# 共同研究報告書

令和元年度

東京大学 大気海洋研究所 気候システム研究系

# 目 次

令和元年度共同研究報告書の発行にあたって

令和元年度共同研究応募及び配分一覧

# 【特定共同研究】

1.	雲解像モデルを用いた雷モデルの開発と高度化・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
2.	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・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
3. 全 <sup>:</sup>	全球雲解像モデルの開発及びデータ解析 球非静力学モデルの高度化および気象予測研究への応用・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
4.	海洋深層における乱流拡散のパラメタリゼーション・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
5.	雲解像モデルにおける物理過程の高度化・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
6.	統合陸域シミュレータILS の検証・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
7.	気象研究所共用海洋モデルの時間積分スキーム更新・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
8.	全球雲解像モデルの開発及びデータ解析・・・・・18
9.	アジアモンスーンの数値シミュレーションのための物理過程の高度化とデータ同化手法の開発・・・・・・・20

【一般共同研究】

1. 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・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
2. 陸面モデルの積雪スキームの高度化及びデータ解析(継続)・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
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・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・25
4. NICAM 及び MIROC モデルを用いた地球惑星大気の物質輸送と気候変動の研究・・・・・・・・・・・・27
5. 気候変動現象の形成メカニズムと塩分が果たす役割・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
6. 惑星中層大気大循環の力学・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
7. トッテン棚氷の海洋シミュレーション・・・・・33
8. アジアモンスーン降水の将来変化と海面水温変化バターンとの関係・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
3. 衛生時小レーチと静止衛生高頻及戦例を組みられた時がアメチムのワイクサイクルに関する研究・・・・・35 10. 海洋循環一低次牛熊系結合モデルを用いた魚類牛息環境場の比較研究・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
11. 衛星データ活用による全球炭素収支推定に向けた大気輸送モデル開発研究・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
12. 放射収支算定のための放射スキームの高速・高精度化・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
13. 大気海洋マルチスケール変動に関する数値的研究・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
14. 全球雲解像モデルデータを用いた熱帯雲活動の解析・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
15. 数値モデルを用いた東アジア大気循環の変動力学の探究・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・47
16. 非静力学海洋モデルの汎用化と OGCM とのシームレスな接続・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
17. トランスバースラインの観測的および理論的研究・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・51
18. 次世代海洋生態系モデルを用いた気候変動が海洋生態系に与える影響の予測・・・・・・・・・・53
19. 海洋における循環・水塊形成・輸送・混合に関する数値的研究:アナディール冷水帯発生過程についての観測と モデリング・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・

令和元年度共同研究報告書の発行にあたって

令和元年度の終盤から、世界は新型コロナウィルスの蔓延という思わぬ災禍に見舞われま した。そしてその間にも地球温暖化に伴う気候変動は着々と進行しています。近年、豪雨、巨 大台風、猛暑などの極端現象による災害が多発し、気候変動との関係が指摘されています。 現在、日本は暖候期を迎え、今年は感染症との複合災害も危惧されています。国連国際防 災戦略(UNISDR)によると、1998 年から 2017 年の 20 年間の自然災害による世界の経済損 失額は 325 兆円と見積もられており、そのうち気候変動によるものは 77%を占めると報告さ れています。特に日本は国土の狭さにも拘わらず、国別にみると、米国、中国に次ぐ3位の、 20 年間に約 43 兆円という経済損失を気候変動と関連した自然災害から被っており、気候変 動の影響を受けやすい地域にあることが示されています。

本共同研究は、「気候」に係るシームレスな現象のメカニズム解明および予測に関して幅広 いテーマで参加いただいています。気候の成り立ちと気候変動を語るには、微物理スケール から古気候スケールまで様々な時空間スケールの現象の相互作用解明、同化やプロセス研 究を通じた、衛星などの新しい観測データと数値モデル研究の融合等、様々なアプローチが 必要です。本共同研究が、そのための場を提供し、気候システムの理解と気候変動対策へ の一助となれば幸いです。

令和2年6月

東京大学大気海洋研究所 気候システム研究系 系長 高薮 縁

# 令和元年度 気候システムに関する共同研究 応募及び配分一覧

研究									気	候系		配 分	↑ 額	
区分	研	究	課	題	研	究 組	織		   教	1当 2 <u>月</u>	ノード時間	消耗品 千円	旅 費 千円	合 計 千円
特定 研究 1	全球雲解像モ	デルの開発			北海道大学大学院理学研究院 東京大学理学系研究科 富山大学都市デザイン学部 名古屋大学太陽地球環境研究科	佐	<ul><li>陽祐</li><li>前 裕亮</li><li>第 単平</li></ul>	特任准教授 准教授 准教授 特別研究員	佐藤	正樹	40,000	0	0	0
特定 研究 2	<ol> <li>①衛星データ 過程の研究</li> <li>②全球雲解像</li> </ol>	と数値モデ モデルの開	ルの融合) 発及びデ <sup>、</sup>	こよる雲の素 ータ解析	国立環境研究所 北海道大学大学院理学研究院	五藤 佐藤	<ul><li>大輔</li><li>陽祐</li></ul>	主任研究員 特任准教授	鈴木 佐藤	健太郎 正樹	100, 000	0	0	0
特定 研究 3	全球雲解像モ	デルの開発	及びデー	夕解析	海洋研究開発機構 埼玉県環境科学国際センター 海洋研究開発機構 海洋研究開発機構 理化学研究所計算科学研究センタ	那 須 山 田 町 町 町 町 町	〔野 智江 政之   洋平 ; 満寿 ] ; 尚	<ul> <li>主任研究員 研究員 ポストドクトラル研究員</li> <li>技術研究員 研究員</li> </ul>	佐藤	正樹	40,000	0	0	0
特定 研究 4	<b>海洋モデルに</b> パラメータ化	おけるサブ	グリッド	現象の	東京大学大学院理学系研究科 九州大学応用力学研究所	日田永高福柳張大		<ol> <li>教授</li> <li>助教</li> <li>特任研究員</li> <li>大学院生</li> <li>大学院生</li> <li>大学院生</li> <li>大学院生</li> <li>助教</li> </ol>	羽角	博康	200, 000	0	0	0
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 奥川	: 数明   椋介	教授 修士課程2年生	佐藤	正樹	90, 000	100	120	220
特定 研究 6	統合気候・環 ジュールの開	境モデルの 発	素過程モ	デル・モ	東京大学生産技術研究所 東京大学IR3S 東京大学生産技術研究所 東京大学工学系研究科社会基盤学専	芳村 沖 Kim 山峪 新日 日 り 月 文 竹 島	· 圭 大幹 Hyungju F 大 F 友子 誤野 硯 沢	准教授 教授 特任准教授 准教授 特任助教 5 助教 博士課程学生	木本	昌秀	4,000	0	0	0
特定 研究 7	世界海洋大很	環モデルの	相互比較		気象庁気象研究所	中野 辻野 坂本 浦川	; 英之 ; 博之 ; 圭   昇吾	主任研究官 室長 主任研究官 主任研究官	羽角	博康	34, 560	0	0	0
特定 研究 8	全球雲解像モ	デルの開発	及びデー	タ解析	筑波大学計算科学研究センター	田中 松信 石山	□ 博 □ 匠 □ 涼太	教授 院修士2年 院修士1年	佐藤	正樹	0	60	5	65
特定 研究 9	高分解能大気 発	モデル及び	領域型気	<b>侯モデルの開</b>	気象庁予報部数値予報課	坂荒米佐下今松上鍋		予報官 予報官 調查官 技術専門官 技術主任 技官 技官 技官	木本	昌秀	16, 000	0	0	0

# 令和元年度 気候システムに関する共同研究 応募及び配分一覧

研究										• • •			気	医糸		配 分	新	
	研	究		課	題			研	究	組	織		1 担	日二		消耗品	旅費	合計
<u>区分</u> 一般 研究 1	大型大気レー 的に用いた中	ダーと全3 層大気大行	球高解 循環の	屛像度モ )階層構	デルを相補 造の解明	東京大学	大学院理学获	系研究科		佐藤 高 原 新	薫 正史 優一 大	教授 助教 大学院生 大学院生	木本	【目 目秀	<u>ノート時间</u> 100,000	<u>一 一 円</u> 0	<u></u> 0	<u>一 千円</u> 0
一般 研究 2	陸面モデルの 解析(継続)	積雪スキー	-LO	)高度化	及びデータ	北海道大学 WDB株式会	学大学院工 <sup>4</sup> 社	学研究院		安成渡邉	哲平 達博	助教 技術補助員	阿部	彩子	1, 500	0	120	120
一般 研究 3	気候変動予測 環モデルの料	の不確実 緻化	性低调	ばに 資す	る海洋大循	海洋研究	開発機構			建 小 黒 草 波 辺	洋 樹	主任技術研究員 技術研究員 特任技術研究員 研究員 特任研究員	羽角	博康	300, 000	0	0	0
一般 研究 4	NICAM及びMII 物質輸送と気	0Cモデル 候変動の	を用 v 研究	た地球	惑星大気の	東北大学	大学院理学科	研究科		寺 笠 早 中 rade	直 康 忠 広 Khatr 朝 成	教授 教授 教授 助教 i 助教 客員研究者 大学院生	佐藤阿部	正樹 彩子	100, 000	0	85	85
						情報通信码 京都産業ス 大阪府立ス	研究機構 大学 大学			笠井 黒田 前澤山	康剛 英 史 夫 之 輝	上席研究員 主任研究員 准教授 准教授 士学院生						
一般 研究 5	気候変動現象 役割	の形成メ	カニス	ベムと塩	分が果たす	東京大学	大学院理学	系研究科		案 東 家 下 田 楠	<u>八</u> 輝 知己 晶一郎 壱学 秀大	<u> </u>	木本	昌秀	20,000	0	0	0
一般 研究 6	惑星中層大気	大循環の	力学			九州大学师	芯用力学研究	究所		山本	勝	准教授	佐藤	正樹	2,000	0	70	70
一般 研究 7	トッテン棚対	の海洋シ	ミュレ	<b>/</b> ーショ	ン	北海道大学	学低温科学研	研究所		中山 青木	佳洋 茂	助教 准教授	阿部	彩子	8,000	30	120	150
一般 研究 8	アジアモンス 化パターンと	ーン降水の の関係	の将来	突化と	海面水温変	首都大学到	東京			高橋 神澤	洋 望	助教 大学院生(博士課程)	渡部	雅浩	2,000	60	30	90
一般 研究 9	衛星降水レー わせた降水シ 研究	ダと静止( ステムの <sup>5</sup>	衛星高 ライフ	高頻度観 ┚サイク	測を組み合 ルに関する	富山大学⇒ 富山大学⇒	大学院理工学大学院理工学	学研究部 学教育部		濱田 内木	篤 詩歩	准教授 修士2年生	高裘	<b>反</b> 禄	200	40	120	160
一般 研究 10	海洋循環-低 生息環境場の	次生態系統 比較研究	結合モ	デルを	用いた魚類	東京大学 水産研究	大気海洋研 ・ 教育機構	究所		伊藤井 金 幕瀬	進一 孝 院 親 殿	教授 特任研究員 特任研究員 大学院生 グループ長	羽角	博康	51,840	0	0	0
一般 研究 11	衛星データ活 た大気輸送モ	用による デル開発	全球炭 研究	专素収支	推定に向け	国立環境研	研究所			齊藤 丹羽 佐村上		主任研究員 主任研究員 高度技能専門員 特別研究員	佐藤	正樹	5,000	0	0	0
一般 研究 12	放射収支算定 精度化	のための	放射ス	ィキーム	の高速・高	東京海洋ス	大学			関口 大方	美保 めぐみ	准教授 博士研究員	鈴木	健太郎	500	50	22	72
一般 研究 13	大気海洋マハ 究	チスケー	ル変重	かに関す	る数値的研	<ul> <li>北海道大省 北海道大省 北海道大省 北海道大省 北海道大省 北海道大台 北海道大台</li> </ul>	学大学院理 <sup>4</sup> 学大学院地球 学大学院理 <sup>4</sup> 学大学院理 <sup>4</sup> 学大学院理 <sup>4</sup>	学研究院 <sup>求</sup> 環境科学 学研究院 学院 学院	研究院	稲松堀見勝丹 津村之延山治	將 伸治 亡士郎 祐太河	教授 博士研究員 准教授 教授 大学院生 大学院生	木本	昌秀	60, 000	0	0	0
一般 研究 14	全球雲解像モ 解析	デルデー	タを月	引いた熱	帯雲活動の	• 福岡大学	理学部			西第	憲敬	教授	佐藤	正樹	0	0	100	100
一般 研究 15	数値モデルを 学の探究	用いた東江	アジア	了大気循	環の変動力	東京大学会	<b>先端科学技</b> 行	<b>術研究セン</b>	ノター	中 小 田 坂 口 坂	尚 優 文明 貴文	教授 准教授 特任准教授 特任助教	渡部	雅浩	50,000	0	0	0
一般 研究 16	非静力学海洋 レスな接続	モデルの	汎用化	くと OGCM	とのシーム	東京大学 東京海洋 Scripps I 北海道大 <sup>4</sup>	大気海洋研究 大学 Institutior 学低温科学研	究所 n, UCSD 研究所		松 大 橋 村 山	義     義       等     太       第     太       約     4	助教 特任研究員 JSPS海外特別研究員 講師 大学院生	羽角	博康	50,000	0	80	80
一般 研究 17	気候モデル・ 気研究	全球雲解	像モラ	ドルを用	いた熱帯大	東京大学	大学院理学	系研究科		三神松神山	裕翼修拓 一 武 武	准教授 ポストドクトラル研究員 大学院生 大学院生 大学院生	渡部	雅浩	200, 000	75	0	75
一般 研究 18	次世代海洋生	態系モデ	ルを用	目いた気	候変動が海	北海道大学	学地球環境和	科学研究院	完	増田 山中	良帆 康裕	博士研究員 教授	岡	顕	25,000	0	0	0
一般 研究 19	海洋における	循環・水	塊形成	<del>、</del> 輸送	・混合に関	東京大学	大気海洋研究	究所		安田 川口 李 柏 矢部	一郎 悠介 表宗 いつが	教授 助教 特任研究員 、大学院生D2	羽角	博康	6,000	0	0	0
I		特	F	定	<u>共</u> 同	合	計				9	件			524, 560	160	125	285
			-	<u> 対</u> 又	兴 问	<u> </u>	市 工 手				19				982,040	255	141	1,002
		Î	1			I	1				40				т, эоо, юоо	410	012	1, 207

# 雲解像モデルを用いた雷モデルの開発と高度化

# Development of lightning component based on cloud resolving model

# 要旨

本研究では次世代気象気候ライブラリ SCALE に雷を直接扱う雷コンポーネントを実装した。また開発した 数値モデルを用いて台風に関する理想実験を行い、台風周辺で発生する雷発生頻度にエアロゾルが与える影 響を評価した。数値実験の結果から、エアロゾルの数濃度は台風の強度には影響は小さいが、発雷頻度には 大きな影響を与えることが示唆された。同時に、数値実験で計算される雷の特性に決定的な影響を及ぼす雲 微物理モデルの高度化を目指して、詳細雲微物理モデルの検証を行った。

#### 1. はじめに

雷は高度に電子化された現代社会において、大きな被害をもたらすため、その精度良い予測が求められている。しかしながら 日々の数値天気予報に用いられる数値気象モデルをはじめとした、ほとんどの数値気象モデルは、雷を直接扱う計算には対応し ていない。また一部の数値モデルで雷を直接取り扱った計算が行われているが(Mansell et al. 2005 など)、計算コストが高く 広く用いられていない。この高い計算コストのために、雷を直接扱った気象モデル(以下、気象雷モデル)の実行は主に大型計 算機によって行われる。そのため気象雷モデルを開発するにあたっては、雷という現象の再現性のみならず大型計算機での性能 が出ることを考慮した開発が必要になる。そこで本研究では、大型計算機で性能が出るように設計された次世代の気象気候ライ ブラリ(Scalable Computing for Advanced Library and Environment: SCALE, Nishizawa et al. 2015, Sato et al. 2015) に雷モデルを実装して、大型計算機で実行可能な気象雷モデルの開発を行った。次に開発された気象雷モデルを用いて台風を対 象とした理想化実験を行い、台風の周辺で発生する雷の雷頻度と、台風内部の電荷構造にエアロゾルが与える影響を評価した。

同時に雷と密接に関係する雲粒の電荷は、積乱雲内であられを主成分とする水物質の衝突によって生じると考えられるため (Takahashi 1978)、雷モデルの開発とともに、雲微物理モデルの高度化も進める必要がある。そこで、本研究では雲微物理モデ ルの高度化にも取り組んだ。

これらの研究に用いる SCALE の雲微物理モデルは全球雲解像モデル NICAM のそれと同じものであり、上記の一連のよって得ら れた知見は近い将来 NICAM に還元することが可能である。また、詳細雲微物理モデルによって得られた雲微物理モデルの高度化 に関する知見は、バルク法をはじめとする既存の雲微物理モデルの改良のために有益な知見となり、NICAMの改良に資する知見 とすることができる。

#### 2. 問題設定·方法

まず雷モデルを実装した SCALE を用いた台風の理想実験について記述する。実験設定は Miyamoto and Takemi (2013)に従い、 西インドで観測された気象場の鉛直プロファイルを水平一様で 3000 km 四方の計算領域に与え、初期に領域の中心に渦を置いて 実験を行なった。外力として、一定のコリオリカ(f=10<sup>5</sup> s<sup>-1</sup>)と海水温一定(300 K)の地表面からの潜熱・顕熱フラックス を与え、放射の効果は無視した。空間解像度は5 km、鉛直解像度は 200 m から 1040 m (下層ほど細かい) で、高度 21 km まで を 40 層に分割した。積分時間は台風が定常に達する 196 時間まで行い、最後の 24 時間のみを解析した。雲微物理モデルはダブ ルモーメントバルク法 (Seiki and Nakajima 2014: SN14) を用いた。エアロゾルの感度を調べるために、エアロゾルの濃度を 変化させて感度実験を行なった。SN14では活性化する雲粒数濃度(Necn)を

 $N_{ccn} = N_0 s^k$ 

(1)のように与える。ここで s は過飽和度、k は定数(=0.462)、M は過飽和度 1% での雲凝結核である。この Noを 10 cm<sup>-3</sup>、100 cm<sup>-3</sup>、1000 cm<sup>-3</sup>と変化せて実験

を行なった。なお、Seiki and Nakajima (2014)のデフォルトは N = 100 cm<sup>-3</sup> であり、この実験を以下ではCTL実験と呼ぶ。実験設定の詳細はSato et al. (2019)を参照されたい。

また雲微物理モデルの高度化には、Hashino et al. (2007)によって開発さ れた詳細な雲微物理モデル Spectral Ice Habit Prediction System (SHIPS) を Kinetics Driver (KiD: Shipway and Hill, 2012)に実装し、KiD で提供さ れている線状降水帯(スコールライン)の実験設定で、水平 200 km、鉛直 12 km の計算ドメイン(水平解像度 750 m、鉛直解像度 250 m)にて、数値実験を行 い、計算初期に与える鉛直流の速度の最大値を 3、5、10、15、120 m s<sup>-1</sup>と変 化させて実験を行い、計算される氷粒子の特性を調べた。

#### 3.結果と考察

まず台風を対象とした理想実験の結果について述べる。図1は雷を実装した



Fig. 1: Horizontal distribution of (shade) LWP+IWP and (yellow contour) lightning frequency. Contour means 1 lightning per 30 minutes.

陽祐, 北海道大学・理学研究院, E-mail: yousuke.sato@sci.hokudai.ac.jp 佐藤 裕亮, 東京大学·理学系研究科, E-mail: h\_miura@eps.s.u-tokyo.ac.jp 三浦 濱田 篤, 富山大・学術研究部, E-mail: hamada@sus.u-toyama.ac.jp 端野 典平,高知工科大学環境理工学群,E-mail: hashino.tempei@kochi-tech.ac.jp

SCALE によって再現された台風とその周辺で発生する雷の水平分布を表す。本研究を通して開発された気象雷モデルを用いることでこのような雷の水平分布を数値実験によって得ることが可能となった。図2は計算の最後24時間で平均した水物質の電荷密度のz = R断面である(zは高度、Rは台風中心からの距離を示す)。エアロゾル数密度を変化させることで、電荷密度の分布が大きく変化している。CTL実験と $N_0 = 10$  cm<sup>-3</sup>の時は、電荷の鉛直分布は下層から正→負→正という三極構造を示しているのに対し、 $N_0 = 1000$  cm<sup>-3</sup>の時は負→正の二極構造となっていた(エアロゾルが多い時に二極構造となる原因についてはSato et al. (2019)で詳細に議論されている)。このように電荷密度が二極構造の時は、電荷密度の三階微分で求められる電場が三極構造の時に比べて大きくなる。またモデルの中では電場が大きいほど雷が発生しやすくなる。そのため、 $N_0 = 1000$  cm<sup>-3</sup>の時はそれ以外の時に比べ10倍程度大きくなっていた。一方、エアロゾルが台風の強度に与える影響は小さかった(図は非表示)。

次に SHIPS を実装した KiD での数値実験では、スコールラインの断面にできるレーダー反射因子の構造を再現できていること が確認できた。また上昇流による感度を調べたところ、上昇流が強い場合にはあられの密度が小さくなること、柱状結晶の最大 粒径が大きくなることが確認された。

# 4. まとめと今後の展望

本研究では雷を直接扱うコンポーネントを SCALE に実装して、台風を対象とした数値実験を行なった。実験の結果から、台風 内部の電荷分布にエアロゾルの数密度が大きな影響を与え、それによって、台風周辺で発生する雷の頻度にもエアロゾルの数密 度が大きな影響を与えていることが明らかになった。これらの内容は Sato et al. (2019)として公開済みである。今後は定常 状態のみならず、計算開始から定常に至るまでの台風のライフサイクルと発雷頻度の関係について調査を行う。また、理想実験 で行ってきた実験を現実事例に拡張して数値実験を行なっていく。

また雲モデルの高度化を目指して KiD に実装した SHIPS を用いた数値実験を行い、SHIPS で計算される雲粒子の形状や密度な どについて解析を行った。今後は数値実験の結果からレーダー反射因子やドップラー速度を計算して、衛星やレーダーとの観測 と比較を行う。

- Mansell et al. 2005: Charge structure and lightning sensitivity in a simulated multicell thunderstorm, J. Geophys. Res., 110, D12101, doi: 10.1029/2004JD005287
- (2) Nishizawa et al. 2015: Influence of grid aspect ratio on planetary boundary layer turbulence in large-eddy simulations, Geosci. Model Dev., 10, 3393-3419
- (3) Sato et al. 2015: Impacts of cloud microphysics on trade wind cumulus: which cloud microphysics processes contribute to the diversity in a large eddy simulation?, Prog. Earth Plan. Sci., 2(1), doi:10.1186/s40645-015-0053-6
- (4) Takahashi 1978: Riming Electrification as a Charge Generation Mechanism in Thunderstorms, J. Atmos. Sci., 35, 1536-1548
- (5) Sato et al. 2019: Large dependency of charge distribution in a tropical cyclone inner core upon aerosol number concentration, Prog. Earth Plan. Sci., 6(1), doi: 10.1186/s40645-019-0309-7
- (6) 市来康介 2020: "深い対流雲における上昇流と氷粒子の特性の関係",高知工科大学卒業論文,27pp.
- (7) Miyamoto and Takemi 2013: A Transition Mechanism for the Spontaneous Axisymmetric Intensification of Tropical Cyclones, J. Atmos. Sci., 70, 112-129.
- (8) Seiki and Nakajima, 2014: Aerosol Effects of the Condensation Process on a Convective Cloud Simulation, J. Atmos. Sci., 71, 833-853.
- (9) Hashino et al. 2007: The Spectral Ice Habit Prediction System (SHIPS). Part I: Model description and simulation of the vapor deposition process. J. Atmos. Sci., 64, 2210-2237.
- (10)Shipway and Hill, 2012: Diagnosis of systematic differences be- tween multiple parametrizations of warm rain microphysics using a kinematic framework. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 138(669), 2196-2211



Fig. 2: Vertical distribution of charge density simulated by SCALE with (a)  $N_0 = 10 \text{ cm}^{-3}$ , (b)  $N_0 = 100 \text{ cm}^{-3}$ , and (c)  $N_0 = 1000 \text{ cm}^{-3}$ . The value was tangentially averaged during last 24 hours of the simulation.

# 大気粒子と短寿命気体及び雲との相互作用に関するモデリング研究

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

# 五藤 大輔, 国立環境研究所, E-mail: goto.daisuke(at)nies.go.jp 佐藤 陽祐, 北海道大学大学院理学研究院・地球惑星科学部門, E-mail: yousuke.sato(at)sci.hokudai.ac.jp Daisuke Goto, National Institute for Environmental Studies Yousuke Sato, Faculty of Science, Department of Earth and Planetary Sciences Hokkaido University

### 要旨

全球雲解像モデル NICAM と結合した大気汚染物質輸送モデルである NICAM-Chem を用いて、世界最高解 像度レベルの全球 14km 解像度で3年間積分したエアロゾル場の検証および解析を実施した。高解像度計算 (High-Resolution Model; HRM)との比較のために、全球 56km 解像度(Low-Resolution Model; LRM)の NICAM-Chem の実験結果も用いることで、高解像度計算を行うことによるメリットを考察した。HRM は LRM より も時空間変動のばらつきを表現できることが定性的には考えられているが、定量的に示されたことはない。 そこで本研究では、HRM 結果の検証の一つとして、エアロゾル・雲・降水に関して、全球規模で時空間変動 のばらつきに着目した。その結果、HRM と LRM の時空間ばらつきの全球年平均値の比を見積もると、エア ロゾルが2程度であり、雲・降水は3程度の値となることがわかった。またアマゾンなどエアロゾル-雲-降 水に関係する極端現象の再現が重要である地域では特に高解像度計算が重要であることも示された。

### 1. はじめに

大気中に浮かぶ粒子(大気粒子、あるいは、エアロゾル)は、大気環境だけではなく、気候にも影響を与えている。本研究では、主に用いられる全球雲解像モデル(NICAM)に結合したエアロゾル化学統合モデル(NICAM-Chem)を用い、モデル内で取り扱われている大気粒子とその前駆気体である短寿命気体との相互作用に着目したエアロゾル化学の精緻化と、エアロゾルと雲の相互作用に関するモデリングの高度化を行うことを目的としている。

## 2. 問題設定·方法

全球雲解像モデル NICAM と結合した大気汚染物質輸送モデルである NICAM-Chem を用いて、世界最高解像度レベルの全球 10km スケールで安定した全球エアロゾルシミュレーションが行えることを目指し、本年度は全球 14km 解像度で 3 年間積分し たエアロゾル場の検証および解析を実施した。高解像度計算(High-Resolution Model; HRM) との比較のために、全球 56km 解像 度(Low-Resolution Model; LRM)の NICAM-Chem の実験結果も用いることで、高解像度計算を行うことによるメリットを考察 した。ただし、計算資源の制約上、6 時間毎の出力は追計算で実施したため、1 年分しか計算できなかった。

# 3. 結果と考察

図1は HRM と LRM の2 つの異なる解像度の NICAM-Chem で計算したエアロゾル光学的厚さ (Aerosol Optical Thickness; AOT)、高度 2km における雲凝結核 (Cloud Condensation Nuclei; CCN) 濃度、水雲の光学的厚さ (Cloud Optical Thickness; COT)、降水量の時空間変動性を示している。エアロゾルに関する類似研究は過去にも行われているが、対象地域が限定的であり (Lin et al., 2017)、全球規模で調べられた例はない。Lin et al. (2017)では、2008 年 10 月の1 ヶ月間を対象とし、南太平洋上でのエアロゾル濃度の変動を調べたところ、大気境界層では 15%程度、自由対流圏では 50%程度の時空間変動性があることがわかった。本研究では全球を対象に1年間の時空間変動性を調べたところ、HRM では 28.5%、LRM では 16.6%と求められ、Lin et al. (2017)とも矛盾しなかった。高度 2km における CCN の変動性は、HRM では 7.6%、LRM では 4.1%となり、AOT よりも値が小さかった。これは、NICAM-Chem で計算された CCN 濃度が一般的な観測に比べて過小評価であることが要因の一部である。雲・降水はサブグリッド変動に大きく影響されることが知られている (例えば Pincus et al., 1999)。本研究での計算結果は全球年平均値で、COT は HRM で 80.0%、LRM で 22.9%となり、降水量は HRM で 216.2%、LRM で 77.9%と計算された。これらの値はエアロゾルの値よりもかなり大きく、HRM とLRM の相対的な比をみると、1.7 (AOT), 1.9 (CCN), 3.5 (COT)、2.8 (降水量)と見積もられた。また、アマゾンでは値が大きく、エアロゾルー雲-降水に関係する極端現象の再現が重要である領域では、特に高解像度モデルが重要であることも示された。



Fig 1 Global distributions of the ratio of the standard deviation to the average for the (a,b) AOT, (c,d) CCN at a height of approximately 2 km, (e,f) COT and (g,h) precipitation in  $1^{\circ}\times1^{\circ}$  grids using the 6-hourly output of both the HRM and the LRM for a 1-year integration period. All units are in %. The transparency represents lower absolute values of each parameter: AOTs of <0.1 in panels (a,b), CCN of <40 cm<sup>-3</sup> in panels (c,d), COTs of <5 in panels (e,f), and precipitation fluxes of <1 mm day<sup>-1</sup> in panels (g,h). This figure is referred from Figure 14 in Goto et al. (2020).

# 4. まとめと今後の展望

高解像度モデルの利用によって、高い時空間変動を示す現象を捉えることができる。今後は、他の物理量の検証も行い、特に エアロゾルと雲の相互作用が強い事例に注目し、その現象理解を深めていきたい。

- Goto, D., Sato, Y., Yashiro, H., Suzuki, K., Oikawa, E., Kudo, R., Nagao, T. M., and Nakajima, T.: Global aerosol simulations using NICAM.16 on a 14-km grid spacing for a climate study: Improved and remaining issues relative to a lower-resolution model, Geosci. Model Dev. Discuss., https://doi.org/10.5194/gmd-2020-34, in review, 2020.
- (2) Lin, G., Qian, Y., Yan, H., Zhao, C., Ghan, S. J., Easter, R., and Zhang, K.: Quantification of marine aerosol subgrid variability and its correlation with clouds based on high-resolution regional modeling, J. Geophys. Res. Atmos., 112, 6329-6346, doi:10.1002/2017JD026567, 2017.
- (3) Pincus, R., McFarlane, S. A., and Klein, S. A.: Albedo bias and the horizontal variability of clouds in subtropical marine boundary layers: Observations from ships and satellites, J. Geophys. Res., 104, D6, 6183-6191, 1999.

# 全球雲解像モデルの開発及びデータ解析

# 全球非静力学モデルの高度化および気象予測研究への応用

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

那須野 智江,海洋研究開発機構, E-mail: nasuno(at)jamstec.go.jp 中野 満寿男,海洋研究開発機構, E-mail: masuo(at)jamstec.go.jp 山田 洋平,海洋研究開発機構, E-mail: yoheiy(at)jamstec.go.jp 原 政之,埼玉県環境科学国際センター, E-mail: mikikoi(at)jamstec.go.jp 八代 尚,国立環境研究所, E-mail: yashiro.hisashi(at)nies.go.jp Tomoe Nasuno, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology Masuo Nakano, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology Yohei Yamada, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology Masayuki Hara, Center for Environmental Science in Saitama Hisashi Yashiro, National Institute for Environmental Studies

#### 要旨

世界的な対流活発域である海大陸を特徴づける日周期変動の再現は、気候・気象モデルにとって挑戦的な課題である。この課題へのアプローチとして、Years of the Maritime Continent (YMC,海大陸研究強化年) 集中観測期間を対象とする、全球非静力学モデルNICAM (7 km 格子)と領域高解像度モデル (UK Met Office UM, 4.4 km 格子)の予測計算データの比較解析を行った。2つのモデルは物理過程など多くの点において異 なるが、どちらも海陸の降水日周期の特徴や、対応する地表風の収束発散場の変動を概ね再現していた。但 し、陸上の日周期変動には差異が顕著に見られ、NICAM では日周期に伴う降水量の増加速度が過少で地表風 の収束が弱く、UM では降水の増加が過剰で強い地表風収束を伴う傾向があることが分かった。これらの結果 は、NICAM と UM では、陸上の加熱に伴う海風の発達や、これと雲の形成の結合度合いが異なることを示唆す る。高解像度データの活用として、局所循環を詳しく調べた結果、両モデルに共通して、スマトラ南西部の 地表風の日周期変動に、風向の回転を伴う特徴的な振る舞いが検出された。

#### 1. はじめに

全球非静力学モデルによる高解像度数値実験は、気象・気候に関する変動現象のスケール間相互作用を理解する上で有用な研 究手法である。本課題では、全球雲解像モデル Nonhydrostatic Icosahedral Atmospheric Model (NICAM; Satoh et al. 2014) を用いた数 km~+数 km メッシュの数値実験および解析を行うことにより、雲降水現象のメカニズムの理解およびモデルにおけ る再現性の向上に関する指針を得ることを目的とする。R1 年度は H29・H30 年度に引き続き、国際プロジェクト Years of the Maritime Continent (YMC; 海大陸研究強化年)集中観測期間を対象とする研究を行った。海大陸 (インドネシア周辺域)では、 局地的な循環や降水の日周期変動が卓越し、大規模場と複雑に相互作用する。これらをモデルで正しく再現するためには、高い 解像度と雲の形成に関する物理過程の適切なモデリングが重要である。そこで本年度は、NICAM を用いた数値実験と、仕様の異 なる高解像度領域モデルの比較解析を行うことにより、日周期変動や季節内振動の再現の要件を調べた(那須野, 2019)。本報 告では、降水や循環場の日周期変動に注目し、モデル間の違いとその原因について議論する。

#### 2. 問題設定·方法

全球非静力学モデル NICAM と UK Met Office の領域ネスティングモデル (Unified Model, UM) を用いた YMC-Sumatra2017 集 中観測期間 (2017 年 11 月 15 日-2018 年 1 月 15 日) を対象とする 5 日予測計算データ (0000 UTC 初期値、62 セット) を用い た。NICAM の計算では、全球 7 km 格子とし、初期値として NCEP final analysis を用いた (実験設定の詳細は Nasuno 2019 参 照)。UM の計算では、海大陸周辺域 (91-153E, 17S-29N) において 4.4 km 格子とし、初期値・境界値として英国気象局の現業解 析値・予報値 (10 km 格子) を用いた (実験設定は Short and Petch 2018 と同様)。両モデルは、物理過程 (大気境界層、陸面、 雲微物理など) スキームのいずれも共有しておらず、特に雲物理過程については、NICAM では対流スキーム (格子スケール以下 の対流を表現) を用いないが、UM では浅い対流について適用している。実験結果の検証には、衛星による降水観測プロダクト (Global Satellite Mapping of Precipitation, GSMaP および NOAA CPC Morphing technique, CMORPH) と、客観解析 (NCEP final analysis) の風速データを用いた。本稿では、降水と10 m 高度風速に関する日内時間変化の合成解析の結果を示す。数 km 格子の非静力学モデルであるという大枠を除き、殆ど共通点のない2つのモデルにおける日周期変動が、どの程度の幅で一 致/相違するのかに注目する。

### 3. 結果と考察

Fig. 1に海大陸西部(Fig. 2囲み域)における降水日周期の比較を示す。両モデルとも、海陸での位相の反転や、海上より も陸上で日周期の振幅が大きいといった特徴を再現している。海上では2つのモデルに共通して日周期振幅の過少傾向があり、 その原因としては、境界条件の海面水温に日内変動が充分に解像されていないことが考えられる(Fig. 1b)。陸上ではモデル間 で逆の誤差傾向があり、NICAMでは降水の立ち上がりが遅くピーク時刻の遅れと過少傾向が見られるが、UMでは午後早い時刻か ら急速に降水が増加し、ピーク時刻は観測よりやや早く過剰傾向である(Fig. 1a)。降水の衰退期(深夜〜午前)には誤差が小 さく、降水の発達期(昼〜夕方)に大きな誤差が現れることから、日射に応答した海陸風の発達や雲の形成過程がモデル間の差 異に深く関係していると考えられる。Fig. 2に陸上の降水ピーク時刻(1200 UTC)における南北風速(日平均からの偏差場)を 示す。陸上および沿岸部での収束がUMではNCEP解析値に比べ強く、NICAMでは弱い傾向が見てとれる。陸上の加熱に伴う海風 の発達と強制上昇を介した雲の形成がUMでは強くリンクしていること、NICAMでは海陸風の発達が弱いことが、降水の日周期 の違いをもたらしたと考えられる。さらにUMでは、ボルネオ北西部やニューギニア北部などで、海風の海洋上への拡大が顕著 にみられ、海陸循環がより広範囲まで及ぶことで強い降水の発達に寄与したことが示唆される。Fig. 3にスマトラ南西部の拡 大図を示す。降水のピークに先立ち、島の地形に沿った北風が岸の内陸側に形成され、海風と収束している(Fig. 3a, c)。降水 ピーク時には、海風の内陸への侵入とともに南風成分が強まって島の内陸部での収束が増大し、東岸では東風の流入も発達して いる(Fig. 3b, d)。即ち、この地域の風向の日周期変動は、反時計回りに回転していると見ることができ、これが収束場を介し て降水の日周期変動に関与している可能性がある。このような局所的な変動現象の検出は高解像度モデルに特化したものといえ



rig. 1 comporte ultimat precipitation averaged in the (a) land and (b) ocean areas of the analysis domain (black box in Fig. 2). Fig. 3 zoomed plots of Fig. 2 in (a) (b) NICAM and (c) (d) UM

65



### 4. まとめと今後の展望

at (a)(c) 0900 UTC, (b) 1300

UTC, and (d) 1200 UTC.

海大陸における降水現象のモデル再現性に関する知見を得ることを目的として、YMC 集中観測期間を対象とする NICAM および UM による予測計算の比較解析を行った。どちらのモデルも、海陸の降水日周期の特徴や、対応する地表風の収束発散場の変動を 概ね再現していること、但し陸上での日周期に伴う海陸循環の強さや降水の増加速度には異なる特徴が見られ、UM では過剰、 NICAM では過少の誤差傾向があることが分かった。NICAM の雲物理過程において降水効率を高くした感度計算も実施し、降水の 日周期振幅は観測と同等になるが、位相の遅れや地表風の過少傾向は変わらないことも確認している。解像度を上げた(3.5 km 格子)においても位相の遅延傾向が見られることから、これらを改善するためには、陸面過程や境界層過程の検討を行う必要が あると思われる。2つのモデルに共通して、スマトラ島南西部の地表風の日周期変動に風向の回転を伴う特徴的な振る舞いが見 られた。スマトラ南西沖では地形に由来する総観規模の渦擾乱が頻繁に発生し、しばしば台風の初期擾乱となることが知られて いるが、その実態は未だよくわかっていない。スマトラ島における日周期変動と総観規模擾乱の関係について、新たな課題とし て今後の研究で取り組みたい。

#### 謝辞

UMの計算結果は、Christopher Short 氏(UK Met Office)からご提供頂いた。NICAMの計算には地球シミュレータを用い、池田美紀子氏にご協力頂いた。GSMaP は JAXA から、CMORPH は NOAA Climate Prediction Center からご提供された。

- Satoh, M., Tomita, H., Yashiro, H., Miura, H., Kodama, C., Seiki, T., Noda, A. T., Yamada, Y., Goto, D., Sawada, M., Miyoshi, T., Niwa, Y., Hara, M., Ohno, Y., Iga, S., Arakawa, T., Inoue, T., Kubokawa, H., 2014: The Nonhydrostatic Icosahedral Atmospheric Model: Description and Development. Progress in Earth and Planetary Science, 1, 18.
- (2) YMC Web, http://www.jamstec.go.jp/ymc/index.html.
- (3) 那須野智江, 2019: YMC-Sumatra 2017 期間を対象とするモデル相互比較,日本気象学会 2019 年度秋季大会予稿集, p. 241.
- (4) Nasuno, T. 2019: Moisture transport over the western Maritime Continent during the 2015 and 2017 YMC Sumatra campaigns in global cloud-system-resolving simulations, SOLA, 15, 99-106.
- (5) Short C. J. and J. Petch, 2018: How well can the Met Office Unified Model forecast tropical cyclones in the western North Pacific? Weather and Forecasting, 33, 185-201.

# 海洋深層における乱流拡散のパラメタリゼーション Parameterization of Turbulent Mixing in the Deep Ocean

日比谷 紀之, E-mail: hibiya@eps.s.u-tokyo.ac.jp 田中 祐希, E-mail: yuki.tanaka@eps.s.u-tokyo.ac.jp 永井 平, E-mail: nagai\_t@eps.s.u-tokyo.ac.jp 高橋 杏, E-mail: anne@eps.s.u-tokyo.ac.jp 福澤 克俊, E-mail: fukuzawa@eps.s.u-tokyo.ac.jp 張 愛琦, E-mail: zhang@eps.s.u-tokyo.ac.jp 柳町 隆裕, E-mail: tyanagimachi@eps.s.u-tokyo.ac.jp 大貫 陽平, E-mail: onuki@riam.kyushu-u.ac.jp Toshiyuki Hibiya, Graduate School of Science, The University of Tokyo Yuki Tanaka, Graduate School of Science, The University of Tokyo Taira Nagai, Graduate School of Science, The University of Tokyo Anne Takahashi, Graduate School of Science, The University of Tokyo Katsutoshi Fukuzawa, Graduate School of Science, The University of Tokyo Aiqi Zhang, Graduate School of Science, The University of Tokyo Takahiro Yanagimachi, Graduate School of Science, The University of Tokyo Yohei Onuki, Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University

### 要旨

内部波束が不均一な背景場中を反射・屈折・伝播する様子を追跡する ray-tracing simulation を用いて,既存の 乱流パラメタリゼーションにおいて考慮されてこなかった「平均流(地衡流)シアーに伴う物理過程」や「内 部波スペクトルの歪み」が内部波の砕波に伴う乱流混合に与える影響について定量的に検証した。数値実験 の結果,先行研究でその重要性が指摘されていた「平均流シアーに伴う波-平均流相互作用」は,普遍的背景 内部波場が存在する現実的な状況では非常に小さくなることがわかった。その一方,南極周極流域における 現場観測で確認されたような,鉛直低波数側に歪んだスペクトルを持つ内部波場においては,既存の乱流パ ラメタリゼーションは過大評価傾向を示し,この過大評価傾向は「内部波エネルギーレベル」と「シアー・ ストレイン比」という2 種類の内部波パラメータに強く依存することが確認された。

# 1. はじめに

南極周極流域では、上空を吹く偏西風の変動によって上層に励起される近慣性内部波や、地衡流(南極周極流)と急峻な海底 地形との相互作用によって深層に励起される風下波が、それぞれ砕波することで、強い乱流混合が生じている。極域で形成され る底層水が周囲の水塊との混合を経て太平洋・大西洋・インド洋の各海盆へ送り込まれていく起点である南大洋における乱流混 合強度の定量化は、深層海洋大循環像を解明する上でも非常に重要な課題である。

ー般に外洋域では,海洋内部に普遍的に存在する Garrett-Munk (GM) 平衡内部波場 (e.g., Garrett and Munk 1975) 内でのエネル ギーカスケード理論に基づく乱流パラメタリゼーションが用いられるが,南極周極流域では,これらの乱流パラメタリゼーショ ンでは考慮されていない「平均流(地衡流)シアーに伴う物理過程 (e.g., Waterman et al. 2014)」や「(内部波励起源近傍における) 内部波スペクトルの歪み (Takahashi and Hibiya 2019)」が乱流混合強度に影響を与えうることが指摘されている。

本研究では、内部波場を構成する波束の一つ一つが、不均一な背景場中を反射・屈折を繰り返しながら伝播し、砕波に至るま での様子を追跡する ray-tracing simulation に、背景場として平均流シアーや異方性を持った内部波場を組み込むことで、南極周 極流域を想定した乱流混合過程の再現実験を行い、既存の乱流パラメタリゼーションで考慮されてこなかった上記の要因につい て定量的に検討した。

#### 2. 研究成果

### 2-1. 平均流シアーが与える影響

先行研究 (e.g., Waterman et al. 2014)では、風下波と南極周極流に伴う平均流(地衡流)シアーとの間の「波-平均流相互作用」 によって、風下波エネルギーの一部が平均流に吸収され、乱流混合が抑制されることで、乱流パラメタリゼーションが実際の 乱流エネルギー散逸率を過大評価するのではないか、という指摘がなされた。しかしながら、この仮説は、単色の風下波の波 束と平均流シアーのみを考慮した、非常に単純化された理論に基づいており、風下波が背景内部波場から受ける影響について は一切考慮されていない。そこで、平均流シアーが波-平均流相互作用を通じて内部波の砕波に与える影響を定量的に評価する ために、普遍的な背景内部波場の模型である Garrett-Munk (GM)内部波場と平均流シアーが重なり合う場における乱流混合過程 を再現する ray-tracing simulation を行った。 数値実験の結果,風下波が平均流シアーだけでなく背景内部波場とも共存する現実的な状況では,平均流シアーによる波-平均流相互作用は非常に小さくなることがわかった。さらに,背景内部波場に平均流シアーが重なることにより,風下波の波束が砕波するまでに要する時間が短縮され,乱流混合は強化されることがわかった。これらの結果は先行研究 (e.g., Waterman et al. 2014) による理論的考察と大きく異なる。

# 2-2. 鉛直波数スペクトルの歪みが与える影響

先行研究 (Takahashi and Hibiya 2019, Takahashi and Hibiya in prep.)では, 南極周極流域において, 内部波エネルギーの鉛直波 数スペクトルが鉛直低波数側(鉛直波数~0.01 cpm)に "hump (こぶ)"を持つような歪んだ形(図1)をしていることが多く, そのような場所では, 乱流パラメタリゼーションが実際の乱流 エネルギー散逸率を過大評価することが報告されている。

そこで、このような内部波スペクトルの歪み(hump)が乱流 パラメタリゼーションの推定に与える影響を定量的に調べるた めに、Garrett-Munk (GM)背景内部波場の上に鉛直低波数の内部 波の波束を重ね合わせることで"hump"を持つ内部波スペクト ルを再現し、そのようなスペクトルを持つ内部波場における乱 流混合過程について ray-tracing simulation を用いて調べた。

数値実験の結果,鉛直低波数の内部波は,鉛直高波数の内部 波を砕波させやすくする「背景シアー」としての役割を果たす一 方で,自らは砕波しにくいために,乱流エネルギー散逸率には 大きく寄与しないことがわかった。既存の乱流パラメタリゼーシ ョンは,平坦な形状の鉛直波数スペクトルを持つ GM スペクト ルモデルに基づいて定式化されているため,一般に,観測機器 のノイズの影響を受けにくい鉛直低波数帯のスペクトルレベル から乱流エネルギー散逸率が推定される。それゆえ,"hump"を持 つスペクトルに乱流パラメタリゼーションを適用すると,乱流 混合に直接的に寄与しない鉛直低波数帯のスペクトルレベルは,



図1. 南極周極流域における現場観測から得られた内部波エネ ルギーの鉛直波数スペクトル(緑:水平流速の鉛直シアー,桃: 密度の鉛直ストレイン)の一例。鉛直低波数側に hump(こぶ) を持っている。薄色の平坦な線は GM スペクトル。

砕波限界に近い鉛直高波数帯のスペクトルレベルよりも大きくなるため、 乱流パラメタリゼーションの過大評価傾向が生じる ということが確認された。

乱流パラメタリゼーションにおける過大評価傾向の程度は、内部波スペクトルレベルの推定に用いる鉛直波数帯の上限である「カットオフ波数」に依存した。特に、小さいカットオフ波数を使用する場合には、「内部波エネルギーレベル」が大きく、「シアー/ストレイン比」が小さいときに過大評価傾向が顕著となった。このような内部波パラメータに対する依存性は、南極 周極流域における現場観測の結果と整合的であった。

### 3. まとめと今後の展望

本研究を通じて,既存の乱流パラメタリゼーションを用いて乱流エネルギー散逸率を推定する際には、内部波エネルギーの 鉛直波数スペクトルの歪みを考慮する必要があることが示された。このような歪んだ内部波スペクトルは、南極周極流域のほ か、渦を伴う地衡流と内部波が共存する黒潮流域のような海域でも確認されている (e.g., Nagai et al. 2017)。

一方,本研究で行った ray-tracing simulation では,(1)最初に与えた背景内部波場は定常である,(2)追跡する内部波の波束は, 自身より水平・鉛直スケールの大きい背景内部波成分のみから影響を受ける,(3)内部波の波束の鉛直波数が「砕波限界 (=0.02 cpm)」を超えると砕波し,その内部波エネルギーの全てが乱流エネルギーとなる,といった非自明な仮定をおいている。そのた め,今後の乱流パラメタリゼーションの改良に向けては,上記の仮定が妥当であるのか,本研究の結果がどの程度現実を再現 しているのかについて,より仮定の少ない primitive 方程式を用いた数値実験に基づいて検証を進めていくことが必要である。

- (1) Garrett, C. and W. Munk, 1975, Space-time scales of internal waves: A progress report, J. Geophys. Res., 80, 291-297.
- (2) Waterman, S. et al., 2014, Suppression of internal wave breaking in the Antarctic Circumpolar Current, J. Phys. Oceanogr., 44, 1466-1492.
- (3) Takahashi, A. and T. Hibiya, 2019: Assessment of finescale parameterizations of deep ocean mixing in the presence of geostrophic current shear: Results of microstructure measurements in the Antarctic Circumpolar Current region, *J. Geophys. Res.: Oceans*, **124**, 135-153.
- (4) Takahashi, A. and T. Hibiya, in prep., Low wave number hump in the internal wave energy spectra observed in the Antarctic Circumpolar Current region.
- (5) Nagai, T. et al., 2017, First evidence of coherent bands of strong turbulent layers associated with high-wavenumber internal-wave shear in the upstream Kuroshio, *Sci. Rep.*, **7**, 14555.

# 雲解像モデルにおける物理過程の高度化

# Development of the Cloud Microphiscs Parameterization in a Nonhydrostatic Atmospheric Model

# 安永 数明, 富山大学・都市デザイン学系, E-mail: yasunaga@sus.u-toyama.ac.jp 奥川 椋介, 富山大学・理工学教育部, E-mail: m1841402@ems.u-toyama.ac.jp Kazuaki Yasunaga, University of Toyama Ryosuke Okugawa, University of Toyama

# 要旨

本研究では、海洋大陸の西端に位置するスマトラ島の西岸の沿岸降水帯の再現性を、雲微物理過程のパラメタリ ゼーションに着目しながら調べた.上層の雲氷の混合比を増加させ、その平均粒径を温度依存させるようにした 実験において沿岸降水帯の再現性の向上がみられた.一方で、雲水、雨水、雪、雹に関するパラメータを変化さ せた場合では、その再現性は不十分であった.また海面温度の分布は沿岸域の降水分布において重要であり、雲 氷のパラメータ実験と組み合わせることで、沿岸域の降水帯は最も現実に近く再現された.計算期間の平均的な 日周期の様子を詳しく調べたところ、陸域における対流活動の日周期を起源とする雲氷が上層の東風によって海 上に移流され、それに伴い沿岸域で水蒸気と降水が増加するという沿岸降水帯の形成メカニズムが示唆された.

#### 1. はじめに

海洋大陸は、赤道域の中でも特に積雲対流活動が活発な地域であり、それに伴う潜熱の放出は全球の循環に影響を与える. 海洋大陸の西端に位置するスマトラ島の西岸では、沿岸域の海側に降水の極大を持ち、その極大値は年間4000mmを超えるという特徴を示す.しかし、この降水分布が沿岸域で極大となる沿岸降水帯の形成メカニズムは、未解明のままである.

海上における広範囲・長期間の包括的な観測データを得ることは難しいことから、観測的な研究から沿岸降水帯の形成メカ ニズムを明らかにするには限界がある.また大気大循環モデル(GCM)は、一般的にこの地域の降水量や降水分布を精度良く 再現できない.これらのことから、沿岸降水帯の形成メカニズムという観点からは、積雲対流を陽に表現する雲解像モデルを 用いた研究が最も適切と考えられる.一方で、この雲解像モデルにおいても、沿岸降水帯を適切に再現できる場合とできない 場合があり、その原因は明らかにはなっていない.

以上のことから、本研究では、水平解像度が数kmの雲解像モデルを用いて、スマトラ島西岸をターゲットに様々な数値実験を行い、降水分布の再現性の違いを調べた.ここでは、特に雲微物理過程のパラメタリゼーションに着目しながら、湿潤静的エネルギーの収支式に基づき体系的に感度実験を構成することで、沿岸降水帯の形成メカニズムを理解すると共に、エネルギー収支の観点からの雲微物理過程パラメタリゼーションの高度化・精緻化に関する課題を明らかにすることを目的とした.

# 2. 問題設定·方法

本研究では、理化学研究所において開発している雲解像モデル SCALE を用いた.水平解像度 3.5 km (東西 960×南北 640 格子) とし、計算領域は、スマトラ島及びその西岸の東インド洋を含む東西 85E-115E、南北 12S-6N に設定した.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た.モデル上端は高度約 29 km とし、音波や重力波の反射を軽減するため上層約 10 km に、レイリー摩擦によるスポンジ層を設定した.計算の初期場には、水平解像度 1°×1°の National Centers for Environmental Prediction-Final Analysis (NCEP-FNL) を使用した.側面の境 界値、及び下端の境界値の海面温度 (SST) についても、6時間解像度の NCEP-FNL を使用した.

本研究の水平解像度 3.5 km では、積雲を完全に解像できるとは言えないが、積雲対流スキームは使用せず、雲微物理スキームのみで雲・降水過程の計算を行った. 雲微物理スキームとして、雨、雲水、霰、雪、雲氷の混合比を予報変数とする 6-class の 1-moment スキーム (NSW6; Tomita 2008)を使用した. 境界層乱流のパラメタリゼーションには、MYNN level 2.5 境界層モデル (Mellor and Yamada 1982; Nakanishi and Niino 2004), 放射スキームには相関 k 分布法ブロードバンド大気放射伝達モデル (mstrnX; Sekiguchi and Nakajima 2008)、陸面過程には熱拡散・バケツモデル、都市モデルには単層キャノピーモデル (Kusaka et al. 2001)を使用した. 積分期間は、スマトラ島西岸において集中観測が行われた期間を含むように、2015 年 11 月 22 日 00UTC から 2015 年 12 月 7 日 00UTC の 15 日間 (1 日の spin-up 期間を含む)とした.

標準実験では、沿岸域における降水の極大は再現されず(Fig.1)、スマトラ島西岸の海上で鉛直積算した大気中の水蒸気量 (CWV)のドライバイアス、及び外向き長波放射(OLR)の過大バイアスがみられた.熱帯海洋上では、一般的にCWVと 降水量は比例の関係があることが分かっている.そこで降水分布の再現性に関して、CWVのドライバイアスに着目し、鉛直 積算した FMSE 収支の式を基に、放射加熱と地表面からの熱フラックスに関する感度実験を行った.放射加熱に関わる実験 として、上層の雲氷の混合比を増加させ、その平均粒径を温度依存させるようにした実験(ICE実験),水雲の平均粒径を小 さくした実験(CLOUD実験)、雪・霰の平均粒径を小さくして層状性の降水域を維持しやすくした実験(WW14M実験)を 行った.これらの実験では、いずれも他の条件が同じなら、放射加熱の正偏差(それに伴うCWVの増加)が期待される.ま た、地表面フラックスに関わる実験として、海面温度を客観解析値から衛星を用いて解析されたデータセットへ入れ替えた実 験(SST実験)、降水に伴う水平風の運動量の下層への輸送を強化した実験(NOR10実験)の2つを行った.更に、初期値・ 境界値を NCEP-FNL からヨーロッパ中期予報センターによる最新の再解析データに入れ替えた実験(ERA5+SST実験)も 行った.感度実験の一覧を、表1にまとめる.

実験名	説明
ICE 実験	雲氷の終端速度の経験式の変更(CF-case in Heymsfield et al. 2007).
	$(135.3 + 1.93T)(1000.0\rho q_i)^{(0.0058 - 0.0024539T)}$
	雲氷の有効半径に経験式を導入(Thornberry et al. 2017)
	If $T > 192[K], 40.0 + 0.53(T - 192)$ . If $T < 192[K], 12.0 + 28e^{0.65(T - 192)}$
CLOUD 実験	雲水の有効半径を 1/2 倍(4 <b>.0µm</b> )
WW14M 実験	雪, 霰の切片パラメータの変更(Wainwright et al. 2014)
	$N_{0s} = 3.95 \times 10^8 [m^{-4}], N_{0G} = 5.26 \times 10^7 [m^{-4}]$
	衝突効率の変更(e.g., Rutledge and Hobbs 1984; Krueger et al. 1995; Lang et al. 2007)
	$E_{SI} = E_{SG} = 0.1$
SST 実験	SST の変更(NOAA OISST v2)
N0R10 実験	雨の切片パラメータの変更 $N_{0R} = 8.0 \times 10^7 [m^{-4}]$
ERA5+SST 実験	境界値の変更(ERA5)
	SST の変更(OISST v2)

#### 3. 結果と考察

感度実験の結果を図1に示す. 放射加熱に関する3つの実験の内, ICE 実験では、スマトラ島西岸の海上全域にわたって、 期間平均した CWV の増加がみられたが、WW14M では予想とは逆に減少傾向となっていた. 地表面フラックスに関する実験の NOR10 実験では、海上全域にわたって CWV の増加, SST 実験ではスマトラ島の南西の沿岸域で CWV の増加がみられた. しかし、 これらの5つの実験では、いずれも沿岸域で降水の極大となる沿岸降水帯の再現性は不十分であった. また、ERA5+SST 実験 においても沿岸降水帯は再現されず、初期値・境界値が本質的な問題でもないことも分かった.

そこで本研究では、これらの6つの内いくつかを組み合わせた複合感度実験を、さらに4つ行った(ICE+SST 実験, ICE+N0R10 実験、SST+N0R10 実験、ICE+SST+N0R10 実験).その結果、ICE+SST 実験が沿岸域における降水の極大を最もよく再現した(図 略).また ICE 実験を含む感度実験は、どれも海岸線に近い所で降水の極大の再現性が向上する傾向があった.そこで、計算 期間の平均的な日周期の様子を詳しく調べたところ、陸域における対流活動の日周期を起源とする雲氷が上層の東風によって 海上に移流され、それに伴い10 kmより下層で水蒸気が増加することによって沿岸域で降水が増加する、という陸域と海洋域 が相互に関係しあった沿岸降水帯の形成メカニズムが示唆された.

# 4. まとめと今後の展望

本研究では、スマトラ島西岸における沿岸降水帯をターゲットに、領域非静力学モデル SCALE-RM を用いて再現実験を行い、 湿潤静的エネルギーの収支式を基に、雲微物理パラメタリゼーションに着目しながら沿岸降水帯の再現性について調べた.湿 潤静的エネルギーの収支という観点からは、上層の雲氷の混合比を増加させ、その平均粒径を温度依存させるようにした実験 において再現性の向上がみられた.一方で、力学場(循環場)や他の物理量に着目した再現性の評価や、他の物理過程のパラ メタリゼーション(例えば乱流過程等)に関しては今後の課題である.また今回は、熱帯域の雲降水システムに着目したが、 中緯度の降水システムに関して、今回の結果をどの程度応用できるかに関して、冬季の日本海の降水に着目しながら様々な数 値実験を行う予定である.



Fig.1:衛星観測から見 積もった期間平均の 降水分布(上)と標準 実験の降水分布(下).



Fig. 2:スマトラ島西岸の降水分布(Fig.1の矩形領域). ただし,(a) ICE 実験,(b) CLOUD 実験,(c) WW14M 実験,(d) SST 実験,(e) NOR10 実験, (f) ERA5+SST 実験の結果.海岸線に平行に平均をとり海岸線からの距離 の関数で表している.負値は海上,正値は陸上を表す.各図において,点 線は衛星観測から見積もった降水分布.実線は標準実験の結果.

# 統合陸域シミュレータ ILS の検証 Validation of Integrated Land Simulator

芳村 圭, 東大・生産研, E-mail: kei(at)iis.u-tokyo.ac.jp 沖 大幹, 東大・IFI, E-mail: taikan(at)iis.u-tokyo.ac.jp Kim Hyung jun, 東大・生産研, E-mail: hjkim(at)iis.u-tokyo.ac.jp 山崎 大, 東大・生産研, E-mail: yamadai(at)iis.u-tokyo.ac.jp 新田 友子, 東大・生産研, E-mail: t-nitta(at)iis.u-tokyo.ac.jp 日比野 研志, 東大・生産研, E-mail: khibino(at)iis.u-tokyo.ac.jp 竹島 滉, 東大・工・社基, E-mail: akira(at)rainbow.iis.u-tokyo.ac.jp Kei Yoshimura, Institute of Industrial Science, The University of Tokyo Taikan Oki, Institute of Industrial Science, The University of Tokyo Dai Yamazaki, Institute of Industrial Science, The University of Tokyo Kenshi Hibino, Institute of Industrial Science, The University of Tokyo Nordo Nitta, Institute of Industrial Science, The University of Tokyo Akira Takeshima, Department of Civil Engineering, The University of Tokyo

# 要旨

本共同研究では、気候モデルに結合可能な独立した陸モデルとして開発を進めてきた統合陸域シミュレータ (Integrated Land Simulator; ILS)について、様々な気候帯に位置する世界 20 カ所を対象として検証を行った。 顕熱・潜熱フラックスを観測と比較した結果、季節性・日変化は全体として良い再現性を示した。また、他 の陸モデルと同様に、30 分値の再現性は2 変数回帰の方が良い再現性を持つ傾向にあるが、極値については ILS の方が良い傾向があることがわかった。今後の展望として、さらなる検証、新しい素過程の実装、大気・ 海洋モデルとの結合を進めている。

#### 1. はじめに

陸域過程の精度良い表現は、気候シミュレーション、気象予測、洪水予測、影響評価研究といった様々な目的のために重要で ある。迅速な開発サイクルによる精度向上を目指し、(1)適切な格子系による高解像度化の実現、(2)よく検証された要素モデ ルの簡素な導入の実現、(3)大気・海洋モデルやその他のモデルと物理的に整合した形での結合を実現するため、統合陸域シミ ュレータ(Integrated Land Simulator; ILS)の開発を進めている。ILS は複数の陸域要素モデルを汎用カプラで結合し、MPMD (Multiple Program-Multiple Data)方式で実行する。本報告書では、現地観測データを用いてサイト実験を行い、ILS 開発に当た って書き直した MATSIRO の再現性の評価し、地表面フラックスの検証を行った結果を報告する。

# 2. 実験設定

現地観測データとして、PALS (Protocol for the Analysis of Land Surface Models; Abramowitz, 2012; Best et al., 2015) で用意された フラックスネット 20 カ所のデータを用いて、ILS のサイト実験を行なった。これらのサイトは、熱帯、乾燥帯、温帯、亜寒帯と いう幅広い気候帯に及び、森林域と非森林域のどちらも含んでいる。PALS で整備された、気象データ(下向きの短波・長波放 射、地上気温、降水量、比湿、風速、地表面気圧)、顕熱・潜熱フラックスの観測データ、2 変数回帰式によって推定された顕熱・ 潜熱フラックスの 3 種類のデータを用いる。これらは全て、時間解像度 30 分で欠損なく整備されている。また、雲量データと して ERA5 を用いる。実験の期間はサイトごとに異なり 2~10 年で、計算の時間解像度も 30 分である。ILS は、MIROC5 版の MATSIRO を元に書き換えたもの、さらにフラックス計算部に繰り返し計算を実装したものの 2 種類を用いて実験を行った。ベ クトル機での高速化コードに必要な汎用ループは、どちらにも実装してある。書き換えの再現性検証は前者、観測との比較によ る検証には後者の結果を用いた。また、比較のために MIROC5 版の MATSIRO を用いた実験も行なった。

### 3. 結果と考察

まず書き換えたコードの再現性を確認する。これまで限られたサイトで検証を行なっていたが、本実験では気候の異なる 20 カ所を対象とした。MIROC5 版の MATSIRO と ILS を用いて行なった実験結果のうち、主要 4 変数(各層の土壌温度と土壌水分、顕熱フラックス、潜熱フラックス)の 30 分出力値を4 バイト実数で比較した。その結果、対象とした全ての変数について、バイナリレベルで一致することを確認した。次に、年平均潜熱・顕熱フラックスのバイアスを調べた。潜熱・顕熱フラックスどちらもバイアスが大きいのは、ElSaler2、Howard の 2 サイトで、ElSaler2 では顕熱フラックスを過大評価し、潜熱フラックスを 過小評価していた。Howard ではその逆で、下向き短波放射の量は比較的大きい。これらのサイトでは、潜熱・顕熱フラックスの和のバイアスは小さく、地表面フラックスの分配が誤差の原因ではないかと考えられる。一方、Mopane では、顕熱フラック



の誤差のみ大きく、Hesse では潜熱フラックスの誤差のみ大きかった。Mopane は 20 サイト中短波放射が一番大きいサイトであ るため、誤差が大きくなりやすいと考えられる。潜熱フラックスと顕熱フラックスのバイアスを線形回帰した結果、傾き-0.71、 切片 2.53 で、-45 度に近い直線となった。短波放射の大きさで 2 つに分けたところ、短波放射の大きい 10 サイトの方が 45 度の 線に近かった。また、他の気象要素や境界条件との関係も調べたが、どの変数とも明確な関係は見られなかった。

次に、潜熱・顕熱フラックスの季節変化を調べた。潜熱フラックスの季節変化を Fig.1 に示す。ケッペンの気候区分(Peel et al., 2007) によると、Palang と Howard が熱帯、Mopane、Kruger、ElSaler、FortPeck が乾燥帯、Amplero、ElSaler2、Espirra、Blodgett、 Hsse、Tumba、Loobos が温帯、Harvard、Howlandm、Merbleue、Bugac、Sylvania、UniMich、Hyytiala が亜寒帯となる。亜寒帯の サイトについては、季節変化が大きく、計算結果が観測とよく合っている。乾燥帯のサイトは、1年間を通して潜熱フラックス が小さく、観測と比較的よく合う結果となった。温帯と熱帯のサイトについては、観測と差がみられるサイトが多い。ただし、 過小評価と過大評価のどちらもあり、限られたサイトを対象にした結果ではあるものの、オフライン実験では系統的なバイアス は見られなかった。日変化についても、全体的には季節変化と同様に、熱帯と温帯よりも乾燥帯と亜寒帯の方が日変化の誤差は 小さかった。また、フラックス計算部に繰り返し計算を実装することで、Palang と Harvard で見られていた計算不安定によるも のと考えられる振動が改善した。次に、潜熱・顕熱フラックス 30 分値の再現性を、テイラー図としてまとめた(紙面の都合上 図を省略)。テイラー図は、相関係数、観測の標準偏差で標準化した RMSD (Root Mean Square Error) と標準偏差を同時に示す ことができる。参考のため、PALS で作成された下向き短波放射、気温による2変数線形回帰との比較を行った。潜熱フラック スは、ILS と回帰式それぞれについて、相関係数の中央値は 0.78 と 0.83、RMSD の中央値は 0.66 と 0.59、標準偏差の中央値は 0.93 と 0.74 となった。標準偏差は ILS の方が観測に近く、RMSD と相関係数は回帰式の方が観測に近い傾向があることがわか った。回帰式では、ほとんどの場所で標準偏差を過小評価していた。顕熱フラックスについては、ILS と回帰式で、相関係数の 中央値は 0.84 と 0.89、RMSD の中央値は 0.60 と 0.50、標準偏差の中央値は 1.14 と 0.90 となった。全体として、潜熱フラックス よりも再現性が良いが、ばらつきは大きかった。3 つのメトリックのどれも回帰式の方が良い傾向が見られた。ただし、回帰式 は極値の再現性に問題が見られた。例えば、各サイトで潜熱・顕熱フラックスのそれぞれについて、30分値の 99.9パーセンタ イル値を調べたところ、 その平均絶対誤差は潜熱フラックスで ILS 77.1 W/m<sup>2</sup>、回帰式 203.7 W/m<sup>2</sup>、顕熱フラックスで ILS 76.8 W/m<sup>2</sup>、回帰式 149.9 W/m<sup>2</sup>となり、ILS の方が良い結果となった。99 パーセンタイルや 99.99 パーセンタイル値についても同様 に ILS の方が良い傾向が見られた。

### 4. まとめと今後の展望

本共同研究では、統合陸域シミュレータ ILS の検証を行った。複数の気候帯における 20 サイトについて計算結果を観測と比較した結果、季節性・日変化は全体として良い再現性を示すこと、30 分値の再現性は 2 変数回帰の方が良い再現性を持つ傾向にあるが、極値については ILS の方が良い傾向があることがわかった。今後の展望として、汎用ループ実装によりベクトル機における高速化を実現した ILS の大気・海洋モデルへの結合を進めている。陸域には数多くの観測データが存在するため、新しい素過程実装と観測データによる検証により高精度化した陸モデルを気候モデルに結合することを目指している。

- Abramowitz, G., 2012: Towards a public, standardized, diagnostic benchmarking system for land surface models. Geosci. Model Dev., 5, 819-827, doi:10.5194/gmd-5-819-2012.
- (2) Best, M. J., G. Abramowitz, H. R. Johnson, A. J. Pitman, G. Balsamo, A. Boone, et al., 2015: The Plumbing of Land Surface Models: Benchmarking Model Performance. J. Hydrometeor., 16, 1425–1442.
- (3) Peel, M. C., B. L. Finlayson, and T. A. McMahon, 2007: Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. Hess, 11(5), 1633–1644

# 気象研究所共用海洋モデルの時間積分スキーム更新

Update of the time integration method of MRI.COM

中野 英之、気象研, E-mail: hnakano(at)mri-jma.go.jp 辻野 博之、気象研, E-mail: htsujino(at)mri-jma.go.jp 坂本 圭、気象研, E-mail: ksakamot(at)mri-jma.go.jp 浦川 昇吾、気象研, E-mail: surakawa(at)mri-jma.go.jp 羽角、博康 東大・大気海洋研, E-mail: hasumi(at)aori.u-tokyo.ac.jp Hideyuki Nakano, Meteorological Research Institute Hiroyuki Tsujino, Meteorological Research Institute Kei Sakamoto, Meteorological Research Institute Shogo Urakawa, Meteorological Research Institute Hiroyasu Hasumi, Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo

# 要旨

気象研共用海洋モデル(MRI.COM)の時間積分スキームを更新し、Leapfrogと3次のAdams Moulton法の組み 合わせ(LFAM3) を導入した。コードの変更は rewrite などの表面的な場所にとどまり空間差分に関する変 更はない。そして、 現状のコードの結果は完全に維持され LFAM3 への変更は namelist 指定で可能とし た。感度実験などから、従来のLeapfrog 法に見られた位相の誤差が LFAM3 では軽減され、計算コストも 2 ~3 割程度削減されることを確かめた。

# 1. はじめに

現在の MRI.COM は時間積分に leapfrog を用い、leapfrog に存在する computational mode の 抑制に matsuno scheme を用 いている。leapfrog scheme は二次の精度を持ち、移流に中央差分と組み合わせた場合効率がよい。しかしながら、高精度の前 方差分系の移流スキームと組み合わせた場合、安定性が悪く保存性を満たすことが難しいことなどの弊害が大きくなり、新しい 時間積分スキームを導入する機運が高まってきた。 新しい時間積分スキームを選択するにあたっては、現在のコードとの親和 性や、現行の MRI.COM の利点を生かせるように慎重に行う必要がある。世界の海洋モデルで用いられている時間積分手法など を精査したところ、The regional oceanic modeling system (ROMS)で使用されている Leapfrog と 3 次の Adams Moulton 法の組 み合わせ(LFAM3、Schchepetkin and McWilliams, 2005)を採用することにした。他の有力な手法としては、MITgcm 等で用いら れている運動量の式とトレーサーの式を互い違いに解く、time-staggered 法があるが、この手法は計算コストにおいては LFAM3 よりも有利であるが、精度や他モデルとの結合については不利であるため採用しなかった。

# 2. 問題設定·方法

OGCM に用いられる LFAM3 の形式は以下のように、

1. predictor substep :  $P^{n+1/2} = (1/2-2\gamma)P^{n-1} + (1/2+2\gamma)P^n + \Delta t(1-2\gamma)F^n$  ( $\gamma = 1/12$ )  $\geq$ ,

2. corrector substep :  $P^{n+1} = P^n + \Delta t F^{n+1/2}$ 

からなる。 $P^{n+1/2}$ を求める predictor substep は n-1/2 の時刻より  $2\gamma \Delta t$  だけ進んだ時刻から n+1/2 までの(1-2 $\gamma$ ) $\Delta t$  だけ の時間積分と解釈することができる(図 1)。LFAM3 には、以下のようなメリット、デメリットが想定される。

・メリット

- 時間スキームの精度が2次から3次に上昇。波動に関しては4次の精度を持ち、特に波の位相の誤差が減少。

- 計算コストが 2~3 割ほど減少。
- leapfrog の数値モード削除による保存性の向上。
- どの時間ステップからでも接続計算可能。

・デメリット

- 過去の情報が必要なため、リスタートファイルが倍増 +α 。
- 常に Predictor 、Corrector ステップの違いを意識する必要がある。
- リスタート処理が面倒。

MRI. COM に実装後、傾圧渦の実験(例えば Debreu et al. (2012)の実験に相当)を使って,LF, LFAM3 それぞれの時間スキー ムによる計算を行い、LFAM3 実装のテストを行う。この実験では初期に地衡流の関係を満たす温度,流速の値が与えられた傾圧 渦を矩形領域の北東に置き、外力なしで時間発展を見ている。この系は非線形性が強いためモデルの誤差が短い積分で大きく現 れるため評価に適している。評価項目としては

(1) 安定にとることのできる時間ステップ及び計算コストの確認

(2) 計算精度の測定

である。(2)については、理論解が存在しないので、理論解との比較に変わるものとして、ある時間ステップで動かした結果と、時間ステップをその1/3にして動かした結果との比較から推定した。

# 3. 結果と考察

LFAM3, leapfrog の場合の、時間ステップの最大値はそれぞれ、1110秒、630秒であった。これは傾圧波が CFL 条件を決め ているとした場合の理論的見積もりの、 LFAM3 の安定な時間ステップは leapfrog のそれの 約 1.8 倍であることと整合的で ある。 leapfrog に比べて LFAM3 は predictor-corrector の二つの手順があるため、単純に LFAM3を実装してしまうーステ ップに二倍の計算が必要であることから、時間ステップが 1.8 倍であっても LFAM3 の計算コストの方が大きいことになる。し かしながら、LFAM3 では、predictor step において移流に簡便な手法を用いても殆ど計算精度が変わらないことや、混合層や 順圧計算をどちらかの substep での一度だけの計算で済ますことができることなどの実装時の工夫により、計算コストの低減が でき、結局この実験では 24%のコスト低減となった。

計算精度においても LFAM3 のほうが高く、leapfrog スキームを用いた場合は Rossby 波の等高線の混んだところに誤差が現 れ波の位相に差が生じた(図 2)。これは leapfrog が振幅は正しく表現できるものも位相に誤差が出ることと整合的であった。 一方、LFAM3 を用いた場合にはこのような波の位相の差はほとんど明瞭にはみられず、全体の誤差も小さい(図 3)。

> -0.5 -0.6

0.7



図 1. LFAM3 手法における時間 の進み方。



図 2:Leapfrog を用いた場合: 等値線は 実験開始 100 日後の海面高度。シェードは 時間ステップを1/3にした場合との海面高 度の差(単位は 1 cm)。



図 3: 図 2 と同様ただし、LFAM3 を用 いた場合。

#### 4. まとめと今後の展望

時間積分スキームとして、ROMS に導入されている LFAM3 を MRI. COM に実装し、傾圧渦におけるパフォーマンスのチェックを行った。計算コストは 24%減となり、なおかつ Leapfrog を採用した場合に時間ステップを伸ばすと位相にズレが現れる問題が LFAM3 では軽減されることを確かめた。 コードの変更は配列の時間方向の更新などの表面的な場所にとどまり、空間差分に関 する変更はない。そして、 現状のコードの結果は完全に維持され LFAM3 の採用も 2,3 個の namelist 指定で可能である。 ま た、より現実的な設定である全球低解像度の海洋においても並列/接続チェックおよび時間ステップ、計算 コストなどを見積も り、2割から3割の計算コスト削減となった。 結論として、コードは精度も向上し計算コストも削減された。

現在 MRI. COM における LFAM3 実装において、 predictor substep と corrector substep の双方で計算し直しているが、1度 の計算でよい要素がある。たとえば、 (等密度) 拡散の削除や粘性計算が挙げられ、これらをどちらかの substep で1度だけ 計算することで、計算精度を殆ど落とさずにさらに計算負荷を下げることができると考えている。

- (1) Shchepetkin, A. F, and J. C. McWilliams (2005) The regional oceanic modeling system (ROMS): a split-explicit, free-surface, topography-following-coordinate oceanic model. Ocean Modelling, 9, 347-404.
- (2) Debreu, L, P. Marchesiello, P. Penven, and G. Cambon (2012) Two-way nesting in split-explicit ocean models: Algorithms, implementation and validation. Ocean Modelling, 49-50, 1-2

# 全球雲解像モデルの開発及びデータ解析

Development and data analysis of Nonhydrostatic Icosahedral Atmospheric Model

# NICAM を用いた北極低気圧の研究

# Study of Arctic Cyclone using NICAM

# 田中博,筑波大・CCS E-mail: Tanaka(at)ccs.tsukuba.ac.jp 石山涼太,筑波大院・生命環境, E-mail: s1920971(at)s.tsukuba.ac.jp Hiroshi L. Tanaka, CCS, University of Tsukuba Ryota Ishiyama, Life and Environmental Sciences, University of Tsukuba

# 要旨

本研究では、北極圏で発生する北極低気圧の発達と維持のメカニズムを解明するために、全球雲 解像モデル NICAM を用いて 2016 年 8 月の事例をもとに初期値問題としての再現実験を行った。 その結果、極渦を背景に存在する北極低気圧に、中緯度で傾圧不安定により発達した温帯低気圧 が北上して融合することで、上層の暖気核に温帯低気圧の暖気が供給され、下層の正の渦度に温 帯低気圧の正の渦度が供給されるプロセスが重要であることが明瞭に再現された。

# 1. はじめに

研究の背景としては、近年の地球温暖化に伴い北極海の海氷が融けだしており、夏季には北極海航路が開けて、アジア とヨーロッパを結ぶ低コスト運輸が可能になってきた。また、北極海海底の自然資源にも注目が集まっている。そのため 安全な航海上、北極低気圧などの激しい擾乱の予測が重要となっている。しかし、これまで北極低気圧を対象とした研究 は少なく、予測も困難とされる。

北極圏で生起する様々な現象がモデル内でどのように再現されているかを観測と比較しながら検証することで、北極低 気圧のライフサイクルを把握し、その発生から衰退までのプロセスを解析することは重要な課題である。北極温暖化に伴 い、北西航路が開かれ、北極海の自然資源や物流などの経済効果に注目が集められている状況下では、北極低気圧の予測 が重要であり、発生と発達のメカニズムの解明が急務である。

# 2. 問題設定·方法

本プロジェクトの目的は、これまでに筑波大学 CCS の計算機資源を用いて行った全球非静力大気大循環モデル NICAM、 および、現業全球数値予報モデル OpenIFS の経験を生かして、これらの低解像モデルから高解像モデルまでの一連の解像 度で北極圏大気循環の研究を行うことである。この研究の成果から大気大循環研究および気候変動研究に重要な貢献をす ることが期待される。

本研究では、これまでに CCS で実施してきた NICAM や OpenIFS を用いた研究成果を北極圏に応用し、北極低気圧などの 顕著現象の成因解明と予測精度の向上を目的とした研究を行う。研究計画としては、新たに研究に参入した松枝、山上、 松信、石山を中心に、北極低気圧の再現実験を行った。今年度の成果としては、北極低気圧の成因解明に向けた研究を、 NICAM の高解像度モデルを用いて行ったことである。東京大学大気海洋研究所の佐藤正樹教授率いる NICAM チームの 協力のもと、松信の研究により OFP 上で gl05 (224 km 格子)から gl11 (3.5 km 格子)までの解像度で安定して実行で きるようになった。

#### 3. 結果と考察

今年度は、石山の研究として、gl09の雲解像モデルを用いて2016年8月16日前後に発生した北極低気圧に対し、8 月13日初期値の再現実験として4.5日間の時間積分を行った。その結果、現実大気と同様の北極低気圧がモデル大気 で再現され、その発達維持には、高緯度から北極圏に侵入する温帯低気圧と北極低気圧本体とのマージング(融合)に より、上層に暖気、下層に渦度が供給されることが本質的に重要であることを明らかにした。下図は対流圏上層の暖気 核が2つの低気圧のマージングにより強化され、それにより北極低気圧が発達・維持される様子を再現している。

高解像度の NICAM による実験は計算コストが高く、OFP のような大規模計算機でのみ実行可能である。通常のワ ークステーションでは、gl08 以上の解像度を用いた計算は実行不可能であった。gl08 以上の解像度のモデル実験を実 施できたこと、また gl09 の雲解像モデルにより、北極低気圧の再現実験を実施できたことは、学際共同利用として OFP を利用できたためである。

# 4. まとめと今後の展望

高解像度 NICAM での実験が可能となったため、数値モデルによる予測精度の向上や、大気現象理解のための本格的な 実験が可能となった。北極低気圧は中緯度から北上してくる温帯低気圧と融合することで、上層の暖気核を維持し、下層 の低気圧性の渦が強化される。その順圧構造の渦が大気下層のエクマン境界層で収束をもたらし、中心部で上昇気流を形 成することで、対流圏は断熱膨張により寒気核となる。この点は潜熱過熱のある熱帯低気圧と本質的に異なる点である。 寒気核であることから大気は極めて安定であり、安定度に打ち勝って上昇気流を維持するのはエクマン収束の働きによる。 したがって、北極低気圧のエネルギー源は、低緯度からの渦度と顕熱フラックスの収束という結論に至った。今後は、 NICAM 等の大気大循環モデルを用いた、北極圏の予測精度を向上させるための研究を行う予定である。

# 参考文献

- (1) Yamagami, A., M. Matsueda, and H. L. Tanaka 2019: Skill of summertime extraordinary Arctic cyclones in a medium-range reforecast. Polar Science, doi:10.1016/j.polar.2019.02.003.
- (2) Matsunobu, T., and H. L. Tanaka, 2019: Time series analysis of normal mode energetics for Rossby wave breaking and saturation using a simple barotropic model, Atmospheric Science Letters, DOI: 10.1002/asl.940. 2019;20:e940.



Fig. 1 Merging warm cores of Arctic cyclone and extratropical cyclone simulated by MICAM for the event occurred in August 2016.

# 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

坂本 雅巳, 米原 仁, 下河邉 明, 横田 祥, 齊藤 慧, 松川 知紘, 黒木 志洸, 鍋谷 尭司 気象庁予報部数値予報課, E-mail: globalnwp(at)met.kishou.go.jp Masami Sakamoto, Hitoshi Yonehara, Akira Shimokobe, Sho Yokota, Kei Saitou, Chihiro Matsukawa, Yukihiro Kuroki, and Takashi Nabetani Numerical Prediction Division, Forecast Department, Japan Meteorological Agency

### 要旨

気象庁の高解像度全球モデル(気象庁 2019)に、アンサンブル予報で推定した予報誤差を取り入れたハイブ リッドデータ同化の現業化を行い、地形性抵抗と陸面過程を精緻に扱う物理過程の高度化との開発を行った。 これらの改良により、台風進路予測誤差の改善、高周波擾乱予測誤差の軽減等の多くの効果が確認された。 2020年3月までに実施した改良とその効果の概要を報告する。

# 1. はじめに

気象庁は現在格子間隔約 20km (TL959) 鉛直 100 層(0.01hPa まで)の全球モデル(GSM)を現業運用して天気予報や台風予報等を行っている。予測精度の向上は物理過程の高度化とデータ同化手法の開発に大きく依存している。2019 年 12 月に局所アンサンブル変換カルマンフィルタ(LETKF)による予報誤差を利用した 4 次元変分法(4DVar)の現業化を行い、2020 年 3 月に地形性抵抗と陸面過程の精緻化を取り入れて、予測精度を改善することができた。

# 2. 物理過程高度化とデータ同化手法開発



図 1. 2018 年 9 月 29 日 03 時を初期値とする GSM の 6 時間予報の海面気圧 (hPa) (左図) と、同時刻を初期値とする LETKF による 6 時間予報の下部境界気圧 (hPa) のスプレッド (右図)。赤丸で台風第 24 号と熱帯低気圧、温帯低気圧を示す。(気象庁 2019)

GSM の初期値作成には 4DVar を使用したデータ同化を行っている。これまでは過去の事例に対する予報誤差を統計処理した 気候学的な背景誤差のみを用いてきた。観測に対する相対的な第一推定値の不確かさは、気象状況に依存して異なるはずであり、 LETKF のアンサンブル予報のスプレッドを用いて第一推定値の不確かさを評価するハイブリッドデータ同化手法の開発を行って きた。図1に GSM の6時間予報の海面気圧と LETKF のアンサンブル予報による下部境界気圧のスプレッドを示す。台風、熱帯低 気圧と温帯低気圧の予測される位置に大きなスプレッドがあり、予測の精度が相対的に低いことを示している。こうした場所で 背景誤差を大きくして、観測の情報を有効に利用することで解析精度を向上させることができる。衛星搭載マイクロ波サウン ダ・マイクロ波イメージャの観測を晴天域以外でも使用するための開発と 4DVar で解析値を計算する途中で第一推定値を更新す るアウターループを合わせて現業化することによって解析精度が向上し、予測精度の改善に大きく貢献する結果を得た。 GSM はこれまで以下の問題点が指摘されてきた。

① 対初期値検証で、対流圏中層のトラフが日本付近で浅く、移動速度も遅く予想される場合が多い。

② 夏期の中央アジアなどの乾燥域で夜間の地上気温を高く予想する。

物理過程の高度化について検討を進め、①については地形性抵抗と地形性重力波等の扱いの精緻化、②については陸面過程の 改良を行った。具体的には以下の検討を行って、改良した GSM を現業化した。

- 地形性抵抗と地形性重力波等の扱いの精緻化
- ▶ サブグリッド地形による大気の抵抗は、これまで Iwasaki et al.(1989)による重力波過程及び、境界層過程での混合長の調整 により取り扱ってきた。対流圏下層での抵抗効果を精緻に表現するため、Lott and Miller (1997), Vosper(2015)による重力

波過程と blocked flow 過程及び、Beljaars et al. (2004)による地形性乱流抵抗を採用した。

- 陸面過程
- ▶ 夏期の中央アジア等の乾燥域で夜間にみられる地上気温の高温バイアスを抑制するため、裸地面の蒸発と下草断熱効果の扱いを変更した。地上比湿の多湿バイアスを抑制するため、日陰を考慮した気孔抵抗の扱い等の調整を行った。

### 3. 結果

衛星搭載マイクロ波サウンダ・マイクロ波イメージャの観測の全天同化とアウターループを今回のデータ同化手法の改良と合わせて取り込むことによって、台風進路や降水の予測精度向上が確認できた。図2に平成30年台風第21号の進路予測を示す。 以前のデータ同化手法を用いる青線の予測進路より、新しいデータ同化手法を用いた赤線の予測の方がベストトラックに近い。





図 2. 平成 30 年台風第 21 号の 2018 年 8 月 31 日 21 時初期値の進路予測。黒線は気象庁ベストトラッ ク、青線は旧来のデータ同化手法によるもの、赤線 は改良したデータ同化手法によるもの。(気象庁 2019) 図 3. 2017 年 12 月 16 日 12UTC を初期値とする GSM の 48 時間予報 の 500hPa ジオポテンシャル高度(m)の分布。黒線が予測値、緑線 は予測対象となる 12 月 18 日 12UTC の解析値。着色は予測値から 解析値を引いた差。上図は以前の GSM によるもの。下図は物理過 程の高度化を取り入れた後の GSM によるもの。(気象庁 2020)

物理過程の高度化については、冬期のチベットの北を回り込むジェット気流の高周波擾乱の予測精度改善の効果が確認できた。図3に2017年12月16日21時初期値の500hPaジオポテンシャル高度の48時間予測を示す。上図の以前のGSMではトラフの前面で高度が高く、トラフの後ろでやや低い誤差がある。これはトラフが浅く、移動速度が遅い予報誤差があることを示している。下図の改良後の物理過程を用いた予測でも同様な誤差パターンはあるが誤差の大きさはかなり軽減している。

### 4. まとめと今後の展望

データ同化手法の改良により暖候期の降水と台風進路の予測を改善し、物理過程の高度化により冬期の高周波擾乱の予測の改善を行った。次年度以降も、精度改善のために物理過程の高度化とデータ同化手法の開発に取り組んでいくことにしたい。

- (1) 気象庁 2019: "全球モデルの改良と展望" 数値予報課報告・別冊 65 号,気象庁予報部.
- (2) Iwasaki, T., S. Yamada, and K. Tada, 1989: A parameterization scheme of orographic gravity wave drag with two different vertical partionings part I: Impacts on medium-range forecasts. J. Meteor. Soc. Japan, 67, 11-27.
- (3) Lott, F., and M. Miller, 1997: A new subgrid-scale orographic drag parametrization: Its formulation and testing. Q.J.R. Met. Soc., 123, 101-127.
- (4) Vosper, S. B., 2015: Mountain waves and wakes generated by South Georgia: implications for drag parametrization.
   Q. J. R. Met. Soc., 141, 2813-2827.
- (5) Beljaars, A. C. M., A. Brown, and N. Wood, 2004: A new parametrization of turbulent orographic form drag. Q. J. R. Met. Soc., 130, 1327-1347.
- (6) 気象庁 2019:"雲・降水域の衛星観測データの利用開始と初期値作成手法の高度化による全球モデルの予測精度向上につい て"配信資料に関するお知らせ、気象庁.
- (7) 気象庁 2020: "全球モデルと全球アンサンブル予報システムの予測精度向上について"配信資料に関するお知らせ,気象庁.

# 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

A study of hierarchical structure of the middle atmosphere circulation by combination of a Mesosphere-Stratosphere-Troposphsere radars and a high-resolution general circulation model.

南原 優一,東京大学・大学院理学系研究科地球惑星科学専攻, E-mail: minamihara(at)eps.s.utokyo.ac.jp 佐藤 薫,東京大学・大学院理学系研究科地球惑星科学専攻, E-mail: kaoru(at)eps.s.u-tokyo.ac.jp

Yuichi Minamihara, Department of Earth and Planetary Science, School of Science, The University of Tokyo

Kaoru Sato, Department of Earth and Planetary Science, School of Science, The University of Tokyo

要旨

論文投稿中につき、近日公開予定です。

# 陸面モデルの積雪スキームの高度化及びデータ解析(継続)

# Upgrading the snowpack scheme in the land surface model and its data analysis (continuation)

安成 哲平, 北海道大学・北極域研究センター, E-mail: t.j.yasunari(at)arc.hokudai.ac.jp 渡邉 達博, WDB株式会社, E-mail: tatuhiro\_watanabe(at)arc.hokudai.ac.jp Teppei J. Yasunari, Arctic Research Center, Hokkaido University Tatsuhiro Watanabe, WDB Co., Ltd.

# 要旨

昨年度まで開発を行ってきた陸面モデル MATSIRO の積雪スキームの高度化に向け,更なる継続 開発を行った.昨年度導入した時間可変積雪密度スキームの動作確認を行い,その後,太陽光吸 収性エアロゾル(ダスト,黒色・有機炭素)の積雪汚染モデル高度化に向けて,これまで考慮さ れていなかった積雪層内で液体水が存在する場合に,積雪不純物が下層へ流出する過程の導入を 行った.また,このスキームで使用する積雪空隙率を計算する計算コードの導入も行った.

# 1. はじめに

太陽光吸収性エアロゾルによる積雪汚染(アルベドの低下と気候影響)は、1980年代の先駆的積雪アルベド研究<sup>1)</sup>から発展し 続け、気候モデルによる気候影響まで評価できるようになり<sup>2)</sup>、最新の IPCC の海洋と雪氷圏の気候変動に関する特別報告書<sup>3)</sup> までも継続して取り上げられるまで重要な研究トピックとなった.気候モデル MIROC<sup>4),5)</sup>に搭載の陸面モデル MATSIRO<sup>6)</sup>でも以 前より、ダストと黒色炭素(混合)の積雪汚染モデルが導入されているが、これまでは有機炭素が扱われておらず、また積雪層 内の不純物が消雪まで堆積し続ける(液体水による流出がない)ように扱われており<sup>7)</sup>、積雪汚染過程として十分に考慮できて いない部分が多かった.そこで、積雪汚染モデルの高度化を行うことを目的として、継続した共同研究を行ってきた.

# 2. 方法

今年度は、昨年度導入した全球積雪層固定 3 層の時間変化積雪密度スキームの動作確認を行 い、その後、流出水による積雪層内のダスト、黒 色・有機炭素の流出効果を NASA GEOS-5 で採 用されている積雪不純物流出スキーム 8を元に MATSIRO 用に移植を行い, 合わせて同論文で使 用されている積雪層内の空隙率 (snow porosity) の計算式も導入した. 同論文の GEOS-5 積雪汚 染モデル GOSWIM では,上記3種類の積雪不純 物は異なるサイズや特性(親水性・非親水性)で 考慮されているが、MATSIRO では、各積雪不純 物の変数が現在は1つずつしかないため, 簡易 的ではあるが、ひとまず GOSWIM で仮定されて いる代表粒径サイズの相乗平均を代表粒径サイ ズとして使用した.また,これらのサイズを元 に, 流出計算に用いる Scavenging Coefficient を Yasunari et al. (ref. 8) の方法と同様にして計算し たものを使用した.新たに導入した積雪不純物 流出スキームによる動作をチェックするため, 2007年11月1日から2008年6月1日の期間に おいてオフラインで MATSIRO を走らせ、計算を 行った. ここでは, MIROC5 のオフライン用 MATSIRO<sup>9)</sup>をベースにスキームを導入しているが,



Fig. 1. A snapshot of simulated (a-c) time-varying snow density (SN-Den), (d-f) snow porosity (PO), and (g-i) snow specific surface area (SSA) in each snow layer (Top; Middle; Bottom) on May 6, 2008.

MATSIRO<sup>9)</sup>をベースにスキームを導入しているが、この積雪モデル開発は MIROC6<sup>10)</sup>の MATSIRO にも随時反映をしており、オフラ インや AGCM 共に利用できるように進めている.今後、同バージョンは MIROC6 においても利用可能となる予定である.

### 3. 結果と考察

導入をこれまで行ってきた固定3層積雪密度,積雪比表面積(Snow Specific Surface Area: SSA),新しく導入した各層からの 積雪不純物流出フラックス(ダスト,黒色炭素,有機炭素)とその計算に必要な積雪空隙率を積雪の各層で計算したスナップシ ョット(2008月5月6日の例)をFig.1に示す.積雪密度が小さい(大きい)と積雪空隙率や積雪比表面積の値が大きく(小さ く)なる関係が計算できていることがわかる.また,この時期の中緯度の融雪が起こっていると考えられる snowline の辺りで融 解水などによる積雪不純物の流出量があり,この日のケースでは,積雪層トップから第2層へ流出している積雪不純物が多いこ とも見て取れる(Fig. 2).現時点では,観測などと比較は出来ていない状況ではあるが,挙動としては概ね妥当と考えられる.

# 4. まとめと今後の展望

数年かかったが、これまでずっと固定されていた 積雪密度のが時間と共に荷重などを考慮して時間変 化するものにようやく変更することができた. 主 た,その積雪密度を使って,積雪空隙率や比表面積 と言った新たな積雪物理量変数の計算も行えるよ うになった.そして,積雪空隙率や流出水フラック スを使用することで、MATSIRO 内で積雪不純物が これまでダストと黒色炭素が合わせた状態で扱わ れ, さらに積雪期間中流出が考慮されずに積雪内に 積算され続けていたものが<sup>7)</sup>積雪層内の液体水を考 慮して積雪不純物の流出効果を計算することがで きるようになった. しかしながら, これらのパラメ ータ調整などは、今後観測などと比較検討すること で、より最適なものにアップデートされていくこと が必要と考えられる. 今後, これらのスキームの変 数を使用することで, Yasunari et al. (refs. 8, 11)で使 用されている NASA GEOS-5/GOSWIM 用の積雪ア ルベド計算式を移行し、オプションで使用できるよ うにすれば、今後、これらのエアロゾル起源の積雪 不純物や雪氷生物 (Onuma et al.: ref. 12) による質量吸 収係数から多様な積雪汚染効果も考慮できるように



carbon flux (bcflux), and (g-i) organic carbon flux (ocflux) in each snow layer (Top; Middle; Bottom) on May 6, 2008.

# なり、そこからの大気-陸面相互作用によるフィードバック効果や、気候影響評価なども可能になることがおおいに期待される.

#### 参考文献

- (1) Warren, S. G., and W. J. Wiscombe, 1980: A model for the spectral albedo of snow. II: Snow containing atmospheric aerosols, *J. Atmos. Sci.*, 37(12), 2734–2745.
- (2) Yasunari, T. J., R. D. Koster, W. K. M. Lau, and K.-M. Kim, 2015: Impact of snow darkening via dust, black carbon, and organic carbon on boreal spring climate in the Earth system, J. Geophys. Res. Atmos., 120, 5485–5503. doi: 10.1002/2014JD022977.
- (3) Hock, R., et al. (2019), High Mountain Areas. *In: IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate* [H.-O. Pörtner, et al. (eds.)]. In press. (available at: <u>https://www.ipcc.ch/srocc/chapter/chapter-2/</u>)
- (4) Watanabe, M., et al., 2010: Improved climate simulation by MIROC5: Mean states, variability, and climate sensitivity, J. Clim., 23, 6312– 6335, doi: 10.1175/2010JCLI 3679.1.
- (5) Watanabe, S., et al., 2011: MIROC-ESM 2010: Model description and basic results of CMIP5–20c3m experiments, *Geosci. Model Dev.*, 4, 845–872, doi: 10.5194/gmd-4-845-2011.
- (6) Takata, K., S. Emori, and T. Watanabe, 2003: Development of the minimal advanced treatments of surface interaction and runoff, *Glob. Planet. Change*, 38(1–2), 209–222, doi:10.1016/S0921-8181(03)00030-4.
- (7) Qian, Y., T. J. Yasunari, S. J. Doherty, M. G. Flanner, W. K. M. Lau, J. Ming, H. Wang, M. Wang, S. G. Warren, and R. Zhang, 2015: Light-absorbing particles in snow and ice: measurement and modeling of climatic and hydrological impact, *Adv. Atmos. Sci.*, 32(1), 64-91, doi: 10.1007/s00376-014-0010-0.
- (8) <u>Yasunari, T. J.</u>, K.-M. Lau, S. P. P. Mahanama, P. R. Colarco, A. M. da Silva, T. Aoki, K. Aoki, N. Murao, S. Yamagata, and Y. Kodama (2014), The GOddard SnoW Impurity Module (GOSWIM) for the NASA GEOS-5 Earth System Model: Preliminary comparisons with observations in Sapporo, Japan, *SOLA*, 10, 50–56, doi:10.2151/sola.2014-011.
- (9) Nitta, T, K. Yoshimura, K. Takata, R. O'ishi, T. Sueyoshi, S. Kanae, T. Oki, A. Abe-Ouchi, and G. E. Liston (2014), Representing variability in subgrid snow cover and snow depth in a global land model: Offline validation, *J. Clim.*, 27, 3318–3330.
- (10) Tatebe, H., et al. (2019), Description and basic evaluation of simulated mean state, internal variability, and climate sensitivity in MIROC6, *Geosci. Model Dev.*, 12, 2727–2765, doi:10.5194/gmd-12-2727-2019.
- (11) Yasunari, T. J., R. D. Koster, K.-M. Lau, T. Aoki, Y. C. Sud, T. Yamazaki, H. Motoyoshi, and Y. Kodama (2011), Influence of dust and black carbon on the snow albedo in the NASA Goddard Earth Observing System version 5 land surface model, *J. Geophys. Res.*, 116, D02210, doi:10.1029/2010JD014861
- (12) Onuma, Y., Takeuchi, N., Tanaka, S., Nagatsuka, N., Niwano, M., and Aoki, T. (2019), Temporal changes in snow albedo, including the possible effects of red algal growth, in northwest Greenland, simulated with a physically based snow albedo model, *The Cryosphere Discuss.*, doi:10.5194/tc-2019-263, in review.

#### 謝辞

本共同研究には、東京大学大気海洋研究所大石龍太特任研究員に多大なるご協力を頂き、受け入れ教員の阿部彩子教授と共に 有益な議論をしていただいた.また、MATSIRO開発者の国立環境研究所高田久美子特別研究員や、MIROC6の中心的開発者である JAMSTEC 建部洋晶主任技術研究員、東京大学生産技術研究所大沼友貴彦特任研究員にモデル開発を進めるにあたり、有益な情報・ アドバイスを頂いた.モデル開発当初からは、東京大学生産技術研究所芳村圭教授・新田友子助教にも随時ご協力して頂いた.

# 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 Ocean General Circulation Model for Climate Prediction

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

# 要旨

南極沿岸域の水平解像度が 5-7km となる高解像度南大洋周極棚氷-海氷-海洋モデルを整備した。現在の平 均気候値の海面境界条件を用いてスピンアップし、その後、経年変動する海面境界条件を用いて、1979-2018 年の数値積分を実施した。数値モデルで再現された南極棚氷全体の年間底面融解量は衛星観測からの 見積もり結果と整合的であることを確認した。また、同棚氷-海氷-海洋モデルに仮想トレーサーを導入 し、棚氷下の海水の滞留時間を南極の全ての棚氷に対して見積もった。大きな棚氷群では数年であるのに 対し、小さい棚氷群では、半年以内であることがわかった。この棚氷下の海水の滞留時間の違いは、大気 及び海洋の環境変動に対する棚氷融解プロセスの応答タイムスケールが大きく異なることを意味する。

# 1. はじめに

南極氷床・棚氷と南大洋との相互作用は気候システムを考える上で極めて重要である。南極氷床の体積は海水準に換算すると約60mに相当し、地球表層に存在する全淡水量の約90%に対応する。南極氷床は、淡水の巨大リザーバであるといえる。南極の氷床の質量収支を考えると、氷床は南極大陸上の積雪によって成長し、棚氷末端での氷山形成と棚氷底面での融解の二つのプロセスによって消耗する。棚氷とは、氷床の末端で海にせり出した部分を指す。南極氷床から南大洋へ供給される氷の量(淡水量)は一年間で2100-2300 Gt (1 Gt=10<sup>12</sup> kg)と見積もられている (Rignot et al. 2011)。ごく最近まで、氷山形成が主たる流出プロセスであると推測されていたが、最近の衛星データによる棚氷の流動収支解析から、棚氷底面での融解が南極氷床/棚氷の支配的な消耗プロセスであることが明らかになってきた (Deporter et al. 2013; Rignot et al. 2013)。棚氷およびその周辺の氷床の薄化、流出速度の加速が報告されている (Pritchard et al. 2012; Paolo et al. 2015)。この主たる原因として、南大洋による棚氷底面融解の増加が指摘されている。極域海洋モデリングにおいて、氷床融解プロセスの理解の重要性が高まっている。

1990年代後半以降、棚氷要素をもつ三次元海洋モデルがいくつも開発されている(Dinniman et al. 2016)。しかしながら、棚氷 -海洋モデリング研究の多くは、特定の棚氷に注目した領域モデルが主流であり、南極の全棚氷をターゲットした研究はまだま だ少ない。そのため、棚氷下の海水の滞留時間といった基礎的知見すら、いまだよくわかっていない状況である。本研究では、 棚氷要素を導入した海氷海洋結合モデルを用いて、仮想トレーサー実験を実施し、南極の全ての棚氷領域に対して、水塊の滞留 時間を定量評価する。

## 2. 問題設定·方法

本研究では、海洋研究開発機構 (JAMSTEC) と東京大学大気海洋研究所 (AORI) で共同開発・運用されている海洋海氷結合モデル COC04.9 に棚氷要素を導入したものを使用した (Kusahara and Hasumi 2013)。本年度は、高解像度南大洋周極モデル (水平解像 度 1/5°×1/5° cos φ、モデル領域:南緯 15 度以南)を新たに整備した (図 1)。この水平解像度によって、南極の海岸線・棚氷域 や沿岸域の海底地形を表現でき、数値モデル内において高密度水形成・棚氷底面融解といった南極沿岸域プロセスがある程度再 現可能となる。この数値モデルの駆動に必要な、風応力と熱的海面境界条件 (気温、比湿、下向き短波/長波放射等) は、大気再 解析データセット等から計算した。まず、大気海面境界条件の気候値 (Röske 2006)を用いて 50 年間積分した。その後、ERA-Interim (Dee et al. 2011)の 1979 年の境界条件を用いて、20 年間積分し、経年変動実験 (21979-2018)の初期値とした。

南極棚氷下の海洋の滞留時間を見積もるために、仮想トレーサー実験を実施した。仮想トレーサー実験は、5年ごとに(1981, 1986, 1991, 1996, 2001, 2006, 2011)実施した。各仮想トレーサー実験の積分期間は6年間である。仮想トレーサーは棚氷下の海洋に配置し、棚氷グリッド外に流出すると除去するように設定した。この方法は、領域モデルを用いて、ロス棚氷の下で滞留時間を見積もった先行研究と同様なものである(Reddy et al. 2010)。

#### 3. 結果と考察

本研究では、南極の棚氷を11のグループに分類し(図1のa-k)、棚氷下の海水の滞留時間を見積もった(図2)。図2の滞留時間は、トレーサー実験7ケースの平均値を示している。ここで、棚氷下の海水の滞留時間は、トレーサー濃度が1/e(=0.37)となる時間(日数)とする。最も長い滞留時間は、ロス棚氷(図1のh)で、約5年。その次に長いのが、フィルヒナー・ロンネ棚氷(b)の4年、アメリー棚氷(e)の1年半と続く。その他の棚氷の滞留時間は50日-180日程度と短い。トレーサー濃度が指数関

数的に減少すると仮定すると、棚氷下の水の95%が交換する時間は、この滞留時間の約三倍となる。モデルのスピンアップで棚 氷の底面融解が準定常に達するのに約15年程度必要となるが、これはおおよそ最も長い滞留時間の5年の三倍であり、仮想ト レーサー実験から得られる水塊交換時間と整合的であることがわかった。本研究で見積もられた棚氷下の海水の滞留時間・交換 時間というのは、大気や海洋大循環場が何らかの影響で変化した場合の、各棚氷融解プロセスの応答時間に対応するものである。 海水の滞留時間が長い棚氷ほど、外的要因の変化にゆっくり応答するのに対し、滞留時間が短い棚氷はその外的変化に鋭敏に応 答することを意味している。西南極域はENS0等の熱帯の変動の影響が顕著となる海域として知られており、そこの棚氷群(jと k)の滞留時間が数か月と短いことから、これらの棚氷はこれらの大気モードに対して敏感に応答すると考えられる。

本報告では、現在気候場における南極の棚氷下の滞留時間を見積もったが、異なる気候下では、氷床・棚氷の応答が変化する 可能性がある。今後、将来予測実験結果などを用いて、温暖化時にどのように棚氷下の海水の滞留時間が変化するか調査してい く必要がある。



- Dee, D. P., and Coauthors, 2011: The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 137, 553-597, doi:10.1002/qj.828.
- Depoorter, M. A., J. L. Bamber, J. A. Griggs, J. T. M. Lenaerts, S. R. M. Ligtenberg, M. R. van den Broeke, and G. Moholdt, 2013: Calving fluxes and basal melt rates of Antarctic ice shelves. *Nature*, **502**, 89-92, doi:10.1038/nature12567. http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/24037377.
- Dinniman, M., X. Asay-Davis, B. Galton-Fenzi, P. Holland, A. Jenkins, and R. Timmermann, 2016: Modeling Ice Shelf/Ocean Interaction in Antarctica: A Review. *Oceanography*, 29, 144-153, doi:10.5670/oceanog.2016.106.
- Kusahara, K., and H. Hasumi, 2013: Modeling Antarctic ice shelf responses to future climate changes and impacts on the ocean. J. Geophys. Res. Ocean., 118, 2454-2475, doi:10.1002/jgrc.20166.
- Paolo, F. S., H. A. Fricker, and L. Padman, 2015: Volume loss from Antarctic ice shelves is accelerating. Science (80-. )., 348, 327-331, doi:10.1126/science.aaa0940.
- Pritchard, H. D., S. R. M. Ligtenberg, H. A. Fricker, D. G. Vaughan, M. R. van den Broeke, and L. Padman, 2012: Antarctic icesheet loss driven by basal melting of ice shelves. *Nature*, 484, 502-505, doi:10.1038/nature10968.
- Reddy, T. E., D. M. Holland, and K. R. Arrigo, 2010: Ross ice shelf cavity circulation, residence time, and melting: Results from a model of oceanic chlorofluorocarbons. *Cont. Shelf Res.*, **30**, 733-742, doi:10.1016/j.csr.2010.01.007.
- Rignot, E., I. Velicogna, M. R. Van Den Broeke, A. Monaghan, and J. Lenaerts, 2011: Acceleration of the contribution of the Greenland and Antarctic ice sheets to sea level rise. *Geophys. Res. Lett.*, **38**, L05503, doi:10.1029/2011GL046583.
- --, S. Jacobs, J. Mouginot, and B. Scheuchl, 2013: Ice-shelf melting around Antarctica. Science (80-. )., 341, 266-270, doi:10.1126/science.1235798. http://www.sciencemag.org/cgi/doi/10.1126/science.1235798.
- Röske, F., 2006: A global heat and freshwater forcing dataset for ocean models. *Ocean Model.*, **11**, 235-297, doi:10.1016/j.ocemod.2004.12.005.

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

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

寺田 直樹,黒田 剛史,笠羽 康正,早坂 忠裕,中川 広務,Pradeep Khatri,青木 翔平,鳥海 克成,東北大・理 E-mail: teradan(at)pat.gp.tohoku.ac.jp (寺田), tkuroda(at)tohoku.ac.jp (黒田)
笠井 康子,情報通信研究機構
佐川 英夫,京都産業大・理
前澤 裕之,築山 大輝,大阪府立大・理
佐藤 正樹,阿部 彩子,東大・大気海洋研
Naoki Terada, Takeshi Kuroda, Yasumasa Kasaba, Tadahiro Hayasaka, Hiromu Nakagawa, Pradeep
Khatri, Shohei Aoki, Katsushige Toriumi, Graduate School of Science, Tohoku University
Yasuko Kasai, National Institute of Information and Communications Technology
Hideo Sagawa, Faculty of Science, Kyoto Sangyo University
Hiroyuki Maezawa, Daiki Tsukiyama, Graduate School of Science, Osaka Prefecture University

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

# 要旨

NICAM を用いた大気エアロゾルシミュレーション,及び MIROC をベースとする火星・金星大気大循環モ デルを用いた水・微量物質循環のシミュレーションを行い,観測との十分な連携を通して地球惑星大気の物 質輸送と気候変動に対する総合的な理解を目指している.今年度は特に MIROC モデルを用いた火星古気候 のシミュレーションについて重要な成果が得られたため,それを報告する.具体的には約 38 億年前の火星 を対象とした全球気候・地表流水結合モデルを開発し,それにより当時の火星が降雨と積雪の両方が存在し うる「冷涼・湿潤」な気候である可能性を示唆,またこの気候が約 100 万年継続すると火星地表に観測され ている流水地形(valley networks)が形成されることを示した(Kamada et al., 2020).

#### 1. はじめに

現在の火星の地表は、平均気温約 200K、平均気圧約 7hPa と非常に寒冷・希薄で、液体の水は存在しえない環境である.とはいえ、過去には液体の水が流れていたことを示す valley network と呼ばれる無数の流水地形が見つかっている(Hynek et al., 2010 など).火星由来とされる隕石や表面に残るクレーターなどから、約 38 億年前の火星は今の地球大気に匹敵する 0.5~2 気圧の大気をもっていたと見積もられており(Kite et al., 2014; Kurokawa et al., 2018),このことより当時の火星は温室効果によって温暖な気候が保たれていたのでは、と考えられる.しかし、この当時の生まれたての太陽は今よりも暗く、現在の約 75%程度であったとされているため、従来のモデルでは二酸化炭素と水蒸気の温室効果のみでは地表に液体の水が存在しうる温暖な気候は再現できず(Forget et al., 2013; Wordsworth et al., 2013),隕石の衝突(Steakley et al., 2019)や火山の噴火(Mischna et al., 2013)など、突発的な温暖化による陸氷の融解を入れないと地表の流水を説明できなかった.

### 2. 問題設定·方法

我々は MIROC モデルをベースに、約38億年前の火星の気候と地表流水を再現する大気・水文結合モデルを作成した(Kamada et al., 2020). 水平分解能は T21(5.6°×5.6°),鉛直 15層でモデル上端は約60 km,上端のレイリー摩擦の時間定数は30 sol<sup>-1</sup> (sol は 1 火星日で約24.66 時間相当),8次の水平粘性,e-folding time は10 sols とした.現在の火星地形で標高-2.54kmより低い部分を 海と仮定した地表パラメータを用い(図1),積雲対流(簡略化 Arakawa-Schubert)・大規模凝結スキームにより雲を生成する水循環 過程を含む.大気は二酸化炭素を主成分とするが,鉛直 1 次元大気放射計算では CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>の衝突誘起による赤外線吸収が初期火 星の温暖化に寄与する可能性を示していることから(Ramirez, 2017),それに倣って水素分子(初期火星においては惑星内部からの 脱ガスにより供給されていた可能性がある)を0~20%の混合比で加えた大気(CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O/H<sub>2</sub>大気)を仮定した.大気放射計算は相関 k-分布法を用い,温度6グリッド(100~350 K),気圧46グリッド(10<sup>-5</sup>~10<sup>4</sup> hPa),水蒸気混合比8グリッド(0 及び10<sup>-7</sup>~10<sup>-1</sup>)の表 から分子吸収と CO<sub>2</sub>-CO<sub>2</sub>及び CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>の衝突誘起吸収の効果を計算,さらに水及びドライアイスの雲の放射効果を考慮した.太陽定数は上述の通り,現在の75%とした.軌道は円軌道,自転軸傾斜角は現在と同じ 25.19°と仮定した.

また大気モデルから得られる降水量及び地表における融雪量とカップリングさせて, Ishihara and Kobatake (1979)のタンクモデルをベースとした水文モデルを構築し、大気モデルより高い水平分解能 T106(1.1°×1.1°)で地表流水を計算、年平均の降水用・融雪量をもとに valley networks 形成に必要な時間スケールを見積もった.

## 3. 結果と考察

地表気圧 0.5, 1, 1.5, 2 気圧, H2 混合比 0, 1, 3, 6, 20%についての全球平均地表温度計算結果を図 2 に示す. H2 なしの場合の結果は先行研究(Wordsworth et al., 2013)と整合する寒冷な環境となった一方で,地表気圧 1 気圧において H2 混合比 20%, 1.5 気圧において 3%以上,2 気圧において 1%以上で平均地表温度は水の融点である 273K を上回り,これらのケースでは液体の雨の降

水が生じた.中でも平均地表温度が273Kをわずかに上回るケース,例えば地表1.5気圧・H2混合比3%の場合は,valley networks が観測されている低緯度域において降雨と積雪が季節によって繰り返される「冷涼・湿潤」な気候となり,これが約100万年続 くと現在残る流水地形が形成できる地表流水量をもたらしうることが示された(図3).ここで得られた地表流水量の多い箇所は, 東半球においては観測されている valley networks の分布(Hynek et al., 2010)とよく整合する.

ただし、現在のモデルではタルシス山脈が存在する西半球の valley networks の分布は再現できていない. その理由としては (1)38 億年前にはまだタルシス山地ができていなかった可能性、(2)氷河による valley networks の生成を考慮していないこと、(3) 降水量のパラメタリゼーション(積雲対流スキーム)依存性、が考えられる. そのうち(3)の検証として簡略化 Arakawa-Schubert に 代わり Kain-Fritsch スキームを積雲対流パラメタリゼーションに用いた計算を別途行ったが、簡略化 Arakawa-Schubert の結果と の大きな違いは見られなかった.



Fig. 1: Implemented surface condition of early Mars in our simulations. Brown and blue shading represents land and ocean, respectively. (Kamada et al., 2020)



Fig. 2: Annual and global mean surface temperatures (K) as a function of  $P_s$  in the Aqua-Mars scenario (with an ocean/lakes on surface). A dashed line shows the melting point of H<sub>2</sub>O (273 K). (Kamada et al., 2020)



Fig. 3: Annual fluvial discharge per grid cell ( $\log_{10}$  of m<sup>3</sup> MY<sup>-1</sup> grid<sup>-1</sup>) in the Aqua-Mars scenario with a H<sub>2</sub> composition of 3% for  $P_s$  of 1.5 bar. (Kamada et al., 2020)

# 4. まとめと今後の展望

初期火星の気候については、これまで「温暖・湿潤」(Palumbo and Head, 2018 など)か「寒冷で氷で覆われた」(Wordsworth et al., 2015 など)かで議論が分かれていたが、今回の我々の結果(Kamada et al., 2020)はその中間といえる「冷涼・湿潤」な気候を想定 することで、特別なイベントが起きなくても観測されている流水地形を作ることができることを初めて示した。今後は西半球の valley networks 分布の再現に向け、上記の(1)及び(2)の検証を進める.

また、本報告書では詳細は割愛した MIROC を用いた現在火星の水循環及び大気重力波の励起・伝播、金星大気の雲・化学シ ミュレーション、NICAM を用いたエアロゾル分布予測とその火星等への適用などのトピックについても、それぞれ研究が進行 中である.特に現在火星大気の研究は 2018 年に発生した全球ダストストームの間の観測データが出揃ったこともあり、来年度 の成果創出が特に期待されるトピックである.

- (1) Kamada et al., 2020: A coupled atmosphere-hydrosphere global climate model of early Mars: A 'cool and wet' scenario for the formation of water channels. Icarus, 338, 113567.
- (2) Hynek et al., 2010: Updated global map of Martian valley networks and implications for climate and hydrologic processes. J. Geophys. Res. Planets, 115, E09008.
- (3) Kite et al., 2014: Low palaeopressure of the martian atmosphere estimated from the size distribution of ancient craters, accepted in principle. Nat. Geosci., 7, 335-339.
- (4) Kurokawa et al., 2018: A lower limit of atmospheric pressure on early Mars inferred from nitrogen and argon isotopic compositions. Icarus, 299, 443-459.
- (5) Forget et al., 2013: 3D modelling of the early Martian climate under a denser CO<sub>2</sub> atmosphere: temperatures and CO<sub>2</sub> ice clouds. Icarus, 222, 81-99.
- (6) Wordsworth et al., 2013: Global modelling of the early Martian climate under a denser CO2 atmosphere: water cycle and ice evolution. Icarus, 222, 1-19.
- (7) Steakley et al., 2019: Testing the impact heating hypothesis for early Mars with a 3-D global climate model. Icarus, 330, 169–188.
- (8) Mischna et al., 2013: Effects of obliquity and water vapor/trace gas greenhouses in the early Martian climate. J. Geophys. Res. Planets, 118, 560-576.
- (9) Ramirez, 2017: A warmer and wetter solution for early Mars and the challenges with transient warming. Icarus, 297, 71-82.
- (10) Ishihara and Kobatake, 1979: Runoff model for flood forecasting. Bulletin of the Disaster Prevention Research Institute, 29, 27-43.
- (11) Palumbo and Head, 2018: Early Mars Climate History: Characterizing a "Warm and Wet" Martian Climate With a 3-D Global Climate Model and Testing Geological Predictions. Geophys. Res. Lett., 45, 10249–10258.
- (12) Wordsworth et al., 2015: Comparison of "warm and wet" and "cold and icy" scenarios for early Mars in a 3-D climate model. J. Geophys. Res. Planets, 120, 1201-1219.

# 気候変動現象の形成メカニズムと塩分が果たす役割 Generation mechanisms of climate variation phenomena and the role of salinity

東塚 知己, 東大・理学系研究科, E-mail: tozuka(at)eps.u-tokyo.ac.jp 木戸 晶一郎, 東大・理学系研究科, E-mail: skido(at)eps.u-tokyo.ac.jp 村田 壱学, 東大・理学系研究科, E-mail: KazuMurata(at)eps.u-tokyo.ac.jp 楠 秀大, 東大・理学系研究科, E-mail: kusunoki(at)eps.u-tokyo.ac.jp Tomoki Tozuka, Graduate School of Science, The University of Tokyo Shoichiro Kido, Graduate School of Science, The University of Tokyo Kazumichi Murata, Graduate School of Science, The University of Tokyo Hidehiro Kusunoki, Graduate School of Science, The University of Tokyo

# 要旨

正のインド洋ダイポールモード現象に伴う塩分偏差のインパクトを領域海洋モデルの感度実験を通して 調べた。その結果、赤道域の塩分偏差に伴う密度成層の強化は風応力から注入される運動量をより上層にト ラップし、東西・鉛直流偏差を上方へシフトさせることが明らかになった。そして、東インド洋赤道域では 水温躍層付近の湧昇流が弱化し、亜表層の冷水が持ち上げられにくくなることで、最大1.0℃程度の海面水 温の上昇がもたらされていた。したがって、塩分変動がインド洋ダイポールモード現象に対して単に受動的 に振る舞うのではなく、海面水温偏差に対する負のフィードバックとして能動的な役割を果たす可能性が示 された。

### 1. はじめに

インド洋ダイポールモード現象(IOD)は、インド洋熱帯域で生じる大気海洋結合現象であり(Saji et al. 1999)、正の IOD は東(西)インド洋熱帯域に負(正)の海面水温(SST)偏差を伴う。この現象はインド洋沿岸諸国のみならず、日本を含む広い 地域の気候に影響するため(Saji and Yamagata 2003)、予測精度の向上は重要な課題である(Luo et al. 2007)。

IOD に伴う風応力偏差や降水偏差等の大気偏差は、海流や海面淡水フラックス等の偏差をもたらすため、IOD に伴う塩分偏差 の発展において重要な役割を果たすが(Kido and Tozuka 2017)、その相対的な寄与に関する先行研究は、定性的な議論にとど まっていた。そこで、前年度の研究では、領域海洋モデルを用いた感度実験を行うとともに、完全に収支が閉じる塩分収支解析 を行い、その定量的理解を試みた(Kido et al. 2019a)。その結果、風応力偏差に起因する海流偏差が塩分偏差の形成において 支配的な役割を果たしていることが明らかになった。しかし、このような IOD に伴う塩分偏差が、どの程度、海洋上層の循環や 水温場に影響を与えるのかについては、定量的な評価が十分なされていない。そこで、本年度の研究では、正の IOD に伴う塩分 偏差のインパクトを、領域海洋モデルを用いた感度実験を通して調べた。

### 2. モデル

本研究で使用したモデルは、領域海洋モデル ROMS (Shchepetkin and McWilliams 2005) である。インド洋 (30° E-110° E, 46° S-32° N) の大部分をカバーする水平解像度 1/3°×1/3°、鉛直 40 レベルの領域モデルである。World Ocean Atlas 2013 の水温・塩分場を初期値とし、大気再解析データ JRA55-do (Suzuki et al. 2018; Tsujino et al. 2018) の 3 時間間隔データ の気候値を用いて、30 年間スピンアップした。その後、1958 年から 2015 年まで JRA55-do の 3 時間間隔データで駆動した。側 壁境界条件は、海洋同化データ ORAS4 (Balmaseda et al. 2013) の月平均値を使用した。前年度の研究で、本領域モデルが、熱 帯インド洋における正の IOD に伴う水温、塩分、海流偏差を比較的良く再現できることを確認した。この標準実験を CTL\_MR と 呼ぶ。

また、塩分偏差のインパクトを見積もるため、9個の正の IOD 年について感度実験を行った。まず、Kido et al. (2019a)と 同様、大気外力から正の IOD に伴う偏差を除去した実験(CTL\_NoIOD)を実施した。次に、ROMS のソースコードを編集し、塩分 の支配方程式から移流項を除去した上で改めて CTL\_MR、CTL\_NoIOD と同様の実験を行った(それぞれ NoSADV\_MR、NoSADV\_NoIOD と呼ぶ)。CTL\_MR と CTL\_NoIOD の差(=Diff\_CTL) は、正の IOD に伴う大気偏差に対する応答を表すのに対し、NoSADV\_MR と NoSADV\_NoIOD の差(=Diff\_NoSADV)は、移流偏差に伴う塩分偏差がない場での応答を表している。塩分移流偏差が正の IOD に伴 う塩分偏差の形成において支配的な役割を果たしていることから、 Diff\_CTL と Diff\_NoSADV の差を取れば、正の IOD に伴う塩 分偏差のインパクトを定量化することが可能となる。

# 3. 結果と考察

まず、両実験の表層・亜表層の塩分偏差について確認したところ、Diff\_CTL には顕著なシグナルが見られたのに対し、 Diff\_NoSADV ではその大部分が消失しており、実験設定の狙い通り、正の IOD に伴う塩分偏差が概ね除去されていた。そこで、 両実験間のSSTの差に着目したところ、Diff\_CTLの方がDiff\_NoSADVよりも赤道インド洋東部での冷却が抑制されていた。その原因を定量的に調べるため、海洋上層の熱収支解析を行ったところ、前者の方が後者よりも亜表層付近での鉛直上向きの流れが弱く、亜表層の冷たい水が表層に運ばれにくくなっていることが、SSTの低下を抑制する主要因であることが明らかになった。

さらに、鉛直流速の診断および東西運動量収支解析を行い、要因を詳細に調べたところ、Diff\_CTL における湧昇の弱化は、 塩分偏差に伴い赤道インド洋東部での密度成層が強化することで風から注入される西向きの運動量をより上層にトラップされ、 流速偏差が浅いところに持ち上がることで生じていることが示された。これらの力学的解釈の妥当性は、線形連続成層モデルを 用いた感度実験からも確認された。以上の結果を模式的にまとめたのが図1である。



Fig. 1 正の IOD に伴う塩分偏差のインパクトを示した模式図 (Kido et al. 2019b)。

# 4. まとめと今後の展望

本研究では、正の IOD に伴う塩分偏差のインパクトを領域海洋モデルの感度実験により調べた。その結果、塩分偏差の有無に よる東インド洋赤道域での SST 偏差は最大 1.0℃程度にも達しており、大気海洋相互作用にも影響しうることが示唆された。し たがって、塩分変動は、IOD に対して単に受動的に振る舞うのではなく、SST 偏差に対して負のフィードバックとして能動的な 役割を果たしうるということが示唆された。

本研究では、正の IOD に焦点を当てたが、エルニーニョ現象(Hasson et al. 2013)やニンガルー・ニーニョ現象(Feng et al. 2015)等、他の気候変動モードも塩分偏差を伴うことが知られており、本研究の手法は、他の気候変動現象に伴う塩分変動の影響の定量化に応用することが可能である。また、本研究では、領域海洋モデルを使用したが、大気海洋相互作用を陽に取り扱うことが可能な大気海洋結合モデルで同様の実験を行ってみるのも興味深い。

- Saji, N. H., B. N. Goswami, P. N. Vinayachandran, and T. Yamagata, 1999: A dipole mode in the tropical Indian Ocean. Nature, 401, 360-363.
- (2) Saji, N. H., and T. Yamagata, 2003: Possible impacts of Indian Ocean dipole events on global climate. Clim. Res., 25, 151–169.
- (3) Luo, J.J., S. Masson, S. Behera, and T. Yamagata, 2007: Experimental forecasts of the Indian Ocean Dipole using a coupled OAGCM. J. Clim., 20, 2872–2880.
- (4) Kido, S., and T. Tozuka, 2017: Salinity variability associated with the positive Indian Ocean Dipole and its impact on the upper ocean temperature. J. Clim., 30, 7885-7907.
- (5) Kido, S., T. Tozuka, and W. Han, 2019a: Anatomy of salinity anomalies associated with the positive Indian Ocean Dipole. J. Geophys. Res. Oceans, 124, 8116-8139.
- (6) Shchepetkin, A. F., and J. C. McWilliams, 2005: The regional oceanic modeling system (ROMS): A split-explicit, free-surface, topography-following-coordinate oceanic model. Ocean Modelling, 9, 347-404.
- (7) Suzuki, T., D. Yamazaki, H. Tsujino, Y. Komuro, H. Nakano, and S. Urakawa, 2018: A dataset of continental river discharge based on JRA-55 for use in a global ocean circulation model. J. Oceanogr., 74, 421-429.
- (8) Tsujino, H. et al., 2018: JRA-55 based surface dataset for driving ocean-sea-ice models (JRA55-do). Ocean Modelling, 130, 79-139.
- (9) Balmaseda, M. A., K. Mogensen, and A. T. Weaver, 2013: Evaluation of the ECMWF ocean reanalysis system ORAS4.
   Q. J. Roy. Meteorol. Soc., 139, 1132–1161.
- (10)Kido, S., T. Tozuka, and W. Han, 2019b: Experimental assessments on impacts of salinity anomalies on the positive Indian Ocean Dipole. J. Geophys. Res. Oceans, 124, 9462-9486.
- (11) Hasson, A. E. A., T. Delcroix, and R. Dussin, 2013: An assessment of the mixed layer salinity budget in the tropical Pacific Ocean. Observations and modelling (1990-2009). Ocean Dyn., 63, 179–194.
- (12) Feng, M., J. Benthuysen, N. Zhang, and D. Slawinski, 2015: Freshening anomalies in the Indonesian throughflow and impacts on the Leeuwin Current during 2010-2011. Geophys. Res. Lett., 42, 8555-8562.

# 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、Yamamoto et al. (2019)を T21 から T63 に変更し、太陽座標と地理座標 から見た「金星大気大循環、潮汐波および定在波の構造」を明らかにした.厚い雲で覆われた惑星の大気大 循環の力学に関しては、惑星半径や自転を変えた実験に基づいて、1よりも高いロスビー数の大気大循環構 造、熱・運動量輸送過程およびその変動の相似性を明らかにした.

# 1. はじめに

近年様々な惑星探査が行われている中,惑星中層大気大循環の理論体系は確立されていない.特に,金星のような「厚い雲で 覆われた天体」の大気力学的な理解は十分ではない.本研究の目的は,

(1) 金星放射伝達と地形を組み込んだ大気大循環モデル(Yamamoto et al. 2019)を高解像度で計算し、温度および大循環構造を Venus Express やあかつきの観測結果と比較する.

(2) 金星下層大気で生じた擾乱が、中層大気スーパーローテーションに及ぼす役割を明らかにする.

(3) 惑星大気の大循環パターンについて、自転と惑星半径を変えた理想化大気大循環モデル実験の解析を行い、ロスビー数と水 平拡散係数に対する大気大循環の依存性を整理する.

と定めて、本年度の研究を進めた.

#### 2. 問題設定·方法

現実的な大気大循環モデル(上記の研究目的1と2)に関しては、Ikeda(2011)が東京大学大気海洋研究所で開発した放射伝 達コードと金星の地形を組み込んだ金星 GCM(Yamamoto et al. 2019)を T63L52 で計算し、太陽座標と地理座標から見た「金 星大気大循環および波動」について整理した.

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

#### 3.結果

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

Yamamoto et al. (2019)の水平解像度をT21からT63に上げて計算し,細かい地形が大気大循環と波動に及ぼす影響を調査した. 本研究では,低解像度モデルと同じように,雲頂付近で約120 m s<sup>-1</sup>の高緯度東西風ジェットと約90 m s<sup>-1</sup>の赤道東西風が形成 される.また,太陽直下付近の雲頂水平風分布や複雑な安定度の分布も再現している.水平解像度を上げることによって,赤道 域ではより高い東西波数の定在波が卓越するようになり,極域潮汐波のシャープな筋構造が見られるようになった.高緯度ジェ ットコア付近とその上層では,「擾乱による帯状流減速」が「東西風と南北風のメトリック項加速」とバランスしている.地形 に起因する擾乱による帯状流減速の増加が,それとバランスするメトリック項加速(ūv̄ tan φ/r)を強めるので,地形が存在する と南北風速vīだけでなく東西風速ūも増加する(Yamamoto et al., International Venus Conference 2019).

金星の自転傾斜角は非常に小さいが,弱いながら帯状流の自転傾斜角依存性が見られる.また,紫外線吸収物質の経年変化を 調査する予備実験として,紫外線吸収物質高度分布に対する大気大循環の依存性を調べた.その吸収物質を高度 57-65 km (LowUV 分布)から高度 57-70 km (High-UV 分布)に変えると,雲頂付近の UV 加熱域が鉛直に広がり,その加熱率極大値が小さ くなる.これゆえ,High-UV 実験では,雲層上端の東西風と子午面循環が LowUV 実験よりも弱くなり,潮汐波の振幅および運 動量フラックスも小さくなる (山本他, 2019 年度気象学会秋季大会).

### 3.2.惑星の自転と半径を変えた理想化大気大循環モデル実験

雲で覆われた惑星中層大気の大循環構造に関して,理想化大気大循環モデル(Yamamoto and Takahashi 2016, 2018)の自転と惑星 半径を変えた実験を行った.エクマン数と無次元熱時定数を変えずに,惑星半径と自転速度を同じ割合で変化させた実験(3,8,15 倍)では,子午面循環と波動による運動量輸送は Gierasch メカニズムが有効に機能すること示し,同じロスビー数 Ro に対して鉛 直積分した水平運動量フラックスや全球平均した鉛直運動量フラックスの分布で相似構造が見られる.ロスビー数が小さくなる につれて(Ro~23  $\Rightarrow$  Ro~7.5),子午面循環による水平方向の運動量輸送と熱輸送が大きくなり,帯状流流速は大きくなるが,超回 転強度(大気角速度/惑星自転角速度)は小さくなる.また,解析期間を惑星自転周期で規格化することで,卓越擾乱の変動に 関する相似構造も見られ,そのロスビー数依存性を整理することができた(山本他,EGU Assembly 2019).

地球型惑星対流圏大気大循環モデル(global WRF)では、惑星半径が小さい(Ro~1)と、西風ジェットが極域で形成され、その ジェットが高緯度でよりサブグリッドスケール水平拡散の影響を受けやすい(Lu and Yamamoto 2020, under review after revision). ロスビー数が1よりも大きい金星やタイタンでも同様な懸念(極域で発達したジェットがサブグリッドスケール水平 拡散の影響を受けやすい)が生じるかもしれない.

# 4. まとめと今後の課題

現実的な金星大気大循環モデルでは、Yamamoto et al. (2019)を T21 から T63 に変更し、太陽座標と地理座標から見た「金星大 気大循環、潮汐波および定在波の構造」を明らかにした.今後、潮汐波および定在波の運動量・熱フラックスを明らかにする予 定である.また、紫外線吸収物質の変動に対する大循環構造の応答も明らかにしなければならない.

厚い雲で覆われた惑星の大気大循環の力学に関しては、惑星半径や自転を変えた実験に基づいて、1よりも高いロスビー数の 大気大循環構造、熱・運動量輸送過程およびその変動の相似性を明らかにした.さらに、波と平均場のエネルギー変換の解析に 基づき、惑星日より短い周期の擾乱および大気大循環変動について今後調査したい.

厚い雲で覆われた惑星中層大気大循環と比較するために、地球型惑星対流圏大気大循環の惑星半径依存性や水平拡散依存性を 整理した.ロスビー数のみならず、サブグリッドスケール水平拡散から算出したレイノルズ数を用いて、なぜ高いロスビー数で 極域ジェットが水平拡散の影響を受けやすいのか?を明らかにしなければならない.

- (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, J. Geophys. Res. Planets 121, 558-573.
- (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, J. Geophys. Res. Planets 123, 708-728.
- (4) Yamamoto, M., Ikeda, K., Takahashi, M., & Horinouchi, T., 2019: Solar-locked and geographical atmospheric structures inferred from a Venus general circulation model with radiative transfer. Icarus, 321, 232-250.

# トッテン棚氷の海洋シミュレーション

# Development of ocean simulation with focus on the Totten Ice Shelf

# 中山 佳洋,北海道大学•低温科学研究所, E-mail: Yoshihiro.Nakayama(at)lowtem.hokudai.ac.jp 青木 茂,北海道大学•低温科学研究所, E-mail: shigeru(at)lowtem.hokudai.ac.jp Yoshihiro Nakayama, Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University Shigeru Aoki, Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University

### 要旨(明朝 9pt)

東南極に位置するトッテン棚氷は、近年、氷厚が減少していることが知られ、将来的に棚氷の融解、氷河による氷の海への流 出の加速によって、海面上昇に大きく寄与しうることが指摘されている。オーストラリア、アメリカ、日本によって行われた海 洋観測では、トッテン棚氷下部に約-0.5°C程度の暖かい水塊(modified Circumpolar Deep Water (mCDW))が存在することが示 された。しかし、トッテン棚氷に着目した数値モデル研究は少なく、mCDWの流入経路といった基本的なこともまだよくわかって いない。本研究では、トッテン棚氷への mCDW の流入、トッテン棚氷からの氷河融解水の流出などに着目して数値シミュレーシ ョンを行う。近年の観測データを統合的に利用し、より現実に近い海洋の状態を再現する。このような数値シミュレーションの 開発は、この海域の南極氷床の海面上昇への寄与をより現実的に見積もる上で欠かせない。

### 1. はじめに

トッテン氷河は、近年氷厚が減少していることが知られている。継続的な棚氷厚 の減少が続けば、氷河流動が加速し、海面上昇へ大きく寄与しうる。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暖かい水塊 (mCDW)の流入、トッテン棚氷からの氷河融解水の流出などに着目したモデル開発を 行った。NASA ジェット推進研究所によって進められているデータ同化プロダクト (Estimating the Circulation and Climate of the Ocean (ECCO))を境界条件と して利用することで、領域モデルまたは全球海洋モデルと比べて、観測データの再 現性が格段に高いことがこの研究の大きな特徴である。

### 2. 問題設定·方法

モデルの解像度は、水平方向約4 km、 鉛直方向には 50 層である。モデルの初期 値は、January World Ocean Atlas 2009 の水温と塩分から 25 年スピンアップした ものを用いる。海底地形は International Bathymetric Chart of the Southern Ocean (IBCSO)を用い(Figure 1)、棚氷形状は、Antarctic Bedrock Mapping (BEDMAP-2)を用いる。さらに、NASA ジェット推進研究所によって進められているデータ同化プ ロダクト (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。

#### 3. 結果と考察

トッテン棚氷沖に着目した海洋数値モデルを開発することができた。海洋モデルを 用いて再現された 552m 深のポテンシャル水温 (図 1a シェイド)、塩分 (図 1b シェイ ド)と同一水深における海洋アルゴフロートによって得られたポテンシャル水温、塩分

データを比べると両者は非常によく類似しており、海洋の循環場を現実に近く再現できていることがわかる。また、トッテン棚 氷沖の海洋の熱容量は、数年スケールの変動を示し、この変動は、トッテン氷河の流動速度と整合的であった(Green et al., 2018)。

## 4. まとめと今後の展望

トッテン氷河沖に着目した海洋モデルの開発を行った。この海洋モデルは、トッテン沖の海洋の水温変動を現実的に示すこと ができることもわかり、この原因を解析することは、トッテン棚氷の融解のメカニズムの理解につながる。さらに、将来的には、 氷床・棚氷モデルとの結合を検討している。これらを通して、この海域の南極氷床の海面上昇への寄与をより現実的に見積もる。

# 参考文献

(1) Greene, C. A., Blankenship, D. D., Gwyther, D. E., Silvano, A., and van Wijk, E., 2017: Wind causes Totten Ice Shelf melt and acceleration. Science Advances, 3(11).



Figure 1 再現された 552m 深のポテンシ ャル水温(a)、塩分(b)と同一水深にお ける海洋アルゴフロートによって得られた ポテンシャル水温、塩分データ。TIS はト ッテン棚氷の位置を示す。赤い線で囲まれ た部分は、トッテン棚氷沖の海洋の熱容量 の計算を行った領域を示す。

# アジアモンスーン降水の将来変化と海面水温変化パターンとの関係

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

# 高橋 洋, 首都大・地理, E-mail: hiroshi3(at)tmu.ac.jp 神澤 望, 首都大・地理 Hiroshi Takahashi, Department of Geography, Tokyo Metropolitan University Nozomi Kamizawa, Department of Geography, Tokyo Metropolitan University

# 要旨

気候変動によりアジアモンスーンの降水とそれに関わる大気水循環がどのように変化するのかについて、海面水温(SST)昇温の空間パターンの変化に着目し調査する。まずは、大規模なアンサンブル実験データセット(d4pdf)などを利用し、異なる SST 強制パターンの変化により、どの程度の降水量の将来変化の空間パターンが変化するのかを調べる。どのような SST の昇温パターンに、アジアモンスーン降水量が影響されやすいかを同定する。

#### 1. はじめに

気候変動によりアジアモンスーンの降水とそれに関わる大気 水循環がどのように変化するのかについて、海面水温(SST)昇温 の空間パターンの変化に着目し調査する。まずは、大規模なアン サンブル実験データセット(d4pdf)などを利用し、異なる SST 強 制パターンの変化により、どの程度の降水量の将来変化の空間パ ターンが変化するのかを調べる。どのような SST の昇温パターン に、アジアモンスーン降水量が影響されやすいかを同定する。さ らに、SST パターンが土壌水分などの地表面状態の将来変化と、 どのように関連しているのかについても評価する。特に降水の将 来変化の不確実性が大きい、将来変化の地域性を含めて調べる。

#### 2. 問題設定·方法

大規模なアンサンブル実験データセット(d4pdf; Mizuta et al. 2016)などを利用し、異なる SST 強制パターンの変化により、 どの程度の降水量の将来変化の空間パターンが変化するのかを 調べる。そのために、各 SST 強制パターン内でのばらつきや、各 SST 強制パターン間でのばらつきを評価する。まずは、CMIP5 で のアジアモンスーン域の降水量の変化と、d4pdf での降水量の変 化などを調べた。

#### 3.結果と考察

図1は、CMIP5モデルでの夏季降水量の将来変化である(詳細は、Kamizawa and Takahashi (2018)を参照のこと)。CMIP5では、 アジアモンスーン域において、概ね降水量が増加している。空間 分布は循環場のパターンと良く一致しており、低気圧性の循環の 強化と降水量の増加が一致している。また、降水量の増加域は、 モンスーントラフと呼ばれる対流を伴う熱帯擾乱活動の活発域 と一致している。しかしながら、IPCC-AR5などでもよく知られて いるように、全球規模での降水量増加に対して、地域規模での降 水量変動の予測は、循環の変化などと対応しており、予測が難し いとされている。

図2は、同様の図をd4pdf で作成したものである。d4pdf で与 えられるすべてのSST 強制の平均である。6個のSST 強制パター ンがあり、各SST パターンに15のアンサンブルメンバーがある。



図 1:CMIP5 での夏季降水量の将来変化。



図 2:d4pdf での夏季降水量の将来変化。

降水量は、全球で増加するものの SST 強制により分布が大きく異なる。特に前述の様に、地域規模の降水量変動予測は難しく、 循環の変化パターンが大きく異なることで、CMIP5 とは異なる結果が得られている。

今後は、SST 強制パターン毎にどのように将来変化が異なるのかを詳細に調べる。また、別の気候モデルを用いた場合での応答なども考慮する。

参考文献: Kamizawa, N., and H. G. Takahashi, 2018: Projected Trends in Interannual Variation in Summer Seasonal Precipitation and Its Extremes over the Tropical Asian Monsoon Regions in CMIP5. J. Climate, 31, 8421-8439, doi:10.1175/JCLI-D-17-0685.1.

# 衛星降水レーダと静止衛星高頻度観測を組み合わせた 降水システムのライフサイクルに関する研究 A study on the life cycle of precipitation systems by a combined use of

# spaceborne precipitation radar and geostationary satellite infrared observations

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

### 要旨

将来気候変動の予測において雲や降水は大きな不確定要素となっているが、これは気候モデルが解像できる 大規模場と実際に発生する雲・降水の関係性についての知見の不足によるところが大きい。そこで本研究課 題では、静止衛星高頻度観測および衛星搭載降水レーダを用いて雲・降水システムを同定し、雲・降水シス テムの発生から終息までの一連の変化を統計的かつ時空間的に記述することを目的とした研究を行う。本年 度は特に雲システム数の日周期・半日周期変動に着目した解析を行った。特に面積が10<sup>2</sup>~10<sup>4</sup> km<sup>2</sup>程度の雲 システム数に半日周期変動が存在することが見出された。この半日周期変動は太陽同期の半日潮汐波に関係 するものであることが強く示唆された。

# 1. はじめに

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

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

#### 2. 問題設定·方法

本年度はまず、GPM 主衛星による降水観測から降水システムをラベリングによって同定するアルゴリズム、およびひまわり 8 号による 10 分間隔のフルディスク赤外輝度温度観測から雲システムをラベリングによって同定し追跡するアルゴリズムの開 発を行った。続いて、ひまわり 8 号観測から同定された雲システムについて、特にそれらの大きさ別の数に着目し、日周変動に ついて詳細な解析を行った。

#### 3. 結果と考察

本年度に得られた主な成果は以下の通りである。

(1) ひまわり 8 号のバンド 13(中心波長 10.4 µm) 輝度温度観測データを用いて、個々の雲システムを同定するプログラム群を 開発した(業績 1,7)。このプログラム群によって、10分間隔のフルディスク観測から、各時刻における雲システムの数を客観的 に求め、個々の雲システムの地理的位置や面積、輝度温度の平均値・最低値(最も活発な位置)を算出することが可能になった。 (2) GPM DPR 観測データを用いて、個々の降水システムを同定するプログラム群を開発した(業績 2,4,6)。このプログラム群に よって、個々の降水システムの地理的位置や面積、降水強度の平均値・最大値、レーダエコー頂の強度別平均値・最大値などを 算出することが可能になった。

(3) (1)で開発した雲システム同定プログラム群を、2015 年 11 月~2016 年 12 月(14 か月)のひまわり 8 号データに適用し、熱帯海洋上における雲システム数の日周期変動を調査した。熱帯域では雲量や降水量などに太陽同期の日周期変動が存在することがよく知られているが、本研究において新たに、特に面積が 10<sup>2</sup>~10<sup>4</sup> km<sup>2</sup>程度の雲システム数に半日周期変動が存在することが見出された(Fig. 1, 2;業績 1)。この半日周期変動をもたらす力学的な要因について ERA5 再解析データを援用して調査した。 その結果、雲システム数の増減と大気潮汐との位相関係から、太陽同期の半日潮汐波との関わりが強く示唆された。



Fig. 1 Joint frequency distribution of local time and the area coverage of the cloud system. Values are shown as anomalies from their corresponding daily mean.



Fig. 2 Power spectrum density normalized by the variance of the of the cloud system number. Abscissa and ordinate indicate the frequency (unit: cycle per day) and area coverage of the cloud system (unit: km<sup>2</sup>), respectively.

# 4. まとめと今後の展望

本年度は主に静止衛星高頻度観測を用いて同定した雲システムについて、特に雲システム数の日周期・半日周期変動に着目した解析を行った。特に面積が10<sup>2</sup>~10<sup>4</sup>km<sup>2</sup>の雲システム数に半日周期変動が見出され、太陽同期の半日潮汐波との関係が強く示唆された。これまでの静止衛星の観測時間間隔は30分~1時間程度と長かったため、特に降水システムの発達初期を追うことが難しかった。静止衛星の高頻度観測を活用することにより、降水システムの発生から終息までの全ての段階における3次元的な降水特性情報が得られることが期待される。本研究で得られた結果は、全球非静力学モデルのパフォーマンス検証や、気候モデル、特にいわゆる Arakawa-Schubert 型の積雲パラメタリゼーションの評価に役立つと期待される。

#### 関連業績

- (1) 内木 詩歩, 2020:ひまわり 8 号高頻度観測から同定した熱帯海洋上の雲システムの日周期. 富山大学大学院理工学教育部 2019 年度修士論文, 30pp.
- (2) 進藤 愛可, 2020:局所的な SST・CWV 分布と組織化降水システムの降水特性の関係.富山大学理学部 2019 年度卒業論文, 33pp.
- (3) 染谷 由樹, 2020:静止衛星高頻度観測を用いた降雨開始予測に関する統計的解析. 富山大学理学部 2019 年度卒業論文, 42pp.
- (4) 進藤 愛可,濱田 篤,安永 数明,2019:局所的な SST と組織化降水システムの降水特性との関係.2019 年度日本気象学会 中部支部研究会,富山,2019 年 11 月 28-29 日.
- (5) 染谷 由樹, 濱田 篤, 安永 数明, 2019: ひまわり 8 号高頻度観測を用いた降雨開始以前の雲の発達に関する統計的解析. 2019 年度日本気象学会中部支部研究会, 富山, 2019 年 11 月 28-29 日.
- (6) 進藤 愛可,濱田 篤,安永 数明,2019:局所的な SST 勾配と組織化降水システムの降水特性との関係.日本気象学会2019 年度秋季大会,福岡,2019年10月28-31日.
- (7) 内木 詩歩, 安永 数明, 濱田 篤, 2019: ひまわり 8 号高頻度観測から同定した熱帯海上の雲システムの日周期. 日本気象 学会 2019 年度秋季大会, 福岡, 2019 年 10 月 28-31 日.

# 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 横井 孝暁,東大・大気海洋研, E-mail: tyokoi(at)aori.u-tokyo.ac.jp 金子 仁,東大・大気海洋研, E-mail: h\_kaneko(at)aori.u-tokyo.ac.jp 郭 晨穎,東大・大気海洋研, E-mail: guochenying(at)aori.u-tokyo.ac.jp 瀬藤 聡,水産研究・教育機構, E-mail: setou(at)affrc.go.jp Shin-ichi Ito, Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo Takaaki Yokoi, Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo Hitoshi Kaneko, Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo Chenying Guo, Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo Takashi Setou, Japan Fisheries Research and Education Agency

# 要旨(明朝 9pt)

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

# 1. はじめに

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

#### 2. 問題設定·方法

領域海洋モデル Regional Ocean Modeling System (ROMS; Haidvogel et al., 2008) と低次生態系モデル NEMURO (North Pacific Ecosystem Model for Understanding Regional Oceanography; Kishi et al., 2007) 、および魚類回遊モデル NEMURO. FISH (NEMURO For Including Saury and Herring; Ito et al., 2004) を結合させた ROMS-NEMURO. FISH (Rose et al, 2015)を北西 太平洋を対象に OAKFOREST 上で構築、積算し、CCSR Ocean Component Model (COCO; Hasumi, 2006)上で計算された低次生態系 モデルと相互比較する。本年度は、引き続き領域海洋モデル ROMS の改良を行い、多くの回遊性魚種において重要となる黒潮流 路の再現性について検証および改良を行った。

## 3. 結果と考察

これまでモデル内において亜熱帯循環が弱化傾向を示し、黒潮および黒潮続流の位置が実際の位置よりも南偏傾向を示すことが問題であった。この問題を解決するため、モデルパラメータやスキームの変更を行い、試験計算を行ってきた。モデルパラメ ータ依存性をより迅速に調べるため、低解像度モデル(1/4°)を用意し、モデル内における移流スキームを、水平移流については3次の風上差分スキームから4次のAkimaスキームに、鉛直移流については4次の風上差分スキームから4次のAkimaスキ ームに変更して実験を実施した。その結果、これまで問題となっていた亜熱帯循環の弱化が解消された。



## 4. まとめと今後の展望

移流スキームの変更によって亜熱帯循環および黒潮、黒潮続流の位置及び強度が現実の状況に近づいた。しかし、これらはモ デル解像度にも依存する可能性があるため、高解像度モデルについても同様の比較実験が必要である。また、低次栄養段階生態 系モデルおよび魚類成長-回遊モデルを結合させた実験も必要であるが、オフラインでサンマ、カタクチイワシ、マサバ、マイ ワシに関する魚類成長-回遊モデルの開発は順調に進んでおり、低次栄養段階生態系モデルと領域循環モデルの結合実験におい て餌料環境場の再現性が確認できれば、実験の実施が可能な状況にある。

- Haidvogel D. B., H. Arango, W. P. Budgell, B. D. Cornuelle, E. Curchitser, E. Di Lorenzo, K. Fennel, W. R. Geyer, A. J. Hermann, L. Lanerolle, J. Levin, J. C. McWilliams, A. J. Miller, A. M. Moore, T. M. Powell, A. F. Shchepetkin, C. R. Sherwood, R. P. Signell, J. C. Warner and J. Wilkin (2008) Ocean Forecasting in Terrain-Following Coordinates: Formulation and Skill Assessment of the Regional Ocean Modeling System. Journal of Computational Physics, 227, 3595-3624.
- (2) Hasumi H., CCSR Ocean Component Model (COCO) version 4.0. CCSR Report No. 25, 103 pp., 2006.
- (3) Ito S., M. J. Kishi, Y. Kurita, Y. Oozeki, Y. Yamanaka, B. A. Megrey and F. E. Werner (2004) Initial design for a fish bioenergetics model of Pacific saury coupled to a lower trophic ecosystem model, Fish. Oceanogr., 13, Suppl. 1, 111-124.
- (4) Kishi M. J., M. Kashiwai, D. M. Ware, B. A. Megrey, D. L. Eslinger, F. E. Werner, M. N. Aita, T. Azumaya, M. Fujii, S. Hashimoto, D. Huang, H. Iizumi, Y. Ishida, S. Kang, G. A. Kantakov, H. Kim, K. Komatsu, V. V. Navrotsky, S. L. Smith, K. Tadokoro, A. Tsuda, O. Yamamura, Y. Yamanaka, K. Yokouchi, N. Yoshie, J. Zhang, Y. I. Zuenko, V. I. Zvalinsy (2007) NEMURO -a lower trophic level model for the North Pacific marine ecosystem. Ecol. Model., 202, 12-25.
- (5) Rose, K. A., J. Fiechter, E. N. Curchitser, K. Hedstrom, M. Bernal, S. Creekmore, A. Haynie, S. Ito, S. Lluch-Cota, B. A. Megrey, C. A. Edwards, D. Checkley, T. Koslow, S. McClatchie, F. Werner, A. MacCall, and V. Agostini (2015) Demonstration of a fully-coupled end-to-end model for small pelagic fish using sardine and anchovy in the California Current. Prog. in Oceanogr., 138, 348-380.

# 衛星データ活用による全球炭素収支推定に向けた大気輸送モデル開発研究

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

齊藤 誠,環境研・地球環境研究センター, E-mail: saito.makoto(at)nies.go.jp
丹羽 洋介,環境研・地球環境研究センター, E-mail: niwa.yosuke(at)nies.go.jp
佐伯 田鶴,環境研・地球環境研究センター, E-mail: saeki.tazu(at)nies.go.jp
村上 和隆,環境研・地球環境研究センター, E-mail: murakami.kazutaka(at)nies.go.jp
Makoto Saito, Center for Global Environmental Research, NIES
Yosuke Niwa, Center for Global Environmental Research, NIES
Tazu Saeki, Center for Global Environmental Research, NIES
Kazutaka Murakami, Center for Global Environmental Research, NIES

# 要旨

衛星が観測する地球の表面および大気から反射または散乱した太陽光スペクトルデータから大気中の二酸 化炭素やメタン等の温室効果ガス濃度を導出する過程において、エアロゾルの時空間分布は必須の情報であ る。本研究では大気輸送モデルの精緻化を進めることにより、エアロゾルの時空間分布変動に関するモデル 再現性の向上を図る。モデルの推定結果は衛星観測データ、また、異なるモデルによる推定結果との比較を 実施し、本研究において開発を進める大気輸送モデルの再現性を確認した。

#### 1. はじめに

人間活動に伴う大都市からの温室効果ガスや大気汚染物質の排出、北方針葉樹林帯における夏季の二酸化炭素吸収と湿地から のメタン放出、干ばつが引き金となって発生する大規模森林火災に伴う温室効果ガス排出等、温室効果ガスの吸排出源は全球に 渡って複雑に分布し、また、その吸排出量は時空間方向で大きく変動する。これらの変動を把握し、全球炭素循環と気候変動の 理解を深める上で、大気輸送モデルや陸域・海洋モデルを用いた全球炭素循環の再現と、個々のプロセスおよび各プロセス間の 関係性の理解、また、衛星観測による広域の温室効果ガス濃度分布の現状把握とその情報の蓄積は、現在では必要不可欠なツー ルとなりつつある。本研究では、温室効果ガス観測技術衛星 GOSAT および GOSAT-2 が観測する、赤外域の太陽光スペクトルデー タから温室効果ガス濃度を導出する上でも必要となるエアロゾル時空間分布情報について、エアロゾル大気輸送モデルの開発を 進めつつ、独立した観測データおよびモデルとの比較を通し、その再現性を確認することを目的とする。

#### 2. 問題設定·方法

本研究ではエアロゾルの時空間変動分布推定にNICAM-SPRINTARS (Takemura et al. 2000, 2005; Suzuki et al, 2004; Dai et al. 2014; Goto et al. 2015) を使用する。NICAM-SPRINTARS は水平解像度約 223 km (g-level 5)、鉛直 40 層、時間分解能 20 分で計算を実施した。NICAM-SPRINTARS によるモデル計算の入力データとして使用する排出インベントリについては、国立環境研究所 五藤主任研究員から提供して頂いたデータを基に、鉛直層を本研究で使用する形式へ変換した上で使用した。また、ナッジング用水平風速場には気象庁 55 年長期再解析 (JRA-55) データモデル面解析値 anl\_mdl\_ugrd (東西風)、anl\_mdl\_vgrd (南北風)を使用する。

モデル推定結果の比較・検証に MODIS のエアロゾル光学的厚さ (AOD) データを使用した。MODIS Collection 6 の AOD データ を用いて、2003 年から 2014 年までの 12 年間平均した値を使用した。また、消散係数の鉛直勾配を比較するために CALIPSO レ ベル 3 (CAL\_LID\_L3\_APro\_AllSky-Standard-V3-00) の消散係数データ (km<sup>-1</sup>)を使用した。解析に使用したデータは 2013 年から 2015 年の 3 年間で、CALIPSO データは日中および夜間の両データを用いた。3 年間のデータから、夏季(4-9 月)および冬季(10 -3 月) における消散係数の平均値を計算し、解析に使用した。

他のモデル推定値との比較として、本研究では Assimilation SPRINTARS (Schutgens et al., 2010)を使用した。これは国立 環境研究所 GOSAT プロジェクトにおいて MIROC-SPRINTARS にエアロゾルデータ同化手法を取り入れて計算したものである。モデ ル出力データは富士通 FIP 中村氏に提供して頂いた。モデルの解像度は水平 T42 (2.8125 度)、鉛直 20 層、時間間隔は 20 分で ある。気象データは気象庁が提供する GPV データ、Hadley センターが提供する海氷・海面温度データを使用した。モデル気象場 は水平風速および気温に対しナッジングを行った。エアロゾル排出インベントリには、森林火災起源として GFED3.1(1997—2011 年の気候値)、人為起源として HTAP v2 (2010 年)を用いた。同化するエアロゾルデータには米国海軍研究所 NRL が提供する 6時 間毎の MODIS AOD データを使用した。AOD の同化はアンサンブルカルマンフィルターを用いて 6時間毎に行った。

#### 3. 結果と考察

NICAM-SPRINTARS が推定したエアロゾル光学的厚さ AOD を、MODIS および Assimilation SPRINTARS の AOD と比較する。対象 とする波長域は MODIS が 532 nm、NICAM-SPRINTARS と Assimilation SPRINTARS が 550 nm である。NICAM-SPRINTARS および Assimilation SPRINTARS は 2015 年を解析対象とする。2 月および 8 月における AOD の全球分布を図 1 に示す。2 月における MODIS AOD は、アフリカ中央部、インド北東部、中国沿岸部で高い値を示す。この特徴は NICAM-SPRINTARS でも再現出来ている ことがわかる。Assimilation SPRINTARS ではシベリアにも高濃度域が見られるが、NICAM-SPRINTARS ではこの高濃度域は無い。 8 月における MODIS AOD は、上記領域に加えアマゾン中央部、サハラ西部、およびソマリアからアラビア海に渡る領域で AOD が 高い値を示す。NICAM-SPRINTARSではサハラ西部の AOD が低いが、他の領域では MODIS 同様に AOD が高い値を示す。図1の結果 を 10 度格子毎に平均した場合(60°N-60°S)、2 月および8 月における MODIS AOD との相関係数は NICAM-SPRINTARS が 0.68、0.76、 Assimilation SPRINTARS が 0.78、0.77 (いずれも p < 0.01) であった。MODIS AOD に同化した Assimilation SPRINTARS の結果 と同程度の相関係数を NICAM-SPRINTARS が示した点は注目に値する。各月の MODIS AOD との相関係数は Assimilation SPRINTARS および NICAM-SPRINTARS ともに概ね 0.7以上であった.



図 1. 2月(上)および 8月(下)における AOD 分布。 左から MODIS、NICAM-SPRINTARS、 Assimilation SPRINTARS を示す。



図 2 に, 夏季の13 領域 (Koffi et al., (2016)参照) における消散係数の平均鉛直勾 配を示す。大西洋赤道域 (CAT) やアマゾン (SAM),インド (IND)では NICAM-SPRINTARS の 地表面付近の消散係数は CALIPSO に比べて低 い値となった。但し、NICAM-SPRINTARS の値 は概ね CALIPSO のバラツキ内に収まっている ことがわかる。両者の相関係数は多くの領域 で 0.9 以上 (p < 0.01) の値であった。

次に、NICAM-SPRINTARS の消散係数の鉛直 分布を他のモデルと比較するために、 AeroCom phase II (Koffi et al., 2016)の 結果を代用する。Koffi et al. (2016)は、11 種類のエアロゾル大気輸送モデルの推定結果 を用いて CALIPSO データと比較し、モデル推 定精度の検証を行った。CALIPSO データとの比

較において、彼らは地上から上空6 km までの AOD を用いて規格化した消散係 数鉛直分布を使用しているため、本研究でも同様の手法で NICAM-SPRINTARS の 消散係数を規格化した。この解析では CALIPSO、NICAM-SPRINTARS ともに 2013 -2015年に渡る消散係数の平均値を使用した。海洋に面している NAT や NWP 領域では消散係数の鉛直勾配が大きく、これらの領域ではモデル間の差が大き くなることが Koffi et al. (2016)では報告されている一方、本研究における CALIPSO と NICAM-SPRINTARS の差は高度 1 km 以下の境界層内の勾配を除けば 概ね一致した。また、森林火災の影響が大きい SAM、SAF、CAF では、特に SPRINTARS の再現性が低いことが Koffi et al. (2016)で報告されているが、 SAM を除く 2 領域における NICAM-SPRINTARS の結果は、Koffi et al. (2016)に よるモデル間のバラツキ内に収まるものと思われる。

#### 4. まとめと今後の展望

今年度は、NICAM-SPRINTARS の開発を進めつつ、モデル推定したエアロゾル 光学量の鉛直積算量および鉛直分布について、MODIS および CALIPSO の衛星観 測、Assimilation SPRINARS との比較を実施し、モデルの再現性を評価した。 今後は NICAM-SPRINTARS で推定したエアロゾル時空間変動情報を、温室効果ガ ス観測技術衛星 GOSAT および GOSAT-2 で使用するカラム濃度導出アルゴリズ ムへ提供し、導出したカラム濃度場での確認作業を予定している。また、モデ ルの更なる改善に向け、来年度以降にエアロゾル同化手法の導入について検討 する予定である。

- Dai, T., D. Goto, N. Schutgens, X. Dong, G. Shi, and T. Nakajima (2014), Simulated aerosol key optical properties over global scale using an aerosol transport model coupled with a new type of dynamic core, Atmospheric environment, 82, 71-82.
   Goto, D., et al. (2015), An evaluation of simulated particulate sulfate over east asia through global model
- intercomparison, Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 120 (12), 6247-6270.
- (3) Koffi, B., et al. (2016), Evaluation of the aerosol vertical distribution in global aerosol models through comparison against CALIOP measurements: AeroCom phase II results, Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 121 (12), 7254-7283.
- (4) Schutgens, N., T. Miyoshi, T. Takemura, and T. Nakajima (2010), Applying an ensemble Kalman filter to the assimilation of aeronet observations in a global aerosol transport model., Atmospheric Chemistry and Physics, 10 (5).
- (5) Suzuki, K., T. Nakajima, A. Numaguti, T. Takemura, K. Kawamoto, and A. Higurashi (2004), A study of the aerosol effect on a cloud field with simultaneous use of GCM modeling and satellite observation, Journal of the Atmospheric Sciences, 61 (2), 179–194.
- (6) Takemura, T., H. Okamoto, Y. Maruyama, A. Numaguti, A. Higurashi, and T. Nakajima (2000), Global three-dimensional simulation of aerosol optical thickness distribution of various origins, Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 105 (D14), 17,853–17,873.
- (7) Takemura, T., T. Nozawa, S. Emori, T. Y. Nakajima, and T. Nakajima (2005), Simulation of climate response to aerosol direct and indirect effects with aerosol transport-radiation model, Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 110 (D2).

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

関ロ 美保,海洋大・学術研究員, E-mail: miho@kaiyodai.ac.jp 大方 めぐみ, JAXA・EORC, E-mail: ohkata.megumi2@jaxa.jp Miho Sekiguchi, Tokyo University of Marine Science and Technology Megumi Okata, Earth Observation and Research Center, Japan Aerospace Exploration Agency

# 要旨

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を再現するように最適化されているため、二酸化炭素 4 倍増のケースで放射強制力の精度が良くないことがわかっている(Pincus et al., 2015)。これを受けて、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が作成済みである。今年度は、RFMIP-IRF で設定された大気状態の計算結果を示し、検討課題を整理した。

CMIP6 に合わせて行われる今回の RFMIP(The Radiative Forcing Model Intercomparison Project)は ERF, IRF, SpAer の3つのサブプロジェクトから成り、関ロが放射伝達モデルの瞬間強制力を比較する IRF について MstrnX を用いて計算を行った。結果を組み合わせて瞬時放射強制力を導出、検討を行っている。大気上端での温室効果気体の増加の放射強制力(2014 年 – 1850 年)は 2.61 ± 0.85 W/m<sup>2</sup>、二酸化炭素倍増の放射強制力は 4.01 ± 1.28 W/m<sup>2</sup>、4倍増は 6.72 ± 2.16 W/m<sup>2</sup>となった。これらは 100 地点の放射強制力の平均と標準偏差を表している。また、RCP8.5 と産業革命前の大気上端の放射強制力では 6.91 ± 2.09 W/m<sup>2</sup>となった。これら MstrnX の結果のみ示しているので、LBL モデルの結果と比較して引き続き検討を行いたい。

# 1. はじめに

MIROC に用いられている放射伝達モデル MstrnX は気体吸収過程を 29 バンド 111 チャンネル版が 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を再現するように最適化されているため、二酸化炭素 4 倍増のケースで放射 強制力の精度が良くないことがわかっている(Pincus et al., 2015)。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。今年度は、これら2つのテーブルを用いて RFMIP-IRF(Pincus et al., 2016)で設定された大気状態について計算し、結果を比較した上で検討課題を整理した。

# 2. 問題設定·方法

CMIP6 に合わせて行われる今回の RFMIP(The Radiative Forcing Model Intercomparison Project)は ERF, IRF, SpAer の3つのサブプロジェクトから成り、関ロが放射伝達モデルの晴天状態の瞬間強制力を比較する IRF について MstrnX の結果を担当した。比較に用いられる大気状態は従来から大幅に増加し、18の実験を 2014 年の ERA-interim(鉛直 60 層)から抽出した大気状態 100 地点に適用して計算を行った。100 地点は適度に振り分けられており(図 1)、陸上が 31 地点、海上が69 地点であり、季節にもバラツキが見られる。

18 の実験はそれぞれ『現在の大気状態』『産業革命前の温室効果気体濃度』『二酸化炭素4倍増状態』『2100年の温室効果気体濃度』『二酸化炭素0.5倍増状態』『二酸化炭素2倍増状態』『二酸化炭素3倍増状態』『二酸化炭素8倍増状態』『産業革命前の二酸化炭素濃度』『産業革命前のメタン濃度』『産業革命前の一酸化二窒素濃度』『産業革命前のオゾン濃度』『産業革命前のハロカーボン類濃度』(ここまでの気体濃度を除く大気状態は全て現在状態)『現在の大気+4K状態』『現在の





大気+4K 状態(湿度固定)』『産業革命前の大気状態』『2100年の大気状態』『最終氷期の大気状態』であり、2100年は IPCC RA5 における RCP8.5 のケース、二酸化炭素 x 倍増状態は産業革命前の二酸化炭素濃度からの x 倍増を意味する。また、今回は主要 7 気体以外にも微量気体濃度が 40 種類与えられているが、現在 MstrnX に導入されている、HITRAN2004 で取り扱いのあった気体 28 種類の内 16 種類が該当した(表 1)。考慮すべきとされる気体の種類が変化しつつ増加している。最新の HITRAN2016 (Gordon et al., 2017)を確認したが、全ての微量気体のデータが網羅されているわけではなく、7 種類の微量気体の扱いがなかった(表 1、斜字体)。他の放射伝達モデル担当者と情報交換しつつ、対応を検討したい。

表 1: RFMIP-IRF で提供された大気状態に含まれる微量気体。太字の気体は MstrnX で取り扱いのある気体、 斜字体の気体は HITRAN2016 で取り扱いのない気体。

	11 J 11-0	×((+)(\$ 111111111111111111111111111111111111			
CFC-11	CFC-12	CFC-113	CFC-114	CFC-115	
HCFC-22	HCFC141b	HCFC142b	Halon-1211	Halon-1301	Halon-2402
HFC-23	HFC-32	HFC-43-10mee	HFC-125	HFC-134a	HFC-143a
HFC-152a	HFC-227ea	HFC-236fa	HFC-245fa	HFC-365mfc	
CF <sub>4</sub>	C2F6	$C_3F_8$	$c-C_4F_8$	$C_4F_{10}$	$C_{5}F_{12}$
$C_{6}F_{14}$	C7F16	$C_{8}F_{18}$	CCl <sub>4</sub>	SF <sub>6</sub>	NF <sub>3</sub>
CH <sub>3</sub> Cl	CH <sub>3</sub> Br	CH <sub>3</sub> CCl <sub>3</sub>	$CH_2Cl_2$	CHCl <sub>3</sub>	$SO_2F_2$

# 3. 結果と考察

これらの結果を組み合わせて 100 地点での瞬時放射強制力を導出し、検討を行っている。大気上端、対流圏界面を想定した 200hPa 付近、地表面での放射強制力を表 2 に示す。今回の 100 種類の気温構造は対流圏がはっきりわからないものもあるため、 200hPa 付近での結果を対流圏の代わりに示す。この手法は先行研究でも用いられている。温暖化対応版(bnd29ch11)よりも 4 倍 増対応版(bnd29ch147)のほうがやや値が小さく、4 倍増対応版による調整が働いていることがわかる。しかし、過去研究などと 比較すると、どちらもまだ過大評価と考えられる。これらは *MstmX* の結果のみ示しているので、LBL モデルや他のブロードバ ンドモデルの結果と比較するなどして引き続き検討したい。また、今回は二酸化炭素の結果を示しているが、水蒸気、メタン、一酸化二窒素などの結果も精査し、検討を行う予定である。

表 2: 大気上端、200hPa 付近、および地表面での放射強制力(W/m<sup>2</sup>)の 100 ケースの平均と標準偏差。上段は温暖化対応版(bnd29ch111)、下段は 4 倍増対応版(bnd29ch147)による結果。

	温室効果気体 (現在-産業革命前)	二酸化炭素 倍増	二酸化炭素 4倍增	RCP8.5 (2100 年-産業革命前)
TOA	$2.84\pm0.89$	$2.58\pm0.84$	$5.60 \pm 1.86$	$7.49 \pm 2.29$
	$2.61\pm0.85$	$2.70\pm0.82$	$5.41 \pm 1.72$	$6.91 \pm 2.09$
200hPa 付近	$4.16\pm0.82$	$5.10\pm0.79$	$10.66 \pm 1.82$	$12.64\pm2.21$
	$3.85\pm0.82$	$5.01\pm0.81$	$10.27 \pm 1.68$	$11.92\pm2.06$
surface	$1.77\pm0.69$	$1.92\pm0.84$	$4.66 \pm 1.83$	$5.46 \pm 2.14$
	$1.98\pm0.71$	$1.98\pm0.83$	$4.22 \pm 1.55$	$5.29 \pm 1.89$

## 4. まとめと今後の展望

RFMIP-IRF のテストケースを通じて MIROC の放射モデルの精度確認を行った。LBL モデルの結果と比較しないと結論付け られないことが多いが、29 バンド 111 チャンネルの温暖化対応版は4倍増状態などのケースに対応できていない可能性が高い。 しかし、4倍増対応版は20世紀実験では再現性が良くなかったため、MIROC に導入されていない。4倍増対応版はバンド分割 の変更がなく、長波放射と短波放射の重なり部分の問題も未解決のままである。今後は新しくバンド分割を施し、長波放射と短 波放射の分離を行ってからこれらの課題を解決した上で MIROC に導入していくことが課題である。

また、粒子散乱については、昨年度雲氷粒子として六角柱、降雪粒子として aggregate の形状を仮定して導入したが、砂じん 粒子などの回転楕円体の導入についても検討を行っている。より高速で精度の良い放射コードを提供していけるように引き続き 研究を進めていきたい。

- Pincus, R., et al. 2015: Radiative flux and forcing parameterization error in aerosol-free clear skies, Geophys. Res. Lett., 42, 5485 - 5492, doi:10.1002/2015GL064291.
- (2) Pincus, R., Forster, P. M., and Stevens, B, 2016: The Radiative Forcing Model Intercomparison Project (RFMIP): experimental protocol for CMIP6, Geosci. Model Dev., 9, 3447-3460, doi:10.5194/gmd-9-3447-2016.
- (3) Gordon et al., 2017: The HITRAN2016 molecular spectroscopic database, J. Quant. Spectrosc. Radiat.Trns., 203, 3-69.

# 大気海洋マルチスケール変動に関する数値的研究

# Numerical studies on atmosphere ocean multiscale variations

稲津 將,北大院理, E-mail: inaz(at)sci.hokudai.ac.jp
見延庄士郎,北大院理, E-mail: minobe(at)sci.hokudai.ac.jp
堀之内 武,北大院地球環境, E-mail: horinout(at)ees.hokudai.ac.jp
松村 伸治,北大院地球環境, E-mail: matsusnj(at)ees.hokudai.ac.jp
勝山 祐太,北大院理, E-mail: katsuyama(at)sci.hokudai.ac.jp
丹治 星河,北大院理, E-mail: seika(at)sci.hokudai.ac.jp
Masaru Inatsu and Shoshiro Minobe, Faculty of Science, Hokkaido University
Takeshi Horinouchi and Shinji Matsumura, Faculty of Earth Environmental Science, Hokkaido University

# 要旨(明朝 9pt)

大気海洋マルチスケール変動の解明を目指した数値的研究を推進する一環として、対流圏中緯度における長 周期変動を多角的な側面から分析している。今年度はその解釈および簡便な長周期積分を目指し、統計的多 段回帰モデルである SLP エミュレーターを実装した。SLP エミュレータは学習データにおける 1,000 主成分 を状態ベクトルとした数理モデルであり、極値を含め多様な統計が現実に近いことが過去の研究で示されて いる。

#### 1. はじめに

本研究の目的は、貴研究所の共同利用によって、大気海洋マルチスケール変動の解明を目指した数値的研究を推進することで ある。このため、北海道大学のチームでは、熱帯から中緯度に至るさまざまなスケールの気象擾乱の特性および予測を、貴研究 所が開発した数値モデル等を用いて調査している。令和元年度は本共同利用で計算された1万年分の大気大循環モデルから得ら れた統計を再現する数理モデルを実装し、計算結果の解釈を試みやすいようにした。本項ではその実装内容について紹介する。 この背景として、水文管理、土砂侵食、交通工学、災害保険などのさまざまな分野で1万年単位(場合によっては10万年単位) の極値統計が必要とされており、毎度の気候変動計算の労が大きいことがあげられる。そのようなことならば、一度、大気大循 環モデルで1万年程度の計算を行い、その計算の統計量を再現できる数理モデルを考え、簡便な応用解析にはそれによって代用 すると便利である。また、大規模数値計算の結果をランダム力学系としての解釈を可能にする数理モデルは便利であろう。近年、 文部科学省・気候変動リスク情報創生プログラムでは、60 km 解像度の大気大循環モデルにより、d4PDF と呼ばれる 6000 年規模 のアンサンブル実験を行った。それを日本域で 20 km 解像度に、さらに北海道域で 5 km 解像度に力学的ダウンスケーリングを 実施した(Mizuta et al. 2017; Hoshino et al. 2019)。この d4PDF 大量アンサンブルデータは、北海道における十勝川と常呂 川の豪雨にともなう氾濫のリスク評価に適用された(Yamada et al。2018)。

### 2. 問題設定·方法

この手の数理モデルとして工学的に長年用いられてきたものが、確率的ウェザージェネレーターである。これは特定の場所で 観測された降水量の統計を再現する時系列を乱数生成により得られる計算コストの安いモデルである。Ailliot et al. (2015) の総説によると、確率的ウェザージェネレーターには、2 値マルコフ連鎖を使用した降水日数決定モデルと、パラメトリックま たはノンパラメトリックに観測データにフィッティングして日降水量を計算するモデルがある。単一サイトにおける確率的ウェ ザージェネレーターを拡張して、サイト間の降水量に空間相関を持たせたマルチサイトモデルもある(Wilby et al. 2003)。こ のように確率論的ウェザージェネレータには多くの研究があるのだが、降水の極値統計を十分に再現するとはいえない。一方、 準地衡風近似の枠組みで対流圏で観測された高度場の統計を再現する、多段回帰モデルが Kravtsov et al. (2005)により構築 さた。Kravtsov et al. (2016)はこの多段回帰モデルを海面気圧データに拡張し、SLPエミュレーターと名付けた。SLPエミュ レーターの出力データは、長周期変動の空間パターンや温帯低気圧のトラックなど、極値も含めた総観場を代表する特徴量をよ く再現する上に、著しく計算コストが低い。SLPエミュレータを使えば、現行の計算サーバで24時間以内に10,000年の積分を 実現できる。そこで本項ではこの SLP エミュレーターについて自己完結に説明するとともに、その計算結果を紹介する。なお、 SLPエミュレーター実装作業のため、回帰係数の推定には1960年1月から2017年12月までのJRA55再解析データの海面気圧 を利用した。これを大循環モデルの出力に差し替えることは容易である。

### 3. 結果と考察

SLP エミュレーター実装の最初のステップはデータの縮減を目的にした主成分分析である。1960 年から 2017 年までの期間に わたり、日々の海面気圧偏差を計算し、経験的直交関数展開した。主要モードは、これまでの研究で強調されてきたテレコネク ション・パターンだった(Wallace and Gultzler 1981; Barnston and Livezey 1987)。第1モードは北大西洋振動に高い相関 があり、第3と第5モードは太平洋・北米パターンに似ていた。海面気圧偏差の全分散の 99.87%を説明する1,000 モードを、 多段回帰モデルの説明変数として用いる。なお、各主成分は海面気圧偏差を各 モードの空間パターンに射影して求めた。ここでは、主成分が正規化され、各モ ードのパターンは次元付で示されている。次に、3段回帰モデルを1,000モード の主成分を説明変数として経験的に推定した。

$$dx = x^T A^{(0)} + e^{(1)}, (1)$$

(2)

 $de^{(1)} = (e^{(1)} x)^T A^{(1)} + e^{(2)},$ 

$$de^{(2)} = (e^{(2)} e^{(1)} x)^T A^{(2)} + e^{(3)}, \qquad (3)$$

上付き文字 T は転置を示す。ここで x は正規化主成分を格納する 1,000 次元ベクトルである。 $e^{(1)}$ 、 $e^{(2)}$ 、 $e^{(3)}$ は、それぞれ第 1 段、第 2 段、および第 3 段の回帰モデルの残差である。この 3 段回帰モデルでは、海面気圧偏差の 1,000 モードの時系列から、伝播関数 $A^{(0)}$ 、 $A^{(1)}$ 、および $A^{(2)}$ を推定する。多重共線性を効果的に回避するため、部分的最小二乗を利用した。1,000×1,000の行列として伝播関数 $A^{(0)}$ を推定し、その後 $e^{(1)}$ を 1 段目の回帰モデルの残差とした。2 段目の回帰モデルでは、説明変数は $x \ge e^{(1)}$ になり、伝播関数 $A^{(1)}$ は 2,000×1,000の行列となる。同様に、3 段目では説明変数をx、 $e^{(1)}$ 、 $e^{(2)}$ にするので、伝播関数 $A^{(2)}$ は 3,000×1,000の行列となる。このようにして得られた 3 段回帰モデルは、白色雑音とみなせる $e^{(3)}$ が強制力となって、x、 $e^{(1)}$ 、 $e^{(2)}$ を予報する方程式系になっている。

具体的に 1960 年 1 月から 2017 年 12 月まで海面気圧偏差を用いて回帰式を立 てる。すると、残差時系列 $e^{(1)}$ 、 $e^{(2)}$ には有意な自己ラグ相関があったが、確かに  $e^{(3)}$ は白色雑音とみなせることがわかる。しかし、Kravtsov et al. (2016)の経 験から白色雑音を疑似乱数として与えると数値不安定を起こすことが知られて いる。そこで、彼らの方針に従って、 $e^{(3)}$ を学習データ期間全体から得られた残 差時系列をノイズ・ライブラリとして保存し、予報された状態ベクトルxのうち 主要 10 モードで構成される位相空間内の最近傍を通過する軌道の部分集合で得 られた $e^{(3)}$ をライブラリより取得して利用する。つまり、与えるノイズは状態依 存(または乗法的)である。また、学習データの復元とならないように 15 日で ノイズを入れ替えることにする。

この多段回帰モデルのパフォーマンスを評価するために再予測実験を行った (図1)。たとえば、1960年1月1日から開始された再予測実験は、解析データ に基づいた主成分時系列をトレースすることに成功した。また、同じ最初の日付 から開始した別の実験は、1961年1月1日からのノイズを強制力として同じ初 期値より計算を実施した。結果は、初期日の影響が最初の10日間程度は持続す ることを示しているものの、その後はノイズ・ライブラリの日付に引き戻すに強 制力が支配的であることがわかった。このような理由で、予測実験ではノイズ・ ライブラリの継続的な使用は避けるべきである。

次に、SLP エミュレーターを利用した数万年の数値積分の安定性について確認 した(図2)。SLP エミュレーターを用いた100年の数値積分に成功し、その間、 計算不安定は起こらなかった。また、100年のテンデンシーをモードごとに計算 したところ、その値はすべて約±0.1の範囲であり、このシステムは気候ドリフ トせずに動作することが確認されました。したがって、SLP エミュレーターは、 乗法性ノイズによる強制にもかかわらず、1,000次元の位相空間の気候値アトラ クターに引き寄せられる、大域的に安定した力学系といえる(Sura et al. 2005; Inatsu et al. 2013)。

# 4. まとめと今後の展望

以上の力学系を得たことで、大気大循環モデルを用いずに既存の計算結果を引き 延ばして好きなだけの極値統計を得る方策を得たほか、数値積分の結果を力学系 により解釈することもできると期待している。

### 参考文献

 Inatsu, M., T. Suematsu, Y. Tamaki, N. Nakano, K. Mizushima, and M. Shinohara, 2019: Development of pressureprecipitation transmitter. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 58, 2453-2468.



図1:(a) 1960年1月からの第1主成分の 時系列。黒丸は再予報であり、白丸は解析 値。(b)(太線)1960年1月からおよび(細 線)1961年1月からの第1主成分の時系 列。黒丸は1961年1月からのノイズを与 えた予報値。



図2:(a) 100 年間積分の結果の第1主成 分の時系列。(b) 最初の20年の平均と最後 の20年の平均との差として計算した、各 主成分時系列の100年間のテンデンシー (単位は100年あたりの値)。

# 全球雲解像モデルデータを用いた熱帯雲活動の解析

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

# 西 憲敬, 福岡大・理, E-mail: nornishi(at)fukuoka-u.ac.jp 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 SATOH Masaki, Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo

#### 要旨

解像度 3.5km の NICAM 実験結果を解析した。その結果、現実大気で雲帯の分割現象が起きたほぼ同じ時刻・ 場所に、分割がシミュレートされている事例を発見した。分割の形態については現実と出力で違う特徴もあ るが、NICAM によって現実大気にもみられる大規模分割がおおむね正しく計算されていたことがわかったの で、NICAM に雲帯分割の物理がきちんと含まれていることが示唆された。また、分割発生時の慣性不安定の 発生条件についての考察を行った。

## 1. はじめに

中部太平洋域の熱帯収束帯において、東西数千 km におよぶ雲帯がほぼ同時に南北に分割する現象を見いだしてその解析を行っている(文献 1)。この現象は衛星画像で形態が明瞭にとらえられるが、客観解析においては再現性がよくなく、それにともなう力学場はうまくとらえることができない。全球雲解像モデル NICAM の出力において類似の現象が検出されているので、これまで行われた実験結果のアーカイブを解析すれば、多数の現象発生を取り出すことができることが期待できる。モデル出力の風や気圧などの力学場を雲活動と合わせ解析することができれば、現実大気観測ではできなかった、現象発生のメカニズムを探求できると期待される。主に力学的不安定現象を念頭において、モデル出力の解析を行うことを目的とする。昨年度は、NICAM 出力にみられたひとつの事例(Case-1)について、帯状分割中に巻雲が成長することによって巻雲の帯が 1-2 日の長い寿命をもつこ

と、および巻雲の帯が広域で同時に発生しているときに、慣 性不安定が関連している可能性があることを示した。

#### 2. 問題設定·方法

NICAM の実験出力を用いて、熱帯収束帯(ITCZ)内でみられる 大規模雲域の南北分割現象についての解析をおこなう。分 割現象を主観的な方法で見いだし、その中でどのような雲 活動の変化および循環場の変化が起きているかを観察する ことによって、実際の大気で起きている現象の機構を説明 するヒントを見いだす。本年度は、那須野智江氏によって実 施された 2008 年 6 月の RUN の出力を用いて雲帯分割の解析 事例を増やし、Case-1 でみられた特徴が共通してみられる かどうか調べた。

### 3. 結果と考察

本年度の出力解析で最も興味深かったのは、現実大気で の分割が発生したのとほぼ同じ場所・時刻にモデル出力に も分割現象が認められたことであった(CASE-2:図1)。これ はモデルの初期時刻より36時間後に発生しており、分割を 引き起こす一本の東西に長い対流性の雲帯の発生でさえシ ミュレートできたと判断できる。モデルの初期値には、初期 の雲帯の発生も広域同時分割も起こさせるための「種」が含 まれていたとみられる。現実大気ではどちらかというと帯 状というよりは円弧状であること、現実大気では1カ所の 分割だが、シミュレートされたものは東西の2カ所(170W付 近と150W付近)で分割が起きていること、などの違いはあ るが、積乱雲中心の雲帯から巻雲中心の大きな雲域の広が りがあるという点では酷似している。

この実験では、雲微物理過程の設定について、異なるパラ メターの値を用いた 4 つの計算が行われていた。上部対流 圏での巻雲の広がりは設定によってかなり異なっていた が、南北への巻雲の広域同時拡大(分割)はどの設定でも見

OLR 18Z16Jun2008



Fig 1: NICAM で再現された雲帯分割事例 Case2. 外向き長波放 射(W m<sup>-2</sup>)で6時間ごとの雲の様子を示す.

ることができるため、巻雲の微物理は拡大(分割)には本質的ではないことが示唆された。

南北へ拡大中の巻雲域において、Case-1 でみられたような、慣性不安定に代表されるような不安定性が Case-2 での東西同時 拡大の原因と考えられるかどうかについても検討した。典型的な慣性不安定発生の必要条件である地衡風絶対渦度が北半球で負 になるという条件を調べようとしたが、低緯度であるために計算された地衡風には小スケールの乱れが卓越していた。それに相 当な空間スムージングを行っても、得られた地衡風(Fig 2 左)は現実の風(Fig 2 右)とは全く異なった様相となり、地衡風絶対 渦度(Fig 2 左)は絶対渦度(Fig 2 右)とは全く異なった分布となった。そこで、地衡風絶対渦度をあきらめ、拡大初期の絶対渦 度を調べた(Fig 2 右)。その結果、対流性の帯(7N)のすぐ北側に強い負の絶対渦度、すぐ南側に強い正の絶対渦度がみられた。 対流性の雲が生じる前には、この領域は広域で上層が西風で下層が東風となっていたのだが、その後対流性の雲の発達とともに、 その緯度付近で上層の西風が著しく弱まっており、対流による鉛直運動量混合が起きたと思われる。その結果、対流性の帯の北 側では北ほど西風が強くなる分布となり、慣性不安定発生に有利な負の絶対渦度が形成されたとみられる。しかし、Case-2 東部 では雲はむしろ初期の帯より南側に広がっていて、そこは慣性不安定条件を満たす領域ではないことなど、説明のつきにくい特 徴もみられることから、現時点では慣性不安定はまだ分割発生の原因のひとつの候補であるという認識である。



Fig 2: 初期値から 36 時間後の(左)地衡風で計算された絶対渦度(×10<sup>-5</sup>s<sup>-1</sup>),および(右)絶対渦度(×10<sup>-5</sup>s<sup>-1</sup>).ともに高度 12km 付近の値で、赤等値線が正値、青等値線が負値を示す.彩色で鉛直積算の雲氷および雪の量(×10<sup>-4</sup> g m<sup>-2</sup>)を対数で示す.緑の矢印は高度 12km 付近の(左)地衡風、(右)水平風 (ms<sup>-1</sup>).

# 4. まとめと今後の展望

解像度 3.5km の NICAM 実験結果を解析した。その結果、現実大気で雲帯の分割現象が起きたほぼ同じ時刻・場所に、分割がシ ミュレートされている事例を発見した。分割の形態については現実と出力で違う特徴もあるが、NICAM によって現実大気にもみ られる大規模分割がおおむね正しく計算されていたことがわかったので、NICAM に雲帯分割の物理がきちんと含まれていること が示唆された(日本気象学会 2019 年秋季大会で発表)。今後はこれまでの既存実験出力の解析だけではなく、現実大気において 典型的な分割現象が起きている時期をねらって自ら数値実験を行いたい。現実大気の解析で過去 10 年間における数件の典型例 を抽出しているので、それらについて再現実験を行う。なるべく異なる基本場で起きた事例に関する実験を行うことによって、 どのような要因が分割発生に必要なのかを見極めることをめざす。

#### 参考文献

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

# 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 田口 文明, 東大・先端研, E-mail: bunmei(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 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 Bunmei Taguchi, RCAST, The University of Tokyo Takafumi Miyasaka, RCAST, The University of Tokyo Shion Sekizawa, RCAST, The University of Tokyo

# 要旨

甚大な被害を出した平成 30 年 7 月豪雨をもたらした大気循環偏差の主要因は大気内部変動であ るが、その背景には人為起源気候変動や大気海洋結合変動の寄与があった可能性がある。本研究 は特に日本周辺海域における同時期の海面水温偏差に着目し、そこからの水蒸気供給が豪雨に与 えた影響を気象庁メソモデルによる客観解析デーを用いて調べた。海面潜熱フラックスについて バルク式を気候値の周りで線形化し、海上風速・海上比湿・海面水温の各偏差の寄与を評価した。 降水量極大期の2日間において、蒸発量は日本周辺海域の広い範囲で平年よりも増加しており、 これには海上風速の強化の寄与が支配的だったが、海面水温は特に本州の南で紀伊半島沖からそ の東方において平年より高く、この海域からの蒸発量増加に寄与していた。また豪雨時の大気境 界層内の空気塊に対して後方流跡線解析を行ったところ、岐阜上空にもたらされる空気塊に対す る 24 時間積算蒸発量の 26%を海面水温偏差の寄与が説明していた。

# 1. はじめに

2018年夏、我が国では豪雨、猛暑、台風と多くの気象災害が発生した。取り分け、7月上旬に起きた「平成 30年7月豪雨」は西日本を中心に広域で記録的な雨量をもたらし、河川の氾濫や土砂崩れなどにより、犠牲者 237 名もの甚大な被害をもたらした。「平成 30年7月豪雨」に伴っては、6月 28日~7月8日の11日間の総雨量 400mm 超の地域が九州から岐阜県にかけて広く西日本に拡がっているが、この大部分は「西日本豪雨」と呼ばれるピーク期間(7月5~7日)に観測されたものである。豪雨災害が甚大だった瀬戸内地方では総雨量 400~500mm 程度であったが、これは普段比較的雨量の少ないこの地域の7月平年雨量の2倍を超えるもので、西日本豪雨の期間を中心に48~72時間降水量の記録を更新した地点が続出した.気象庁の全球大気再解析 JRA-55 に拠れば、西日本豪雨の期間を中心に48~72時間降水量の記録を更新した地点が続出した.気象庁の全球大気再解析 JRA-55 に拠れば、西日本豪雨の期間を中心に48~72時間降水量の記録を更新した地点が続出した.気象庁の全球大気再解析 JRA-55 に拠れば、西日本豪雨の期間を中心に48~72時間降水量の記録を更新した地点が続出した.気象庁の全球大気再解析 JRA-55 に拠れば、西日本豪雨の期間を中心に48~72時間降水量の記録を更新した地点が続出した.気象庁の全球大気再解析 JRA-55 に拠れば、西日本豪雨の第間を中心に48~72時間降水量の記録を更新した地点が続出した。気象庁の全球大気再解析 JRA-55 に拠れば、西日本豪雨の期間を中心に48~72時間降水量の記録を更新した地点が続出した。気象庁の全球大気再解析 JRA-55 に拠れば、西日本豪雨の期間を中心に48~72時間降水量の記録を更新した地点が続出した。気象庁の全球大気再解析 JRA-55 に拠れば、西日本豪雨の期間を中心に48~72時間降水量の記録を更新した地点が続出した。気象庁の全球大気再解析 JRA-55 に拠れば、西日本豪雨の期間を中心に48~72時間降水量の記録を更新した地点が続出した。気象庁の全球大気再解析 JRA-55 に拠れば、西日本豪雨の東市とは春~25 時間降水量の記録を更新した地点が続出した。気象庁の全球大気両解析 JRA-55 に拠れば、西日本豪雨時には南西方から流入した極めて多量の水蒸気が西日本全域で顕著に収束していた(Takenura et al., 2019)。実際、西日本上空 [31.25°-35°N, 130°-135°E]に流入した鉛直積算の水蒸気量は過去60 年において最大級で、かつ水蒸気収束量は過去最大であった。この収束をもたらした一因は、西日本付近に梅雨前線が停滞し続けたことであるが、これは上空の亜熱帯ジェット気流が朝鮮半島上空で南偏して本州東方海上で北偏するという蛇行が数日持続したことに伴っている(Shimpo et al. 2019)。し、西日本に熱帯起源の極めて暖湿な気流が吹き込む過程で、日本周辺の海洋がどのような役割を果たしたかは不明である。

### 2. 問題設定·方法

そこで、本研究では、詳細な水蒸気輸送の解析を気象庁メソ解析に基づき実施した。メソ解析データは水平解像度が約 5.5km と JRA-55 の約 10 倍で、地形の影響を受けやすいメソ降水系の表現がより現実的であり、かつ JRA-55 用の 2 倍以上の水平解像度 を持つ海面水温 (SST) データが用られ、海流に伴う細かな SST 分布の影響を受けやすい海上大気境界層の表現にも優れている。 但し、データが 2006 年以降に限られるため、各地点での気候値を 2006~2017 年の 12 年分の日別平均値に 15 日移動平均を施す ことで推定し、これからのずれを偏差と定義した。

そして、水平水蒸気 flux 偏差を気候値周りに線型化し、風偏差と比湿偏差の各々の寄与の相対的重要性を評価した。同様に、海 面での蒸発に伴う上向き潜熱 flux (LHF)のバルク式を気候値周りに線型化して、LHF 偏差への SST、海上風速、海面比湿の各偏差 の寄与の相対的重要性を評価した (Sekizawa et al. 2019)。

また、MSM データが3時間毎に得られることを活用し、海面LHF 偏差から豪雨域への水蒸気供給の連関を定量的に評価するため、後方流跡線解析を実施した。7月5日9時から7日6時にかけて3時間毎に、西日本6地点の上空500mにあった各空気塊を対象として、MSMの3次元流に従ってオイラー法で5分毎に24時間前まで追跡した(Sekizawa et al. 2019)。

# 3. 結果と考察

メソ解析に基づく2018年7月5~7日平均の鉛直積算された水蒸気fluxは、JRA-55による解析同様、梅雨前線南側の西日本・ 東海地方に拡がる顕著な収束偏差域に南方から流入する水蒸気flux 偏差が明瞭である。風と水蒸気量を各々気候値と偏差に分 解する解析から、四国の南方[32.5%,132-136°E]を北向きに横切る境界層内の水蒸気flux 偏差の大部分(86%)は南風偏差のみ に起因すると評価されたが、両偏差の相乗効果(非線型項)の寄与も10%であった。この相乗効果の項が西日本近海での水蒸気 flux 発散と豪雨域での水蒸気flux 収束を局所的に強めていたことも見出された。この項は、西日本南方沖の黒潮上で南風強化 とともに比湿が増加したことを反映しており、この一部は西日本近海での海面LHF増大の反映と考えられる。

同様な分解を海面 LHF にも施したところ、強い南風偏差の寄与で南西諸島から九州・四国沖にかけての黒潮近傍で海面蒸発が 平年より多かった一方、東海沖の遠州灘では寧ろ暖水偏差の寄与で蒸発が増加したことが分かった。具体的には、日本周辺におけ る海上風速は広範囲で強化され、南西諸島から四国沖にかけての黒潮上と日本海において特に風速増大が顕著であった。これを 反映して、海上風速偏差による LHF の増大は、梅雨前線へ向けて南方から水蒸気を供給した気流が通過した南西諸島から四国沖 で特に大きかった。一方、SST は東海・関東沖の北緯 28 度以北で平年より高く、対馬暖流沿いの北陸・東北沖にも暖水偏差がみ られ、これらの海域での LHF 増大には暖水偏差からの寄与が大きい。なお、南西諸島から四国沖にかけて海上風速とともに LHF が 顕著に増大したにも拘わらず冷水偏差が非常に弱かったのは、黒潮による熱輸送の効果と考えられる。一方、海上では概ね乾燥偏 差であったが、梅雨前線とそのすぐ南側では帯状に湿潤偏差が存在した。

このように西日本の豪雨域における記録的な降水の大部分は南方からの水蒸気供給によるもので、それはメソ解析データに基づく気塊の後方流跡線解析からも確認できる。追跡した全ての空気塊は梅雨前線の南側を起源とし、気候値で偏差でも蒸発が活発であった南西諸島から紀伊半島沖を通過していた。流跡線に沿って蒸発偏差を積算したところ、前線に吹き込む気流が蒸発偏差から獲得した水蒸気量は0.7~1.9mmと見積られた。これは豪雨域のすぐ南側の境界層内で積算した水蒸気量偏差(約1.5mm)と同程度であり、気候値の積算水蒸気量の約10%に相当する。この積算蒸発偏差の7~9割もが海上風速強化からの寄与と推定できる。一方で、SST 偏差からの寄与は概ね小さいものの、岐阜上空を起点とした流跡線に対しては積算蒸発偏差のうち約26%を説明していた。

#### 4. まとめと今後の展望

気象庁メソ解析データを活用して、「西日本豪雨」の記録的な降水を支えた多量の水蒸気流入への海面蒸発の影響を評価した。 水蒸気 flux 偏差の大部分は強化された南風によるものであったが、それによる黒潮域からの蒸発増大がさらに水蒸気量に上乗 せ効果をもたらしていた。即ち、蒸発増加をも反映して日本南岸沿いでは平年より水蒸気量が多く、南風偏差とともに北向き水蒸 気輸送を強化し、水蒸気 flux の局所的な発散偏差をもたらしたのである(Sekizawa et al. 2019)。

その一方、日本海全域と東シナ海北部においては、大陸側に偏り発達したオホーツク海高気圧からの乾燥した強い北東風により蒸発増加が促されていた。比湿偏差からの海面 LHF 偏差への寄与は日本海で特に大きかった。但し、これに伴う顕著な南西向き水蒸気 flux 偏差の収束は不明瞭で、豪雨への寄与は不明であり、今後数値実験に基づく評価が求められる。

なお、今回も用いたメソ解析データは再解析データではないため、経年変動やトレンドに気象庁のメソ予報・同化システムの改善の影響が紛れている可能性がある。よって、豪雨や台風などの要因分析のためには、日本域の領域大気再解析データの作成が強く望まれる。

- (1) Shimpo, A., et al., 2018: Primary factors behind the Heavy Rain Event of July 2018 and the subsequent heat wave in Japan, SOLA, **15A**, 13-18.
- (2) Takemura, K., S. Wakamatsu, H. Togawa, A. Shimpo, C. Kobayashi, S. Maeda, and H. Nakamura, 2019: Extreme moisture flux convergence over western Japan during the heavy rain event of July 2018. SOLA **15A**, 49-54.
- (3) Sekizawa, S., T. Miyasaka, H. Nakamura, A. Shimpo, K. Takemura, and S. Maeda, 2019: Anomalous moisture transport and oceanic evaporation during a torrential rainfall event over western Japan in early July 2018. SOLA 15A, 25-30.

# 非静力学海洋モデルの汎用化と OGCM とのシームレスな接続

# Development of a multi-scale non-hydrostatic ocean modeling framework for seamless integration with OGCMs

松村 義正,東京大学大気海洋研究所, E-mail: ymatsu(at)aori.u-tokyo.ac.jp 大橋 良彦,東京海洋大学, E-mail: yohash0(at)kaiyodai.ac.jp 中村 知裕,北海道大学低温科学研究所, E-mail: nakamura(at)lowtem.hokudai.ac.jp 山口 卓也,北海道大学低温科学研究所/大学院環境科学院 桂 将太,スクリプス海洋研究所, E-mail: skatsura(at)ucsd.edu

Yoshimasa Matsumura, Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo Yoshihiko Ohashi, Tokyo University of Marine Science and Technology Tomohiro Nakamura, Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University Takuya Yamaguchi, Graduate School of Environmental Science, Hokkaido University Shota Katsura, Scripps Institute of Oceanography, UCSD

# 要旨

我々が独自に開発運用している非静力学モデル kinaco を発展的に高度化し、相対的に荒い解像度 の OGCM をシームレスに接続することで、多様な時空間スケールを扱うことのできる包括的な 海洋モデリングプラットフォームの構築を目指している。本年度の応用研究として 1)北西部グリ ーンランドフィヨルドの氷河融解水動態, 2) 潮汐による渦対の形成過程 3) Tidal straining による 海底境界層の懸濁粒子輸送過程, 4) 表層混合層中のマイクロプラスチック粒子拡散過程 に関す る数値シミュレーションを実施した。それぞれについて研究の概要を述べる。

# 1. 北西グリーンランドフィヨルドの氷河融解水動態に関する数値モデリング

近年、グリーンランド氷床の質量損失の加速に伴い、海洋への融解水の流出量が増加している. 特に海洋に流れ出す氷河から の融解水流出は、海水・懸濁物質・栄養塩を鉛直・水平的に輸送するため、フィヨルドの循環・物質輸送・生物生産に重要な役 割を果たす可能性が指摘されている.本研究は、現場観測が実施されているグリーンランド北西部 Bowdoin フィヨルドを対象 とし、氷河融解水の動態を明らかにすることを目的とした.現場観測データをもとに、非静力学海洋モデルを使用し数値モデ ル実験を実施した.氷河融解水トレーサーを導入し、融解水流入量と初期成層を変化させ実験を行った(図1).融解水流入量の 増加に伴い、水深 0-50 m では氷河融解水トレーサー濃度が増加していた(図1a, c).一方で、初期成層の変化に伴い、水深 25 m 以深の氷河近傍ではトレーサー濃度が減少していた(図1b, d).このモデル結果をもとに現場観測結果を解釈すると、表層 付近(水深 5-15 m)における氷河融解水の分布には融解水流入量, 亜表層(水深 25-40 m)には成層の変化がそれぞれ影響し ている可能性が示された.今後は研究対象域を Bowdoin フィヨルドから複数の氷河が海洋に流れ込むフィヨルド群に拡張し、 氷河融解水のフィヨルドの循環への寄与を調べる予定である.

### 2. 放射条件の組み込みと潮汐による渦対のシミュレーション

海面の開境界条件、特に放射条件は、沿岸域の主要な駆動力である潮汐のシミュレーションに必須である。潮汐は、外部波と して領域外から入射し領域外へ伝播するため、海面変位として入射波を与え、放射条件で外に出すことになる。そこで、非静水 圧モデル kinaco に実装されていなかった、海面変位(および水温塩分流速)の放射・流入条件を組み込んだ。組み込んだ放射 条件のテストとして、外部波と内部波を初期に与えた実験を行った。どちらのケースも概ね良好に波が外へ放射された。わずか に反射波が生じたが、これは流入条件と同様にリストアを課すことでほぼなくなることが期待される。

この放射条件を用いて鳴門海峡を対象に、潮汐による渦対の形成についてシミュレーションを行い、衛星画像と似た渦対が再 現できた(図2)



図 1 41時間後の氷河融解水トレーサーの濃度差





図 2 鳴門海峡 北側にできた渦対(渦度の水平分布。赤が正、青が負。) 左は北向流最強時(3h後)、右は南向流最強時(9h後)。

#### 3. Tidal Straining による海底斜面上の懸濁粒子再浮遊・輸送過程に関するシミュレーション

海底摩擦にともなう潮汐流の鉛直シアと密度成層の組み合わせにより、海底境界層において潮流の向きに対して非対称な不安 定が生じることが知られている(tidal straining)。特に斜面上では潮流が斜面を登る際に不安定化、斜面を下る際に安定化し (Endoh et al, 2016)、海底境界層内の懸濁物質の巻き上げとその輸送にこの非対称性が寄与する可能性がある。

海底境界層での微小スケールの不安定・巻き上げによる再懸濁過程 0(1) mと、いったん再浮遊した粒子が斜面上を輸送され る過程 0(10<sup>4</sup>) mの双方を陽にシミュレートするため、次のような理想化実験を実施した:斜面に沿うドメイン(x軸が斜面方向 幅 100m, z 軸が斜面法線方向 高さ 50 m)、したがって重力加速度が x 成分をもつ。x 方向に周期境界、ただし背景成層を反映し 周期境界をまたぐ際に密度をオフセットする。懸濁粒子をオンライン粒子追跡により表現し、海底摩擦の限界応力超過分が一定 量を超える毎に粒子を生成する。1~256  $\mu$  m の粒径クラスを設定し、粒径にもとづく終端沈降速度を与え、着底したら除去する。 個々の粒子は周期境界通過カウンタを保持し、ドメインを正または負方向に何回通過したかの情報を持たせることができる。こ れにより、周期境界ドメインが 100m 幅しかないにもかかわらず、数 km 以上におよぶ粒子の正味の移動距離を得ることができ る。スロープ 1/1000, M2 潮汐の最大振幅 50 cm/s を与えた結果を図3,4 に示す。粒径が小さい(<8  $\mu$  m)粒子は tidal straining の非対称性によって潮流が upslope 時に浮遊時間が相対的に長く、正味で斜面を登る向きに移動する。他方、粒径 8,16,32  $\mu$  m の粒子は重力によって正味で斜面を下る方向に移動した。また粒径 64  $\mu$  m 以上の粒子は再浮遊後すみやかに沈降してしまうため 水平移動はほとんど生じなかった。







図 4. 粒径クラス毎の粒子移動距離のヒストグラム。 正が斜面を登る方向。

#### 4. 表層混合層中のマイクロプラスチック粒子拡散過程のシミュレーション

近年、人工的に海洋に排出されたプラスチックごみが劣化・細分化して微小な粒子(実効粒径 5mm 以下をマイクロプラスチックとよぶ)として海洋中を漂い、生物が誤食するなど環境への悪影響が懸念されている。プラスチック粒子の海洋中での動態を考えると、ポリエチレン(PE)・ポリプロピレン(PP)等の海水より軽い材質と、ポリエステル(PEs)・アクリル・PET など海水より 重い材質に大別できる。海底堆積物からは水に浮くはずの前者の材質も検出されており、糞粒などの沈降粒子に吸着するなど、 何らかの過程で浮力に逆らい表層から除去されている可能性が指摘されているが、そのメカニズムは十分には明らかになってい ない。本研究では PE 粒子が海上風及び波浪の存在下で物理的な混合のみでどのような鉛直分布をとり得るかを、3 次元非静力 学モデルに組み込まれたオンライン粒子追跡による理想化シミュレーションにより見積もった。

実験領域は周期境界をもつ一辺128 m, 深さ200 mの矩形海洋、格子解像度1 mとし、粒径10µm ~ 5 mmの10bin に分類したプラスチック粒子を表層格子中央に初期配置する(計128x128x10bin= 163,840 粒子)。海上風として U<sub>10</sub> = 0, 5, 10, 20 [m/s]、波浪の振幅 A = 0, 0.316, 1.0, 3.16 [m] をあたえた。ただし波浪は自由表面による直接表現ではなく、波高・周期に対応した渦度力と粒子のストークスドリフト速度を与えることで表現している。初期成層は混合層の浅い夏季と深い冬季を設定し、海上風 4 x 波高 4 x 成層 2 (風・波ともに0のケースは除外)の計 30 ケースの感度実験を実施した。各実験では風応力による乱流混合層の発達や、風が弱く波浪が高い場合にはラングミュア循環による明瞭な筋状構造が形成されるなど、理想化された表層混合過程をよく再現できている。マイクロプラスチック粒子はすべてのケースで混合層底まで分布するが、粒径が大きいほど浮力が大きい(終端浮上速度が速い)ため表層に長く滞在する傾向にある。混合層下端を超えて躍層下に到達する粒子はいずれの実験でも発生しなかった。本結果は定性的にはシミュレーションをするまでもなく明らかであるが、粒径・波浪・海上風毎に定量的なプラスチック粒子の鉛直分布見積もりを得ることができた。また、各粒子の水深と紫外線の水中減衰率から各粒子の正味の紫外線曝露時間も計算された。

今回の数値実験でも再確認されたように、PP, PE といった水より軽量な材質のプラスチック粒子を物理的な混合のみで表層から除去することは困難である。今後は主要な除去過程としてプランクトンによる摂餌(誤食)を想定し、体長毎のプランクトン 密度の鉛直分布(とその季節変化)をモデルに与え、乱数を用いた確率的な誤食と糞粒の沈降による表層からの除去過程を導入することで、プロセスシミュレーションの立場から外洋域でのプラスチックごみの滞留・除去時間スケールをボトムアップ的に見積もることを目指す。

### 参考文献

 Ohashi, Y., S, Aoki, Y. Matsumura, Y., S. Sugiyama, N. Kanna, and D. Sakakibara, Vertical distribution of water mass properties under the influence of subglacial discharge in Bowdoin Fjord, northwestern Greenland, *Ocean Science*, in press.

# トランスバースラインの観測的および理論的研究 An observational and theoretical study of the transverse cirrus banding

山崎 一哉, 東大院・理学系研究科, E-mail: yamazaki(at)eps.s.u-tokyo.ac.jp 三浦 裕亮, 東大院・理学系研究科, E-mail: h\_miura(at)eps.s.u-tokyo.ac.jp Kazuya Yamazaki, Graduate School of Science, The University of Tokyo Hiroaki Miura, Graduate School of Science, The University of Tokyo

# 要旨

トランスバースラインは上層雲で生じることがある波状の構造である。本研究ではトランスバースライン の成因について、高解像度ラジオゾンデ観測の統計解析、高解像度数値実験、水蒸気の影響を考慮した線 形安定性解析を用いて調べ、トランスバースラインが鉛直シアのもとでのレイリー・テイラー不安定で生 じることを示した。これは従来の事例解析の結果を支持した上で、これまで不足していた観測的および理 論的根拠を強化する結果である。

#### 1. はじめに

トランスバースラインはジェット気流や台風等のアウトフローに伴う上層雲で生じることがある、波状・バンド状の構造で ある。トランスバースラインは近傍に乱気流を伴うことがあるため航空機の運航に影響を及ぼしているほか、台風のアウトフ ロー内部での混合によって台風全体のエネルギー収支に寄与している可能性がある。

トランスバースラインの成因については複数の先行研究があるが一致した結論は得られておらず、それぞれ手法に課題を抱 えていた。大野・三浦(1982)はジェット気流を模して経験的に設定した基本場で線形安定性解析を行い、ケルビン・ヘルムホ ルツ(KH)不安定が最速成長モードであることを示し、このKH波がトランスバースラインの成因であると結論した。しかし、こ の安定性解析は乾燥過程のみを扱っており、水蒸気の潜熱放出は無視されている。トランスバースラインは水蒸気が飽和した 雲内でかつ静的安定度の小さい領域で生じるため、乾燥過程のみで算出した静的安定度は現実と乖離している懸念がある。一 方で、Trier et al. (2010)はトランスバースラインを伴ったメソ対流系の事例において領域モデルWRFを用いて数値実験を行 い、水蒸気の影響も考慮して静的安定度を調べた。その結果、トランスバースライン内部は静的不安定になっていたことから、 鉛直シアのもとでのレイリー・テイラー(RT)不安定でロール状対流が生じ、これがトランスバースラインの原因であることを 示唆した。温帯低気圧付近(Kim et al. 2014; Trier and Sharman 2016)でも数値実験で同様の結果が得られている。しかし、 これらの数値的研究は観測的証拠を欠いていることが課題であった。また、鉛直シアのもとでのRT不安定の理論的性質は、上 下を固定端で囲まれた理想的な条件のもとでAsai (1970)などが得た結果が用いられてきたが、静的安定層と不安定層とが隣 接した現実の複雑な場における RT 不安定の性質は十分に解明されていない。

### 2. 問題設定·方法

トランスバースライン内部における力学場の構造を観測的に明らかにし、その背景場の成因を数値実験を用いて考察すると ことと、現実的な力学場を基本場とし、かつ水蒸気の影響を考慮した安定性解析を行ってトランスバースラインの形成メカニ ズムを理論的に明らかにすることを目的として以下の解析を行った。

まず、2018年7月に配信開始された気象庁の高分解能ラジオゾンデ観測値から、ひまわり8号バンド13の赤外画像で明瞭な 雲バンドが見られた27事例を抽出し、雲域内部の静的安定度、静的不安定層の厚さ、鉛直シアの向きと大きさを求めた。

次に、雲解像モデル SCALE-RM を用いて台風の理想実験を行い、アウトフローで自発的に生じるトランスバースライン内部の 安定度や鉛直シアの構造をラジオゾンデ観測と比較するとともに、熱収支解析によってトランスバースライン内部の温度場の 成因を調べた。水平領域は 640 km×640 km とし、2 方向とも周期境界条件とした。f = 2.0×10<sup>-4</sup> s<sup>-1</sup>という大きなコリオリパ ラメータでのf 平面に設定し、初期渦を水平格子間隔 10 km で長時間積分することでほぼ平衡状態の台風を得た。トランス バースラインの再現と熱収支解析は、台風の雲域を覆う 320 km×320 kmの領域で行った水平格子間隔は 400 mの高解像度実験 で行った。この高解像度実験の領域の外側は水平格子間隔 2 km で計算を行い、外側から内側への1方向ネスティングを行った。

さらに、ラジオゾンデ観測で得られた静的安定度や鉛直シアの値を用いて、異なる静的安定度・鉛直シアの領域が共存する 現実的な基本場を設定し、ブシネスク方程式の線形安定性解析で成長擾乱の性質を調べた。雲内であると想定した特定の高度 帯では、基本方程式に現れる浮力振動数 N<sup>2</sup>を、Durran and Klemp(1982)が定義した湿潤過程での浮力振動数 N<sup>2</sup>に置き換える ことで、水蒸気の潜熱放出による静的安定度の変化を表現した。

#### 3.結果と考察

ラジオゾンデ観測 27 事例全てで、雲内であると考えられる高度帯において湿潤過程での静的安定度が負の層が存在した。不 安定層の厚さは中央値 730 m,不安定層における湿潤浮力振動数の中央値は №<sup>2</sup> = -1.0×10<sup>-5</sup> s<sup>-2</sup>であった。不安定層内部の鉛 直シアベクトルは衛星画像での雲バンドとほぼ平行であった。これらの特徴は、鉛直シアのもとでの RT 不安定で生じるロール 状対流(Asai 1970)と整合的であった。なお、多くの事例において、湿潤浮力振動数が負の静的不安定層においても乾燥過程で の浮力振動数 № は正であった。したがって、トランスバースライン内部の静的安定度を適切に評価するには湿潤過程を考慮す ることが不可欠である。

SCALE-RM を用いた台風の理想実験においても、トランスバースライン内部では湿潤浮力振動数が負の静的不安定層と、雲バ

ンド構造にほぼ平行な鉛直シアが見られ、ラジオゾンデ観測や Trier et al. (2010)などの先行研究と整合する結果であった。 熱収支解析の結果、トランスバースライン内部においては放射過程が静的不安定化に寄与していた。放射過程に対して凝結物 を全て透明にすることで雲一放射相互作用を取り除いた感度実験においては、放射過程による静的不安定化が消失してトラン スバースラインも生じなくなったため、雲一放射相互作用がトランスバースラインの形成に寄与していると考えられる。

ラジオゾンデ観測を基に設定した基本場で線形安定性解析を行った結果、鉛直方向には基本場が静的不安定な高度帯に局在 して水平方向には鉛直シアベクトルと平行な、RT不安定と整合的なロール状対流が最速成長モードであった。これは Asai (1970)などがより理想的な基本場で得た結果と整合する。この最速成長のロール状対流の水平波長は、基本場の各種パラメー タにほとんど依存せず、1~2 kmであった。それに対して、高解像度な極軌道衛星画像で観測されたトランスバースラインの 赤外輝度温度の2次元スペクトルでは波長1~数+kmにシグナルが見られ、現実の波長帯(1~数+km)の下限のみが線形論 (1~2 km)と整合した。波長数 km以上の長波長のバンド構造は非線形効果によって生じていることが考えられるが、この検証 は今後の課題である。







図2:線形安定性解析での最速成長モードの鉛直断面。 基本場の鉛直シアを x 軸方向に与えており、それと垂直 な yz 平面で示している。矢印は yz 平面内の風ベクトル を表し、陰影は鉛直流を表す。 基本場の静的不安定層は-500m ≦ z ≦ 500m であり、 その上下は安定成層である。

# 4. まとめと今後の課題

トランスバースラインの成因を明らかにするために、高解像度ラジオゾンデ観測データの統計解析、高解像度モデル実験に よる不安定化要因の考察、線形安定論による現実に近い基本場での成長モードと現実のトランスバースラインとの比較を行っ た。ラジオゾンデ観測では全事例においてトランスバースライン内部に静的不安定層と、雲バンド構造に平行な向きの鉛直シ アが見られた。ゾンデ観測から得られた成層と風の構造を基本場として線形安定性解析を行った結果、トランスバースライン と整合的な構造の、RT 不安定で駆動される擾乱が最速成長モードであることが示された。雲解像モデル SCALE-RM による高解像 度数値実験でも同様の不安定層とロール状対流が見られ、熱収支解析と感度実験の結果、静的不安定層は雲一放射相互作用に よって形成されていることが示唆された。これらの結果は Trier et al. (2010)の結果を支持し、先行研究に不足していた観 測的および理論的根拠を強化するものである。

主な今後の課題としては、観測事例のさらなる蓄積と解析手法の客観化や、非線形効果がトランスバースラインの水平波長 に与える影響の定量的評価が挙げられる。

- (1) Asai, T., 1970: Three-Dimensional Features of Thermal Convection in a Plane Couette Flow. J. Meteor. Soc. Japan, 48, 18-29.
- (2) Durran, D. R., and J. B. Klemp, 1982: On the effects of moisture on the Brunt-Väisälä frequency. J. Atmos. Sci., 39, 2152-2158.
- (3) Kim, J., Chun H., Sharman R. D. and S. B. Trier, 2014: The Role of Vertical Shear on Aviation Turbulence within Cirrus Bands of a Simulated Western Pacific Cyclone. Mon. Wea. Rev., 142, 2794-2813.
- (4) Trier, S. B., and R. D. Sharman, 2016: Mechanisms influencing cirrus banding and aviation turbulence near a convectively enhanced upper-level jet stream. Mon. Wea. Rev., 144, 3003–3027.
- (5) Trier, S. B., Sharman R. D., Fovell, R. G. and R. G. Frehlich, 2010: Numerical Simulation of Radial Cloud Bands within the Upper-Level Outflow of an Observed Mesoscale Convective System. J. Atmos. Sci., 67, 2990-2999.
- (6) 大野久雄, 三浦信男, 1982: 圏界面直下におけるケルビン・ヘルムホルツ波の励起. 天気, 29, 1235-1241.

# 次世代海洋生態系モデルを用いた気候変動が海洋生態系に与える影響の予測

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

# 増田 良帆, 北大・地球環境, E-mail: masuda(at)ees.hokudai.ac.jp 山中 康裕, 北大・地球環境, E-mail: galapen(at)ees.hokudai.ac.jp Yoshio Masuda, Faculty of Environmental Earth Science, Hokkaido University Yasuhiro Yamanaka, Faculty of Environmental Earth Science, Hokkaido University

#### 要旨

最新の植物プランクトン生理理論に基づいた次世代海洋生態系モデルを開発し、気候変動の海洋生態系への 影響予測を行うことが本研究の大目的である。本年度は、これ迄に開発した次世代モデルでパラメータ群の チューニングを行い、少なくとも数十年間は安定した栄養塩濃度を実現出来るようになった。更に北極海の 再現性を高める為に、河川からの栄養塩供給量、海氷形成・融解に伴う栄養塩の再配分に関するチューニン グを行い、全球モデルでは世界で初めて北極海の亜表層クロロフィル極大の再現に成功した。

# 1. はじめに

海洋の植物プランクトンは、光合成によって二酸化炭素を吸収するという点、海洋食物連鎖の基底となるという点において重要な役割を果たしている。気候変動によって、海洋植物プランクトンの一次生産や生態・種構成が変化すると、海洋全体の二酸化炭素吸収量が変化するのに加えて、食物連鎖を通じて漁業生産への影響が生じると考えられている。これらの影響評価を行う効果的な道具として、海洋大循環モデルと組み合わせた海洋生態系モデルが用いられてきた。物理モデルではナビエストークス方程式が不変の真理であるのに対し、海洋生態系モデルの基礎方程式は近似式である。よって、時代が進むと、より近似の精度が高い基礎方程式が提唱されるという発展プロセスを辿る。我々のグループは、一連の理論的研究 Pahlow and Oschlies (2013)、Pahlow et al. (2013)、Smith et al. (2015)で新たに提唱された基礎方程式を採用した次世代 3D 海洋生態系モデル (FlexPFT-3D)をこれ迄に開発してきた。本年度の目標は1.パラメータ群のチューニングによって長期間の積分を可能にすること、2. 北極海の再現性を向上させることである。これまでは、世界中のどの全球海洋生態系モデルでも北極海の再現性は低く、特に亜表層クロロフィル極大 (SCM: Subsurface Chlorophyll Maximum)の再現性に問題があった(Steiner et al. 2016)。

### 2. 問題設定·方法

海洋大循環モデルは気象研究所共用海洋モデル(MRI.COM)を用いており、海氷モデルも含まれている。計算領域は全球で、 北極海以外の水平解像度は東西1度×南北0.5度である。生態系モデルは、植物プランクトン1種、動物プランクトン1種を設 け、窒素・鉄循環を計算している。

長期積分を可能にする為に植物・動物プランクトンの生理パラメータ群や、硝酸塩や鉄といった栄養塩の循環をコントロール するパラメータ群のチューニングを行った。更に北極海の再現性を高める為に、河川からの栄養塩供給量、海氷形成・融解に伴 う栄養塩の再配分に関するチューニングを行った。

# 3. 結果と考察

20年間の計算を行った結果、後半の10年間では準定常状態が実現された。20年後の植物プランクトンの海表面クロロフィル 分布は衛星観測に近い結果が得られた。海洋内部のクロロフィルについても、観測データがあり、比較可能な場所では観測と整 合する結果が得られた。全球の硝酸塩濃度分布も観測データ(WOA)からのずれは小さい。

北極海については、全球モデルでは世界で初めて SCM の再現に成功した(図1)。海域によって深度が異なり、また顕著な年 変動が見られる。観測と同様、海氷がない場所では SCM は栄養塩躍層の周辺に形成されており、深度 30m-60m に存在する。形成 時期は、主にブルーム後の季節であり、観測との一致が見られた。一方、海氷がある場所では、クロロフィル極大深度は 20m よ り浅い表層付近に存在する。栄養塩分布についても、次世代モデルでは従来モデルに比べて大きな改善が見られた。我々グルー プの従来モデルである MEM では北極海表層の年平均硝酸塩濃度が 7 molN/L 程度であり、観測より著しく高い値となっていた。 次世代モデルで再現された変平均濃度は 1.5 molN/L 程度であり、観測での値とほぼ一致した。

海氷がない場所での SCM 形成メカニズムを調べた。クロロフィル濃度は植物プランクトンの炭素濃度と単位炭素辺りのクロロ フィル含有量の掛け算によって得られる。SCM の再現の鍵は、細胞内のクロロフィル含有量の変化であり、深度 70m 近辺では表 層の数倍に増加している事が示された。つまり、クロロフィル極大は必ずしも生物の炭素量の極大とは対応しておらず、光の減 少に伴って植物プランクトン細胞内のクロロフィル含有量が増加する順化反応に伴って形成される。この形成メカニズムは亜熱 帯・亜寒帯と共通である。一方、海氷がある場所では、減衰した光に適応するため、表層で既に細胞内クロロフィル含有量が高 い。よって、クロロフィル含有量の深度による変化が少なくなり、深い場所にクロロフィル極大が形成されない。



Fig. 1 Simulated SCM depth.

# 4. まとめと今後の展望

本年度は次世代生態系モデルのパラメータチューニングを行い、少なくとも数十年間は安定した栄養塩濃度を実現出来るように なった。これによって、今後の過去再現実験・将来予測実験の準備が整った。また、北極海のクロロフィル分布・栄養塩濃度分 布の再現性が従来モデルに比べて著しく向上した。これによって、北極海に関する過去再現実験・将来予測実験の信頼性が大き く増加した。

次世代モデルで計算された北極海の栄養塩濃度が従来モデルに比べて著しく改善されたのは、両モデル間の生物生産の違い が原因だと考えている。従来モデルでは、生物生産が現実より少なく、鉛直下方への硝酸塩輸送が不十分だった可能性が高い。 次世代モデルでは亜表層や海氷下での高いクロロフィル濃度が生物生産に貢献しており、現実に近い下方への硝酸塩輸送が生じ ているという作業仮説の下、今後解析を進める予定である。

来年度は過去再現実験を開始する。また、これまで次世代モデルで得られた SCM 等に関する成果を論文に纏める。

- 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.
- (2) 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.
- (3) 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.
- (4) Steiner, N. S., T. Sou, C. Deal, J. M. Jackson, M. Jin, E. Popova, W. Williams, and A. Yool, 2016: The future of the subsurface chlorophyll-a maximum in the Canada Basin -A model intercomparison, Journal of Geophysical Research: Oceans, 121, 387-409.

# 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:

# アナディール冷水帯発生過程についての観測とモデリング

# Numerical study on circulation, formation, transport and mixing of water-masses in the ocean: Formation of cold upwelling near the Anadyr strait

安田 一郎, 東大・大気海洋研, E-mail: ichiro(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 李 根淙, 東大・大気海洋研, E-mail: leekj(at)aori.u-tokyo.ac.jp 矢部いつか, 東大・大気海洋研, E-mail: yabe.itsuka@s.nenv.k.u-tokyo.ac.jpl

# 要旨

アナデイール海峡からベーリング海峡にかけて冷水帯が人工衛星画像で観測される。ロシア船及 び観測船みらいによるアナデイール海峡付近での現場観測及び数値モデリングを用いて、冷水帯 の発生に、アナデイール海峡を横切る海流が形成する海底境界層での渦粘性に関わっていること を指摘した。

#### 1. はじめに

ベーリング海峡を通した北太平洋と北極海の間の水塊交換は、海氷量変動に直接的な影響を与えるという意味において、北 極圏全域の気候に対して絶大な影響力のある問題である。その一方、ベーリング海ではシベリア半島沿岸の海域の多くがロシア の排他的経済水域に位置しており、船舶等を用いた現地調査による共有データや報告が不足している。したがって、現在でも気 象学・海洋学上で多くの疑問点が未解明な状態にある。

# 2. 観測データ

本研究では、北部ベーリング海、アナディル海峡からベーリング 海峡を通した水塊混合の実態把握と水塊変質の機構解明を目指す ベく現場調査を実施した(図 a)。ここでは、「みらい」北極航海 MR17-05C とマル/フスキー航海 Mu18 を用いて 2017 年と 2018 年の夏期に 船舶による海洋調査を実施した(1)。MR17-05C は ArCS 航海、Mu-18 は OMIX と ArCS の共同航海であった。MODIS 衛星の海水面温度 の画像から、アナディル海峡からベーリング海峡にかけての領域 (チリコフ海盆)において、夏期に明らかな冷水の海面露出(アウ トクロッピング)が見られ、これに伴う急峻な水温フロントが出 現することに注目する。寒冷水の海面露出帯のシグナルは、水位 差で恒常的に駆動される北上流によって北極海内部に移流される ため、大気冷却による秋以降の海氷生産量やその速度に著しく影 響を及ぼす可能性がある。

#### 3. 結果と考察

この寒冷水の海面露出の実態を探るために、周辺海域を中心に 両航海における海洋物理観測を実施した。2017年の観測では、ア ナディル海峡からベーリング海峡を抜ける縦断航路に沿って複数 の乱流観測を実施した。その結果、アナディル海峡周辺において 海底を中心とした乱流エネルギー散逸率の顕著な増大を確認する ことができた。この観測時の海峡通過流は約0.7 m s<sup>-1</sup>を超える流速で あった。2018年の観測では、アナディル海峡の横断線上に観測点を設定 し、提示の乱流観測、および流速・CTD 観測を実施した。定点での約1



モデルによる水平循環の再現、c)定点乱流観測による乱流エネルギー散逸率 $\varepsilon$ の時系列。

日間における時系列観測のデータから、海底での乱流エネルギーの最大値が約半日の周期性の下に規則的に変動する様子が明ら かとなった。それと同時に、海峡を横断する密度と水平流速の断面からは、中間の水温躍層の傾斜による傾圧性の流れと半日潮 流による順圧的な移流が組み合わった時空間的に複雑な流れの場を可視化することに成功した。乱流観測から鉛直方向の乱流熱 フラックスを見積もると、10 W m<sup>2</sup>の規模であった(図 c)。これは乱流が駆動する熱の輸送量としては破格の数値であるが、数 日間で冷水を海面に露出させる 100-1000 W m<sup>2</sup>の熱輸送と比べると明らかに桁が小さい。我々はこの結果から、海底付近での乱 流混合はあくまで順圧潮流に対する呼応としての発生であり、チリコフ湾での冷水湧昇は別の機構が駆動していると仮定した。 上記の仮説を検証するために本研究では、新たに3次元の海洋循環モデルを導入し、当該海洋環境を模した環境下での数値実 験を数例ほど実施した(図 b)。これらの実験では、シベリア半島沿いに流入する順圧流を外力としてモデルを駆動し、初期条件

線を数例はと実施した(図り)。これらの実験では、シベリアキ島沿いに加入する順圧加を外力としてモケルを駆動し、初期采作 は鉛直二層の水温を採用した。数値実験の結果、想定された通りにアナディル海峡上での下層冷水の湧昇が再現された。モデル の出力を細かく解析すると、この底層水の湧昇過程は、特にシベリア半島の沿岸(海峡の西岸)で集中的に発生していた。当現 象の発生機構において、我々は海峡を横断する流れの存在がキーと考えている。これは、当該海峡を大きな流速を持つ順圧流が 通過する際、海底付近の境界層内において乱流混合が顕著に発達することが要因の一つと考えられる。つまり、海底の粘性境界 層では、地衡流平衡から逸れる成分が横断流、すなわちシベリア沿岸に向かう流れの成分を形成する。すなわち、この海底流が 西岸で上昇流を形成することによって、人工衛星で見られた大規模な下層冷水層の海面露出(図 a) という現象を引き起こした と解釈することができる。この仮説を検証する目的で、我々は海底境界層の摩擦を仮想的にゼロにする実験を行った。その結果、 海峡に沿う順圧流自体の流速は強化されるものの、西岸での冷水湧昇は全く再現されないという結果が得られた。これは、上記 の海底境界層を含めた海峡を横断する二次循環の重要性を再確認する結果と言える(図 b)。

# 4. まとめと今後の展望

最後に、Mu18の時系列観測で得られた流速データにおいて、半日周期の順圧潮流が沿岸湧昇に寄与することが推測される。これは、潮汐振幅における長期的な変動が海面水温やフロント形成に影響を及ぼすことを暗に示している。M<sub>2</sub>を代表とする主要分 潮の振幅が約 20 年の周期で変動することが知られており、当該海域の海面水温、ひいては北極海での海氷量変動への長期的な 波及効果が考えられる。本研究は、(2)として JGR-Ocean に投稿中。

- (1) Bui et al., 2019, Influence of warm-core eddy on dissolved methane distribution in the southwestern Canada Basin during late summer/early fall 2015, Polar Science, 22 (2019).
- (2) Kawaguchi et al., Cold water upwelling and basal entrainment near the Anadyr Strait: Observations and Simulations, JGR-Ocean, submitted.