# 共同研究報告書

令和4年度

東京大学 大気海洋研究所 気候システム研究系 令和4年度共同研究報告書の発行にあたって

令和4年度共同研究応募及び配分一覧

# 【特定共同研究】

- ①衛星データと数値モデルの融合による雲の素過程の研究
   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

- 5. 全球雲解像モデルの開発及びデータ解析 分担課題:雲解像モデルにおける物理過程の高度化......13
- 6. 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

【一般共同研究】

1. トッテン棚氷のグリーン関数法を用いたデータ同化、生態系モデルとの結合17
<ol> <li>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19</li> </ol>
3. 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21
4. エルニーニョ・南方振動現象の形成機構と鉛直乱流混合が果たす役割23
5. NICAM 及び MIROC モデルを用いた汎惑星気象予測・物質輸送・気候変動の研究25
6. 惑星中層大気大循環の力学27
7. 全球雲解像モデルデータを用いた熱帯雲活動の解析29
8. 機械学習による統計的ダウンスケーリング・バイアス補正・ナウキャスティングモデ ルの開発
9. 金星気象現象の全球非静力学モデル NICAM による解明
10. 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
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
12.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
13. 放射収支算定のための放射スキームの高速・高精度化41
14. 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43
15. データ同化を用いた古気候復元に関する研究44

1	7.	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:東部北太平洋海洋熱波 についての解析
1	8.	MIROC-lite モデルを用いた全球凍結後の海洋循環の理解
1	9.	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52
2	0.	非静力学海洋モデルの汎用化と OGCM へのシームレスな接続(準備中)54
2	1.	MIROC と NICAM を用いた地球型惑星におけるスノーボール状態突入条件の解明
2	2.	放射対流平衡系における雲の自己組織化シミュレーションの解像度・領域サイズ依存 性
2	3.	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58
2	4.	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(準備中)60

令和4年度共同研究報告書の発行にあたって

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

地球温暖化の影響は気候の様々な側面で顕在化し、豪雨や猛暑といった極端現象をはじ めとして、人間の生活や社会への波及も深刻度を増しています。それにあわせて、社会的関 心が深い問題により直接的に答えていく方向にも我々の研究は広がっています。そうした中 で昨年、地球温暖化問題を幅広い学術分野の融合的枠組みで捉えながら具体的解決に導く ことを目的として、東京大学に気候と社会連携研究機構が設立されました。当研究所はこの 連携研究機構の主管部局を務めており、そうした新たな研究の方向性に対しても本共同研究 の枠組みが有効であるものと考えます。

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

令和5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 羽角 博康

# 2022年度 気候システムに関する共同研究 応募及び配分一覧

一杯         死         度         消耗品         点 費         合計           1	研究											気	候系		配 分	▶ 額	
公分         大師         大師         大師         大日         千円         千日         10 <th1< th=""><th></th><th>研</th><th>究</th><th>靜</th><th>Ł</th><th>題</th><th>研</th><th>究</th><th>組</th><th>織</th><th></th><th>打</th><th>当</th><th></th><th>消耗品</th><th>旅費</th><th>合計</th></th1<>		研	究	靜	Ł	題	研	究	組	織		打	当		消耗品	旅費	合計
特定 衛星データと数値モデルの間を及びデータ解析 1) 全球雲解像モデルの間を及びデータ解析 北海道大学大学院理学系研究所 1) 全球雲解像モデルの間を及びデータ解析 北海道大学大学院理学系研究所 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2	区分											耄	傾	ノード時間	千円	千円	千円
$\Pi \propto REQ 0 \# C$ $\Pi \circ k g k g (2 m) = M + M + M + M + R + R + R + Q + R + Q + R + Q + R + Q + R + Q + R + Q + Q$	特定	衛星データと	数値モデ	ルの融	合によ	る雲の素過	国立環境研究所		五藤	大輔	主任研究員	鈴木	健太郎	50,000	0	0	0
1 全要要歸像モデルの開発及びデータ解析       北海道大学大学院理学研究院       佐藤<       RA       特征曲殺授   <	研究	程の研究					国立環境研究所・地域環境保全領域		打田	純也	特別研究員	佐藤	正樹				
Physical Lagrance       Skept Skeff	1	全球雲解像モ	デルの開	発及び	データ	解析	北海道大学大学院理学研究院		佐藤	陽祐	特任准教授						
$\widehat{W2}$ $\widehat{W1}$ $\widehat{W2}$ $\widehat{W2}$ $\widehat{W1}$ $\widehat{W2}$ $\widehat{W2}$ $\widehat{W1}$ $\widehat{W2}$ $\widehat{W2}$ $\widehat{W2}$ $\widehat{W1}$ $\widehat{W2}$ $\widehat{W1}$	特定	世界海洋大循	環モデル	の相互	比較		気象庁気象研究所		坂本	圭	主任研究官	羽角	博康	43,200	0	0	0
$ \frac{2}{8\pi} \left[ \frac{2}{8\pi} \left[ \frac{1}{8\pi} \left[ 1$	研究								中野	英之	室長						
$\mu$	2								辻野	博之	室長						
m $m$ $p$									豊田	隆實	主任研究官						
$m_{T}^{c}$									<u></u> 浦川	昇吾	主任研究官						
特定       所定									ЛЕ	推直	研究官						
研究 3     効果気体の解析     日本     日本<	特定	「衛星データと	数値モデ	ルの複	合利用	による温室	鹿児島大学			勝文	准教授	今須	良一	3,000	0	120	120
3 - 1 - 1 - 1 - 1 - 1 - 1 - 1 - 1 - 1 -	研究	効果気体の解	析						> < 104	101 24				.,	Ű	120	120
特定 発 名 第 名 化高分解能大気モデル及び領域型気候モデルの開 気象庁情報基盤部 数値予報モデル技術開発室氏家 報告 和予報官 予報官 金演 費史 技術専門官 木商 哲平 技術専門官 大商 哲平 	3																
第二 研究 42 2 	特定	高分解能大気	モデル及	び領域	型気候	モデルの開	気象庁情報基盤部 数值予報課		氏家	将志	予報官	渡部	雅浩	16,000	0	0	0
研究 4       小       米原       仁       予報官 金濵 貴史       技術専門官 大麻 哲学       技術専門官 大麻 哲学       技術専門官 大麻 哲学       人材 専門官 大麻 哲学       人材 専門官 大麻 法市主任         黒木<		発	- / ////			- / // // //	数値予報モデル技術開発室			1.1.1			ЦІЩ	10,000	Ũ	Ũ	, i i i i i i i i i i i i i i i i i i i
4 $\Delta_{\hat{a}\hat{a}}$ $\hat{b}e_{\hat{a}\hat{a}}$ $\hat{b}e_{\hat{a}\hat{a}\hat{a}}$ $\hat{b}e_{\hat{a}\hat{a}\hat{a}\hat{a}}$ $\hat{b}e_{\hat{a}\hat{a}\hat{a}\hat{a}}$ $\hat{b}e_{\hat{a}\hat{a}\hat{a}\hat{a}\hat{a}\hat{a}\hat{a}\hat{a}\hat{a}a$	研究								米原	仁	予報官						
kmkmfer	4								金濵	貴史	技術専門官						
 内 中 中 方 方 方 方 方 方 方 方 方 方 方 方 方 方 方 方 方 方 									木南	哲平	技術専門官						
照木 志洸 技官 林田 和大 技官 須藤 康平 技官       に <th< td=""><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>齊藤</td><td>慧</td><td>技術主任</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></th<>									齊藤	慧	技術主任						
本田和大族校官 須藤康平 技官       本田和大族校官       同       回       回       回       回         特定 5       全球雲解像モデルの開発及びデータ解析 5       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       0       80       80         特定 5       海洋モデルにおけるサブグリッド現象のパラ 6       東京大学大学院理学系研究科       日比谷 紀之 伊地知 敬 斯教 福井県立大学海洋生物資源学部       客員共同研究員 助教 田中 祐希 准教授 永井 平       羽角 博康       200,000       0       0       0       0         小       計       ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・									黒木	志洸	技官						
小       120,000       0       120,000       0       80         第二       第二       第二       第二       120,000       0       80       80         第二       第二       120,000       0       80       80       80         第二       120,000       0       10       0       0       0       0         第二       1       120,000       0       10       0 <t< td=""><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>林田</td><td>和大</td><td>技官</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></t<>									林田	和大	技官						
特定 研究 5     全球雲解像モデルの開発及びデータ解析     富山大学     安永 田中     教明 田中     教授 田中     佐藤 能     正樹     120,000     0     80     80       特定 5     海洋モデルにおけるサブグリッド現象のパラ 6     東京大学大学院理学系研究科     日比谷     紀之     客員共同研究員 伊地知     羽角     朝角     博康     200,000     0     0     0     0     0     0     0     0     0     0       特定 研究 6     本産研究・教育機構 海洋環境部     田中     枯希     准教授 准教授     田中     祐希     准教授     31     100,000     0     0     0     0       小     ・     ・     計     ・     ・     ・     432,200     0     200     200									須藤	康平	技官						
田中     田中     瑞樹     修士課程1年生     田中     田     田中     田	特定	全球雲解像モ	デルの開	発及び	データ	解析	富山大学		安永	数明	教授	佐藤	正樹	120,000	0	80	80
新学売     新学モデルにおけるサブグリッド現象のパラ     東京大学大学院理学系研究科     日比谷     紀之     客員共同研究員     羽角     博康     200,000     0     0       研究     シータ化     海洋県立大学海洋生物資源学部     田中     祐希     准教授     小     1     0     0     0     0       小     計     計     日     本     田中     七     432,200     0     200     200	研究				/ /				田中	瑞樹	修十課程1年生	1-		120,000	Ũ	00	
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       客員共同研究員 伊地知       羽角       博康       200,000       0	5									111,121							
研究 $3 - 9 \ell$ 伊地知 敬 助教       6     一       6     小       小     計       中地知 敬 助教       市       日       市       日       市       日       日       日       日       日       日       日       日       日       日       日       日       日       日	特定	海洋モデルに	おけるサ	ブグリ	ッド現	象のパラ	東京大学大学院理学系研究科		日比彳	~ 紀之	客員共同研究員	羽角	博康	200,000	0	0	0
6     福井県立大学海洋生物資源学部     田中 祐希     准教授       小産研究·教育機構 海洋環境部     永井 平     研究開発職員       小     計	研究	メータ化							伊地东	11 敬	助教		1.4 / 4 4	,			
小產研究·教育機構 海洋環境部     永井 平     研究開発職員     432,200     200     200	6						福井県立大学海洋生物資源学部		田中	祐希	准教授						
小         計         小         432,200         0         200         200	Ŭ						水産研究,教育機構 海洋環境部		永井	亚	研究開発職員						
小 計 432,200 0 200 200	<u> </u>								/1//	I	MI JUDI JUDI K						
το2, 200 0 200 200			,	6			≣+							432 200	0	200	200
			1				14							402,200	0	200	200

# 2022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	研	究	課	題	研 究	組		織		気(   担	產系 【当	P	<u>記</u> 分 消耗品	· 額 旅費	合 計
区分	トッテン畑氷の	י וו ו	> 月目米6小七 え	マ田いたデータ	北海洋十学低泪利学研究正	da da	14	七议	时初	教	<u>員</u> 巡乙	ノード時間	千円	千円	千円
一般 研究	同化、生態系モ	ミデルとの	イ関剱伝を の結合	と用いたデータ	北海道大学低温科子研究所 北海道大学大学院環境科学院 北海道大学大学院環境科学院	中山 瓢子 安世	· 俊	主件 安太郎 翌	助教 大学院学生 士学院学生	四 部	彩士	33,000	0	150	150
一般	気候変動予測の	つ不確実	性低減に資	至する海洋大循	海洋研究開発機構	<u>女开</u> 小室	- <u></u>	<del>奧</del> 	副主任研究員	羽角	博康	150,000	0	0	0
研究 2	環モデルの精維	政化				鈴木 苴原	立和	」 上 郎 弥	研究員 研究員						
						渡辺	路	各生	特任研究員						
一般	海洋モデルを用	目いたケー	ープダンレ	~一沖南極底層	北海道大学低温科学研究所	<u>黒木</u> 大島	聖慶	星夫 豪一郎	_ 准研究副主任 教授	羽角	博康	30,000	0	90	90
研究	水の沈み込み過	過程の再現	現	тт то <u>с</u>		Mensa	ah,	Vigan	特任助教		10/40	,	, i i i i i i i i i i i i i i i i i i i		
<u>3</u> 一般	エルニーニョ・	・南方振動	動現象の刑	ジ成機構と鉛直	東京大学大学院理学系研究科	<u>中山</u> 東塚	佳 三 知	ŧ洋 旧己	助教 准教授	渡部	雅浩	15,000	0	0	0
研究	乱流混合が果た	こす役割				村田	壱	5学	大学院生		3-1-	,			-
4 一般	NICAM及びMIRO	Cモデルる	を用いたシ	R惑星気象予	東北大学大学院理学研究科	<u> </u>	<u> </u>	<u>n也</u> 川史		佐藤	正樹	100,000	0	25	25
研究	測·物質輸送·	· 気候変動	動の研究			寺田	直	<b> </b>	教授	阿部	彩子				
5						笠羽 中川	康広	₹止 な務	教授 助教						
						狩生	步	云喜	大学院生						
					東京大学大学院総合文化研究科	古孙 小玉	ヽ フ	木米 貴則	大字阮生 特任助教						
					情報通信研究機構	笠井	・康	€子 ★ ★	上席研究員						
					京都產業入子 大阪府立大学	伍川 前澤	────────────────────────────────────	マ大 谷之	教授 准教授						
一般	惑星中層大気大	て循環のス	力学		九州大学応用力学研究所	山本	膨	劵	准教授	佐藤	正樹	2,000	0	70	70
研究 6															
一般	全球雲解像モラ 解析	デルデー	タを用いた	と熱帯雲活動の	福岡大学理学部 富山大学学術研究部	西	憲敬	文 <sup>(</sup>	教授	佐藤	正樹	30,000	0	150	150
ッイデビ 7	וע דני 				軍四八十千四%/7九司 東京大学大学院理学系研究科	19日 三浦		》 谷亮	准教授						
一般	機械学習による イアス補正・+	5統計的	ダウンスケ スティング	rーリング・バ ブモデルの閉発	東京大学 生産技術研究所	芳村	圭	E	教授	渡部	雅浩	60,000	0	0	0
いから 8		ノコギノ	~/ 1 / 2	こ / /ビッノ(刑分)		亚丁 大沼	<i>後</i> 友	z 支貴彦	来示八子时別研先員 特任研究員						
						吉兼	: 隆 十	惫生 ₹ <del>7</del>	特任准教授 <sup>助教</sup>						
						<u></u> 和田 山崎	及 · 大	ス <del>ナ</del> 大	助教 准教授						
	▲目与毎祖毎 <i>個</i>	つ合成北非	ムカヴエミ	デルNICAMIT ト	東京大学大学院工学系研究科 社会基盤学	<u>沖</u>	大戟	수 도리/	教授	は蔬	工掛	190,000	0	150	150
一版研究	金星风家筑家のる解明	ノ主称矛盾	アノチモノ		京都産業大学	高不 佐川	· 汕 英	专夫	教授	化膝	止肉	120,000	0	150	150
9					慶応義塾大学	杉本	憲	憲彦	教授						
					東京御洋入子  京都産業大学	\阕□ 安藤	天 [	el朱 広基	准教授 助教						
. 南几	<u> </u>	テ世はアイ	トント ス 地の耳	田相し仕能でに	国立環境研究所	八代	计	5 与 <del>立</del>	主任研究員	习 在	捕車	96 400	0	0	0
一般研究	周年 一 仲 合 移 1 関 す る 数 値 的 研	」帝域に 肝究	わりる物理	E場と生態ポに	<b>東京入子</b> 入 <b>式</b> 神祥研究所	伊藤堤	· 辛 英輔	白彦 甫	准教授 特任助教	初角	导康	86,400	0	0	0
10						柴野	良	良太	特任研究員						
一般	大型大気レータ	ブーと全球	球高解像度	モデルを相補	東京大学大学院理学系研究科		<u>文</u> 進 董	<u>。</u>	大学院生 教授	羽角	博康	30,000	0	0	0
研究	的に用いた中層	<b> <b> </b></b>	循環の階層	層構造の解明		高麗		、 E史	助教		14,444	,			-
11						奥井 青石	睛	青香 译太	博士課程大学院生 修士課程大学院生						
一般	海洋循環一低め	次生態系約 14	結合モデル	レを用いた魚類	東京大学 大気海洋研究所	伊藤	道		教授	羽角	博康	20,000	0	0	0
研究 12	土芯泉児场のル	し取り行うし				松村 佐々:	<sub>我</sub> 木	<sub>受止</sub> 千晴	助教 学術支援職員						
一般	放射収支算定の	っためのカ	放射スキー	-ムの高速・高	東京海洋大学	関口	美	<b></b> 長保	准教授	鈴木	健太郎	100	0	21	21
小开先 13	111 <i>1</i> 211														
一般	<ul><li>気象・気候シミ</li><li>現象のメカニス</li></ul>	ミュレー: ズムに 関っ	ションを月 すろ研究	引いた惑星規模	お茶の水女子大学	神山	選・	之 之	助教	渡部	雅浩	8,000	0	0	0
圳元 14						山小	省丁		八子阮生						
一般	データ同化を用	目いた古会	気候復元に	ニ関する研究	弘前大学	岡崎	這	享史	助教	阿部 古本	彩子 正和	8,000	0	0	0
س براند 15											<u>ш</u> , тр				
一般	衛星データ活用 た大気モデル開	月による≦ 昇発研究	全球炭素收	マ支推定に向け	国立環境研究所	八代	尚		主任研究員	佐藤	正樹	50,000	0	0	0
研究						丹羽	洋	<b>≜介</b>	主任研究員						
16						質滕 佐伯	:	и 日 雀鳥	土江研究貝 主任研究員						
						村上	和	口隆	特別研究員						
						шш Guang	示- Igyu	- Liu	特別研究員						
一般	海洋における循 する数値的研究	看環・水均 F	塊形成・輔	谕送・混合に関	東京大学大気海洋研究所	安田		一郎	教授 助教	羽角	博康	6,000	0	0	0
ッド元 17	→ → 外回日刊刊 力					松浦		印徳	<sup>助我</sup> 特任研究員						
						張	愛き 本	5 	大学院生						
一般	MIROC-liteモラ	デルを用い	いた全球運	東結後の海洋循	筑波大学生命環境系	原田	<u>小</u> 真	<sup>— 细元</sup> 〔理子	<u></u>	岡	顕	25,000	0	0	0
研究	環の理解				筑波大学生命地球科学研究群	三川	袑	谷己	博士前期学生						
	次世代海洋生態	<u> 影系モデ</u> ノ	ルを用いた	と気候変動が海	北海道大学地球環境科学研究院	増田	虍	良帆	博士研究員	田	顕	25.000	0	0	0
研究	洋生態系に与え	える影響の	の予測			山中	康	長裕	教授	1.3		,			-
19	北热力学演兴。	ニリーク	の田とした	$CCM \sim D^{2}$	<b>事</b> 吉十兴 十层海洲顶空王	+/\ +-	<u> </u>	色元	田教	<b>JJ</b>	玉寸	150,000		^	
一般 研究	か開力子御待せ レスな接続		ブェノ#1ビと0	oumマリンーム	来京八子 八 <b>风</b> 神祥研究所 東京大学 大気海洋研究所	松村 小松	義幸	<del>&amp;</del> 止 医生	の教 准教授	初角	导康	150,000	0	0	0
20					東京大学大学院新領域創成科学研究科	王	業消	当	大学院生						
					北海道大学低温科学研究所	甲科 伊藤	は 薫		<sup>呣吧</sup> 学術研究員						
					東京海洋大学	大橋	良	良彦 新一 印	特任研究員 准教授						
					九州大学総合理工学府	小山 泉 二	ガ 智貴	91 <i>时</i> 皇	大学院生						
	MIROC と NICAMを	シ田いたり	₩球刑戓╘	見におけスマ	高度情報科学技術研究機構 東京大学総合文化研究科	山岸	孝	<b>孝輝</b>	主査						
一般	ノーボール状態	L/III / / / / / / / / / / / / / / / / /	中の解明	ニータリンクン	先進科学研究機構	小玉	貴	覧則 → +++	特任助教	阿部	彩子	50,000	0	10	10
研究 21					#/F/研究開発機構 地球環境部門 海洋研究開発機構 地球環境部門	局須 齋藤	頁 [ 冬]	べ 朝 樹	研光貝 研究員	佐滕   宮川	止樹 知己				
					東北大学大学院 理学研究科	黒田	) 17 E	川史 県中	助教		_				
1	1				业 双八子 理子 即 彻 埋子 科	ΨШ	防	<b>万</b> 丈	村江唯教授	I		I			

研究	f究						気	候系	配 分 額								
区分	研	究	課	是	<u>)</u>			研	充 組	織		推載	1当 2111	ノード時間	消耗品 千円	旅 費 千円	合 計 千円
1 一研究 22	気候モデル 気研究	· 全球雲解	像モデ <i>1</i>	レを用い7	た熱帯大	東京大学	大学院理学系研究科		三神Ching 一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一	裕	准教授 大学院生 g 大学院生 大学院生 大学院生 大学院生 大学院生 大学院生 大学院生 大学院生	渡部	雅浩	200,000	0	0	0
一般 研究 23	数値モデル 学の探究	を用いた東	アジアラ	大気循環(	の変動力	東京大学	<sup>4</sup> 先端科学技術研究セ	ンター	中小宮岡宮 関	前 一 優 貴 悟 歩 温	教授 准教授 特任准教授 特任助教 特任研究員 特任研究員	渡部	雅浩	50,000	0	0	0
一般 研究 24	経年的な大 影響の定量	気海洋変動 的評価	がMJOの	頭在化に	果たす	海洋研究 東京大学 お茶の水	<ul> <li>開発機構 地球環境部</li> <li>大気海洋研究所</li> <li>女子大学理学部情報</li> </ul>	87門 科学科	高須? 末松 神山	賀 大輔 環 翼	ポスドク研究員 特任研究員 助教	佐藤	正樹	200, 000	0	0	0
		/]	\				計							1, 448, 500	0	666	666
		朱	寺 泛	定 共	; 同	合				6	件			432, 200	0	200	200
		_	一 舟	改 共	; 同	合				24	件			1, 448, 500	0	666	666
			2				計			30	件			1, 880, 700	0	866	866

# 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

全球大気汚染物質輸送モデル NICAM-Chem のバージョンアップと鉛直高解像化を実施した上で、世界最高 解像度レベルである全球 14km のエアロゾルシミュレーションを実施した。エアロゾル光学的厚さ (AOD) 及び放射フラックス等の基本場の再現性を検証したところ、衛星観測結果と概ね整合的であった。特に従来 の結果よりも、中国四川盆地やインドヒンドスタン平原などの AOD 高濃度地域で衛星結果に見られるよう な極大値が見えるようになり、モデル結果が改善された。短波放射フラックスの再現性も概ね良好であった が、改善の余地も見られ、今後も継続してモデル改良を進めていきたい。

# 1. はじめに

大気中に浮かぶ粒子(大気粒子、あるいは、エアロゾル)は、大気環境だけではなく、気候にも影響を与えている。国際的な 気候変動問題に対応するため、日本においても CO2などの長寿命温室効果ガスと併せて、大気汚染物質でもある短寿命気候強制 因子(SLCFs)の削減政策を組み合わせることで、気候変動緩和策を早急に検討する必要があると考えられている。本研究では、 全球雲解像モデル(NICAM)<sup>1,2,3</sup>に結合したエアロゾル化学統合モデル(NICAM-Chem)<sup>4,5)</sup>を用い、モデル内で取り扱われてい る大気粒子とその前駆気体である短寿命気体との相互作用に着目したエアロゾル化学の精緻化と、エアロゾルと雲の相互作用に 関するモデリングの高度化を行うことを目的としている。

# 2. 問題設定·方法

大気汚染物質輸送モデルである NICAM-Chem<sup>4,5)</sup>を用いて、世界最高解像度レベルの全球 10km スケールで全球エアロゾルシ ミュレーションを実現した。その結果、都市部及び極域でのエアロゾル再現性が向上し<sup>6,7)</sup>、雲エアロゾル相互作用の表現が従 来の気候モデルよりも劇的に向上した<sup>8)</sup>。これらの成果を踏まえて、本年度はモデルのバージョンを v16 から v19 に更新し、さ らに鉛直格子を従来の 38 層から 78 層に高解像度化した。エアロゾルや気候影響の議論にとって重要な物理量である放射フラッ クスの基本場の再現性を検証し、従来の高解像度シミュレーションの通年結果<sup>9</sup>との比較を通じて、モデル結果がどのように改 善されたかを調べた。なお本報告では、従来のモデル設定と極力共通にするために、雲微物理モジュールは NSW6<sup>9</sup>を用いてお り、雲から雨への変換効率は Berry (1968)<sup>10</sup>を用いた。

# 3. 結果と考察

図1は、大気中のエアロゾル光学的厚さ(AOD: Aerosol Optical Depth)の年平均分布を比較したものである。本研究で計算した結果は以前の計算結果のと同様に、衛星観測結果を概ね再現しており、一般的なエアロゾルシミュレーションの結果と比べても同程度であった。以前の計算結果よりも再現性が良くなった点としては、中国四川盆地やインドヒンドスタン平原などのエアロゾル高濃度地域で衛星結果に見られるような極大値が見えるようになったことである。また、南太平洋などの海上で、強風で巻き上げられることで発生する海塩粒子が減少し、AODが減少し、衛星結果に近づいたことも挙げられる。

大気上端における外向き短波放射フラックス (Outgoing Shortwave Radiation: OSR) 及び雲短波放射フラックス (ShortWave Cloud Radiative Forcing: SWCRF) も検証した。NICAM をバージョンアップした結果は、以前の計算結果のや衛星観測によって得られた結果と概ね整合的であった。また、エアロゾルがない条件でのシミュレーションと比べると、エアロゾルの冷却効果によってOSR が 1.8 Wm<sup>2</sup>程度増加し、観測結果に近づいた。それでも観測との差は赤道付近でも約 10 Wm<sup>2</sup>程度あり、精度の良いエアロゾルの気候影響評価のために、モデル高度化を継続する必要がある。SWCRF に関しては、エアロゾルの効果が OSR に比べて小さく、観測との差が約 11 Wm<sup>2</sup>程度存在することがわかった。これは、以前の計算結果よりも観測に遠のく結果になってしまったが、今回は特別なモデルチューニングは行っておらず、モデル素過程を改良している途中経過と考えれば、今後より良い一致性が得られることが期待できる。



Fig. 1 Annual mean aerosol optical depth (AOD). (a) NICAM-Chem simulated AOD with 14-km horizontal resolution, (b) NICAM-Chem simulated AOD with 14-km horizontal resolution in Goto et al. (2020)<sup>6</sup>), (c) NICAM-Chem simulated AOD with 56-km horizontal resolution in Goto et al. (2020)<sup>6</sup>), and (d) TERRA/MODIS retrieved AOD.

# 4. まとめと今後の展望

バージョンアップし高度化した全球大気汚染物質輸送モデル NICAM-Chem を用いて、世界最高解像度レベルである全球 14km のエアロゾルシミュレーションを実施したところ、衛星観測結果と概ね整合的であった。今後はエアロゾルと雲の関連過程に注目し、雲微物理モジュールの更新等の関連過程のモデル高度化に取り組む。

- (1) Tomita H., and M. Satoh, 2004: Fluid Dyn. Res. 34, 357-400
- (2) Satoh M., T. Matsuno, H. Tomita, T. Miura, T. Nasuno, S. Iga, 2008 : J. Comput. Phys. 227, 3486–3514
- (3) Satoh M., H. Tomita, H. Yashiro, H. Miura, C. Kodama, et al., 2014: Prog. Earth Planet. Sci. 1, 18-49
- (4) Suzuki K., T. Nakajima, M. Satoh, H. Tomita, T. Takemura, T. Y. Nakajima, G. L. Stephens, 2008: Geophy. Res. Lett. 35, L19817
- (5) Goto, D., T. Nakajima, T. Dai, H. Yashiro, Y. Sato, K. Suzuki, et al., 2018: in: Land-Atmospheric Research Applications in South and Southeast Asia, edited by: Vadrevu, K., Ohara, T., and Justice, C., *Springer Remote Sensing/Photogrammetry, Springer*, Cham
- (6) Goto D., Y. Sato, H. Yashiro, K. Suzuki, E. Oikawa, R. Kudo, T. M. Nagao, T. Nakajima, 2020: Geosci. Model Dev., 13, 3731-3768
- (7) Sato Y., H. Miura, H. Yashiro, D. Goto, T. Takemura, H. Tomita, T. Nakajima, 2016: Sci. Rep., 6, 26561
- (8) Sato Y., D. Goto, T. Michibata, K. Suzuki, T. Takemura, H. Tomita, T. Nakajima, 2018: Nat. Comm., 9, 985
- (9) Tomita, H., 2008: J. Meteorol. Soc. Jpn., 86A, 121-142
- (10) Berry E. X., 1968: Proceedings first conference on weather modification, Albany, NY, 81-85

# 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(3)

Ocean model intercomparison of AORI and MRI (3)

坂本 圭、気象研, E-mail: ksakamot(at)mri-jma.go.jp 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 浦川 昇吾、気象研, E-mail: surakawa(at)mri-jma.go.jp 川上 雄真、気象研, E-mail: y-kawakami(at)mri-jma.go.jp 羽角、博康 東大・大気海洋研, E-mail: hasumi(at)aori.u-tokyo.ac.jp Kei Sakamoto, Meteorological Research Institute Hideyuki Nakano, Meteorological Research Institute Hiroyuki Tsujino, Meteorological Research Institute Shogo Urakawa, Meteorological Research Institute Yuma Kawakami, Meteorological Research Institute

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

# 要旨

大気海洋研究所が中心となり開発されている海洋大循環モデル「COCO」と、気象研究所で主に 開発されている「MRI.COM」の相互比較の基盤として、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。いわゆる OMIP プロトコル実験を最新 のソースコードで再実験した 2021 年度に引き続き、2022 年度は海氷モデルの高度化に注目し、 マルチモデル実験の実行と解析を行った。

# 1. はじめに

大気海洋研究所が中心となり開発されている海洋大循環モデル「COCO」と、気象研究所で主に開発されている「MRI.COM」の相互比較を、2020年度から海洋モデル相互比較プロジェクト日本版「OMIPj」と命名して行っている。2021年度には、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)を最新のソースコードで再実行し両モデルの結果を比較した。本報告では、その実験でモデル間の違いが大きかった海氷に注目し比較結果を紹介する。現在、両モデルとも海氷モデルの高度化が進んでいることを受け、なされた高度化によって極域の海氷再現性がどのように変化するかも報告する。

# 2. モデルと実験

用いた両モデルと実験仕様は 2021 年度共同研究報告書に詳述している。これらコントロール実験 (COCO-ctl, MRICOM-ctl)に加えて、海氷モデルを高度化した実験(COCO-dev, MRICOM-dev)も行った。 MRI.COM の新海氷モデルでは、海氷塩分と、海氷上のメルト・ポンド(氷・雪の融解による水たまり)の物理 量がモデル予測変数に新たに加えられた(Toyoda et al. 2023)。これにより、海氷アルベド、積雪から海氷への 変換、海氷内の熱伝導率等がより精緻にモデル化できる。COCO の新海氷モデルには、やはり海氷アルベド の精緻化を目的に、スノー・エイジング及びメルト・ポンドの効果が導入された。これらの開発については OMIPj の中で議論し相互の理解を深めている。

# 3. 結果

結果の一例として、2018 年 3 月の北極域における海氷厚さの分布を図 1 に示す。観測による推定では、西経 0-180°側で比較的厚く 3mに達する一方で、東経 0-180°側では 1-2m と薄い。この大まかな特徴は、COCO(図 1b)と MRI. COM(図 1d)の両方で表現されている。一方で、氷の厚い領域が、COCOでは東側まで広く張り出しているのに対し、MRI. COM では岸に近い領域に制限されているという違いもある。新しい海氷モデルを導入した結果では、基本的な分布特性は導入前と大きく変わらないものの、両者とも厚くなる傾向であるのが興味深い。いわゆるアイス・アルベドフィードバック効果が強化されているのかもしれない。

# 4. まとめと今後の展望

日本で開発されている主要な二つの海洋大循環モデルの開発者が互いの開発状況を共有し、最新の実験結果 を同一のツールで解析した。我々の知る限り、このような取り組みは日本では例がなく、モデル開発において これからの重要なステップとなりうる。本報告では海氷モデルの結果の一部を紹介しただけだが、今後、モデ ル高度化による効果を調査・比較することで、海氷モデルの調整や課題の抽出に寄与すると期待される。

# 参考文献

 Toyoda, T., K. Sakamoto, T. Toyota, H. Tsujino, L. S. Urakawa, Y. Kawakami, A. Yamagami, K. K. Komatsu, G. Yamanaka, T. Tanikawa, and H. Nakano, 2023: Improvements of sea ice thermodynamics with variable sea ice salinity and melt pond parameterizations in an OGCM (in preparation)



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

# 要旨

今須教授らは、GOSAT や GOSAT-2 の GOSAT シリーズによる温室効果ガスの分布の把握に努めている。一方、大橋は、Fiber Etalon Solar Carbon (FES-C)計測器を今須教授らにより南鳥島に、Optical Spectrum Analyzer(OSA)を我々が東京学芸大学付属高校 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3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

L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。

# 結果と考察

2014年9月から2021年2月まで、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1)。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。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。



<sup>●</sup>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:季節変動と年間の増加を考慮した関数

<sup>2014</sup> 年 9 月から 2021 年 2 月まで東京学芸大学附属高校で行った結果および TCCON のグループが公開している二酸化炭素平均

カラム量にも式(1)で Fitting した(表1)。さらに、地上での観測結果に対しても式(1)で Fitting した(表2)。2014~2016年での 東京やつくばの観測では1年間の増加傾向はそれぞれ1.07,1.88であった[4]が、2014~2021年の長期にわたる解析では2ppm以 上を示した。また、東京は社会活動により排出されるため、南鳥島、つくば、佐賀が3ppmに比べて大きい5.51ppmを示した。

$$CO_{2}Mixing\ Ratio = I_{ntercept} + T_{rend} \cdot t + Amp_{1} \cdot \cos\left(2\pi \frac{t-\phi_{1}}{365.25}\right) + Amp_{2} \cdot \cos\left(4\pi \frac{t-\phi_{2}}{365.25}\right)$$
(1)

Site	Intercept (ppm)	Trend (ppm/y)	Amp1 (ppm)	Amp <sub>2</sub> (ppm)	Max. Month	Min. Month	Ref.
東京	399.90	2.44	5.51	0.28	2	9	This Work
南鳥島	393.30	2.87	3.62	1.45	5	9-10	7
つくば	397.75	2.44	3.00	0.07	2	9	5
佐賀	398.75	2.28	3.08	0.28	2	9	5

# 表1 二酸化炭素平均カラム量(ppm)における Fitting 関数の係数

# 表2 地上計測結果(ppm)における Fitting 関数の係数

Site	Intercept (ppm)	Trend (ppm/y)	Amp1 (ppm)	Amp <sub>2</sub> (ppm)	Max. Month	Min. Month	Ref.		
Mauna Loa	397.68	2.51	3.02	0.95	5	9	6		
与那国島	400.28	2.58	4.49	-0.87	5	9	8		
南鳥島	397.68	2.51	3.93	0	5	9	8		

# 4. まとめと今後の展望

2014 年 9 月から 2021 年 2 月まで東京学芸大学附属高校で行った結果をまとめた。本解析に用いた HITRAN データベースが 2016 から 2020 に更新されたため、今後は、HITRAN2020 によりデータ解析を再度行い、最新の結果を示す予定である。

# 参考文献

[1] https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets/M2I3NPASM\_5.12.4/summary?keywords=M2I3NPASM

- [2] https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php
- [3] M. Inoue, et. al., "Validation of XCO2 derived from SWIR spectra of GOSAT TANSO-FTS with aircraft measurement data", Atmos. Chem. Phys., 13, pp.9771–9788 (2013).
- [4] Xiu-Chun Qin, et. al. "Observation of column -averaged molar mixing ratios of carbon dioxide in Tokyo", Atmospheric Environment X, 2, pp. 1-8, (2019).
- [5] https://tccondata.org/
- [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
- [8] https://ds.data.jma.go.jp/ghg/kanshi/obs/co2\_monfhave\_ryo.html

# 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, 黒木 志洸, 林田 和大, 須藤 康平 気象庁情報基盤部数値予報課, E-mail: globalnwp(at)met.kishou.go.jp Masashi Ujiie, Hitoshi Yonehara, Takafumi Kanehama, Teppei Kinami, Kei Saitou, Yukihiro Kuroki,

Kazuhiro Hayashida, Kouhei Sutou

Numerical Prediction Division,

Information Infrastructure Department, Japan Meteorological Agency

# 要旨

気象庁全球モデルの水平高解像度化による予測精度向上の効果をより引き出すため、標高オリジ ナルデータセットの更新と物理過程の改良(非地形性重力波過程)を行った。標高オリジナルデ ータセットの更新からは 500hPa 高度等の循環場の改善を、非地形性重力波過程の改良からは成 層圏の誤差軽減やデータ同化サイクルを通じた対流圏の予測精度向上を確認した。これらの改良 と昨年度の成果である水平高解像度化とそれに合わせた力学過程・物理過程の改良をすべて組み 合わせることで、台風に伴う降水等、夏季アジアモンスーン期における日本の降水予測精度が向 上することを確認した。

# 1. はじめに

気象庁は、天気予報や台風予報の作成支援を目的に現業運用している全球モデル(GSM)の水平解像度の約20km (TL959)から約13km (TQ959)への更新を2023年3月に実施した。全球モデルの水平高解像度化は、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。そのため、高分解能化の効果を引き出すための力学過程と物理過程の開発を継続して実施しており、昨年度(2021年度)は力学過程の改良や地形性抵抗過程、放射過程の改良について実施し、その成果を報告した。今年度は、全球モデルの水平高解像度化に付随した開発として、標高オリジナルデータセットの更新、非地形性重力波過程の改良に向けた開発を重点的に実施した。本開発では、標高オリジナルデータセットの高精度化に伴う地形性の現象の表現向上、物理過程改良によるモデルの系統誤差減少やデータ同化サイクルを通じた予測精度向上を狙う。

# 2. 改良の概要

# 2. 1 標高オリジナルデータセットの更新

GSM では、地形の効果の大気現象への影響を力学過程、物理過程それぞれで考慮している。2022 年 3 月の更新前の GSM では、 モデルに入力する地形作成のための標高オリジナルデータセットとして GTOP030 を用いていた。GTOP030 は、データが作成され た 1990 年代後半時点では高精度・高解像度(水平解像度約 1km)であったが、現在ではその品質に関する問題点も指摘されるよ うになった。また、GTOP030 が作成された以降も、より高精度・高解像度の標高データが多数作成されている。これらを受け、 GSM で新しく利用する標高オリジナルデータセットとして、より高精度・高解像度の MERIT DEM (Yamazaki et al. 2017,水平 解像度約 100m)と RAMP2 (60S 以南,水平解像度約 200m)を採用した。

# 2.2 非地形性重力波抵抗の改良

GSMでは、力学過程が解像度できないスケール(サブグリッドスケール)の重力波による運動量輸送のうち、積雲対流活動や前 線及びジェット近傍などで励起される地形に起因しない重力波による効果は、非地形性重力波過程として Scinocca (2003)に基 づくパラメタリゼーションで表現している。Scinocca (2003)における、重力波射出高度での運動量フラックス(射出フラックス) の定式化は、中層大気の気温や風の平均場、熱帯下部成層圏における準2年周期振動(QBO: Quasi-biennial Oscillation)の表 現に大きな影響を与え、データ同化サイクルを通じた短期予測の精度にも影響を及ぼす。本改良では、射出フラックスの緯度依 存性の精緻化とそれに合わせた安定時の鉛直拡散係数の調整を行った。具体的には、射出フラックスの大きさを全体的に小さく するとともに、高緯度で特に射出フラックスを小さくするような修正を行った。また、非地形性重力波過程の精緻化と合わせて 成層安定時における局所渦スキームによる拡散係数を成層圏ではより小さくなるよう調整を行った。

# 3. 改良のインパクト

Fig. 1は、南米のベネズエラ付近における標高の表現の GTP0030 と MERIT DEM による違いを示している。GTOP030 ではベネズ エラに標高 2000m を超える山岳の広がりを表現している。一方、これらは現実よりも遥かに標高が高い偽の山岳であることが Iwao et al. (2008)などで指摘されており、GSM のモデル標高にもこの不適切な標高の表現が反映されてしまっている。 Fig. 1(b)で示す通り、MERIT DEM では GTOP030 に見られるベネズエラ付近の偽の山岳は見られず、標高がより適切に表現される。 Fig.2は、2020年1月の北半球における500 hPa 高度の予測の二乗平均平方根誤差(RMSE) について、 標高オリジナルデー タセット更新前後の差を示したものである。2 日予測から5 日予測まで、更新後は、更新前に対する RMSE の減少が見られる。 日々の誤差の分布で見ると、標高オリジナルデータの更新によるバイアスの増減や誤差のパターンに大きな変化はない(図略) が、誤差が少しずつ小さくなった結果、RMSE の減少につながっている。非地形性重力波過程の改良は、データ同化サイクルにお ける、熱帯における風の第一推定値と観測値との整合性向上に寄与する。Fig.3 は、熱帯域におけるラジオゾンデ東西風の第一 推定値(GSM による6時間予測値)との観測値の標準偏差の変化率を示している。対流圏上層から下部成層圏にあたる100 hPa から50 hPa 付近を中心に、非地形性重力波過程改良による標準偏差の大幅な減少が見られる。このことが、初期値の改善を通 じて、熱帯における対流圏から成層圏までの予測場の精度向上に寄与した(図略)。

2021 年度と今年度の共同研究で実施した改良を全て組み合わせた場合の、2021 年台風第 14 号に伴う降水予測へのインパクト を Fig. 4 に示す。この事例では、水平高解像度化と物理過程改良の効果により、上層のジェットの表現が改善し、台風が実際よ りも北側に進む誤差が減少した。さらに、台風の進路予測の改善により、台風に伴う山陰地方の降水分布の予測にも改善が見ら れた。

# 4. まとめと今後の展望

標高オリジナルデータセットを MERIT DEM と RAMP2 の組み合わせに更新することにより GTOP030 で見られた問題点が解決し、 GSM の予測精度も向上すること、非地形性重力波過程の改良により成層圏の表現が向上し、データ同化サイクルを通じて対流圏 の予測精度向上にも寄与することを確認した。これらの改良の取り込みと、2021 年度成果報告で示した改良(水平高解像度化、 地形性抵抗、放射過程の改良等)を組み合わせることで、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。これら GSM の改良は 2023 年 3 月 14 日から気象庁の全球数値予報システムに導入された。今後は、改良された GSM をベースに、物理過程(雲、積雲、地形に関する過程等)の更なる改善やデータ同化手法の改良を継続して進めていく。



Fig. 1 南米ベネズエラ付近 (1S-11N, 71W - 56W) における標高[m]の DEM による違い。(a) GTOPO30, (b)MERIT DEM。GTOPO30, MERIT DEM ともに1km 格子で表示。



Fig. 2 2020 年 1 月における、北半球 (20N-90N)での 500 hPa 高度場の対解析 RMSE [m]について、標高オリジナルデー タセット変更前後の差(縦軸)。横軸は 予測時間[day]。エラーバーは 95%信頼 区間を表す。



Fig. 3 2020 年1月の熱帯域(20N-20S) 平均のラジオゾンデ東西風観 測値と第一推定値の差の標準偏差 の変化率[%]。負の値は非地形性重 力波過程改良後の方が観測値と第 一推定値の差が小さいことを表す。



Fig. 4 2021 年 9 月 17 日 21 時を対象とした 78 時間予測における 3 時間降水量[mm] (カラー) と海面 更正気圧 [hPa] (等値線) (左) 改良前、(中) 改良後。(右) 対応する解析雨量。

- (1) Iwao, K., N. Yamamoto, D. Patton, S. Kodama, R. Nakamura, M. Matsuoka, S. Tsuchida, S. Sekiguchi, and E. Tsukuda, 2008: Validating global digital elevation models with degree confluence project information and ASTER-DEM on geo grid. Int. Arch. Photogramm, Remote Sens and Spatial Info. Sci, 37, 1847-1852.
- (2) Scinocca, J. F., 2003: An accurate spectral nonorographic gravity wave drag parameterization for general circulation models. J. Atmos. Sci., 60, 667-682.
- (3) Yamazaki, D., D. Ikeshima, R. Tawatari, T. Yamaguchi, F. O'Loughlin, J. C. Neal, C. C. Sampson, S. Kanae, and P. D. Bates, 2017: A high accuracy map of global terrain elevations. Geophys. Res. Lett., 44, 5844-5853.

# 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対象に、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、理想的な条件下の数値実験により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波数展開して、 各波数成分のエネルギーの時間発展に着目した。低波数のエネルギーの時間発展の様子から、水平移流は対 流の自己組織化を抑制し、鉛直移流は対流の自己組織化の促進をすることが分かった。短波放射と長波放射 は、低波数の成分のエネルギーを増加させる働きを持つが、ある程度エネルギーが大きくなった後にそうし た強化する様子が見られることから、対流の自己組織化を促進するというよりは維持する働きであることが 分かった。また鉛直移流に関して、鉛直流を直交函数で展開して各モードの役割の違いについて調べた。対 流圏の殆どの層で正となる第1モードは、水蒸気量を減少させる効果を持ち対流の自己組織化を抑制する一 方で、第2モード以上の高波数モードでは組織化を促進することが分かった。特に第2モードは、組織化し た降水システムの高度 5km 付近での下降流に伴う下方への水蒸気輸送に重要な役割を果たしていた。また第 3モードや第4モードは、高度 1km 付近の大気境界層から融解層にかけての上方への水蒸気輸送を通じて、 対流の組織化を促進していた。更に高次のモードに関しては、定量的には無視できる程度の寄与であった。 これらの水蒸気の鉛直輸送は、雨粒や霰というよりは氷雲の落下速度に関して相対的に高い感度を示した。

# 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。また雲一降水一放射過程 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、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、熱帯海洋上を想定した対流の自己組織化に関 する数値実験を行っている。モデルの水平解像度は、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 一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。本研究では数値実験の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

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

に基づき組織化のメカニズムを議論する。ここで、H.ADは水平移流、V.ADVは鉛直移流、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 $\partial h_{(k,l)}/\partial t \times h^*_{(k,l)} = 1/2 \times \operatorname{Re}(\partial h^2_{(k,l)}/\partial t)$ 

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

 $\operatorname{Re}(H.ADV_{(k,l)} \times h^*_{(k,l)}) + \operatorname{Re}(V.ADV_{(k,l)} \times h^*_{(k,l)}) + \operatorname{Re}(Qr_{(k,l)} \times h^*_{(k,l)}) + \operatorname{Re}(SHF_{(k,l)} \times h^*_{(k,l)})$ 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、鉛直積算した MSE (CMSE) の各波数のエネルギーの時間変化を表したものである。10 日目以降で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。特に,20日目付近で波数1~2以下の領域でエネルギーが大きくなって いる。これは、20日目付近に対流がモデル領域内でおおよそ1つの塊に組織化したことに対応している。更に、50日目付近で は波数1以下でエネルギーが増加しており、1つの塊となった降水システムが東西に延びた線状の構造となったことに対応して いる。この低波数でのエネルギーが増加した段階で、短波と長波の放射過程による強化がみられており、放射過程は組織化を促 すというよりは、組織化を維持する働きがあることが分かる(図2と3)。また地表面からの熱輸送は、数値実験の最終段階に おいて組織化を強化する傾向を示しており、これも組織化を維持する働きとなっている(図4)。水平移流に関しては常に負の 強制となっており、逆に組織化を阻害する方向に働いている(図5)。一方で、鉛直移流は一貫して組織化を促進する働きを持 っている(図6)。この鉛直移流に関して、先行研究である Yanase et al. (2022)では境界層付近の水蒸気輸送の重要性を指摘し ている。このことから、本研究においても EOF 解析から鉛直流を鉛直方向に分解して、各モード別の鉛直移流の役割について調 べた。対流圏の殆どの層で正となる第1モードは、水蒸気量を減少させる効果を持ち対流の自己組織化を抑制する一方で、第2 モード以上の高波数モードでは組織化を促進することが分かった(図7,8,9)。特に第2モードは、組織化した降水システ ムの高度 5km 付近での下降流に伴う下方への水蒸気輸送に重要な役割を果たしていた(図略)。また第3モードや第4モードは, 高度1km付近の大気境界層から融解層にかけての上方への水蒸気輸送を通じて、対流の組織化を促進していた。更に高次のモー ドに関しては、定量的には無視できる程度の寄与であった。この鉛直輸送に関して、雲微物理過程の影響を調べるために、凝結 物の落下速度を人為的に変化させた。第1,第2モードに関しては大きな違いがなかったものの,落下速度は第3,第4モード を通じて組織化に影響を及ぼすことが分かった。特に雨粒や霰というより氷雲の落下速度に関して相対的に高い感度を示した。



Fig. 1 : Time variations of the amplitude of the column-integrated moist static energy (CMSE) with each wavenumber.



Fig. 4: Same as Fig.2 except for the surface heat fluxes.



Fig.7: Same as Fig.6 except for the vertical advection associated with the 1<sup>st</sup> mode.

# 4. まとめと今後の展望

本研究では、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から、水平移流項は自己組織化を阻害する 働き、鉛直移流は組織化を促進する働き、地表面からの熱フラックスや放射過程は組織化を維持する働きがあることが分かった。 これらの水蒸気の鉛直輸送は、雨粒や霰というよりは氷雲の落下速度のパラメタリゼーションに相対的に高い感度を示した。



CSD (fmse-

Fig. 2 : Time variations of the amplitude of the short-wave radiative heating projected onto the CMSE.



Fig.5: Same as Fig.2 except for the horizontal advection.



Fig.8: Same as Fig.6 except for the vertical advection associated with the 2<sup>nd</sup> mode.



Fig. 3 : Same as Fig.2 except for the long-wave radiative heating.



Fig. 6: Same as Fig.2 except for the vertical advection.



Fig.9: Same as Fig.6 except for the vertical advection associated with the 3<sup>rd</sup> mode.

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

# 要旨

沿岸から深海に向かって延びる峡谷状の海底地形(海底峡谷)は、内部潮汐波のエネルギーが集中 することで乱流混合のホットスポットを形成すると考えられている。特に、日周潮汐の周波数が慣性 周波数以下になる緯度30°より極側の海底峡谷では、日周期の沿岸捕捉波(Coastal Trapped Wave, CTW) が強い乱流混合を引き起こす可能性が指摘されてきたが、その詳細な物理過程は不明なままである。 本研究では、海底峡谷における日周期 CTW の励起・伝播・散逸過程を明らかにするため、駿河湾を 対象とした高解像度の非静水圧3次元数値実験を実施した。数値実験の結果、伊豆海嶺上の日周潮流 によって励起された CTW が駿河湾の沿岸に沿って反時計回りに伝播する様子が明瞭に再現された。さ らに、駿河湾中央部の海底峡谷内では、日周期 CTW によって海底近傍で強化された流れが粗い海底地 形と相互作用することで、上向きに伝播する内部風下波が発生し、海底から上方に広がる乱流混合の ホットスポットが形成されていた。これらの結果は、海底峡谷の乱流混合過程を明らかにする上で日 周期 CTW の存在が極めて重要な要素であることを示している。

# 1. はじめに

海洋中の鉛直乱流混合は、海洋表層と深層との間の熱や物質の交換を強く規定し、深層循環の強さやパターンをもコントロールする重要な物理過程の一つである。このため、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」の候補の一つとして、内部潮汐波のエネルギーが集中しやすい、沿岸から深海に向かって 延びる峡谷状の海底地形(海底峡谷)が挙げられる。特に、日周潮汐の周波数が慣性周波数以下になる緯度 30°より極側 の海底峡谷では、日周期の内部潮汐は自由に伝播することができず、沿岸捕捉波(Coastal Trapped Wave, CTW)として海底 地形に捕捉されることで、極めて大振幅になる。クリル海峡やアリューシャン海嶺など、日周潮が卓越する亜寒帯の海峡 部では、日周期の CTW が砕波することで強い乱流混合が生じることが知られている(Tanaka et al. 2010 など)。しかしなが ら、よりエネルギーが集中しやすい海底峡谷における日周期 CTW の発生と散逸の詳細な物理過程は、これまでほとんど 調べられてこなかった。本研究では、海底峡谷における日周期 CTW に伴う乱流混合過程を明らかにするため、駿河湾を 対象とした高解像度の非静水圧 3 次元数値実験を実施した。

# 2. 数值実験

数値実験には非静水圧の海洋大循環モデル MITgcm を用いた。 駿河湾およびその中央部から沖に向かって延びる海底峡谷(駿 河トラフ)全体を含む領域を対象とし(図1)、水平解像度1/240° (~450 m)、鉛直94層(上層100 m で解像度5 m)の超高解像度で 計算を行った。この計算領域における平均的な密度成層を背景 場として仮定し、日周K1潮成分の順圧潮汐流を開境界から入射 させることでモデルを駆動した。計算は7日間行い、最後の1 日のデータを以下の解析で使用した。

#### 3.結果と考察

図2に、水深500mにおける日周K1潮成分の渦位の時系列を 示す。図中の矢印で示されているように、正・負の符号を持つ 渦位擾乱のペアが、伊豆半島の西側斜面に沿って駿河湾に入射 し、湾内を反時計回りに伝播している様子が見て取れる。この ような伝播特性はCTWを特徴づけるものである。さらに、図1



図1:本研究の計算対象領域。

の SA セクションにおける流速の断面構造を見てみる と、日周潮の流速変動は大陸棚および大陸斜面上に強 く捕捉されていることがわかる(図3上段)。この鉛直 断面内における CTW のモード構造を、二次元固有値 問題を数値的に解くことで求め、その重ね合せとして 得られた流速構造を図3(下段)に示す。数値実験で 再現された流速構造(図3上段)は、低次モードの CTW の重ね合せによって極めてよく説明可能であることが わかる。

次に、日周潮 CTW の散逸過程を調べた。図 4a は SA セクションにおける流速構造の拡大図である。日周期 CTW によって海底近傍で強化された水平流速が、峡谷 内の波長~4 km の小スケールの海底地形と相互作用す ることで、内部風下波状の擾乱が励起されていること がわかる。励起された内部風下波は上方に伝播しなが ら砕波することで、海底地形上に広がる「乱流混合ホ ットスポット」を形成している(図 4b)。このような 内部風下波の励起・散逸は、半日周期の順圧潮流に対 して Hibiya et al. (2017)が指摘したのと同じ現象である。 以上のように、駿河湾の海底峡谷内に形成される「乱 流混合ホットスポット」にとって日周期 CTW は極め て重要な要素である。



図 2:水深 500 m における K1 潮成分の渦位の時系列。計算開始から (a) 150, (b) 154, (c) 158, (d) 162 時間後。

# 4. まとめと今後の展望

本研究では、駿河湾を対象とした高解像度の非静水圧数値実験によって、海底峡谷における日周期 CTW とそれに伴う 「乱流ホットスポット」の存在を明らかにした。本研究で対象にしたような海底峡谷は世界中の海洋に数多く存在する。 今後、このような日周期 CTW に伴う乱流混合強度のグローバル分布を明らかにし、海洋大循環モデルへと組み込んでい くことが、その高精度化に向けて不可欠である。



- Hibiya, T., T. Ijichi, and R. Robertson, 2017: The impacts of ocean bottom roughness and tidal flow amplitude on abyssal mixing, J. Geophys. Res., 122, 5645–5651, https://doi.org/10.1002/2016JC012564.
- (2) Tanaka, Y, T. Hibiya, Y. Niwa, and N. Iwamae 2010: Numerical study of K1 internal tides in the Kuril straits, *J. Geophys. Res.*, **115**, C09016, https://doi.org/10.1029/2009JC005903.

# トッテン棚氷のグリーン関数法を用いたデータ同化、生態系モデルとの結合

# Optimization of East Antarctic ocean simulation with a focus on the Totten Ice Shelf using the Green function Approach and coupling with the Biogeochemistry model.

中山 佳洋,北海道大学・低温科学研究所, E-mail: Yoshihiro.Nakayama(at)lowtem.hokudai.ac.jp 瓢子 俊太郎,北海道大学環境科学院、E-mail: shuntaro1022(at)ees.hokudai.ac.jp 安井 翼,北海道大学・低温科学研究所, E-mail: yasui.tsubasa.b2(at)elms.hokudai.ac.jp Yoshihiro Nakayama, Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University Hyogo Shuntaro, School of Environmental Science, Hokkaido University Tsubasa Yasui, Institute of Low Temperature 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。海洋による影響で棚氷が融 解し、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。また、観測データとの詳細な比較を行った。感度実験の結果から、棚氷融解量をコントロールするとされるトッテン棚氷 沖の海洋の温度躍層の深さは、大気一海氷一海洋間の風応力、乱流熱フラックスに関するパラメータに強く依存することが確か められた。さらに、東南極トッテン棚氷沖の過去2万年間の海洋の状態を推定するために、過去の状態を再現した海洋モデル (MIROC)から境界条件を求め、7000年、11500年、13000年、20000年を想定した海洋モデル実験を実施した。

# 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。本研究で は、海洋数値モデル MITgcm((Massachusetts Institute of Technology General Circulation Model)を用いて、 東南極に位置するトッテン棚氷への温かい水塊(mCDW) の流入、トッテン棚氷からの氷河融解水の流出など表 に着目したモデル開発を行なってきた(Nakayama et al., 2021)。本共同利用研究では、(1)これまで開発さ れてきた東南極域海洋モデルにグリーン関数法を適用 したデータ同化の実施、(2)過去2万年間の海洋の変化 を調べるための新たなダウンスケール実験の実施、(3) 生態系モデルとの結合を新たな方向性として研究を実 施した。

# 2. 問題設定·方法

モデルの解像度は、水平方向約4km、 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。

さらに、古環境ダウンスケーリングシミュレーショ ンの開発のために、7000年、11500年、13000年、20000 年を想定した大気、海洋の境界条件を作成した。海洋 の境界条件は Obase et al., 2021の過去2万年間の計



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.

算結果をもとに作成し、大気の境界条件は Obase et al., 2021 らによって MIROC を用いて計算された過去と現在の大気の状態の 差を計算し、その差を Era-interim に足し合わせることで、計算を実施した。

#### 3. 結果と考察

データ同化の準備段階として、多数の感度実験を実施した。 棚氷融解量をコントロールするとされるトッテン棚氷沖の海 洋の温度躍層の深さは大気一海氷一海洋間の風応力、乱流熱 フラックスに関するパラメータがトッテン棚氷沖の海洋の再 現性を向上させる上で重要であることが示された。ただし、 モデルパラメータの最適化のみでは観測で得られている大陸 棚上の水温躍層の深さを完全には再現することはできなかっ たため、トッテン氷河周辺は氷山が多く座標する海域である と言う点に注目し、座礁氷山の融解水を組み込んだモデル開 発を現在進めている。

現在(Present)、7000 年前、11500 年前(11.5ka)、13000 年 前、20000 年前(20ka)の海洋の状態を再現することを目的と した実験をおこなった(Figure 3)。現在、11500 年前、20000 年前を比較すると、東南極域東部の外洋域の水温が低下し、 トッテン棚氷に向かって流入する高温の水塊の水温が急激に 低下することが示された。

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。もともと は、本共同利用研究のもとで実施予定の課題であってが、 NASA ジェット推進研究所との共同研究として進めることと なり、本共同利用での計算機利用はなかった。

# 4. まとめと今後の展望

開発された東南極モデル(Nakayama et al., 2021)をも とにモデル開発を継続した。まず、海洋の再現性をさらに向 上させるために、グリーン関数法と言われるデータ同化手法 の適用のための準備を実施した。大気一海氷一海洋間の風応 力、乱流熱フラックスに関するパラメータがトッテン棚氷沖 の海洋の再現性を向上させる上で重要であることが示され た。また、この海域は氷山が多く座礁する海域であり、座礁 氷山の融解水をモデルに組み込むことでさらに再現性が改 善されることが示唆された。次に、過去2万年間の東南極域 の海洋、トッテン棚氷への高温の水塊流入を調べるために、 古環境ダウンスケーリングシミュレーションを実施した。再 現された海洋場は、南極沿岸流の影響を強く受けることが示 唆された。次年度は、これらの二つの課題を進め、論文投稿 を予定している。

- 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.
- (2) Obase, T., Abe-Ouchi, A., and Saito. F., (2021). Abrupt climate changes in the last two deglaciations simulated with different Northern ice sheet discharge and insolation. Scientific reports 11.1 (2021): 1-11.



Figure 2: Sensitivity experiment for Air-Ice drag coefficient. (a)CTL (b)Air-Ice Drag coefficients multiplied by 0.3.



# 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 Development of General Ocean Circulation Model for Climate Prediction

小室芳樹,海洋研究開発機構, E-mail: komuro(at)jamstec.go.jp 鈴木立郎,海洋研究開発機構, E-mail: tsuzuki(at)jamstec.go.jp 草原和弥,海洋研究開発機構, E-mail: kazuya.kusahara(at)jamstec.go.jp 渡辺路生,海洋研究開発機構, E-mail: michiow(at)jamstec.go.jp 黑木聖夫,海洋研究開発機構, E-mail: m\_kurogi(at)jamstec.go.jp Yoshiki Komuro, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC) Tatsuo Suzuki, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC) Kazuya Kusahara, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC) Michio Watanabe, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC) Masao Kurogi, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC)

# 要旨

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

今年度は、沿岸から外洋にわたる物質輸送やスケール間相互作用に関する知見獲得に向けて、日本近海 を水平約500m格子で覆う全球多重ネストモデルを改良し数値実験を行なった。232m以深でポテンシャル水 温・塩分を再解析データへ緩和するように設定することで、黒潮の流路等を現実的に表現しつつ、表層で の微細スケール現象を表現することができた。また、特に高解像度設定でコストが高くなる出力・後処理 の効率化のために、モデル出力にNetCDF4を用いた並列出力を導入した。

# 1. はじめに

日本沿岸全域を対象にした海洋モデルの水平解像度は、最高で2km 程度(例えば、Sakamoto et al., 2019)である。水平2km の解像度は日本沿岸の比較的大きな湾等を表現できる一方で、より小規模な湾や島、瀬戸内海等の地形の表現性については十分 ではない。地形の表現性は、潮汐との総合作用により形成される潮汐残差流や、島等の後方に生成される渦等の現象の表現性に 関連しているため、沿岸から外洋にわたる物質輸送やスケール間相互作用を考える上では、可能な限り高解像度設定の海洋モデ ルを用いた数値実験が必要である。本課題研究では、利用する計算機資源で運用が可能な、日本近海を水平約 500m 格子で覆う 全球多重ネストモデルを改良し数値実験を行なった。

# 2. 問題設定·方法

本研究では、東京大学大気海洋研究所と海洋研究開発機構 (JAMSTEC)で共同開発・運用されている海氷海洋結合モデル COCO (Hasumi, 2006)を基にした双方向ネストモデル (Kurogi et al., 2013)を用いた。モデルはLO-L3の4つ のモデルから構成される(図1)。L0は三極座標系に基づい た全球モデルであり、北緯 63°以南の緯度経度座標系領域 の水平格子幅は1/4度×1/4cos  $\phi$  度( $\phi$ は緯度)である。L1、 L2、L3 モデルの水平座標は緯度経度座標系に基づき、水平 解像度はそれぞれ、1/12度×1/12cos  $\phi$  度、1/60 度×1/60cos  $\phi$  度、1/180 度×1/180cos  $\phi$  度である。

海面境界条件として JRA55-do (Tsujino et al., 2018)を 用いてモデルを次の手順で駆動した。

- (1) L0-L1 モデルを 2000 年 1 月 1 日から 2012 年 12 月 31 日 まで積分
- (2) L0-L2 モデルを 2012 年 12 月 31 日から 2013 年 1 月 1 日 まで積分(L2の初期値は(1)の結果を補間)
- (3) L0-L3 モデルを 2013 年 1 月 1 日から 2013 年 12 月 1 日 まで積分 (L3 の初期値は(2)の結果を補間)

また、上記積分では、232m 以深のポテンシャル水温と塩分 を再解析データ FORA-WNP30 (Usui et al., 2017) に緩和し、 (3)の積分のみ起潮力ポテンシャルを与えた。



モデル出力に NetCDF4 を用いた並列出力を導入した。

# 3. 結果と考察

図2は再解析データFORA-WNP30 (Usui et al., 2017) とL3モデ ルの海面水温を比較したものである。232m 以深のポテンシャル水 温と塩分を上記再解析データに緩和したため、L3 モデルで表現さ れる大規模な黒潮の流路等の構造は、上記再解析データに近くなっ ている。

L3 モデルは水平解像度が約 500m であり、直径 2km 程度より大き い渦を表現可能である。このモデルでは島や岬の後方に微細なスケ ールの渦が生じる様子が表現されており、そのシグナルは海面水温 にも現れている(図 2c)。島の後方の渦については、人工衛星に基 づく観測でも存在が確認されている(例えば、Hasegawa, 2019)。

上記の渦等の微細スケール現象は、緩和を行った部分では十分に 表現することができない。今年度の研究では、232m 以深のみ再解 析データに緩和することで、沿岸に影響の大きい黒潮の流路等を現 実に近い状態に表現しつつ、表層の微細スケールの現象を表現する ことができた。

今年度新たにNetCDF4を用いた並列出力をモデルに導入したこと で、効率的にモデルを運用できるようになった。これまでは、MPI-IO で出力されたバイナリデータを非並列のプログラムを用いて NetCDF 形式に変換し、データをサーバに転送後消去してから次の 計算を行なっていたが、モデル計算にかかる時間の数倍の時間がこ れらの処理にかかっていた。NetCDF4の並列出力を用いることで、 出力データサイズをこれまでの 1/3 程度に抑えることができ、デ ータ転送完了を待つことなく次の計算に進むことができるように なった。

# 4. まとめと今後の展望

日本近海を水平約 500m 格子で覆う全球多重ネストモデルを用い て1年程度の計算を行なった。232m 以深でポテンシャル水温・塩 分を再解析データへ緩和するように設定することで、黒潮の流路等 を現実的に表現しつつ、表層での微細スケール現象を表現すること ができた。また、特に高解像度設定でコストが高くなる出力・後処 理の効率化のために、NetCDF4を用いた並列出力を導入した。

モデルの出力データはサーバに転送して研究者間で共有する予定 であるが、結果の解析を進めることで、沿岸から外洋にわたる物質



138.0 138.5 139.0 139.5 140.0 140.5 141.0 図 2: (a)再解析データ FORA-WNP (Usui et al., 2017) の海面水温 (2013 年 3 月 23 日、1 日平均値)、(b)L3 モデルの海面水温 (2013 年 3 月 23 日 12:00-13:00)。 (c) (b) の白枠内の拡大図。

輸送やスケール間相互作用に関する理解が進むことが期待できる。今年度の計算では、低解像度(0.25 度)の河川データを用いたが、今後高解像度河川データを導入し、沿岸の塩分分布の表現性の向上に取り組む予定である。また、より長期の積分でモデルが安定に動くように地形やパラメータの修正を検討する予定である。

- Hasegawa, D., 2019: Island Mass Effect, in Kuroshio Current: Physical, Biogeochemical, and Ecosystem Dynamics, edited by T. Nagai, H. Saito, K. Suzuki, and M. Takahashi, pp.163-174, American Geophysical Union and John Wiley and Sons, Inc.
- (2) Hasumi, H., 2006: CCSR Ocean Component Model (COCO) Version 4.0. CCSR Report, 25, Cent. for Clim. Sys. Res., Univ. of Tokyo, 103 pp.
- (3) Kurogi, M., H. Hasumi, and Y. Tanaka, 2013: Effects of stretching on maintaining the Kuroshio meander. J. Geophys. Res., 118, 1182-1194.
- (4) Sakamoto, K. et al., 2019: Development of a 2-km resolution ocean model covering the coastal seas around Japan for operational application. Ocean Dyn., 69, 1181-1202.
- (5) Tsujino, H. et al., 2018: JRA-55 based surface dataset for driving ocean-sea-ice models (JRA55-do). Ocean Modell., 130, 79-139.
- (6) Usui, N. et al., 2017: Four-dimensional variational ocean reanalysis: a 30-year high-resolution dataset in the western North Pacific (FORA-WNP30). J. Oceanogr., 73, 205-233.

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

# Abstract:

Using a 500-m resolution model, we investigated the downslope flow and transport of Dense Shelf Water (DSW) from the shelf off Cape Darnley Polynya (CDP, East Antarctica) to the oceanic bottom through the Wild Canyon and its network of sub-canyons. The high-resolution of the model and high-quality of bathymetric data in the Wild Canyon allowed us to highlight how the flow of DSW with heterogeneous properties occurs first through narrow sub-canyons, then merges successively into larger sub-canyons as it goes down the continental slope. Finally, the dense water flows within a single channel towards the bottom of the continental slope, its hydrographic properties having been homogenized into Cape Darnley Bottom Water (CDBW). Such features can be compared to those of the flow of a network of tributaries into a large river.

# 1. Introduction

In several locations in the Southern Ocean, cold and salty DSW is formed in winter due to strong atmospheric cooling and sea ice production. The production of DSW and subsequent downslope flow from the shelf to the offshore is crucial because DSW contributes greatly to the formation of Antarctic Bottom Water (AABW) and thus plays a role in the global ocean overturning circulation. Understanding the processes through which DSW flows down the continental slope and transforms into AABW is especially important since global warming may affect the production of sea ice and DSW. Due to the episodic nature of DSW downslope flow and the difficulty in obtaining a sufficiently high number of observations in polar regions, numerical model is particularly helpful to study this topic. Because the downslope flow of DSW occurs through canyons which may have width as narrow as 2-km, a high-resolution model is needed. Here, we use a high-resolution model and bathymetric data in the CDP region to estimate the volume transport of DSW through several locations across and along the Wild Canyon and its sub-canyons network. We also follow the change in properties of DSW as it goes down the slope and becomes CDBW.

# 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 2019. We analyzed the model output in current velocities, temperature, and salinity throughout the year.

# 3. Results

The pathways of DSW were identified from the yearly-averaged bottom-layer current and the volume transport was estimated along several locations throughout the various pathways. The DSW pathways correspond to a network of sub-canyons within the Wild Canyon region (yellow lines in Fig. 1). About two dozen narrow pathways/sub-canyons exist near the top of the continental slope. These narrow sub-canyons merge as the depth increase until only one major canyon exists at depths > 3000 m, with a yearly-averaged bottom transport of 0.71 Sv. Both downslope (red shades in Fig. 1) and upslope flow (blue shades in Fig. 1) exist in some of the sub-canyons, respectively on the canyons' western flank and eastern flank, consistent with the canyon exchange mechanism first delineated by Morrison et al. (2020).

Time series of the bottom-layer water density at the top-, mid- and bottom-slope (Fig. 2) reveal how DSW of various densities at the top of the slope homogenize to form CDBW with a nearly time-invariant density at the bottom of the slope.



Fig. 1. Volume transport through the Wild Canyon for year 2019. Each yellow line represents a canyon or sub-canyon, and downslope and upslope transport through each of the canyons are indicated by the black and grey numbers, respectively. Thick and thin black lines denoting the isobaths deeper than 500 m. every 500 m. and 100 m. respectively.



Fig. 2 Time series of neutral density at the upper (a), mid- (b), and bottom-slope (c). Density in separate pathways are represented by the colored lines.

# 4. Conclusions and future works

Our high-resolution model allowed us to document in unprecedented detail the downslope pathways of DSW through a network of narrow canyons, and subsequent formation of CDBW. The main focus of future works will be the comparison of modelled time series of hydrographic properties and current with those from mooring data deployed within the canyon in 2019.

# 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

# エルニーニョ・南方振動現象の形成機構と鉛直乱流混合が果たす役割 Generation mechanisms of the El Niño/Southern Oscillation and the role of vertical mixing

東塚 知己, 東大院理, E-mail: tozuka(at)eps.s.u-tokyo.ac.jp 村田 壱学, 東大院理, E-mail: KazuMurata(at)eps.s.u-tokyo.ac.jp 中村 航也, 東大院理, E-mail: nakamura-kouya624(at)eps.s.u-tokyo.ac.jp Tomoki Tozuka, Graduate School of Science, The University of Tokyo Kazumichi Murata, Graduate School of Science, The University of Tokyo Kouya Nakamura, Graduate School of Science, The University of Tokyo

# 要旨

エルニーニョ・南方振動現象(ENSO)は、全球の気候変動において重要な役割を果たすが、依然としてそのメカニズムは、正確には把握できていない。特に、ENSOの出現海域である東太平洋赤道域の表層付近では、 活発な鉛直乱流混合が生じており、海面水温への影響が示唆されているにも関わらず、鉛直乱流混合が果た す役割は、明らかになっていない。そこで、本研究では、精緻な鉛直混合パラメタリゼーションを独自に導 入した領域海洋モデル(ROMS)を大気再解析データを用いて駆動することにより、太平洋熱帯域の経年変動 再現実験を行った。シミュレーションの際に各時間ステップで熱収支の各項を保存することにより、完全に 閉じる混合層の熱収支解析を行ったところ、エルニーニョ現象の成長において、鉛直混合項偏差が最も重要 な寄与をしているという興味深い結果を得た。一方、海面熱フラックス偏差がエルニーニョ現象の発達に対 する負のフィードバックとして働くことも明らかになった。

# 1. はじめに

エルニーニョ・南方振動現象(ENSO)は、太平洋熱帯域の気候変動現象であり、全球の気候に大きな影響を与えることで知ら れる。エルニーニョ現象のうち、東部太平洋赤道域において正の海面水温(SST)偏差が生じる標準的なイベント(canonical El Niño)では、その発生・発達機構に、鉛直移流偏差が重要な役割を果たしていることが示唆されており(Huang et al., 2012)、 この働きは温度躍層フィードバックと呼ばれている。一方、東部太平洋赤道域において海面付近を流れる南赤道海流と亜表層の 温度躍層付近を流れる赤道潜流の間の強い流速シアに起因する活発な鉛直乱流混合による SST 偏差形成への影響が示唆されて いる(Warner and Moum, 2019)にも関わらず、現象の発達において鉛直混合過程が果たす役割は未だ明らかになっていない。 そこで、本研究では、精緻な乱流混合のパラメタリゼーションが導入された領域海洋モデルを用いてシミュレーションを行い、 完全に閉じる混合層熱収支解析を実行することで、エルニーニョ現象に伴う SST 偏差の形成における鉛直混合の役割を定量的に 明らかにすることを目的とする。

# 2. モデル・データ

用いた海洋モデルは、熱帯太平洋を対象とした領域海洋モデル (Regional Ocean Modeling System; ROMS; Shchepetkin and McWilliams, 2005)である。対象とした計算領域は120°E-67°W, 25°S-25°Nで、鉛直層数は40層、水平解像度は緯度・経度 共に0.25°である。大気外力にはJRA55-do v1.3 (Tsujino et al., 2018)を用いており、側面の境界条件には海洋同化プロダクトである ORAS4 (Balmaseda et al., 2013)を用いている。乱流混合パラメタリゼーションには、Mellor-Yamada スキームを元に開発された Furuichi et al. (2012)が導入されている。気候値を用いて20年間のスピンアップを実行した後、1958年から 2016年まで積分を行い、1961年から2016年までの計算結果で解析を行う。シミュレーションの際に各時間ステップで熱収支の 各項を保存することにより、完全に閉じる混合層の熱収支解析を行えるようにした。モデルの検証のため、海面水温の観測データ (HadISST; Rayner et al., 2003)と ORAS4 を使用した。

#### 3. 結果と考察

Niño-3 海域(150°-90°W、5°S-5°N)で領域平均した SST 偏差の3ヶ月移動平均を標準偏差で割ることで規格化した値を Niño-3 指数と定義する。その冬季(10-12月)のピークが1よりも大きくなる年をエルニーニョ現象の発生年として同定するこ とで、コンポジット解析を行った。その結果、1961年から2016年にかけて12回のエルニーニョ現象が発生しており、ROMSが 現象を現実的に再現していることが確認された。その上で、混合層熱収支解析を行ったところ、先行研究で重要性が指摘されて いた鉛直移流よりも、鉛直混合過程の方が、エルニーニョ現象に伴う正のSST 偏差の形成に関して支配的に寄与していることが 初めて定量的に示された(図1)。

続いて、エルニーニョ現象の発生において鉛直混合過程が重要となる原因を調べるために、TKE 収支解析を含む更なる解析を 行った。これにより、温度成層の弱化による鉛直混合を強めようとする効果と、鉛直混合を弱めようとする流速シアの弱化の効 果が打ち消し合い、鉛直乱流混合の強度自体は大きく変化しないことが明らかになった。その一方で、温度躍層の深化に伴う鉛 直水温勾配の緩和を通した鉛直混合の冷却効率の低下と、混合層が通常よりも厚くなることで鉛直混合による冷却に対する感度

# が低下する、という2つの効果が、正のSST 偏差の形成に大きく寄与していることが明らかになった。

一方、海面熱フラックス偏差がエルニーニョ現象の発達に対する負のフィードバックとして働くことも明らかになった(図1)。 このフィードバックには、混合層深度の正偏差が不可欠であり、平均的な海面加熱に対する混合層の感度を低下させる点で大き く寄与していることがわかった。さらに、海面熱フラックス偏差自体も重要であり、特に潜熱フラックスや短波放射を通した冷 却偏差が、正の SST 偏差を抑制することが示された。これまでにも、海面熱フラックス偏差自体がエルニーニョ現象に伴う正の SST 偏差を減衰させるという指摘はあるが、海洋上層の熱容量を制御する混合層厚偏差の重要性を指摘したのは本研究が最初で ある。



Fig. 1 Composites of anomalies in mixed layer heat budget terms.

# 4. まとめと今後の展望

本研究は、エルニーニョ現象に伴う SST 偏差の形成において、温度躍層フィードバックよりも、鉛直乱流混合がより重要な役割を果たすことを初めて定量的に示したものである。さらに、海面熱フラックスが主要な負のフィードバックとして働くことも明らかにした。多くの先行研究で、混合層厚が時空間的に一定であることを仮定した解析が行われてきているが、両プロセスにおいて混合層厚偏差が重要な役割を果たすことから、熱収支解析を行う際には、混合層厚の変動も考慮することが重要であることを指摘するものである。

今後は、正の海面水温偏差の極大が太平洋赤道域の中央部に現れるエルニーニョもどき現象(Ashok et al., 2007)のメカニズムについても調べていく予定である。

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

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

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

黒田 剛史, 寺田 直樹, 笠羽 康正, 中川 広務, 鎌田 有紘, 狩生 宏喜, 古林 未来, 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, 大阪公立大・理 佐藤 正樹, 阿部 彩子, 東大・大気海洋研
Takeshi Kuroda, Naoki Terada, Yasumasa Kasaba, Hiromu Nakagawa, Arihiro Kamada, Hiroki Karyu, Mirai Kobayashi, Graduate School of Science, Tohoku University Takanori Kodama, Komaba Institute for Science, The University of Tokyo Yasuko Kasai, National Institute of Information and Communications Technology Hideo Sagawa, Faculty of Science, Kyoto Sangyo University Hiroyuki Maezawa, Graduate School of Science, Osaka Metropolitan University

# 要旨

NICAM を用いた太陽系外惑星を想定しての様々な条件下での気候シミュレーション, MIROC をベースとす る火星・金星大気大循環モデルを用いた水・物質循環や雲生成過程のシミュレーションを行い,太陽系惑星 については観測との十分な連携を通して汎惑星大気の気象予測・物質輸送・気候変動に対する総合的な理解 を目指している.今年度は特に MIROC モデルを用いた現在火星の水環境,金星の下層雲生成における大気 力学の影響に迫るシミュレーション研究について進展があったため,それらを報告する.具体的には火星 GCM にレゴリスによる水吸着過程を導入し,大気・地下水圏カップリングモデルへと発展させることで火 星における地下水分布の推定に取り掛かるとともに,金星 GCM の中に見られる赤道域の東西波数1ケルビ ン波構造と雲底部における雲生成過程との関連についての解析研究が論文発表された(Karyu et al., 2023).

# 1. はじめに

我々はかねてから, MIROC モデルの火星(現在及び形成初期)・金星化に着手し,太陽系外惑星の理解も視野に入れた比較惑星 気象・気候学に貢献する成果を創出している.そのことに加え,火星においては地表・地下の水環境の把握が10~20年先の有人 探査等を見据えた上で重要なトピックとなっており, Mars Ice Mapper 等それに主眼を置いた将来探査も国内外で計画されてい る.今年度我々はそのような将来探査への貢献を見据え,火星地表のレゴリスによる大気中水蒸気の吸着と地下への水の蓄積を 再現する大気・地下水圏カップリング計算に着手した.

また、金星の雲の構造と変動は大気力学過程と強く結びついており、最近の「あかつき」探査機による金星周回の近赤外線撮像観測からは硫酸雲の東西波数1の構造や雲の不連続性といった変動が見つかっているが、それらの形成メカニズムはまだ明らかではない. 我々は MIROC に簡単な大気化学スキームと共に硫酸雲の生成消滅過程を導入した金星 GCM を用いて、赤道域雲底部の雲の変動と東西波数1ケルビン波構造の関連性を調べた.

# 2. 問題設定·方法

地下水圏とのカップリング計算を行う MIROC 火星 GCM は水平分解能 T21 の鉛直 32 層・上端高度~90 km で, CO<sub>2</sub> とダスト の放射効果を導入している.大気中の水循環は Kuroda (2017)に基づき,氷雲の放射効果は考慮していない.地中は深さ 20m ま でを 17 層で区切り,温度と水量の分布を求めている.地中温度は熱慣性の観測データから見積もった熱伝導率と熱容量から鉛 直方向の熱拡散を解いて見積もっている.地中の水量は以下の式で定義される.

# $\sigma = \varphi n + \alpha + \zeta$

ここで $\sigma$ は地中の水の総和, $\varphi$ はレゴリスの空隙率,n,はレゴリス空隙内の水蒸気量, $\alpha$ はレゴリスに吸着された水の量, $\zeta$ はレゴリス空隙内にできる氷の量で,空隙率以外の単位は kg m<sup>3</sup> である.レゴリスに吸着される水の量は地中温度と水蒸気量nの関数 として Jakosky et al. (1997)の定義を用い(図 1),さらに大気~レゴリス空隙内の水蒸気鉛直輸送(分子拡散とクヌーセン拡散の組 み合わせで拡散係数を定義した拡散の式により定義)・空隙内水蒸気の凝結による地下氷の生成及びその昇華を考慮している.空隙率 $\varphi$ は氷がない状態で 0.4 と定義し、レゴリス空隙内の氷生成に伴い地中の熱伝導率とともに補正される.またクヌーセン 拡散係数の値に影響を与えるレゴリスの粒径分布を Piqueux and Christensen (2009)をもとに熱慣性データからから見積もり、導入している(熱慣性が小さいほどレゴリス粒径は小さくなる傾向).その他詳細は Steele et al. (2017)に基づく.

また、ここでの MIROC 金星 GCM は水平分解能 T42 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 加熱及び運動量と熱の鉛直拡散係数は Yamamoto et al. (2019)と同一とし、水平拡散の最大波数 e-folding time は1 地球日に設定、

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(SO<sub>3</sub>, SO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, CO, O が絡む 4 種類の反応)を導入した. 雲粒径は Pioneer Venus 観測(Knollenberg and Hunten, 1980)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,硫酸蒸気の過飽和と雲粒成長過程は考慮せず,飽和硫酸蒸気量を超えた硫酸を 即座にその場の高度の観測の比に応じた硫酸雲(75%硫酸エアロゾルを想定,相応の H<sub>2</sub>O の取り込みも導入)に変換している.

# 3. 結果と考察

図2は MIROC 火星地下水圏カップリング GCM において、2kgm<sup>-3</sup>の地下氷を全球・深さ一様に配置、大気中の水蒸気はなく 北極冠を地表における水の供給源とした初期条件から10火星年積分計算後の地下65cmより浅いところの吸着水+氷のカラム量 (単位 kg m<sup>-2</sup>)の分布である.現状の結果では Mars Odyssey の熱外中性子フラックス観測からの見積もり(Boynton et al., 2002)と比 較して定性的に赤道域~北半球中緯度の地下氷が多くなっている結果になっており、その改善として空隙率の鉛直分布の考慮、 透気率(レゴリスの上を細かいダストが覆い地表との水のやり取りを弱める効果)の実装などを今後予定している.

また図 3 に MIROC 金星 GCM の計算結果として、コンポジット解析で 7.1 日周期成分を取り出した赤道域における雲生成率 と鉛直流の経度・高度分布を示す.計算結果は赤道域の雲底高度における東西波数 1 構造の雲分布の成因について、先行研究 (Ando et al., 2021)で示された東西波数 1 ケルビン波に起因する温度変動の影響のみでなく、むしろ鉛直流の変動の影響が大きい ことを示した(Karyu et al., 2023).



Fig. 1: Adsorption isotherm defined by Jakosky et al. (1997).



Fig.2: Simulated amount distribution of subsurface water (sum of adsorped water and ice) in 0-65 cm from the surface (in kg  $m^{-2}$ ).



Fig. 3: Longitude-altitude distributions of composite means of cloud generation rate (color shades) and vertical wind anomaly (contours, in  $mm s^{-1}$ ) on the equator.

# 4. まとめと今後の展望

今年度は上記の結果の他, MIROC ベースの初期火星 GCM と河川流水・氷河底融解過程のカップリング計算から,地表に残 る流水地形(valley networks)が地表に液体の海と降雨が存在できるほど温暖でなくても氷河の底融解により約 10 万年の時間スケ ールで形成可能であることを示した論文が発表され(Kamada et al., 2022),また NICAM を用い太陽系外惑星を見据えた様々な軌 道傾斜角のもとでの水惑星計算でも,特に高軌道傾斜角の場合において水平分解能により大きく大気温度・降水構造が変わる興 味深い結果を示した(Kodama et al., 2022).また金星については雲微物理スキームの開発も進んでおり(狩生, 2023),来年度は特に 現在と過去の火星・金星シミュレーションでの成果創出が見込まれる.

- Karyu et al., 2023: Vertical-Wind-Induced Cloud Opacity Variation in Low Latitudes Simulated by a Venus GCM. J. Geophys. Res. Planets, 128, e2022JE007595.
- (2) Kuroda, 2017: Simulation of the Water Cycle Including HDO/H<sub>2</sub>O Isotopic Fractionation on the Present Mars Using DRAMATIC MGCM. 6<sup>th</sup> International Workshop on the Mars Atmosphere: Modelling and Observations, Granada, Spain.
- (3) Jakosky et al., 1997: The Mars Water Cycle: Determining the Role of Exchange with the Regolith. Icarus, 130, 87–95.
- (4) Piqueux and Christensen, 2009: A model of thermal conductivity for planetary soils: 1. Theory for unconsolidated soils. J. Geophys. Res. Planets, 114, E09005.
- (5) Steele et al., 2017: Regolith-atmosphere exchange of water in Mars' recent past. Icarus, 284, 233-243.
- (6) Yamamoto et al., 2019: Solar-locked and geographical atmospheric structures inferred from a Venus general circulation model with radiative transfer. Icarus, 321, 232–250.
- (7) Knollenberg and Hunten, 1980: The microphysics of the clouds of Venus: Results of the Pioneer Venus particle size spectrometer experiment. Journal of Geophysical Research, 85, 8039–8058.
- (8) Boynton et al., 2002: Distribution of Hydrogen in the Near Surface of Mars: Evidence for Subsurface Ice Deposits. Science, 297, 81-85.
- (9) Ando et al., 2021: Quasi-Periodic Variation of the Lower Equatorial Cloud Induced by Atmospheric Waves on Venus. J. Geophys. Res. Planets, 126, e2020JE006781.
- (10) Kamada et al., 2022: Evolution of ice sheets on early Mars with subglacial river systems. Icarus, 385, 115117.
- (11) Kodama et al., 2022: Climate of high obliquity exo-terrestrial planets with a three-dimensional cloud resolving climate model. Astrophys. J., 940, 87.
- (12) 狩生宏喜, 2023: GCM を用いた金星の低緯度域における雲形態とその生成メカニズムの研究. 修士論文, 東北大学大学院理 学研究科.

# 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調べ、赤道スーパーローテーションの加速機構を議論した(Yamamoto et al. 2023). 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の水平拡散がスーパーローテーションのスピンアップに与える影響を明らかにした(Yamamoto & Takahashi 2022).

# 1. はじめに

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

(1) 放射伝達と地形を組み込んだ金星大気大循環モデル(Yamamoto et al. 2021)を用いて、大気大循環と波動の構造や成因を明らかにする.特に、短周期擾乱の赤道スーパーローテーション加速機構を明らかにする.

(2) Venus-like 簡略化 GCM (Yamamoto & Takahashi 2016, 2018)を用いて、サブグリッドスケールの水平拡散がスーパーローテーションのスピンアップに与える影響を明らかにする.

と定めて、本年度の研究を進めた.

# 2. 問題設定·方法

現実的な金星大気大循環モデル(上記の研究目的 1)に関しては、Ikeda(2011)が開発したモデルを用いて、T63L52の解像度で計算した(Yamamoto et al. 2021). 今年度は、短周期擾乱の構造と成因を整理し、赤道スーパーローテーションの加速機構について調査した.

スーパーローテーションの数値実験では、研究グループによってサブグリッドスケールの水平拡散の値が大きく異なっており、 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の水平拡散がス ーパーローテーションや波動に与える影響は詳しく調査されていない.昨年度に引き続き、Venus-like 簡略化 GCM (Yamamoto & Takahashi 2016, 2018)を用いて、水平拡散がスーパーローテーションのスピンアップに与える影響について調査し、整理した(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(東西波数1の7.5日波)と成因について調査した(Yamamoto et al. 2023). この7.5日波 は、雲上部ではRossby 波の構造をもち、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伴う傾圧エネルギー変換よって形成・維持される. 雲底の赤道 Kelvin-like 波と高緯度 Rossby 波は、 臨界緯度を横切る水平熱および運動量輸送に伴い順圧および傾圧エネルギー変換で形成・維持される. この高度域では、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、赤道 Kelvin-like 波と Rossby 波が結合する. 本研究では、 赤道 Kelvin-like 波動が、水平方向には圏界面の高緯度ロスビー波と結合し、鉛直方向には斜め上の雲頂のロスビー波と結合する 様子が見られる. このように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と 速度ポテンシャル」と「臨界緯度や臨界高度で見られる帯状平均場から渦へのエネルギー変換」を介して3次元結合している.

金星の赤道 Kelvin-like 波のように、赤道捕捉が弱く中緯度で臨界緯度をもつ状況では、収束・発散成分だけでなく、回転成分 も現れる.発散成分のみならず、回転成分も赤道域の東西流形成において重要な役割を果たす.それを示すために、本研究では、 水平運動量フラックスを回転流成分と発散流成分で分離し、流線関数と速度ポテンシャルの赤道東西風加速への寄与を見積もっ た.赤道上では、回転成分の旋回による東西流と収束・発散成分の南北流の相関による運動量フラックスが東西流加速を生み出 す(図1a).赤道の周辺域では、流線関数の傾きにより生じる運動量フラックスが東西流を加速する(図1b).このように、赤 道上とその周辺で東西風加速機構が異なることが分かった.



図1 金星の赤道Kelvin-like波動の収束・発散成分(添字d)と回転成分(添字r)で生じる2種の赤道東西風加速機構の模式図 (Yamamoto et al. 2023を基に描かれた2023年気象学会春季大会予稿集より)

# 3.2. 簡略化した金星大気大循環モデル

以前に開発した放射過程を簡略化した GCM(Yamamoto and Takahashi 2016, 2018)を用いて、数値拡散パラメーターの感度 実験を行い、高ロスビー数の大気大循環構造を明らかにした.本年度は、2016年以降これまで行ってきた実験を整理し、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サブグリッドスケールの水平拡散依存性を調査した.昨年度に行っ た平衡状態での解析に加えて、今年度はスピンアップ時の影響を明らかにし、その結果をまとめた(Yamamoto and Takahashi 2022). 一般に、ロスビー数が大きくなると、極域でジェットやロスビー波が卓越するようになり、それらが水平拡散によって影響を受 ける.この研究では、強い水平拡散では「スピンアップ中に鉛直渦運動量フラックスが弱くなること」と「極域の間接循環や水 平熱輸送の弱化により、鉛直 EP フラックスが弱くなること」を角運動量収支解析から明らかにした.これら2つの要因で、強 い水平拡散ではスーパーローテーション強度が大きくなることが分かった.

# 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、論文にまとめた.引き続き、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整理し、これらの成因を明らかにしたい.

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の水平拡散がスーパーローテーションのスピンアップや平衡状態の維持に与える影響を明らかにした. 今後,この成果を金星大気大循環モデルの改良につなげたい.

- (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.
- (4) Yamamoto, M., Ikeda, K., & Takahashi, M. 2021: Atmospheric response to high-resolution topographical and radiative forcings in a general circulation model of Venus: Time-mean structures of waves and variances. *Icarus*, 355, [114154].
- (5) Yamamoto, M., & Takahashi, M. 2022: Sensitivities of general circulation and waves to horizontal subgrid-scale diffusion in long-term time integrations of a dynamical core for Venus. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 127, [e2022JE007209].
- (6) Yamamoto, M., Hirose, T., Ikeda, K., Takahashi, M., & Satoh, M. 2023: Short-period planetary-scale waves in a Venus general circulation model: Rotational and divergent component structures and energy conversions. *Icarus*, *392*, [115392].

# 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 I

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が、本年度の実験では再現できた割合は小さかった。また、雲 帯発生の局所時固定について、太陽放射の日変化を削除する実験を行ったが、それによって局所時固定は消 えなかった。また、実験結果を評価するための再解析データの解析も引き続き行い、分割進行時の雲帯の特 徴を明らかにした。

# 1. はじめに

中西部太平洋域の熱帯収束帯(ITCZ)において、東西数千kmにおよぶ雲帯がほぼ同時に南北に分割する現象を見いだしてその 解析を行ってきた(文献 1)。 昨年度は、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。本年度はさらに多くの事例の再現実験を行うとともに、初期的な感 度実験も行うことにした。また、ERA5データを用いた実データの解析も並行して行った。

#### 2. 実験方法および結果

コンピュータ Wisteria-O において、NICAM Version19.1 および 19.3 を用いて、高水平解像度(7km)の実験を試みた。初期 値としては、この現象がよく再現されている ERA5 の解析データを用い、現象発生の 2-3 日前からの積分を行った。雲物理は、 NICAM Single Moment Water 6class Scheme (NSW6)を用いた。

# (1) 再現実験

昨年度は 3 例の現象について再現実験を行い、現象の基幹的な構造をほぼ現実大気と同じ場所・時間において再現に成功した。本年度は、文献1で報告した 1993年の顕著な現象を含め、さらに 6 例の実験を行ったが、1 例を除いて再現することができなかった。2022年の事例についてはやや現象が小規模、非典型であったが、2017年以前の現象は典型的なものであった。それらが昨年度の実験のように再現できなかった理由は定かでないが、古い時期の ERA5 の初期値が最近のものに比べて低品質である可能性を考えている。

# (2) 雲帯発生の局所時固定

雲帯の分割現象は、2つの重要なフェーズをもつ。1つめは、東西に長く積乱雲活動を主体とする細い雲帯の形成であり、も う1つは、形成された雲帯から、巻雲活動を主体とする南北に太い帯への形態変化である。最初の細い雲帯の形成は、主に局所 時の早朝にみられるという局所時固定がはっきりとみられるが、太い雲帯への変化のタイミングは事例によりさまざまで局所時 固定は明瞭でない。ここでは、細い対流雲主体の雲帯の形成が太陽活動に同期しているかどうか確かめるための実験をおこなっ た。NICAMにおいて、短波放射の日変化および年変化を取り除き、日平均および年平均された短波放射を用いて、昨年度再現 に成功した3例について比較実験を行った。全球的の規模での対流活動については、海上と陸上の両方において、日変化を喪失 したことが確認できた。しかし、問題の雲帯の形成タイミングは短波放射の日変化を含んだものとほとんど変わらなかった。こ のように、短波放射によって雲帯の発生局所時が固定されているという仮説は説明できなかった。何が局所時固定をもたらして いるかはわからないが、ひとつの仮説としては、短波放射の日変化を切っても、初期値力学場に含まれる潮汐の成分が2-3日維 持されていて、それが局所時固定に効いているのかもしれない。

# (3) ERA5 データの解析

雲帯が広がって 2-3 本に分割していく部分がこの現象で最も興味をもたれるところであるので、この部分について、ERA5 デ ータを詳細に解析した。図1は、2020年12月24日に日付変更線の西で発生した現象のやや東部に当たる165-170Eにおける 上部対流圏(200hPa)でのいくつかの物理量の緯度時間断面である。図1(a)には雲氷量の対数を示すが、23日212に7N付近に ある濃厚な雲域から北向きに6°/day (7m/s)で雲帯が移動し、24日18Zには13℃Nに達している。雲氷量はこの時期の後半には むしろ増大しており、雲が成長していることを示す。図1(b)には鉛直流(負値が上昇流)を併せて示す。この北進する雲帯の中に は、はっきりした上昇流がみとめられ、この上昇流によって雲が発達していることがわかる。したがって、この雲帯は単に移流 されているだけでなく、形成機構をもちながら北進しているとみられる。移流との関連を調べるために図1(c)を用意した。北進 する雲帯付近では南風が想定される。実際に南風は観測されるが、その分布は特徴的であり、雲帯の中心よりもさらに北側に最 大風速をもつ。この最大風速位置も雲帯とほぼ等速で北進しているようにみえる。また、雲帯における南風の強さは、ほぼ雲帯 の北進速度と合致している。上昇流が内部重力波によっているとすれば、単純なモデルを考える限り南風位相と合うはずなので、 この分布は内部重力波の寄与を支持しない。

# 3. まとめと今後の展望

本年度の再現実験はほとんどがうまくいかなかった。初期時間の変更、鉛直層数の増加、物理スキームの変更などを行いなが ら、さらに多くの事例の再現を目指すことが統計的な研究には必要である。ERA5 で認められた分割中の雲帯の構造をさらに詳 しく調べるとともに、再現された事例の NICAM 出力の中で、これらについても再現されているのかを調べ、その形成機構をさ らに研究することが現象の解明につながると考えている。





Fig. 1 Latitude-time section of some variables of ERA5 reanalysis averaged in 165E-170E for a case in Dec 2020. Logarithm of cloud ice contents are shown in all panels with color. Also vertical-P velocity (x100 Pa/s) and meridional wind (m/s) are shown by contour in panel (b) and (c), respectively.

# 参考文献

 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.

# 機械学習による統計的ダウンスケーリング・バイアス補正・ナウキャスティング モデルの開発

# Development of statistical downscaling-bias correction method and nowcasting model using machine learning techniques

金子 凌 (Ryo Kaneko),東大・生研, E-mail: rkaneko@iis.u-tokyo.ac.jp 吉兼 隆生 (Takao Yoshikane),東大・生研, E-mail: takao-y@iis.u-tokyo.ac.jp 坂内 匠 (Takumi Bannai),東大・生研, E-mail: bannai@rainbow.iis.u-tokyo.ac.jp BASNAYAKE MUDIYANSELAGE DIANI NIMANTHIKA ABEYRATHNE,東大・生研, E-mail: diani@iis.u-tokyo.ac.jp 吉川 晴矢 (Haruya Yoshikawa),東大. 生研, E-mail: yharuya@iis.u-tokyo.ac.jp 大沼 友貴彦 (Yukihiko Ohnuma),東大・生研, E-mail: onuma@iis.u-tokyo.ac.jp 新田 友子 (Tomoko Nitta),東大・生研, E-mail: t-nitta@iis.u-tokyo.ac.jp Kim Hyungjun,東大・生研, E-mail: hjkim@iis.u-tokyo.ac.jp 山崎 大 (Dai Yamazaki),東大・生研, E-mail: yamadai@rainbow.iis.u-tokyo.ac.jp 芳村 圭 (Kei Yoshimura), 東大・生研, E-mail: oki@civil.t.u-tokyo.ac.jp

# 要旨

近年の地球規模のシミュレーションや、降水観測・予測の需要の高まりを受け、機械学習を用いてそれらの 課題を検討した.本研究では、気候モデルのシミュレーション結果を、機械学習モデルを用いてダウンスケ ーリングすることにより、全球規模でより詳細な降水量分布を推定することが可能となった.また、解析雨 量を学習させた深層学習を用いて6時間先までの降水量を予測可能であることも示唆された.さらに、衛星 データを深層学習モデルに学習させることで、降水量を推定し、時間変動を捉えられる可能性も示唆された.

# 1. はじめに

近年の気候モデルシミュレーションの高度化により、全球規模での気候変動要因が明らかになっている.しかし、地域詳細の 気候変動影響を評価するには解像度が不十分である.ダウンスケーリング(高解像度化)が不可欠であるが、膨大な計算機資源 が必要になるなど課題も多い.また、ローカルスケールでは豪雨災害を未然に防止すべくリードタイムの短い降水量予測への需 要が高まっている.深層学習を用いた降水予測も取り組まれてはいるが、豪雨に特化した予測を行っているところは未だ少ない のが現状である[1].

一方,これらのベースとなる真値を全球規模で観測する試みとして、人工衛星による赤外バンド(IR)による衛星降水量推定 は、高い時空間分解能を持ち、水文学研究及び社会経済的な応用に大きな可能性を秘めている[2].昨今は輝度温度と地上降水 量の統計的な関係性をもモデル化するため、機械学習を用いることで精度向上を実現した研究が登場してきている[3].しかし、 それらは IR から取得できる雲上層部の情報に過度に依存している問題点が指摘されている[4].

そこで、本研究では、以下三つの目的の下、現象の理解・予測に取り組む.第一の目的として、統計的ダウンスケーリングや バイアス補正・機械学習により、局地降水の形成メカニズム及び気候変動メカニズムの解明を試みる.第二の目的として、解析 雨量の分布から6時間先までの降水量を予測する深層学習モデルを作成・検討する.第三の目的として、雲の中・下層部の情報 に対応する大気再解析モデルの物理変数を利用した新たなIR降水量推定手法を提案する.

# 2. 手法

第一の目的のため,気候モデルシミュレーションで再現される現象と観測値との関係性を機械学習で認識し,地域詳細の気候 変動特性を推定する手法を開発した.本手法は力学的手法のように様々な気象要素を推定可能である.また,計算コストが低く, 高解像度化及びバイアス補正が可能である.本研究では,気候モデル出力データ(空間解像

度 150 km 四方)をダウンスケーリングする.

第二の目的のため、気象庁が作成する解析雨量を学習させた短時間降水予測モデルを検討 した.モデルには、U-Netといわれる深層学習モデルを使用した.全国を13の領域(256 グ リッド四方、図-1)に分割し学習データセットを作成する.このデータセットを用いて、6時 間前までの降水量を入力すると、6時間先までの降水量を推定するようモデルに学習させた. モデルは予測誤差を最小化するように最適化されるが、これを変更することにより予測精度 の向上を目指す.

第三の目的のため、物理モデルを参考にした多入力モデルを提案する. IR データやモデル のデータを3つ使用し入力することで、降水量を推定するというモデルであり随所に学習効 率を上げるための工夫を適用している. これの予測結果の精度を ERA5 の Total Precipitation の予測精度と比較した. 予測・検証に利用したのは米国の内陸のデータである.



# 3. 結果と考察

# 【目的1に関して】

本手法を用いてダウンスケーリングした結果,観測とほ ぼ同じ降水空間分布の気候的特性を推定できることが示 された(図-2).地形の影響なども詳細に表現することがで きている地域も存在し,学習結果が良好だったことが確認 できる.

#### 【目的2に関して】

短時間降水予測モデルの予測結果を図-3 に示す.この結 果,降水域を過大評価する場合もあるが,6 時間先の豪雨 の継続も捉えられる場合もあることが明らかとなった(図 中赤色の領域).また,モデル最適化の際の誤差関数を工夫 することで,図中の0.5時間先予測の北側に見られる様に, 降水域をより詳細に予測できることが明らかとなった.

#### 【目的3に関して】

降水量推定の実験の結果,降水物理変数を利用した深層 学習モデルは,従来の深層学習モデルと比較して,降水量 の推定では4.9%,強い雨(10mm/h以上)では7.96%(RMSE) の改善に繋がった.またイベント分析においても,提案モ デルは従来の深層学習モデルや現在運用中のプロダクト と比較し,降水の時空間変動を上手く捉えられていること が確認できた.



**図-2** ダウンスケーリング結果の例



# 4. まとめと今後の展望

空間解像度 150 km 四方の気候モデルのシミュレーション結果を,機械学習モデルに学習させることで,ダウンスケーリングすることが可能となった.また,深層学習モデ

**図-3** 平成 30 年 7 月豪雨の予測例(LT は Lead time すなわち予測時 間(単位:時間), p は降水量を意味する.)

ルを用い解析雨量を学習させることで、6時間先までの豪雨の継続を予測できる可能性も示唆された.さらに、衛星データを利 用し降水量を推定することで、降水の時間変動を捉えられることが示唆された.

機械学習によるダウンスケーリングの予測研究をさらに発展させ、領域-地球システムを理解する.降水予測・推定の分野で は、今後は他の物理変数の活用可能性やより高解像度な領域モデルを用いることによる表現力の向上などが期待できる.

今後はこれらを踏まえ、災害に強い(極端現象が起こっても被害が極めて小さく、復旧が早い)社会の実現に向けて取り組む. 本手法により、水災害、水資源、農業、健康影響などの様々な気候変動リスクがより高精度の推定が可能になると期待される.

- [1] Ravuri S, Lenc K, Willson M, Kangin D, Lam R, Mirowski P, et al. (2021). Skilful precipitation nowcasting using deep generative models of radar. Nature, 597(7878), 672-7.
- [2] Funk, C., Peterson, P., Landsfeld, M., Pedreros, D., Verdin, J., Shukla, S., Husak, G., Rowland, J., Harrison, L., Hoell, A., & Michaelsen, J. (2015). The climate hazards infrared precipitation with stations—a new environmental record for monitoring extremes. Scientific Data, 2(1), 1–21.
- [3] Sadeghi, M., Asanjan, A. A., Faridzad, M., Nguyen, P., Hsu, K., Sorooshian, S., & Braithwaite, D. (2019). PERSIANN-CNN: Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information Using Artificial Neural Networks–Convolutional Neural Networks. Journal of Hydrometeorology, 20(12), 2273–2289.
- [4] Nguyen, P., Shearer, E. J., Ombadi, M., Gorooh, V. A., Hsu, K., Sorooshian, S., Logan, W. S., & Ralph, M. (2020). PERSIANN Dynamic Infrared–Rain Rate Model (PDIR) for High-Resolution, Real-Time Satellite Precipitation Estimation. Bulletin of the American Meteorological Society, 101(3), E286–E302.

# 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ための物理過程の開発を行った。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と鉛直拡散依存性を調べた。長波放射輸送モデルの開発に引き 続き,短波放射輸送モデルの開発に着手した。金星大気中に存在する熱潮汐波の再現実験を行い,観測と整 合的な空間構造を再現し,運動量輸送の緯度・高度分布を明らかにした。

#### 1. はじめに

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

#### 2. 問題設定·方法

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

これまでに開発した GCM 用の金星雲モデル (Ando et al., 2020, 2021) により,極域下部雲層高度の大気成層度の低い領域 で活発な擾乱活動が生じ,水蒸気が高度 50 km 以下の下層大気から上方に輸送されることが,極域の非常に厚い雲の形成に重要 であることを明らかにした。また,低緯度の下部雲層では,Kelvin 波的な惑星規模波動によって,東西波数 1 の雲の濃淡が作ら れることを明らかにし,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できた。しかしながら,上部 雲層(高度 60-70 km)では観測よりも雲量が少なく,紫外線で観測される雲頂の雲模様の再現などに課題が残されていた。今 年度は,雲を構成する硫酸エアロゾルの濃度を固定せず,温度や圧力などの条件に従って濃度が決定されるようにモデルの改良 を行った。その結果,上部雲層で濃度の低い雲が多く作られるようになり,上層雲の再現性が改善された。現在,その結果を投 稿論文としてまとめているところである。しかしながら,上部雲層では雲の原料となる水蒸気の絶対量が不足しており,雲不足 である傾向が続いている。鉛直拡散過程の見直しなど,モデルの最適化を試みている。

長波放射輸送モデルに引き続き、短波放射輸送モデルの開発を進めている。太陽放射による大気加熱率の鉛直分布は、先行研究(Haus et al., 2015)とほぼ同じ結果を再現することができた。現在、これまでに開発した長波放射輸送モデルと短波放射 輸送モデルを利用した1次元・2次元の簡単な数値モデルを作成し、金星大気の温度構造、特に下層大気の成層度や鉛直対流の 有無、夜昼間の温度差の形成などに着目した研究を行っている。

金星大気中には熱潮汐波と呼ばれる惑星規模の大気波動が存在している。熱潮汐波は鉛直方向に運動量を輸送し、励起高度に 自転と同方向の平均東西風を生成することから、従来から大気スーパーローテーション (SR) の生成メカニズムのひとつとし て注目されてきた (Fels and Lindzen, 1974; Takagi and Matsuda, 2007)。最近の観測により、熱潮汐波は雲頂高度(約70 km)の低緯度において運動量を赤道向きに輸送することが明らかになり、運動量の南北輸送によってもSRの生成・維持に寄与 している可能性が指摘されている(Horinouchi et al., 2020)。我々はGCMを用いて観測と整合的な熱潮汐波の構造を再現し、 観測された運動量の南北輸送の再現にも成功した(Suzuki et al., 2020)。ところが、運動量の南北輸送の方向は緯度・高度に 複雑に依存し、必ずしも赤道向きになっていない。SRの維持に対する熱潮汐波の正味の効果を観測的に明らかにするには、もっ と広い緯度・高度領域で風速場を導出し、運動量輸送を定量的に評価する必要がある。また、従来から指摘されている運動量の 鉛直輸送も重要であることが改めて確認された。

# 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。今後は早期にNICAMに金星大気の物理過程を組み込み、大気スーパーローテーションの維持機構の解明を進めたい。

- Ando et al., 2020: Venusian cloud distribution simulated by a general circulation model. J. Geophys. Res.: Planets, 125, e2019JE006208, https://doi.org/10.1029/2019JE006208
- (2) 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
- (3) Haus et al., 2015: Radiative heating and cooling in the middle and lower atmosphere of Venus and responses to atmospheric and spectroscopic parameter variations. Icarus, 117, 262-294, http://dx.doi.org/10.1016/j.pss.2015.06.024
- (4) Fels and Lindzen, 1974: The interaction of thermally excited gravity waves with mean flows. Geophys. Fluid Dyn. 6, 149-191.
- (5) Takagi and Matsuda, 2007: Effects of thermal tides on the Venus atmospheric superrotation. J. Geophys. Res., 112, D09112, https://doi.org/10.1029/2006JD007901
- (6) Horinouchi et al., 2020: How waves and turbulence maintain the super-rotation of Venus' atmosphere. Science, 368, 405-409, https://doi.org/10.1126/science.aaz4439

# 沿岸−沖合移行帯域における物理場と生態系に関する数値的研究 Numerical studies on physical field and ecosystem in coastal-offshore transition zones

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

# 要旨

沿岸―沖合移行領域における物理場と生態系の過程を明らかにするために、夏季三陸沿岸の津軽暖流域に 生じた冷水帯の数値シミュレーションを行った。その結果、同様の冷水帯構造が再現され、津軽暖流と三 陸の陸岸地形間の相互作用に起因して生じる湧昇と鉛直混合が成因である可能性が示された。

# 1. はじめに

日本の沿岸には多数の河川や内湾が存在するとともに、沖合には黒潮や親潮、津軽暖流、宗谷暖流等の海流系が流れ、多様な 海洋環境が形成されている。この沿岸と沖合の間の「移行帯」では、物質循環と生物生産、生物多様性のホットスポットとなっ ている。三陸の海洋は代表的な移行帯であり、そこを流れる津軽暖流では前線(潮目)が生じ漁場形成に関わることが知られて いるが、それには海域に特徴的なサブメソスケール(海洋において 10 km以下のスケール)の流動が混合と物質循環を通じ、重 要な役割を果たしていると考えられる。研究代表者らは、三陸沖における高解像度観測から、津軽暖流と親潮の間にサブメソス ケールの前線を見出し、鉛直混合強化と生態系への影響を提案した(Itoh et al. 2016; 2022)。しかし三陸海域のサブメソス ケール流動の発生機構は未だ明らかでない。本研究課題では、沿岸一沖合移行帯の特徴の1つであるサブメソスケール構造の形 成メカニズムと物質循環・生態系への影響を明らかにすることを目的として、数値モデルによる解明を行う。前年度までの研究 では、大槌沖の津軽暖流フロント域においてサブメソスケール不安定の発生と鉛直混合の強化が生じる可能性を示し、その要因 として津軽暖流と三陸陸岸地形間の相互作用を推察した。それに基づき今年度の8月に学術研究船新青丸による大槌湾沖の調査 を行ったところ、三陸沿岸に沿って広く冷水帯が生じており、サブメソスケール前線の形成が捉えられた(Fig.1)。調査実施時 には顕著な海上風は吹いておらず、この冷水帯が風成の沿岸湧昇の結果生じたとは考え難い状況であった。そこでこの観測され た冷水帯の成因と三陸沿岸のサブメソスケール不安定間の関係を探るため、Wisteria/Odyssey上で数値実験を実施した。

# 2. 問題設定·方法

海洋大循環モデル MITgcm (Marshall et al. 1997)を用い、三陸沖を対象とした流動と鉛直混合の数値シミュレーションを行った。前年度までの設定を変更し、計算領域を38°30'-43°00'N、140°00'-144°00'E、三陸沿岸から沖合にかけてのサブメソスケール構造を解像するため、39°25'-39°90'N、141°90'-142°80'Eの領域では水平格子幅を100mと高解像度化し、その外側では開境界に向けて格子幅を1kmまで拡張した。鉛直格子幅については、表層200mで2mとし、それ以深で徐々に拡張させた(計152×1296×147層)。海底地形には約50m格子のGlobal tsunami Terrain Model (Chikasada, N. 2020)を使用し、モデル格子に内挿して与えた。鉛直拡散・粘性係数はともに背景の値を1×10<sup>5</sup>m<sup>2</sup>s<sup>-1</sup>とし、鉛直対流不安定等によって鉛直密度逆転が生じた層ではそれらの値がThorpe scale 法によって強化されるKlymak & Legg (2010)のスキームを採用した。水平拡散・粘性係数は 1 m<sup>2</sup>s<sup>-1</sup>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8月の気候値をモデル格子へ内層して与え、開境界における水温・塩分・流速・海面高度を同気候値に強制的に緩和するとともに、開境界から潮汐モデル TPX08-atlas (Egbert & Erofeeva 2002)のM<sub>2</sub>, S<sub>2</sub>, K<sub>1</sub>, O<sub>1</sub>分潮の順圧潮汐流で駆動した。また海面からの強制力ととして風応力を与えず、海面加熱を考慮するため 50 W m<sup>-2</sup>の海面熱フラックスを時間・空間一定として与えた。

# 3. 結果と考察

数値モデルによる計算結果は、津軽海峡における鉛直混合や黒潮域の水温を過大に評価する傾向にあったものの、三陸沿岸に おいて観測された冷水帯と同様の水温構造を示した(図 2)。三陸沿岸の水温低下に寄与する鉛直熱輸送を評価すると、水温時 間変化率に対する鉛直移流フラックスの寄与は∂(wT)/∂z=-1.9×10<sup>-5</sup> ℃ s<sup>-1</sup>、鉛直拡散フラックスの寄与は∂/∂z(K∂T/∂z)=-6.1×10<sup>-6</sup> ℃ s<sup>-1</sup>と両者とも水温低下に寄与するものの、鉛直流の寄与の方が約3倍大きい結果であった(図 3)。これらの値はそれぞれ1日 あたりの値にして約1.7℃と0.5℃の水温減少に相当する。図3に示されるように、実際には一様に水温低下が生じているわけ では無く、場所によって(時間的にも)水温上昇・低下が生じており、サブメソスケールの擾乱の平均として冷水帯が生じてい ると推察される。鉛直流と鉛直拡散を強化するこの擾乱は、津軽ジャイアから南下してくる津軽暖流が岩手県の北山崎や閉伊埼、 トドヶ埼などの岬に衝突・剥離した結果、下流側に高気圧性の渦度を持つ水平境界層に関連して発生していた(図 4)。

# 4. まとめと今後の展望

本研究では三陸沿岸から沖合の高解像度数値シミュレーションから、2022 年 8 月に観測された三陸沿岸の冷水帯の成因を検討 した。数値モデル実験では、三陸沿岸で鉛直流と鉛直拡散がそれぞれ0(100 m day<sup>-1</sup>)、0(10<sup>-2</sup> m<sup>2</sup> s<sup>-1</sup>) に強化され、三陸の沿岸 において観測された冷水帯の特徴と一致する水温分布が得られた。水温変化に寄与する鉛直移流フラックスと鉛直拡散フラック スを比較したところ、移流フラックスの方が約3倍大きく、冷水帯の形成に地形性の湧昇が主要な役割を果たす可能性が示され た。このような湧昇は津軽暖流と三陸陸岸地形が生じる水平境界層内で生じており、その流れ・地形間相互作用過程について今 後詳細に調べる必要がある。また使用した数値モデルが静水圧近似を用いている点、鉛直拡散パラメタリゼーションが対流不安 定による鉛直拡散の強化のみを考慮している点については検証が必要である。今後、観測データとともに統合的に解析を進め、 これらの課題を明らかにする予定である。



Fig. 1 2022 年 8 月 7 日にお けるひまわり 8 号衛星海面水 温(JAXA)と AVISO 衛星地衡流 場(欧州 Copernicus). Fig. 2 数値モデルで計算された(a) 8月10日にお ける海面水温と(b)8月8-9日の平均水温変化率。

Fig. 3 数値モデルで計算された 10m 深における (a)鉛直移流及び(b)鉛直拡散による熱フラックスの 鉛直勾配。8月8-9日における時間平均値を示す。



Fig. 4 数値モデルで計算された三陸沿岸における鉛直流と鉛直拡散の強化の典型例(8月9日22:40におけるスナップショット).(a)水温 T(カラーシェード)と流速(矢印)、(b)鉛直流 w、(c)鉛直渦拡散係数 K、(d)コリオリ周波数で規格化した相対渦度の鉛直成分  $\zeta_z/f_o$  それぞれ 10m深における値を示す。

- 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, <u>https://doi.org/10.1007/s10872-015-0320-6</u>.
- Itoh, S., Tsutsumi, E., Masunaga, E., Sakamoto, T. T., Ishikawa, K., Yanagimoto, D., Hoshiba, Y., Kaneko, H., Hasegawa, D., Tanaka, K., Fukuda, H., Nagata, T., 2022, Seasonal cycle of the confluence of the Tsugaru Warm, Oyashio, and Kuroshio currents east of Japan. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 127, e2022JC018556. https://doi.org/10.1029/2022JC018556.
- Marshall, J., A. Adcroft, C. Hill, L. Perelman, and C. Heisey, 1997, A finite-volume, incompressible Navier Stokes model for studies of the ocean on parallel computers. *Journal of Geophysical Research*, 102, 5753–5766, https://doi.org/10.1029/96JC02775.
- 4. Chikasada, N., 2020, Global tsunami Terrain Model, https://doi.org/10.17598/NIED.0021.
- 5. 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.
- 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.
- 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.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

# 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

2021 年 5 月 18 日に南極昭和基地のレーダーにより観測された大気重力波(以下、重力波)について、現実的な水平風・温度の背景場の下で、高解像度モデルを用いた理想化数値シミュレーションを実施した。このシミュレーションでは、対流圏における鉛直風の擾乱の振幅や下部成層圏の北向き運動量の鉛直フラックスなど、観測された重力波の特徴をよく再現していた。対流圏では、小さな海岸地形に沿って Ship-wave に似た波状構造が現れていた。一方、成層圏では、背景風の方向が鉛直方向に変化することに伴い、卓越する波の水平構造が大きく変化していた。クリティカルレベル付近では、大きな渦度を持つ層が複数みられた。興味深いことに、この高度領域において、観測されたレーダースペクトル幅から推定される乱流エネルギー散逸率が大きくなっていた。これは、クリティカルレベル付近で、重力波の砕波が起きていることを示唆する。すなわち、本数値シミュレーションでは、重力波の砕波、及び、それに伴う重力波の水平構造の高度変化を再現することができた。

# 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。本研究課題では、2021 年5月18日に PANSY レーダーで観測された大気重力波 (Figure 1) に注目し、高解像度数値モデルによる数値シ ミュレーションを実施した。これまでに昭和基地付近の気 象システムの研究のために数値シミュレーションは数例 行われてきたが、その水平解像度は一番細かいもので 2.8 km であった。今回、水平解像度 250 m、鉛直解像度 60 m のラージエディシミュレーションを実施した。

#### 2. 数値モデル・実験設定

数値実験には、圧縮性流体のナビエ・ストークス方程式 の有限体積コードである Complex Geometry Compressible Atmospheric Model (CGCAM) を用いた (Lund et al., 2020; Fritts et al., 2021)。計算ドメインは昭和基地を中心とし た560 km 四方正方領域とし、地上から高度 96km までを含む。 中心の 100 km 四方の領域において、水平解像度を 250 m と した。サブグリッドスケールの運動の効果を取り込むために Dynamic Smagorinsky subgrid-scale model (Germano et al., 1991)を用いた。初期値・背景場は、MERRA-2 再解析データ と JAGUAR-DAS 再解析データ (Koshin et al., 2022) を組み 合わせて作成した風速・温度の鉛直プロファイルを与えた。 数値積分は 12 時間実施した。その他の実験設定は Table 1 に示した。



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

m 11 1	· a	C 1 1	• 1	• •
Table L	. Settings	of the	numerical	evneriment
Table 1	· Douings	or une	mannerica	caperinene

	<u> </u>
Domain	$(L_x, L_y, L_z) = (560 \text{ km}, 560 \text{ km}, 96 \text{ km}), (N_x, N_y, N_z) = (696, 696, 960)$
$\Delta x$	250 m in the central region & gradual increase up to ${\sim}4.8~{\rm km}$ at the horizontal boundary
$\Delta z$	60 m up to z=48 km & gradual increase up to ~500 m at the model top (z=96 km)
Boundary condition	Horizontal: Characteristic BC Bottom: Free slip, Top: Characteristic BC
$\Delta t$	0.2 s (3 <sup>rd</sup> -order RK Scheme)
Sponge layer	ex.) for $x_b - x_w < x \le x_b$ , $\frac{d\rho u_i}{dt} = \dots - \left\{ 1 + \tanh\left[2.5\left(\frac{x - x_b}{x_w}\right)\right] / \tanh(2.5)\right\} \left(\frac{\rho u_i - \overline{\rho} \overline{u_i}}{\tau_s}\right)$ Width $x_w$ : (horizontal, top) = (80 km, 10 km) Time constant $\tau_s$ : (horizontal, top) = (128 s, 4 s)
Background wind	Gradual increase of background wind in z $<15\mbox{ km}$ in 8 $\mbox{ h}$
Terrain	Radarsat Antarctic Mapping Project v2 (dx=200m; Liu et al., 2015)

# 3. 結果と考察

図2左列に、t=12hにおける 高度5km、16km での w の水平図を示した。地上での風向は東北東 であり、昭和基地は図の中心に位置する。昭和基 地北東の大陸沿岸では、振幅約 0.5 m s<sup>-1</sup>の ship-wave に似た空間構造が存在する。また、昭和 基地の南には、位相が南北に伸びる構造が見られ る。一方で高度 16 km では波状構造は見られるも のの、その水平構造は高度5kmと比べて、大きく 異なっている。図2右列は、t=12hにおける100km ×100 km の水平領域の w から計算された水平パ ワースペクトル Pw(k,l) を示している(k と l は それぞれ東西波数と南北波数)。Pw は、統計的な ゆらぎを小さくするために、60 mごとに計算した 後に、約4kmの鉛直幅で平均している。高度5km では、水平波長5km以上の波が卓越し、水平波数 ベクトル $\mathbf{k}_h \equiv (k, l)$  が N-S、NNE-SSW、NE-SW、 ENE-WSW、E-W 方向に向いていることが確認された。 興味深いのは、高度 16 km において、E-W、ENE-WSW、 NE-SW 方向の Pw が減少していることである。こ の結果、高度 5 km では NNW-SSE 方向の Pw が他の 方向を向いたものに比べて小さいにもかかわらず、



Figure 2: (Left column) Horizontal maps of w at altitudes of (above) 5 km and (below) 16 km.

(Right column) Power spectra of w at altitudes of (above) 5 km and (below) 16 km.

高度 16 km では、NNW-SSE 方向を向いた k<sub>h</sub> を持つ波が卓越している。 波の水平構造の変化を理解するために、定在重力波の波の伝播条件を 調べた(Figure 3)。その結果、背景風の向きが高度方向に変化するこ とに伴い、E-W、ENE-WSW、NE-SW の波のクリティカルレベルが、高度 9 ~13 km に存在することが明らかとなった。この高度領域の昭和基地上 空の渦度の構造を調べてみると、大きな渦度の多重層構造が現れていた。 これは重力波の砕波に伴う乱流の生成を示唆する。さらに、レーダーの スペクトル幅から推定される乱流エネルギー散逸率(Kohma et al., 2019)の高度分布を見てみると、同じ高度領域で、強い乱流層が複数存 在することが確認された。これは、シミュレーションで見られた重力波 砕波に伴う乱流生成を支持する結果である。



#### 4. まとめと今後の展望

南極昭和基地のレーダーにより観測された大気重力波の数値シミュレーションを実施し、観測された重力波との比較、及びその物理機構について調べた。数値シミュレーションは、鉛直風の大きさや運動量フラックスなど、観測された波の特性をよく再現していた。重力波の水平構造に注目した解析を行い、卓越する重力波の高度方向の変化を、重力波の鉛直伝播特性の観点から考察した。また、クリティカルレベル付近において、数値シミュレーション・レーダー観測のいずれにおいても、大気重力波の砕波に伴う乱流生成を示唆する結果を得た。今後、成層圏の w の水平図において見られる、位相線が東西に伸びる重力波の成因について考察を深めることを予定している。

- (1) Sato, K., Tsutsumi, M., Sato, T., Nakamura, T., Saito, A., Tomikawa, Y., Nishimura, K., Kohma, M., Yamagishi, H., and Yamanouchi, T.: Program of the Antarctic Syowa MST/IS Radar (PANSY). J. Atmos. Sol.-Terr. Phys., 118A, 2-15, 2014, https://doi.org/10.1016/j.jastp.2013.08.022
- (2) Lund, T. S., Fritts, D. C., Wan, K., Laughman, B., and Liu, H. L. (2020). Numerical Simulation of Mountain Waves over the Southern Andes. Part I: Mountain Wave and Secondary Wave Character, Evolutions, and Breaking. J. Atmos. Sci., 77(12), 4337-4356. <u>https://doi.org/10.1175/Jas-D-19-0356.1</u>
- (3) Fritts, D. C., Lund, T. S., Wan, K., and Liu, H. L. (2021). Numerical Simulation of Mountain Waves over the Southern Andes. Part II: Momentum Fluxes and Wave-Mean-Flow Interactions. J. Atmos. Sci., 78(10), 3069-3088. https://doi.org/10.1175/Jas-D-20-0207.1
- (4) Germano, M., Piomelli, U., Moin, P., and Cabot, W. H. (1991). A Dynamic Subgrid-Scale Eddy Viscosity Model. Physics of Fluids a-Fluid Dynamics, 3(7), 1760-1765. <u>https://doi.org/10.1063/1.857955</u>
- (5) Koshin, D., Sato, K., Kohma, M., and Watanabe, S. (2022). An update on the 4D-LETKF data assimilation system for the whole neutral atmosphere. Geosci. Model Devel., 15(5), 2293-2307. <u>https://doi.org/10.5194/gmd-15-2293-2022</u>
- (6) Kohma, M., Sato, K., Tomikawa, Y., Nishimura, K., and Sato, T. (2019). Estimate of Turbulent Energy Dissipation Rate from the VHF Radar and Radiosonde Observations in the Antarctic. Journal of Geophysical Research-Atmospheres, 124(6), 2976-2993. https://doi.org/10.1029/2018jd029521

# 海洋循環-低次生態系結合モデルを用いた魚類生息環境場の比較研究

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

伊藤 進一,東大・大気海洋研, E-mail: goito(at)aori.u-tokyo.ac.jp 松村 義正,東大・大気海洋研, E-mail: ymatsu(at)aori.u-tokyo.ac.jp 佐々木 千晴,東大・大気海洋研, E-mail: sasaki.chiharu(at)aori.u-tokyo.ac.jp 矢部いつか,東大・大気海洋研, E-mail: yabe.itsuka(at)aori.u-tokyo.ac.jp Shin-ichi Ito, Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo Yoshimasa Matsumura, Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo Itsuka Yabe, Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo

# 要旨

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

# 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)を結合させた ROMS-NEMURO による数値実験を行い、 その再現性を吟味してきた。しかし、ROMS を用いた数値実験では黒潮の流路の再現性が良くないため、昨年度は、インド洋に おける数値実験を実施し、シェーシェルドームの発達に伴う栄養塩の鉛直拡散と混合層へのエントレイメントの強化が植物プラ ンクトンブルームに寄与していることを示した (Yokoi et al., 2022)。また、NEMURO と魚類の成長を結び付けたサンマの成長ー 回遊モデル NEMURO.FISH (NEMURO For Including Saury and Herring; Ito et al., 2004) をマサバなどに適用してきた。

本年度は、黒潮続流域におけるマサバの仔稚魚の成長-回遊モデルを用いて行った数値実験の結果を解析し、論文として発表 した。マサバは、マイワシ、カタクチイワシ、サンマなどと同様に北西太平洋に生息している多獲性の重要な水産対象種である。 マサバは、春季に伊豆諸島付近に主産卵場を有するが、産卵された卵は黒潮および黒潮続流によって沖へと輸送され、輸送過程 で孵化した仔魚は、成長とともに混合水域へと索餌回遊し、夏秋季に混合水域および親潮域で索餌後、越冬のために常磐・鹿島 灘海域へと南下回遊することが知られている。マサバ太平洋系群の個体数は、数十年周期で10倍以上の変動を繰り返すが、先 行研究によって、仔稚魚期の成長が良いときに生残率が高いことが知られている(Kamimura et al., 2015)。また、マサバの耳石を 用いた日周輪解析と酸素安定同位体比分析結果から、仔魚期の成長が良い個体が稚魚期に積極的に低水温域に侵入し、多くの餌 料を摂餌することで成長が加速されるという growth positive spiral 仮説を提唱した(Higuchi et al., 2019)が、用いた分析数は限定 されている。そこで、マサバの魚類回遊-成長モデルを用いて、growth positive spiral 仮説の妥当性を評価した。マサバの魚類回 遊-成長モデルは、過去の飼育実験や野外調査の結果をもとに摂餌の水温依存性や体重依存性を設定するとともに、自ら室内実 験で求めた酸素消費量の水温、体重、遊泳速度依存性(Guo et al, 2020; 2021)を取り入れて構築した。

上記のマサバの成長を再現する生物エネルギーモデルは仔稚魚期に焦点を当てて開発したが、成魚に至るまでの成長を再現す るモデルは存在せず、成魚が産卵する卵数、仔魚、稚魚へと成長する過程の死亡などを加味して、マサバの個体数変動を表現で きるモデルが皆無であった。そこで、マサバの成長と資源変動を同時に計算するマサバ成長 – 個体群動態結合モデルを開発した。 個体群動態モデルの中では、体長依存もしくは成長率依存する死亡率を導入することで、海洋環境変動がマサバの成長を通して、 マサバの個体数変動に与える影響を反映させた。また、新たに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継続して実施した。

# 3. 結果と考察

2002から2016年の衛星データに基づいた海面水温、餌料環境を外力としてマサバの成長を計算した結果をクラスター解析し、 3 つの成長パターンに分類した。1 つは成長が遅いクラスター、残り2 つは成長がピークを示す時期が異なるものの成長が比較 的早いクラスターであった。成長が遅いクラスターと早いクラスターの差は、黒潮流軸の南北のどちらに位置するかによって規 定されており、黒潮流軸の北側に位置し高餌料環境を経験することがマサバの成長に重要であることが示された。また、成長の 良い個体はより早く混合水域に侵入し、良い餌条件を経験していることがモデル内でも示され、growth positive spiral がモデルの 中でも起きていることが示された。さらに、モデル内での成長の経年変動の再現性を高めるために調節した摂餌の半飽和定数の 変動から、マサバの加入量は黒潮流軸が房総半島に接近し沿岸暖水種の動物プランクトンが増えるときに増加しており、黒潮流 軸付近で発生する餌料の種類がマサバの初期成長に影響を与えていることが示された。これらの内容を Guo et al. (2022) として 発表した。

マサバの成長モデルを成魚まで拡張し、タイセイヨウサバで開発された産卵アルゴリズムを改良して再生産過程を明示的に表 現できるモデルを構築した。個体群動態モデルの中では、体長依存もしくは成長率依存する死亡率を導入することで、海洋環境 変動がマサバの成長を通して、マサバの個体数変動に与える影響を反映させたが、両依存性については知見がないため、1998 年から 2018 年にかけて 21 年間の衛星データから求めた水温および餌料環境を与えた過去再現実験を実施し、計算結果として得 られる 1998 年から 2014 年のマサバの資源量と再生産成功率が観測値とあうように最適な体長依存性と成長率依存性を求めた。 その結果、体長依存性のみを考慮した死亡率を用いたときにモデルの再現性が高くなった。この際、1998 年から 2018 年までの 実際の漁獲圧もモデルで与えた。

モデル内で、仔稚魚期の成長は、餌料密度に大きく依存していた。2000年代に入ってから餌料環境が好転し、マサバ仔稚魚の成長が良くなり、2010年以降の個体数の増加に結びついたことが示唆された。ただし、卵期の累積死亡数は水温にも大きく依存するため、水温および餌料密度の両者が好適であることが2010年以降の個体数増加にとって重要であったことが示唆された。また、漁獲圧による感度解析を行ったところ、漁獲圧を抑えると個体数増加がより顕著になり、逆に漁獲圧を高めると2010年以降の個体数増加が生じなくなることが確認され、2010年以降の個体数増加には適切な資源管理も重要であったことが示唆された。これらの結果をWang et al. (in press)として論文にまとめた。

#### 4. まとめと今後の展望

マサバを例とした、魚類成長-回遊モデルと魚類成長-個体群動態結合モデルの開発を進めた。今後は両者を結合させた魚類 成長-回遊-個体群動態結合モデルへの発展が期待される。魚類成長-回遊-個体群動態結合モデルを用いることで、将来の気 候変動に対し、成長、回遊、資源量がどのように変化するか総合的に解析することが可能となる。

気候変動による影響に加え、微小マイクロプラスチックが動物プランクトンによって誤食される影響についても今後調べる必要がある。

- Haidvogel D. B., H. Arango, W. P. Budgell, B. D. Cornuelle, E. Curchitser, et al. (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) Kishi M. J., M. Kashiwai, D. M. Ware, B. A. Megrey, D. L. Eslinger, et al. (2007) NEMURO -a lower trophic level model for the North Pacific marine ecosystem. Ecol. Model ., 202, 12-25.
- (3) 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
- (4) 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.
- (5) Kamimura Y., M. Takahashi, N. Yamashita, C. Watanabe and A. Kawabata (2015) Larval and juvenile growth of chub mackerel *Scomber japonicus* in relation to recruitment in the western north pacific. Fish. Sci., 81, 505-513.
- (6) Higuchi T., S. Ito, T. Ishimura, Y. Kamimura, K. Shirai, H. Shindo, K. Nishida, K. Komatsu, 2019, Otolith oxygen isotope analysis and temperature history in early life stages of the chub mackerel Scomber japonicus in the Kuroshio-Oyashio transition region. Deep-Sea Res. II, 169-170, Article 104660. https://doi.org/j.dsr2.2019.104660.
- (7) Guo C., S. Ito, N. C. Wegner, L. N. Frank, E. Dorval, K. A. Dickson, D. H. Klinger, 2020, Metabolic measurements and parameter estimations for bioenergetics modelling of Pacific Chub Mackerel *Scomber japonicus*. Fish. Oceanogr., 29, 215-226. https://doi.org/10.1111/fog.12465
- (8) Guo C., S. Ito, M. Yoneda, H. Kitano, H. Kaneko, M. Enomoto, T. Aono, M. Nakamura, T. Kitagawa, N. C. Wegner, and E. Dorval, 2021, Fish specialize their metabolic performance to maximize bioenergetic efficiency in their local environment: conspecific comparison between two stocks of Pacific chub mackerel (*Scomber japonicus*). Frontiers Mar. Sci., Article613965. https://doi.org/10.3389/fmars.2021.613965.
- (9) Guo C., S. Ito, Y. Kamimura, and P. Xiu, 2022, Evaluating the influence of environmental factors on the early life history growth of chub mackerel (*Scomber japonicus*) using a growth and migration model. Prog. Oceanogr., 206, 102821. https://doi.org/10.1016/j.pocean.2022.102821
- (10)Wang Z., S. Ito, I. Yabe, C. Guo, 2023, Development of a bioenergetics and population dynamics coupled model: A case study of chub mackerel. Frontiers Mar. Sci., accepted. https://doi.org/10.1111/faf.12742

# 放射収支算定のための放射スキームの高速・高精度化

# Fast and accurate radiation scheme for radiation budget calculation

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

# 要旨

昨年度に引き続き、MIROC に用いられている放射伝達モデル MstrnX の気体吸収過程の更新を行った。本更 新では、相関 k-分布モデル比較プロジェクト(CKDMIP)で指定されているデータを用いて気体吸収テーブル の構築を行っている。昨年度は Mstrn の長波領域と短波領域のプログラムを独立させ、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、Mstrn11 短波版として 30 バンド 103 点の気体吸収テーブルを構築した。今年 度はこのテーブルの精度を向上させ、評価結果を CKDMIP に提出した。また、長波版として 33 バンド 75 点 の気体吸収テーブルを構築した。

#### 1. はじめに

MIROC に用いられている放射伝達モデル MstrnX は気体吸収過程を 29 バンド 111 チャンネル版 (以下、温暖化対応版) が CMIP6 向けに採用されている。この気体吸収テーブルは二酸化炭素倍増状態やメタン、一酸化二窒素が増加した状態を再現するように 最適化されており、二酸化炭素 4 倍増のケースで放射強制力の精度が不十分であることが指摘されている(1)。これを受けて、 2017 年度に 29 バンド 147 チャンネルの二酸化炭素 4 倍増状態に対応した吸収テーブル (以下、4 倍増対応版) を作成したが、 20 世紀の気温上昇の再現性が悪く、IPCC AR6 に提出する実験には採用されなかった。また、短波領域での水蒸気吸収が過小評 価されていることがわかっている(2)。この原因としては、現在使われている温暖化対応版のデータベースは HITRAN2004(3) で あり、HITRAN2012(4)以降に導入された近赤外域の水蒸気の吸収線が考慮されていないため、過小評価になっていることが考え られる。さらに、温暖化対応版は波長 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、相関 *k*-分布モデル比較プロジェクト(CKDMIP; Correlated-*k* distribution model intercomparison project)(5)への参加を念頭に、Mstrn の気体吸収過程の更新を続けている。今年度はこの更新作業を継続して行った。

#### 2. Mstrn11-SW

昨年度作成した Mstrn11-SW の仕様について記述する。気体吸収データは CKDMIP で配布されているものを使用した。短 波領域のデータは波数 250-50000 cm<sup>-1</sup>の範囲であるので、今回開発する気体吸収テーブルも同様に設定した。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。

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(cosθ=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<sup>2</sup>以下、放射強制力が 0.1W/m<sup>2</sup>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。 このようにして 30 バンド 103 点の短波領域の気体吸収テーブルを作成した。

#### 3. Mstrn11-SW 精度評価

CKDMIP が提供している評価用プロファイルを用いて昨年度開発した短波領域の気体吸収テーブルの評価を行った。短波領域 用の評価用プロファイルは 18 シナリオ、それぞれ 50 プロファイルが準備されている。18 のシナリオはそれぞれ、全ての気体 を変化させたものが 4 シナリオ(現在、産業革命以前、2100 年、氷河期最大時)、単一の気体濃度の変更が 14 シナリオであり、 二酸化炭素(180, 280, 560, 1120, 2240ppm)、メタン(350, 700, 1200, 2600, 3500ppb)、一酸化二窒素(190, 270, 405, 540ppb)である。

このプロファイルによる評価で、昨年度作成したバージョンは紫外域におけるオゾン及びレイリー散乱の誤差が大きかった。

前者はバンド 30 の積分位置を調整することで対応した。後者は、レイリー散乱の光学的厚さの変化がバンド内で大きいと思われる 29 バンドにおいて、従来は一つの平均したレイリー散乱の光学的厚さを与えていたところに、それぞれの積分点における レイリー散乱を計算して与えることで精度を向上させることができた。

現在の大気状態 100 プロファイルの TOA 上向きフラックスの平均バイアスと二乗平均平方根誤差(RMSE) は 0.68、0.76W/m<sup>2</sup>、地 表面下向きフラックスの平均バイアスと RMSE は 1.75, 1.96W/m<sup>2</sup>であった。加熱率の RMSE は 4hPa 以下では 0.136K/day、0.02-4hPa で 0.66K/day であった。加熱率プロファイルにおいては、中間圏のプロファイルにずれがあり、上層の二酸化炭素の吸収 が的確に再現できていないことが理由として考えられる。また、対流圏の近赤外領域のバンドの水蒸気吸収に誤差があり、地表 面での下向き放射フラックスに影響を与えている。この結果は現行の放射伝達モデルとの比較において大幅に劣るものではない が、より一層の精度の向上が望ましい。

# 4. 長波領域モデルの構築

長波領域において提供されているデータは 0-3260cm<sup>-1</sup>であった。0-20cm<sup>-1</sup>の波長領域では、吸収線は多いが地球放射領域にお ける影響は小さいので、Mstrn11-LWの波長領域は 20-3260cm<sup>-1</sup>とした。バンド分割の考え方と最適化手法については、Mstrn11-SW と同様に行った。このように作成した長波放射領域の気体吸収テーブルは 33 バンド 75 点となった。

本吸収テーブルの計算結果は、特に二酸化炭素の吸収が強い15micron付近で誤差がまだ大きく、さらなる調整が必要である。

	#g	Band range	gas		#g	Band range	gas
1	1	20 - 160	$H_2O, O_3, O_2, N_2$	18	<b>2</b>	1110 - 1180	H <sub>2</sub> O, O <sub>3</sub> , N <sub>2</sub> O, CH <sub>4</sub> , CFC-12
<b>2</b>	2	160 - 350	$H_2O, N_2$	19	2	1180 - 1250	H <sub>2</sub> O, CO <sub>2</sub> , O <sub>3</sub> , N <sub>2</sub> O, CH <sub>4</sub>
3	2	350 - 450	$H_2O$	20	4	1250 - 1340	$H_2O$ , $CO_2$ , $N_2O$ , $CH_4$
4	4	450 - 520	$H_2O, CO_2$	21	2	1340 - 1450	$H_2O$ , $CO_2$ , $CH_4$ , $O_2$
<b>5</b>	2	520 - 560	$H_2O$ , $CO_2$ , $N_2O$	22	2	1450 - 1650	$H_2O$ , $CH_4$ , $O_2$
6	4	560 - 600	$H_2O, CO_2, O_3, N_2O$	23	1	1650 - 1850	$H_2O, O_3, O_2$
$\overline{7}$	3	600 - 630	$H_2O, CO_2, O_3, N_2O$	24	1	1850 - 1910	H <sub>2</sub> O, CO <sub>2</sub> , O <sub>3</sub> , N <sub>2</sub> O
8	<b>5</b>	630 - 670	$H_2O$ , $CO_2$ , $O_3$	25	1	1910 - 2080	$H_2O$ , $CO_2$ , $O_3$
9	<b>5</b>	670 - 710	$H_2O$ , $CO_2$ , $O_3$	26	1	2080 - 2270	H <sub>2</sub> O, CO <sub>2</sub> , O <sub>3</sub> , N <sub>2</sub> O, N <sub>2</sub>
10	4	710-740	$H_2O$ , $CO_2$ , $O_3$	27	1	2270 - 2400	$H_2O$ , $CO_2$ , $N_2$
11	<b>5</b>	740 - 780	$H_2O$ , $CO_2$ , $O_3$	28	1	2400 - 2620	$H_2O, CO_2, N_2O, CH_4, N_2$
12	2	780 - 830	$H_2O$ , $CO_2$ , $O_3$	29	1	2620 - 2750	H <sub>2</sub> O, CO <sub>2</sub> , O <sub>3</sub> , CH <sub>4</sub> , N <sub>2</sub>
13	2	830 - 860	H <sub>2</sub> O, CO <sub>2</sub> , O <sub>3</sub> , CFC-11eq	30	1	2750 - 2830	$H_2O, CO_2, O_3, N_2O, CH_4, N_2$
14	3	860 - 940	H <sub>2</sub> O, CO <sub>2</sub> , CFC-12	31	1	2830 - 2900	$H_2O$ , $CH_4$ , $N_2$
15	4	940 - 1060	$H_2O$ , $CO_2$ , $O_3$	32	1	2900 - 3100	H <sub>2</sub> O, O <sub>3</sub> , CH <sub>4</sub>
16	2	1060 - 1080	H <sub>2</sub> O, CO <sub>2</sub> , O <sub>3</sub> , CFC-11eq	33	1	3100 - 3260	H <sub>2</sub> O, CO <sub>2</sub> , O <sub>3</sub> , CH <sub>4</sub>
17	2	1080 - 1110	H <sub>2</sub> O, CO <sub>2</sub> , O <sub>3</sub> , CFC-11eq, CFC-12				

表1:長波領域におけるバンド領域と考慮する吸収気体

## 5. まとめと今後の展望

本更新で評価した短波領域用放射伝達モデル Mstrn11-SW は精度の調整を行い、一定の精度を確保できたが、より一層の精度向 上を目指してさらなる調整を目指す。また、長波領域用放射伝達モデル Mstrn11-LW は二酸化炭素の強い吸収があるバンドでま だ精度が十分ではないので、バンド分割も視野に入れ引き続き調整を行う。

十分な精度が得られたところで CKDMIP から提供されている評価プロファイルを用いて評価を行い、放射フラックス、加熱率 に対して精度を検証していく予定である。

- (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.

# 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

# 田村 香子, お茶大・情報科学, E-mail: g1820520(at)is.ocha.ac.jp 神山 翼, お茶大・情報科学, E-mail: tsubasa(at)is.ocha.ac.jp Kyoko Tamura, Department of Information Sciences, Ochanomizu University Tsubasa Kohyama, Department of Information Sciences, Ochanomizu University

# 要旨

惑星規模現象の中でも、今年度は特に「ミランコビッチサイクルに対する南半球環状モードの応答」に関する研究を進めている。特に、産業革命前の気候を境界条件として日射を変化させた実験を行い、大気海洋結合モデル MIROC6を使用してさまざまな条件で実験する予定である。現在は大気大循環モデル部分でのシミュレーション実験 を予備的に行った上で、今後大気海洋結合モデルでの実験を行うための準備をしている。

# 1. はじめに

SAM(南半球環状モード)の日射への応答を調べる研究に取り組んでいる。これを解析するために産業革命前の気候を境界条件として日射を変化させた実験に着手した。

# 2. 問題設定·方法

MIROC6 の CGCM (大気海洋結合モデル)を用いて離心率・地軸の傾き・近日点経度のパラメータを変化させて日射の条件を変え た実験を行う。実験する日射の条件は完新世で南半球が最も温暖であった最終間氷期(12 万 7 千年前)・完新世で北極が最も温 暖であった完新世中期(6 千年前)・現在気候の3種類を予定している。

# 3. 研究の進捗状況と今後の予定

本年度は、まず MIROC6 の使い方を習得するために AGCM (大気大循環モデル) で 1950 年の1 年間のシミュレーション実験を 行った。この実験の出力ファイルを用いて地表面気温を描画することで適切に計算結果を出力できていることを確認した。 現在は、AGCM から CGCM に切り替えた上で境界条件を産業革命前の気候とし、離心率・地軸の傾き・近日点経度のパラメータ を最終間氷期の値に変更して1年間のシミュレーションを行なっている。今後はこの設定で積分時間を 80 年に拡張した実験を 行う予定である。この出力結果から全球平均地表気温、南大洋表層水温、南大洋深層水温を描画することで、SAM は現在と比べ て強化しているのか弱化しているのか・南半球の偏西風は北上しているのか南下しているのかを解析する予定である。

# 参考文献

Kino, K., Okazaki, A., Cauquoin, A., & Yoshimura, K. (2021). Contribution of the Southern Annular Mode to variations in water isotopes of daily precipitation at Dome Fuji, East Antarctica. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 126*(23), e2021JD035397.

# データ同化を用いた古気候復元に関する研究 Study on paleoclimate reconstruction with data assimilation

岡崎 淳史, 弘前大·理工学研究科, E-mail: Atsushi.okazaki(at)hirosaki-u.ac.jp Atsushi Okazaki, Graduate School of Science and Technology, Hirosaki University

#### 要旨

データ同化はモデルシミュレーションと観測を統計的に融合することで最適値を得る。融合は、それぞれの 誤差情報に基づいて行われる。従って、誤差情報を正確に見積もることが、データ同化を用いた結果の成否 を握る。これまでのデータ同化を用いた古気候復元では、観測(気候プロキシ)が持つ誤差について、十分 な注意が払われて来なかった。本研究では、数値気象分野で開発されたイノベーション統計という手法を用 いて、気候プロキシが有する観測誤差の推定を行なった。観測誤差推定の結果、既往研究で用いられてきた 観測誤差は、全ての種類の気候プロキシについて過小であることが明らかになった。さらに、推定された観 測誤差を用いて気候復元を行なったところ、既往研究に比べて復元精度の向上が確認できた。以上から、観 測誤差を推定し、これを用いた古気候復元を行うことで、その精度が向上することが期待される。

#### 1. はじめに

気候の長期的な振る舞いを理解するためには、過去の気候がどのように変化してきたかを調べることが有効である。古気候研 究のアプローチは、地質学的な手がかりを元にするものと、気候モデルを用いるものに大別することができる。これらはそれぞ れ独立して研究が進められてきたが、近年これらをデータ同化により融合する研究が急速に発展している。データ同化は、力学 理論と統計学に基づきモデルシミュレーションと観測を融合することで最適な状態を推定する手法である。データ同化は数値天 気予報やロケット制御などの予測・制御に用いられる成熟した手法である。データ同化を用いた古気候復元により、過去二千年 あるいは最終氷期といった時代の気候変動に関する描像が刷新されつつある (e.g., Tardif et al., 2019; Tierney et al., 2020)。ここで、 データ同化を用いた古気候復元において、気候プロキシが観測の役割を果たす。

データ同化は、モデルシミュレーションと観測を、それぞれの誤差情報に基づいて融合する。したがって、誤差情報の設定が 古気候復元プロダクトの確度を決定する。モデルシミュレーションの誤差(以下、背景誤差と呼ぶ)は、気候システムの内部変 動や、モデルシミュレーションに与える外力の不確実性に起因する。気候モデルが妥当であれば、これらは初期値や外力を少し ずつ変えたアンサンブルシミュレーションで適切に見積もることが可能であり、これまでの古気候研究でもこの手法により背景 誤差を設定してきた。一方、観測誤差は、変動の大きさや"professional knowledge"に基づき設定されることが多く、適切に扱わ れてきたとは言い難い。データ同化における観測誤差は、第一推定値と観測の差で定義されるイノベーションの統計量によって 推定できることが示されており(Desroziers et al., 2005)、数値天気予報分野では頻繁に用いられる。本研究は、イノベーション 統計を用いて観測誤差を推定するとともに、これを用いた場合に古気候復元精度に与える影響を評価する。

#### 2. 問題設定·方法

本研究では、アイスコア・サンゴ・樹木セルロース中に記録された酸素同位体比の観測誤差を推定した。データ同化手法には アンサンブルカルマンフィルタの一つである局所アンサンブル変換カルマンフィルタ(LETKF; Hunt et al., 2007)を用いる。古 気候観測の観測頻度は年程度であり、大気の予測可能性よりもはるかに長いことから、データ同化による推定値をモデル初期値 としては使用しない、いわゆるオフライン同化(Steiger et al., 2014)を用いる。対象期間は、観測データが豊富に存在し、かつ 精度検証が可能な過去150年(1851-2000)である。観測誤差は、観測された値と、誤差のない真の観測値の差で定義されるが、 後者は一般に不可知である。観測誤差推定を検証するため、まず真値および誤差が明らかな系で実験を行う(OSSE 実験)。真値 は MIROC5-iso を用いたシミュレーションとし、観測は真値にホワイトノイズを加えることで作成する。観測分布は Iso2k (Konecky et al., 2020)に倣う。OSSE 実験に加え、実際の気候プロキシを用いる REAL 実験を行い、実環境における評価を行 う。

OSSE 実験・REAL 実験ともに、水同位体の振る舞いを導入した大気大循環モデル MIROC5-iso (Okazaki & Yoshimura, 2017) に観測された外力を与えて走らせた過去再現ランを背景アンサンブルに用いる。観測の時間解像度と整合するよう全ての変数は 年平均値とする。また、復元年にかかわらず用いる背景アンサンブルは同じである。

観測誤差の推定には、Desroziers et al. (2005)によって提案されたイノベーション統計を用いる。推定には、データ同化に用いる第一推定値、観測値、および同化結果である解析値が必要である。実験対象とする過去150年の第一推定値、観測値、解析値を用いて観測誤差を推定する。

# 3. 結果と考察

OSSE 実験で復元を行い、その結果とイノベーション統計を用いて観測誤差を推定した。同化時に与えた観測誤差(R<sub>ini</sub>)に対して、推定した観測誤差(R<sub>est</sub>)は、真の誤差に近づくことが確認された。Fig. 1a では、R<sub>ini</sub>は真の誤差の 16 倍であるが、これ以外の様々な R<sub>ini</sub>に対しても同様の傾向が確認できた。一方、R<sub>ini</sub>が真の誤差から大きく外れている場合、推定誤差 R<sub>est</sub>は真の誤 差に近づくものの、両者には依然として大きな差が残ることも分かった。そこで、推定された観測誤差を用いて再度データ同化 を行い、この結果を元に観測誤差を推定するということを繰り返しおこなった。この結果、繰り返し同化および推定を行うこと で、観測誤差は真の誤差に近づく様子が観察された(Fig. 1b-d)。また、復元精度も繰り返しにより向上することが確認された (Fig. 2a)。これは取りも直さず、観測誤差が真の誤差に近づき推定精度が向上したためである。

続いて、REAL 実験でも同様にデータ同化および観測誤差推定を行った。観測誤差推定の結果、既往研究で用いられてきた観 測誤差は、本研究で対象とする全ての種類の気候プロキシについて過小であることが明らかになった。さらに、推定された観測 誤差を用いて気候復元を行なったところ、Expert knowledge に基づき観測誤差を設定する手法(UNI)や、変動の大きさに基づき 観測誤差を設定する手法(SNR)を用いる既往研究に比べ良い精度で復元できることが確認できた。丁寧にパラメタをチューニ ングすれば既往研究で用いられる手法でも本研究(EST)と同等の精度を達成することができるが、一般にパラメタチューニン グはコストが高い。イノベーション統計により観測誤差を推定し、これを用いた古気候復元を行うことで、その精度が簡便に向 上できることが期待される。





Fig. 1 真の観測誤差Fig. 2 (a) OSSE 実験における同化・推定の繰り返は観測種別を示す。し数と復元精度の関係を示す。R は相関係数、CEする。は Coefficient of Efficienty, RE は Reduction of Error。(b) REAL 実験における復元精度。

# 4. まとめと今後の展望

本研究は、イノベーション統計を用いて気候プロキシが有する観測誤差を推定するとともに、これを用いた場合に古気候復元 精度に与える影響を評価した。観測誤差推定の結果、既往研究で用いられてきた観測誤差は、全ての種類の気候プロキシについ て過小であることが明らかになった。さらに、推定された観測誤差を用いて気候復元を行なったところ、既往研究に比べて復元 精度の向上が確認できた。以上から、本研究で対象とした過去150年以前についても、イノベーション統計を用いて観測誤差を 推定し、これを用いた古気候復元を行うことで、その精度が向上することが期待される。さらに観測誤差情報は、気候プロキシ の信頼性の決定や、より精度の高い観測インパクト推定、またはプロキシシステムモデルの改善に役立つことが期待できる。

- (1) Desroziers et al., 2005: Diagnosis of observation, background and analysis-error statistics in observation space. Q.J.R. Meteorol. Soc., 131, 3385-3396.
- (2) Hunt et al., 2007: Efficient data assimilation for spatiotemporal chaos: A local ensemble transform Kalman filter, 230, 1-2, 112-126.
- (3) Konecky et al., 2020: The Iso2k database: a global compilation of paleo-δ<sup>18</sup>O and δ<sup>2</sup>H records to aid understanding of Common Era climate, Earth Syst. Sci. Data, 12, 2261-2288.
- (4) Okazaki, A., and K. Yoshimura, 2017: Development and evaluation of a system of proxy data assimilation for paleoclimate reconstruction, Clim. Past, 13, 379-393.
- (5) Steiger et al., 2014: Assimilation of Time-Averaged Pseudoproxies for Climate Reconstruction, J. Climate, 27, 1, 426-441.
- (6) Tardif et al., 2019: Last Millennium Reanalysis with an expanded proxy database and seasonal proxy modeling, Clim. Past, 15, 1251-1273.

(7) Tierney et al., 2020: Glacial cooling and climate sensitivity revisited. Nature 584, 569-573

# 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 杜上 和隆, 国立環境研究所, E-mail: murakami.kazutaka(at)nies.go.jp Liu Guangyu, 国立環境研究所, E-mail: liu.guangyu(at)nies.go.jp 山田 恭平, 国立環境研究所, E-mail: yamada.kyohei(at)nies.go.jp Hisashi Yashiro, National Institute for Environmental Studies Yosuke Niwa, National Institute for Environmental Studies Tazu Saeki, National Institute for Environmental Studies Kazutaka Murakami, National Institute for Environmental Studies Liu Guangyu, National Institute for Environmental Studies Kazutaka Murakami, National Institute for Environmental Studies Liu Guangyu, National Institute for Environmental Studies Liu Guangyu, National Institute for Environmental Studies Liu Guangyu, National Institute for Environmental Studies

# 要旨

逆解法を用いた全球 CO<sub>2</sub>吸排出量推定において、温室効果ガス観測技術衛星 2 号(GOSAT-2)の観測から導出した CO<sub>2</sub>カラム量(XCO<sub>2</sub>)データの有効性について、バックグラウンドに位置する地上観測濃度データとの比較を通して評価を行う。GOSAT-2 XCO<sub>2</sub>から推定した大気 CO<sub>2</sub>濃度は地上観測点の季節変動を 0.5 ppm 以下の誤差で再現するとともに、初号機 GOSAT に比べて有効データ数に顕著な改善が見られた。今後の XCO<sub>2</sub> データおよび吸排出量推定手法の改良により、全球 CO<sub>2</sub>吸排出量推定の更なる精緻化が期待される。

#### 1. はじめに

化石燃料消費等の人間活動の影響により、大気中の温室効果ガス(GHG)濃度は上昇を続けている。このGHG濃度上昇に伴い、近年では熱波や旱魃、大雨などの発生頻度・強度が増し、気候変動の影響が顕在化しつつあると同時に、今後の更なる進行が懸念されている。この状況を踏まえ、パリ協定では全ての国が人間活動によるGHG 排出量を削減し、気候変動対策に公平かつ実行的に取り組む新たな国際枠組みが締結された。代表的なGHGである二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)は、化石燃料消費、森林から開発地への転用等の土地利用変化、また森林火災によって大気中へ放出される。大気中へ放出された CO<sub>2</sub>の約半量は陸域・沿岸域の植生と海洋によって吸収される一方で、残りのCO<sub>2</sub>は大気中に蓄積され続けている。GHG 排出削減策の取り組みを評価・検証し、その実効性を確実にしていくためには、排出量インベントリとは独立した、例えば大気濃度観測等を用いた手法による排出削減の評価と、CO<sub>2</sub>等のGHG 吸排出源に関する科学的知見の更なる深化が必要不可欠である。

GHG は各分子の振動数と一致する赤外光の波長域に固有の吸収帯を持っている。温室効果ガス観測技術衛星 GOSAT (2009-) (Yokota et al., 2009) は、地表面から反射される太陽光の短波長赤外域の分光放射輝度をフーリエ変換分光計を用いて宇宙 から測定することで、CO<sub>2</sub>およびメタン(CH<sub>4</sub>)のカラム量全球分布の観測を可能とした。また、この GOSAT カラム量データが、 逆解法を用いた全球炭素収支推定を制約する上で有効な観測データであることも実証された(Maksyutov et al., 2013)。 GOSAT ミッションを引き継ぐ後継機として 2018 年に打ち上げられたのが GOSAT-2 である(Suto et al., 2021)。GOSAT-2 で は、雲の無い領域に視野を向ける機能の追加、衛星の進行方向および垂直方向へのポインティング角の拡大等の改良により、 GOSAT との比較において陸域・海域ともに有効データ数の増加が図られている。本報告書では、GOSAT-2 の観測データから導出 した CO<sub>2</sub> カラム量データ(XCO<sub>2</sub>)を元に推定した全球 CO<sub>2</sub>吸排出量の概要と比較結果について記述する。

# 2. 問題設定·方法

GOSAT-2 は太陽同期準回帰軌道を軌道高度 613 km、回帰日数6日で飛行し、降交点通過時刻は13時である。本研究では、 GOSAT-2 が測定した複数の波長帯データを同時に使用し、雲・エアロゾル等の影響を考慮した上で複数気体(CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, 水蒸 気, 一酸化炭素)のカラム量を同時に導出した FTS-2 SWIR L2 カラム平均気体濃度プロダクト(Ver. 02. 00; Yoshida and Oshio. 2022)を観測データ(2019 年 8 月-2020 年 12 月)に使用した。大気輸送・逆解法システムには NISMON-CO<sub>2</sub>(NICAMbased Inverse Simulation for Monitoring CO<sub>2</sub>; Niwa et al., 2022)を glevel-5 で使用した。地表面フラックス先験値には 6 種類(化石燃料消費、陸域生態系総一次生産量および呼吸量、土地利用変化、森林火災、海洋吸収・放出量)を使用した。

計算処理では、初めに地上観測データ(ObsPack Ver7.0; Masarie et al., 2014)のみを用いて解析対象期間内(2019年10月から2020年10月の13ヶ月間)の事後フラックスを推定し、この事後フラックスから地上観測データに準拠した初期場濃度データを作成した。次に、GOSAT-2 XCO<sub>2</sub>と初期場濃度データとの差分から、解析期間内におけるGOSAT-2 XCO<sub>2</sub>の平均濃度バイアス(陸域・海域別)を算出し、その値を補正項としてGOSAT-2 XCO<sub>2</sub>に加算することで濃度バイアスの補正を行った。その上で再度、初期場濃度データとGOSAT-2 XCO<sub>2</sub>の濃度差を観測点毎に算出し、この濃度差を各観測点の観測誤差とした。GOSAT-2 XCO<sub>2</sub>データには時空間方向に不均一な濃度バイアスが含まれていることが判っており、その対処として上記処理を実施した。上記処理を踏まえ、GOSAT-2 XCO<sub>2</sub>データによる事後フラックスを推定した。また、GOSAT-2 XCO<sub>2</sub>データとの比較実験として、

GOSAT プロジェクトから公開されている、バイアス補正済 GOSAT FTS SWIR L2 カラム平均気体濃度プロダクト (Ver. 02. 97/98; Inoue et al., 2016)を使用し、GOSAT-2 XCO<sub>2</sub>データと同一処理を行った上で、別途、事後フラックスを推定した。 3. 結果と考察

GOSAT-2 XCO<sub>2</sub>データとNISMON-CO<sub>2</sub>から推定した事後フラックスを評価するため、フォワード計算により事後フラックスを大 気 CO<sub>2</sub>濃度場へ変換し、4 地点(Alert (ALT), 82.45°N, 62.51°W; Barrow (BRW), 71.32°N, 156.61°W; South Pole (SPO), 89.98°S, 24.79°W; Mauna Loa (MLO), 19.54°N, 155.58°W)の地上観測データと比較した(Fig. 1)。この4 地点は人間活動の 影響を無視できる場所に立地しており、その観測データはバックグラウンド大気を代表すると考えられる。SPO を除く3 地点 は北半球に位置するため、年前半に CO<sub>2</sub>濃度が上昇し、陸域生態系による吸収が増大する6月前後から濃度が低下し始め、9月 前後に再び上昇へ転じる季節変動を示す。GOSAT-2 XCO<sub>2</sub>データを元に推定した大気 CO<sub>2</sub>濃度変動は、観測データが示す季節変動 を概ね再現している事を示している。両者の濃度差の平均値と標準偏差は、0.3±1.6 (ALT)、-0.3±3.1 (BRW)、0.0±0.2 (SPO)、0.4±1.0 ppm (MLO)であった。これらの値は、バイアス補正済 GOSAT XCO<sub>2</sub>データを元に推定した結果(それぞれ0.1± 1.7、0.0±3.0、-0.2±0.3、0.6±1.0 ppm)と比較して顕著な違いは見られなかった。事後フラックス推定において地上観測



Fig. 1. Seasonal variations of observed (green circles) and simulated (red and blue circles for posteriori fluxes based on GOSAT and GOSAT-2 XCO<sub>2</sub>) CO<sub>2</sub> concentrations at 4 ground-based observation sites, (a) Alert, (b) Barrow, (c) South Pole and (d) Mauna Loa, respectively. Boxes show number of GOSAT (red) and GOSAT-2 (blue) XCO<sub>2</sub> data for a 250 km area encompassing each site for each month.

データに基づく初期場濃度データによる拘束の影響は無視で きないが、上記結果は GOSAT-2 XCO<sub>2</sub>データがバックグラウン ド大気 CO<sub>2</sub>濃度を平均で 0.5 ppm 以下の誤差で再現しうる制 約力を持つこと、また、その濃度の精度はバイアス補正済 GOSAT XCO<sub>2</sub>データと同程度であることを示唆している。

放射輝度強度、雪面や雲の影響等により GOSAT/GOSAT-2 は 高緯度域での有効データの取得数は限定的となる。このため SPO 周辺には観測データが存在せず、ALT および BRW 周辺に おいても夏季の数点から数十点のデータ数に限定される。こ のことは、ALT、BRW、SPO の大気 CO<sub>2</sub> 濃度推定結果はより低緯 度に分布する観測データによって制約されていることを示し ている。一方で、MLO 周辺における観測データ数は GOSAT が 69 点に対し、GOSAT-2 では陸・海域共に有効データが増大し たことにより 231 点と 3.3 倍に増加している。現時点では GOSAT-2 XCO<sub>2</sub>データに内在する不均一なバイアスが事後フラ ックス精度を高める上での障害となっているが、GOSAT に比 べて GOSAT-2 の有効データ数の顕著な増大は、今後期待され る放射輝度スペクトルデータおよびリトリーバル手法の改良 による XCO<sub>2</sub>データ精度向上により、全球吸排出量推定結果を より高めることが期待される。

# 4. まとめと今後の展望

本報告書では、GOSAT-2 XCO<sub>2</sub>データに基づき推定した全球 CO<sub>2</sub>吸排出量事後フラックスについて、大気 CO<sub>2</sub>濃度変動の点から 地上観測データとの比較を行った。GOSAT-2 XCO<sub>2</sub>データはバックグラウンド大気 CO<sub>2</sub>濃度の季節変動を 0.5 ppm 以下の誤差で再 現すると同時に、バイアス補正済 GOSAT XCO<sub>2</sub>データに基づく推定結果と大差ない結果を得ることが出来た。現在の推定手法は 地上観測データに基づく初期場濃度データによる制約の影響が残るが、今後は観測データの誤差定義を見直し、GOSAT-2 XCO<sub>2</sub> データの情報をより多く取り入れていく改良を行なっていく予定である。

- Inoue, M., Morino, I., Uchino, O., Nakatsuru, T., Yoshida, Y., Yokota, T., Wunch, D., Wennberg, P. O., Roehl, C. M., Griffith, D. W. T., Velazco, V. A., Deutscher, N. M., Warneke, T., Notholt, J., Robinson, J., Sherlock, V., Hase, F., Blumenstock, T., Rettinger, M., Sussmann, R., Kyrö, E., Kivi, R., Shiomi, K., Kawakami, S., De Mazière, M., Arnold, S. G., Feist, D. G., Barrow, E. A., Barney, J., Dubey, M., Schneider, M., Iraci, L. T., Podolske, J. R., Hillyard, P. W., Machida, T., Sawa, Y., Tsuboi, K., Matsueda, H., Sweeney, C., Tans, P. P., Andrews, A. E., Biraud, S. C., Fukuyama, Y., Pittman, J. V., Kort, E. A. and Tanaka, T. (2016). Bias corrections of GOSAT SWIR XCO<sub>2</sub> and XCH<sub>4</sub> with TCCON data and their evaluation using aircraft measurement data. Atmospheric Measurement Techniques, 9(8), 3491-3512.
- Maksyutov, S., Takagi, H., Valsala, V. K., Saito, M., Oda, T., Saeki, T., Belikov, D. A., Saito, R., Ito, A., Yoshida, Y., Morino, I., Uchino, O., Andres, R. J., & Yokota, T. (2013). Regional CO<sub>2</sub> flux estimates for 2009-2010 based on GOSAT and ground-based CO<sub>2</sub> observations. Atmospheric Chemistry and Physics, 13(18), 9351-9373.
- Masarie, K. A., Peters, W., Jacobson, A. R., & Tans, P. P. (2014). ObsPack: a framework for the preparation, delivery, and attribution of atmospheric greenhouse gas measurements. Earth System Science Data, 6(2), 375-384.
- Niwa, Y., Ishijima, K., Ito, A., & Iida, Y. (2022). Toward a long-term atmospheric CO<sub>2</sub> inversion for elucidating natural carbon fluxes: technical notes of NISMON-CO2 v2021.1. Progress in Earth and Planetary Science, 9(1), 1-19.
- Suto, H., Kataoka, F., Kikuchi, N., Knuteson, R. O., Butz, A., Haun, M., Buijs, H., Shiomi, K., Imai, H., & Kuze, A. (2021). Thermal and nearinfrared sensor for carbon observation Fourier transform spectrometer-2 (TANSO-FTS-2) on the Greenhouse gases Observing SATellite-2 (GOSAT-2) during its first year in orbit. Atmospheric Measurement Techniques, 14(3), 2013-2039.
- Yokota, T., Yoshida, Y., Eguchi, N., Ota, Y., Tanaka, T., Watanabe, H., & Maksyutov, S. (2009). Global concentrations of CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> retrieved from GOSAT: First preliminary results. SOLA, 5, 160-163.
- Yoshida, Y., and Oshio, H. (2022). GOSAT-2 TANSO-FTS-2 SWIR L2 Retrieval Algorithm Theoretical Basis Document.

# 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 東部北太平洋海洋熱波についての解析 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 Ichiro Yasuda, Tomonori Matsuura, Yusuke Sasaki, Yusuke Kawaguchi Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo

要旨:2022年度は、北東太平洋で近年問題になっている海洋熱波の発生について、温暖化の無い MIROC6高解像度 気候モデル 270年積分データおよび海洋観測データを用いて調べた。年平均水温標準偏差の1.5倍で定義した海洋熱 波に、気候モード数10年規模で変動する PDO や NPGOの変動が関わっていることを、大気海洋結合気候モデルと 海洋観測データ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。2014-2015年に東部北太平洋アラスカ湾において観測史上最大かつ最長の異常高水温 (The Blob)が観測された。この熱波について、中央太平洋エルニーニョからのテレコネクション(DiLorenzo & Mantua 2016)な ど様々な研究がなされている。2022年度では、北東太平洋で近年問題になっている海洋熱波の発生について、温暖化の無い MIROC6高解像度気候モデル 270年積分データおよび海洋観測データを用いて、気候モードとの関係を調べた。

2. 問題設定・方法 用いたモデルデータは海洋 1/4 度の MIROC6subhi (Tatebe 他 2016)の温暖化無し・3 次元潮汐混合を導入した気候モデルの 300 年積分の出力である。また、観測海面水温データセット ErSSTv4 の 1920-2018 でのトレンド除去したアラスカ湾での年平均 SST 偏差を標準偏差で規格化した時系列, 20N 以北北太平洋での SST の EOF 第1モード PDO/第2モード NPGO について気象庁作成時系列データを用いた。また、ここではアラスカ湾での SST 年平均偏差が標準偏差の 1.5 倍を超える高温年(低温年)を熱波(寒波)と定義した。

3. 結果と考察 下図(a)は、モデルでのアラスカ湾の年平均 SST 偏差が標準偏差の 1.5 倍を超える年を熱波年として、270 年 のデータから抽出された 14 例の熱波を熱波年を 0 年としてその前後-3 から+3 年でのアラスカ湾年平均 SST 偏差(GOA), 規格化 した PD0 偏差・NINO3.4 水温偏差・黒潮親潮続流域 SST 偏差(KOE)のコンポジットである。熱波年の数年前から PD0/NPG0 が増加し熱波年前後に極大(NPG0 が約1年先行)をとる他、熱波年前後にエルニーニョが発生する、という傾向が抽出された。 1920 年以降 2018 年の期間のトレンドを除去して、モデルと同様に観測のアラスカ湾年平均 SST 偏差が標準偏差の 1.5 倍を超え る高温年(低温年)を熱波(寒波)として抽出した。図 b の黄色(青矢印)矢印が熱波年(寒波年)である。モデルでは熱波年の前後 で PD0/NPG0 に特徴ある変動が見られたことから、気象庁 PD0/NPG0 指標を規格化し、5 年移動平均をとった時系列を重ねて示し た。1944 年の熱波、および、1976 年の寒波、を除き、熱波年(寒波年)の数年前から PD0/NPG0 が増加(減少)し高極(低極)をとる 傾向があり、モデルに現れた熱波前後の特徴と整合的な特徴を示した。



**4**. **まとめと今後の展望** 温暖化成分を入れない気候モデルに見られる数 10 年スケールで出現する東部北太平洋熱波と気候モードとの関係に基づき、トレンドを除いた SST 変動と気候モードとの関連を整理した。現実の熱波は、このパターンに温暖化が 加わることで、より顕著になっていると考えられる。熱波の予測に対する、気候モードの予測の重要性が示唆される。 参考文献

- (1) Di Lorenzo, E. A., and N. Mantua. (2016), Multi-year persistence of the 2014/15 North Pacific marine heatwave, *Natl. Clim. Change.*, **6**, 1042-1047.
- (2) Tatebe, H., et al. (2019), Description and basic evolution of simulated mean state, internal variability, and climate sensitivity in MIROC6, *Geosci. Model. Dev.*, **12**, 2727-2765.

# MIROC-lite モデルを用いた全球凍結後の海洋循環の理解 Ocean circulation in the aftermath of snowball Earth event revealed by MIROC-lite

# 原田 真理子, 筑波大学・生命環境系, E-mail: harada.mariko.mp@alumni.tsukuba.ac.jp 三川 裕己, 筑波大学・生命地球科学研究群, E-mail: mikawa.yuki.su@alumni.tsukuba.ac.jp Mariko Harada, Faculty of Life and Environmental Sciences, University of Tsukuba Yuki Mikawa, Degree Programs in Life and Earth Sciences, University of Tsukuba

# 要旨

全球凍結イベント(マリノアン氷河時代)後の超温室気候状態における海洋循環と生物地球化学循環を明ら かにするために,MiROC-liteを用いた数値実験を行った.6.35億年前の大陸配置のもとで大気二酸化炭素分 圧を変化させた感度実験からは、当時の大陸配置では南半球で水塊が沈み込む熱塩循環が卓越し、温暖化に よりこれが強化することが示された.また、温暖かつ塩分成層した状態を初期条件として時間発展させた数 値実験から、全球凍結イベント終了直後には熱塩循環が数千年間停滞し、この間、海洋表層における一次生 産が通常の半分程度にまで抑制される可能性があることがわかった.

# 1. はじめに

全球凍結イベントは、全球が低緯度まで氷に覆われる大規模な氷河時代である.全球凍結イベントは地球史において少なくと も3回生じたと考えられており、全球凍結イベントと同時代には大気酸素濃度の上昇や生物進化を示す地質記録・化石記録が産 出することが知られている.全球凍結中は全球平均気温が-40℃にも低下する一方で、全球凍結から脱出した直後の気候は全球 平均気温が50℃に達する超温室状態へと一時的に遷移する(e.g., Hoffman and Schrag 2002; Tajika 2003).ボックスモデルを用い て当時の生物地球化学循環を推定した数値実験からは、超温室気候下で大陸地殻の風化が促進されるため、海洋に大量の栄養塩 が供給されて酸素発生型光合成生物の活動が活発化し、大気酸素濃度の急上昇が起こることが示唆された(Harada et al. 2015). しかしながら、全球凍結脱出後には海洋循環が停滞する可能性があり(Yang et al. 2017; Ramme and Marotzke 2022),このような 海洋循環の変動はボックスモデルによる計算では考慮されていない、全球凍結イベントと大気酸素濃度変動や生物進化との関係 性を正しく評価するには、超温室気候下における海洋循環の変化や、その生物地球化学循環への影響を評価することが不可欠で ある.

# 2. 問題設定·方法

本研究では、MIROC-lite (Oka et al. 2011)を用いて、原生代後期に生じた全球凍結イベント(マリノアン氷河時代)終了直後の超温室気候状態を模擬した数値実験を行った.異なる大気二酸化炭素分圧における海洋循環の定常状態を解析するとともに、 氷床の融解により生じる成層状態を初期条件として、時間発展させる実験を行なった.それぞれの実験を「定常実験」および 「Transient 実験」をよぶ.すべての実験において、当時の大陸配置および太陽光度を境界条件として用いた.定常実験では、二 酸化炭素分圧を目的の値に固定し、定常状態に達するまで 3000 年間の時間積分を行った後、最後の 100 年間の平均値を解析 した. Transient 実験では、二酸化炭素分圧を 70000 ppm に固定し、初期条件として海洋が高温・低塩分の表層と低温・高塩分 の真相に成層した状態を与え、9000 年間の時間積分を行った.これらの実験から、全球凍結後の超温暖環境における海洋循環お よび生物地球化学循環を解析した.

# 3. 結果と考察

定常実験では二酸化炭素分圧を 1500 ppm から 0.3 bar の範囲で変化させ、各気候条件における定常状態を調べた.その結果、 当時の大陸配置と太陽光度では、現在と同程度の全球平均気温(約15 ℃)を実現する二酸化炭素分圧は 10000 ppm であること、 さらにこの条件では、南北の両半球の高緯度で水塊の沈み込みが起こり、特に南半球高緯度域の大陸の縁辺で沈み込む熱塩循環 が卓越することが分かった (Fig.1).各二酸化炭素分圧条件において、南半球と北半球それぞれの子午面流線関数の最大値を求 めたところ、南半球の子午面流線関数の最大値は二酸化炭素分圧が高いほど増加する傾向が見られた (Fig.2).すなわち、南半 球で卓越する熱塩循環は温暖化により強化されることが示唆される.塩分の成層状態を初期条件として与えた Transient 実験か らは、全球凍結脱出直後は循環が弱化することが示された (Fig.3).循環の弱化にともなう海洋表層への栄養塩供給の停滞によ り、輸出生産も通常の半分程度まで大きく低下する (Fig.3).熱塩循環は 3000 年程度停滞するが、およそ 9000 年で完全に回復 し、輸出生産も熱塩循環の回復にやや遅れて回復することがわかった.

# 4. まとめと今後の展望

MIROC-lite を用いた数値実験により, 6.35 億年前の全球凍結イベント前後の大陸配置では南半球で水塊が沈み込む熱塩循環 が卓越し,温暖化によりこれが強化される可能性があることが示された.また,氷床が融解により生じる塩分成した状態を初期 条件として時間発展させた数値実験の結果から,全球凍結イベント終了直後には熱塩循環が約 3000 年間停滞し,海洋表層にお ける一次生産が抑制されることもわかった.今後は,平均気温の上昇が熱塩循環を強めるメカニズムを明らかにすることが必要 である.加えて,大陸風化による海洋への栄養塩の流入や,堆積物への有機物の埋没フラックスは本研究では計算されていない ことにも留意する必要がある.これらの効果は,本研究で使用したモデルを改良することで検証可能であり,今後の課題である.



Fig. 1. 流線関数を全球で平均した子午面断面図. 陰影と等値線は流線関数の強度 (Sv) を表す. 負の値が紙面に 対して反時計回り,正の値が紙紙面に対して時計回りの循環 を表す. 濃紺線および水色線で囲まれた領域は,南半球と北半 球それぞれにおいて子午面流線関数の最大値を探索した領域 を示す.



Fig. 3 南半球の子午面流線関数の強度および輸出生産の時間 発展.

左縦軸に南半球の子午面流線関数最大値(Sv),右縦軸に輸出 生産,横軸に Transient 実験の積分時間(year)を表す.子午 面流線関数最大値の探索領域はFig.1およびFig.2に準ずる.

# 参考文献

- (1) Hoffman, P. F., and D. P. Schrag, 2002: The Snowball Earth hypothesis: Testing the limits of global change. Terra Nova 14, 129-155.
- (2) Tajika, E., 2003: Faint young Sun and the carbon cycle: implication for the Proterozoic global glaciations. Earth Planet. Sci. Lett., 214, 443-453.
- (3) Harada, M., E. Tajika, and Y. Sekine, 2015: Transition to an oxygen-rich atmosphere with an extensive overshoot triggered by the Paleoproterozoic snowball Earth. Earth Planet. Sci. Lett., 419, 178–186.
- (4) Yang, J., M. F. Jansen, F. A. Macdonald, and D. S. Abbot, 2017: Persistence of a freshwater surface ocean after a snowball Earth. Geology, 45, 615–618.
- (5) Ramme, L., and J. Marotzke, 2022: Climate and ocean circulation in the aftermath of a Marinoan snowball Earth. Clim. Past., 18, 759–774.
- (6) Oka, A., E. Tajika, A. Abe-Ouchi, and K. Kubota, 2011: Role of ocean in controlling atmospheric CO2 concentration in the course of global glaciations. Clim. Dyn., 37, 1755–1770.



Fig. 2. 各気候状態(二酸化炭素分圧 1500 ppm-0.3 bar) にお ける平均子午面流線関数の強度と全球平均気温(Surface Air Temperature; SAT)の散布図.

縦軸に Fig.1 で示した領域における子午面流線関数の最大値 (Sv)を,横軸に全球平均気温(℃)を表す.

# 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,海洋研究開発機構, E-mail: y-masuda(at)jamstec.go.jp 山中 康裕,北大・地球環境, E-mail: galapen(at)ees.hokudai.ac.jp Yoshio Masuda, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology 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。従来のモデルの多くでは、植物プランクトンの炭素・窒素比 (CN 比)は Redfield 比で固定されていたが、本研究で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)ことによって、CN 比が変化するメカニズムが導入されている。昨年度までに行 った実験によって、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。本年度はこの結果を論文化 し、Limnology and Oceanography Letters 誌 (2021 年の IF: 8.5)で公表した。

#### 1. はじめに

海洋の植物プランクトンの炭素・窒素比(CN比)は、光合成によって固定される炭素と供給される窒素の比であり、地球の 炭素循環と窒素循環を繋げる役割を担っている。もし、将来の気候変動に伴って、植物プランクトンのCN比が変わると、海洋 に吸収される炭素の量が変わる。よって、植物プランクトンのCN比が決まる生物学的なメカニズムを解明することは、地球環 境の将来予測に非常に重要である。従来の海洋生態系モデルでは植物プランクトンのCN比は一定値(Redfield比)に固定され ていたが、観測研究は植物プランクトンのCN比がRedfield比から大きくずれることを示している。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<sup>-1</sup>の範囲で変化する。植物プランクトンのCN比は環境によって変化し、栄養塩濃度の 減少・光強度の増加に伴って増加する。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。

Pahlow(2005)は環境への馴化によって植物プランクトンの CN 比が決まるという理論を提唱した。この理論によると、植物プランクトンの体内リソースは葉緑体形成(炭素の獲得)・栄養塩吸収(窒素の獲得)・構造体形成の3つに対して配分され、何かにリソースを割くと他がしわよせを受ける。リソース配分は与えられた環境下で成長速度を最大にするように決まる。Pahlowの理論からは、多数の培養実験から得られた Droopの経験則が導出できる。Droopの経験則では植物プランクトンの CN 比が大きくなると、成長速度が下がり、最大 CN 比( $Q_0^{-1}$ )では成長速度が0になる。 $Q_0$ は観測から決まるが、その値は種によって大きく異なり、0.038~0.13 molN molC<sup>-1</sup>の範囲でばらつく。 $Q_0$ は、Pahlowの理論ではパラメータとして与えられる。我々は $Q_0$ の種による違いが、同一環境下における植物プランクトン種間の CN 比の違いに決定的な役割を果たしていると考えた。

# 2. 問題設定·方法

本研究で解く問題は、Pahlow 理論によって CN 比が決まるメカニズムが培養実験・現場観測の結果を説明できるかどうかである。

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 (2005)、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。標準実験( $Q_0=0.8$  molN molC<sup>-1</sup>)の積分期間は 1985年から2004年であり、最終年の結果を観測と比較した。 $Q_0 \ge 0.04 - 0.13$  molN molC<sup>-1</sup>の範囲で変えたパラメータ実験は、標 準実験の2003年1月1日の結果を初期値として2年間計算を行い、2004年の結果を解析に用いた。

# 3. 結果と考察

Pahlowの理論では、葉緑体形成(炭素の獲得)にリソースを割くと栄養塩吸収(窒素の獲得)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120m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、鉛直平均した植物プラン クトンの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った。これは粒子状有機物の 現場観測から得られたCN比の分布と整合的である。

 $Q_0$ を変えたパラメータ培養実験を行い、全海洋における CN 比の頻度分布を計算した。 $Q_0=0.04 \text{ molN molC}^{-1}$ の種(主に珪藻)

の CN 比は 6.0~25.0 molC molN<sup>-1</sup>の値を持ち、 $Q_0$ = 0.13 molN molC<sup>-1</sup>の種(主にトリコデスミウム)は 2.5~7.7 molC molN<sup>-1</sup>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<sup>-1</sup>)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、比較的高い $Q_0$ (0.09 molN molC<sup>-1</sup>周辺)を持つシネココッカスの 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。

更に我々は植物プランクトンの CN 比の全球平均が Redfield 比に一致するかどうかを考察した。本来は、 $Q_0$ の異なる様々な 種の CN 比と種の相対頻度から全球平均を計算する必要があるが、ここでは単純化して、全植物プランクトン種で平均した $Q_0$ から植物プランクトン CN 比の全球平均を概算した。 $Q_0$ が低い(0.038~0.7 molN molC<sup>-1</sup>) 珪藻や緑藻の方が、 $Q_0$ が高い(0.08~0.13 molN molC<sup>-1</sup>) シネココッカスやトリコデスミウムより豊富に存在するため、全植物プランクトン種で平均した $Q_0$ は 0.08 molN molC<sup>-1</sup>より低くなると推定される。 $Q_0$ =0.08 molN molC<sup>-1</sup>の実験では、植物プランクトン CN 比の全球平均は 8.4 molC molN<sup>-1</sup>である。植物プランクトン CN 比の全球平均は $Q_0$ が下がると増加し、 $Q_0$ は 0.08 molN molC<sup>-1</sup>以下と考えられることから、Redfield 比(6.6 molC molN<sup>-1</sup>)より植物プランクトン CN 比の全球平均は高くなると考えられる。この結果は、現場観測で植物プランクトンの CN 比が粒子状有機物の CN 比より顕著に高いことを示した研究(Martiny et al., 2013; Talmy et al., 2016)と整合的である。

#### 4. まとめと今後の展望

Pahlow の理論を海洋生態系モデルに導入し、培養実験で得られたQ<sub>0</sub>でモデルを拘束することで、培養実験における植物プランクトンの CN 比の変動範囲、種による CN 比の違いを説明できた。また、海洋観測で得られた粒子の CN 比の空間パターンについても Pahlow の理論で説明できることを示し、全種間で平均した植物プランクトンの CN 比は Redfield 比より高くなることを示した。

近年、CN 比の変動を組み込んだ海洋生態系モデルが世界中で開発されている。CN 比の変動が海洋の炭素吸収に及ぼす影響 は IPCC の AR7 で重要なトピックとなると予測する。CN 比の計算方法は大別すると二つの方法があり、あるモデルは我々のよ うにメカニスティックな理論に基づいて計算しており、別のモデルは経験則から計算している。経験則から植物プランクトンの CN 比を計算するモデルは、現場観測で得られた粒子の CN 比と硝酸塩濃度の関係に基づいて植物プランクトンの CN 比を計算 しているが、植物プランクトンの CN 比の光強度依存性が考慮されていない等の問題がある。我々のモデルは、植物プランクト ンの CN 比=粒子の CN 比という仮定を用いていない、植物プランクトン種間の CN 比の違いを培養実験で得られたQ<sub>0</sub>の違いに 基づいて表現できる、Droop の経験則に忠実、という特徴があり、これらの特徴が将来の CN 比の変化予測の精度を高めるのに 重要な役割を果たすと考えている。

2022 年 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、気象研の海洋大循環モデル MRI.com に組 み込んでいた次世代海洋生態系モデルを地球システムモデルの海洋大循環モデルである COCO に移植する仕事を行っている。 更に、炭素循環モデルとの結合、窒素固定を行う植物プランクトンの導入、リン循環の導入といった海洋生態系モデルの改良を 行うため、しばらくはモデル開発に専念する見込みである。

- (1) Martiny, A. C., J. A. Vrugt, F. W. Primeau, M. W. Lomas, 2013: Regional variation in the particulate organic carbon to nitrogen ratio in the surface ocean. Global Biogeochemical Cycles, 27, 723-731. doi:10.1002/gbc.20061
- (2) 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. Communication Earth & Environment, 2, 128. https://doi.org/10.1038/s43247-021-00201-y
- (3) Masuda, Y, Y. Yamanaka, S. L. Smith, T. Hirata, H. Nakano, A. Oka, H. Sumata, M. N. Aita, 2023: Acclimation by diverse phytoplankton species determines oceanic carbon to nitrogen ratio. Limnology and Oceanography Letters, https://doi.org/10.1002/1012.10304
- (4) Pahlow, M., 2005: Linking chlorophyll-nutrient dynamics to the Redfield N:C ratio with a model of optimal phytoplankton growth. Marine Ecology Progress Series, 287, 33-43.
- (5) 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
- (6) 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
- (7) 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
- (8) Talmy, D., A. C. Martiny, C. Hill, A. E. Hickman, M. J. Follows, 2016: Microzooplankton regulation of surface ocean POC:PON ratios. Global Biogeochemical Cycles, 30, 311-332. doi:10.1002/2015GB005273

# 準備中

# 20. 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

# MIROC と NICAM を用いた地球型惑星におけるスノーボール状態突入条件の解明 Understanding the condition of Snowball state for terrestrial planets using MIROC and NICAM

小玉 貴則, 東大・総合文化・先進 E-mail: koda(at)g.ecc.u-tokyo.ac.jp 高須賀 大輔, JAMSTEC (現:大気海洋研), 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 (AORI) Takeshi Kuroda, Tohoku University Fuyuki Saito, JAMSTEC

# 要旨

地球史の中で過去に少なくとも3回あった全球凍結イベントは、気候進化の重要な問題である だけでなく、生命の進化に対しても重要な意味を持つ。しかしながら、それぞれの全球凍結イベ ントにおける、太陽放射、二酸化炭素濃度、大陸配置は異なるため、全球凍結イベントを引き起 こしたトリガーは未だ明らかでない。加えて、全球凍結イベントを再現するシミュレーションの 例は少なく、その物理場も十分に理解されているとは言えない。よって、この課題では、古気候 実験で実績のある MIROC4m を用いて、全球凍結状態における気候場を調べた。結果として、太 陽放射に関しては、全球凍結状態への突入条件は先行研究とおおよそ同じ値となった。しかし、 全球凍結後の数値計算がうまくいかない問題が見られ、次の課題とした。

# 1. はじめに

地球史の中で、最も大規模に環境が変化したイベントの1つに地球表層が全球的に凍結した『スノーボールイベント』が挙げ られる。本現象は、約25億年前、約7億年前、約6億年前に少なくとも3回発生し、大規模な気候変動をもたらした。それぞ れのイベント間で継続期間は大きく異なるが、イベント前後で、大気組成の変化を伴う気候進化や生態系の大きな変化があった ことが知られている。しかし、その原因や『どのような気候の推移だったか?』など、多くの議論が残っており、地球気候進化 を議論する上で、大きな課題である。しかしながら、先行研究におけるスノーボール状態のシミュレーション例は多くなく、十 分に理解されているとは言えない。特に、長期積分を要する、海洋循環の推移などに関して、その物理場を記述したものはなく、 長期気候進化の観点から議論が残っている状況である。

# 2. 問題設定·方法

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

# 3. 結果と考察

結果としては、先行研究で示されたような、約90%の太陽放射において、全球凍結に突入するという結果が得られた。スノー ボール突入後においても、全球を覆うような十分に厚い海氷であってもモデルが安定して動作し、数百年程度の積分が可能にな るところまで実施できた。

# 4. まとめと今後の展望

本年度は、スノーボール状態の再現とモデル整備に時間をかけたため、多くの実験は行なっていない。そのため、大陸分布な どの他の気候決定要因について調べることができなかった。また、地球気候システムの推移を検討する上で重要な海洋の役割に 関しては、数千年の長期積分が必要となるため、今後の課題として残っている。

# 放射対流平衡系における雲の自己組織化シミュレーションの

# 解像度・領域サイズ依存性

# Resolution and domain size dependence of cloud self-aggregation simulations in radiative-convective equilibrium systems

# 橋本 恵一, 東大・理学系研究科, E-mail: khashimoto@eps.s.u-tokyo.ac.jp 三浦 裕亮, 東大・理学系研究科, E-mail: h\_miura@eps.s.u-tokyo.ac.jp Keiichi Hashimoto, School of Science, The University of Tokyo Hiroaki Miura, School of Science, The University of Tokyo

雲解像領域モデルの水平格子間隔を 4000 m として、さまざまな大きさの正方形領域において放射対流平 衡実験を行った。200 km 四方の正方形よりも小さな領域において系は一時的な組織化を示すが、時間が経 過すると散在状態に回帰して定常状態に到達する。より大きな領域サイズでは系は定常的に組織化状態を維 持する。対流は東西南北波数1または東西・南北いずれかの方向に波数1の構造を好み、構造の長さスケー ルは領域サイズに対して一定の倍率を保って変化した。

# 1. はじめに

放射冷却による成層の不安定が鉛直対流や地表面フラックスによってバランスされる系を「放射対流平衡系」と呼ぶ。雲解像 モデルを用いた放射対流平衡実験において、水平均一な初期条件および境界条件のもとで対流が自発的に局所化する現象が知ら れている(Held et al., 1993)。このような「対流の自己組織化」の発生はモデルの解像度や実験領域の形状・大きさに依存し、 一般に、自己組織化にはある閾値より大きな領域が必要となる(Muller & Held, 2012)。Yanase et al. (2020)は水平解像度 500 m から 4000 m の範囲について自己組織化発生の領域サイズ依存性を調査し、水平解像度 2000 m のとき組織化に必要 な領域サイズが急峻に変化することを見出した。また Hung and Miura (2021)は水平解像度 2000 m の条件でアンサンブル 実験を行い、組織化の発生が確率的となることを発見した。本研究では雲解像シミュレーションとしては比較的粗い水平解像度 4000 m の場合について、実験領域の大きさと対流の振る舞いとの関係を調べた。

# 2. 方法

理化学研究所が開発している大気モデル Scalable Computing for Advanced Library and Environment (SCALE; Nishizawa et al., 2015; Sato et al., 2015) を利用した領域モデル SCALE-RM で水平格子間隔を 4000 m に設定し、放射対流平 衡実験を行った。実験領域は 100,144,200,240,300 km 四方の正方形として、水 平境界では二重周期境界条件を課した。その他の実験設定は RCE Model Intercomparison Project (RCEMIP; Wing et al., 2018) に準拠している。

# 3. 結果と考察

はじめに 100,144,200,240,300 km 四方の領域サイズそれぞれで 50 日間の放 射対流平衡シミュレーションを実施した。組織化の程度の指標として可降水量の標 準偏差の時間変化を調べた(図1)。領域サイズが 100,144 km のとき、系は一時 的に組織化したあと散在状態に戻った。一方で領域サイズが 200,240,300 km の とき、系は 50 日間にわたって組織化状態を維持していた。

上記の結果を受けて、組織化発生の閾値に近いと考えられる領域サイズ 200 km の条件について、100 日積分×5 本のアンサンブル実験を行った。この結果、5 メンバーすべてで系は一時的に組織化したあと散在状態に遷移した。組織化の崩壊が 確定的に発生する事象は先行研究で報告がなかったため、ここでは散在状態への移行プロセスを詳細に調査した。

領域サイズ 200 km 実験のうちの 1 メンバーに関して、 Hung and Miura (2021)に従って、自由対流圏 (0-1 km)と境界層 (1-10 km)における水蒸気の 水平自己相関長を計算した(図2)。この図から、散在状態に移行する際は自由対流 圏の長さスケールに先行して、境界層の長さスケールが縮小していることがわか る。水蒸気の水平収束に関する PW rank-height 図(図3)は、散在状態への移行 が境界層における乾燥領域下部への水蒸気流入によって引き起こされることを示 唆している。

200 km 四方の正方形領域を用いた実験で組織化状態が崩れたことから、より大きな 500 km 四方の実験領域について長期間積分を実施し、水平 4000 m 解像度 で系が組織化した定常状態に達することを確認した。積分開始 30 日程度で系は組



図1 水平格子間隔を 4000 m、実験領域 を 100,144,200,240,300 km 四方の正 方形とした放射対流平衡実験における可 降水量の標準偏差の時間変化。



図2 水平格子間隔を 4000 m、実験領域 を 200 km 四方の正方形とした放射対流 平衡実験の自由対流圏(橙)と境界層(藍) における水蒸気の自己相関長の時間変化。



図3 図2と同じ実験について、左から順に積分開始後26-30,31-35,36-40日目で時間平均した水蒸気水平収束をPW rankheight 座標に示した(シェード)。また実線は時計回りの、点線は反時計回りの有効流線関数を表す。

織化状態に達し、領域を南北に縦断する一本の帯状のドライパッチが出現した。こ のときモデル上端では東西方向に強い水平風が発生し、この水平風によって積分開 始後 220 日程度で組織化状態は破壊された。モデル上端にナッジングをかけた場 合、系は 250 日を超えて組織化状態を維持した。

本研究で実施した実験のうち水平領域サイズ 200 km 以上のものでは、水蒸気の水平自己相関長はしばしば、実験領域の一辺の長さの 0.4 倍にトラップされていた(図4)。また水平領域サイズ 240 km 以上の場合には 0.6 倍にまで成長し頭打ちとなっていた。前者は領域内に単一の円形ドライパッチが存在する状態に、また後者は一本の帯状のドライパッチが存在する状況に対応している。このことから、水平格子間隔が 4000 m で領域サイズが 500 m 以内の放射対流平衡シミュレーションにおいては、対流は東西南北または東西・南北いずれかの波数 1 の構造で安定することがわかった。構造の大きさは原則的に領域サイズにスケールするが、240 km 四方よりも大きな領域では円形ドライパッチを帯状に変化させてより大きな長さスケールを確保する場合もある。



図4 本研究で実施した各実験での、自由 対流圏における水蒸気の水平自己相関長 の時間変化をまとめた。自己相関長は実験 領域の一辺の長さに対する割合で表示し ている。

# 4. まとめと今後の展望

領域大気モデル SCALE-RM の水平格子間隔を 4000 m として放射対流平衡実験を行い、対流の自己組織化の領域サイズ依存性 を調べた。200 km 四方の正方形領域よりも小さい場合には、系は実験開始直後の初期応答として自己組織化するものの、境界 層におけるドライパッチ下部への水蒸気の流入によって再び散在状態に回帰する。より大きな 500 km 四方の正方形領域にお いては、系は定常的に組織化状態を維持することが確認された。

組織化状態で出現する対流の構造は、実験領域に対して東西南北波数1の円形ドライパッチか、東西・南北いずれかの方向に 波数1の帯状ドライパッチで安定となる。240 km 四方の正方形よりも小さな実験領域においては主に前者が発生し、それより も大きな実験領域では後者が好まれるようになった。なお今回の正方形領域においては波数1の帯状構造よりも大きな長さスケ ールの構造をとることはできない。

今後は散在状態への遷移において水蒸気の流入を引き起こすトリガーを明らかにし、また Muller and Held (2012) で主張されている「自己組織化のヒステリシス」と、今回の結果との関係を検討する必要がある。

- Held, I. M., Hemler, R. S., & Ramaswamy, V. (1993). Radiative-Convective Equilibrium with Explicit Two-Dimensional Moist Convection. Journal of Atmospheric Sciences, 50(23), 3909–3927. https://doi.org/https://doi.org/10.1175/1520-0469(1993)050<3909:RCEWET>2.0.CO;2
- Hung, C. S., & Miura, H. (2021). Ensemble of Radiative-Convective Equilibrium Simulations Near the Aggregated and Scattered Boundary. Geophysical Research Letters, 48(20), e2021GL095279. https://doi.org/10.1029/2021GL095279
- Muller, C. J., & Held, I. M. (2012). Detailed Investigation of the Self-Aggregation of Convection in Cloud-Resolving Simulations. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 69(8), 2551–2565. https://doi.org/10.1175/JAS-D-11-0257.1
- Nishizawa, S., Yashiro, H., Sato, Y., Miyamoto, Y., & Tomita, H. (2015). Influence of grid aspect ratio on planetary boundary layer turbulence in large-eddy simulations. *Geoscientific Model Development*, 8(10), 3393–3419. https://doi.org/10.5194/GMD-8-3393-2015
- Sato, Y., Nishizawa, S., Yashiro, H., Miyamoto, Y., Kajikawa, Y., & Tomita, H. (2015). Impacts of cloud microphysics on trade wind cumulus: which cloud microphysics processes contribute to the diversity in a large eddy simulation? *Progress in Earth and Planetary Science*, 2(1), 1–16. https://doi.org/10.1186/S40645-015-0053-6/FIGURES/11
- Wing, A. A., Reed, K. A., Satoh, M., Stevens, B., Bony, S., & Ohno, T. (2018). Radiative-convective equilibrium model intercomparison project. Geoscientific Model Development, 11(2), 793–813. https://doi.org/10.5194/GMD-11-793-2018
- 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(16), e2020GL088763. https://doi.org/10.1029/2020GL088763

# 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

亜熱帯の大陸西岸沖で卓越する下層雲は、太陽放射を強く反射するため、正味で冷却効果を持つ。このため、 気候系における下層雲の役割は、主に海面水温(SST)を局所的に低下させる効果が強調されており、正の下 層雲-SST フィードバックとしてよく知られている。しかしながら、大気海洋相互作用を通じて、下層雲が非 局所的に大気海洋循環場に与える影響については未解明な点が多い。本研究は、大気海洋結合モデルで下層 雲の放射影響を人為的に除去することで、カリフォルニア沖下層雲が北太平洋の気候に与える影響を評価し た。下層雲は、カリフォルニア沖 SST を局所的に下げるのみならず、地表亜熱帯高気圧を強化することが示 された。 この SST と海上風の応答は、風-蒸発-SST (WES) フィードバックを通じて、南西方向に拡大する。 また、この亜熱帯高気圧強化に伴う高気圧性風応力カールの注入は、海洋ロスビー波の西方伝播を通じて、 北西太平洋域に正の海面高度応答をもたらす。この遠隔影響に伴う黒潮強化は、SST 昇温による上向き乱流 熱フラックス強化を通じて、黒潮周辺の降水量を増加させる。本研究は、カリフォルニア沖下層雲が大気海 洋相互作用を通じて東アジアを含む北太平洋広域の気候に影響することを示唆するものである。

#### 1. はじめに

カリフォルニア沖の北東太平洋では、亜熱帯高気圧に伴う下降流と冷たい海面水温(SST)の影響で下層雲が卓越している (e.g., Klein and Hartmann 1993)。下層雲は、高い反射率を持つ一方長波放射には大きな影響を与えないため、正味で強い冷 却効果を持ち、地球の放射収支に強く影響する。日傘効果とも呼ばれるこの下層雲の局所的な冷却効果は、大気海洋相互作用を 通じて領域気候の形成・変動において重要な役割を果たす。特に、下層雲によって低下した SST は直上の下層雲を維持するよう に働くため、正の大気海洋結合フィードバック(下層雲-SST フィードバック)としてよく研究がなされてきた (e.g., Norris and Leovy 1994)。しかしながら、下層雲が大気海洋循環場に対して非局所的に与える影響については未解明な点が多い。雲頂 長波放射冷却や SST 低下を通じた亜熱帯高気圧や貿易風強化が過去に指摘されているものの、簡易モデルを用いた概念的な研究 が殆どであり、大気海洋結合モデルを用いた研究は少ない。本研究は、大気海洋結合モデルにおいて、下層雲の放射効果を人為 的に除去することで、カリフォルニア沖の下層雲が北太平洋の気候に与える影響の全体像を示すことを目的とする。

# 2. 実験設定

大気海洋結合モデル GFDL CM2.1 (Delworth et al. 2006)を用いて,感度実験を行った。大気モデルの解像度は経度2.5°×緯度2°,鉛直24層である。海洋モデルは,鉛直は50層で,水平は1°解像度だが,赤道で緯度1/3°解像度となるように緯度30°から徐々に高解像度となる。このモデルは,カリフォルニア沖下層雲や亜熱帯高気圧をよく再現する。まず,標準実験(CM\_CTL)として,外部強制を1990年に固定した実験を十分なスピンアップの後,110年積分した。次に,感度実験として,下層雲の放射効果を局所的に除去した実験(CM\_NoCRE 実験)を行った。具体的には,図1aの黒枠内のカリフォルニア沖において,680hPaから地表の雲量を0%として放射計算を行いながら110年積分する。本研究では,最後の年の11月までの100年を解析した。下層雲の放射影響は,CM\_CTL気候値からCM\_NoCRE気候値を引くことで評価した(以後,応答と呼ぶ)。

#### 3. 結果と考察

図1は下層雲の放射効果に対する年平均の海上風と海面水温の応答を示している。下層雲の日傘効果の影響で,黒枠の下層雲 領域で最大-3度程度のSST 負応答が見られる。しかしながら,その負応答は,黒枠内にとどまらず,南西側に広がっているこ とが分かる。この負応答の拡大は,+2hPaの高気圧応答(図1b)に伴う北東貿易風の強化(図1a)と対応しており,風-蒸発-SST (WES)フィードバック(Xie and Philander 1994)に伴ってSST が低下していると考えられる。つまり,WESフィードバックを 通じて下層雲に対する非局所応答がもたらされていることが分かった。

この結合応答の季節性を調べると、特に大気応答が夏から秋に強いことが分かった。このメカニズムは、以下のように説明さ

れる。日射量の多い春から夏にかけて、下層雲による短波冷却が負の SST 応答を強める。成長した負の SST 応答は、気候学的に SST の高い夏から秋にかけて、熱帯内収束帯(ITCZ)の北への拡大を阻害することで、降水量を減少させる。これに伴う非断熱 冷却偏差に対する第一傾圧的な松野ギル応答が、地表の亜熱帯高気圧を強化し、WES フィードバックを通じて南西へ結合応答が 拡大する。大気応答の顕著な季節性は、南インド洋での同様の実験結果とも整合的である(Miyamoto et al. 2021, 2022)。

また、夏から秋の強い大気第一傾圧応答に伴って、ハワイ周辺では鉛直シアーが強まる。鉛直シアーは、WES フィードバック により生じた負の SST 応答とともに、ハワイ周辺でのハリケーン発生を抑制する。実際、ハリケーンの発生頻度とよく相関する Genesis Potential Index (GPI; Camargo et al. 2007)を用いた解析から、鉛直シアーの強化応答と、SST 負応答に起因する中 層相対湿度の負応答及び Maximum Potential Intensity (MPI; Emanuel 1988)の弱化応答がハワイ周辺の GPI 負応答をもたら していることが分かった。これは、下層雲がハワイをハリケーン襲来から防ぐように働いていることを示唆する。

さらに、亜熱帯高気圧の強化(図1)は北太平洋亜熱帯ジャイアを加速するように働いていることが分かった。これに伴い、 黒潮は約30%加速される。結果、黒潮とその続流域周辺に正のSST応答が生じ、上向き乱流熱フラックスが強化される。この海 洋からの熱強制により、黒潮周辺では30%程度年平均降水量が増加することが分かった。これは、下層雲が海洋循環を通じて、 北西太平洋域にも影響することが示唆される。



Fig. 1 カリフォルニア沖下層雲の放射効果に対する年平均応答(CM\_CTL−CM\_NoCRE)。(a) SST(<sup>o</sup>C, 陰影),海上風(m/s, 矢, 赤 と青はそれぞれ信頼度 99%で風速強化と減少)。(b) SLP(0.4hPa おき,赤と青はそれぞれ正値と負値,零線は省略,陰影は信頼 度 99%)。(a)の黒枠は, CM\_NoCRE 実験で下層雲を透明にした領域を示す。

# 4. まとめと今後の展望

本研究は、大気海洋結合モデルで下層雲の放射効果をカリフォルニア沖で除去することで、カリフォルニア沖下層雲が北太平 洋の気候に与える影響を実証した。下層雲に対する負の SST 応答は、下層雲領域にとどまらず、WES フィードバックを通じて、 南西側へ拡大することが分かった。これに伴う亜熱帯高気圧強化は、夏から秋に強いという季節性を持つ。また貿易風強化に付 随する鉛直シアー強化は、SST 低下とも相まって、ハワイ周辺のハリケーン発生を抑制することが示唆された。一方、亜熱帯高 気圧強化は、北太平洋亜熱帯ジャイアを加速するように働き、黒潮を約 30%加速させる。これに伴う正の SST 応答によって、黒 潮周辺では 30%程度年平均降水量が増加することが分かった。

本研究は、下層雲が大気海洋相互作用を通じて北太平洋広域の気候に影響することを強く示唆している。同様の応答は、下層 雲による冷却効果を強化するジオエンジニアリング研究などでも見られており(Baughman et al. 2012)、本研究はその物理的 な解釈を与える。また、本研究は、気候変動・変化における下層雲フィードバックの役割(e.g., Yang et al. 2023)にも示唆 を与えるものであり、気候モデルにおける再現性とともに、さらなる研究の発展が期待される。

- Baughman, E., A. Gnanadesikan, A. Degaetano, and A. Adcroft, 2012: Investigation of the surface and circulation impacts of cloud-brightening geoengineering. J. Climate, 25, 7527-7543.
- (2) Camargo, S. J., K. A. Emanuel, and A. H. Sobel, 2007: Use of a genesis potential index to diagnose ENSO effects on tropical cyclone genesis. *J. Climate*, **20**, 4819-4834.
- (3) Delworth, T. L., and Coauthors, 2006: GFDL's CM2 global coupled climate models. Part I: Formulation and simulation characteristics. *J. Climate*, **19**, 643–674.
- (4) Klein, S. A., and D. L. Hartmann, 1993: The seasonal cycle of low stratiform clouds. J. Climate, 6, 1587-1606.
- (5) Miyamoto, A., H. Nakamura, T. Miyasaka, and Y. Kosaka, 2021: Radiative impacts of low-level clouds on the summertime subtropical high in the south Indian Ocean simulated in a coupled general circulation model. J. Climate, 34, 3991–4007.
- (6) Miyamoto, A., H. Nakamura, T. Miyasaka, and Y. Kosaka, 2022: Wintertime weakening of low-cloud impacts on the subtropical high in the south Indian Ocean. *J. Climate*, **35**, 323–334.
- (7) Norris, J. R., and C. B. Leovy, 1994: Interannual variability in stratiform cloudiness and sea sur- face temperature. *J. Climate*, **7**, 1915–1925.
- (8) Xie, S.-P., and S. G. H. Philander, 1994: A coupled ocean-atmosphere model of relevance to the ITCZ in the eastern pacific. *Tellus*, **46A**, 340-350.
- (9) Yang, L., S.-P. Xie, S. S. P. Shen, J.-W. Liu, and Y.-T. Hwang, 2023: Low cloud-SST feedback over the subtropical Northeast Pacific and the remote effect on ENSO variability. *J. Climate*, **36**, 441-452.

# 準備中

# 24. 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