		慶応義塾大学	杉本　憲彦	教授					
		東京海洋大学	関口　美保	准教授					
		京都産業大学	安藤　紘基	助教					
		国立環境研究所	八代　尚	主任研究員					
一般研究9	MIROCとNICAMを用いた地球型惑星における気候決定要因の理解	東京大学総合文化研究科	小玉　貴則	特任助教	阿部　彩子	100,000	0	50	50
		先進科学研究機構			佐藤　正樹				
		JAMSTEC　地球環境部門	斉藤　冬樹	研究員	宮川　知己				
		お茶ノ水女子大学基幹研究院	高須賀　大輔	研究員					
		理学部情報科学科							
		東京大学　大気海洋研究所	シェリフ多田野サム	特任助教					
		東北大学大学院　理学研究科	黒田　剛史	助教					
一般研究10	経年的な大気海洋変動がMJOの顕在化に果たす影響の定量的評価	お茶の水女子大学　基幹研究院	高須賀　大輔	日本学術振興会特別研究員PD	佐藤　正樹	50,000	0	0	0
		お茶の水女子大学　大学理学部情報科学科	神山　翼	助教					
		東京大学　大気海洋研究所	末松　環	特任研究員					
一般研究11	大型大気レーダーと全球高解像度モデルを相補的に用いた中層大気大循環の階層構造の解明	東京大学大学院理学系研究科	佐藤　薫	教授	羽角　博康	30,000	0	0	0
			高麗　正史	助教					
			南原　優一	博士課程大学院生					
			奥井　晴香	博士課程大学院生					
一般研究12	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	渡部　雅浩	50,000	0	0	0
			小坂　優	准教授					
			宮坂　貴文	特任助教					
			岡島　悟	特任助教					
			宮本　歩	特任研究員					
			関澤　偲温	特任研究員					
一般研究13	沿岸－沖合移行帯域における物理場と生態系に関する数値的研究	東京大学　大気海洋研究所	伊藤　幸彦	准教授	羽角　博康	51,840	0	0	0
			堤　英輔	特任助教					
			柴野　良太	特任研究員					
一般研究14	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	濱田　篤	准教授	高薮　縁	1,000	30	120	150
		富山大学学術研究部都市デザイン学系	安永　数明	教授					
一般研究15	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	渡部　雅浩	300,000	0	0	0
			神野　拓哉	大学院生					
			Ching-Shu Hung	大学院生					
			山崎　一哉	大学院生					
			坂井　彩織	大学院生					
一般研究16	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	西　憲敬	教授	佐藤　正樹	20,000	0	180	180
		富山大学学術研究部	濱田　篤	准教授					
		東京大学大学院理学系研究科	三浦　裕亮	准教授					
一般研究17	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	21	96
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	北海道大学地球環境科学研究院	増田　良帆	博士研究員	岡　顕	25,000	0	0	0
			山中　康裕	教授					
一般研究19	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	佐藤　正樹	50,000	0	0	0
			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					

2021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20	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	渡部　雅浩	8,000	0	0	0
			大和田　真由	大学院生					
			小川　公子	大学院生					
			木村　佳羽	研究生					
			坂田　百合絵	大学院生					
			鳥山　菜海子	大学院生					
一般研究21	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	羽角　博康	20,000	0	0	0
			松村　義正	助教					
			佐々木　千晴	学術支援職員					
一般研究22	非静力学海洋モデルの汎用化とOGCMへのシームレスな接続	東京大学　大気海洋研究所	松村　義正	助教	羽角　博康	150,000	0	0	0
		東京大学　大気海洋研究所	小松　幸生	准教授					
		東京大学大学院新領域創成科学研究科	王　業浩	大学院生					
		東京大学　大気海洋研究所	佐々木　千晴	学術支援職員					
		北海道大学低温科学研究所	中村　知裕	講師					
		北海道大学低温科学研究所	伊藤　薫	学術研究員					
		東京海洋大学	大橋　良彦	特任研究員					
		高度情報科学技術研究機構	山岸　孝輝	主査					
一般研究23	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	羽角　博康	6,000	0	0	0
			川口　悠介	助教					
			松浦　知徳	特任研究員					
			矢部　いつか	大学院生					
			張　愛き	大学院生					
			佐々木　雄亮	大学院生					
一般研究24	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	東京都立大学	高橋　洋	助教	渡部　雅浩	2,000	60	0	60
			神澤　望	特任研究員					
			北林　翔	大学院生					
特定共同合計		9	件			563,200	40	120	160
一般共同合計		24	件			1,524,540	225	946	1,171
合計		33	件			2,087,740	265	1,066	1,331

大気粒子と短寿命気体及び雲との相互作用に関するモデリング研究

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

五藤 大輔，国立環境研究所，E-mail: goto.daisuke(at)nies.go.jp
打田 純也，国立環境研究所，E-mail: uchida.junya(at)nies.go.jp
佐藤 陽祐，北海道大学大学院理学研究院，E-mail: yousuke.sato(at)sci.hokudai.ac.jp
Daisuke Goto and Junya Uchida, National Institute for Environmental Studies
Yousuke Sato, Faculty of Science, Department of Earth and Planetary Sciences
Hokkaido University

要旨

エアロゾルシミュレーションの不確定性の大部分は、エアロゾル湿性沈着過程の不確定性に起因する。そして、エアロゾル湿性沈着過程の中では雲内洗浄が重要である。そこで本研究では、非静力学正 20 面体格子大気モデルである NICAM の領域版である D-NICAM に、4 つの異なる雲内洗浄スキームを導入し、2011 年 3 月に起きた福島第一原子力発電所事故に伴う放射性セシウム 137（Cs-137）の粒子動態に関する感度実験を実施した。実験結果を既存の観測結果と比較したところ、概ね、±30%のバイアス、0.6-0.9 の相関係数、67-112 Bq m^{-3} の不確実性、<40%の精度（1/10 から 10 倍の範囲に収まる値の割合）となった。また、NICAM で計算している雲粒から雨粒への変換効率が過大評価であることも示唆された。そこで、雲・雨に関係する過程に注目し、NICAM に搭載された雲微物理モジュールや雲雨変換式を変えることで、Cs-137 の濃度場がどのように変わるのかを調べた。しかし、雲微物理関係のモジュールの違いに対する結果の変動幅は比較的小さく、Rainout の違いや Rainout 式のパラメータチューニングによる違いの方が変動幅は大きかった。つまり、雲微物理モジュールを変えるだけでは Cs-137 濃度再現性は向上しなかった。これは、着目した事例が中緯度の冬春季であることも要因として考えられる。

１．はじめに

エアロゾルの気候影響を高精度で評価するためには、エアロゾルの時空間分布に関する再現性を向上させることが必須となる。しかし、エアロゾルは時空間変動が激しく、シミュレーション精度はまだ十分ではない。これまで研究から、エアロゾルシミュレーションの不確定性の大部分は、エアロゾル湿性沈着過程の不確定性に起因することが知られている。そこで本研究では、エアロゾル湿性沈着に関連した過程の中で、雲内洗浄 (Rainout) および雲微物理過程の部分に注目し、福島原発事故に伴う放射性セシウム (Cs-137) を例にとって不確実性の定量化を目指した。

２．問題設定・方法

モデルは領域版 NICAM (Uchida et al., 2017) を用いて、水平解像度 3km で東日本での Cs-137 エアロゾルシミュレーションを実施した。Cs-137 エアロゾルは、吸湿性のある微小エアロゾルと仮定し、NICAM に搭載されたエアロゾルモジュールで取り扱っている硫酸塩エアロゾルの除去過程に従うとした。実施した 13 実験のうちの 9 実験では、4 つの異なる雲内洗浄スキーム（① GCM-Type：単純なチューニング除去定数を用いた全球気候モデルで用いられるスキーム、② GCM-Type：①と同じだが、降水の予報変数化や現実的な鉛直輸送を考慮した雲解像モデルに最適化したスキーム、③CONV-Type：地表面降水フラックスを用いて擬一次近似の仮定で表現した伝統的なスキーム、④ CTM-Type : オフライン化学輸送モデル CMAQ（Byunn and Schere, 2006）で用いられており、雲・降水フラックスや簡略化されたパラメータ分析アプローチを用いたスキーム）と、それぞれのスキームで用いられるチューニング変数を数パターン用いた。

さらに、雲・雨に関係する過程に注目し、NICAM に搭載された雲微物理モジュールや雲雨変換式を変えることで、Cs-137 の濃度場がどのように変わるのかを調べた。モデル設定としては、標準実験で利用している 1 モーメントの雲微物理モジュール (Tomita, 2008) を、2 モーメントの雲微物理モジュール (Seiki and Nakajima, 2014) に更新した。また、雲粒から雨粒への変換効率のスキームとして Berry (1968) を利用していたが、Khairoutdinov and Kogan (2000) を利用した。なお、これらの実験は、CRM-Type と CTM-Type のみに適用し、4 実験を追加した。

なお、本結果は Goto and Uchida (2022) にて公表しているので、詳細な設定は論文を参照されたい。

３．結果と考察

シミュレーションした Cs-137 を観測結果（Oura et al., 2015）と比較すると、±30%のバイアス、0.6-0.9 の相関係数、67-112 Bq m^{-3} の不確実性（RMSE）、<40%の精度（1/10 から 10 倍の範囲に収まる値の割合）となった。CRM-Type は最適な結果が得られたが、その結果を得るためにチューニング変数の下限値を用いる必要があった。GCM-Type と CONV-Type では適切なチューニング変数を設定すれば、適用可能なスキームであることもわかった。CTM-Type では相関が良く、不確実性が小さかったが、大きな負のバイアスが存在した。特に CTM-Type の結果から、NICAM で計算している雲粒から雨粒への変換効率が過大評価であることも示唆され、これは先行研究（Jing and Suzuki, 2018）とも整合的であった。

全部で 13 通りの実験を 3 分類し、Rainout の違い、Rainout の式で用いられたパラメータの違い、及び雲微物理関係のモジュ

ールの違いに対する Cs-137 濃度場の違いを、観測データを用いた統計指標毎に評価した（Fig.1）。この結果から、雲微物理関係のモジュールの違いに対する結果の変動幅は比較的小さく、Rainout の違いや Rainout 式のパラメータチューニングによる違いの方が変動幅は大きいことがわかった。雲微物理関係のモジュールの違いに対する結果の変動幅が小さかったのは、今回対象とした時空間が 3 月の東日本（中緯度の冬春季）であるため、降水過程が微物理過程よりも力学過程によって強く支配されているからと推察される。

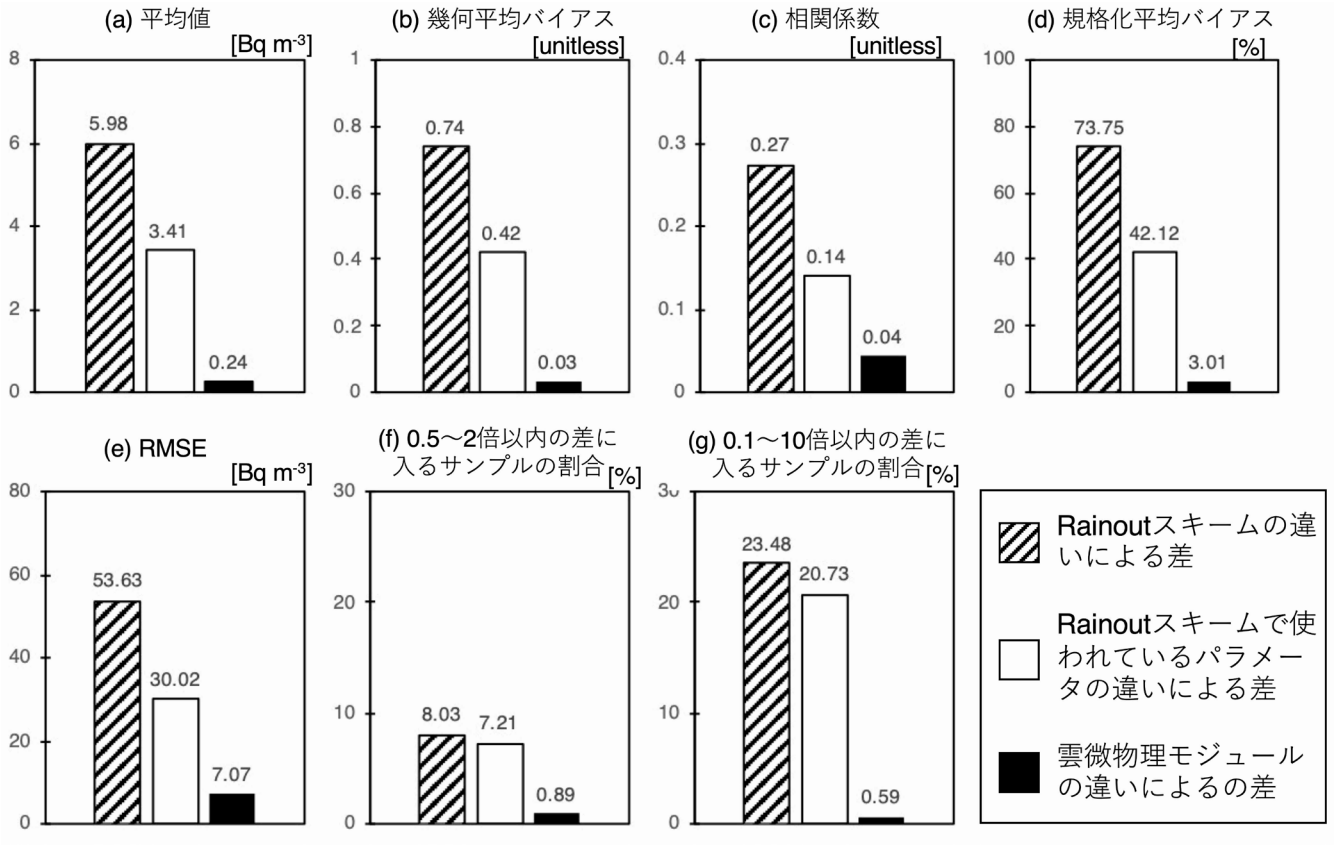

Fig. 1. 2011 年 3 月の東日本を対象に NICAM で計算した Cs-137 と観測との統計的指標に関する不確実性。統計的指標は、(a) 平均値 [Bq m^{-3}]、(b) 幾何平均バイアス、(c) 相関係数、(d) 規格化平均バイアス[%]、(e) RMSE [Bq m^{-3}]、(f) 0.5 から 2 倍以内の差に入るサンプル数 [%]、(g) 0.1 から 10 倍以内の差に入るサンプル数 [%]である。不確実性はカテゴリーに分類された中での結果のばらつきで表現しており、カテゴリーは図右下の枠に書かれた 3 つとした。なお、この図は Goto and Uchida (2022) の図 11 を引用している。

４．まとめと今後の展望

エアロゾルシミュレーションを改善するには、雲内洗浄の定式化を現象の素過程に立ち返って精緻化することが重要であることがわかった。また、エアロゾル湿性沈着に関わる雲微物理モジュールや雲雨変換式がエアロゾル分布に及ぼす影響は無視できるものではないと考えられているため、今後は異なる事例を対象として評価していきたい。

今後の展望としては、改良されたモデルを用いて、エアロゾル排出量変化に対する気候応答評価を実施したい。

参考文献

（1）Berry E. X., 1968: Modification of the Warm Rain Process. *Proceedings first conference on weather modification,* Albany, NY*,* 81–85.
（2）Byun D., and K. L. Schere, 2006: Appl. Mech. Rev., 59, 51–77.
（3）Goto D., and J. Uchida, 2022: J. Meteorol. Soc. Japan, 100(1), 197-217.
（4）Jing X., and K. Suzuki, 2018: Geophys. Res. Lett., 45, 10729–10737.
（5）Khairoutdinov M., and Y. Kogan, 2000: Mon. Wea. Rev., 128, 229–243.
（6）Oura Y., M. Ebihara., H. Tsuruta, T. Nakajima, T. Ohara, et al., 2015: J. Nucl. Radiochem. Sci., 15, 2_1–2_12.
（7）Seiki T., and T. Nakajima, 2014: J. Atmos. Sci., 71, 833–853.
（8）Tomita H., 2008: J. Meteor. Soc. Japan, 86A, 121–142.
（9）Uchida J., M. Mori, M. Hara, M. Satoh, D. Goto, T. Kataoka, K. Suzuki., and T. Nakajima, 2017: Mon. Wea. Rev., 145, 5059–5082.

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（2）

Ocean model intercomparison of AORI and MRI (2)

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
豊田　隆寛、気象研，E-mail: ttoyoda(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
Takahiro Toyoda, 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

2020 年度には、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」の相互比較の基盤として、海洋モデル相互比較プロジェクト日本版「OMIPj」を両モデル開発グループの協力で立ち上げた。 2021 年度には、このOMIPj を基盤として、両モデル開発者により実際にマルチモデル実験の実行と解析を試みた。

１．はじめに

2020 年度の本共同研究では、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。我々はこの取り組みに「海洋モデル相互比較プロジェクト日本版(OMIPj)」と命名し、定期的なオンライン会合、実験仕様のすり合わせ、解析ツールの共有化等を行っている。その背景や詳細については 2020 年度の共同研究報告書を参照されたい。2021 年度は、上記の環境を基盤として、両モデル開発者により実際に複数モデル実験の実行と相互比較を試みた。本報告では、まず相互比較の具体的な進め方を説明し(2 節)、比較解析の結果の一部を紹介する(3 節)。

２．相互比較の進め方とモデル

OMIPj では 2 つのモデル結果を単に比較するだけでなく、実験仕様の策定から実行、解析まで、プロジェクト参加者で常に議論・共有することを目的とした。具体的には以下の手順で進めた。

1. 実験仕様の策定 － 相互比較のテーマについて両モデル開発者で議論し、気候的的な海洋循環場に関する最新モデルの基本的な性能調査を目的とした。具体的には OMIP 実験(CMIP6 下の海洋大循環相互比較プロジェクトの実験プロトコル, Tsujino et al. 2020)を最新のソースコードで再実施するとした。実験期間は 1958 年から 2018 年とし、初期値のスピンアップ手順は各モデルに委ねた。
2. 実験の実行 － 各モデル開発者が通常用いるマシン環境で、それぞれの実験を行った。その際に、Fig.1 に示すように、モ

実験仕様

仕様	COCO	MRI.COM
モデルver	リビジョン 200:92137af37658	4.7.09
水平座標系	Tripolor (Murray 1996)	Tripolor (Murray 1996)
水平解像度	1°	1°*0.5° (10S-10Nの範囲は0.3°)
水平グリッド数	360*256	364*366
鉛直座標	Z+σ(自由海面)	Z*
鉛直層	62層+BBL	60層+BBL
時間積分スキーム	staggered time-stepping	LFAM3
運動量移流		Takano and Oonishi (Ishizaki and Motoi, 1999)
水平粘性	ラプラシアン等方、緯度依存係数	ラプラシアン非等方 (Smith and McWilliams, 2003) + Smagorinsky型係数
背景鉛直粘性	10^{-4} m^2 s^{-1}	10^{-4} m^2 s^{-1}
トレーサー移流	SOM (Prather 1986)	SOM (Prather 1986)
中規模渦パラメタリゼーション	等密度面拡散(Cox, 1987)+層厚拡散 (Gent et al., 1995)	Gent and McWilliams (1990) + 層厚拡散 (Danabasoglu and Marshall, 2007) + 海面テーパリング(Danabasoglu et al. 2008), 等密度面拡散 (Large et al. 1997)
背景鉛直拡散	Kawasaki et al. (2021) (潮汐モデルの結果を使用した3次元分布)	Decloedt and Luther (2010)
混合層	GLS (Umlauf and Burchard, 2003)	GLS (Umlauf and Burchard, 2003)
BBL	Nakano and Suginohara (2002)	Nakano and Suginohara (2002)
海氷モデル（力学）	EVP (Hunke and Dukowicz, 1997)	EVP (Hunke and Dukowicz, 1997)
海氷モデル（熱力学）	Komuro et al. (2012)	Mellor and Kantha(1989)ベース

Fig. 1 An experimental specification table for COCO and MRI.COM. Comparisons of various specifications are summarized on GitHub, but here are some of them.

デルの仕様を詳しく比較表にまとめ、お互いの開発状況を共有した。トレーサー移流など共通のスキームも多い一方、それぞれのモデルの特色となる部分も明らかになった。

3. 出力データの共有 － 各モデルの初期設定では異なったフォーマットで出力されるが、本実験では月毎の netCDF フォーマットの出力に統一した。出力ファイルは東京大学 Oakforest-PACS に置き、参加者全員がどちらの結果にもアクセスできるようにした。
4. 解析のテーマ選定と実行 － 参加者の興味に応じて分担を決め、解析を行った。その際に、2020 年度に作成した Python ツールを必ず用いて、常に両モデルの結果を 1 つのスクリプトで描画した。(これを可能にするスクリプトの作り込みについては 2020 年度の報告書を参照せよ。)
5. 解析結果の共有 － 解析結果の図は、GitHub 上の OMIPj プロジェクトページで共有した。特に Wiki を活用し、両モデルの特徴を示す代表的な結果をわかりやすく示した(図は省略)。

３．結果

比較解析において、全球水温分布など基本的な特徴は両モデルとも現実的な結果が得られた(図は省略)。これは、OMIP 等への参加によって既によくチューニングされていることから不思議ではない。一方、いくつかの詳しい解析では両モデルの違いも示された。その一例として、北極圏の海氷面積と体積の時系列を Fig.2 に示す。季節変動の振幅や長期的な変化傾向(面積は微減、体積は明確な減少)は、両モデルに共通している。 しかし、面積は MRI.COM が 2 割大きいが体積は COCO が 3 割大きいなど、両者の違いも明らかである。もう一つの例として、大西洋子午面循環の流量の時系列を Fig.3 に示す。MRI.COM では変動は小さいのに対し、COCO は継続的に低下する。これは COCO ではモデルのスピンアップが不十分であったためと考えられ、現在、スピンアップを伸ばして再実験を行っている。COCO の再実験結果の時系列が得られれば、各モデル流量の大きさや、MRI.COM に見られる 1990 年代後半の増大などをより詳細に検証できると期待される。

４．まとめと今後の展望

去年度に立ち上げた OMIPj をモデル相互比較の基盤に用いることで、実際にマルチモデル実験・解析を行うことに成功した。共通の仕様と最新のソースコードを用いて比較実験する試みは日本国内の海洋大循環モデルの開発では例がなく、得られた比較結果は今後のモデル開発の指針として有用である。加えて、実験の共通仕様を策定する手順の確立や、モデルを横断して解析する Python ツールの共有など、海洋モデル相互比較を円滑に行う環境をほぼ整備しつつある。今後も OMIPj の枠組みで、国内海洋モデル開発者の協力を進めていきたい。

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.

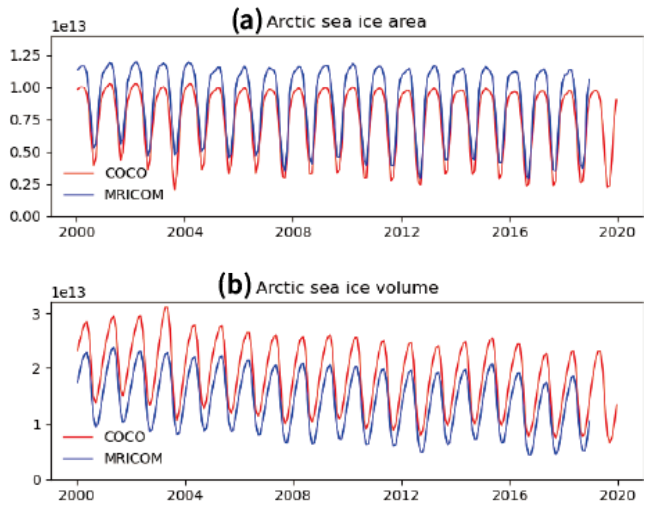

Fig. 2 Time series of the Arctic sea ice (a) area [m^2] and (b) volume [m^3]. The red lines indicate COCO, while blue lines MRI.COM. Only after 2000 is shown.

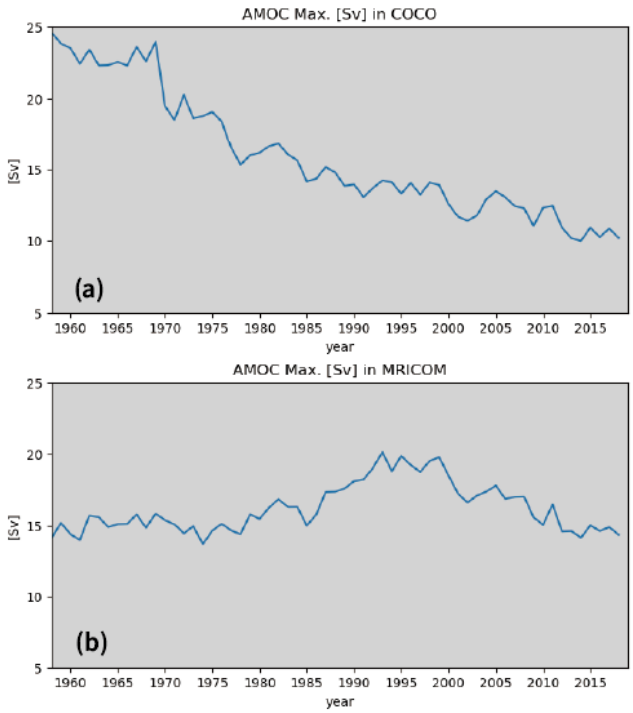

Fig. 3 Time series of the transport of the Atlantic meridional circulation in (a) COCO and (b) MRI.COM.

雲解像モデルにおける物理過程の高度化

Development of Cloud Microphysics Prameterization in a Nonhydrostatic Cloud-system Resloving 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，その自己組織化過程における外的要因や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。昨年度はコリオリパラメータに着目して，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。一連の実験の解析から，数値モデルで暗黙的に指定されていた周期的な初期場への回帰が，結果に影響を及ぼしている可能性が示唆されたため，今年度は設定を見直して緯度 0 度の数値実験を再度行い，自己組織化と湿潤静的エネルギーの時間変化の関係を調べた。湿潤静的エネルギーの収支式の各項を降水や湿潤静的エネルギー自身に射影して，その寄与を計算したところ，移流項に関しては自己組織化を阻害する方向，その他の項に関しては，自己組織化を促進する方向に働くという先行研究と同様の結果が得られた。今後は，雲微物理過程の影響について調べることを目的に，幾つかの数値実験を進めていく計画である。

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にする。

数値実験では，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 4 km（東西 512 ×南北 512 格子）とし，計算領域は 2048 km× 2048 kmで，側面に周期境界条件を課している．鉛直層数は 80 層で，最下層 50 m，最上層 1250 m の上層に向けて粗くなるストレッチグリッドを使用している．モデル上端は高度約 27 km とし，音波や重力波の反射を軽減するため上層約 10 km に，レイリー摩擦によるスポンジ層を設定している．計算の初期場には，狭領域（128 km× 128 km）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 2048 km× 2048 kmに水平一様に与えている．更に，下端の境界値として，30℃で一様な海面温度を与えている．昨年度においても同様の実験設定で，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。これらの結果を比較したところ，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，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．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．こうした結果の一方で，数値モデルで暗黙的に指定されていた周期的な初期場への回帰が，組織化の違いに影響を及ぼしている可能性が示唆されたため，本年度は初期場への回帰を取り除いて緯度 0 度の数値実験を再度行い，自己組織化と湿潤静的エネルギーの時間変化の関係を調べる。

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，鉛直積算した MSE の収支式を水平方向に２次元の波数分解した

$$\partial h_{(k,l)}/\partial t = ADV_{(k,l)} + Qr_{(k,l)} + SHF_{(k,l)}$$

に基づき組織化のメカニズムを議論する。ここで，ADVは移流，Qrは放射，SHFは下面からの熱フラックスを示し，k,lは東西，南北波数を表す。この両辺に$h_{(k,l)}$の複素共役を掛けて実数部分に着目することで，左辺は

$$\partial h_{(k,l)}/\partial t \times \ h^*_{(k,l)} = 1/2 \times \mathrm{Re}(\partial h^2_{(k,l)}/\partial t)$$

と書き直せるので，各波数のエネルギーの時間変化と理解できる。このことから

$$\mathrm{Re}(ADV_{(k,l)} \times \ h^*_{(k,l)}) + \mathrm{Re}(Qr_{(k,l)} \times \ h^*_{(k,l)}) + \mathrm{Re}(SHF_{(k,l)} \times \ h^*_{(k,l)})$$

の各項の正負で，ある波数のエネルギーを増やす方向に働いているのか，減らす方向に働いているのかが判断できる。

３．結果と考察

図１は，波数展開した湿潤静的エネルギーの時間変化に，湿潤静的エネルギー自体の複素共役を掛けた値の実数部分の時間変化である。数値実験開始の５日後ぐらいから，高波数から低波数に向かってエネルギーが増大していく様子が確認できる。また４０日から６０日と７２日以降では，低波数の振幅が減少していく傾向にある。移流項に関しては，ほとんど常に負となっており，４０日から６０日と７２日以降の低波数の振幅の減少に大きな寄与をしている（図２）。下面からの熱フラックスは，６０日から７０日を除いて正の傾向が優位で，特に数値実験開始においては長波放射と並んで最も早くから低波数のエネルギーの増加に寄与している（図３）。放射過程に関しては常に正となっており，特に低波数のエネルギーの増加の主原因となっていることが分かる（図４と図５）。一方で，短波放射と長波放射で若干の時間的なずれが見られ，前者の過程は後者の過程よりも後に有効となるという違いがある。こうしたそれぞれの項の寄与に関しては，先行研究（例えば，下記１，２）とおおよそ一致しているが，波数展開した鉛直積算湿潤静的エネルギー（MSE）の方程式に着目して，組織化のメカニズムの違いを定量的に評価できるのが本研究手法の特徴である。

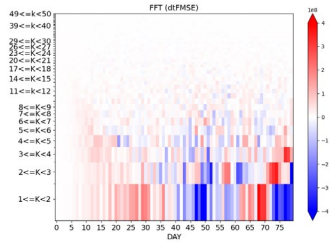

Fig. 1 : Time variations of the amplitude of vertically-integrated moist static energy with each wavenumber.

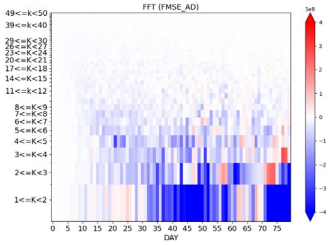

Fig. 2 : Time variations of the amplitude of advection projected onto the vertically-integrated moist static energy.

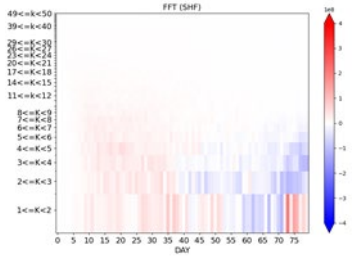

Fig. 3 : Same as Fig. 2, except for the surface heat fluxes.

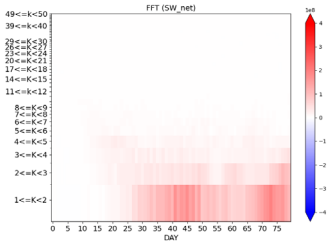

Fig. 4 : Same as Fig. 2, except for the shortwave radiation.

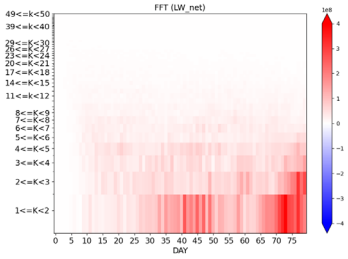

Fig. 5 : Same as Fig. 2, except for the longwave radiation.

４．まとめと今後の展望

本研究では，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，熱帯擾乱の発達に伴う対流の組織化について調べた． 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，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）が強くなったり，弱くなったりする様子が確認された．湿潤静的エネルギーの収支式も同様に波数展開することで，移流項は自己組織化を阻害する方向，海面熱フラックスや放射過程は自己組織化を促進する方向に働くことが分かった。こうした違いの詳細な物理メカニズムや，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.

(2) 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 cocentrations 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付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。この解析にて、令和２年度に行った FES-C によるデータ解析手法を OSA 観測データ用に改良したものを用いた。

１．はじめに

近年，温室効果ガスの二酸化炭素量の大気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、東京学芸大学付属高校の屋上に OSA を設置して行っている。その後、Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC) [1]の再解析データから観測地・観測時間で内挿した値から高度・気象データを算出して、さらに気象庁が提示している観測場所・観測場所付近の地上の気象データ[2]で、補正を行った高度・気象データにより観測地の吸収スペクトルをシミュレートすることで観測データを解析した。データ解析には東京大学大気海洋研究所のスパコン等を用いた。

３．結果と考察

長期にわたり計測した観測データを解析する前に、国立環境研究所が所有している FTS との同時計測により得られたデータの解析結果と国立環境研の解析データとを比較して、計測機器の特性および当方の解析システムによる感度係数(SF)を 0.973 と見積もった。

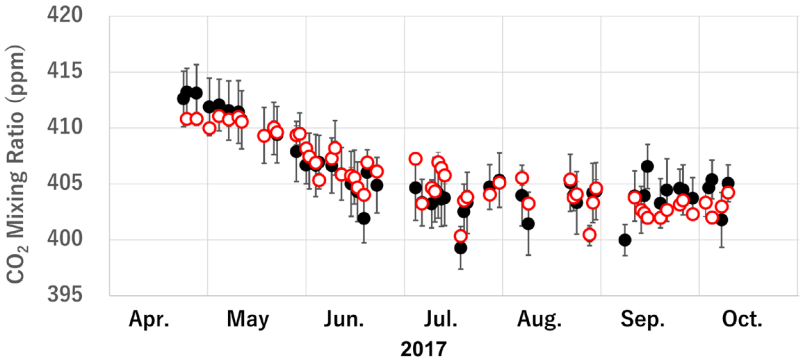

図1　国立環境研究所で観測した OSA 補正値と FTS 値の比較（Solar Time 10 時から 14 時）
●OSA 補正値の平均値（エラー値：標準偏差）OSA 補正値＝OSA/SF（SF:0.973）○ FTS 値（エラー値：標準偏差）

2018 年 2 月 6 日から 2021 年 2 月 10 日まで、東京学芸大学附属高校屋上で観測した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２）。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。

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

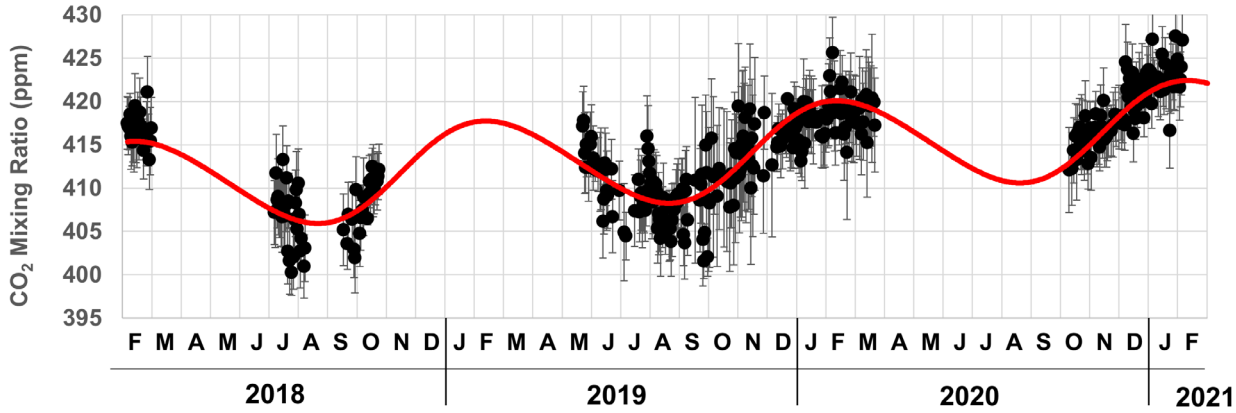

図2 東京学芸大学附属高校での CO2 平均カラム量解析結果（Solar Time 10 時から 14 時）
●OSA 補正値の平均値（エラー値：標準偏差）OSA 補正値＝OSA/SF（SF:0.973）赤線 Fitting 曲線

表１　Fitting 関数の係数表

Site	$I_{ntercept}$ (ppm)	T_{rend} (ppm/y)	Amp_1 (ppm)	Amp_2 (ppm)	Max. Month	Min. Month	Ref.
東京	400.5	2.34	5.32	0.38	2	9	This Work
南鳥島	393.3	2.87	3.62	1.45	5	9-10	7
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

国立環境研究所が所有している FTS との同時計測により得られた OSA 観測データの解析結果と国立環境研の解析データとを比較して感度係数(SF)を 0.973 と見積もった。その感度係数を用いて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った。今後は、解析データと観測衛星データと比較や東京学芸大学付属高校や南鳥島での観測結果を解析する予定です。

参考文献

[1] https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets/M2I3NPASM_5.12.4/summary?keywords=M2I3NPASM

[2] https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php

[3] M. Inoue, et. al., "Validation of XCO2 derived from SWIR spectra of GOSAT TANSO-FTS with aircraft measurement data", Atmos. Chem. Phys., 13, pp.9771–9788 (2013).

[4] Xiu-Chun Qin, et. al. "Observation of column -averaged molar mixing ratios of carbon dioxide in Tokyo", Atmospheric Environment X, 2, pp. 1-8, (2019).

[5] https://data.caltech.edu/records/958

[6] https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/

[7] 令和２年度気候システム研究系共同研究報告書

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

Advancemant 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

西太平洋の台風活動に対する海面水温偏差の影響を明らかにするため、台風活動の活発だった 2018 年夏季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、台風の応答を調べた。亜熱帯中部太平洋の高い海面水温を気候値に置き換えた実験（SPCLIM）,熱帯太平洋を気候値に置き換えた実験（TPCLIM）を行い、現実再現実験（CLIM+）および全球気候値実験（CLIM）と比較した結果、亜熱帯（熱帯）の高温偏差は大規模な循環場の応答を介して、西太平洋東部（西部）の台風活動に大きな影響を及ぼすことが分かった。この結果は、西太平洋域内の台風分布の予測において、海面水温偏差およびその影響を詳細に把握することの重要性を示唆する。

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、熱帯および日本付近に大きな影響を及ぼす気象擾乱のメカニズムや現象間および環境場との相互関係を理解し、現象の再現性・予測性能の向上に資する知見を得ることを目的とする。本年度は、西太平洋における台風活動に対する海面水温偏差の影響について、先行研究（Qian et al. 2019）において行った 2018 年夏季を対象とする NICAM を用いた数値実験について調べた。本稿では、亜熱帯および熱帯の海面水温偏差の影響に関する結果を報告する。

２．問題設定・方法

2018 年夏季は西太平洋における台風の活動が活発で（発生数 29 個/平年値 25 個）、日本への接近数も多かった（16 個/平年値 11.7 個）。図 1 に数値実験において用いた海面水温偏差分布を示す。亜熱帯中部太平洋、熱帯中部～東部太平洋に高温偏差がみられる。これらの海面水温偏差が大規模循環場や台風の存在密度・強度にどのようなインパクトをもたらすかを明らかにするため、それぞれの海域の海面水温を気候値に置き換えた数値実験（STCLIM, TPCLIM）を行い、全球の海面水温偏差を与えた実験（CLIM+）および全球気候値を与えた実験（CLIM）との比較解析を行った。数値実験は、2018 年 7—9 月とし、海面水温データには全球大気海洋結合モデルによる出力（12 メンバー）を用い、大気初期値には、JRA-55 を用いた。NICAM の設定として、水平 14km 格子、鉛直 38 層を用い、対流は雲微物理スキームを用いて陽に計算した。台風の検出は、海面気圧の極小値を追跡し、10m 高度の風速（＞17.5 m s^{-1}），850hPa 面の相対渦度、温暖核等の条件に基づいて行い（Nakano et al. 2015）、台風（TC）・台風初期渦（TD dvlp）・台風にならなかった渦擾乱（TD nondvlp）の存在密度（1 度格子）を算出した。

３．結果と考察

Fig. 2 に期間平均の台風の存在密度の比較を示す。標準実験（CLIM+）は、平年（CLIM）に比べて西太平洋の東部で台風が活発だった 2018 年の特徴を再現している（Fig.2a, d)。SPCLIM では、全般的に台風が抑制され、特に海面水温の正偏差のピーク域である 160E 以東での抑制傾向が顕著である（Fig. 2a, b；Qian et al. 2019 の主張と整合的)。これは海面水温正偏差域による上昇流強化（Fig. 3a）がこの海域の台風活動に寄与していたことを示唆する。TPCLIM では、160E 以東の台風は CLIM+と余り変わらないが、160E 以西では台風が著しく抑制されており、CLIM に比べても少ない（Fig. 2a, c, d)。循環場の違いを確認すると、西太平洋における下層発散偏差に加え、TPCLIM では西太平洋の 0－20N にわたる緯度帯で上昇流が顕著に減じている（Fig.3)。このことから、台風発生・発達においてこの海域の上昇流を維持することが重要であり、熱帯の海面水温偏差については、直下よりむしろ中部太平洋太以東の正偏差の影響が大きいことが分かる。

台風（TC）の変化を理解するうえで、台風の種となる擾乱（TD）の変化を把握することは有用である。Table 1 に、西太平洋（160E 以東）の TC と TD の存在密度を示す。TC,TD を併せた存在密度は、いずれの実験でも CLIM+に比べ減少している一方、TC にならない TD は増加している。CLIM では、TD の存在密度が多く（CLIM+より増)、台風の種から台風への成長割合が最も低い。この結果は、亜熱帯・熱帯太平洋の広域にわたる海面水温正偏差が、台風の種の台風への成長を助長していたことを示唆する。また、SPCLIM や TPCLIM では、TC に成長する TD の存在密度が CLIM+および CLIM よりも少なくなっており、これらの海面水温に伴う環境場の違いが、台風になる擾乱とならない擾乱の分離に影響し、前者は比較的速やかに台風に成長したことが推察される。

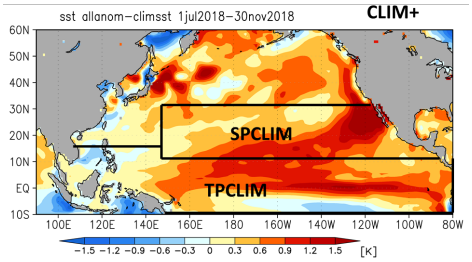

Fig. 1 Sea Surface Temperature anomaly in July-September 2018, which is used in the experiments. The box domains are replaced with zero in SPCLIM and TPCLIM.

Table 1 Area-accumulated track density in (5-45N, 115-160E) for the ensemble means of July-September 2018. Numbers in the parenthesis indicate percentage in each case. See text for the details of TC/TD categories.

Case	TC	TD (dvlp)	TD (nondvlp)	ALL
CLIM+	1.058 (43)	0.327 (13)	1.071 (44)	2.457
CLIM	0.735 (31)	0.339 (14)	1.282 (55)	2.356
SPCLIM	0.776 (36)	0.257 (12)	1.132 (52)	2.166
TPCLIM	0.726 (36)	0.209 (10)	1.102 (54)	2.037

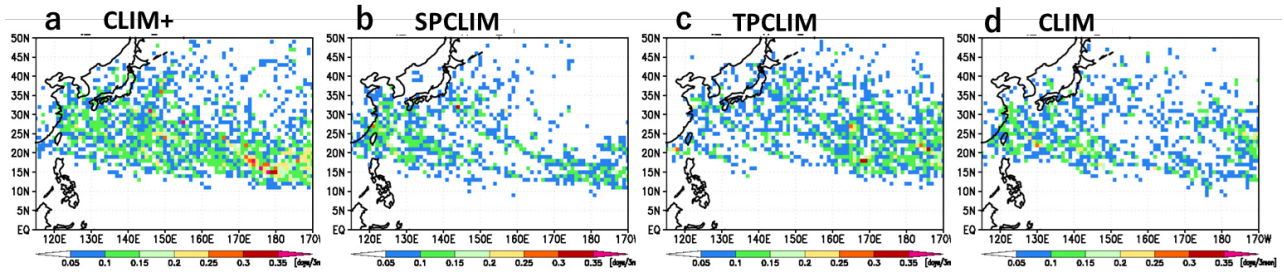

Fig. 2 Simulated track density (days/3 month) of TC in (a) CLIM+, (c) SPCLIM, (d) TPCLIM, and (d) CLIM.

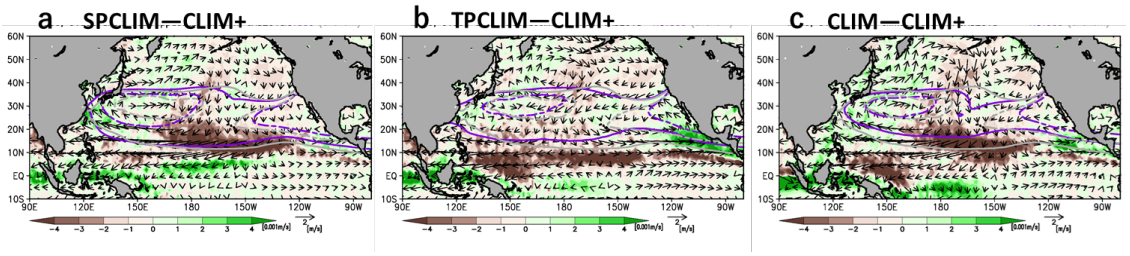

Fig. 3 The period mean anomalous 500-hPa vertical velocity (shade) and 850-hPa wind vector in (c) SPCLIM, (d) TPCLIM, and (e) CLIM. Anomalies from CLIM+ are shown.

４．まとめと今後の展望

西太平洋の台風活動に対する海面水温の影響およびそのプロセスを理解することを目的として、西太平洋における台風活動の活発だった 2018 年夏季を対象とする NICAM を用いた感度実験を行った（中緯度海面水温の影響については、Nasuno et al. 2022 で報告）。その結果、亜熱帯（熱帯）の高温偏差は大規模な循環場の応答を介して、西太平洋東部（西部）の台風活動に大きな影響を及ぼし、日本を含む西太平洋西部の台風活動については、（下層渦度等の違いよりも）0－20N の鉛直流の変化の感度が高いことが分かった。また、太平洋の広域にわたる高温偏差により、台風の種となる渦擾乱から台風への成長が促進されること、台風になる擾乱とならない擾乱の選別や成長割合にも変化をもたらすことが示唆された。今後の研究において、台風の種や成長率の変化の内容・要因を明らかにするとともに、他の年についても調査し、より包括的な知見を得る必要がある。

謝辞

NICAM の計算には京コンピュータを用い(課題番号 hp180182)，ポスト処理には JAMSTEC の Data Analyzer を用いた。数値実験の設計および海面水温データについて、NOAA GFDL の村上裕之氏にご協力頂いた。

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) Qian, Y., H. Murakami, M. Nakano, P.-C. Hsu, T. L. Delworth, S. B. Kapnick, V. Rammaswamy, T. Mochizuki, Y. Morioka, T. Doi, T. Kataoka, T. Nasuno, and K. Yoshida, 2019: On the Mechanisms of the Active 2018 Tropical Cyclone Season in the North Pacific, Geophys. Res. Lett., 46, 12293-12302.

(3) Nakano, M., M. Sawada, T. Nasuno, and M. Satoh, 2015: Intraseasonal variability and tropical cyclogenesis in the western North Pacific simulated by a global nonhydrostatic atmospheric model. Geophys. Res. Lett., 42, 565-571.

(4) Nasuno, T., M. Nakano, H. Murakami, K. Kikuchi, and Y. Yamada, 2022: Impacts of midlatitude western North Pacific sea surface temperature anomaly on the subseasonal to seasonal tropical cyclone activity: case study of boreal summer 2018, SOLA, accepted.

海洋深層における乱流拡散のパラメタリゼーション

Parameterization of Turbulent Mixing in the Deep Ocean

日比谷 紀之，E-mail: hibiya@eps.s.u-tokyo.ac.jp
永井 平，E-mail: nagai_t@eps.s.u-tokyo.ac.jp
平野 雄介，E-mail: hirano@eps.s.u-tokyo.ac.jp
Ying He, Email: heyingiocas@gmail.com
Toshiyuki Hibiya, Graduate School of Science, The University of Tokyo
Taira Nagai, Graduate School of Science, The University of Tokyo
Yusuke Hirano, Graduate School of Science, The University of Tokyo
Ying He, Graduate School of Science, The University of Tokyo

要旨

鉛直乱流混合は深層海洋大循環を制御する重要な物理過程であるにもかかわらず、現在までに得られている乱流混合強度の全球分布では、毎秒 2000 万トンに及ぶとされる深層海洋循環を維持するには不十分であることが指摘されている (missing mixing 問題)。この問題を解決する可能性として、局所的に乱流混合強度の強い、いわゆる「乱流混合ホットスポット」の存在が考えられている。本研究では、有限振幅の海底凹凸地形と背景内部重力波場とを組込んだ高解像度の数値実験を行うことで、「乱流混合ホットスポット」の性質を調べた。その結果、海底凹凸地形の振幅が小さい場合 (steepness パラメータ $s < 0.3$) には、先行研究で示唆されていた通り「背の高い乱流混合ホットスポット」が形成された。一方、海底凹凸地形の振幅が大きい場合 (steepness パラメータ $s > 0.3$) には、対照的に「背の低い乱流混合ホットスポット」となってしまうことが明らかになった。この「背の低い乱流混合ホットスポット」の存在は、近年の乱流観測の結果ともより整合する。「背の低い乱流混合ホットスポット」が形成されるのは、内部風下波と海底近傍の慣性流シアーとの強い相互作用によって慣性流が強化され、顕著な混合域が形成されるためであることが示唆された。

1．はじめに

海洋深層の鉛直乱流混合は、長期の気候変動に影響を及ぼすことで知られる深層海洋循環をもコントロールする重要な物理過程の一つである。このため、海洋大循環モデルで深層海洋循環を正確に再現するためには、深海乱流混合の全球的な強度分布を明らかにすることが不可欠である。しかしながら、現在までに明らかにされている深海乱流混合の強度分布では、毎秒約 2000 万トンの流量を持つと推定される深層海洋循環を維持するにはパワー不足であることが指摘されている (missing mixing 問題)。この問題を解決する可能性の一つとして、局所的に乱流混合強度の強い、いわゆる「乱流混合ホットスポット」の存在が注目されている。乱流混合ホットスポットが形成される海域では tidal excursion パラメータが $T_e = k_H U_0 \Omega \gg 1$ (k_H: 海底地形の水平波数, U_0: 潮汐流の振幅, Ω: 潮汐周波数) となり、海底凹凸地形上では内部風下波が励起されると考えられる。現状の海洋大循環モデルでは、この乱流混合ホットスポットの存在は、St. Laurent et al. (2002) によって提唱された全球一定の鉛直スケール $\zeta = 500$ m で減衰する指数関数型の鉛直構造を仮定した単純なパラメタリゼーションを通じて組込まれていることが多い。しかしながら、近年の研究によって、ζ は海域ごとに変化することが次第にわかってきており、この St. Laurent et al. (2002) のパラメタリゼーションの有効性は疑問視されている (Hibiya 2022)。

そこで本研究では、missing mixing 問題の解決に向けた予備的研究として、$T_e \gg 1$となる粗い海底凹凸地形上での乱流混合ホットスポットの性質を、特にその鉛直構造に着目して調べた。有限振幅の海底凹凸地形 (steepness パラメータ$s = h_0 N/U_0 > 0.3$, h_0: 海底地形の振幅, N: 浮力周波数) や Garrett–Munk スペクトルをもつ内部重力波場 (以降 GM スペクトル場) を組込んだ数値実験を行うことで、より現実に近い状況下において海底凹凸地形上に形成される乱流混合ホットスポットの性質を考察した。

2．数値実験

数値実験は、非静水圧の海洋大循環モデル MITgcm を用いて、鉛直 2 次元面内で行った。海底地形は正弦波型の無限波列を仮定し、12 時間周期の M2 潮汐を外力として与えた。以下に示す数値実験は、いずれも $T_e \gg 1$を満たす条件下で行った。

3．結果と考察

3.1. 数値実験 1

数値実験 1 では、GM スペクトル場を初期条件として与え、tidal excursion パラメータ T_e は変えずに、海底地形の振幅 h のみを変化させる実験を行った。その結果、乱流混合強度は、海底地形の振幅が小さい場合 ($s = 0.1, 0.2$) には、鉛直減衰が小さい構造 (「背の高い乱流混合ホットスポット」) であるのに対し、地形振幅が大きい場合 ($s = 0.6$) には、鉛直減衰が大きい構造 (「背の低い乱流混合ホットスポット」) となった (図 1)。また、地形振幅が大きい場合には、内部風下波エネルギ

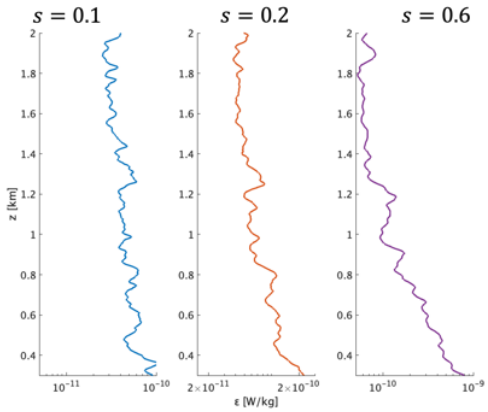

図 1: 乱流エネルギー散逸率の鉛直構造。$s = 0.1$ (左), 0.2 (中央), 0.6 (右) の 3 ケースについてプロットした。

ーフラックスが海底近傍で急激に減衰する様子も確認された。

3.2. 数値実験 2

数値実験 1 の結果における、海底凹凸地形の振幅 h_0 が大きい場合には「背の低い乱流混合ホットスポット」となってしまうことの物理機構を詳しく解析するため、静止場を初期条件として単純化した上で、海底地形の振幅を変化させる数値実験 2 を行った。数値実験 1, 数値実験 2 では、いずれも海底地形の振幅が大きい場合のみ、その近傍で慣性流が強化された (図 2)。この慣性流の強化に伴って、「背の低い乱流混合ホットスポット」が形成されている可能性が考えられる。

慣性流の強化はごく狭い高度でのみ発生しており、定常流を対象にした先行研究 (Nikurashin and Ferrari 2010) のメカニズムでは説明できない。そこで、慣性流の強化について、エネルギー収支をもとに考察する。この場合、長期的な平均で見ると、各高度における鉛直エネルギーフラックスの鉛直差分が局所的な慣性流の強化と内部風下波の散逸に消費されるというエネルギー収支が成立する。詳細については省略するが、解析の結果、$s = 0.47$ の場合には、内部風下波に伴う鉛直エネルギーフラックスは、海底近傍で大きく減衰すること、そして、そのエネルギーのほとんどが慣性流の強化に使われるということがわかった。このことは、鉛直伝播する内部風下波のエネルギーのほとんどが慣性流の強化に使われ、$z > 1$ km に到達する内部風下波のエネルギーが小さくなってしまったことが、数値実験 1 の「背の低い乱流混合ホットスポット」形成の主原因であることを示唆している。

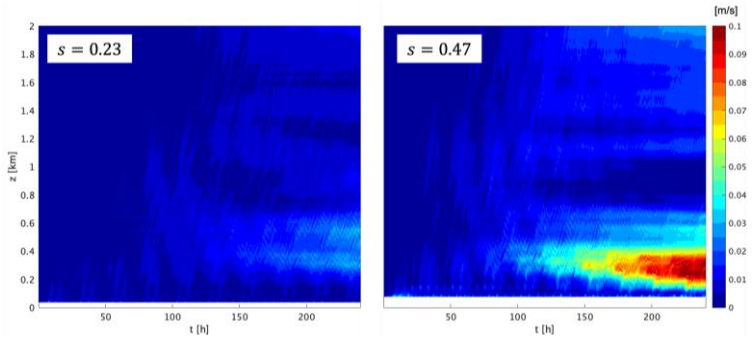

図 2: 数値実験 2 における慣性流の振幅の時間–高度分布。(左) $s = 0.23$, (右) $s = 0.47$ の場合。

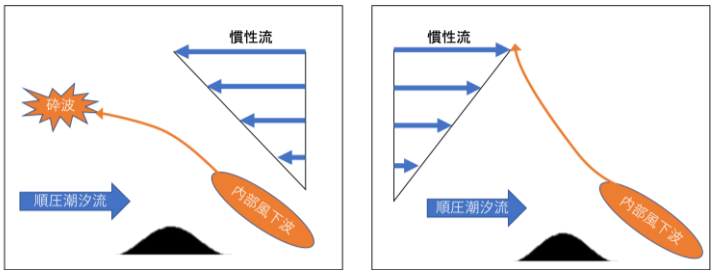

図 3: 内部風下波と慣性流シアーとの相互作用によって慣性流が間欠的に強化されるメカニズムを表す模式図。

さらに詳細に確認すると、この慣性流の強化は間欠的に発生していることもわかった。慣性流が強化するタイミングに注目したところ、それは以下のプロセスによって決められることが推察された。内部風下波が鉛直伝播する時、内部風下波の水平位相速度と慣性流シアーの方向が一致する際には、図 3(左)のように、内部風下波は鉛直波数が増加、鉛直群速度が減少するようにドップラー効果を受ける。その結果、慣性流帯を抜けて上層へと通過することができなかった内部風下波は、その運動量を慣性流に受け渡し、慣性流を加速するという、いわゆる、臨界層吸収が発生していることが示唆された。実際、慣性流が強化されているのは、内部風下波の水平位相速度と慣性流シアーの方向が一致するタイミングであることが確認された。

4. まとめと今後の展望

「乱流混合ホットスポット」における乱流混合の実態の把握は、その観測の難しさもあり、あまり進んでこなかった。このため、例えば、粗い海底凹凸地形の近傍で形成される「背の低い乱流ホットスポット」は、潮流によって励起された（鉛直群速度の小さい）高波数の内部潮汐波が GM スペクトル場との強い非線形相互作用を通じて砕波することで形成されているものと誤って解釈されてきた。本研究の結果は、比較的強い潮流と粗い海底凹凸地形との相互作用 ($T_e \gg 1$) の下では、内部潮汐波というよりは内部風下波が形成されると考える方が自然であること、さらに、海底凹凸地形の振幅が有限 ($s > 0.3$) であることで、内部風下波の発生と同時に慣性流の強化が海底地形の近傍で起こること、この慣性流が海底凹凸地形から鉛直上方に発していく内部風下波と強く非線形相互作用することで、海底地形の近傍に顕著な混合域を形成していくことを明らかにした。このシナリオは、「背の低い乱流ホットスポット」の形成に関して、観測結果とより整合的な全く新しいものである。

一方、海底凹凸地形から上層の主密度躍層の深さまで届くことで、深層海洋循環へ強いインパクトを与え得る「背の高い乱流混合ホットスポット」に関しては、水平高波数で振幅があまり大きくない海底凹凸地形上に強い順圧潮汐流が存在する海域 ($T_e \gg 1$ かつ $s < 0.3$) に限定されることが示された (Hibiya 2022)。このような順圧潮汐流の振幅が大きい海域の例としては、海山や海嶺の山頂周辺が挙げられる。深層海洋循環に大きな影響を与える可能性がありながら、今まで見逃されてきた乱流混合ホットスポットの有力な候補として、海山や海嶺の山頂付近を対象に、高解像度の海底凹凸地形の情報を把握した上で、乱流観測や数値実験を実施していくことが、海洋物理学に長く残されている missing mixing 問題の解決に繋がっていくことであろう。

参考文献

(1) Hibiya, T., 2022: A new parameterization of turbulent mixing enhanced over rough seafloor topography, *Geophys. Res. Lett.*, **49**, e2021GL096067.

(2) Nikurashin, M., and R. Ferrari, 2010: Radiation and dissipation of internal waves generated by geostrophic motions impinging on small-scale topography: Theory, *J. Phys. Oceanogr.*, **40**, 1055–1074.

(3) 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.

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 $\delta^{15}N$ 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 Shigemitu, JAMSTEC
Chisato Yoshikawa, JAMSTEC

要旨

海底堆積物で起こる硝化-脱窒過程の相互作用が水柱における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、昨年度「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。このモデルでは、窒素栄養塩とアンモニウム塩を予報でき、全球物質循環モデルにおいてもアンモニウム塩を予報する必要がある。今年度は硝酸塩・アンモニウム塩およびそれらの窒素同位体比を予報できる物質循環モデルを開発するとともに、その結果を用いて、昨年度開発した初期続成過程モデルのパフォーマンスを調べた。

１．はじめに

海水中の窒素栄養塩の窒素同位体比($\delta^{15}N$)を用いて、現海洋の窒素栄養塩収支を見積もろうとする試みや、現海洋の窒素栄養塩の $\delta^{15}N$ の動態に関する知見から、堆積物中に保存された有機態窒素の $\delta^{15}N$ を用いて過去の窒素栄養塩収支を復元する試みがある。これらの試みは、様々な生物過程における同位体分別の大きさの確からしさに依存している。それら生物過程における同位体分別のうち、最も不確実性が高い過程が「堆積物中で起こる生物過程（脱窒と硝化）」である。本研究は、この過程に伴う同位体分別の影響を明らかにしようとするものである。

２．問題設定・方法

昨年までの研究で、窒素同位体比計算を導入した全球物質循環モデルを開発した。しかし、アンモニウム塩とその $\delta^{15}N$ を予報できなかった。そこで、アンモニウム塩を予報できるモデルを開発した（Fig. 1）。本モデルでアンモニウム塩を予報できるようにしたことによって、窒素栄養塩の $\delta^{15}N$ の動態に重要な生物過程である硝化過程に伴う同位体分別を考慮することができるようになった。また、初期続成過程モデルと整合的に結合できるようになった。今年度は物質循環モデルと初期続成過程モデルを結合するに際し予備実験を実施した。予備実験では、物質循環モデルによって予報された堆積物直上の硝酸塩とその $\delta^{15}N$、アンモニウム塩とその $\delta^{15}N$、溶存酸素および堆積物への有機炭素の埋没フラックスを初期続成過程モデルの境界条件として使用し当該モデルを計算することにした。境界条件として重要な硝酸塩とその $\delta^{15}N$、アンモニウム塩とその $\delta^{15}N$ を Fig.2 に示す。

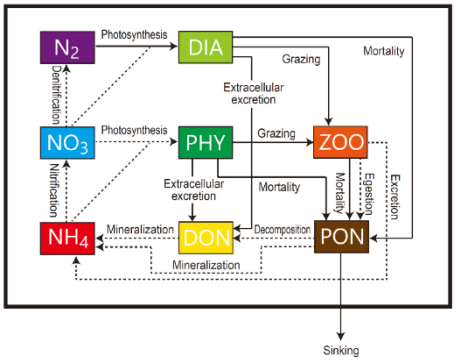

Fig. 1 Schematic diagram of the biogeochemical model in water column (Yoshikawa et al., in preparation).

堆積物直上の硝酸塩濃度は北大西洋から北太平洋に向けて増える。また、その $\delta^{15}N$ 値も硝酸塩と同様に数‰増える。一方アンモニウム塩は水深の浅い陸近傍で高い濃度が確認でき、その $\delta^{15}N$ 値は濃度の高い場所で低くなる傾向があった。本研究では、堆積物直上の硝酸塩の $\delta^{15}N$ に基づいてクラスター解析を行い特徴的な海域を抽出することにした（Fig. 3）。その結果 9 つのクラスターが抽出された。これらの特徴的な海域の堆積物直上のモデル結果を用いて予備実験を行った。予備実験では、それぞれのクラスターにおけるモデル結果の平均値を用いて初期続成過程モデルを駆動することとした。本報告書では、クラスター1（北太平洋）、4（北極域および北大西洋）、および 5（東部赤道太平洋）についての結果を示す(Fig. 4)。

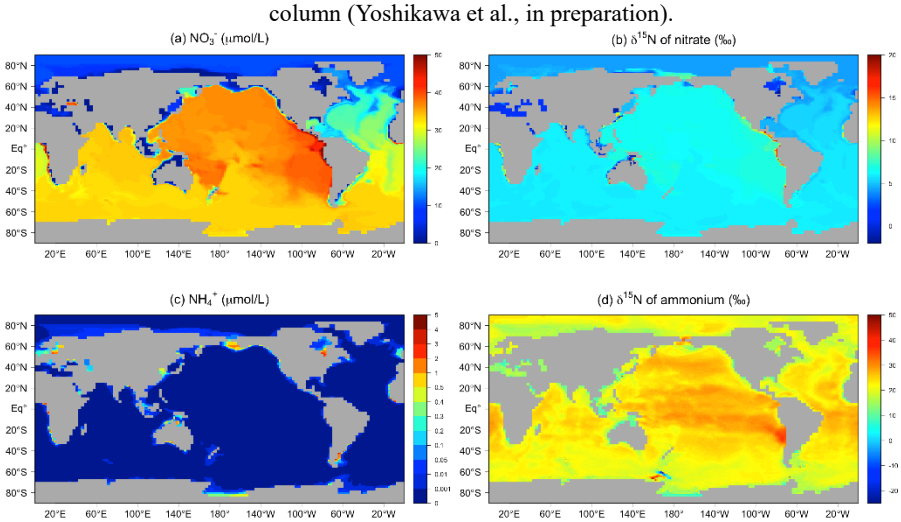

Fig. 2 Model results of (a) nitrate concentration, (b) $\delta^{15}N$ of nitrate, (c) ammonium concentration, and (d) $\delta^{15}N$ of ammonium in bottommost layers (Yoshikawa et al., in preparation).

３．結果と考察

それぞれのクラスターにおける境界条件は、硝酸塩濃度とその $\delta^{15}N$、アンモニウム塩濃度とその $\delta^{15}N$、溶存酸素濃度および有機態炭素の埋没フラックスの順に以下のようであった。クラスター1 : ~35 μmol/L、~6.6‰、~0.01 μmol/L、~25‰、~160 μmol/L、1.6 mmolC/m^2/d、クラスター4: ~11 μmol/L、~4.5‰、~0.01 μmol/L、~20‰、~300 μmol/L、1.3mmolC/m^2/d、クラスター5: ~22 μmol/L、~13‰、~0.2 μmol/L、~18‰、~100 μmol/L、36 mmolC/m^2/d。

クラスター1 および 2 では、外洋域であるため有機炭素の埋没フラックスがほぼ同様に小さいものの、堆積物直上の硝酸塩と溶存酸素濃度が異なるため、堆積物内で物質が異なる挙動を示す。直上の溶存酸素濃度の高いクラスター4（赤線）では、モデル領域内で溶存酸素がなくならない。そのため、脱窒過程は起こらず、堆積物を通して硝化過程が起こるためアンモニウム塩はほとんど存在できず、硝酸塩に変換され、深くなるほど硝酸塩濃度が高くなる。またアンモニウム塩の $\delta^{15}N$ 値は有機物の分解起源でできたアンモニウム塩（6‰）から硝化の同位体分別効果（5‰）分だけ高くなりほぼ一定である。硝酸塩の $\delta^{15}N$ 値はアンモニウム塩がほぼ全て硝化で硝酸塩になるため、同位体分別はほとんどおこらず、有機物の値とほぼ同じになっている。一方クラスター1（黒線）では、酸素が深度 5cm ほどでなくなるため、それ以深では硝化が起こらず脱窒のみが起こる。そのため、アンモニウム塩が蓄積し、硝酸塩が減少していく。またアンモニウム塩の $\delta^{15}N$ 値は酸素のある上層で硝化の同位体分別により高くなるもの、下層では硝化が起こらないため有機物分解起源の値となる。一方、硝酸塩の $\delta^{15}N$ 値は脱窒の影響（同位体効果 5‰）を受けて、深くなるほど値が高くなっていく。クラスター5 は、有機炭素の埋没フラックスが高いだけでなく、直上の酸素濃度が低いため、極上層で酸素がなくなってしまう。そのため、クラスター4 での物質の挙動と似ているがより極端になった挙動がみられることになる。その結果、アンモニウム塩は深度とともに蓄積し、硝酸塩の $\delta^{15}N$ は増大する。このように、さまざまな境界条件で辻褄の合う結果が初期続成過程モデルから得られた。

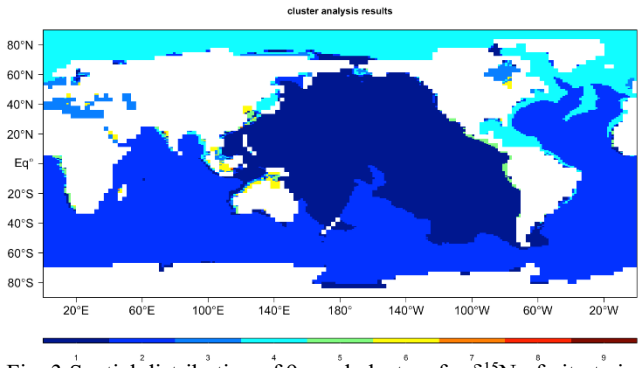

Fig. 3 Spatial distribution of 9 areal clusters for $\delta^{15}N$ of nitrate in bottommost layers (Yoshikawa et al. in preparation).

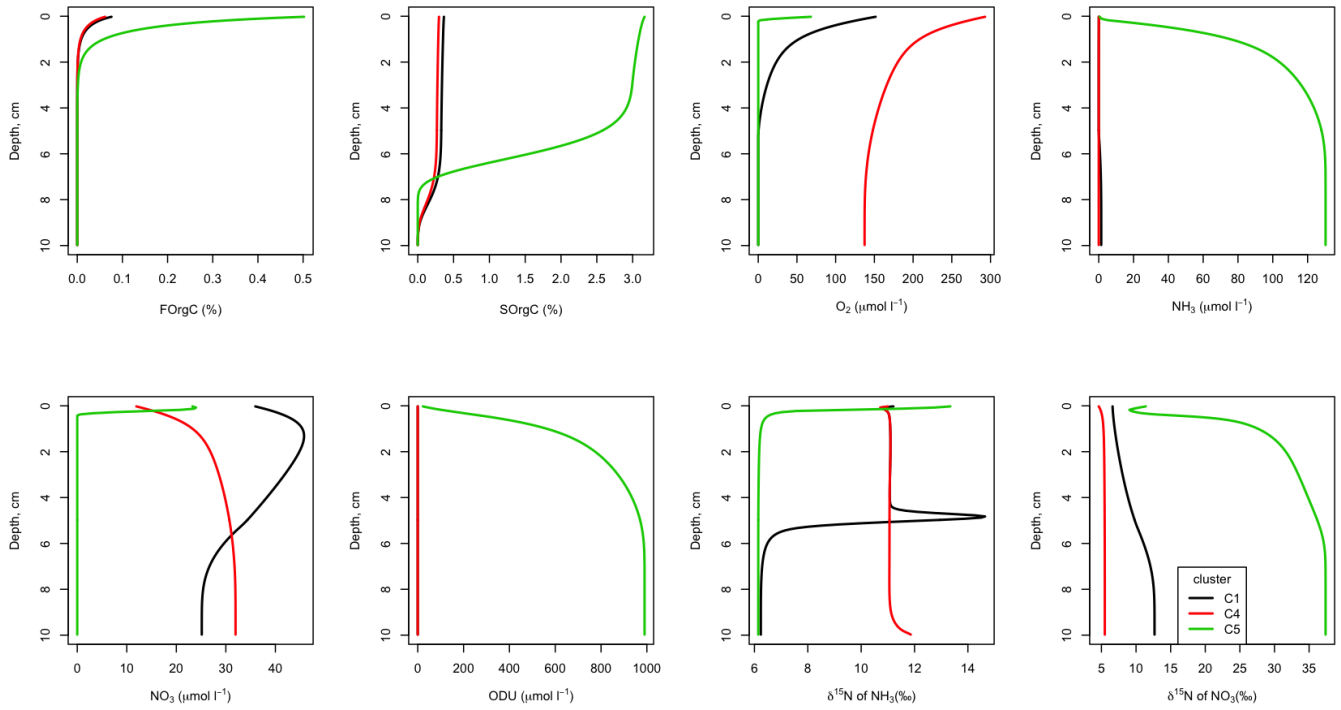

Fig. 4 Sediment model profiles for the boundary conditions of the clusters 1, 4 and 5 (C1, C4, and C5). FOrgC, SOrgC, and ODU represent fast- and slow-decayed organic carbon concentration, and oxygen demand unit, respectively.

４．まとめと今後の展望

今年度の研究により全球物質循環モデルに初期続成過程モデル結合する準備が整った。今後、初期続成過程モデルのパラメータを現在利用できる観測結果でチューニングし、全球物質循環モデルに結合する予定である。そのモデルを用いて堆積物における硝化―脱窒過程の相互作用が示す同位体分別効果の空間分布を把握し、その結果を「はじめに」で述べた研究に資する。

統合陸域シミュレータ ILS と MIROC の結合

Coupling of Integrated Land Simulator to MIROC climate model

芳村 圭，東大・生研，E-mail: kei(at)iis.u-tokyo.ac.jp
沖 大幹，東大・工学系，E-mail: oki(at)civil.t.u-tokyo.ac.jp
山崎 大，東大・生研, E-mail: yamadai(at)iis.u-tokyo.ac.jp
Kim Hyungjun，東大・生研, E-mail: hyungjun(at)iis.u-tokyo.ac.jp
新田 友子，東大・生研, E-mail: t-nitta(at)iis.u-tokyo.ac.jp
大沼 友貴彦，東大・生研, E-mail: onuma(at)iis.u-tokyo.ac.jp
竹島 滉，東大・工学系, E-mail: akira(at)rainbow.iis.u-tokyo.ac.jp

精度良い陸域過程のシミュレーションは洪水・渇水予測や気候変動予測等，様々な目的のために重要である．著者らは，陸域シミュレーションの詳細化と高精度化を目指して，複数の陸域要素モデルを汎用カプラーで結合する，統合陸域シミュレータ(ILS)を開発してきた．本共同研究では，ILS を格子系の異なる大気・海洋モデルと結合した場合の手法と課題について議論する．

１．はじめに

気候モデルによる将来の気候変動予測は，気候変動に関する政府間パネル第 6 次評価報告書[1)]にまとめられた最新の研究から産業界に至るまで，幅広く利用されている．大気・海洋・陸から構成される気候モデルにおいて，土壌水分・積雪はメモリとしての役割を持ち，土地利用変化など人間活動も陸域の変化を通して気候に影響を及ぼす．そのため，陸域過程を正確・詳細にモデル化することは，気候モデルの高度化・精緻化のために重要な課題のひとつである．そこで，1) 陸モデルを大気モデルから独立させて，2) 開発時には観測ベースの気象データを強制力とする陸のみの実験（オフライン実験）で十分に検証し，3) 精度良い最新の陸モデルを気候モデルに容易に採用することを目指し，統合陸域シミュレータ[2)](Integrated Land Simulator; ILS) と呼ばれる新しい陸域シミュレータの開発に取り組んでいる．陸モデル独立により，陸域にとって適切な格子系・解像度を用いること，開発・オフライン実験・検証を容易にすること，さらに可読性向上・人為的ミス軽減を期待している．本共同研究では，気候モデル MIROC[3)]から独立させた陸モデルをベースに開発した ILS を，汎用カプラーを用いて MIROC の大気・海洋モデルと結合する．

２．問題設定・方法

陸モデルを MIROC から独立させ，汎用カプラーを用いて結合する概念図を図 1 に示す．最初に大気・海洋モデル用と大気・陸モデル用に MPI (Message Passing Interface) のコミュニケータを生成し，前者でこれまでの MIROC の MPI_COMM_WORLD を置き換えることで，大気・海洋間のエクスチェンジャーによる通信・格子変換をそのまま利用する．大気モデルは T85，海洋モデルは 3 極座標系約 1 度，陸域モデルは流域形状の格子で 0.5 度とそれぞれ異なる格子系・解像度を採用する．大気モデル・ILS 間のデータ交換と格子変換は，事前に用意した格子の対応関係と重みのテーブルを用いて，汎用カプラーで行う．基本的には重複面積の重みつき平均を採用しているが，大気モデル経由で海洋モデルに送られる変数は，近傍の海洋に重複する大気格子に送っている．

これまでの MIROC では，陸域の初期値データは大気・海洋・陸域結合実験により作成されてきた．しかしながら，陸域の状態変数が平衡状態になるには長期積分が必要で，大気モデルの高い計算負荷が課題だった．ILS では，MATSIRO に気象データを送るコンポーネントを大気モデルから I/O を切り替えることにより，観測値を基にした気象データを用いたオフライン実験を容易に行うことができる．GSWP3 (Global Soil Wetness Project Phase 3)[4)]の気象データ，MIROC との結合シミュレーションに用いるものと同じ，海洋モデルに合わせた海陸分布と境界条件データを用いて 1901-2010 年までの 110 年間の実験を行い，陸域の初期値データを作成した．

実験は，①MIROC6 実験，②時間ステップを固定した MIROC6 実験， ③MIROC6 と ILS を結合した実験の 3 種類行う．MIROC6 の実験設定や境界条件は，CMIP6 実験と同じ設定を用いる．ILS の時間ステップは，MATSIRO 12 分，CaMa-Flood は可変時間ステップを採用した．大気モデルと MATSIRO は 12 分に一度データ交換を行う．MIROC6 では物理過程の一部として毎時間ステップ逐次的に実行されていた地表面フラックス計算を，並列に実行することで，大気モデルと

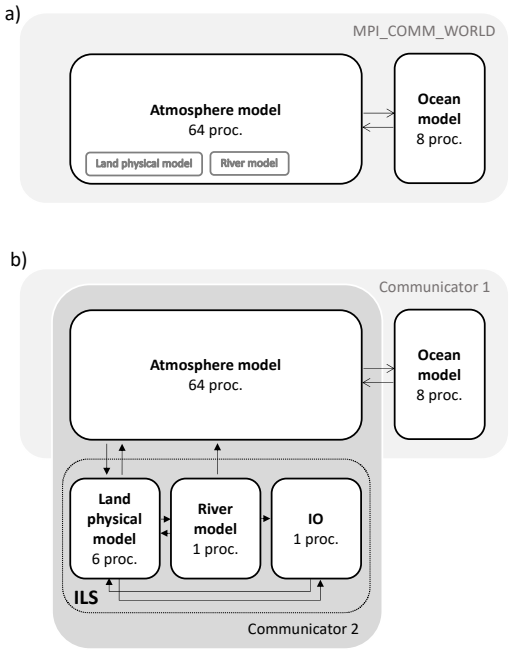

図 1：MIROC-ILS 結合の概念図．a) MIROC6 と b) MIROC6-ILS 結合実験

MATSIRO がそれぞれお互いの 1 ステップ前の計算結果を入力として動くことになり，2 つの実験で計算の順序と大気・陸間のデータ交換頻度が異なっている．

３．結果と考察

まず，時間方向の結合方法に関して，MIROC AGCM は可変時間ステップを採用しており，風速に応じて時間ステップを変えることにより，安定かつ高速な計算を実現している．ILS を結合した場合もこの機能を維持することを目指して，可変時間間隔でのデータ交換について検討した．しかしながら，1 ステップ前の値を入力として動く「たすきがけ」と呼ばれるデータ交換の方法を取りつつ，モデルの計算時間ステップ・データ交換間隔を可変にすると，水収支の保存が難しかった．複数案を検討したが，現段階での実装は難しいと判断し，ILS を結合する場合には，大気モデルの時間ステップは固定とすることとした．また，これまでは陸域に貯めていた氷河流出を海洋への淡水流出として与えるため，モデルの修正を行った．

次に，MIROC6-ILS 結合の長期実験を行った．ILS を結合した影響を見るため，MIROC6 実験と，MIROC6 の時間ステップを 4 分に固定した実験も同時に行った．図 2 に降水量の計算結果を示す．MIROC6 と ILS を結合した MIROC6 の全球平均を比較すると，ILS の結合により降水量は減少する傾向となった．さらに，ILS 結合時に MIROC AGCM の時間ステップを固定した影響を評価するため，MIROC6 で大気モデルの時間ステップのみ 4 分固定にした実験も行った．全球平均を見ると時間ステップ固定と ILS 結合はどちらも降水量を減少させる方向に影響すること，海洋上・陸上の減少はそれぞれ時間ステップと ILS 結合の影響が大きいことがわかった．MATSIRO のパラメタリゼーションは MIROC6 時のものに揃えてあるが，陸域の格子系・空間解像度が変わっていること，境界値データの変更，時間的な結合方法を変更していることが影響していると考えられる．最後に，MIROC7 に ILS を結合してテストを行い，問題なく動作することを確認した．

４．まとめと今後の展望

精度良い陸域水循環過程のシミュレーションは，洪水・渇水予測や気候変動予測等，様々な目的のために重要である．著者らは，陸域シミュレーションの詳細化と高精度化を目指して，複数の陸域要素モデルを汎用カプラーで連成させる，統合陸域シミュレータ(ILS)を開発してきた．本共同研究では，ILS と大気・海洋モデル MIROC を双方向で弱連成させてシミュレーションを行う際に考慮すべき点を検討した．さらに，計算時間や水収支保存，結合方法の違いが結果に与える影響等の課題について議論した．

参考文献

(1) IPCC: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2021.

(2) Nitta, T. et al.: Development of Integrated Land Simulator. Progress in Earth and Planetary Science, 7, 68, 2021.

(3) Tatebe, H. et al.: Description and basic evaluation of simulated mean state, internal variability, and climate sensitivity in MIROC6. Geosci. Model Dev., 12, pp.2727–2765, 2019.

(4) Kim, H. et al.: Global Soil Wetness Project Phase 3, http://hydro.iis.u-tokyo.ac.jp/GSWP3/, 2014.

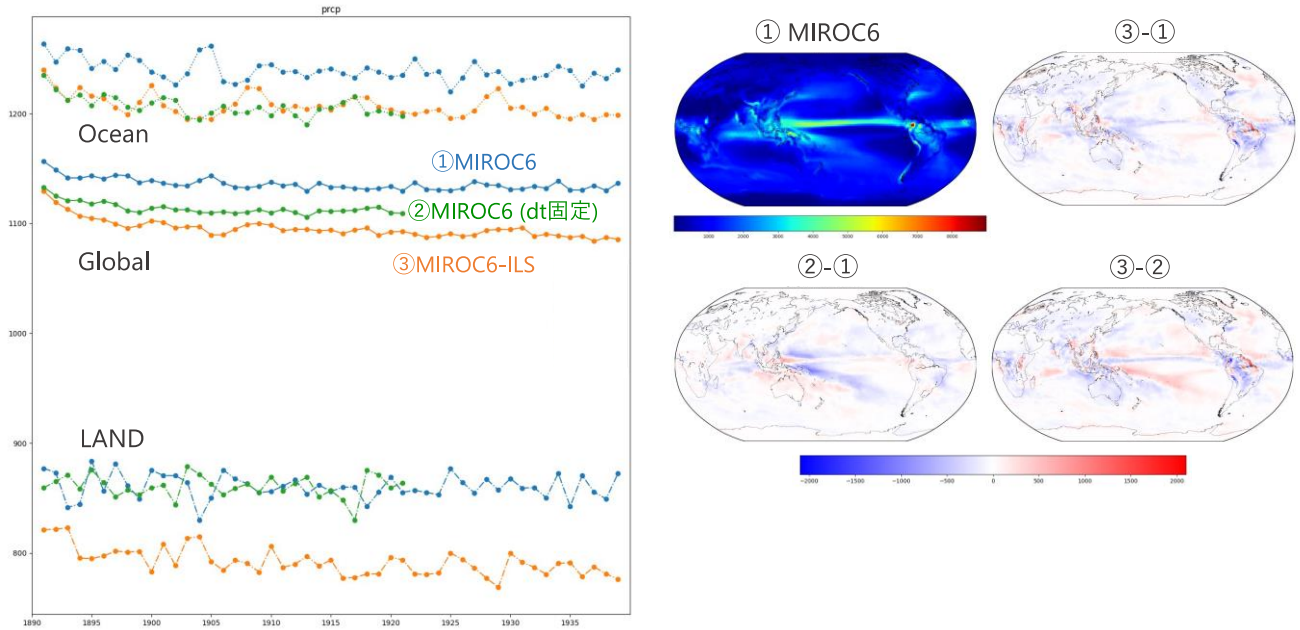

図 2 降水量 [mm/yr]の計算結果

アジアモンスーンの数値シミュレーションのための物理過程の高度化とデータ同化手法の開発

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

氏家 将志，米原 仁，金浜 貴史，木南 哲平，齊藤 慧，市川 悠衣子，黒木 志洸，須藤 康平
気象庁情報基盤部数値予報課,
E-mail: globalnwp(at)met.kishou.go.jp
Masashi Ujiie, Hitoshi Yonehara, Takafumi Kanehama, Teppei Kinami, Kei Saitou, Yuiko Ichikawa, Yukihiro Kuroki, Kouhei Sutou
Numerical Prediction Division,
Information Infrastructure Department, Japan Meteorological Agency

要旨

気象庁全球モデルの予測精度向上のため、水平高解像度化に向けた力学過程の開発、物理過程の改良（地形性抵抗、放射過程）を行った。高分解能化と力学過程の改良による実効解像度の従来モデルからの向上と、物理過程の改良による気温および風の系統誤差軽減を確認した。これらの改良を施した気象庁全球モデルを現業数値予報システムに準じた設定で精度評価し、夏季アジアモンスーン期における日本の降水予測が現システムのそれを上回ることを確認した。

１．はじめに

気象庁は現在格子間隔約 20km（TL959）鉛直 128 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。数値予報モデルの水平高分解能化は、地形に伴う現象や空間スケールの小さい現象の表現向上、物理過程のより精緻な表現を通じて、アジアモンスーンやそれに伴う降水予測に大きく影響する。また、地形性抵抗過程や放射過程の改良による数値予報モデルの系統誤差減少は、アジア域の大気循環の予測精度向上に資する。これらのことから、今年度は全球モデルの水平解像度の 20km から 13km への増強を見越した力学過程の改良、物理過程（地形性抵抗、放射過程）の改良に向けた開発を重点的に実施した。

２．改良の概要

２．１ 全球モデルの水平高解像度化(20km→13km)に向けた力学過程の開発

水平高解像度の効果が有効に得られるよう、実効解像度の向上を目的とした力学過程の改良を行った。スペクトル法における格子の取り方を 1 次格子から 2 次格子に変更することでエイリアシングに伴うノイズを軽減させた。切断波数は現在の 959 のままであるが、2 次格子の採用により東西格子数（赤道付近）・南北格子数はそれぞれ 1.5 倍となり、水平格子間隔は約 13km となる。また、2 次格子の採用に伴うノイズ軽減に合わせる形で、モデル標高作成時のフィルターを見直し、より高波数成分が維持されるようにするとともに、大気モデルの数値拡散の強さを現在の半分とした。

２．２ 地形性抵抗過程の改良

GSM では、2020 年 3 月の更新以降、地形性抵抗として Lott and Miller（1997）に基づくサブグリッド地形効果（重力波抵抗、ブロック流抵抗）パラメタリゼーションと Beljaars et al.（2004）に基づく地形性乱流形状抵抗を採用している。一方で、更新に伴う対流圏上層～下部成層圏における西風の弱風バイアスの拡大が課題として残っている。この課題を解決するために、地形性重力波抵抗のパラメータを見直した。具体的には、運動量フラックスをより上層まで伝播させることで東西風の加速率のピーク高度がより高く、大きさがより小さくなるよう、サブグリッド地形の分散の効果の大きさや、運動量フラックスの飽和振幅の大きさを決めるパラメータを調整した。さらに、地形性重力波抵抗の調整を補完し北半球の循環場の予測精度を維持するため、地形性乱流形状抵抗の振幅を決めるパラメータを大きくした。

２．３ オゾン気候値の更新

現在の GSM では放射過程で利用するオゾン濃度について、気象研究所化学輸送モデル MRI-CCM1 を用いて作成された 3 次元月別気候値を、1hPa より上層で衛星観測に基づく帯状平均月別気候値で補正したものを使用している。放射計算の精度向上及び成層圏の気温バイアス軽減を狙い、より新しい精緻なデータセットである MRI-CCM2 を基にしたオゾン再解析値から作成したものに更新した。

３．改良のインパクト

Fig.1 は、モデル面第 71 層目（約 150hPa）における、東西風の運動エネルギーの回転成分のスペクトルを示す。1 次格子を採用している 20 km GSM では、エイリアシングに伴う切断波数付近でのスペクトルの反り上がりが顕著である。一方、2 次格

子を採用している 13 km GSM では、スペクトルの反り上がりはほぼ解消される。また、13 km GSM は全波数 200 以上成分でのスペクトルの振幅が 20 km GSM に比べて大きく、全波数 800 付近までは、1 次格子での 13 km 格子で（切断波数 1439） で計算されたスペクトルの振幅とほぼ同等である。このことは、力学過程の改良によりこれまでと同じ切断波数で高い実効解像度向上が得られていることを示している。Fig.2 は、中東域における東西風の分布とその誤差を示している。地形性抵抗改良前は、100hPa, 33N 付近を中心に西風が弱い系統誤差が顕著に表れているが、地形性抵抗改良後はこの誤差が大きく減少している。これは、地形性抵抗による西風減速がこの領域で弱まったことによる。Fig.3 は、2020 年 1 月平均の熱帯(20S-20N) における気温予測のラジオゾンデ観測に対する平均誤差をオゾン気候値更新前後で比較したものである。対流圏では平均誤差の違いは小さいが、10 hPa 付近見られる高温バイアスが新オゾン気候値を使用することで大きく減少する。

これらの改良を取り込み GSM の水平解像度を 20km から 13km に増強した際の、夏季アジアモンスーン期における日本域の降水予測の検証結果を Fig.4 に示す。主に高解像度化の効果により、バイアススコアについて、弱い降水(1mm/3h)の頻度過大、強い降水（20mm/3h）の頻度過少が改善されている。エクイタブルスレットスコアについても、中立～改善傾向が見られた。

4．まとめと今後の展望

今年度の開発により、GSM の力学過程の改良による実効解像度の向上、地形性抵抗及び放射過程改良による風や気温の系統誤差減少を達成した。また、これらの改良の取り込みと水平解像度の増強により、夏季アジアモンスーン期における日本域の降水予測精度が向上することを確認した。今後は、本報告で示した改良を適用した GSM をベースに、物理過程（雲、積雲、地形に関する過程等）の更なる改善やデータ同化手法の改良を継続して進めていく。

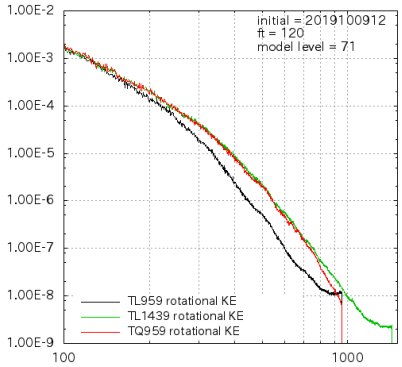

Fig.1 約 150hPa における運動エネルギーの回転成分のスペクトル[m^2s^{-2}] 。黒：20 km GSM(1 次格子、切断波数 959)、赤：13 km GSM(2 次格子、切断波数 959)、緑：13 km GSM（1 次格子、切断波数 1439）2020 年 10 月 9 日 12UTC 初期値の 120 時間予測値。

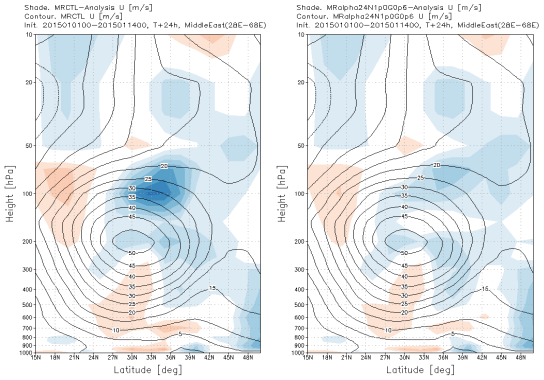

Fig.2 中東域(28E-68E,15N-50N)における東西風（等値線）とその誤差（カラー）[m/s]。（左）地形性抵抗過程改良前、(右）地形性抵抗過程改良後。00UTC 初期値、24 時間予測の期間平均値で、統計期間は 2015 年 1 月 1 日から 2015 年 1 月 14 日。

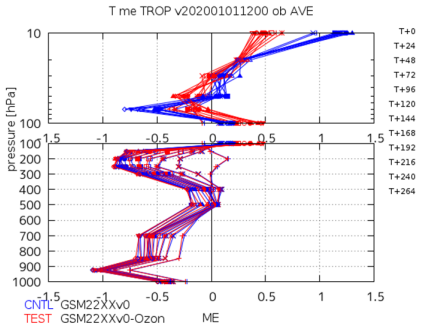

Fig.3 解析予報サイクル実験による 2020 年 1 月平均の熱帯(20S-20N) の気温予測のラジオゾンデ観測に対する平均誤差[K] の予報時間別（初期時刻から 264 時間予測 までの 24 時間毎）の鉛直プロファイル。(青）現オゾン気候値使用、(赤）新オゾン気候値使用。

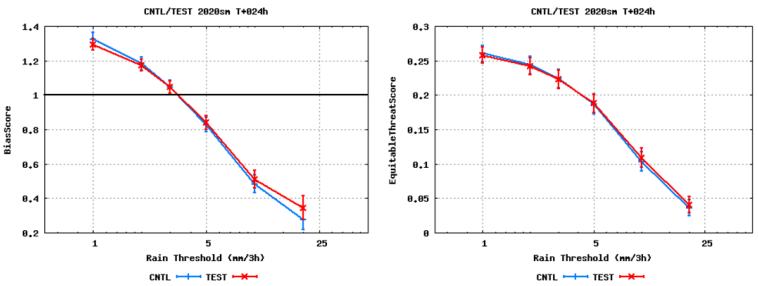

Fig.4 3 時間積算降水量の解析雨量に対する検証結果。横軸は降水量の閾値[mm/3hr]、縦軸は（左）バイアススコア、(右）エクイタブルスレットスコア。24 時間予測値で、統計期間は 2020 年 7 月 1 日から 9 月 30 日。バイアススコア、エクイタブルスレットスコアともに 1 が最適値を示す。

参考文献

(1) Beljaars, A. et al., 2004: A new parametrization of turbulent orographic form drag. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 130, 1327-1347.

(2) Lott, F. and M. J. Miller, 1997: A new subgrid-scale orographic drag parametrization : Its formulation and testing. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 123, 101-127.

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

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

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

Abstract:
Using a 500-m resolution model, we investigated the mechanisms affecting the upslope flow of modified Circumpolar Deep Water (mCDW) in deep troughs and canyons off the Cape Darnley Polynya (CDP, East Antarctica). In this region, Dense Shelf Water (DSW) is formed and flows down the continental slope mainly through the Wild Canyon. The strength of our realistic model also resides in the high-quality of bathymetric data that is essential to reproduce gravity currents in canyons regions. Our investigation revealed a clear canyon exchange mechanism in the time-mean, with downslope flow of DSW to the west side and upslope flow of mCDW to the east side of canyons. Besides, our analysis revealed the existence of strong current oscillations of period ~5-day and amplitude 0.2 m. s^{-1} (i.e., same order as the mean flow), prevalent over the entire continental slope. We propose that these oscillations are caused by a Coastal Trapped Wave. Our model findings are consistent with mooring observations in the study region.

1. Introduction

In the Southern Ocean, the upslope flow of warm modified Circumpolar Deep Water (mCDW) from the offshore regions onto the Antarctic shelf is of crucial importance because these warm waters affect ice shelf melting and play a role in the material cycle. This upslope flow is favoured by the presence of canyons across the continental slope. In a recent study, Morrison et al. (2020) demonstrated that the upslope flow of mCDW in canyons is strongly correlated to the downslope flow of Dense Shelf Water (DSW) in dense water formation regions. However, their global-scale model has a horizontal resolution of (O)10^0km, is not eddy permitting, and uses bathymetric data that may lack in accuracy in some essential trough regions. Therefore, there is a need for establishing a smaller-scale model to study in detail the mechanisms affecting the upslope flow of mCDW in canyon regions.

Here, we develop a high-resolution model in the CDP region, where DSW is formed and flows down the continental slope via several canyons to form Cape Darnley Bottom Water. There, very-high resolution bathymetric data were recently acquired by Japanese research vessels. The high-resolution bathymetric data and model offer a unique opportunity to further investigate the dynamics affecting the mCDW upslope flow as well as its interaction with bottom water formation in the Wild Canyon system. Combining our model results with mooring observations, our study focuses on the processes affecting the mean upslope flow and its temporal variability.

2. Methods and model setup

We used an eddy-resolving regional configuration of the Massachusetts Institute of Technology general circulation model (MITgcm) for the CDP region with hydrostatic approximation and dynamic/thermodynamic sea ice. The model configuration includes sea-ice modeling as well as realistic wind forcing, lateral and surface boundary conditions. Our configuration is similar to that of Mensah et al. (2021), who determined that for the CDP region, a minimum horizontal resolution of 2-km is necessary to reproduce the downslope flow of DSW. We also improved the quality of the bathymetric dataset by including newer, high-resolution bathymetry data, obtained between 2013 and 2020 by various Japanese research vessels as well as the Japanese icebreaker *Shirase*. Following a 1-year spin-up, we ran the 500-m resolution model for the year 2008. We analyzed the model output in current velocities and temperature for the period extending from day 165 to day 225, which corresponds to the peak of sea ice and DSW production, as well as downslope flow of DSW. We analyzed both the mean flow during this period as well as the 3-hours interval time series. We compare the model current velocity data with data obtained from mooring deployed in 2008 (for comparison of time series) and a set of 3 moorings deployed across the Wild Canyon in 2019 (for comparison of time-mean data). We also estimated the mean and time-varying heat transport from the model data.

3. Results

The time-averaged velocity data across several canyons revealed a clear downslope/upslope flow system within each of the individual canyons (Fig. 1a). The current is mostly northward (i.e., downslope) on the canyons' western flank, and southward on their eastern flank. These currents have a strong barotropic component but include a small baroclinic component explained by the presence of more DSW within the southward flow (Fig 1a), and more of the less dense mCDW in the northward flow. Lastly, the magnitude of the downslope and upslope flow is similar, indicating a volume compensation of the downslope flow of DSW by the upslope flow of mCDW. These results are consistent with the canyon exchange mechanism first delineated by Morrison et al. (2020). This is also consistent with the time-averaged near-bottom current from three moorings deployed across one of the canyons (Fig 1.b).

The time series of current velocity at depths greater than 2000 m reveal major temporal variability of about ± 0.2m.s^{-1} at ~5-day period. This variability is spatially consistent over O (10^2) km, with the current exhibiting clear reversals every 2 to 3 days all along a transect roughly following the 2200-m contour (Fig. 2a-b). A 3–8-day band-passed filtering of the current velocity revealed the existence of a westward propagating wave-like signal with wavelength of ~120-km and period of 5.5-day, that is prevalent over the entire continental slope from the 500-m isobath down to the ~3000-m isobath. We propose that this wave-like phenomenon is a Coastal Trapped Wave (CTW). Our preliminary analysis suggests that the CTW may not affect the mean heat-transport budget, though. Note that deep moorings also exhibit a bottom current variability consistent with that of the model.

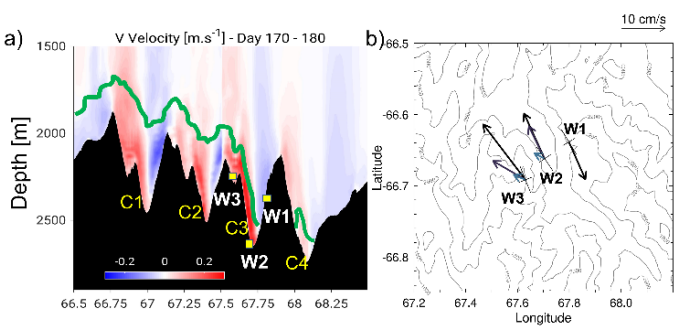

Fig. 1 (a) Cross-section of meridional velocity across the Wild Canyon system (Canyons C1 to C4), averaged between Day 170-180. The green line represents (b) the limit of DSW. (b) Time-averaged current at 3 near-bottom depths at moorings W1, W2 and W3 (locations also marked in a).

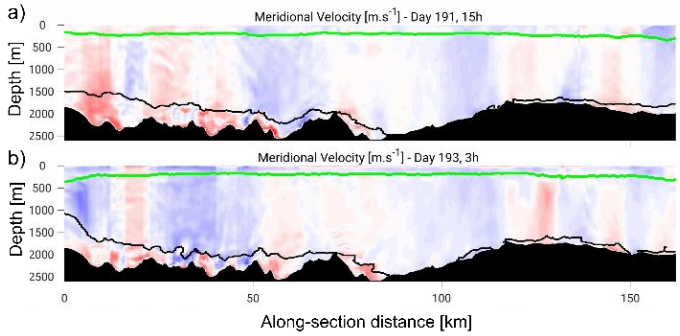

Fig. 2 Deep (>2000 m) cross section of meridional velocity on Day 191 (a) and Day 193.

4. Conclusions and future works

Our high-resolution model revealed the existence of a canyon exchange mechanism which favors compensation of the downslope of DSW by the upslope of mCDW. This confirms the results of the previous study by Morrison et al. (2020) and is consistent with mooring observations. Besides, we found that a wave phenomenon with 5.5-day period and a wavelength of O (10^2) km greatly affects the current variability on the continental slope. We assume this phenomenon to be a CTW, and to confirm this assumption, we are going to apply a linearized CTW solution to our model results. Further, we will investigate the forcing mechanism of this possible CTW. Lastly, we also plan to verify if the phase propagation observed in the model can be observed from mooring observations.

References:

Mensah, V., Nakayama, Y., Fujii, M., Nogi, Y., Ohshima, K.I., 2021. Dense water downslope flow and AABW production in a numerical model: Sensitivity to horizontal and vertical resolution in the region off Cape Darnley polynya, Ocean Modelling, 165, 101843.

Morrison, A. K., Hogg, A. MCC., England, M. H., Spence P., 2020. Warm Circumpolar Deep Water transport toward Antarctica driven by local dense water export in canyons, Science advances, 6, 18, 10.1126/sciadv.aav2516

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
Shuntaro Hyogo, School of Environmental Science, Hokkaido University

要旨

東南極に位置するトッテン氷河上流部には、約 4m海水準を上昇させるほどの氷が存在している。このトッテン氷河は沖から暖水が流入していることや、氷河の流動速度が加速していることが指摘され、将来的に海水準上昇に大きく寄与する可能性が危惧されている。しかし、従来、西南極に比べ東南極の氷河が安定していると考えられていたことや、トッテン氷河沖における海洋観測データが 2015 年以降しかないことが原因で、暖水の流入経路及びその詳細な要因に関して明らかにされていない。本研究では 2019 年度に実施された、第 61 次南極地域観測隊の大規模海洋観測によって得られた新しい海底地形を反映させた数値シミュレーションを実施した。開発したモデルでは、大陸棚縁からトッテン氷河に向けて流入する暖水が窪みを時計回り及び反時計回りに流れる 2 つの流入経路が確認された。また、モデル上の水温躍層は約 200-400m以上観測データよりも浅く、暖水が沖から大陸棚上へ過剰に流入していることが明らかになった。さらに、NASA ジェット推進研究所の共同研究者らによって開発中の海洋生態系モデル (ECCO-Darwin) を拡張し、東南極域領域海洋棚氷生態系モデルを開発した。観測データと比較すると、溶存無機炭素 (DIC)、硝酸塩 (NO3)、リン酸塩、ケイ素などの濃度が観測データと良い一致を示した。

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る。トッテン氷河沖における海洋数値モデルの共通の問題として、主に大陸棚上における水温躍層の位置が観測データと比較し、約 200m 浅いことがわかっている (e.g., Gwyther et al., 2014, Gwyther et al., 2018, Silvano et al,, 2019, Nakayama et al.,2021)。これはトッテン氷河沖の海底地形のデータが乏しいことが要因であると Nakayama et al.,2021 では示唆されている。そこで本研究では、2019 年度に実施された日本の南極地域観測隊(JARE61)によって得られたトッテン氷河沖の新しい海底地形データを組み込み、海洋数値モデルを開発した。使用した海洋数値モデルは MITgcm ((Massachusetts Institute of Technology General Circulation Model)で、東南極に位置するトッテン氷河への暖水(modified Circumpolar Deep Water(mCDW))の流入に関する解析や観測データに対するモデルの再現性の評価を行った。

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 90 層である。モデルの初期値は、January World Ocean Atlas 2009 の水温と塩分を用いる。海底地形は トッテン氷河沖は JARE61 によって得られた新しい海底地形を使い、他領域は The General Bathymetric Chart of the Oceans (GEBCO)を用いた。棚氷形状は、Antarctic Bedrock Mapping (BEDMACHINE)を用いる(Figure 1a)。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の境界条件には、Era-interim を用いる。

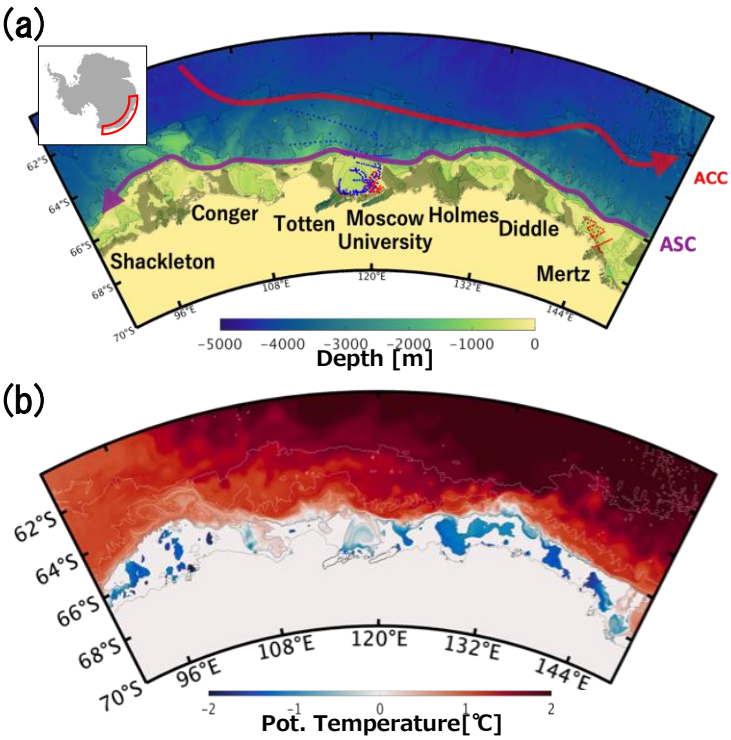

Figure 1: (a) Model bathymetry (color) with black arrows indicating the Antarctic Circumpolar Current (ACC) and Antarctic Slope Current (ASC) as indicated in the figure. Locations of ice shelves and fast ice are shown with gray patches. (b) Simulated monthly mean potential temperature at 501m in January 2015.

３．結果と考察

開発した数値モデルでは、大陸棚上へ流入する暖水、大陸棚斜面上を西向きに流れる南極斜面流、沖合で西から東へ流れる南極周極流が再現されていた(Figure 1)。トッテン氷河に向けて大陸棚縁から流入する暖水の流入は窪みを時計回り及び反時計回りに流れる２つの流入経路が見られた(Figure 1b)。また、モデルの観測データに対する再現性を確認するために、大陸棚上における 100 点以上の海洋観測データとの比較を行った。これによりシミュレーションされた水温躍層は約 200-400m以上観測データよりも浅く、モデルでは暖水が沖から大陸棚上へ過剰に流入していることが明らかになった (Figure 2)。この問題を解決するために、海面の乱流熱フラックスや風からの運動量フラックスに関する感度実験を現在実施し、観測データにより整合的な海洋数値モデルの開発を進めている。

さらに、NASA ジェット推進研究所の共同研究者らによって開発中の海洋生態系モデル (ECCO-Darwin) を拡張し、東南極域領域海洋棚氷生態系モデルを開発した。東経 110 度にて行われた観測と比較すると、溶存無機炭素 (DIC)、硝酸塩 (NO3)、リン酸塩、ケイ素などの濃度が観測データと良い一致を示した (Figure 3)。特に、硝酸塩、リン酸塩は下層と水深 500m 付近に極大を持つが、ケイ素は生態系プロセスによって消費され枯渇されてしまうため下層のみに極大を示すとされるが、このような南大洋の特有のプロセスがモデルで再現されている。現状では、本生態系モデルには、6 種類のプランクトンタイプ (diatoms, eukaryotes, Synechococcus, Prochlorococcus (2 種類)、zoo plankton (2 種類)) のみしか考慮されず、南大洋に存在するとされる植物プランクトン (異なるサイズの Diatom や Phaeocystis) を現在モデルに追加するための作業を実施している。

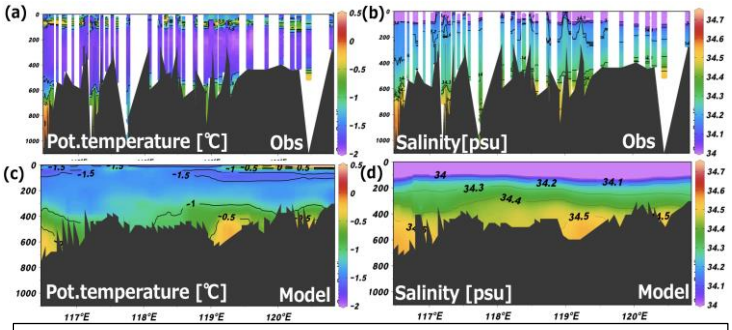

Figure 2: Observed vertical sections of (a) potential temperature and (b) salinity between December 2019 and January 2020 in Totten glacier ice front. Simulated vertical sections of monthly mean (c) potential temperature and (d) salinity in January 2015 along same section.

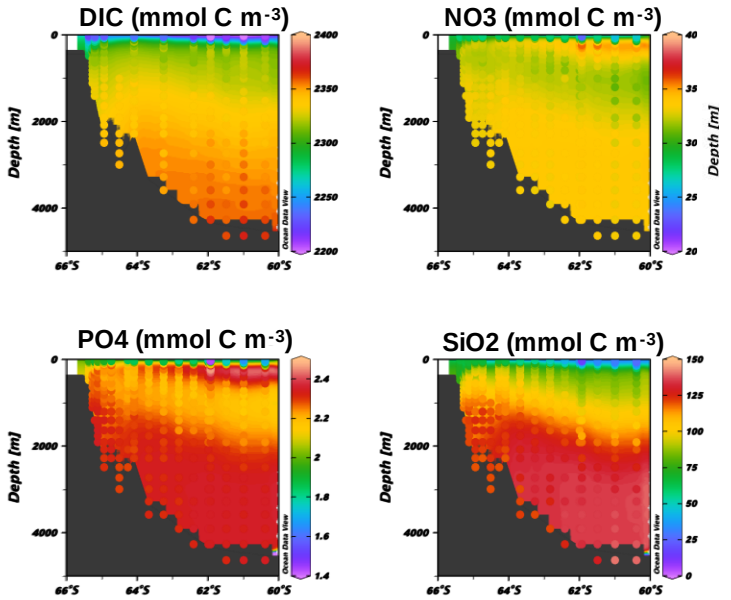

Figure 3: Simulated vertical sections of Dissolved Inorganic Carbon (DIC), Nitrate (NO3), Phosphate (PO4), and Silicate (SiO2) along 110°E (shade). In-situ observations of DIC, NO3, PO4, and SiO2 are plotted in circles.

４．まとめと今後の展望

本モデルでは、JARE61 によって得られた新しい海底地形を使ったトッテン氷河/棚氷域の海洋モデルを開発し、観測データに対するモデルの再現度を比較したが、未だ大陸棚上の観測データの再現性には課題が多い。来年度は衛星観測による海氷データとの比較も含めて、水温躍層の深さがより観測データと一致するように、風や海氷に関わるモデルパラメータを最適化する。本研究については、来年度中に、観測データと良い一致を示すモデルを開発し、再来年度までの投稿を目指す。

参考文献

(1) 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.

(2) 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.

(3) 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.

(4) Nakayama, Y., Greene, C. A., Paolo, F. S., Mensah, V., Zhang, H., Kashiwase, H., et al. (2021). Antarctic Slope Current modulates ocean heat intrusions towards Totten Glacier. Geophysical Research Letters, 48.

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

Model 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
小室芳樹, 海洋研究開発機構, E-mail: 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
渡辺路生, 海洋研究開発機構, E-mail: 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
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。

前年度に引き続き、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。今年度は、東経 116 度付近にあるトッテン棚氷をターゲットした南極周極領域モデルの整備を完了し、大気再解析データを用いて 1951–2021 年の長期積分を実施した。トッテン棚氷底面融解は季節変動よりも 5–12 年周期の経年変動が卓越することがわかった。また、本報告にある棚氷要素は全球海洋モデルにも導入し、正常に動作することを確認している。

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。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(Paolo et al., 2015; Pritchard et al., 2012; Rignot et al., 2008)、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)。南極氷床と大陸岩盤の境界が、内陸に行くほど深くなっている場所がある。このような内陸傾斜床にある氷床・棚氷は、棚氷下への暖水の侵入によって、氷床が不安定になり得る。現在の南極氷床では、西南極氷床の大部分と東南極東部の一部である。東南極ウィルクス海盆にあるトッテン棚氷はこのような棚氷の一つで、周極深層水(暖水)による活発な底面融解があることが最近の海洋観測・衛星観測から示唆されている場所である。

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モデル(Kusahara & Hasumi, 2013) 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、対象領域のトッテン棚氷周辺の水平解像度を局所的に高解像度化(<4 km)させた(図 1)。このモデルを大気の再解析データ(ERA5、1951-2021 年)を用いて駆動し、そのモデル出力を解析した。

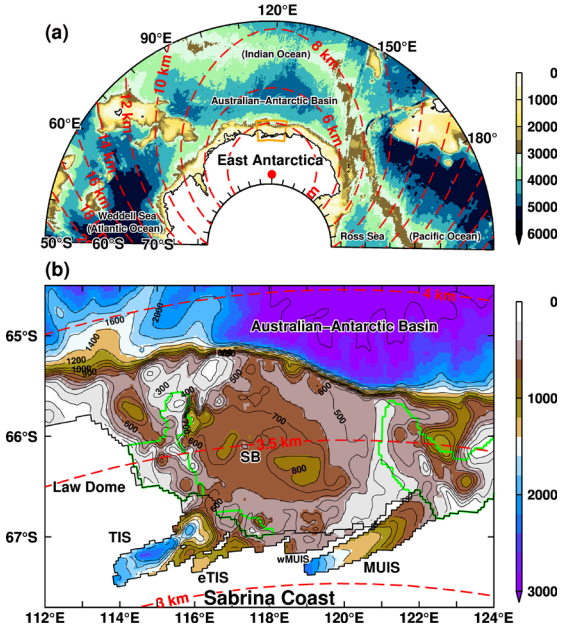

図 1: 海洋モデルの海底地形と水平解像度
(a: 東南極, b: トッテン棚氷周辺)

３．結果と考察

本報告書では詳細は割愛するが、本数値モデルは、大陸棚外縁からトッテン棚氷までの周極深層水(高温・高塩分)の海底沿いにの流入を現実的に再現できていることを、観測結果との直接比較から確認した。図 2 はトッテン棚氷(TIS, 図 1b 参照)とモスクワ大学棚氷の西部(wMUIS)の底面融解の時系列である。トッテン棚氷の年間底面融解量は 40-50 Gt で、衛星観測結果とある程度整合的である。図 3 はこの棚氷融解の時系列のウェーブレット・パワースペクトルである。図 2-3 からトッテン棚氷底面融解は季節変動よりも 5-12 年周期の長周期変動が卓越することがわかる。それに対して、モスクワ大学棚氷では、長周期変動が弱く、季節変動が卓越している。隣接する二つの棚氷の底面融解の変動パターンが大きく異なるのは、モスクワ大学棚氷前面に毎冬現れる沿岸ポリニヤで形成される冷たい高密度陸棚水が流入するためである。トッテン棚氷下には、この冷たい水ほとんど流入しないために、年変動が弱く、周極深層水流入に起因する長周期変動が顕著となる。

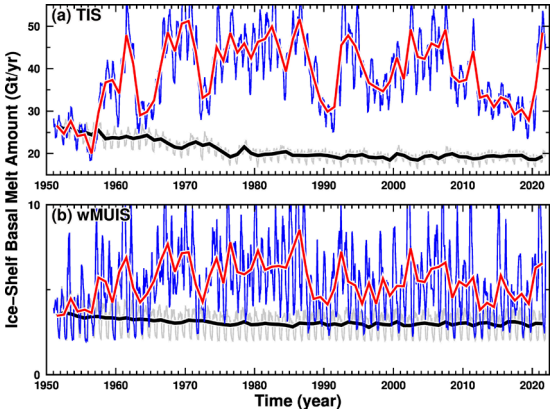

図 2: モデルで再現された棚氷底面融解の時系列(a: トッテン棚氷(TIS)、b:モスクワ大学棚氷の西側部分(wMUIS)、場所は図 1 参照のこと)。

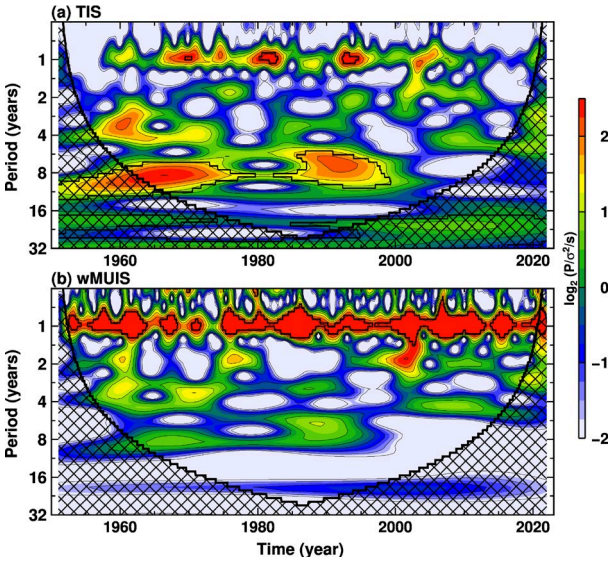

図 3: 棚氷底面融解のウェーブレット・パワースペクトル(a: TIS, b: wMUIS)。

４．まとめと今後の展望

研究対象領域(トッテン棚氷)の水平解像度を数 km とした高解像度モデリングを実施し、トッテン棚氷周辺における周極深層水の流入及び棚氷底面融解プロセスについて調べた。本モデル結果の一部は、海洋観測結果と合わせて取りまとめ、現在国際誌に投稿中である。また、モデルの詳細な解析結果についても、投稿準備中である。使用した棚氷要素は全球 1° 海洋モデルにも導入済みで、正常に動作することを確認した。このような棚氷要素を含む全球海洋モデルを利用することによって、氷床起源の淡水が全球海洋環境場への影響評価がはじめて可能となる。

参考文献

Depoorter, M. A., Bamber, J. L., Griggs, J. A., Lenaerts, J. T. M., Ligtenberg, S. R. M., van den Broeke, M. R., & Moholdt, G. (2013). Calving fluxes and basal melt rates of Antarctic ice shelves. *Nature*, *502*(7469), 89-92. https://doi.org/10.1038/nature12567

Jacobs, S. S., Jenkins, A., Giulivi, C. F., & Dutrieux, P. (2011). Stronger ocean circulation and increased melting under Pine Island Glacier ice shelf. *Nature Geoscience*, *4*, 519-523. https://doi.org/10.1038/ngeo1188

Jenkins, A., Shoosmith, D., Dutrieux, P., Jacobs, S., Kim, T. W., Lee, S. H., Ha, H. K., & Stammerjohn, S. (2018). West Antarctic Ice Sheet retreat in the Amundsen Sea driven by decadal oceanic variability. *Nature Geoscience*. https://doi.org/10.1038/s41561-018-0207-4

Kusahara, K., & Hasumi, H. (2013). Modeling Antarctic ice shelf responses to future climate changes and impacts on the ocean. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, *118*(5), 2454-2475. https://doi.org/10.1002/jgrc.20166

Paolo, F. S., Fricker, H. A., & Padman, L. (2015). Volume loss from Antarctic ice shelves is accelerating. *Science*, *348*(6232), 327-331. https://doi.org/10.1126/science.aaa0940

Pritchard, H. D., Ligtenberg, S. R. M., Fricker, H. A., Vaughan, D. G., van den Broeke, M. R., & Padman, L. (2012). Antarctic ice-sheet loss driven by basal melting of ice shelves. *Nature*, *484*(7395), 502-505. https://doi.org/10.1038/nature10968

Rignot, E., Bamber, J. L., van den Broeke, M. R., Davis, C., Li, Y., van de Berg, W. J., & van Meijgaard, E. (2008). Recent Antarctic ice mass loss from radar interferometry and regional climate modelling. *Nature Geoscience*, *1*(2), 106-110. https://doi.org/10.1038/ngeo102

Rignot, E., Jacobs, S., Mouginot, J., & Scheuchl, B. (2013). Ice-shelf melting around Antarctica. *Science*, *341*(6143), 266-270. https://doi.org/10.1126/science.1235798

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, 古林 未来,
東北大・理, E-mail: tkuroda(at)tohoku.ac.jp (黒田)
小玉 貴則, 東大・総合文化研究科
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, Mirai Kobayashi, Graduate School of Science, Tohoku University
Takanori Kodama, Komaba Institute for Science, The University of Tokyo
Yasuko Kasai, National Institute of Information and Communications Technology
Hideo Sagawa, Faculty of Science, Kyoto Sangyo University
Hiroyuki Maezawa, Graduate School of Science, Osaka 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 モデルを用いた初期火星及び金星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．具体的には初期火星 GCM (Kamada et al., 2020)に河川流水と氷河の底融解をカップリングさせたシミュレーションを行い，現在の火星地表面に残る流水地形を再現可能な条件を示した(Kamada et al., 2021, under revision)．また金星 GCM の中に見られる赤道域のケルビン波について解析を行い，雲底部の物質循環のメカニズムに迫った．

１．はじめに

我々はかねてから，MIROC モデルの火星(現在及び形成初期)・金星化に着手している．その中で初期火星の気候システムの解明にあたっては，観測されている流水地形(valley networks: 以降 VNs)の分布を再現する気候について「温暖・湿潤」か「寒冷で氷で覆われた」かで議論が分かれていたところ，我々は 1.5~2 bar の CO_2大気に 3%以上の混合比の H_2の存在を仮定することでその中間といえる「冷涼・湿潤」な気候を再現し，火山噴火や隕石衝突などの特別なイベントの発生を考慮しなくても観測されている流水地形を作ることができることを世界に先駆けて示した(Kamada et al., 2020)．その後我々は降水あるいは氷河底融解が VNs 形成に要する時間スケールを見積もるため，この初期火星 GCM (PMGCM)に地表流水モデル CRIS (Catchment-based RIver Simulator)，さらに全球氷床モデル ALICE (Accumulation and ablation of Large-scale ICE-sheets with dynamics and thermodynamics)をカップリングさせ，温暖初期火星から寒冷初期火星までの様々な条件下での VNs の再現条件を調べる研究に着手した．

また、金星探査機「あかつき」の IR 画像が示した雲光学的厚さの不連続構造(Peralta et al., 2020)に着目し，AFES 金星 GCM が Kelvin-like な重力波による温度擾乱が雲の厚さの変動を引き起こすことを示した(Ando et al., 2021)ことを受けて，MIROC に硫酸雲の生成消滅過程を導入した金星 GCM を用いて，赤道域雲底部の Kelvin 波構造がもたらす雲の変動を調べた．我々のモデルには AFES 金星 GCM では考慮されていない粒径の大きなモードの存在も導入されており，先行研究と異なる仮定をもとに相補的な理論の構築につながる検証を試みた．

２．問題設定・方法

PMGCM は Kamada et al. (2020)と同様の物理過程を用い(CO_2-H_2の衝突誘起吸収のパラメタリゼーションは Turbet et al. (2020)に更新)、水平分解能 T21，大気上端高度約 60 km の鉛直 15 層で計算を行った．地形は Tharsis 山地形成とそれに伴う地軸移動が起こる前の推定(Bouley et al., 2016)を用い，当時の水量を 500 m GEL (global equivalent layer)相当と仮定して海面高度は-2.3 km (Cirton et al., 2018)に設定した．地表流水モデル CRIS (Kamada et al., 2021)は μm スケールから cm スケールまでの土砂の掃流砂輸送と浮遊砂輸送を考慮し，PMGCM で求めた降水量分布とカップリングさせて，PMGCM よりも細かい T106 相当の水平分解能で地表流水量分布を求めた．また全球氷床モデル ALICE (Kamada et al., under revision)は SICOPOLIS (Greve, 1997)を球面座標に適用したもので，PMGCM の降雪量・大気季節変動とカップリングさせて，寒冷なシナリオについて氷床の成長と内部温度の鉛直分布・地熱による底融解・氷分布の変動に伴う地殻の変動を 100 万年スケールで計算し，それらをもとに CRIS を用いて地表流水量を計算した．地熱フラックスは 45~65 mW m^{-2}で定義した．CRIS と ALICE の概要は図 1 に示す．

MIROC 金星 GCM は水平分解能 T21 の鉛直 52 層・上端高度~95 km で，空間固定の気体分子・硫酸雲の放射過程及び運動量と熱の水平拡散・鉛直拡散係数は Yamamoto et al. (2019)と同一とし，雲生成の物理過程と硫酸蒸気の生成に関わる簡単な化学過

程を導入している(伊藤, 2016)．雲粒径は Pioneer Venus 観測に基づく定義に従いモード 1 (有効半径 0.49 μm)，モード 2 (同 1.18 μm)，モード 2' (同 1.40 μm)，モード 3 (同 3.65 μm)の 4 種類を考慮しており，この部分がモード 1 と 2 のみを考慮した先行研究(Ando et al., 2021)との差異となっている．

３．結果と考察

初期火星計算は地表気圧 0.5, 1, 1.5, 2 bar，水素混合比 0, 1, 3, 6%，軌道傾斜角 20°, 40°, 60°の計 48 パターンについて行った．その中で温暖な条件(2 bar，H_2混合比 6%)では，降水による地表流水で観測 VNs の約 6 割を 1 万～数万年の時間スケールで形成することを示した(図 2 左)．また冷涼(寒冷すぎない)条件(2 bar，H_2混合比 3%)では氷河底融解により観測 VNs の約 5 割を 10 万～数十万年の時間スケールで形成することを示した(図 2 右)が，これより寒冷な条件(例えば 2 bar，H_2混合比 0%)では VNs の形成に必要な氷河底融解は生じなかった．

MIROC 金星 GCM の計算では，硫酸雲の光学的厚さは Peralta et al. (2020)で報告されたような雲の厚さが東西方向に急激に変化するような構造が得られた(図 3)。さらに高度 50 km においてこの構造が移動する周期でのジオポテンシャル及び光学的厚さの擾乱を調べると，ケルビン波の構造に一致するような変動構造が見られた．ケルビン波による温度・鉛直風擾乱の位相と雲生成率の位相を調べると，鉛直風が雲の光学的厚さ変動の原因となることが示唆され(Ando et al., 2021 とは異なる結果)，また光学的に厚い部分で粒径の小さい粒子に富む特徴も再現された．現在論文投稿に向けてさらなる解析を進めている．

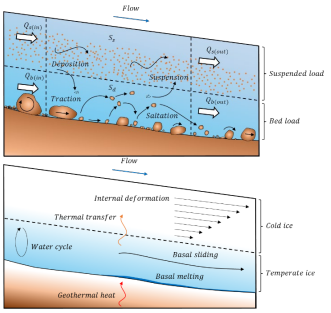

Fig. 1: Schematic diagrams of (top) river model CRIS and (bottom) ice sheet model ALICE.

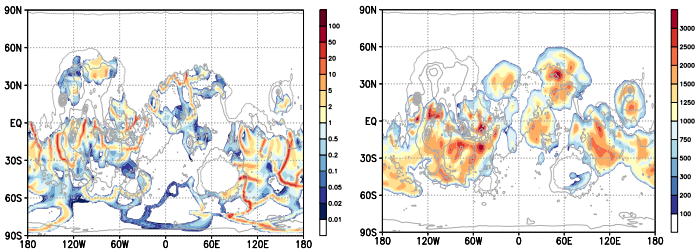

Fig.2: (left) Annual averaged runoff (mm sol^{-1}) with a H_2 mixing ratio of 6% and surface pressure of 2 bar. (right) Simulated global distributions of glacial thickness (m) in the equilibrium state with a H_2 mixing ratio of 3% and surface pressure of 2 bar. For both cases the obliquity was set to 40°.

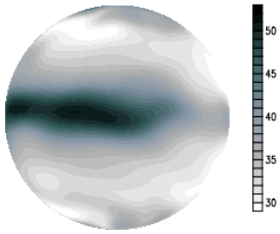

Fig. 3: A snapshot of optical thickness of sulfuric acid clouds (in 2.26 μm) simulated with our Venus GCM.

４．まとめと今後の展望

今年度は上記の結果の他，MIROC ベースの火星 GCM (DRAMATIC)が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(Miyamoto et al., 2021)，及び RSL (Recurring Slope Lineae)と呼ばれるクレーターの斜面などで観測される黒い筋模様からの水蒸気の放出とその広がりの様子・リモートセンシングによる観測可能性の検証(Kurokawa et al., 2022)に用いられ，それぞれ論文発表がなされた．DRAMATIC による火星水環境のシミュレーションは，既に実装されている氷床からの水蒸気供給・氷雲生成と重力沈降・HDO/H_2O 同位体分別過程に加え，レゴリスによる水蒸気の吸着や地下氷からの水蒸気放出の実装が進んでいるところであり，来年度以降の成果創出が見込まれる．

参考文献

(1) Kamada et al., 2020: A coupled atmosphere–hydrosphere global climate model of early Mars: A 'cool and wet' scenario for the formation of water channels. Icarus, 338, 113567.
(2) Kamada et al., 2021: Global climate and river transport simulations of early Mars around the Noachian and Hesperian boundary. Icarus, 368, 114618.
(3) Kamada et al.: Evolution of glacier on early Mars with subglacial river systems. Icarus, under revision.
(4) Peralta etal., 2020: A Long-Lived Sharp Disruption on the Lower Clouds of Venus. Geophys. Res. Lett., 47, e2020GL087221.
(5) Ando et al., 2021: Quasi-Periodic Variation of the Lower Equatorial Cloud Induced by Atmospheric Waves on Venus. J. Geophys. Res. Planets, 126, e2020JE006781.
(6) Turbet et al., 2020: Measurements and semi-empirical calculations of CO_2+CH_4 and CO_2+H_2 collision-induced absorption across a wide range of wavelengths and temperatures. Application for the prediction of early Mars. Icarus, 346, 113762.
(7) Bouley et al., 2016: Late Tharsis formation and implications for early Mars. Nature, 531, 344–347.
(8) Cirton et al., 2018: Timing of oceans on Mars from shoreline deformation. Nature, 555, 643–646.
(9) Greve, 1997: A continuum-mechanical formulation for shallow polythermal ice sheets. Philos. Trans. Royal Soc. A, 355.
(10) Yamamoto et al., 2019: Solar-locked and geographical atmospheric structures inferred from a Venus general circulation model with radiative transfer. Icarus, 321, 232–250.
(11) 伊藤一成, 2016: GCM study of the Venusian cloud formation and distribution: Effects of atmospheric chemistry and circulation，修士論文，東北大学大学院理学研究科.
(12) Miyamoto et al., 2021: Intense zonal wind in the Martian mesosphere during the 2018 Planet-encircling Dust Event observed by ground-based IR heterodyne spectroscopy. Geophys. Res. Lett., 48, E2021GL092413.
(13) Kurokawa et al., 2022: Can we constrain the origin of Mars' recurring slope lineae using atmospheric observations? Icarus, 371, 114688.

惑星中層大気大循環の力学

Dynamics of general circulations of planetary middle atmospheres

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

要旨

現実的な金星大気大循環モデルでは，帯状平均場から擾乱場へのエネルギー変換率や擾乱の流線関数・速度ポテンシャルを基に，短周期擾乱の構造や成因を議論した．厚い雲で覆われた惑星のスーパーローテーションの力学に関しては，サブグリッドスケール水平拡散がスーパーローテーションに与える影響を調査した．

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，

(1) 放射伝達と地形を組み込んだ金星大気大循環モデル(Yamamoto et al. 2021)を用いて，短周期擾乱の構造や成因を明らかにする．特に，雲底の赤道ジェットや雲層内の微細構造の 3 次元構造を明らかにする．また，短周期擾乱がスーパーローテーションに与える影響を評価する．

(2) Venus-like 簡略化 GCM (Yamamoto & Takahashi 2016, 2018; Tsunoda et al. 2021)を用いてスーパーローテーションの力学や擾乱のサブグリッドスケール拡散依存性を明らかにする．

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）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 で計算した(Yamamoto et al. 2021)．今年度は，短周期擾乱の構造と成因について調査した．

これまでスーパーローテーションの数値実験では，サブグリッドスケール水平拡散の値はモデルによって異なり，地球 GCM で用いる水平拡散値より大きいモデルや小さいモデルがある．しかしながら，サブグリッドスケール水平拡散がスーパーローテーションに与える影響は詳しく調査されていない．本年度は，Venus-like 簡略化 GCM (Yamamoto & Takahashi 2016, 2018; Tsunoda et al. 2021)を用いて，水平拡散がスーパーローテーションに与える影響についても調査した（上記の研究目的 2）．

３．結果と考察

３．１．放射伝達と地形を組み込んだ金星大気大循環モデル

東京大学大気海洋研究所の金星大気大循環モデル(Ikeda 2011; Yamamoto et al. 2021)における短周期擾乱(1－10 日周期)にフォーカスし，その中で最も卓越した波の構造と成因について調査した．雲頂(65－70 km)や雲底(～50 km)の短周期波動の中で最も強いシグナルは東西波数 1 の 7.5 日波であった．この 7.5 日波は，雲上部では Rossby 波として，雲底では赤道 Kelvin-like 波と高緯度 Rossby 波のペアとして出現する．雲上部の Rossby 波は，極向き水平渦熱輸送により帯状平均有効位置エネルギーから擾乱への変換が起こり，傾圧不安定による形成・維持が示唆される．雲底では，臨界緯度を横切る水平熱および運動量輸送による帯状平均運動エネルギーと帯状平均有効位置エネルギーから擾乱への変換が起こるので，赤道 Kelvin-like 波と高緯度 Rossby 波の成因として水平シアー不安定（あるいは順圧不安定）と傾圧不安定が示唆される．

雲底中緯度付近では，7.5 日波の流線関数や速度ポテンシャルが臨界緯度を横切るような形態で，Kelvin-like 波と Rossby 波が結合する．赤道の臨界高度付近では(～54 km)，赤道 Kelvin-like 波に代わり，赤道 Rossby 波が出現する．このように，異なる高度および緯度帯で，異なる波動構造をもつ．臨界緯度や臨界高度を挟んで異なる構造をもつ２つの波のペアは，「臨界緯度を横切る流線関数や速度ポテンシャル」や「臨界緯度や臨界高度上の帯状平均場からのエネルギー変換」を介して結合している描像が得られた．

３．２．簡略化した金星大気大循環モデル

以前より，金星のように中層大気に加熱源をもつ惑星を模した Venus-like 簡略化 GCM (Yamamoto & Takahashi 2016, 2018; Tsunoda et al. 2021)を用いて，サブグリッドスケール水平拡散が大気大循環構造に与える影響について調査してきた．本年度は，追実験や解析を行い，その実験結果を整理した．金星のような条件下での力学的コアの長期時間積分において，スーパーローテーションと擾乱がサブグリッドスケールの水平 4 次拡散に敏感であることがわかった．水平拡散が強いと，スーパーローテーションの強度が大きくなり，極域の間接循環が弱まる．また，この強い水平拡散は，鉛直伝播する小スケールの擾乱を強く散逸するため，鉛直渦運動量輸送に影響を与える．引き続き，スーパーローテーションの長時間積分シミュレーションにおける水平拡散の感度実験に基づいて，水平拡散がスーパーローテーションや擾乱に与える影響を評価する必要がある．

４．まとめと今後の展望

現実的な金星大気大循環モデルでは，帯状平均場から擾乱場へのエネルギー変換率や擾乱の流線関数・速度ポテンシャルを基に，短周期擾乱の構造や成因を議論した．来年度，論文化したい．さらに，このアプローチを熱潮汐波にも応用して，１日および半日熱潮汐波の循環構造やエネルギー収支を明らかにしたい．

厚い雲で覆われた惑星のスーパーローテーションの力学に関しては，金星のような条件下での力学的コアの長期時間積分において，サブグリッドスケール水平拡散がスーパーローテーションに与える影響を調べた．今後，水平拡散が角運動量収支や波動構造に与える影響を詳しく調査したい．最終的には現実な金星大気大循環モデルの改良につなげたい．

参考文献

(1) Ikeda 2011: Development of radiative transfer model for Venus atmosphere and simulation of superrotation using a general circulation model, Ph.D. thesis, The University of Tokyo, Japan

(2) Yamamoto, M., & Takahashi, M. 2016: General circulation driven by baroclinic forcing due to cloud layer heating: Significance of planetary rotation and polar eddy heat transport. Journal of Geophysical Research: Planets, 121, 558-573. https://doi.org/10.1002/2015JE004983

(3) Yamamoto, M., & Takahashi, M. 2018: Effects of polar indirect circulation on superrotation and multiple equilibrium in long-term AGCM experiments with an idealized Venus-Like forcing: sensitivity to horizontal resolution and initial condition. Journal of Geophysical Research: Planets, 123, 708-728. https://doi.org/10.1002/2017JE005385

(4) 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

(5) 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

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 壱学，東大・理学系研究科，E-mail: KazuMurata(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

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、モデル内でも太平洋十年規模振動が再現できていることが確認できた．このモデルの水温変化式の各項をオンラインで保存し，完全に閉じる熱収支解析を行った結果，鉛直拡散とエントレインメントが太平洋十年規模振動に伴う海面水温偏差の形成において重要な役割を果たしていることが明らかになった。

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う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(PDO, 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，太平洋十年規模振動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° ×1/4° ，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（Tsujino et al. 2018）の 3 時間間隔データの気候値を用いて，20 年間スピンアップした．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．鉛直拡散・粘性係数の計算には Furuichi et al. (2012)のパラメタリーションを使用した．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．前年度の研究で，水温や混合層厚が現実的に再現できていることを確認した．

３．結果

モデルの出力結果を用いて，海面水温偏差に対する経験的直行関数（EOF）解析を行ったところ，PDO に伴う海面水温偏差の空間パターンと時間発展が再現されていることが確認できた（図 1）．そこで，特に正の PDO（1979-1995 年）と負の PDO（1960-1975 年，2001-2013 年）の期間に関して混合層熱収支式のコンポジット解析を行い，冬季海面水温偏差の形成メカニズムを調べた（図 2）．PDO に伴う海面水温偏差には季節依存性があり，夏季に振幅が小さく，冬季に振幅が大きくなる傾向が見られたため，7 月から積算する形で計算を行った．その結果，PDO の西極（175° W-155° W，25° N-40° N）の負の海面水温偏差の形成において，鉛直拡散項とエントレインメント項が重要な役割を果たしていることが明らかになった．一方，海面熱フラックス項と南北移流項は負の海面水温偏差をダンプする方向に働いていることが明らかになった．

４．まとめ

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 PDO 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 JRA55-do によって駆動するシミュレーションを実施した．本研究で用いたモデルで PDO をよく再現できていることが確認できたため，正負それぞれの位相での水温偏差形成メカニズムを混合層熱収支解析によって調べたところ，鉛直拡散項とエントレインメント項による寄与が大きいことが明らかになった．PDO に伴う冬季の海面水温偏差の形成に鉛直拡散が重要であることを指摘したのは本研究が初めてである．今後は，鉛直拡散項の偏差の原因を探るために，鉛直拡散係数の偏差のメカニズムも明らかにしていく予定である．

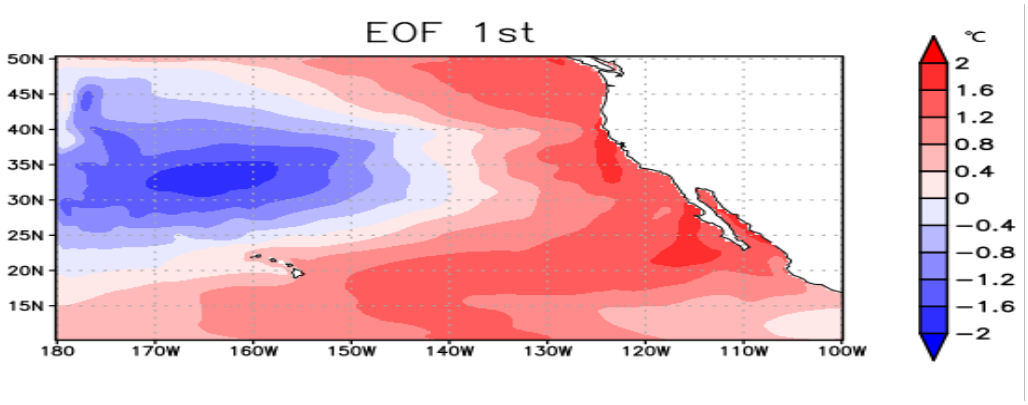

図１：モデルによって再現された海面水温偏差に対する EOF 第 1 モードの正位相時の水温偏差の空間パターン.

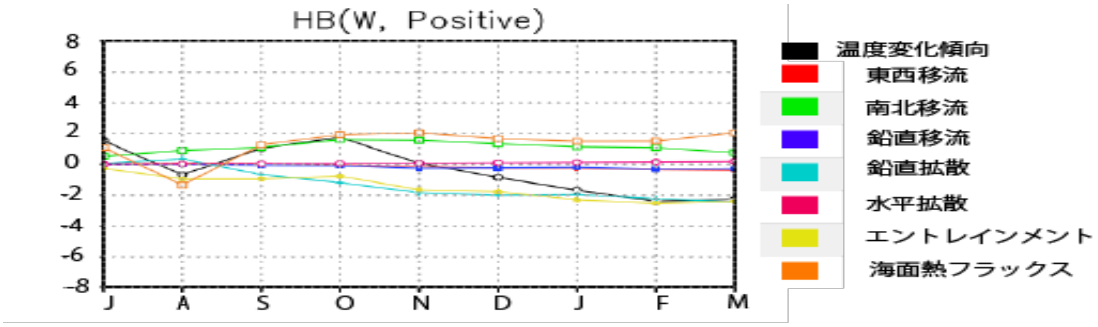

図２：PDO の西極（175° W-155° W, 25° N-40° N）で領域平均した混合層熱収支式の偏差を 7 月から積算した時系列のコンポジット図.

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***, e2020GL088194. 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

(10) Furuichi, N., Hibiya, T., & Niwa, Y. (2012). Assessment of turbulence closure models for resonant inertial response in the oceanic mixed layer using a large eddy simulation model. *Journal of Oceanography*, ***68***, 285-294. https://doi.org/10.1007/s10872-011-0095-3

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　將，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

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、観測データと領域大気モデルを使用して海面水温の温暖化が日本周辺の降水量に与える影響を調べた。昨年度の高解像度の領域海洋モデルを用いて得られた 20 世紀における東シナ海の海面水温の温暖化パターンを、領域大気モデルの下部境界条件として与え大気応答を調べた結果、海面水温の温暖化により初夏の九州南部から南西諸島北部における降水量が増加することが明らかになった。

１．はじめに

大気の温暖化に伴い海洋も温暖化が進んでいる。過去の研究から 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)。昨年度ではそのうち黒潮が流れる東シナ海に焦点を当て、高解像度の領域海洋モデルを用いた 20 世紀の海面水温の再現実験を行い、東シナ海の黒潮流軸付近と中国沿岸の大陸棚上の 2 か所の領域で海表面水温の上昇トレンドが大きいことを明らかにした(Sasaki and Umeda 2021)。本年度はこの 20 世紀を通じた海面水温上昇トレンドが大気に与える影響を明らかにすることを目的とする。そのために過去の研究により、海洋から大気への強い影響が示されている 6 月(Sasaki and Yamada 2018)に着目し、観測データと領域大気モデルを組み合わせた解析を行う。

２．問題設定・方法

領域大気モデルは WRF の ver 4.0(Skamarock et al. 2019)を使用した。領域は 31°N、120°E を中心としたランベルト正角円錐図法で東西方向に 200 グリッド、南北方向に 180 グリッド、鉛直方向は 32 層、空間解像度は 20km である。モデルの初期条件と側面境界条件は NCEP/CFSR 再解析データの 6 時間ごとのデータを、下部境界条件は OISSTv2 の日毎の衛星データを基にした海面水温データを使用した。期間は 1991 年から 2010 年まで各年の 5 月 28 日から 7 月 1 日であるが、スピンアップの期間を考慮して解析には 6 月のデータのみを使用した。

20 世紀の海面水温上昇の大気への影響を調べるために、上記の標準実験(ctl run)に加えて感度実験(sensitivity run)を行った。感度実験のための海面水温偏差は昨年度に領域海洋モデルを用いて計算した 1901 年から 2010 年までの東シナ海における海面水温の線形トレンドの値に 100 年をかけた値から、その東シナ海での領域平均値(約+1.5℃)を引いたものを与えた。この空間パターンは、上述したように黒潮流軸付近と中国沿岸の大陸棚上で強い正の海面水温偏差(約+0.5℃)を持ち、それ以外の領域で弱い正から負の海面水温偏差を持っている(図示せず)。この海面水温偏差を、1991 年から 2010 年の各年の下部境界条件に足してモデル実験を行い、実験結果について標準実験との差をとることで、この東シナ海の海面水温上昇トレンドの大気への影響を明らかにする。

３．結果と考察

まず、モデルの標準実験の結果の妥当性のチェックのために降水量について TRMM(Tropical Rainfall Measuring Mission) 3B43 データと 1998 年から 2010 年の 6 月の降水量の平均値について比較を行った。その結果、梅雨前線に伴う日本周辺の降水量をモデルはよく再現している。

次に感度実験を行い、日本周辺の降水量について標準実験との差を調べた(Fig. 1)。その結果、九州南部から南西諸島北部にかけて降水量の有意な増加がみられた。すなわち、これらの領域では黒潮流軸付近と中国沿岸の大陸棚上での水温上昇に対応して降水量が増加している。一方、その西側の東シナ海上では降水量の減少がみられる。したがって東シナ海上全体で平均した降水量は標準実験と感度実験でほとんど差がない。このことは、海面水温偏差として東シナ海での領域平均値を引いた値を与えたことと整合的である。

さらにこのモデルで見られた九州南部から南西諸島北部にかけての降水量の変化が、実際の降水量のトレンドと整合的かどうか調べるために、APHRO-JP dataset の 1900 年から 2011 年までの陸上の降水量と、NOAA の 20 世紀再解析データ(NOAA20CR)の 1901 年から 2010 年までの降水量について、線形トレンドとその統計的有意性を求めた。その結果、どちらのデータからも上述のモデルの結果と同様に九州南部から南西諸島北部にかけて有意な降水量の増加がみられた(図示せず)。また降水量変化の振幅についても、オーダーとして同程度である。ただし、空間パターンは観測の降水量変化の方がより組織化している。なお同様の降水量増加のトレンドは 6 月だけではなく、年平均した降水量にもみられる。以上の結果をまとめると、黒潮流軸付近と中国沿岸の大陸棚上の海面水温の上昇は、初夏の九州南部から南西諸島北部における降水量を増加させる。

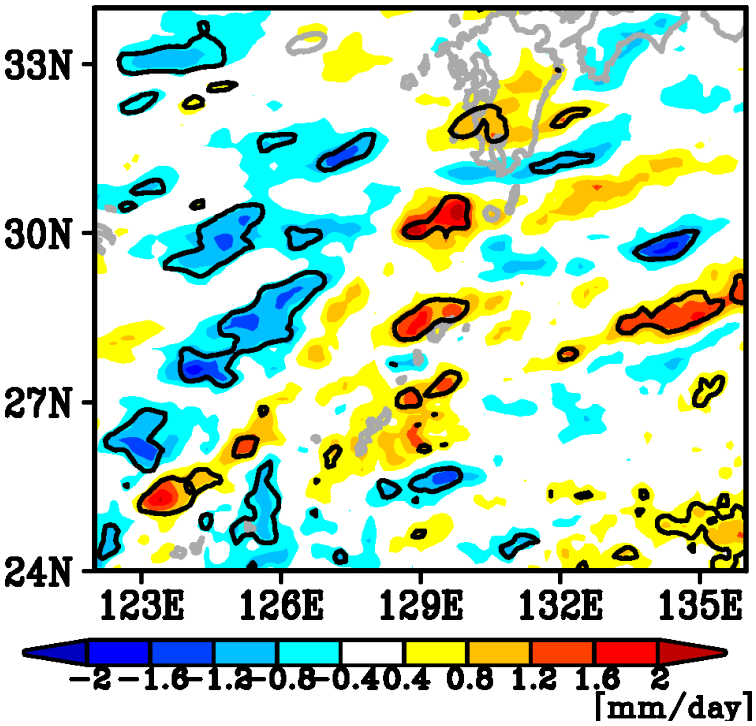

Fig. 1 Precipitation difference (color) between sensitivity minus ctl run from 1991 to 2010 in June. The contour denotes the regions where the difference is statistically significant at 90% confidence level.

4．まとめと今後の展望

本研究のモデル結果により、東シナ海の海面水温上昇トレンドは九州南部から南西諸島北部における降水量の上昇を生じることが明らかになった。この両者の関係のメカニズムを明らかにすることが今後の課題である。また今回の実験では、感度実験で下部境界条件として与えた海面水温偏差は東シナ海での領域平均値を引いたものであった。これは大気の温暖化による海面水温の温暖化の影響を除去するためであった。しかし東シナ海での海面水温上昇の領域平均値(約+1.5℃/100 年)は、大気の温暖化よりも大きい。したがって、このモデル設定が最善であるかについても今後さらに検討する必要がある。

参考文献

(1) 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, 34, 4803-4815, doi:10.1175/JCLI-D-20-0421.1.

(2) Sasaki, Y. N., and Y. Yamada, 2018: Atmospheric response to interannual variability of sea surface temperature front in the East China Sea in early summer. Climate Dynamics, 51(7), 2509-2522, doi: 10.1007/s00382-017-4025-y.

(3) Skamarock, W. C., J. B. Klemp, J. Dudhia, D. O. Gill, Z. Liu, J. Berner, W. Wang, J. G. Powers, M. G. Duda, D. M. Barker, and X.-Y. Huang, 2019: A Description of the Advanced Research WRF Version 4. NCAR Tech. Note NCAR/TN-556+STR, 145 pp. doi:10.5065/1dfh-6p97.

(4) Wu, L. X., and Coauthors, 2012: Enhanced warming over the global subtropical western boundary currents. Nat. Clim. Chang., 2, 161-166.

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硫酸濃度依存性を調べた。金星大気中に存在する惑星規模波動の解析を行い，従来，4 日波（ケルビン波）・5 日波（ロスビー波）と呼ばれていた大気波動が，どちらもロスビー・ケルビン結合不安定によって励起されることを明らかにした。また，新たに開発した赤外放射輸送モデルを GCM に組み込み，安定に時間積分できることを確認した。

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。

今年度は金星雲物理モデルと赤外放射輸送モデルの開発を進め，GCM への組み込み作業を行うとともに，既存の静力学 GCM によるシミュレーションデータを解析し，金星大気中に存在する惑星規模波動の解析を行った。

３．結果と考察

静力学 GCM を利用した予備的な研究により，金星大気中の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., 2021)。低緯度の下部雲層では，その高度に存在するケルビン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の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。しかしながら，上層雲（高度 65-70 km 程度）の再現性には問題点がみられた。そこで，濃硫酸エアロゾルの濃度を可変とし，雲モデルの改善を図った。その結果，上層雲では低濃度（50%程度）の硫酸エアロゾルが作られることが示され，観測と整合的な雲分布が再現される可能性が示唆された。現在，形成される雲分布のパラメータ依存性を整理しつつあり，結果を研究雑誌に投稿予定である。

金星大気の雲頂（高度 70 km 程度）では 4 日と 5 日程度の周期をもつ大気波動が観測されており，東西平均風に対する東西位相速度と波が存在する緯度分布の違いから,それぞれ赤道ケルビン波と中緯度ロスビー波と呼ばれている（Del Genio & Rossow, 1990; Imai et al., 2019)。これらの波の構造や成因はこれまで明らかになっていなかったが，我々は静力学 GCM によってこれらの波の再現に成功した（Takagi et al., 2022)。詳しい解析の結果，4 日波は赤道域のケルビンモード（高度 65-80 km）と中緯度のロスビーモード（高度 65-75 km）の共鳴による「ロスビー・ケルビン結合不安定（Iga & Matsuda, 2005)」によって励起されていることを明らかにした。4 日波による角運動量輸送は赤道向きであり，子午面循環メカニズム（Gierasch, 1975; Matsuda 1980）を通じて，大気スーパーローテーションの維持に寄与していることが期待される。一方，5 日波は赤道域のケル

ビンモード（高度 40-55 km）と中緯度のロスビーモード（高度 55-80 km）および高緯度のロスビーモード（高度 45-65 km）の 3 つの波の共鳴によるロスビー・ケルビン結合不安定によって励起されている。ケルビンモードと中緯度ロスビーモードは 352 K の等温位面，ケルビンモードと高緯度ロスビーモードは 341 K の等温位面上で結合している。5 日波は赤道向きに角運動量を輸送し，下部雲層の大気スーパーローテーションの強化に寄与する可能性がある。また，中緯度と高緯度のロスビーモードは傾圧不安定的な構造をもち，顕著な極向き熱輸送を伴っている。ケルビンモードは高度 55 km 付近の臨界高度より上に伝播できないため，雲層上端付近では中緯度のロスビーモードのみが観測される。5 日波は安定度の低い雲層中で励起されるため，今後 NICAM による再現実験を実施する予定である。

赤外域の金星大気用放射モデルがほぼ完成したため，パフォーマンスをチェックするために静力学 GCM に組み込み，時間積分を実施した。予備的な結果によると，地面付近の気温が 680 K 程度となり，観測よりも 50 K ほど低くなった。パラメータを調整し,現実的な温度分布が再現でき次第，NICAM への導入を進める予定である。

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，あかつき観測と比較しつつ，熱潮汐波や 4 日波・5 日波の力学の解明を進めたい。

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) Del Genio and Rossow, 1990: Planetary-scale waves and the cyclic nature of cloud top dynamics on Venus. J. Atmos. Sci., 47, 293-318.

(8) Ando et al., 2021: Quasi-Periodic Variation of the Lower Equatorial Cloud Induced by Atmospheric Waves on Venus. J. Geophys. Res.: Planets, 126, e2020JE006781. https:// doi.org/10.1029/2020JE006781

(9) Takagi et al., 2022: A GCM study on the 4-day and 5-day waves in the Venus atmosphere. J. Geophys. Res.: Planets, 127, e2021JE007164. https://doi.org/10.1029/2021JE007164

MIROC と NICAM を用いた地球型惑星における気候決定要因の理解

Understanding climates for terrestrial planets using MIROC and NICAM

小玉 貴則，東大・総合文化・先進 E-mail: koda(at)g.ecc.u-tokyo.ac.jp
高須賀 大輔，JAMSTEC,
シェリフ 多田野 サム，リーズ大学
黒田 剛史，東北大学大学院 理学研究科
齋藤 冬樹，JAMSTEC
Takanori Kodama, Komaba Institute for Science, Graduate School of Arts and Science, The University of Tokyo
Daisuke Takasuka, JAMSTEC
Sam Sherriff-Tadano, University of Leeds
Takeshi Kuroda, Tohoku University
Fuyuki Saito, JAMSTEC

要旨（明朝 9pt)

地球型惑星の気候は自転軸傾斜角をはじめとする軌道パラメタにより大きく影響を受けることが知られている。現在数多くの系外惑星が検出され、さまざまな自転軸傾斜角を持つ地球型惑星が想定されている。MIROC と NICAM を用いて、地球に比べ、自転軸傾斜角が大きく異なった惑星での気候を調査した。結果として、解像度と雲のパラメタリゼーションの違いにより、シミュレーションされた気候は大きく影響を受け、雲と水蒸気の役割の重要性が明らかになった。

１．はじめに（節の表題：MS ゴシック 9pt）　（以下各節のタイトルは本例の通りでなくても、実質内容が同じなら結構です。）

現在、候補天体も含めると、5000 天体を超える系外惑星が検出され、その中にはハビタブルゾーン内にある地球に似たバルク密度を持つ地球型惑星が報告されている。地球の自転軸傾斜角は地球に季節変動をもたらす要因であり[1]、現在の値は約 23.5°であるが、4 万年周期で 22°から 25°まで変化することがわかっている。加えて、大きな衛星を持たない火星の自転軸傾斜角は、0°から 60°程度まで変動していたことが知られている[2]。自転軸傾斜角は、ハビタブル惑星の気候において大きな影響を持つと考えられる。系外惑星科学における惑星気候推定は主に鉛直一次元放射対流平衡モデルや南北一次元エネルギーバランスモデルにおいて推定され、近年、大気大循環モデル(GCM)を用いた気候推定が始まってきた[3]。従来の大気大循環モデルでは、グリッドスケール以下の雲・水蒸気に関連した物理現象を扱うために大規模凝結及び積雲対流パラメタリゼーションが用いられてきた。一方で、地球気象の分野において、モデルの水平解像度の高解像度化により、雲微物理を陽に扱えるようになった。しかしながら、系外惑星分野において、『モデルの高解像度化』や『雲微物理』がどの程度必要か？は検証できていない。それらが大きく気候場を変えうるものかどうかを定量的に明らかにすることが、系外惑星気候推定において、高解像度モデルが必要かどうかの答えになるだろう。

２．問題設定・方法

本研究課題では、NICAM[4]を用いて、1)低解像度(~220km 格子)+大規模凝結/積雲対流パラメタリゼーション、2)高解像度モデル(~14km 格子)+雲微物理の 2 種類の数値実験を異なる自転軸傾斜角(0°、23.5°、45°、60°)において行った。鉛直解像度は、モデル上端を 40km とし、40 層とした。初期状態として、300K の等温大気、Qobs セッティングで与えた SST を考えた。スラブオーシャンモデルを用いて、混合層は 50m とした。背景大気は、348ppm の二酸化炭素を含んだ 1 気圧の空気を仮定した。惑星半径/質量、公転周期、自転角速度は地球の値を用いた。低解像度モデルは 15 年間、高解像度モデルは 10 年間の積分を行い、最後の 5 年を解析した。計算は全てスーパーコンピュータ富岳で実施した。

３．結果と考察

低解像度モデルでの低自転軸傾斜角(0°、23.5°)の場合、中高緯度より低緯度で日射量が多く、表面温度は日射量に従って低緯度で高温になった。一方で、高自転軸傾斜角(45°、60°)の場合、中高緯度で日射量が多く、表面温度も高い。低自転軸傾斜角の場合と高自転軸傾斜角の場合では、反対の子午面方向の温度勾配を示した。降雨、大気循環においても解析を行い、先行研究とよい整合性がとれていることを確認した。

高解像度モデルから得られた表面温度は、どの自転軸傾斜角においても、低解像度モデルより高い温度を示した。加えて、低解像度で自転軸傾斜角 60°の場合のみでしか見られなかった、極に向かって大きくなる温度勾配が、高解像度では自転軸傾斜角 45°と 60°で見られた。高解像度モデルは、低解像度モデルに比べ、多くの水蒸気量と降雨量を示した。大気循環においても、低解像度モデルの自転軸傾斜角 45°では 1 セルであったが、高解像度モデルの自転軸傾斜角 45°では 2 セルであった。

低解像度モデルと高解像度モデルでの結果を比較すると、雲微物理を考慮した高解像度モデルは多くの降雨量と水蒸気量を示

した。また、自転軸傾斜角 45° における両モデルにて、異なる気候状態を示し、南北温度勾配も反対であった。加えて、低解像度モデルでは中高緯度にて降雨のピークを示していたが、高解像度モデルは ITCZ のような降雨帯を示した。表面における正味放射収支を解析すると、高解像度モデルにおける多くの雲・水蒸気がエネルギー収支に寄与し、低解像度と異なる温度勾配を形成していることがわかった。この結果は、モデル内でのエネルギー分布が異なることに起因していることを示唆しており、今後、さらなる解析を行い、気候形成メカニズムの理解を進めていく予定である。これら結果は、国際・国内学会において発表を行い、The Astrophysical Journal へ投稿済みである。

４．まとめと今後の展望

本年度では、MIROC を用いた大陸配置を変えた実験が行えなかったため、大陸分布と氷床が持つ気候決定への役割を調べるところまでできなかった。よって、今後は、それらも加味し、大気海洋系の振る舞い、役割の理解を進めていきたいと考えている。これら理解は、地球気候を理解するだけにとどまらず、古気候分野や惑星科学・天文学分野において、重要な研究対象となるため、本研究はその礎になるものと言える。さらに、MIROC と NICAM のさらなる発展・応用を促し、一般的な惑星気候学へと誘うものになると考えている。

参考文献

(1) Abe-Ouchi, A., Saito, F., Kawamura, K., et al.2013, Nature, 500, 190.
(2) Laskar, J., and Robutel, P. 1993, Nature, 361, 608.
(3) Kodama, T., Genda, H., Leconte, J., and Abe-Ouchi, A. 2021, Journal of Geophysical Research: Planets, 126, e06975.
(4) Tomita, H., and Satho, M. 2004, Fluid Dynamics Research, 34, 357.

経年的な大気海洋変動が MJO の顕在化に果たす影響の定量的評価

Quantiative Evaluation of the influences of the interannual atmosphere-ocean variability on MJO realization

高須賀 大輔，海洋研究開発機構，E-mail: dtakasuka(at)jamstec.go.jp
末松 環，理化学研究所計算科学研究センター，E-mail: tamaki.suematsu(at)riken.jp
神山 翼，お茶の水女子大学理学部情報科学科, E-mail: tsubasa(at)is.ocha.ac.jp
Daisuke Takasuka, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology
Tamaki Suematsu, RIKEN Center for Computational Science
Tsubasa Kohyama, Department of Information Sciences, Ochanomizu University

要旨

マッデン・ジュリアン振動（MJO）の顕在化の経年変動に対して、エルニーニョ南方振動（ENSO）および成層圏準２年周期振動（QBO）が与える影響についての定量的評価を、全球非静力学大気モデル NICAM を用いた数値実験によって行う。本年度は特に QBO の影響を評価するためのナッジング機能の実装および調整を行うとともに、その熱帯降水への平均的なインパクトを調べた。その結果、対流圏上層より上部の熱帯大気に対して QBO に伴う水平風分布のナッジングを行うことで、QBO が励起する対流圏界面付近の気温変動が自発的に再現されることを確認した。一方で、熱帯対流活動への QBO の影響は系統的な違いが強くは確認できず、鉛直解像度の向上やより長期の実験の実施などの施策の必要性が示唆された。

１．はじめに

マッデン・ジュリアン振動（MJO）は熱帯域で最も顕著な季節内振動であり、大規模に組織化した対流活動がインド洋から西太平洋にかけて約 30-60 日の時間スケールでゆっくり東進する現象として、特に北半球冬季に活発に観測される。MJO は様々な気象・気候場に影響を与える要因となるため、その活動がある年にどれだけ活発になりうるかを左右する物理的要因を把握し、適切な予測につなげることは重要である。MJO の活動を経年的に変調させる背景場の変動としては、エルニーニョ・南方振動(ENSO)(e.g., Hendon et al. 1999, Suematsu and Miura 2018）と成層圏準２年周期振動（QBO)(e.g., Yoo and Son 2016）が代表的な例として挙げられている。前者について、例えば Suematsu and Miura（2018）は中央太平洋における海面水温の上昇が MJO の顕在化に好都合な環境場を形成することを指摘した。後者については、Yoo and Son（2016）では QBO が東風位相の際に MJO の活動が活発になる傾向にあることを報告しており、この理由の１つとして、QBO の東西風変動に伴って対流圏界面付近に励起される気温偏差が対流活動の振幅を調整している可能性が考えられている。これらの研究は ENSO と QBO 各々の単独影響を論じている一方で、両者の「協調的な作用」の結果として MJO の顕在化がどのように経年変動しているかについての知見はまだ乏しい。この理解を深めるためには、ENSO と QBO による MJO 顕在化への個別・複合的な影響を、数値シミュレーションを活用して定量的に評価することが一つの有効策と考えられる。

ENSO 単独の MJO 顕在化への影響を調査する際には、下部境界条件である海面水温分布のパターンおよび振幅を調節する感度実験を容易に構築可能であるが、QBO はそれ自体が内部変動であるため、その制御には工夫が必要である。そこで本研究では、成層圏の大気場をナッジングする(e.g., Martin et al., 2021）ことで QBO の影響を外的に調節する策を講じることとし、本年度はそのツールの実装と調整を行うとともに、QBO に伴う熱帯対流活動への平均的な影響を評価した。

２．モデル・実験デザイン

本研究で使用したモデルは全球非静力学大気モデル NICAM である。QBO の影響は東風位相・西風位相の場をモデルにナッジングすることでモデルに取り込む。具体的には、ERA-Interim における 1979-2018 年の北半球冬季（11 月-3 月）の 50hPa 面の東西平均東西風が平均値よりも 0.5 標準偏差以上小さい（大きい）年を QBO の東風位相（西風位相）として抽出し、抽出された年でコンポジットした各位相の水平風を、水平方向には 30N-30S, 東西方向全域にわたって、鉛直方向には高度約 13km 以上に対してナッジングした。ナッジングの時定数は任意であるが、ここでは半日および１日の時定数を試行した。今回はナッジングの実装がうまくなされているか否かの確認と、QBO の位相の違いに対する熱帯降水への平均的なインパクトを調べることが目的であるため、水平・鉛直解像度はそれぞれ約 220km・40 層（モデルトップは 40km）という比較的ライトな設定のもとで、2004 年 6 月 1 日を初期値とする 50 日間の積分を行った。

３．結果と考察

図１は、東西平均および積分期間平均した気温と東西風を QBO の東風位相と西風位相をナッジングした実験の差分として示した熱帯域での南北鉛直断面図であり、左図と右図はそれぞれ時定数半日と１日の場合に対応する。どちらの場合でも赤道付近の下部成層圏では東風、それより上では西風を示しており、QBO に伴う東西風の変動をナッジングによって適切にモデルに取り込むことができていることが確認される。また気温分布を見ると、赤道付近の対流圏界面から下部成層圏にかけて低温偏差が形成されており、水平風のナッジングによって自然に QBO に伴う気温変動も表現できることがわかる。さらに、ナッジング時定数の違いは、半日と１日の違い程度では QBO に伴う東西風や気温の振幅にさほど影響しないこともわかった。

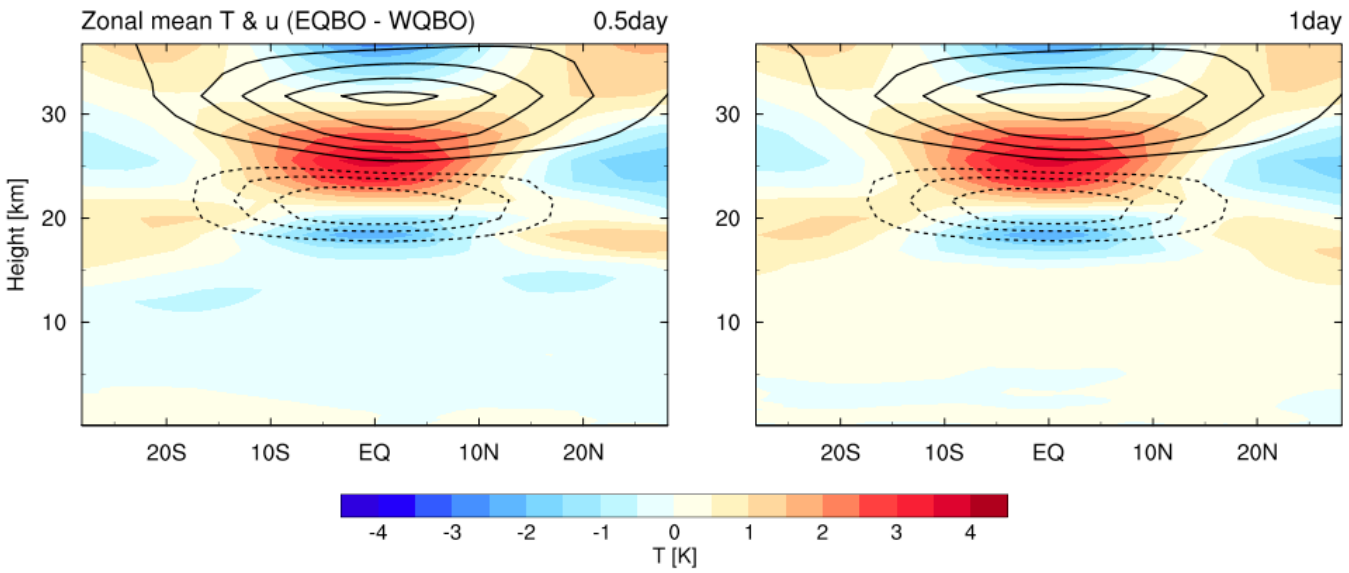

図１　東西平均および積分期間平均（50 日平均）した東西風（コンター；間隔は 5m/s で破線が負の値）と気温（カラー）に対して、QBO の東風位相をナッジングした実験から西風位相をナッジングした実験の結果を差し引いた南北鉛直断面図。ナッジング時定数が（左）半日の場合、（右）１日の場合。

QBO に伴う東西風変動のナッジング、およびそれによって励起された気温偏差が熱帯対流活動に与える平均的なインパクトを調べるため、図２に QBO の東風位相・西風位相を時定数１日でナッジングした実験における東西平均降水分布を示す。参考として、ナッジングを施していない実験の結果も同時に示している。5N 付近の降水ピークにおける降水量を比較すると、QBO 東風位相のナッジング、ナッジングなし、西風位相ナッジングの順に降水量が低下しており、この結果は QBO の東風位相の際に対流活動が活発になっている観測の傾向と整合的である。一方で、降水ピーク以外の熱帯域も含めて見ると、必ずしも上述したような系統的な差が実験間で成り立っているとは言えない。この理由の１つの可能性としては、本実験で採用した鉛直解像度が対流圏－成層圏結合を表現するには不足していることが挙げられる。合わせて、水平解像度の向上および積分期間の延長も必要であることが示唆される。

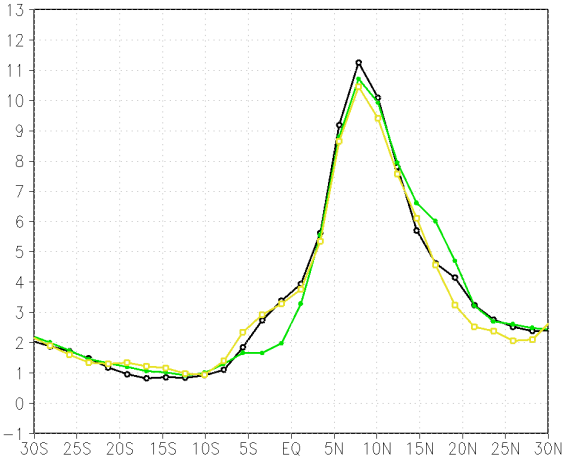

図２　QBO の東風位相をナッジング（黒）、ナッジングなし（緑）、西風位相をナッジング（黄）した実験における東西平均降水量の南北分布。ナッジング時定数は１日である。降水ピークに対しては QBO 位相と対流活動の関係について観測と同様の傾向であるが、その他の熱帯域まで含めると必ずしもそのような傾向が認められない。

４．まとめと今後の展望

MJO の顕在化頻度の経年変動の要因を ENSO と QBO の協調的な作用の観点から定量的に議論するための準備として、本年度は QBO の影響を全球大気モデル NICAM に取り入れるために必要なナッジング機能の実装と確認、および QBO の位相が熱帯対流活動へ与える平均的なインパクトを調査した。QBO の東西風変動を熱帯域の対流圏界面付近以上でナッジングすることで、QBO と付随した気温変動も自然に表現できることがわかった。また、降水ピーク近傍においては QBO と対流活動の関係について観測と同様の傾向が見られた一方で、熱帯域全体にわたってそのような傾向があるとは必ずしも言えなかった。今後は、鉛直解像度の向上を中心に感度実験を行うとともに、より長期の実験において内部で自然に再現される MJO の顕在化頻度と ENSO/QBO との関係を直接的に調べる予定である。

参考文献

(1) Hendon, H. H., Zhang, C., & Glick, J. D. (1999). Interannual variation of the Madden-Julian oscillation during austral summer. Journal of Climate, 12(8), 2538-2550
(2) Suematsu, T., & Miura, H. (2018). Zonal SST difference as a potential environmental factor supporting the longevity of the Madden–Julian oscillation. Journal of Climate, 31(18), 7549-7564.
(3) Yoo, C., & Son, S. W. (2016). Modulation of the boreal wintertime Madden‐Julian oscillation by the stratospheric quasi‐biennial oscillation. Geophysical Research Letters, 43(3), 1392-1398.
(4) Martin, Z., Orbe, C., Wang, S., & Sobel, A. (2021). The MJO–QBO Relationship in a GCM with Stratospheric Nudging. Journal of Climate, 34(11), 4603-4624.

大型大気レーダーと全球高解像度モデルを相補的に用いた中層大気大循環の階層構造の解明

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

佐藤 薫，東大・大学院理学系研究科，E-mail: kaoru(at)eps.s.u-tokyo.ac.jp
高麗 正史，東大・大学院理学系研究科，E-mail: kohmasa(at)eps.s.u-tokyo.ac.jp

要旨

対流圏界面漏斗現象（TF）は、対流圏界面の急速かつ深い下降を特徴付けられ、成層圏と対流圏の間の物質交換に重要な役割を果たすと考えられている。本研究では、再解析データ及び、TF 再現実験データを用いて、南極沿岸域で発生する TF を調べた。まず、南半球中高緯度における TF の発生頻度の気候学的な分布を調べた。先行研究の結果と同様に、TF は南極大陸沿岸で発生頻度が極大となることがわかった。総観規模の擾乱の渦運動エネルギーの地理分布と比較すると、渦運動エネルギーの極大は、南極沿岸域から 1000 km 以上南に位置していた。この結果は、南半球高緯度域における TF の発生頻度の地理分布は、ストームトラックの分布だけでは説明できないことを示唆している。次に、昭和基地における TF のコンポジット解析を行った。対流圏界面高度の負偏差が最大となったとき、TF 発生地点の近傍で Q ベクトルの発散と下降流が観測された。Q ベクトルの分布は、局地的な西風ジェットと、南北方向に縮小した総観規模の擾乱に伴う前線構造の強化に関連していると考えられる。レイトレーシング理論に基づき、南極沿岸に近づく擾乱の空間構造の変化（つまり南北方向の収縮）について、南極大陸の地形と大陸表面の放射冷却が果たす役割について議論した。

１．はじめに

近年、対流圏から中間圏までの広い高度領域を対象とした高精度・高分解能な観測が行われている。昭和基地に設置された大型大気レーダー（PANSY レーダー）は対流圏から中間圏までの 3 次元風速の鉛直プロファイルを高精度かつ高い高度・時間分解能で連続観測することができる南極唯一のレーダーである (Sato et al., 2014)。2015 年 10 月から、PANSY レーダーはフルシステムによる連続観測を継続しており、大型大気レーダーとしては類を見ない長期連続データが蓄積されている。対流圏界面の上でエコー強度の極大が現れることが知られているが、これまでの観測の中で、対流圏界面が急激に下降する「対流圏界面漏斗現象（以下、TF）」が頻繁に観測されてきた (Figure 1)。TF は対流圏と成層圏の物質交換において主要な役割を果たすと考えられている (Holton et al., 1995; Sprenger et al., 2003)。これまでに、TF の発生頻度が南極沿岸域において極大となることが指摘されていたが、その物理機構については十分に調べられていなかった。そこで、本研究においては、再解析データ、及び、TF の再現実験データの解析により、南極沿岸域における TF の発生機構を調べた。

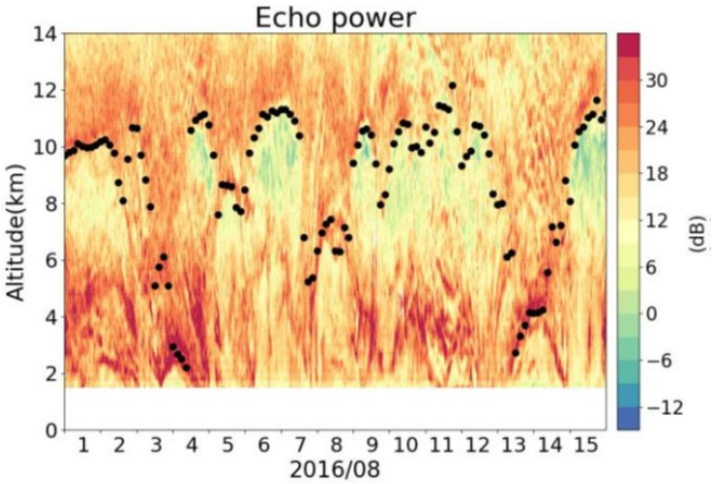

Figure 1: A time height section of echo power observed by the PANSY radar. Black closed circles indicate tropopause height.

２．手法・データ

先行研究 (e.g., Sprenger et al.; 2003) に倣い、渦位に基づく対流圏界面の定義（力学的圏界面）を用いた。本研究では、TF を３０日移動平均した対流圏界面高度からの偏差が、負に 4 km より大きいものとして定義した (詳細は、Kohma et al. (2022) を参照のこと)。TF の再現実験には、WRF v 4.3.0 を用いた。

３．結果

まず、再解析データ（ERA-5）を用い、TF の発生頻度の地理分布を調べた。Figure 2 に６~８月と１２～２月の TF の発生頻度を示した。６~８月（南半球冬季）に南極沿岸域において、TF の発生頻度が極大をもつことが明らかとなった。

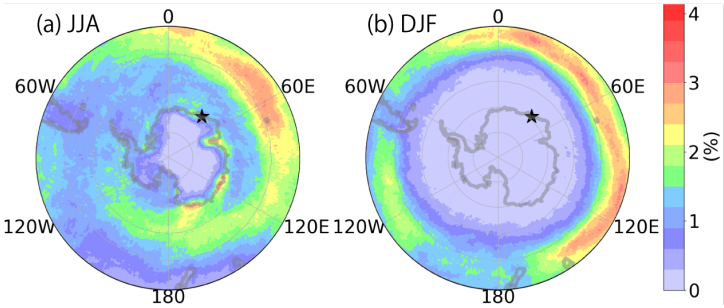

Figure 2: Spatial distributions of the frequency of TFs in **(a)** JJA and **(b)** DJF. The elevation higher than 2.5 km is denoted by thick gray contours. The stars mark the location of Syowa Station.

2016 年 8 月 4 日に昭和基地上空で発生した TF イベントについて、領域モデルによる再現実験を行った。対流圏界面が、高度約 3 km まで下降しており、これは、PANSY レーダーが捉えた対流圏界面の高度とほぼ一致する。さらに、再解析データを用いて、昭和基地で発生した TF イベントについて合成図解析を行った。Figure 3 に昭和基地上空で TF が発生した日の合成図を示した。TF 発生時時には、総観規模の低気圧が接近し (Figure 3b の等値線)、局所的な西風ジェットが強化 (Figure 2b のカラー)、及び、温位の水平勾配が強化 (Figure 3c のカラー) が見られ、強い下降風が現れている (Figure 3d) ことが明らかとなった。Q ベクトルに基づく解析により、TF 発生地点の近傍で強い Q ベクトルの発散が存在することを確かめた。Q ベクトルの分布は、局地的な西風ジェットと、南北方向に縮小した総観規模の擾乱に伴う前線構造の強化に関連していると考えられる。

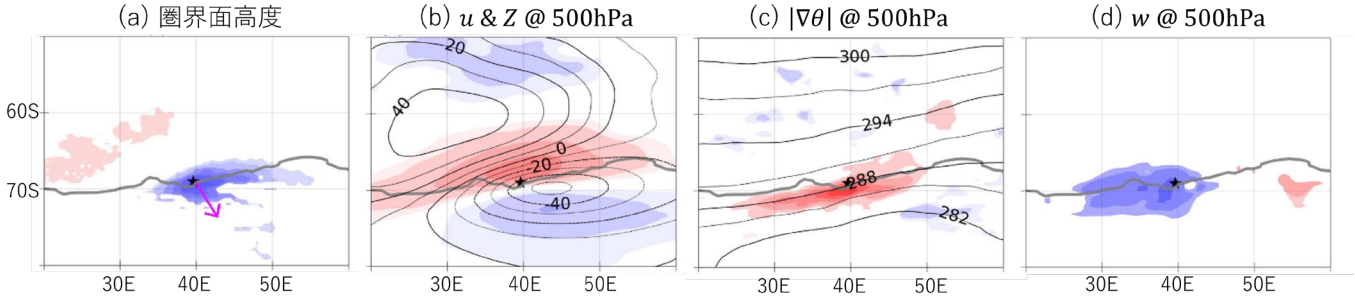

Figure 3: (a) Composites of (a) anomalies of tropopause heights, (b) anomalies of zonal wind (color) and geopotential heights (contours) at 500 hPa, (c) potential temperature (contours) and anomalies of horizontal gradient of θ (color) at 500 hPa, and (d) anomalies of vertical wind at 500 hPa. Only areas with a 95% confidence level for the two-sided t test are colored. Gray thick contours indicate the coast of Antarctica. Stars indicate the location of Syowa Station (69.0°S, 39.5°E). The contour intervals for (b) and (c) are 10 m and 3 K, respectively.

この結果を元に、レイトレーシング理論に基づき、南極沿岸域で TF が頻繁に起こる要因を考察した。南極大陸上での放射冷却により維持される渦位の強い南北勾配により、総観規模低気圧の南北スケールが縮小し、前線強化や西風強化が説明されると考えられる。

以上の研究成果は、投稿論文としてまとめられ、Journal of Climate に受理されている (Kohma et al., 2022)。

参考文献

(1) Sato, K., Tsutsumi, M., Sato, T., Nakamura, T., Saito, A., Tomikawa, Y., Nishimura, K., Kohma, M., Yamagishi, H., and Yamanouchi, T.: Program of the Antarctic Syowa MST/IS Radar (PANSY). J. Atmos. Sol.-Terr. Phys., 118A, 2–15, 2014, https://doi.org/10.1016/j.jastp.2013.08.022.

(2) Holton, J. R., P. H. Haynes, M. E. McIntyre, A. R. Douglass, R. B. Rood, and L. Pfister, 1995: Stratosphere-Troposphere Exchange. Rev. Geophys., 33, 403-439, https://doi.org/10.1029/95rg02097.

(3) Sprenger, M., M. C. Maspoli, and H. Wernli, 2003: Tropopause folds and cross-tropopause exchange: A global investigation based upon ECMWF analyses for the time period March 2000 to February 2001. J. Geophys. Res.-Atmos., 108, 8518, https://doi.org/10.1029/2002jd002587.

(4) Kohma, M., M. Mizukoshi, and K. Sato (2022), Dynamical analysis of tropopause folding events in the coastal region of Antarctica, J. Clim., https://doi.org/10.1175/JCLI-D-21-0858.1.

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
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
岡島 悟，東大・先端研，E-mail: okajima(at)atmos.rcast.u-tokyo.ac.jp
宮本 歩，東大・先端研，E-mail: ayumu(at)atmos.rcast.u-tokyo.ac.jp
関澤 偲温，東大・先端研，E-mail: shion(at)atmos.rcast.u-tokyo.ac.jp

Hisashi Nakamura, RCAST, The University of Tokyo
Yu Kosaka, RCAST, The University of Tokyo
Takafumi Miyasaka, RCAST, The University of Tokyo
Satoru Okajima, RCAST, The University of Tokyo
Ayumu Miyamoto, RCAST, The University of Tokyo
Shion Sekizawa, RCAST, The University of Tokyo

要旨

移動性擾乱は，中高緯度の天気の変動の大部分を説明するだけでなく，背景となるジェット気流の維持・形成に寄与する事で，大気循環偏差の形成にも影響を与える．東アジア域の下流に位置する北太平洋の移動性擾乱活動の活発な領域（ストームトラック）は，理論的な擾乱の成長率が最大となる真冬に活動度が極小となる特徴的な季節進行を示すが，その要因には未解明な点が多い．本研究では，長期間に渡る大気再解析データの解析に基づき，個々のエネルギー変換・生成プロセスを擾乱に伴う全エネルギーで除し，擾乱の振幅に依存しない「変換効率」を評価する事で，北太平洋の移動性擾乱活動の維持・形成メカニズムの季節性を定量的に調査した．移動性擾乱の活動度が極小となる真冬に，正味の変換効率も抑制されている事が示された．この季節性には，南北温度勾配を背景とする傾圧的なエネルギー変換の秋から真冬への低下及び，北太平洋外への正味のエネルギーの流出の真冬から春への減少が重要であり，順圧的な過程も部分的に寄与している事が示された．本研究の結果は，北太平洋の移動性擾乱活動の維持・形成に関わる過程について包括的な定量的情報を与え，その特徴的季節進行が複数のメカニズムに依拠している事を示唆するものである．

１．はじめに

移動性の高低気圧は，中高緯度における日々の天気の変化の大部分を説明するだけでなく，背景となるジェット気流の維持・形成への寄与を通じて，大気循環偏差の形成にも影響を与えるという点において，科学的・社会経済的に重要である．線形傾圧不安定理論によれば，擾乱の最大成長率は，南北温度勾配の大きさに比例する．北大西洋では，ジェット気流の風速とストームトラックの活動度の間に，傾圧不安定理論と整合的な関係が見られるが，その一方で，東アジア域の気候及び天候に重要である北太平洋のストームトラックは，ジェット気流の風速が最大となる真冬に活動度が極小となるという，理論と整合しない季節性を有する（Nakamura 1992）．この特徴的な季節進行は「真冬の振幅低下」と呼ばれ，様々な側面から研究が行われてきたものの，そのメカニズムには未解明な点が多い．

先行研究では，「真冬の振幅低下」を説明し得る要因として，ジェット気流の強い水平シア，上空のジェット気流と下層の傾圧帯の距離，非断熱加熱の寄与，ジェットが渦駆動的であるか亜熱帯ジェット的であるかの差，上流から伝播してくる擾乱の季節性などが挙げられている．しかし，これらの寄与の相対的な比較は不十分である．移動性擾乱に伴うエネルギーの収支解析により，プロセスの寄与の比較を試みた研究は存在するものの，一部のプロセスのみの評価に留まっているか（Chang et al. 2001），エネルギー変換・生成項自体を評価しているため，移動性擾乱の振幅そのものの季節性の影響を含んでしまっている（Zhao and Liang 2019）という問題があった．「真冬の振幅低下」のメカニズムの理解には，移動性擾乱に伴うエネルギーの変換・生成に関わる各項を三次元的に積分した上で，移動性擾乱に伴う全エネルギー（運動エネルギーと有効位置エネルギーの和）で規格化し，擾乱の振幅に依らない「変換・生成効率」の季節性を包括的に評価・比較する必要があるが，そのような調査はこれまで行われていなかった．

２．問題設定・方法

本研究では，上述の目的のために，全球大気再解析 JRA-55（6 時間毎，水平 1.25 度）を用いて解析を行った．解析対象は寒候期の北太平洋で，期間は 1958/59 から 2016/17 の 59 季節である．移動性擾乱成分に伴う変動成分はカットオフ周期 8 日の時間フィルタを用いて抽出し，気候平均には 31 日の移動平均を施した．背景場からの移動性擾乱に伴う運動エネルギー及び有効位置エネルギーの変換，有効位置エネルギーの生成，低周波擾乱からの運動エネルギー及び有効位置エネルギーの変換に加え，北太平洋領域からの正味のエネルギー流出・流入量を評価した．JRA-55 では各過程に伴う非断熱加熱率が提供されているため，

有効位置エネルギー生成項を直接評価する事が可能である．これらの変換・生成項を北太平洋領域の地表面（もしくは海面）から 100hPa 面まで三次元的に積分し，さらに擾乱に伴う全エネルギーで除すことで，各項の「変換・生成効率」を評価した（Okajima et al. 2022）．

３．結果と考察

まず，先行研究と比較してより長期間に渡る気候平均においても，北太平洋ストームトラックに伴う対流圏上層の南北風分散及び，下層の極向き熱輸送が真冬に極小を示す事が確認された．北太平洋領域で三次元的に積分された擾乱に伴う運動エネルギー・有効位置エネルギーでも，同様の季節性を確認した．移動性擾乱のエネルギー収支に関わる変換・生成項の中では，背景場からの有効位置エネルギー変換が他の項に比べて遥かに大きく，その殆どが南北温度勾配に関係する成分であり，移動性擾乱が傾圧的に発達するという性質と符合していた．その効率は秋から初冬に最大となり，真冬から早春にかけてはやや低下していた．背景場からの運動エネルギー変換は寒候期を通じて負であり，移動性擾乱が背景のジェット気流を維持している事と整合的であった．背景場への順圧的変換の効率は真冬に最大となるが，その季節性はジェット気流出口付近でのジェットの分流に関連する成分によりもたらされていた．非断熱加熱に伴う生成の効率は冬季を通じてほぼ一定であった一方，北太平洋領域からの正味のエネルギー流出は真冬に最大となり，春にかけての減少が顕著であった．低周波成分との相互作用に伴う変換の効率の季節性は小さかった．これら全ての過程を合算することで，背景場からの有効位置エネルギー変換の効率と比較して，正味の変換効率がより顕著な真冬の低下を示す事が明らかとなった．

加えて，Nakamura et al. (2002)で示された「真冬の振幅低下」の長期変調についても，同様のエネルギー収支解析により変換効率を評価した．移動性擾乱の指標の「真冬の振幅低下」が不明瞭となる 1980 年代半ば以降の期間で，それ以前の期間と比較して擾乱の全エネルギーの真冬の低下も不明瞭となること，さらに正味の変換効率の真冬の低下も弱化する事が確認された．この正味の変換効率の長期変調には，主として背景場からの有効位置エネルギー変換と領域外への正味のエネルギー輸送が寄与していた．一方，背景場からの運動エネルギー変換は「真冬の振幅低下」の長期変調を弱める方向に働いていた．また，正味の変換効率の長期変調が，主として擾乱構造の長期変調に起因している事も示唆された．

４．まとめと今後の展望

本研究では，移動性擾乱に関するエネルギー収支解析により，東アジア域の気候及び天候に重要である北太平洋ストームトラックの「真冬の振幅低下」に関わるプロセスの変換・生成効率を評価することで，各プロセスの季節性を包括的かつ定量的に比較した．背景場からの有効位置エネルギー変換効率の初冬から真冬への低下に加え，北太平洋外への正味のエネルギー流出の真冬から春への減少及び背景場からの運動エネルギー変換の季節性も正味の変換効率の真冬の低下に寄与しており，「真冬の振幅低下」の存在が，複数のメカニズムに依拠している事が示唆された（Okajima et al. 2022）．

本研究の結果は，北太平洋ストームトラックの「真冬の振幅低下」が，エネルギー論の観点から解釈可能な現象である事を示すものである．今後は，本研究の手法に基づく北大西洋など他の海盆のストームトラックとの比較及び，有効位置エネルギー変換の効率の季節性をもたらす要因のさらなる調査を進める予定である．

参考文献

(1) Nakamura, H., 1992: Midwinter suppression of baroclinic wave activity in the Pacific. J. Atmos. Sci., 49(17), 1629–1642.

(2) Chang, E. K., 2001: GCM and observational diagnoses of the seasonal and interannual variations of the Pacific storm track during the cool season. J. Atmos. Sci., 58(13), 1784–1800.

(3) Zhao, Y., and X. S. Liang, 2019: Causes and underlying dynamic processes of the mid-winter suppression in the North Pacific storm track. Sci. China Earth Sci., 62, 872–890,

(4) Okajima, S., H. Nakamura, and Y. Kaspi, 2022: Energetics of transient eddies related to the midwinter minimum of the North Pacific storm-track activity. J. Climate, 35(4), 1137–1156.

(5) Nakamura, H., T. Izumi, and T. Sampe, 2002: Interannual and decadal modulations recently observed in the Pacific storm track activity and East Asian winter monsoon. J. Climate, 15(14), 1855–1874.

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
柴野 良太，東大・大気海洋研，E-mail: rshibano(at)aori.u-tokyo.ac.jp
孫 文蕙，東大・大気海洋研，E-mail: sunwenhui(at)aori.u-tokyo.ac.jp
Sachihiko Itoh, Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo
Eisuke Tsutsumi, Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo
Ryota Shibano, Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo
Wenhui Sun, Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo

要旨

三陸の沿岸―沖合移行領域におけるサブメソスケール流動場の実態と生成機構、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、津軽暖流の高解像度数値シミュレーションを行った。その結果から、大槌沖の津軽暖流フロント域において、サブメソスケール不安定に伴い鉛直混合が強化されている可能性を示した。

１．はじめに

我が国は河川流入や複雑な海岸地形で特徴付けられる多様な沿岸海洋に加え、沖合の EEZ 内には黒潮や親潮、津軽暖流、宗谷暖流といった特徴的な海流系を有する。このような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。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わることが知られている。三陸の移行帯では近年、サブメソスケール（海洋において 10 ㎞以下のスケール）流動が混合と物質循環に重要な役割を果たしている可能性が示唆されている。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）。しかし、三陸海域のサブメソスケール流動の全容とその発生機構には未だ不明な点が多い。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。本年度は大槌湾沖の津軽暖流フロント域で生じる強い混合（Itoh et al. 2016）を生じる過程に注目した数値実験と解析を行った。

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) を静水圧近似モードで用い、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を行った。計算領域を 38° 30’–43° 00’ N、139° 45’–145° 00’ E とし、津軽暖流流域に現れるサブメソスケール構造を解像するため、格子幅を 39° 15’–42° 00’ N, 141° 15’–143° 30’ E の領域で 300 m とし、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 1×10^{-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するとともに、開境界から潮汐モデル TPXO8-atlas (Egbert & Erofeeva 2002) の M_2, S_2, K_1, O_1 分潮の順圧潮汐流で駆動した。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

シミュレートされた津軽暖流は、三陸の陸棚上から沖合を南下する際に本州最東端である岩手県のトドヶ埼に接岸・剥離し、その下流に位置する大槌沖において強い水平シアを生じるとともに、剥離渦に伴う負の相対渦度を供給していた。その一例を図 1 に示す。トドヶ埼で剥離した津軽暖流はジェット状となり大槌沖の水深 100m以深の沖側を流れ、沿岸側の比較的弱い流れとの間（東経 142 度 5 分付近）に強い鉛直シアと水平シアを生じる（図 1a–d）。水平シアは負の相対渦度に関連しており、水平シア$\partial v/\partial z$（相対渦度）が顕著な負の値となる領域では、浮力振動数で指標される成層強度が局所的に弱まっており、一部が不安定成層化している（図 1e）。これにより、乱流運動エネルギー散逸率が津軽暖流の沿岸側の前線域で強化される結果となっている（図 1f）。このような水平シア、成層強度、エネルギー散逸率間の関係は大槌沖で繰り返し認められ、そこで強い鉛直混合を生じ得る過程の 1 つであることが示唆される。このメカニズムとして、サブメソスケール不安定の一種であり、負のポテンシャル渦度から生じる Inertial/Symmetric instability（Gula et al. 2022）が考えられる。ただし、このようなサブメソスケール不安定は、直接的に乱流混合を引き起こすよりも、二次的に発生するシア不安定や対流不安定を通じて乱流混合に寄与することが報告されているが、本数値モデルではこれらの不安定プロセスを完全には解像できないため、その結果生じる乱流エネルギー散逸率については、使用した拡散スキームに依存した見積もりであることに留意する必要がある。

４．まとめと今後の展望

本研究では津軽暖流の高解像度数値シミュレーションから、津軽暖流と三陸の海岸地形間の相互作用に起因して、大槌沖の津軽暖流フロント域でサブメソスケール不安定の発生に伴い鉛直混合が強化される可能性を示した。本数値シミュレーションの流動や混合の再現性に関しては、使用した沿岸地形や拡散スキーム等に依存すると考えられ、現場観測により検証する必要がある。当初はこのような現場観測を 2021 年 10 月の新青丸 KS-21-24 航海で実施する予定であったが、悪海況により観測時間が限られたため実施することができなかった。今後は現場観測の実施とともに数値モデル結果の検証と解析を進め、詳細なサブメソスケール不安定と混合プロセスを明らかにする予定である。

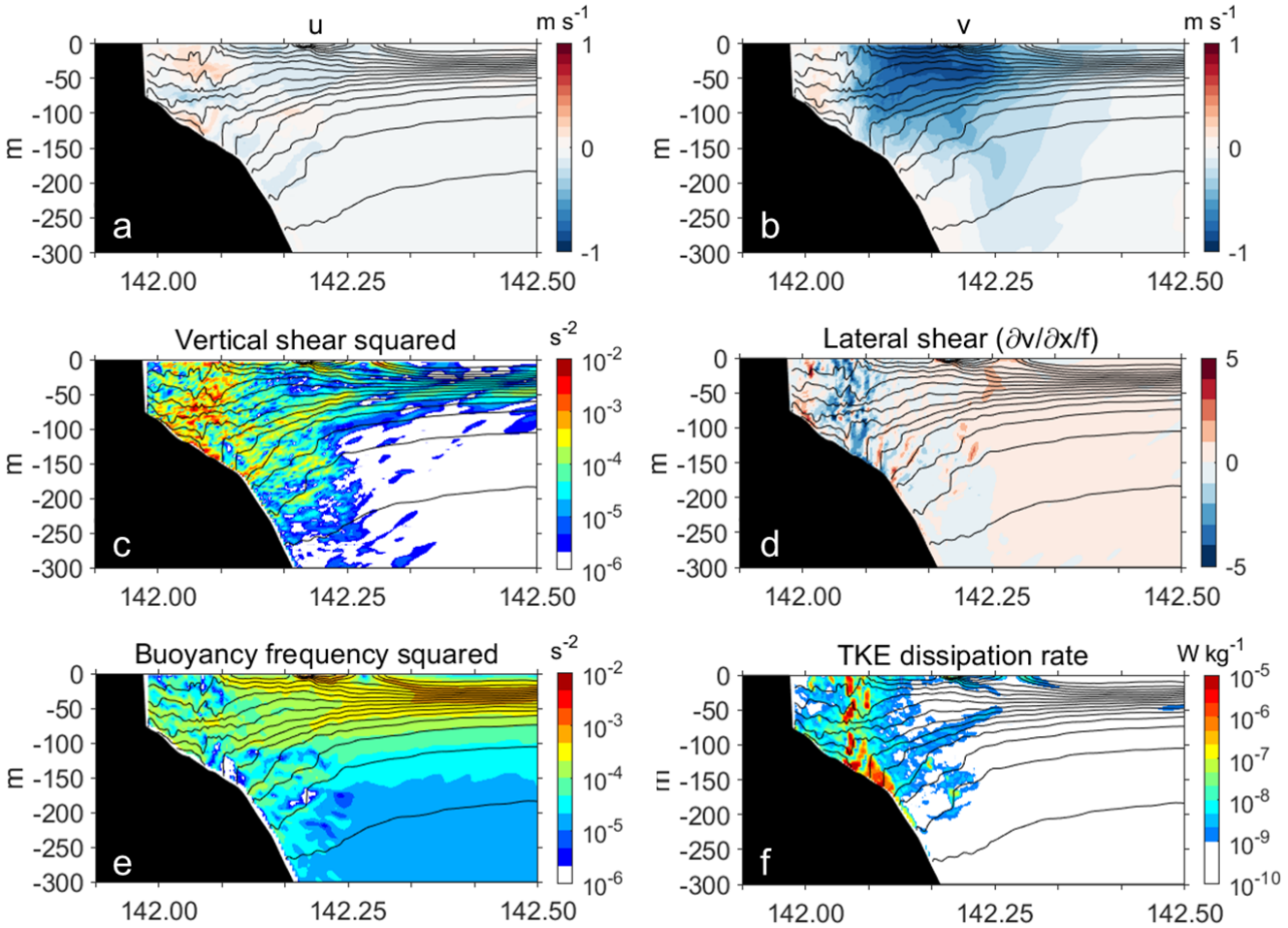

Fig. 1 Zonal transects of simulated velocity field and energy dissipation off Otsuchi (39.38°N, t = 576 h). (a) Zonal velocity u, (b) Meridional velocity v, (c) Vertical shear squared $Sh^2 = (\partial u/\partial z)^2 + (\partial v/\partial z)^2$, (d) Lateral shear normalized by the local Coriolis frequency $(\partial v/\partial z)/f$, (e) Buoyancy frequency squared N^2, (f) Turbulent kinetic energy dissipation rate ε.

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.
6. Gula, J., Taylor, J., Shcherbina, A., and Mahadevan, A., 2022, Submesoscale processes and mixing, *in Ocean Mixing: Drivers, Mechanisms and Impacts, eds M. Meredith and A. N. Garabato*, 181–214. doi: 10.1016/B978-0-12-821512-8.00015-3

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、GPM/DPR による降水 3 次元観測を用いて、特に高緯度陸上の降水システムの 3 次元的な降水特性を明らかにすることを目的とした統計解析を行った。GPM DPR データから約 1 度格子のメソスケールの単位で統計を取り、降水面積や降水頂高度などの降水特性の違いにもとづいて全球規模の降水を複数のタイプに分類し、降水特性を定量化した。

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

本年度は GPM 主衛星搭載 2 周波降水レーダ（GPM/DPR）による降水 3 次元観測を用いて、特に高緯度陸上の降水システムの 3 次元的な降水特性を明らかにすることを目的とした統計解析を行った。GPM/DPR データから約 1 度格子のメソスケールの単位で統計を取り、降水面積や降水頂高度など、降水特性を表現する 6 つの指標を導入して、メソスケールでの平均的な降水特性の違いにもとづいて全球規模の降水を複数のタイプに分類し、降水特性を定量化した。

３．結果と考察

解析の結果、層状性降水面積比と層状性降水強度比の 2 つの指標による相空間における降水特性指標の分布に、特徴的な分布の偏りがみられることが分かった（Fig. 1）。多数の事例についての目視精査の結果から、この相空間は次の 4 つのタイプを効果的に分類できることが分かった（Fig. 2）: (1) 離散的な降水、(2) 層状性降水が広範囲にわたる降水システム、(3) 発達した降水システムの対流性部、および(4) 発達した降水システムの層状性降水域。これら 4 タイプは、それぞれ降水が置かれた環境場などの降水要因が異なっており、本研究で提案する分類基準は気象学的・雲物理学的にも合理的である。

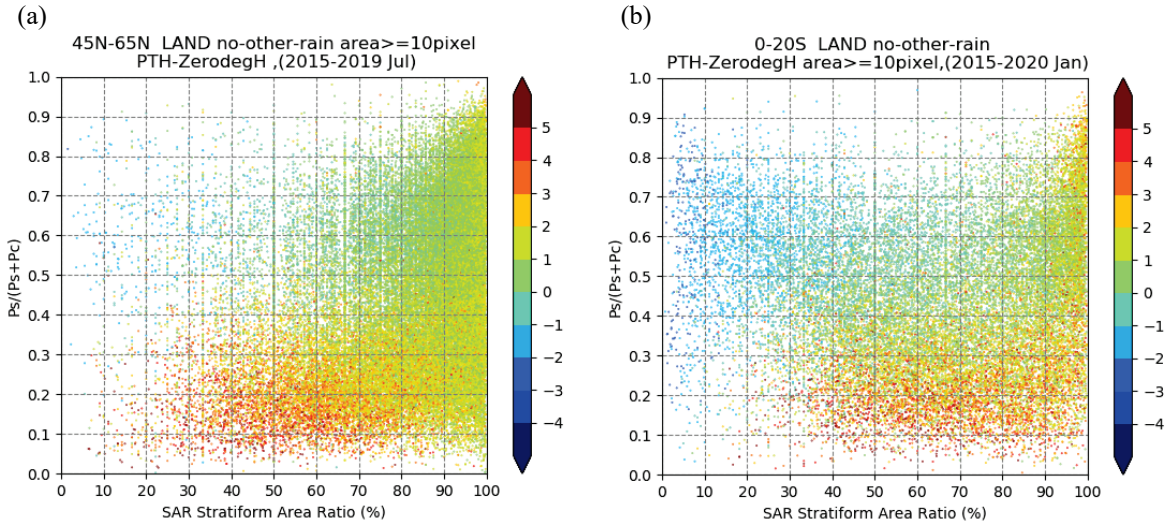

Fig. 1：メソスケール統計にもとづく層状性降水面積比と層状性降水強度比の相空間における、降水観測ボックスの分布を示した散布図。(a) 中高緯度域（45°N–65°N）の陸上、(b) 熱帯域（0°–20°S）の陸上。色は平均降水頂高度（単位 km、0°C 高度からの相対値）を示す。

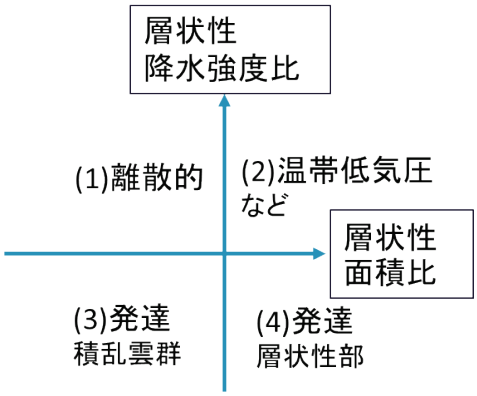

Fig. 2 : Fig. 1 に示した層状性降水面積比－層状性降水強度比の相空間による降水システムの分類。次の 4 つのタイプに分けることができる；(1) 離散的な降水、(2) 温帯低気圧によってもたらされるような層状性降水が広範囲にわたる降水システム、(3) 発達した降水システムの積乱雲群、および(4) 発達した降水システムの層状性降水域。

４．まとめと今後の展望

本研究で提案する分類基準は、緯度によらず普遍的なものであり、地域によってどのような降水の形態の偏りがあるかを、全球で統一的な基準によって調べることが可能になると期待される。降水特性には、各地点の環境場や地理的要素も影響していることが知られている。今後それらの影響についても調査することにより、全球規模の降水特性の解析がさらに進展することが期待できる。

関連業績

(1) Tsuji, T., K. Yasunaga, and A. Hamada, 2021: Drop-size-distribution (DSD) statistics in the warm season over the Sea of Japan. *2021 AGU Fall Meeting*, New Orleans, LA, and Online, 13–17 December 2021.

(2) 辻 泰成，安永 数明，濱田 篤，2021："warm rain"と"cold rain"～降水粒子特性の違い～．日本気象学会 2021 年度秋季大会，三重+オンライン，2021 年 12 月 2–8 日．

(3) Hamada, A., R. Kawabata, and K. Yasunaga, 2021: Statistical analysis of precipitation system characteristics observed by GPM/DPR over high-latitude land. *Japan Geoscience Union Meeting 2021*, Online, 3–6 June 2021.

MIROC6 が表現するマッデン・ジュリアン振動の SST 依存性

SST Sensitivity of Madden-Julian Oscillation in MIROC6

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 sub-monthly sea surface temperature (SST) variability to Madden-Julian Oscillation (MJO) simulation is investigated in the sixth version of the Model for Interdisciplinary Research on Climate (MIROC6) following the MJO SST sensitivity Model Intercomparison Project (MSMIP). The MSMIP consists of five model experiments: one fully coupled (CGCM) and four atmosphere-only model configurations with different prescribed SSTs. Preliminary analysis based on four-year simulations (1951-1954) suggest that the spatial pattern and temporal persistence in sub-monthly SST variability might help simulate the eastward propagation of MJO in MIROC6. Further investigation and longer simulation are needed to obtain statistically robust conclusions. The five MSMIP experiments of MIROC6 are planned to run from 1985 to 2014, and the 30-year simulation data will be publicly available in MSMIP.

1. Introduction

Ocean coupling is known to improve the Madden-Julian Oscillation (MJO) simulation in climate models (e.g., DeMott et al., 2015). Through comparing fully coupled models and atmosphere-only models forced with observed monthly SSTs, many studies have reported the importance of sub-monthly ocean-atmosphere feedbacks to the mean state moisture pattern and MJO eastward propagation (e.g., DeMott et al., 2019). To further understand what aspects of SST anomalies (e.g., phasing, pattern, or persistence) in coupled models are most important for tropical mean state moisture patterns and MJO propagation, the MJO SST sensitivity Model Intercomparison Project (MSMIP) is initiated. The MSMIP is designed to understand the effects of sub-monthly SST variability to MJO simulation and their robustness across climate models. This study contributes to the MSMIP using the sixth version of the Model for Interdisciplinary Research on Climate (MIROC6) developed by the Japanese modeling community (Tatebe et al., 2019). Experimental design and preliminary results are summarized as bellows.

2. Model and experimental design

The climate model used in this study is the MIROC Version 6.1.12 (Tatebe et al., 2019). MIROC6 is composed of T85L81 atmosphere and 1°L62 ocean with considerably updated physical and dynamical packages. The atmospheric component is constructed based on hydrostatic primitive equations with spectral truncation, and the oceanic component is constructed based on Boussinesq hydrostatic primitive equations on tripolar coordinate system. The MSMIP consists of five model experiments: one fully coupled general circulation model (CGCM) and four atmosphere-only model configurations with different prescribed SSTs (AGCM_x). The settings for CGCM correspond to the historical run of Coupled Model Intercomparison Project 6 (CMIP6). This CGCM simulation provides the input SSTs prescribed in AGCM_x experiments. AGCM_mon uses monthly mean SSTs, which removes all sub-monthly SST variability. AGCM_1drandpt uses pointwise randomly shuffled daily SST anomalies (SSTA) to break both the pattern and persistence in sub-monthly SST variability. AGCM_1drandpatt uses randomly shuffled daily SSTA patterns to retain the effects of pattern. AGCM_5drandpatt uses randomly shuffled 5-day running SSTA chunks to retain both pattern and persistence. The SSTAs were shuffled only over the tropical band (25°S-25°N), while its value remains the same in the extra-tropical band (>35°). For the southern and northern latitude bands between 25°-35°, original and randomized SSTAs are merged with a linear filter. In current study, the five MSMIP experiments were run from 1951 to 1954.

3. Results

Following previous research (e.g., DeMott et al., 2015, 2019), intraseasonal rainfall anomalies is used as a proxy to measure the convective signals associated with MJO. Figure 1 shows the longitude-time evolution of 20-100-day rainfall anomalies in Global Precipitation Climatology Project (GPCP) observation and the five MIROC6 experiments. As observed in GPCP, Clear eastward propagation of MJO signals can be found in the CGCM, AGCM_5drandpatt, and AGCM_mon run, while the propagating signals are less clear in the AGCM_1drandpatt and AGCM_1drandpt run. This

result suggests that the spatial pattern and temporal persistence in sub-monthly SST variability might help the eastward propagation of MJO from the Indian Ocean to Western Pacific. However, the AGCM_mon run forced with monthly mean SST that removes the effects of sub-monthly SST variability also simulated a clear eastward propagation during the four-year period. To obtain statistically robust conclusions, detailed examination and longer simulation are needed.

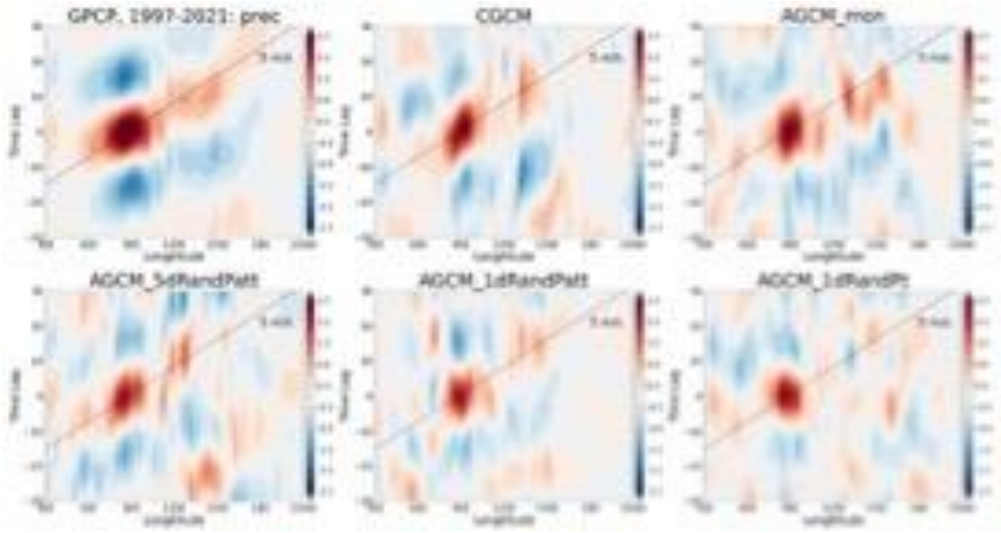

Fig. 1: boreal winter tropical (10°S-10°N) 20-100-day rainfall anomalies (mm day^{-1}) correlated with 20-100-day tropical Indian Ocean (10°S-10°N, 75°E-100°E) rainfall as a function of time lag and longitude for GPCP observation and the five MSMIP experiments: CGCM, AGCM_mon, AGCM_1drandpt, AGCM_1drandpatt, and AGCM_5drandpatt.

4. Conclusion and discussion

In this study, the role of sub-monthly SST variability to MJO is investigated in MIROC6 following the MJO SST sensitivity Model Intercomparison Project (MSMIP). The MSMIP designed five special experiments to address this question: one fully coupled simulation and four uncoupled simulations with different prescribed SSTs. Preliminary analysis based on four-year simulations (1951-1954) suggested that the spatial pattern and temporal persistence in sub-monthly SST variability might help simulate the eastward propagation of MJO in MIROC6. Yet, further investigation and longer simulation are needed to obtain statistically robust conclusions. The five MSMIP experiments of MIROC6 are planned to run from 1985 to 2014, which corresponds to the last 30 years of the CMIP6 historical run. In addition, much research has reported the importance of mean-state moisture on the eastward propagation of MJO (e.g., DeMott et al., 2019). Through close comparison between the coupled and uncoupled experiments, what aspects of the coupled model SST anomalies (e.g., phasing, pattern, or persistence) are most important for tropical mean-state moisture patterns and MJO propagation will be further investigated.

Reference

(1) DeMott, C. A., Klingaman, N. P., & Woolnough, S. J., 2015: Atmosphere-ocean coupled processes in the Madden-Julian oscil- lation, Rev. Geophys., 53, 1099–1154.

(2) DeMott, C. A., Klingaman, N. P., Tseng, W.-L., Burt, M. A., Gao, Y., & Randall, D.A., 2019: The convection connection: How ocean feedbacks affect tropical mean moisture and MJO propagation. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 124, 11,910-11,931.

(3) Tatebe H, Ogura, T., Nitta, T., Komuro, Y., Ogochi, K., Takemura, T., Sudo, K., Sekiguchi, M., Abe, M., Saito, F., Chikira, M., Watanabe, S., Mori, M., Hirota, N., Kawatani, Y., Mochizuki, T., Yoshimura, K., Takata, K., O'ishi, R., Yamazaki, D., Suzuki, T., Kurogi, M.,Kataoka, T., Watanabe, M., Kimoto, M., 2019: Description and basic evaluation of simulated mean state, internal variability, and climate sensitivity in MIROC6.Geosci Model Dev. 12:2727–2765.

全球雲解像モデルデータを用いた熱帯雲活動の解析

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

西　憲敬，福岡大・理，E-mail: nornishi(at)fukuoka-u.ac.jp
濱田　篤，富山大・学術研究部, E-mail: hamada(at)sus.u-toyama.ac.jp
三浦　裕亮，東大・理学研究科, E-mail: h_miura(at)eps.s.u-tokyo.ac.jp
佐藤　正樹，東大・大気海洋研，E-mail: satoh(at)aori.u-tokyo.ac.jp
NISHI Noriyuki, Science Faculty, Fukuoka University
HAMADA Atsushi, Academic Assembly, Faculty of Sustainable Design, University of Toyama
MIURA Hiroaki, Graduate School of Science, The University of Tokyo
SATOH Masaki, Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo

要旨

全球雲解像モデル NICAM を用いて、太平洋中西部の熱帯収束帯の中に発生する東西数千 km におよぶ雲帯の南北への同時分割現象の再現実験を行った。その結果、2020 年 12 月から 2021 年 10 月にかけての 3 つの典型的な事例において、現象の再現に成功した。いずれの事例でも現象発生の 2-3 日前の初期値からの積分であり、分割はもちろん分割前の長大な雲帯の形成も再現できたことになる。現象の本質をもたらす要因は、NICAM の物理野中に含まれているとみられることから、今後はこの再現実験をもとに感度実験も行い、現象の解明につなげていきたい。

１．はじめに

中西部太平洋域の熱帯収束帯(ITCZ)において、東西数千 km におよぶ雲帯がほぼ同時に南北に分割する現象を見いだしてその解析を行っている(文献 1)。 昨年度は、最新の客観解析である ERA5 の水平 0.25 度格子データを解析し、2020 年 7-8 月および、Hamada et al.(2013、文献 1)の対象であった 1993 年 1 月の事例において、衛星データの雲帯と非常に類似した形状をもつ大規模雲帯の発生およびその南北への分割が、再解析データで表現されていることを見いだした。ERA5 には雲に関する情報が同化されているので、雲の分布や変化が衛星観測とあっていても、その維持機構が現実の現象を正しく表しているか判断しにくい。そこで、ERA5 を初期値とする全球雲解像モデル NICAM を用いた数値実験を行い、どのような物理が現象の発生に重要かを調べることにした。まず、今回は実験のスタートとして、現実大気で典型的な現象が見られる時期をいくつか取り出して、NICAM での再現実験を試みた。

２．実験方法および結果

まずコンピュータ OAK-forest 上で NICAM V.16 を用いて、比較的低解像度(水平 56km)の実験を試みた。しかし、この実験では目的とした場所・時間に大規模雲域の同時南北分割は認めることはできなかった。そのため、より新しい NICAM のバージョン(V.19)を使うために、プラットフォームをコンピュータ Wisteria に変更してさらに高水平解像度(7km)の実験を試みた。プ

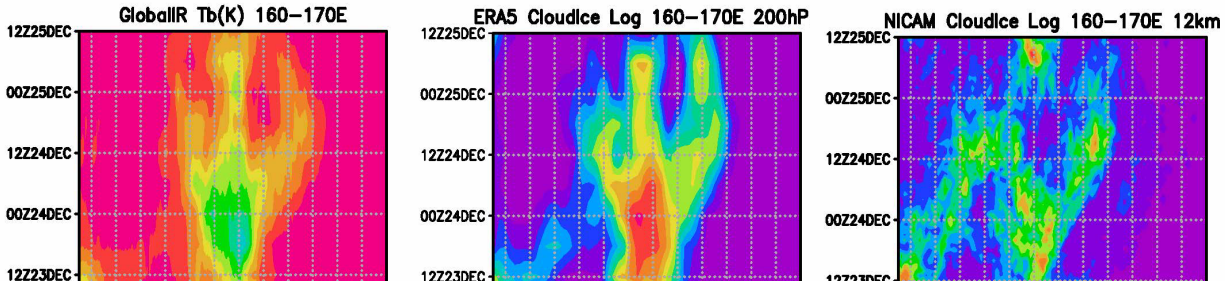

図 1: 2020 年 12 月 23-25 日における帯状雲域中心経度付近(160-170E)で平均された(a) global IR データによる等価黒体温度(K), (b) ERA5 による 200hPa における雲氷量(kg/kg)の対数, および(c) NICAM 実験(21 日 00Z 初期値)による高度約 12km における雲氷量(kg/kg)の対数, の緯度時間分布.

ラットフォーム変更への対応を行ったのち、2020 年 12 月下旬に発生した顕著な事例の再現実験において、初期値を与えた時間から 3 日後に、ほぼ現実大気で発生した現象と同じ場所・時刻に分割現象を再現することができた。図 1 に、2020 年 12 月 24 日の例について、21 日 00Z 初期値の実験結果を示す。観測された雲と、ERA5 と NICAM による上部対流圏における凝結物の変化を比べる。23 日 12Z 頃における 6～8N 付近の帯の形成および 24 日 06Z 頃の 3 本への帯の分割などについて、観測された雲域(図 1a)を ERA5(図 1b)は非常によく表現している。NICAM 実験の結果(図 1c)では、雲帯の形成はよく再現され、分割については 3 本でなく 2 本への変化となっているが、タイミングなどは観測と似ている。このように、東西に長い雲帯の生成、さらにその分割の両方が、2-3 日前の初期値から再現されるということは、この現象の発生がかなり大規模な力学過程に由来してい

ることを示唆する。

また、2021 年 1 月および 10 月に発生した顕著な分割イベントについても、雲帯の発生より 2-3 日前を初期値とする再現実験を 7km 格子で行った。若干の発生位置・時間および形態の差はあるものの、これらの例でも東西に長い雲帯の形成とその分割が再現された。

ERA5 の客観解析データでみられた現象の特徴が、NICAM 出力で再現されているかの確認を行った。まず、ERA5 でみられた内部重力波を調べた。上方にエネルギーを伝える形態の周期数時間の内部重力波が、分割前の 1 本の帯の部分で発生し、この位相が分割の進行と関係しているような特徴が ERA5 ではみられた。ところが、NICAM 出力では、このような内部重力波は顕著ではなかった。それにもかかわらず NICAM が分割現象をよく再現しているということは、内部重力波が分割の促進にはあまり寄与していないことを示唆している。なお、上部対流圏内で分割が進むについて広がっていく巻雲についても解析を行ったが、雲氷と雪の区別の問題や、十分でない高度解像度のために、はっきりした結論が得られなかったので、今後実験設定を変更して実験を続けていくことが必要である。

３．まとめと今後の展望

Wisteria 上で、NICAM Version19 を用いた数値実験で、研究対象である雲帯の分割現象が 3 例において再現された。現象の発生時間や細部の構造は少し違っているものもあったが、発生場所はほぼ同じであった。東西に長い 1 本の雲帯が現れる理由、分割現象のトリガーとなる要因、雲帯が南北に離れていく理由、雲帯内の雲氷が 1-2 日にわたり長持ちする理由、などこの現象の機構に関して未解決になっている問題について、感度実験などを行いながら解析していく予定である。

参考文献

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

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。相関 *k*-分布モデル比較プロジェクト(CKDMIP)に参加するため、指定されているデータをダウンロードしてモデルの作成を行った。今年度は Mstrn11 短波版についての開発を行った。AFGL 標準大気 6 種類、気体濃度 4 種類（現在状態、氷河期最大、2100 年、水蒸気 1.2 倍）、太陽天頂角 5 種類の計 120 プロファイルについて最適化を行い、30 バンド 103 点、21 バンド 76 点の吸収係数を構築した。ここで、目的関数は LBL 計算からの加熱率、放射フラックス、放射強制力の誤差を用いた。最適化に用いたプロファイルに対する、大気上端と地表面の正味の放射フラックスの誤差は±1 W/m^2 程度となった。評価用のプロファイルを用いた評価において、その他の放射モデルとの精度比較を行い、引き続き開発を続けていきたい。

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 4μm 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 4μm 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、昨年度は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、短波領域での水蒸気吸収が過小評価されていることがわかっている(2)。この原因としては、現在使われている温暖化対応版のデータベースは HITRAN2004(3)であり、HITRAN2012(4)以降に導入された近赤外域の水蒸気の吸収線が考慮されていないため、過小評価になっていることが考えられる。このことから、今年度は、相関 *k*-分布モデル比較プロジェクト(CKDMIP; Correlated-*k* distribution model intercomparison project)(5)への参加を目指し、新規の短波領域の気体吸収テーブルの開発を行った。

２．使用データ

CKDMIP は、同じデータベースを用いて相関 *k*-分布モデルを構築し、精度を比較するプロジェクトである。吸収線のデータは気圧 53 点、気温 5 点、水蒸気量 12 点で格子化されている。気圧と気温の格子は図 1 の通りであり、気温が気圧に伴い変化することで、与えられた大気分布に適応したデータを用いることができる。線吸収の吸収係数は水蒸気量に依存しないが、連続吸収では依存するため、データベース化されている。波数方向の解像度は表 1 の通りであり、長波で約 712 万点、短波で約 312 万点である。

吸収気体の種類は、水蒸気、二酸化炭素、オゾン、一酸化二窒素、メタン、酸素、窒素、CFC-11eq、CFC-12 の 9 種類である。窒素は吸収が小さいため、考慮されていない放射モデルが多いが、本比較プロジェクトでは有意な吸収があるとして扱われている。また、ハロカーボン類については、CFC-12 とその他のハロカーボン類に分けられており、その他のハロカーボン類の吸収はすべて CFC-11 の吸収に換算して考慮されている。

表 1：CKDMIP データの波数解像度

Longwave		Shortwave	
0 – 1300 cm^{-1}	0.0002 cm^{-1}	250 – 2200 cm^{-1}	0.002 cm^{-1}
– 1700 cm^{-1}	0.001 cm^{-1}	2200 – 2400 cm^{-1}	0.001 cm^{-1}
– 3260 cm^{-1}	0.005 cm^{-1}	2400 – 5150 cm^{-1}	0.002 cm^{-1}
		5150 – 16000 cm^{-1}	0.02 cm^{-1}
		16000 – 50000 cm^{-1}	1.0 cm^{-1}

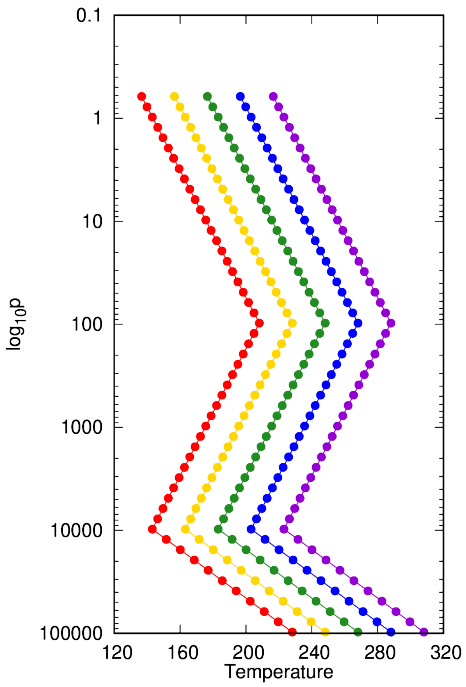

図 1 ：CKDMIP の吸収線データの気圧・気温格子

３．結果と考察

このデータを用いて、まずバンド領域の再設定から行った。短波領域のデータは波数 250-50000 cm^{-1} の範囲について配布されているので、今回開発する気体吸収テーブルもこの通りに設定した。この領域は全太陽放射エネルギーの 99.99%をカバーしている。次にそれぞれの領域についてバンド分割を行った。放射フラックスの波数依存性を考慮する時、もっとも波数依存性が高いものは気体の吸収係数であるが、この波数依存性については相関 *k*-分布法で積分を行うため、その他の係数や変数がバンド内で大きく変化しないようにバンド範囲を設定した。短波領域で考慮すべき変数は太陽放射スペクトル、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。このようにして設定したバンドの波数領域および吸収気体を表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。

表２：短波領域におけるバンド領域と考慮する吸収気体

	#g	Band range	gas		#g	Band range	gas
1	6	250 – 2600	H_2O, CO_2, O_3, N_2O, N_2	1	6	250 – 2600	H_2O, CO_2, O_3, N_2O, N_2
2	4	2600 – 3200	H_2O, CO_2, O_3, CH_4, N_2	2	4	2600 – 3200	H_2O, CO_2, O_3, CH_4, N_2
3	5	3200 – 3800	H_2O, CO_2, N_2O	3	5	3200 – 3800	H_2O, CO_2, N_2O
4	4	3800 – 4500	H_2O, O_3, N_2O, CH_4	4	4	3800 – 4500	H_2O, O_3, N_2O, CH_4
5	4	4500 – 5350	H_2O, CO_2, CH_4, N_2	5	4	4500 – 5350	H_2O, CO_2, CH_4, N_2
6	5	5350 – 5900	H_2O, CH_4	6	5	5350 – 7550	H_2O, CO_2, CH_4
7	3	5900 – 6200	H_2O, CO_2, CH_4				
8	3	6200 – 7000	H_2O, CO_2				
9	6	7000 – 7550	H_2O, CO_2, CH_4				
10	4	7550 – 7780	H_2O, CO_2, CH_4, O_2	7	5	7550 – 8500	H_2O, CO_2, CH_4, O_2
11	2	7780 – 8060	H_2O, O_2				
12	2	8060 – 8320	H_2O, CO_2, O_2				
13	2	8320 – 8500	H_2O, CH_4, O_2				
14	5	8500 – 9100	H_2O, CH_4	8	5	8500 – 9100	H_2O, CH_4
15	2	9100 – 9650	H_2O, CO_2, O_3, O_2	9	2	9100 – 9650	H_2O, CO_2, O_3, O_2
16	4	9650 – 11000	H_2O, O_3, O_2	10	4	9650 – 11000	H_2O, O_3, O_2
17	3	11000 – 11480	H_2O, O_3, CH_4	11	3	11000 – 11480	H_2O, O_3, CH_4
18	1	11480 – 11620	H_2O, O_3, O_2	12	3	O_2 band	H_2O, O_3, O_2
19	3	11620 – 12850	H_2O, O_3	13	3	11620 – 12850	H_2O, O_3
20	6	12850 – 13220	O_3, O_2				
21	6	13220 – 14280	H_2O, O_3	14	6	13220 – 14280	H_2O, O_3
22	5	14280 – 14580	H_2O, O_3, O_2				
23	1	14580 – 15140	H_2O, O_3	15	1	14580 – 15140	H_2O, O_3
24	4	15140 – 20000	H_2O, O_3, O_2	16	4	15140 – 20000	H_2O, O_3, O_2
25	4	20000 – 24600	H_2O, O_3, O_2	17	4	20000 – 24600	H_2O, O_3, O_2
26	1	24600 – 25700	H_2O, O_2	18	1	24500 – 27400	H_2O, O_2
27	1	25700 – 27400	O_2				
28	1	27400 – 29870	O_3, O_2	19	1	27400 – 29870	O_3, O_2
29	4	29870 – 36000	O_3	20	4	29870 – 36000	O_3
30	2	36000 – 50000	O_3, O_2	21	2	36000 – 50000	O_3, O_2

積分点と重みを設定する最適化を各バンドで行った。最適化する大気プロファイルは AFGL 標準大気６種類と、気体濃度を水蒸気が 1.2 倍増した状態、氷河期最大時における温室効果気体濃度、2100 年における推定の温室効果気体濃度を用いた。さらに、太陽天頂角５通り($\cos\theta = 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9$)についても考慮し、最大で 120 種類の大気状態について最適化を行った。バンド内で２種類以上の吸収気体を考慮している場合、初期値を２通り(completely correlated, uncompletely correlated)、積分点数を増加させていく、または減少させていく過程の２通り、計４通りの実験を行った。このようにして得られた結果において、各バンドにおけるしきい値は大気上端、地表面、対流圏界面（ここでは 200hPa とする）における正味の放射フラックスの誤差が 0.2 W/m^2 以下、放射強制力が 0.1W/m^2 以下とし、これを満たすもっとも点数の少ない結果を採用した。これにより、表２の通り 30 バンド 103 点と 21 バンド 76 点の吸収テーブルを構築した。どちらも大気上端と地表面での誤差が最大 1 W/m^2 程度となったが、加熱率のプロファイルに誤差が見られるため、引き続き調整を行う。

４．まとめと今後の展望

今後は CKDMIP から提供されている評価プロファイルを用いて評価を行い、放射フラックス、加熱率に対して精度を検証していく予定である。

参考文献

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

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: y-masuda(at)jamstec.go.jp
2022/4/1 以降は JAMSTEC 所属
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、植物プランクトン個体が環境に適応する（馴化）新たなメカニズムが導入されている。次世代モデルではクロロフィル濃度分布の再現性が従来モデルに比べて大きく向上し、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。本年度はこの結果を Nature 姉妹紙の Communications Earth and Environment 誌で公表した。次世代モデルでは環境に応じた馴化によって植物プランクトン細胞内のクロロフィル・炭素比だけでなく、炭素・窒素比（CN 比）も変化する。従来モデルでは炭素・窒素比は Redfield 比に固定されていた。次世代モデルを用いた実験によって、馴化によって CN 比が決まるメカニズムは培養実験で得られた CN 比の変動幅や、現場観測で得られた粒子状有機物の CN 比の空間分布を説明できることが分かった。

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。本研究では植物プランクトン個体が環境に適応する（馴化）メカニズムを導入した海洋生態系モデルを開発している。これまでに、植物プランクトンが馴化によって細胞内のクロロフィル含有量を変化させるメカニズムが海洋のクロロフィル濃度分布の再現に決定的に重要なことが分かった。

次世代モデルには環境変化に応じた馴化によって植物プランクトンの CN 比が変化するメカニズムも導入されている。植物プランクトンの CN 比は光合成によって固定される炭素量と利用可能な窒素量の比であり、海洋の炭素循環と窒素循環を繋げる役割を果たしている。もし、将来の気候変動に伴って植物プランクトンの CN 比が変化すると海洋に吸収される CO_2 の量が変わる。

２．問題設定・方法

培養実験では植物プランクトンの CN 比は 3.0 から 20.0 molC $molN^{-1}$ の範囲で変化する。また、種によって CN 比の変化が異なることが知られており、シネココッカスは珪藻等に比べて CN 比の変動範囲が狭い。海洋の現場観測では、植物プランクトン CN 比のデータは少ないが、粒子状有機物の CN 比は豊富にあり、亜熱帯で CN 比が高くなり、南極で低くなることが知られている。馴化によって CN 比が決まるメカニズムによってこれらの観測結果を説明できるかどうかが、本研究で解く問題である。

次世代海洋生態系モデルと結合する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

クロロフィル濃度分布の再現性は、前年度報告書で議論されているので、Communications Earth and Environment 誌に掲載された Masuda et al. (2021)の結果を簡潔に紹介する。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（Yasunaka et al. 2022）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。

次世代モデルが採用している Pahlow, Smith の理論では、植物プランクトン CN 比は生体リソース配分の最適化に連動して決まる。生体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。亜熱帯表層のような光が豊富で栄養塩が不足する環境では、光合成による炭素の獲得は容易だが、硝酸塩の獲得は困難なので、CN 比が高くなる。リソースは光合成による炭素の獲得より、栄養塩の獲得に優先的に配分されるので、細胞内クロロフィル含有量は低くなる。逆に、深度 120 m のような光が不足し、栄養塩が豊富な環境では、光合成による炭

素の獲得は困難だが硝酸塩の獲得は容易なので、CN 比は低くなる。リソースは光合成による炭素の獲得に優先的に配分されるので、細胞内クロロフィル含有量は高くなる。結果、Pahlow, Smith の理論では植物プランクトンの CN 比は細胞内クロロフィル含有量と密接に関連して変化しており、これは培養実験の結果と整合的である。この理論に基づいて構築された次世代モデルを用いた計算では、鉛直平均した CN 比は栄養塩濃度の低い亜熱帯で最も高くなり、栄養塩濃度の高い南極海で最も低くなるという結果が得られた。これは粒子状有機物の現場観測から得られた CN 比の分布に整合的である。

種によって CN 比の変化が異なる点については、生存に最低限不可欠な炭素・窒素比（Q_0=Droop's minimum nitrogen quota）の種による違いが寄与していた。培養実験で得られている Q_0 の範囲は 0.038～0.13 molN molC^{-1} である。珪藻や緑藻の Q_0 は 0.038～0.7 molN molC^{-1} であり、シネココッカスやトリコデスミウムは 0.08 molN molC^{-1} 以上の Q_0 を持つ。全海洋環境で植物プランクトンの CN 比を計算すると、Q_0 が 0.04 molN molC^{-1} の種は 6.0～25.0 molC molN^{-1} であり、Q_0 が 0.13 molN molC^{-1} の種は 2.5～7.7 molC molN^{-1} の値を持つ。つまり、培養実験で得られた CN 比の変動範囲（3.0～20.0 molC molN^{-1}）は Q_0 の異なる様々な種が環境に対する馴化によって CN 比を変化させることで説明できる。また、Q_0 が高くなるほど CN 比の変動幅が狭くなるという結果は、シネココッカスの CN 比の変動幅が珪藻等に比べて狭いという培養実験の結果を説明できる。

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。我々の論文はクロロフィル分布の再現に不可欠なメカニズムを明らかにすることで、全海洋の一次生産量の不確定性を減らすのに貢献できた。

馴化によって CN 比が決まるメカニズムは培養実験で得られた CN 比の変動や、現場観測で得られた粒子状有機物の CN 比を説明できることが分かった。この結果を投稿し、受理を目指す。

来年度後半には、北極海の植物プランクトンによる一次生産に関する論文を執筆する。この論文では海氷下で植物プランクトンが弱光環境に適応して細胞内クロロフィル含有量を増加させるプロセスが、近年重要性が指摘されている海氷下一次生産に重要だと示す。

2022 年度 4 月から増田は北大から JAMSTEC に所属が変わっている。これに伴って、海洋大循環モデル MRI.com に組み込んでいた次世代海洋生態系モデルを COCO に移植する仕事を行う。移植が完了した際には物理モデルの違いが生態系モデルの再現性に与える影響を議論できるようになる。

参考文献

(1) Masuda, Y, Y. Yamanaka, S. L. Smith, T. Hirata, H. Nakano, A. Oka, H. Sumata, 2021: Photoacclimation by phytoplankton determines the distribution of global subsurface chlorophyll maxima in the ocean. Commun. Earth & Environ. 2, 128.

(2) 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.

(3) Pahlow, M., H. Dietze, and A. Oshlies, 2013: Optimality-based model of phytoplankton growth and diazotrophy, Marine Ecology Progress Series, 489, 1-16, doi:10.3354/meps10449.

(4) 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.

(5) Yasunaka, S., T. Ono, K. Sasaoka, K. Sato, 2022: Global distribution and variability of subsurface chlorophyll a concentrations. Ocean Sci., 18, 255–268.

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(CO_2)およびメタン(CH_4)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 CO_2 気柱平均濃度データを使用した全球 CO_2 吸排出量分布の推定を行うシステムの開発を行なっている。今年度は、前年度までに開発した NICAM-TM と 4 次元変分法を用いたシステムを基に、衛星観測データをより正確に扱うためのシステムの改良を行った。

１．はじめに

産業革命以降、CO_2、メタン、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(WMO Greenhouse Gas Bulletin, 2021)、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による影響が懸念されているため、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. NOAA, 2022）や、観測データを公開するためのネットワーク（e.g. WMO WDCGG, 2021）が構築されている。

このような背景から、宇宙から温室効果ガスの濃度を観測するため、2009 年に温室効果ガス観測技術衛星 GOSAT が打ち上げられ、全球の CO_2 および CH_4 の気柱平均濃度(XCO_2、XCH_4）等の観測が開始された。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、現在は GOSAT および GOSAT-2 による観測が継続されている。GOSAT-2 には温室効果ガス観測センサ 2 型（FTS-2）および雲・エアロゾルセンサ 2 型が搭載されている。国立環境研究所では、FTS-2 が観測した光の強度データからリトリーバル処理（吉田、2019）により導出した CO_2、CH_4 および一酸化炭素のカラム平均濃度等のプロダクトの公開を 2020 年 11 月から開始し、その後バージョンアップを重ねている。各種プロダクトは GOSAT-2 Product Archive（https://prdct.gosat-2.nies.go.jp/）で公開されている。

本課題では、前年度までに、GOSAT-2 FTS-2 SWIR Level 2 カラム平均気体濃度プロダクトに格納されている XCO_2 を使用した全球 CO_2 収支推定実験に着手した。収支推定には大気輸送モデル NICAM-TM をベースとした 4 次元変分法による逆解析システム NISMON-CO_2（Niwa et al., 2017a, 2017b）を用いている。今年度は、同システムで衛星観測データをより正確に取り扱うため、衛星データの鉛直感度分布を表すカラムアベレージングカーネル（Column Averaging Kernel; CAK）を取り込み、システムの改良を行なった。

２．問題設定・方法

衛星リトリーバルにより導出されたカラム平均濃度 XCO_2 とモデル計算値を比較する際には、CAK を考慮する必要がある（e.g. Connor et al., 2008; 吉田、2019)。CAK（$\mathbf{a}$）はアベレージングカーネル行列（$\mathbf{A}$）と気圧荷重関数（$\mathbf{h}$）を用いて式(1)で表される。n はリトリーバル処理のメインレイヤーの層数である。

$$\mathbf{a}_j = (\mathbf{h}^T\mathbf{A})_j \frac{1}{\mathbf{h}_j} \quad j=1, n \qquad (1)$$

CAK を考慮したモデル計算によるカラム平均濃度（$\boldsymbol{X}^m$）を導出するために、まず、NICAM-TM のフォワード計算により得られた各観測地点での CO_2 濃度の鉛直プロファイルをリトリーバル層にマッピングした鉛直プロファイル（$\boldsymbol{x_m}$）を算出し、Level 2 カラム平均気体濃度プロダクトに格納されている CAK、気圧荷重関数、CO_2 先験値の濃度プロファイル（$\boldsymbol{x_a}$）およびカラム平均濃度（$\boldsymbol{X}^a$）から式(2)により $\boldsymbol{X}^m$ を計算した。

$$\boldsymbol{X}^m = \boldsymbol{X}^a + \sum_j \mathbf{h}_j\, \mathbf{a}_j (\boldsymbol{x_m} - \boldsymbol{x}_a)_j \qquad (2)$$

次に、4 次元変分法による逆解析システム NISMON-CO_2 に式(2)の計算を取り込むため、式(2)のフォワードコードに対応する接線形コードとアジョイント（随伴）コードを作成した。アジョイントコードの検証は式(3)により行った。

$$(\mathbf{Mx})^T\mathbf{Mx} = \mathbf{x}^T(\mathbf{M}^T\mathbf{Mx}) \qquad (3)$$

ここで、$\mathbf{M}$ は接線形コード、$\mathbf{M}^T$ はそのアジョイントコード、$\mathbf{x}$ は接線形コードの任意の入力ベクトルである。

NISMON-CO_2 は最適化手法として準ニュートン法を用いた降下法スキーム POpULar(Preconditioned Optimizing Utility for

Large-dimensional analyses: Fujii, 2005; Niwa et al., 2017b)を用いており、接線形コードとアジョイントコードをこの同化サイクルにより使い分けて NISMON-CO_2に取り込み、システムを構築した。

３．結果と考察

GOSAT-2 FTS-2 SWIR Level 2 カラム平均気体濃度プロダクト v01.04 を用いて、2019 年 3 月から 7 月の 5 ヶ月分の GOSAT-2 観測データと NICAM-TM のフォワード計算結果を比較した（図 1）。GOSAT-2 観測データは品質フラグが 0(Good)のもののみを使用した。データ点数は、XCO_2が 118478 点、XCH_4が 120330 点であった。NICAM-TM のフォワード計算で、CAK を考慮しない場合とした場合の濃度差はXCO_2で−0.06±0.13ppm、XCH_4で−9.1±2.5ppb であり、期間全体の平均濃度 409.01ppm、1842.5ppb に対して 0.03%、0.5%程度であった。CAK を考慮した NICAM-TM 計算値と GOSAT-2 観測値の差は、XCO_2と XCH_4はそれぞれ−3.08ppm、−5.5ppb となり、特に XCO_2でバイアスが大きい結果となったが、現在リトリーバル手法の改良とともに、NICAM-TM の初期値等の調整を行っている。

アジョイントモデルの検証のため、XCO_2について式(3)の計算を倍精度で行い、右辺と左辺の差が計算誤差の範囲（10^{-14} のオーダー）であることを確認した。

NISMON のアジョイントモデルには、離散アジョイント（discrete adjoint; LINEAR）と連続アジョイント（continuous adjoint; NONLINEAR）の 2 つのモデルがあるが、今回は POpULar と NONLINEAR の組み合わせを用いることとし、NISMON の最初の反復計算では接線形コードを使い、それ以降の反復ではアジョイントコードを使用してシステムを構築し、システムが動作することを確認した。

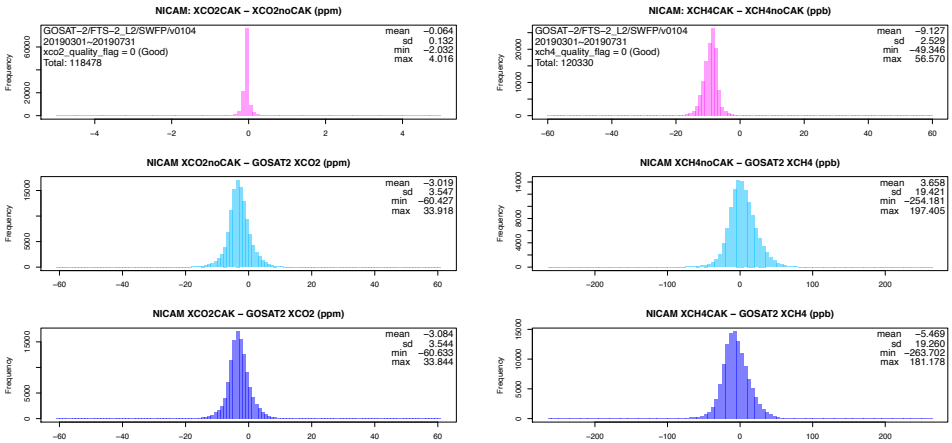

図 1　2019 年 3 月から 7 月の GOSAT-2 FTS-2 SWIR Level 2 カラム平均気体濃度プロダクト v01.04 の観測地点における NICAM-TM 計算値と GOSAT-2 観測データとの比較。（左）NICAM-TM で計算した XCO_2について CAK を考慮した計算値（XCO2CAK）と考慮しない計算値（XCO2noCAK）の差（上）、CAK なしの NICAM-TM XCO_2と GOSAT-2 XCO_2の差（中）、および CAK ありの NICAM-TM XCO_2と GOSAT-2 XCO_2の差（下）。（右）同じく XCH_4の結果。

４．まとめと今後の展望

本課題では、前年度までに、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、今年度はシステムの改良を行った。現在 GOSAT-2 FTS-2 SWIR Level 2 プロダクトの実データを用いた CO_2収支推定とシステムの調整を行なっており、今後、NISMON-CO_2を用いて推定した CO_2の地域ごとの吸収・排出量を Level 4 プロダクトとして国立環境研究所から公開することを予定している。

参考文献

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.

Connor, B. J., H. Boesch, H., G. Toon, B. Sen, C. Miller, and D. Crisp, 2008: Orbiting Carbon Observatory: inverse method and prospective error analysis, J. Geophys. Res., 113, D05305, doi:10.1029/2006JD008336.

Fujii, Y., 2005: Preconditioned optimizing utility for large-dimensional analyses (POpULar). J. Oceanogr., 61, 167-181., doi:10.1007/s10872-005-0029-z.

National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) Earth Systems Research Laboratory Global Monitoring Division, 2022: The Global Greenhouse Gas Reference Network. https://gml.noaa.gov/ccgg/about.html. Accessed 26 April 2022.

Niwa, Y., H. Tomita, M. Satoh, R. Imasu, Y. Sawa, K. Tsuboi, H. Matsueda, T. Machida, M. Sasakawa, B. Belan, N. Saigusa, 2017a: A 4D-Var inversion system based on the icosahedral grid model (NICAM-TM 4D-Var v1.0)—Part 1: Offline forward and adjoint transport models. Geosci. Model Dev., 10, 1157–1174 , doi:10.5194/gmd-10-1157-2017.

Niwa, Y., Y. Fujii, Y. Sawa, Y. Iida, A. Ito, M. Satoh, R. Imasu, K. Tsuboi, H. Matsueda, N. Saigusa, 2017b: A 4D-Var inversion system based on the icosahedral grid model (NICAM-TM 4D-Var v1.0) – Part 2: Optimization scheme and identical twin experiment of atmospheric CO_2 inversion, Geosci. Model Dev., 10, 2201-2219, doi:10.5194/gmd-10-2201-2017.

WMO Greenhouse Gas Bulletin, 2021: The state of greenhouse gases in the atmosphere based on global observations through 2020.

WMO WDCGG, 2021: Data Summary No. 45. Japan Meteorological Agency. World Meteorological Organization, Tokyo, 1-97.

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
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

要旨

昨年度に引き続き，ウォーカー循環のインド洋西端下降流に関する研究を進め，2021 年 10 月に Journal of Geophysical Research 誌に掲載された。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。

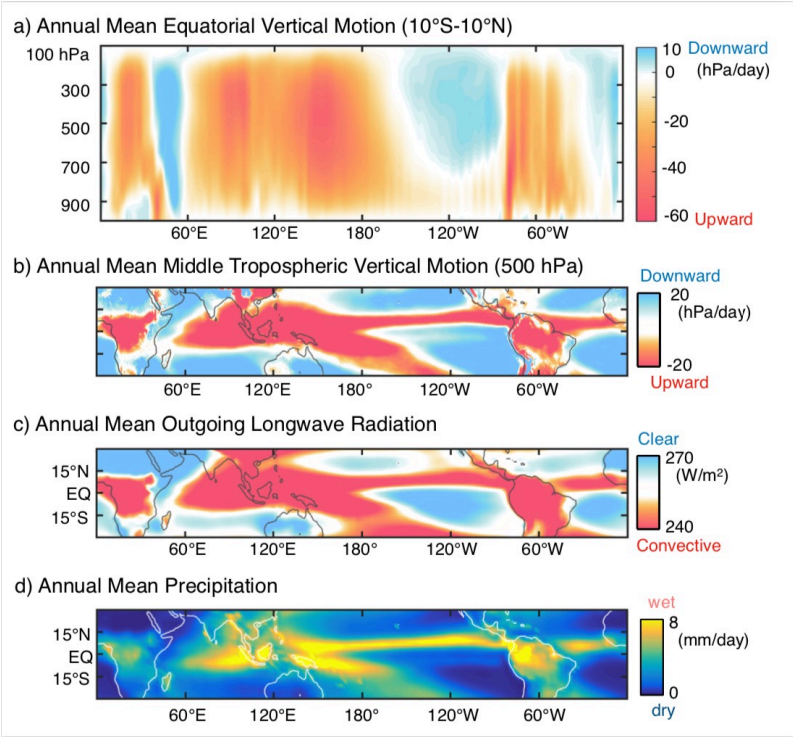

図 1 赤道域における鉛直運動，外向き長波放射，降水量の年平均値。

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，大気大循環モデル（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。

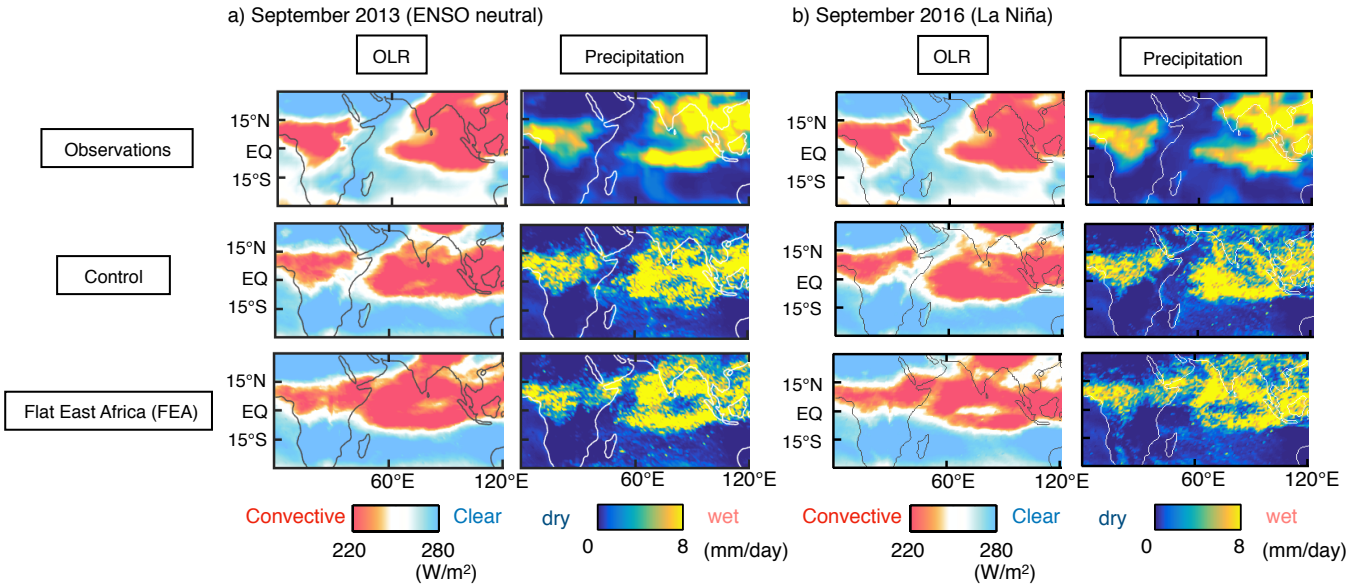

図 2 外向き長波放射と降水量について，観測（上段），CONTROL 実験（中段），FLAT_EAST_AFRICA 実験（下段）の比較。

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 Jounal of Geophysical Resarch, Atmospheres に受理され，2021 年 10 月 15 日付で公開された(Kohyama et al.,2021)。

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, Journal of Geophysical Research, Atmospheres, 126, e2021JD034650.

海洋循環－低次生態系結合モデルを用いた魚類生息環境場の比較研究

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

伊藤 進一，東大・大気海洋研，E-mail: goito(at)aori.u-tokyo.ac.jp
松村 義正，東大・大気海洋研，E-mail: ymatsu(at)aori.u-tokyo.ac.jp
佐々木 千晴，東大・大気海洋研，E-mail: sasaki.chiharu(at)aori.u-tokyo.ac.jp
Shin-ichi Ito, Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo
Yoshimasa Matsumura, Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo
Chenying Guo, Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo
Chiharu Sasaki, Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo

要旨

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

１．はじめに

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

２．問題設定・方法

領域海洋モデル Regional Ocean Modeling System (ROMS; 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ことを念頭に進めてきた。しかし、ROMS を用いた数値実験では黒潮の流路の再現性が良くないため、本年度はインド洋にて実施した数値実験結果を解析し、論文発表した。また、マサバおよびサンマの成長－回遊モデルの改良を進め、北太平洋でも問題となってきているマイクロプラスチックの分布についての数値実験を実施した。

３．結果と考察

インド洋におけるモデル計算結果から、シェ―シェルドーム海域におけるブルームが、シェ―シェルドームが発達し、栄養塩の鉛直傾度が急峻になることで、栄養塩の鉛直拡散と混合層へのエントレイメントが強化され、発生していることを示した。また、シェ―シェルドームの強弱に対応して、栄養塩の鉛直拡散が経年変動していることが示された。これらの結果は、Yokoi et al., (2022) として発表した。

サンマの成長－回遊モデルに関しては、2002 年から 2018 年の期間について、新しい衛星プロダクトをもとに、毎年 6 月から 7 月に行われている漁期前一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。東西に広く分布するサンマの産卵場がモデルによって再現できていること (Fig. 1) が確認された。しかしながら、産卵初期には観測から確認されている緯度帯よりもかなり北側で産卵を開始してしまっている状況も確認され、更なる改良が必要なことがわかった。産卵重心は年によって位置が変化するが、季節とともに南下しつつ、沖合へと移動する傾向を持つこと (Fig. 2) が示された。また、産卵重心の経年変動を調べた結果、2008 年以降沖合化していることが示された (図示せず)。

マサバの成長－回遊モデルに関しては、2002 年から 2016 年の期間について、産卵盛期にあたる 4 月に産卵場に卵を配置し、6 月 8 日までの期間を積分し、仔魚から稚魚になるまでの成長履歴を調べた。各年におけるモデル内でのマサバの成長を観測されている成長とあうように、モデル内での摂餌の半飽和定数 (餌料の摂餌のしやすさを指標) を変化させた。このことによって、各年の成長を再現することができた。再現されたモデル内でのマサバの成長をクラスター解析によって特徴的なクラスターに分けた結果、黒潮続流流軸の南側に位置する成長の遅い個体と、黒潮続流北側に位置する成長の良い個体に区分されることがわかった。黒潮続流の北側は餌料プランクトンが豊富であり、この影響が高い成長に結びついていることがわかった。また、モデル内で調整した半飽和定数の経年変動は黒潮の房総半島からの距離と相関があり、過去の研究では房総半島に黒潮が接近することでマサバが好む動物プランクトンの組成が増えることが指摘されていることから、マサバが摂餌しやすい餌料が多い年に成長が

良くなる傾向にあることも示唆された。
　また、日本海に対馬周辺におけるマイクロプラスチックの水平移動を計算し、対馬周辺での滞留時間を推定し、観測結果と比較した。

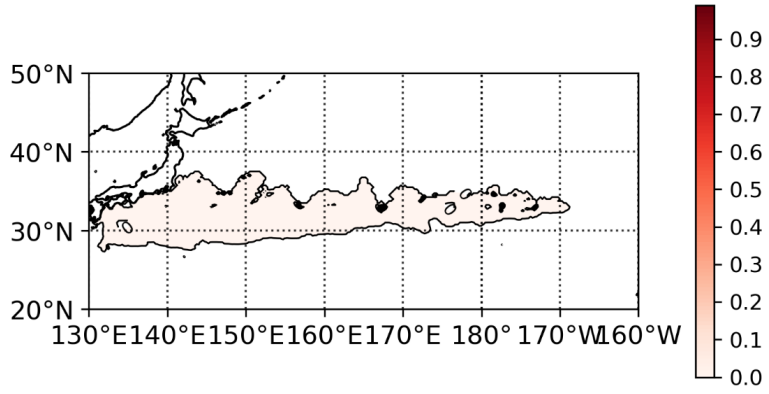

Fig. 1 Distribution of spawning energy used by Pacific saury in February 2018 simulated by the saury growth-migration model.

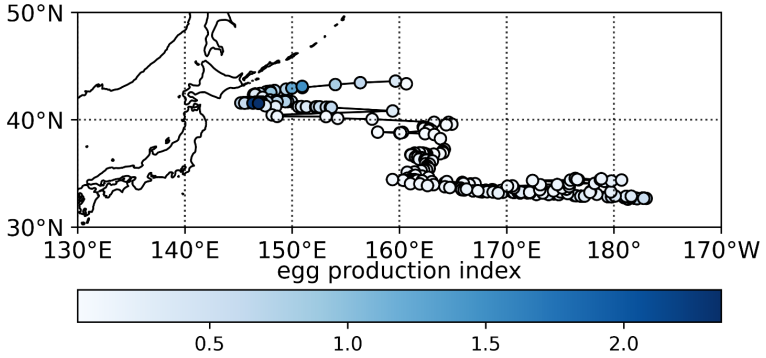

Fig. 2 Gravity center of spawning energy used by Pacific saury in 2018 simulated by the saury growth-migration model.

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である。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。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して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 Co mput ational 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. Zvalinsy (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.
(6) Yokoi, T., S. Ito, and E. Curchitser, 2022, Effect of Seychelles Dome intensity on nutrient supply to mixed layer: Insights from a physical-biological coupled model. J. Mar. Sys., 227, 103689. https://doi.org/10.1016/

j.jmarsys.2021.103689

非静力学海洋モデルの汎用化と OGCM へのシームレスな接続

松村義正，東京大学 大気海洋研究所，E-mail: ymatsu(at)kashiwa-u.ac.jp
大橋 良彦・東京海洋大学，E-mail: yohash0@kaiyodai.ac.jp
羽角 博康・東京大学 大気海洋研究所，E-mail: hasumi@aori.u-tokyo.ac.jp
Yoshimasa Matsumura, Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo
Yoshihiko Ohashi, Tokyo University of Marine Science
Hiroyasu Hasumi, Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo

要旨
我々の開発する非静力学海洋モデルを用いて 1) グリーンラード氷河融解水の動態に関するモデリング研究、2) 漂流する海氷が駆動する乱流混合に関する LES 計算を実施した。

1．グリーンランド氷河融解水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。氷河融解水は海水・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。本研究では直接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，非静力学海洋モデルによるフィヨルドへの氷河融解水流出過程のモデリング研究を実施した。音響測深に基づいた現実的な海底地形(Morlighem et al., 2017; 図 1a)を利用し、各領域において異なる氷河融解水トレーサーを導入して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．

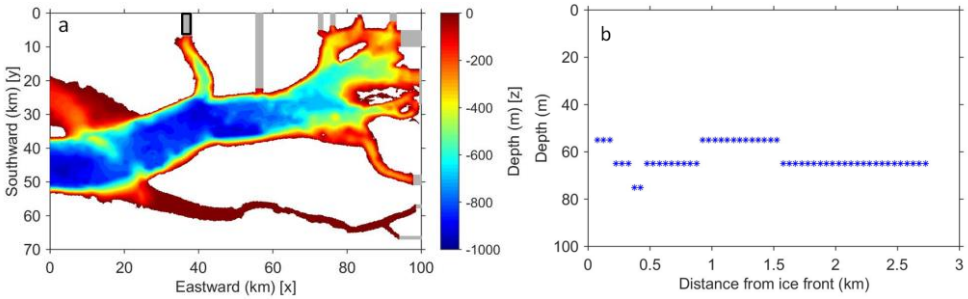

図 1(a)モデルの海底地形分布. (b) Bowdoin 氷河末端付近における氷河融解水トレーサー濃度が最大となる深度の分布(a の黒枠領域に位置する氷河融解水トレーサーの結果，積分開始 3 日後).

2. 漂流する海氷が駆動する乱流混合に関する Large Eddy Simulation

海氷はその形成・成長過程で力学的な破壊と集積による重合を繰り返すことで複雑な形状をなし、多年氷として漂流する大きな氷盤の喫水は局所的には数 10 m にも及ぶ。このような複雑な喫水形状を持つ氷盤が海面を漂流する際には直下の海水を引き摺ることで乱流混合を引き起こす。海氷−海水間に作用する剪断応力は海氷分布を左右するため気候モデルにおいても極めて重要なパラメータであるが、直接測定が困難なためチューニング要素として扱われている。本研究では MOSAiC プロジェクト（Rabe et al, 2021）で取得された UAV 音響探査による現実の海氷喫水形状

(図 2) を用いて large eddy simulation (LES) 計算によって漂流する海氷下での乱流混合を再現し、それによる海氷−海水間の応力を調べた。モデル座標系を漂流する海氷に固定し、海氷に対する相対的な海水運動を解く。格子解像度は 50 cm で、サブグリッドモデルとして複雑な境界近傍でも壁関数による補正を要せず複雑なジオメトリ形状に対して特性が良いことが知られている WALE (wall adoptive local eddy−viscosity) model (Ducross et al. 1996)を用いた。初期成層も現場直接観測から得られたプロファイルを用い、漂流速度は 5. 10, 20 cm/s の一様および 理想的な慣性振動を仮定し側面流入出として与えた。海氷近傍では複雑な喫水による乱流混合が再現され，またリッジ状の喫水に平均流が作用して生じる山岳波は密度躍層より下方に伝播している (図 3)。非静水圧モデルによって解かれた圧力傾度項から形状抵抗を求め、海氷−海水境界でのバルク応力公式でのドラッグ係数 Cd を算出した。領域をサブ区間に分割し、それぞれでの平均喫水高・標準偏差・流れに直行する方向の断面積に対する Cd 値を図 3 に示す。LES で見積られた Cd の値は喫水形状に依存し 1−10 x 10^{-3} をとる。漂流速度に対する Cd の依存性は見られず、バルク式による応力表現の妥当性を確認できた。本研究の結果をもとに OGCM における海氷−海水バルクドラッグ係数を格子平均氷厚の関数として与えるパラメタ化手法を提案することを今後の課題とする。

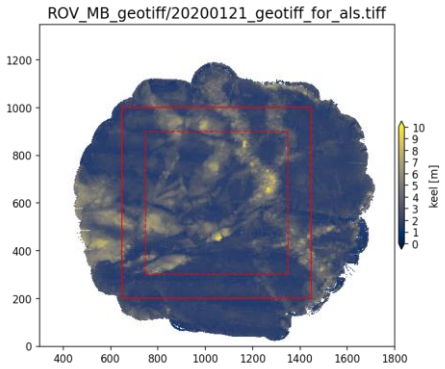

図 2　MOSAiC プロジェクト AUV による海氷喫水

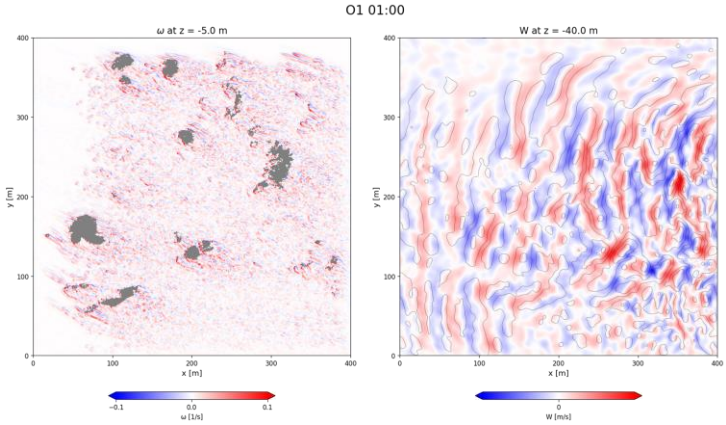

図 3 左）5m 深での渦度，　右）40m 深での鉛直速度

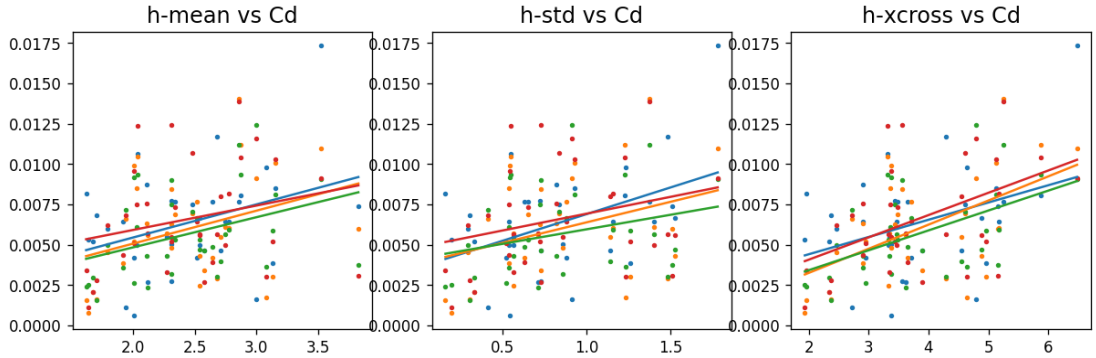

図 4: 喫水の平均高 (左)，標準偏差 (中央)，流速に対する断面積 (右) とドラッグ係数 *Cd* の散布図および線形回帰直線。色は与えた表流速度 (赤 5 cm/s，黄 10 cm/s，緑 20 cm/s，青 10 cm/s 慣性振動)

引用文献

Morlighem et al. (2017). BedMachine v3: Complete bed topography and ocean bathymetry mapping of Greenland from multibeam echo sounding combined with mass conservation. Geophysical Research Letters, 44, 11,051–11,061.

Mankoff et al. (2020). Greenland liquid water discharge from 1958 through 2019. Earth System Science Data 12 2811–2841.

Rabe et al. (2022) Overview of the MOSAiC expedition: Physical oceanography. Elementa: Science of the Anthropocene 10(1).

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：乱流定数化・二重拡散・海洋熱波解析

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

安田 一郎，東大・大気海洋研，E-mail: ichiro(at)aori.u-tokyo.ac.jp
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
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, Yusuke Kawaguchi, Itsuka Yabe
Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo

要旨: 2021 年度は、独自の高速水温計観測を用いて、南極周曲流海域・北太平洋亜寒帯での拡散型二重拡散が強化している可能性がある乱流拡散について研究を進めるとともに、様々な海域に適用可能な密度鉛直プロファイルデータのみから推定可能な乱流パラメタリゼーション手法を開発した。また、北東太平洋での顕著な海洋熱波の発生に、中緯度で東進する海洋擾乱が関与し、PDO や NPGO が負から正に符号を反転させることが関わっていることを、海洋観測データと大気海洋結合気候モデルの結果から指摘した。

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。

２．問題設定・方法・結果　本研究室で独自に開発した、CTD 取り付け型高速水温計データを用いた、深層にも適用可能な乱流エネルギー散逸率推定手法(1,2)を活用し、北太平洋亜寒帯海域において、拡散型二重拡散が乱流を強化している可能性を観測を通じて示し、論文として公表した(3: 2022 年度海洋学会奨励論文賞受賞)。さらに、南極周曲流海域で得られた海底に至る高速水温計観測を元に、ファインスケール(鉛直数 10-100m スケール)観測データを用いて乱流拡散を推定する、乱流パラメタリゼーション手法を検討した結果、CTD から得られる密度データのみでも妥当な推定が可能であることを示した。

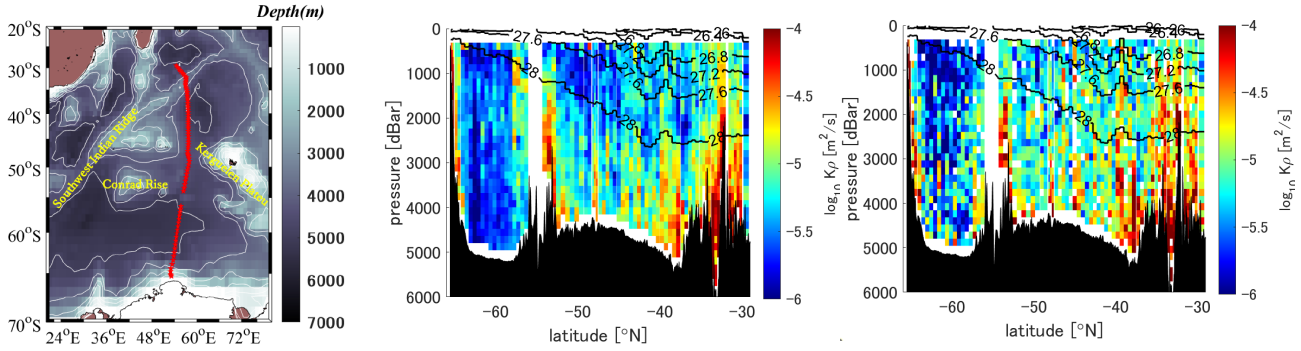

Fig. 1　(左) みらい MR-19-4 レグ 3 (2019/12-2020/2)観測点分布、(中)高速水温計観測から得られた乱流拡散係数分布、(右) CTD からの密度観測データにシア・ストレイン比$R_\omega = 3$を仮定したファインスケールパラメタリゼーションによる乱流拡散係数分布

3. 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、次年度成果を発表する予定である。

参考文献

(1) 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
(2) 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. Oceangr. DOI: 10.1007/s10872-020-005
(3) Tanaka, M., J. Yoshida, K. Lee, Y. Goto, T. Tanaka, H. Ueno, H. Onishi, and I. Yasuda. (2021) The potential role of thermohaline-shear instability in turbulence production in the Bering Sea and the subarctic North Pacific. J. Oceanogr. 77, 431-446, doi.org/10.1007/s10872-021-00602-9
(4) Hamamoto M. and I. Yasuda (2021) Synchronized variations in the Pacific Decadal Oscillation. J. Oceanogr. https://doi.org/10.1007/s10872-021-00592-8

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，E-mail: hiroshi3(at)tmu.ac.jp
北林　翔，都立大
Hiroshi Takahashi, Department of Geography, Tokyo Metropolitan University
Sho Kitabayashi, 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のかについて、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。SST 偏差パターンにより、アジアモンスーン強度への影響が異なることが確認された。どのようなパターンが、陸面状態の影響を強めたり弱めたりするのかは、今後の課題である。

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のかについて、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。

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。しかしながら、どのような SST パターンによって、影響が変わるのかは、わからなかったため、今後の課題である。

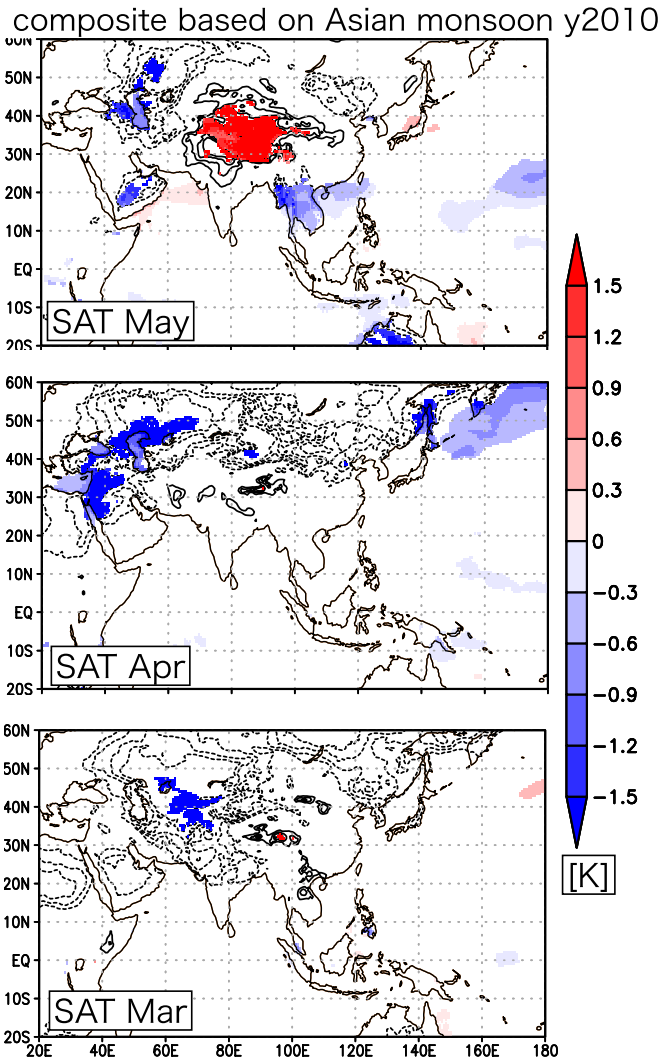

図 1: アジアモンスーンの強度が強い 10 メンバー平均と弱い 10 メンバー平均との差。