

# 共同研究報告書

平成28年度

東京大学 大気海洋研究所  
気候システム研究系

# 目次

平成 28 年度共同研究報告書の発行にあたって

平成 28 年度共同研究応募及び配分一覧

## 【特定共同研究】

1. 地表面・水文モデルの開発及びデータ解析	4
2. 海洋モデルにおけるサブグリッド現象のパラメータ化	8
3. 全球雲解像モデルの開発及びデータ解析	13
4. 水素酸素同位体比を組み込んだ CGCM および領域モデルの開発	17
5. 高分解能大気モデル及び領域型気候モデルの開発	21
6. 衛星データと数値モデルの複合利用による温室効果気体の解析	27
7. 世界海洋大循環モデルの相互比較	31
8. 気候モデル及び観測データを用いた気候変動とその予測可能性の研究	35
9. 全球雲解像モデルの開発及びデータ解析	38
10. ①衛星データと数値モデルの融合による雲の素過程の研究 ②全球雲解像モデルの開発及びデータ解析	43
11. 地表面・水文モデルの開発及びデータ解析	47
12. 気候研究のための気候・氷床モデル開発と古気候数値実験	52
13. 地表面・水文モデルの開発及びデータ解析	55
14. 古海洋研究のためのモデル開発及び数値シミュレーション	61
15. 衛星データと数値モデルの融合による雲の素過程の研究	65

## 【一般共同研究】

1. 大気海洋マルチスケール変動に関する数値的研究	69
2. 底層水形成域の高解像度・高精度モデリング	73
3. 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	76
4. 気候変動現象に伴う大気海洋相互作用とその予測可能性	81
5. 全球高解像度非静力学モデルを用いた物質境界と混合の数値的研究	84
6. 気候モデル・全球雲解像モデルを用いた熱帯大気研究	89
7. なし	
8. 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	92
9. 放射収支算定のための放射スキームの高速・高精度化	96
10. 異常気象とその予測可能性に関する研究	99
11. 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	103
12. 地表面状態の変化による大気水循環への影響	108
13. 地球型惑星の古気候と気候変動の研究	110
14. 惑星中層大気大循環の力学	114
15. 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	118
16. 一般座標系及び重合格子法により地形表現を行う雲解像モデルの開発	122

## 平成28年度共同研究報告書の発行にあたって

どの分野でもそうですが、研究費や定員がじわじわと目減りしてきていますので、全国のみならず競争資金の獲得に奔走しておられることと思います。数年を区切りとする競争的研究費ではどうしてもわかりやすい「アウトプット」を求められるケースが多くなり、モデル開発のような地味な作業を進めにくくなることも多いと思います。しかし、アウトプットを期待されるということはそれだけ当該研究分野が世間の関心を集めているということでもありますので、できる限り期待に応えたいとも思います。もちろんその一方で、やはり外部には少しわかりにくくともこの分野の将来にとっては大事な基盤研究も肅々と進めてゆかなくてはなりません。

いつも申し上げているとおり、現代の気候モデルは大型化し、さまざまなプロセスを含むようになってきています。一研究室で気候モデル全体の開発を担うことは不可能です。全国の研究者、研究室のみなさんには各々得意なところの開発や検証を担って頂いて、いざ数値実験となれば、コミュニティの叡智を集めた全体システムで世界レベルの実験を行う、というような姿が望ましいのではないかと考えています。本共同研究が、そのような活動の核になれるよう願っています。

ところで、本共同研究が利用している東大情報基盤センターの大型計算機も新機種が導入され、プログラミングもこれに対応する必要がある場合が出てきます。気候システム研究系の教員も相談に乗りますので、最新機の性能をエンジョイしつつ研究を進めて頂ければと思います。

平成29年3月

東京大学大気海洋研究所 気候システム研究系 系長  
木本 昌秀



平成28年度 気候システムに関する共同研究 応募及び配分一覧

研究 区分	研究課題	研究組織	気候系 担当 教員	配分額				
				計算機 CPU時間	消耗品 千円	旅費 千円	合計 千円	
特定 研究 1	地表面・水文モデルの開発及びデータ解析	東京大学生産技術研究所 東京大学工学系研究科	沖 大幹 教授 Kim Hyungjun 助教 藪 優太郎 大学院生 石塚 悠太 大学院生	芳村圭	4,000	0	0	0
特定 研究 2	海洋モデルにおけるサブグリッド現象のパラメータ化	東京大学大学院理学系研究科	日比谷 紀之 教授 田中 祐希 助教 永井 平 特任研究員 伊地知 敬 特任研究員 大貫 陽平 大学院生 桑原 将旗 大学院生 高橋 杏 大学院生 福澤 克俊 大学院生	羽角博康	10,000	0	0	0
特定 研究 3	全球雲解像モデルの開発及びデータ解析	筑波大学計算科学研究センター 筑波大学生命環境研究科	田中 博 教授 松枝 未遠 助教 相澤 拓郎 大学院生	佐藤正樹	50	60	5	65
特定 研究 4	水素酸素同位体比を組み込んだCGCMおよび領域モデルの開発	熊本大学大学院自然科学研究科 東京大学	一柳 錦平 准教授 田上 雅浩 研究員	芳村圭	100	20	100	120
特定 研究 5	高分解能大気モデル及び領域型気候モデルの開発	気象庁予報部数値予報課	中川 雅之 予報官 徳廣 貴之 予報官 坂本 雅巳 予報官 佐藤 均 技術専門官 長澤 亮二 技術専門官 荒波 恒平 技術専門官 下河邊 明 技官 木南 哲平 技官 齊藤 慧 技官	木本昌秀	8,000	0	0	0
特定 研究 6	衛星データと数値モデルの複合利用による温室効果気体の解析	気象庁気象研究所海洋・地球化学研究部	丹羽 洋介 研究官	今須良一	5,000	0	0	0
特定 研究 7	世界海洋大循環モデルの相互比較	気象庁気象研究所海洋・地球化学研究部	中野 英之 主任研究官 辻野 博之 主任研究官 坂本 圭 主任研究官 浦川 昇吾 研究官	羽角博康	10,000	0	0	0
特定 研究 8	気候モデル及び観測データを用いた気候変動とその予測可能性の研究	気象庁気象研究所気候研究部	石井 正好 主任研究官 吉田 康平 主任研究官 小山 博司 客員研究員	木本昌秀 渡部雅浩	5,000	0	0	0
特定 研究 9	全球雲解像モデルの開発及びデータ解析	海洋研究開発機構 埼玉県環境科学国際センター	那須野 智江 主任研究員 野田 暁 研究員 中村 晃三 主任研究員 山田 洋平 研究技術専任スタッフ 池田 美紀子 技術主任 原 政之 研究員	佐藤正樹	5,000	0	0	0
特定 研究 10	①衛星データと数値モデルの融合による雲の素過程の研究 ②全球雲解像モデルの開発及びデータ解析	国立環境研究所 理化学研究所・計算科学研究機構	五藤 大輔 研究員 佐藤 陽祐 特別研究員	①鈴木健太郎 ②佐藤正樹	10,000	0	0	0
特定 研究 11	地表面・水文モデルの開発及びデータ解析	横浜国立大学教育人間科学部	筆保 弘徳 准教授 山崎 聖太 大学院生 小林 直弘 大学院生	芳村圭	1,000	0	0	0
特定 研究 12	気候研究のための気候・氷床モデル開発と古気候数値実験	海洋研究開発機構 北海道大学 北海道大学	齋藤 冬樹 技術研究員 セデ`イック ハキム 博士研究員 グ`レーベ` ラルフ 教授	阿部彩子	2,000	0	50	50
特定 研究 13	地表面・水文モデルの開発及びデータ解析	北海道大学大学院工学院	安成 哲平 助教	芳村圭	1,500	0	100	100
特定 研究 14	古海洋研究のためのモデル開発及び数値シミュレーション	海洋研究開発機構	重光 雅仁 技術研究員 岡 顕 准教授	岡頭	1,000	0	0	0
特定 研究 15	衛星データと数値モデルの融合による雲の素過程の研究	名古屋大学宇宙地球環境研究所	増永 浩彦 准教授	鈴木健太郎	0	30	46	76

研究 区分	研 究 課 題	研 究 組 織	気候系 担当 教員	配 分 額				
				計算機 CPU時間	消耗品 千円	旅 費 千円	合 計 千円	
一般 研究 1	大気海洋マルチスケール変動に関する数値的研究	北海道大学大学院地球環境科学研究院 北海道大学大学院理学研究院 北海道大学大学院理学院 北海道大学大学院環境科学院	吉森 正和 准教授 堀之内 武 准教授 佐藤 友徳 准教授 見延 庄士郎 教授 稲津 将 准教授 市川 悠衣子 大学院生 玉置 雄太 大学院生 勝山 祐太 大学院生 井上 史也 大学院生 井田 東吾 大学院生 植木 聡明 大学院生	木本昌秀	4,000	0	0	0
一般 研究 2	底層水形成域の高解像度・高精度モデリング	北海道大学低温科学研究所 北海道大学大学院環境科学院	松村 義正 助教 佐藤 建 博士研究員 中田 和樹 大学院生	羽角博康	3,000	0	0	0
一般 研究 3	海洋における循環・水塊形成・輸送・混合に関する数値的研究	東京大学大気海洋研究所	安田 一郎 教授 田中 雄大 特任研究員 後藤 恭敬 大学院生	羽角博康	6,000	0	0	0
一般 研究 4	気候変動現象に伴う大気海洋相互作用とその予測可能性	東京大学大学院理学系研究科	東塚 知己 准教授 山上 遥航 大学院生 大石 俊 大学院生 木戸 晶一郎 大学院生	木本昌秀	7,000	0	0	0
一般 研究 5	全球高解像度非静力学モデルを用いた物質境界と混合の数値的研究	東京大学大学院理学系研究科	佐藤 薫 教授 三浦 裕亮 准教授 澁谷 亮輔 大学院生 安田 勇輝 大学院生 雨宮 新 大学院生	木本昌秀 佐藤正樹 高橋正明	4,000	0	0	0
一般 研究 6	気候モデル・全球雲解像モデルを用いた熱帯大気研究	東京大学大学院理学系研究科	三浦 裕亮 准教授 末松 環 大学院生 王家瑞 大学院生 松岸 修平 大学院生	渡部雅浩	30,000	75	0	75
一般 研究 7	汎地球型惑星の水循環と気候の検討	東京大学大学院理学系研究科	阿部 豊 准教授 小玉 貴則 大学院生	阿部彩子	0	0	0	0
一般 研究 8	数値モデルを用いた東アジア大気循環の変動力学の探究	東京大学先端科学技術研究センター	中村 尚 教授 小坂 優 准教授 西井 和晃 助教 宮坂 貴文 特任研究員	渡部雅浩	6,000	0	0	0
一般 研究 9	放射収支算定のための放射スキームの高速・高精度	東京海洋大学海洋工学部 JAXA/EORC	関口 美保 准教授 坂西 湊 大学院生 中島 映至 センター長 竹中 栄晶 招聘研究員 橋本 真喜子 プロジェクト研究員	鈴木健太郎	500	50	22	72
一般 研究 10	異常気象とその予測可能性に関する研究	京都大学防災研究所	向川 均 教授 榎本 剛 准教授 時長 宏樹 特定准教授	木本昌秀	500	0	30	30
一般 研究 11	気候変動予測の不確実性低減に資する海洋大循環モデルの精緻化	海洋研究開発機構	建部 洋晶 主任技術研究員 田中 幸夫 主任研究員 小室 芳樹 技術研究員 鈴木 立郎 技術研究員 黒木 聖夫 特任研究員 小野 純 特任研究員	羽角博康	10,000	0	0	0
一般 研究 12	地表面状態の変化による大気水循環への影響	首都大学東京	高橋 洋 助教 神澤 望 大学院生	渡部雅浩	2,000	60	30	90
一般 研究 13	地球型惑星の古気候と気候変動の研究	東北大学大学院理学研究科 情報通信研究機構 京都産業大学 チャルマス工科大学	黒田 剛史 助教 笠羽 康正 教授 寺田 直樹 准教授 中川 広務 助教 青木 翔平 客員研究者 鎌田 有紘 大学院生 笠井 康子 主任研究員 佐川 英夫 准教授 鷲 和俊 大学院生	阿部彩子	8,000	0	50	50
一般 研究 14	惑星中層大気大循環の力学	九州大学応用力学研究所	山本 勝 准教授 角田 裕磨 大学院生 西田 侑加 大学院生	佐藤正樹	1,000	0	0	0
一般 研究 15	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	大気海洋研究所	伊藤 進一 教授 横井 孝暁 特任研究員	羽角博康	500	0	0	0
一般 研究 16	一般座標系及び重合格子法により地形表現を行う雲解像モデルの開発	京都大学	重 尚一 准教授 武村 一史 大学院生	高藪緑	1,000	0	100	100
特 定 共 同		合 計	15 件					411
一 般 共 同		合 計	16 件					417
合 計		合 計	31 件					828

## 特定共同研究課題名

地表面・水文モデルの開発及びデータ解析

## 分担課題名

リアルタイムアンサンブル洪水予報システムの開発と運用

## 共同研究者名

沖 大幹	教授	東京大学生産技術研究所
Kim Hyungjun	助教	東京大学生産技術研究所
日比野 研志	研究員	東京大学生産技術研究所
藪 優太郎	修士課程学生	東京大学大学院工学系研究科
石塚 悠太	修士課程学生	東京大学大学院工学系研究科

## 研究目的

洪水は世界の年間自然災害経済被害の 3 割以上を占める災害である一方で、その予測は未だ実運用まで達していない。その原因として、モデリングの不確実性や初期値不確実性、気象入力の不確実性が挙げられる。本研究では、気象入力の不確実性を考慮すべくアンサンブル入力を用いた洪水予測システムを構築し洪水予測システムのリアルタイム運用を目指す。

## 研究内容

本研究では、ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts)が提供するアンサンブル気象予報入力をもとに、陸面物理過程モデル MATSIRO と河川氾濫モデル CaMa-Flood を用いることで河川流量や氾濫域面積を予測する。ここで、他の洪水頻発地域への適用を見据え全球モデルを用いている。本研究では構築したシステムを日本域に 5 km解像度で適用し、2015年に発生した鬼怒川洪水のハインドキャストを行うことでその性能を試験した。

## 研究成果

日本域 5 kmのモデル境界条件を整備したうえで、気象庁が提供する目視数値予報モデルによる計算結果と全国合成レーダーエコー強度データによる観測降

雨を用いたモデル検証を行った。表1は、全国主要6河川での年間流量積算値の比較結果を示している。

表1 全国主要6河川の計算結果と観測との比較

	観測 [km <sup>3</sup> /year]	モデル [km <sup>3</sup> /year]	相関係数	流量比 (Mdl/Obs)
石狩大橋	13.04	11.09	0.50	0.85
狐禅寺	9.83	9.40	0.69	0.96
栗橋	8.16	13.13	0.69	1.61
小千谷	16.37	18.16	0.70	1.11
淀	8.21	7.58	0.42	0.92
岩津	3.45	2.89	0.61	0.84

栗橋地点については観測との齟齬がみられるが、その他の地点では年間積算流量を適切に再現できている結果となった。栗橋地点については、低水の過大評価が特に目立ち、耕作地や水のせき止め、移転などモデル内で取り扱われていない現象によるものと考えられる。(図1)

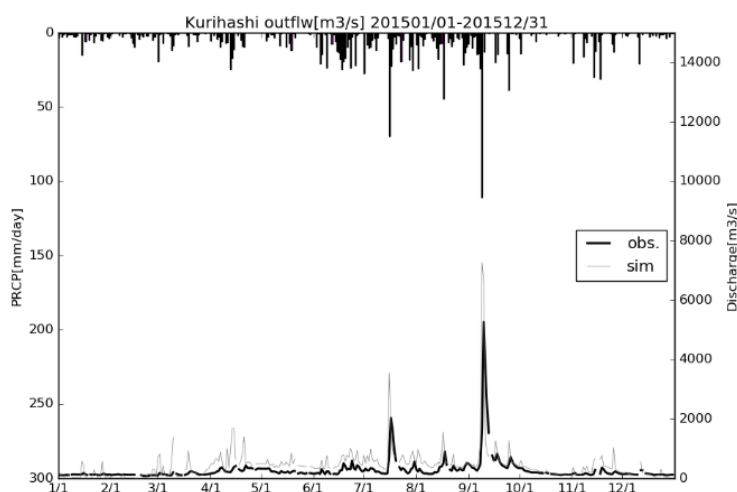


図1

栗橋地点 2015 年のハイエトグラフとハイドログラフ

ただし、洪水時のピークや全体としての変動傾向の再現性は高いものと考えられ、相関係数の低下はダムオペレーションによるピークカットによって多く引き起こされているものと推察される。また、どの河川においてもピークがやや観測と比べて早く鋭いという傾向がみられた。これらは河道地形境界条件の見直しによって一定の改善が得られる事が過去の研究により報告されている。

図 2 に国交省が管轄する利根川水系鬼怒川石井（右）地点でのレーダー観測降雨によるシミュレーション結果を示す。

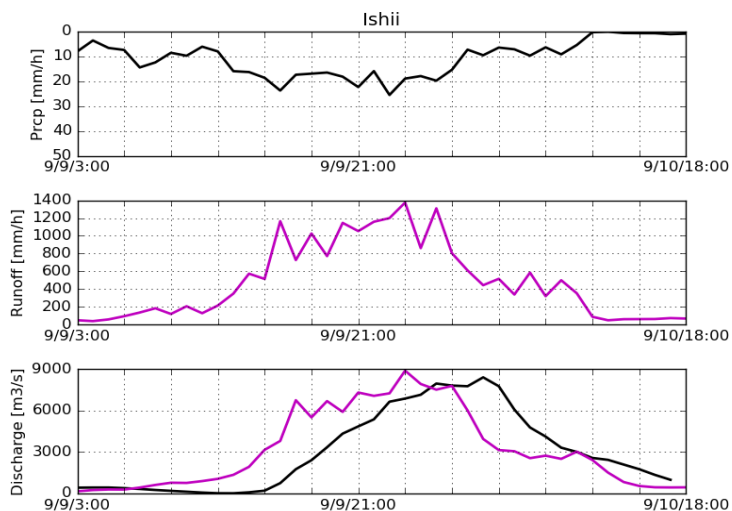


図 2

鬼怒川石井（右）地点での流量再現性  
黒が観測、赤がシミュレーションを示す

こちらにおいてもピークの立ち上がりは早い、洪水そのものはとらえる事が出来ている。

以上の検証から構築したシステムが洪水を再現する能力を有するものと判断し、2015年の鬼怒川洪水について、39時間前からのハインドキャストを行った。

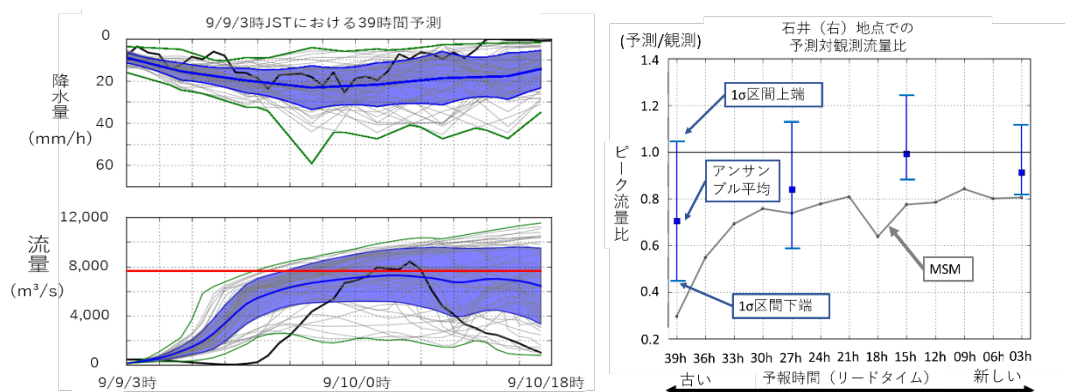


図 3 (左)

ECMEF が提供する全球アンサンブル降水予報をもとに予測を行った結果  
洪水発生 23 時間前の 9 月 9 日午前 3 時の予測

図 4 (右)

各予報初期時刻でのピーク流量比の比較

灰：メソ数値予報モデル (MSM) 青：ECMWF アンサンブル

なお、図中の赤線は国交省が規定する避難判断水位をあらかじめ求めておいた水位流量曲線で流量に変換したものである。

当該ハインドキャストによれば、全 51 メンバーのうち 35 時間前には 17 メンバー、23 時間前には 23 メンバー、11 時間前には 43 メンバーが洪水発生を予測する結果となり、予報時刻が更新されるごとにシステムが洪水発生の確度をより高く予測する結果となった。観測とのピーク流量比でも、メソ数値予報モデルと ECMWF との系統的なバイアスは見られるものの、ECMWF アンサンブルによる計算はその  $1\sigma$  区間内に 1 を常に捉える事が出来ている。

以上本研究によって、全球モデルを用いた洪水の数十時間スケールでの長時間予測が定性的に可能なことが示された。

なお、本研究におけるメソ数値モデルおよび全国合成レーダーエコー強度データ GPV は東京大学生産技術研究所喜連川研究室より提供を受けた。

## 今後の問題点

洪水予測はイベント単位での検証が行われるが、その数は世界的に見ても以前限られている。本研究は今後、より多くのイベントを世界中で検証を行い洪水判定の頑健性を検証するべきである。

また、河道地形や土壌境界条件、内部物理過程等の見直しによって、流量ピークが観測と比べ早く鋭い点について今後改善していく必要がある。

さらに、今回の研究では直接考慮することのできなかつた初期値不確実性やモデル不確実性については、すでに気象分野で試みられているデータ同化や内部物理過程摂動等によって考慮していく事も考えうる課題である。

**特定共同研究課題名：**

海洋モデルにおけるサブグリッド現象のパラメータ化

**分担課題名：**

海洋深層における乱流拡散のパラメタリゼーション

**共同研究者名（所属）：**

- 日比谷紀之（東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻・教授）
- 田中 祐希（東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻・助教）
- 永井 平（東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻・特任研究員）
- 伊地知 敬（東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻・特任研究員）
- 大貫 陽平（東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻・大学院生）
- Wei Yang（東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻・大学院生）
- 桑原 将旗（東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻・大学院生）
- 高橋 杏（東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻・大学院生）
- 福澤 克俊（東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻・大学院生）
- 小堀 笑理（東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻・大学院生）
- 宮寺 凜一（東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻・大学院生）

**研究目的：**

海洋大循環モデルや大気海洋結合モデルが高精度になればなるほど、計算結果の鍵を握るサブグリッドスケール現象のパラメタリゼーションをより現実的なものとしていくことが必要となる。しかしながら、現在の数値モデルに組み込まれている鉛直乱流混合過程のパラメタリゼーションは、現実の海洋観測結果を反映しているものとは言い難い。

これまでの乱流観測から、粗い海底地形の直上では、顕著な乱流ホットスポットが形成されていることが知られている (e.g., Polzin et al. 1997)。この海底地形上に形成される乱流混合のパラメタリゼーションは、中・深層における乱流混合のパラメタリゼーションとは独立に定式化されてきた。その中で、現在、最も広く用いられているパラメタリゼーション (St. Laurent et al. 2002) は、深海底の近傍における乱流への究極的なエネルギー源が潮汐流と海底地形の凹凸との相互作用で励起した高波数の内部潮汐

波であることを仮定し、海底地形の凹凸、それを越えていく潮汐流の強さ、密度成層などの物理量から、海底地形上の乱流混合強度、および、その鉛直方向への減衰スケールを経験的に推定している。特に、鉛直方向の減衰スケールは、限られた観測結果に基づいて一定値 500 m に固定されている。

しかしながら、これまでの数値的研究から、このパラメタリゼーションの欠陥が指摘されている。Iwamae et al. (2009) や Iwamae and Hibiya (2012) は、海底近傍で形成される内部潮汐波起源の乱流ホットスポットの鉛直方向への広がりには決して一定でなく、海底上における乱流混合強度とトレードオフの関係にあることを示した。また、Mohri et al. (2010) は、潮流の振幅  $U_0$  と海底地形の水平波数  $k$  との積を潮流の周波数  $\omega_0$  で割った、いわゆる「潮流の移流効果の強さを示すパラメータ」が 1 を超えた場合、既存のパラメタリゼーションでは考慮されてこなかった準定常的なリー波が海底で励起されることを示した。現在までのところ、このようなリー波が背景内部波場との相互作用を通じて、どのような乱流混合のホットスポット域を海底地形の凹凸上に形成していくかに関しては全く研究が行われていない。

本研究では、海洋中・深層の乱流パラメタリゼーションを定式化する際に基礎となったアイコンアル計算を、海底で励起された内部潮汐波・リー波に対して適用し、海底地形上から上方へ発していく各内部波パッケージが、Garrett–Munk (GM) モデルスペクトル (Garrett and Munk 1975) をもつ背景の普遍平衡内部波場との非線形相互作用を通じて、どのようにエネルギーを散逸していくかを調べた。

## 研究内容：

水深 2000 m、一様成層の2次元海洋中に、GMスペクトルを持つ内部波場を仮定し、その中で、相当数サンプリングした各内部潮汐波・リー波パッケージの位置  $\mathbf{x}$  と波数  $\mathbf{k}$  を、アイコンアル方程式

$$\frac{D\mathbf{x}}{Dt} = \frac{\nabla S}{\nabla k} + \mathbf{u}_{BG},$$

$$\frac{D\mathbf{k}}{Dt} = -\nabla \mathbf{u}_{BG} \cdot \mathbf{k}$$

によって追跡した。ここで、 $\sigma$  は各内部波パッケージの見かけの周波数で、内部波の分散関係を満たす。また、 $\mathbf{u}_{BG}$  は各内部波パッケージよりも大きな水平・鉛直スケールをもつ背景内部波場の流速を表す。各内部波パッケージが背景内部波場中を伝播する間、その内部波パッケージのもつ wave action は保存される。そして、その鉛直波数が 0.1 cpm



を超えた内部波パッケージは砕波したものとして追跡を終了し、その wave action を系から取り除く。各内部波パッケージの wave action を  $A_i$ 、砕波時の周波数を  $\sigma_i$ 、追跡時間を  $T_i$  とすれば、砕波限界を超えて乱流スケールへ流れる各内部波パッケージのエネルギーフラックスは、 $E_{fi} = A_i \sigma_i / T_i$  と表される。アイコンール計算における乱流散逸率  $\varepsilon$  は、こうして計算された各内部波パッケージのエネルギーフラックスの総和  $\varepsilon = \sum_i E_{fi}$  として見積もることができる。

### 研究成果：

まず、海底地形の波数を固定し、潮流の振幅を変化させた実験を行った（図1）。その結果、潮流と海底地形との相互作用が弱く、海底地形の凹凸から発生する内部波が線形の内部潮汐波の場合 ( $kU_0/\omega_0 < 1$ ) には、海底地形上の乱流混合強度や乱流スポット域の鉛直方向への広がり、潮流の振幅にはほとんど依存しない。その一方で、潮流と海底地形との相互作用が強くなり、海底地形の凹凸から発生する内部波が準定常リー波になってくると ( $kU_0/\omega_0 > 1$ )、潮流の振幅の増大とともに、海底地形上の乱流混合強度は低下し、それとともに、乱流スポット域の鉛直方向への広がりが大きくなっていく。

次に、潮流の振幅を一定にし、海底地形の波数を変化させた実験を行った（図2）。その結果、潮流と海底地形との相互作用が弱く、海底地形の凹凸上から発生するのが内部潮汐波の場合 ( $kU_0/\omega_0 < 1$ )、海底地形の波数が増加するとともに、海底地形上の乱流混合強度は増加するが、乱流スポット域は海底地形の近傍に抑えられてしまう。これに対して、潮流と海底地形との相互作用が強くなり、海底地形の凹凸から発生するのが、準定常のリー波になってくると ( $kU_0/\omega_0 > 1$ )、海底地形上での乱流散逸率、および、乱流散逸域の鉛直方向の広がりは、海底地形の波数にあまり依存しなくなっていく傾向がみてとれる。

これらの数値実験結果は、海底地形上で発生する線形内部潮汐や準定常リー波の鉛直群速度が海底地形凹凸の波数や潮流の強さとどのような関係にあるかを考察することで説明できる。今、線形内部潮汐波の鉛直群速度は、海底地形の波数に反比例する。一方、準定常リー波の鉛直群速度は、潮流の振幅の2乗と海底地形の波数との積に比例する。また、背景の内部波の場合との非線形相互作用による減衰時間の方は、どちらの場合も、海底地形の波数に反比例する。したがって、鉛直群速度と減衰時間との積で決まる乱流ホットスポットの鉛直スケールは、潮流の弱い場合は海底地形の

波数の2乗に反比例するが、潮流の振幅が大きくなってくると、海底地形の波数にはほとんど依存せず、むしろ潮流の振幅の2乗に比例して大きくなっていくことになる。

以上の数値実験から示された「海底地形上に形成される乱流ホットスポットの鉛直スケール」は、図3のようにまとめられる。潮流と海底地形との相互作用が弱い場合は、海底地形の波数が増加すると、強い乱流混合が期待できるが、発生する内部波の鉛直群速度が小さくなってしまいうので、形成される乱流ホットスポットは海底地形付近に制限されてしまう。逆に、潮流と海底地形との相互作用が強くなってくると、発生する準定常リー波の群速度が大きくなっていくため、海底地形上で発生したエネルギーは散逸されつつも、鉛直上方に運ばれていき、最終的に鉛直方向に広がった乱流ホットスポットが形成されることになる。

### 今後の問題点：

今後は、本数値実験によって予測された「海底地形上に形成される乱流ホットスポットの鉛直スケール」の特徴を背景場の関数として定式化することで乱流パラメタリゼーションの完成を目指すとともに、海底直上までの乱流散逸率を測定することのできる投下式乱流計を世界海洋の乱流ホットスポット域で多数投入することで、その妥当性を検証していくことが必要である。

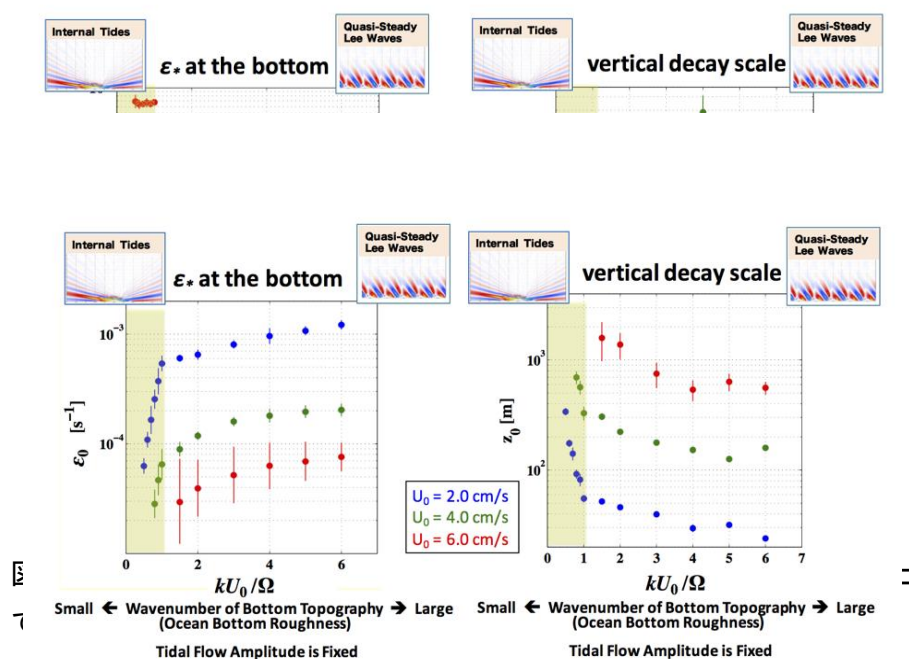


図 2.  $U_0$  を固定し  $k$  を変化した場合に計算された (左) 海底地形上での乱流混合強度、(右) 乱流ホットスポットの鉛直方向の広がり。

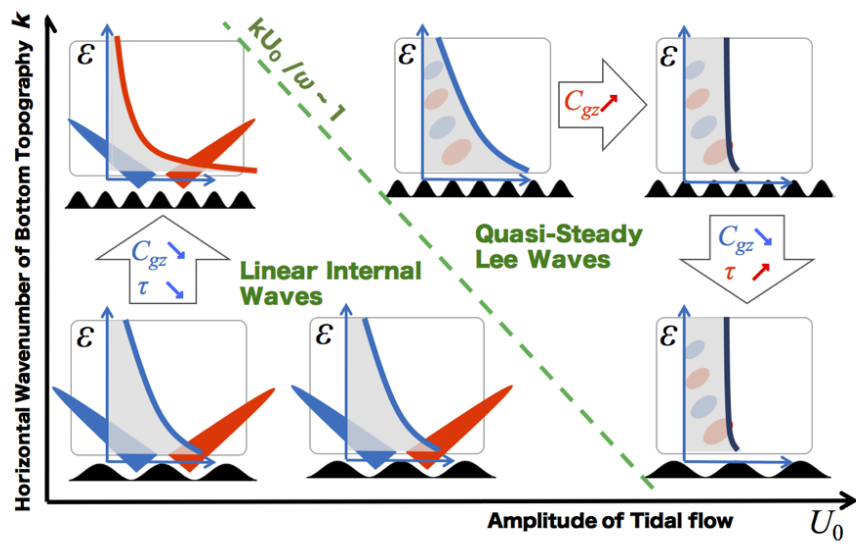


図 3.  $U_0$  と  $k$  で分類した海底地形上に形成される乱流ホットスポットの鉛直スケールの概念図。

特定共同研究課題： 全球雲解像モデルの開発及びデータ解析  
分担課題： 全球雲解像モデルを用いた北極圏のプロセス研究  
研究課題名：北極温暖化増幅に伴う傾圧不安定応答の理論的研究

共同研究者

田中博	筑波大学計算科学研究センター教授
松枝未遠	筑波大学計算科学研究センター助教
相澤拓郎	筑波大学生命環境科学研究科 D3
小柴厚	筑波大学生命環境科学研究科 D3
桜井誠	筑波大学生命環境科学研究科 M2

## 1. 研究目的

東京大学大気海洋研究センター (AORI) と理化学研究所複合系気候科学研究チームでは、次世代大気大循環モデルと期待されている非静力正 20 面体大気モデル NICAM (Nonhydrostatic ICosahedral Atmospheric Model) を開発してきた。NICAM は超並列計算機対応で開発されており、筑波大学の超並列計算機 COMA (PACS-IX 1PF) の CPU を用いて Glevel-10 までの解像度で実行可能である。既存の大気大循環モデルでは、静力学を前提とした積雲パラメタリゼーションを用いており、雲の不確実性が問題となっていた。NICAM では高解像度を目標とするために非静力学格子系を採用し、雲微物理過程を実装しているため、全球雲解像モデルとして、温暖化に対する雲応答について、より信頼に足る結果が得られると期待されている。特に北極圏の海氷上の雲形成過程には多くの問題があり、先端研究として NICAM の応用が望まれている。

しかし、NICAM の物理過程は開発途上のため、モデルの欠点を把握し改善するための基礎的なデータ解析が必要である。本研究では NICAM の出力を解析し、観測や他の全球予報モデルと比較することで、現時点でのモデルの精度を評価することが目的である。

## 2. 研究方法

<使用モデル>

佐藤(AORI)が開発したリアルタイム予報バージョンのNICAM  
Glevel=5 (224km)からGlevel=10 (7km)までの解像度モデル

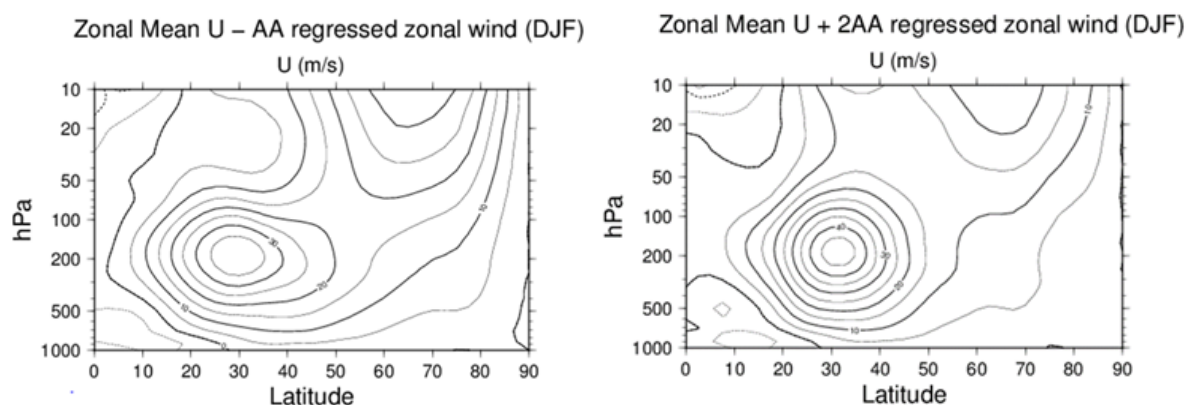
<使用データ>

気象庁JRA-55 (等圧面再解析値)

### 3. 結果

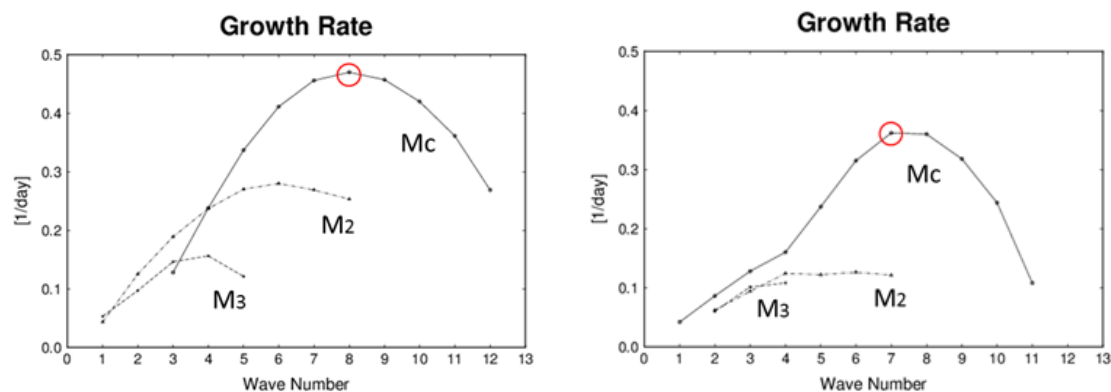
#### 3.1 北極温暖化増幅に伴う帯状風変化

地球温暖化研究では、北極圏で温暖化が顕著に現れるという将来予測があり、観測事実としても北極圏の温暖化が全球平均の 2 倍の速度で進行している。これを北極温暖化増幅 (Arctic Amplification: AA) という。高緯度ではアイスアルベドフィードバックにより温暖化が加速されることが主な原因である。気温の長期変動を EOF 展開すると、EOF-1 には北極振動(AO)が得られ、北極圏の対流圏上層に温度アノマリが現れる。EOF-2 には AA が現れ、北極圏の大気下層にアイスアルベドフィードバックによる温度アノマリが現れ、その一部が上層に伝播する分布となる。この温度分布から温度風関係式を解いて帯状風アノマリを計算し、それを気候値に重ねることで、AA に伴う帯状風変化を計算した結果が図 1 である。図 1 a は気候値に $-1\sigma$ の AA を重ねた図で ( $\sigma$  は標準偏差)、図 1 b は気候値に $+2\sigma$ の AA を重ねたものである。AA に伴い寒帯ジェットが弱化しているが、亜熱帯ジェットは強化している。



#### 3.2 北極温暖化増幅に伴う傾圧不安定波の増幅率変化

北極温暖化増幅に伴い、南北方向の傾圧性が減少するため、傾圧不安定波の増幅率は減少すると予想される。図 2 は上の帯状風変化に伴う傾圧不安定波の



増幅率の変化である。縦軸は増幅率、横軸は東西波数で、波数 6 から 8 の総観規模に最大増幅率の Charney モードが得られる。AA に伴い、増幅率の減少が解析された。この結果は、A0 負の応答とは逆の結果である。

### 3.3 北極温暖化増幅に伴う傾圧不安定波の構造変化

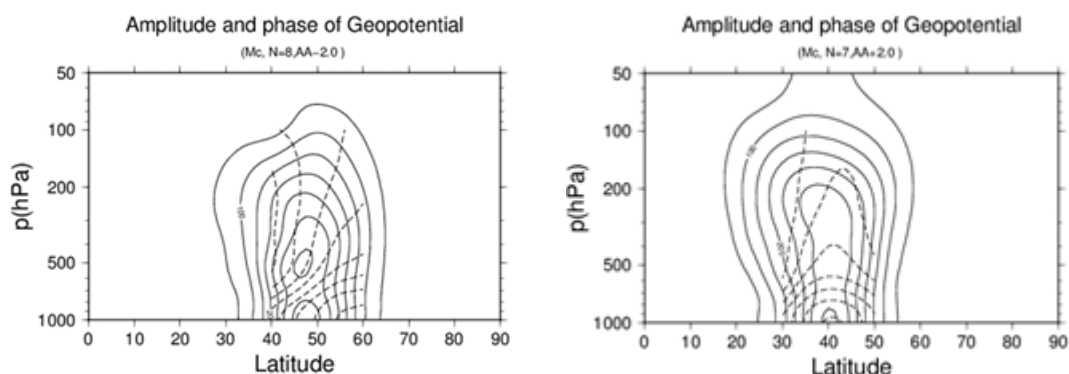


図 2 の最大不安定モードに対するジオポテンシャルの振幅（実線）と位相（破線）の鉛直子午面分布を図 3 に示した。不安定波は中緯度に大きな振幅を持ち、傾圧不安定波の特徴により位相は高さとともに西に傾く。AA が  $-1\sigma$  の時の位相は「ノの字」型となり、渦運動量輸送は北向きとなる一方で、AA が  $2\sigma$  の時の位相は「逆くの字」の構造となり、渦運動量輸送は中緯度に収束する。AA に伴い、寒帯ジェットが弱体化する時に、高緯度の渦運動量輸送は北向きから南向きに変化し、寒帯ジェットをさらに弱体化させる特徴を示した。

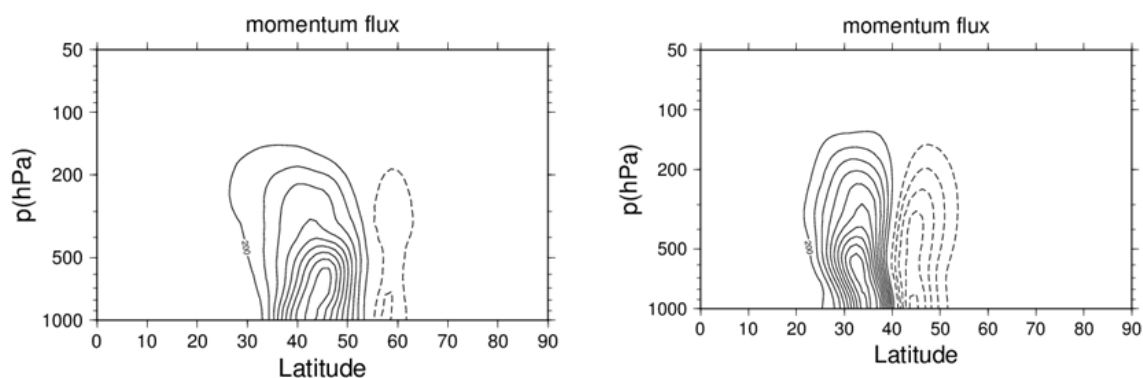
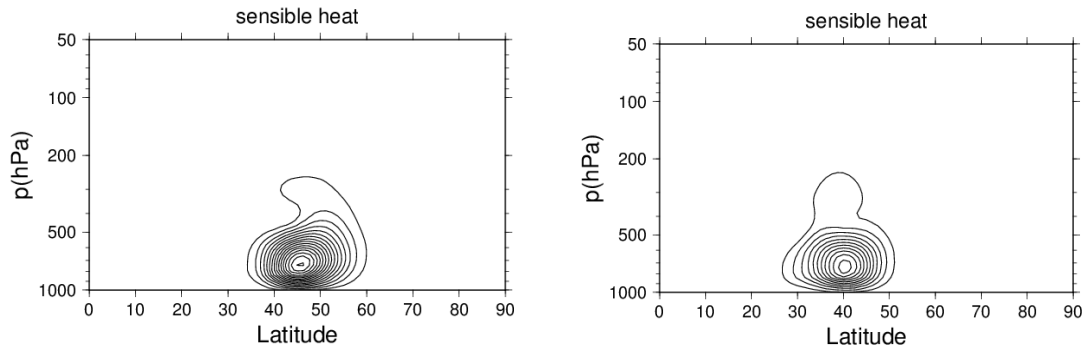


図 4 は図 3 の構造に対応する渦運動量輸送の分布である。実線は正の値、破線は負の値を示す。平面図で見た時のトラフ軸の位相が「ノの字」型時には北向き渦運動量輸送が高緯度まで拡大し、「逆くの字」型の時には渦運動量輸送は南北に逆向きとなり中緯度で収束する。つまり AA により寒帯ジェットが弱まると、高緯度の渦運動量輸送は北向きから南向きとなり、寒帯ジェットをさらに弱体化されるという正のフィードバックが働く。

図5は図3の構造に対する傾圧不安定波による顕熱輸送の分布である。AAにより、北向き顕熱輸送は弱まることが解る。



#### 4. まとめと今後の課題

近年の温暖化は北極域で顕著に現れ、特に秋季から冬季の北極域の気温上昇率は全球平均と比較して約2倍大きくなっている。この現象は北極温暖化増幅(AA)と呼ばれている。AAの要因には、アイス・アルベドフィードバック、雲のフィードバック、中緯度から北極域への熱や水蒸気の輸送などが重要と考えられている。中緯度から北極域への熱輸送は、傾圧性擾乱が担っているが、AAに伴い傾圧性は弱くなると推測される。

本研究では、地球温暖化によりAAが進行し、中緯度の傾圧性が低下する中で、傾圧不安定波の増幅率や構造がどのように変化し、傾圧性擾乱による熱輸送や運動量輸送がどのように変化するかを理論的に調べた。

AAに伴う高温偏差は海氷とのフィードバックにより大気下層で特に顕著である。線形不安定解析によると、AAに伴い寒帯ジェットは広域で弱化し、それに伴い傾圧不安定波の増幅率は減少する。また、擾乱による高緯度の運動量輸送は北向きから南向きに変化するような構造変化を伴うことから、寒帯ジェットはさらに弱化するという正のフィードバックが見られた。このAAの増幅率の応答は、北極振動(AO)と逆である。AOは寒帯ジェットの弱化と同時に起こる亜熱帯ジェットの強化に対応して、傾圧不安定波は強化する。

したがって、人為起源の温暖化(AA)にともない傾圧不安定波の弱化が起こることと、自然変動のAO負にともない傾圧不安定波の強化が起こることが、分離可能となる。今後はこの両者の違いに注目して、温暖化における自然変動の割合を定量化するような研究が課題となる。

# 水素酸素同位体比を組み込んだ CGCM および領域モデルの開発

一柳 錦平（熊本大学大学院先端科学研究部）

田上 雅浩（東京大学大学院工学系研究科）

芳村 圭（東京大学大気海洋研究所）

## 1. 研究目的

降水の水素酸素同位体比は、降水をもたらす水蒸気の起源や輸送経路によって変化する。そのため、大気大循環モデルや領域モデルの検証に有効であり、観測値と計算値の時間的空間的な分布を比較することによって、モデルの高度化を行うことが期待できる。また、降水の安定同位体比を再現されたモデルによって、水蒸気の起源を推定することが可能であり、降水や水蒸気の安定同位体比の変動要因の解明に有効である。

熱帯域では中緯度と異なり、同位体の緯度効果や気温効果が認められず、主に降水量効果が卓越すると考えられる。そこで、インドネシア気象庁により観測された降水の水素酸素同位体比のデータを収集し、同位体循環モデルにより降水の安定同位体比を再現し、その変動要因および水蒸気の起源を推定する。今年度は、降水量に影響を与えるマッデン・ジュリアン振動（MJO）を対象とし、MJO が降水同位体比に与える影響を明らかにすることを目的とする。熱帯域で卓越する MJO などの気象現象が降水同位体に与える影響を明らかにすることは、酸素安定同位体比による古気候の復元にも利用が期待できる。

## 2. 研究内容

インドネシア海洋大陸において、降水の安定同位体比の変動を明らかにするため、海洋研究開発気候によって降サンプリングが行われたデータを利用した。サンプリング地点は、インドネシア東西に渡っており、スマトラ島の Bukit Tinggi と Jambi, バリ島の Denpasar, スラヴェシ島の Makasar と Manado, パラオ諸島の Peleliu の 6 地点で、2001 年から 2006 年まで日単位で行われた。また、降水と水蒸気同位体比の計算と水蒸気



の起源解析には、同位体循環モデル (Yoshimura et al., 2003) と色水解析 (Yoshimura et al., 2004) を用いた. 図 1 に, 降水の安定同位体比の観測地点と, 色水解析で用いた水蒸気の起源区分を示す.

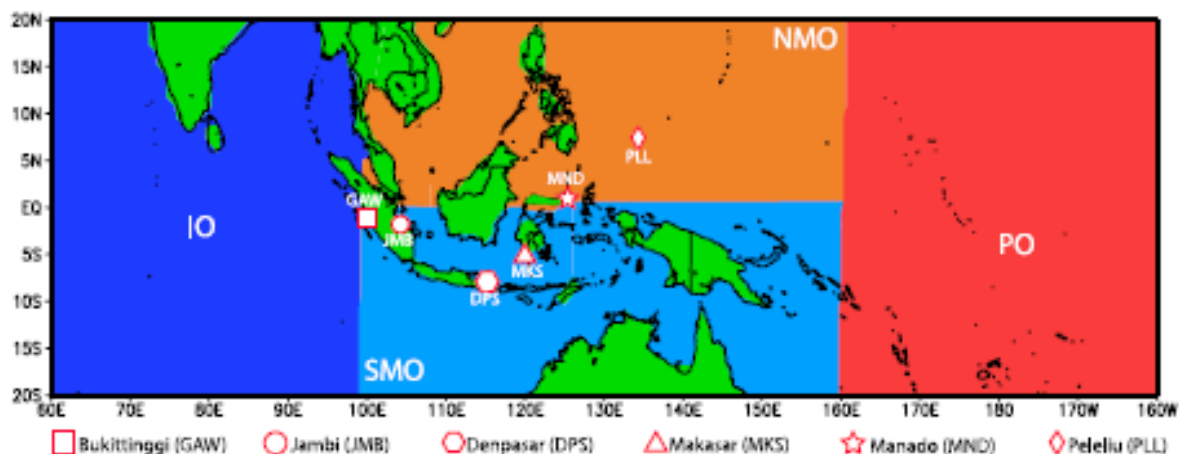


図 1 : 降水の安定同位体比の観測地点 (Bukit Tinggi, Jambi, Denpasar, Makasar, Manado, Peleliu). 背景の色の違いは, 色水解析に用いた水蒸気の起源地域 (どの海域から蒸発した水蒸気か) を示す.

Wheeler and Hendon (2004) による MJO 指標によって, MJO を Phase1-8 に区分し, その期間内にサンプリングされた降水の安定同位体比を, 観測地点ごとに平均した. 同様に, 降水の酸素安定同位体比のモデル計算値と, その水蒸気の起源についても解析を行った. その結果, MJO 活発期 (Phase3-4) には降水量が多くなり, 同位体比が低下する傾向が, スマトラ島の 2 地点 (Bukit Tinggi, Jambi) で示された. また, 水蒸気の起源解析の結果より, スマトラ島の 2 地点ではインド洋起源の水蒸気 (図 2 の青色) が卓越しているが, それより東の 2 地点 (スラヴェシ島の Makasar, バリ島の Denpasar) ではインド洋起源は非常に少なく, ほとんどは海大陸南部の海洋起源 (水色) である. さらに東の 2 地点 (スラヴェシ島の Manado, パラオ諸島の Peleliu) でも, インド洋起源は非常に少なく, ほとんどは海大陸北部 (オレンジ色) や太平洋起源 (赤色) であることが, 色水解析より推定された.

以上をまとめた結果として, MJO がインド洋から海大陸域を通過して太

平洋に至るまでの水蒸気の起源と、降水の酸素安定同位体比の変遷について、MJO を Phase1,2, Phase3-5, Phase6-8 に分けた概念図を、図 2 に示す。インド洋で蒸発した水蒸気が MJO によって東進する際、レインアウト効果により同位体比が低くなる。その水蒸気はインドネシア西部のスマトラ島までは到達し、降水の酸素安定同位体比を低くする重要な役割を果たしているが、それより東部では海大陸近海から蒸発した同位体比の高い水蒸気が多くを占めるため、MJO 通過時にも同位体比は低くならないことを示している。

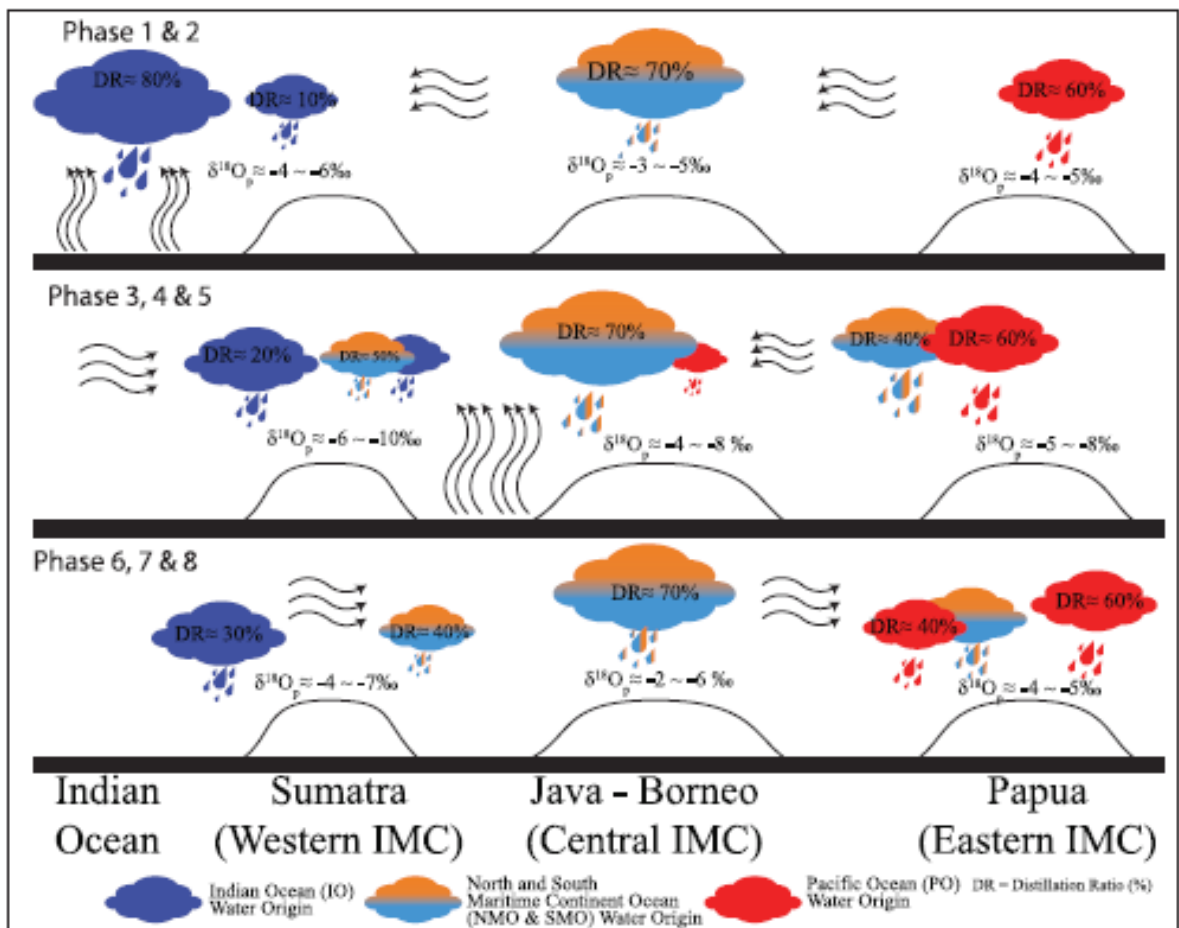


図 2: MJO がインド洋から海大陸域を通過して太平洋に至るまで、水蒸気の起源と、降水の酸素安定同位体比の変遷についての概念図。上段より MJO の Phase1,2, Phase3-5, Phase6-8 に分けて示してある。色の違いは、図 1 の起源地域に対応している。

### 3. 研究成果

- H. A. Belgaman, K. Ichiyanagi, M. Tanoue, R. Suwarman, K. Yoshimura, S. Mori, N. Kurita, M.D. Yamanaka, F. Syamsudin (2016): Intraseasonal Variability of  $\delta^{18}\text{O}$  of Precipitation over the Indonesian Maritime Continent Related to the Madden-Julian Oscillation. SOLA, Vol. 12, 192-197. DOI: 10.2151/sola.2016-039. (査読付き国際誌)
- Halda A. Belgaman, Kimpei Ichiyanagi, Rusmawan Suwarman, Masahiro Tanoue, Edvin Aldrian, Sheila D.A. Kusumaningtyas, and Arika I.D. Utami, Characteristic of Precipitation Isotope Pattern in Indonesia. Full paper, s06-05, 6p. The 7th International Conference on Water Resources and Environment Research (ICWRER2016), Kyoto TERRSA, Kyoto, Japan. 2016年6月5-9日. (査読なし国際会議プロシーディング)
- Halda A. Belgaman, Kimpei Ichiyanagi, Rusmawan Suwarman, Masahiro Tanoue, Edvin Aldrian, Sheila D.A. Kusumaningtyas, and Arika I.D. Utami, Temporal and Spatial Pattern of Precipitation Isotope in Indonesia. The International Science Conference on MAHASRI (Monsoon Asian Hydro-Atmosphere Scientific Research and Prediction Initiative), Poster Presentation No.121, Abstract, 80. Tokyo Metropolitan University, Japan. 2016年3月2-4日. (査読なし国際会議ポスター)

### 4. 今後の問題点

今年度は **MJO** に焦点を当てて、降水の安定同位体比に与える影響を、観測とモデルより評価した。今後は **MJO** だけでなく、モンスーンやエルニーニョ南方振動、日変化など様々なスケールでの気象現象についても、降水の安定同位体比に与える影響を解明する必要がある。そのために、インドネシア気象庁と協力して、海大陸全域における降水のサンプリングを実施しており、降水の安定同位体比の時間空間変動を明らかにする予定である。

## 1. 特定共同研究課題名

高分解能大気モデル及び領域型気候モデルの開発

## 2. 分担課題名

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

## 3. 共同研究者名

中川雅之 徳廣貴之 坂本雅巳 佐藤均 長澤亮二 荒波恒平 下河邊明 木南哲平 齊藤慧 (気象庁予報部数値予報課)

## 4. 研究目的

アジアモンスーンの予測精度を高めるため、高精度の物理過程を開発する。

## 5. 研究内容

高分解能大気モデルに適した物理過程の改善を行うための研究を行う。またデータ同化手法として LETKF の研究を行う。

## 6. 研究成果

今年度は高分解能 (TL959) 全球モデルにおいて、雲放射スキームや積雲対流スキームなどの物理過程の開発を重点的に行ったので、これらについて報告する。

### 6.1 水雲粒有効半径診断方法の変更と積雲上昇流域における放射雲診断スキームの調整

気象庁全球モデルは、衛星観測と比較すると、短波放射について陸上の光学的厚みが過小評価で熱帯海洋上の光学的厚みが過大評価であること、大気上端上向き長波放射フラックス (OLR) が過大であることが指摘されている。それらの誤差を小さくするため特に雲放射過程の改良を継続的に行っている。

水雲粒有効半径の値は、特に短波放射における水雲の光学的厚さに大きなインパクトを持つ。気象庁全球モデルでは水雲粒有効半径の値として Kawamoto et al. (2001) の値を採用している。Kawamoto et al. (2001) では衛星観測から retrieve して水雲粒有効半径を求めており、近年、その値は航空機で直接観測した値に比べて retrieve の不確実性から過大評価されていることが指摘されている。そこで、航空機観測に基づいた Martin et al. (1994) の手法を簡略化した手法で、雲水量 (予報値) と水雲粒数濃度 (固定値) から水雲粒有効半径を診断することとした (以下、水雲粒有効半径診断方法変更)。その結果、放射計算に利用される水雲粒有効半径の値が小さくなり、特に短波放射に対して光学的厚みが増した (H26 年度共同研究報告書に記載)。

従来の気象庁全球モデルでは、積雲上昇流域における雲量や雲水量の効果を、雲スキームの揺らぎ幅を調整することで表現していた。しかし、この手法は弊害も大きいことがわかったため、2016 年 3 月に廃止された。ゆらぎ幅の調整をやめた場合、雲量や雲水量が対流活

動が盛んな熱帯を中心に減少し雲の光学的厚みが過小評価されてしまう。そこでゆらぎ幅調整の代替手段として、積雲上昇流域における雲量や雲水量を積雲上昇マスフラックスから診断し放射計算で用いる雲量や雲水量に考慮する手法（以下、幹スキーム）が開発された（H27年度共同研究報告書に記載）。

水雲粒有効半径診断方法変更、幹スキームともに、雲の光学的厚みを増す向きの改良である。両者を同時に適用すると、短波放射について陸上での光学的厚みの過小評価が緩和される一方、熱帯海洋上での雲の光学的厚みの過大評価がさらに大きくなることがわかった。

水雲粒有効半径診断方法変更の物理的根拠が確かである一方、幹スキームで利用している積雲上昇マスフラックスの定義は開発時に参考にした各機関の全球モデルごとに異なるため、その経験的パラメータの値を調整して気象庁全球モデルに適合した値に変更する必要がある。そこで、気象庁全球モデルにまず水雲粒有効半径診断方法変更を適用した上で、続いて幹スキームを適用し、その経験的パラメータの調整を行うこととした。経験的パラメータの調整は、短波放射フラックスの誤差が衛星観測と比較して小さくなるように行った。

この調整により、短波放射について陸上での光学的厚みの過小評価と海上での光学的厚みの過大評価が双方とも緩和され短波放射フラックスが衛星観測の値に近づいた（図1）。また、幹スキームの適用により雲が増えたため、OLRの過大評価が緩和され衛星観測の値に近づいた（図略）。今後も雲放射過程の開発を雲・積雲過程の開発と調整しながら行い、放射フラックスの誤差をより一層小さくしていく必要がある。

## 6.2 積雲対流スキームの開発

気象庁全球モデルにおける積雲対流スキームの高度化を目指し、また、熱帯循環場を通じた全球的な予測精度の向上を目指して、積雲対流スキームにおける降水の再蒸発過程と固体降水の融解過程の精緻化を行った。また、積雲対流スキーム内の降水フラックスの取り扱い

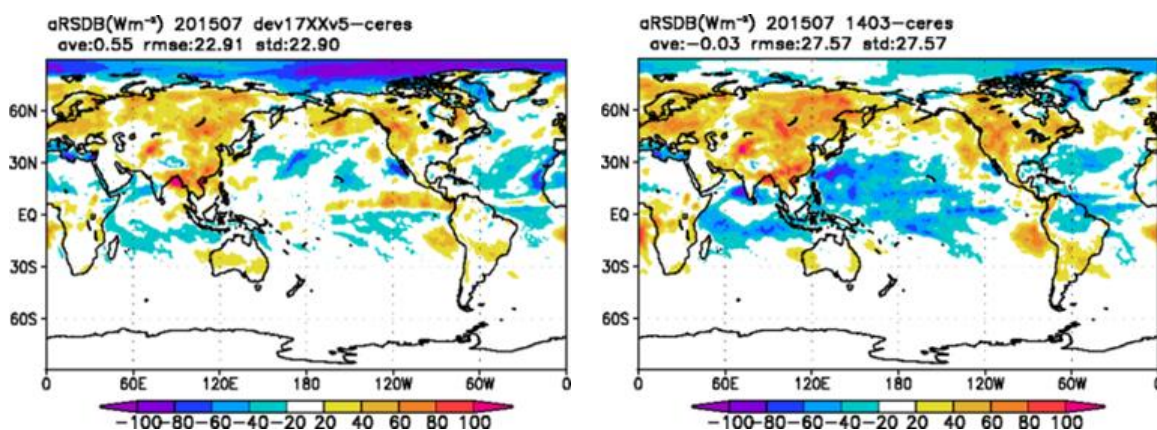


図1 2015年7月平均の地表面下向き短波放射フラックスの誤差（対CERES）。左：水雲粒有効半径診断方法変更及び幹スキームの調整の後、右：前。

における不整合、雲スキーム内の雲水から降水への変換過程における不整合を修正した。

まず降水の再蒸発過程と固体降水の融解過程の精緻化では、積雲対流スキームではこれまで降水（液体及び固体）の再蒸発過程と固体降水の融解過程に簡便な手法を用いていたが、雲スキームに導入されている、もしくは導入が予定されているものと同等の高度な手法を導入した。これまでは、降水の再蒸発による比湿の時間変化として

$$\frac{\partial q}{\partial t} = \gamma (q_s(T) - q) P$$

に従うと仮定していた。ここで、 $q$  は比湿 [kg/kg]、 $t$  は時間 [s]、 $\gamma$  は定数 ( $=3 \times 10^{-2}$ )、 $q_s$  は飽和比湿 [kg/kg]、 $T$  は気温 [K]、 $P$  は降水フラックス [kg/m<sup>2</sup>/s] である。一方で、雲スキームでは Kessler (1969) に基づく手法を採用している (JMA 2013)。両者の違いは、定数の値が異なること、降水フラックスに対するベキの値が異なること、そして、Kessler の手法では降水の落下速度の効果を考慮していることである。さらに、積雲が占める面積は気象庁全球モデルの格子スケールと比較して小さいと考えられることから、降水が落下する領域の面積も格子スケールより小さくなる。このため、上式において格子平均値の飽和比湿と比湿を用いたのでは、比湿の変化を過大に見積もってしまう。そこで、この効果のある程度考慮するために、Kessler の手法で求められた比湿変化に以下の式による簡便な補正を加えたものを、比湿の時間変化とした。

$$\frac{\partial q}{\partial t} \Big|_{\text{new}} = f(\text{RH}) \times \frac{\partial q}{\partial t}$$

$$f(\text{RH}) = \begin{cases} 1 & (\text{RH} < \text{RH}_{\text{crit}}) \\ \frac{\text{RH}_{\text{cmax}} - \text{RH}}{\text{RH}_{\text{cmax}} - \text{RH}_{\text{crit}}} & (\text{RH}_{\text{crit}} \leq \text{RH} < \text{RH}_{\text{cmax}}) \\ 0 & (\text{RH} \geq \text{RH}_{\text{cmax}}) \end{cases}$$

ここで、RH は相対湿度 [%]、RH<sub>crit</sub>、RH<sub>cmax</sub> は臨界相対湿度 [%] であり、それぞれ 80%、90% を採用した。また、これまでは、固体降水の融解として、気温が 0°C を越えた層から下に 300 hPa の幅 (ただし 0°C 層と地表面の気圧差が 300 hPa 未満の場合は、地表面までの幅) を持った融解層を仮定し、融解層中で全ての固体降水が、気圧あたりの融解熱が一定になるように融解するとして、気温や比湿の時間変化を計算していた。この手法には、300 hPa という厚さの融解層は観測的に知られている融解層の厚さと比較して非常に厚いこと、中高緯度では 0°C 層から地表面まで 300 hPa の幅を確保できずに非常に大きな気温・比湿の変化が起きて計算安定性に問題が生じること、地表面気温が 0°C 以上の場合は積雲による降雪 (固体降水の地上への落下) が存在しないこと、といった課題があった。そこで、ECMWF (2015) で採用されている、比湿の変化が気温と融解温度 (0°C) の差に比例する緩和型の方程式を採用した。この結果、計算安定性を確保しつつ、これまでは 300 hPa の幅を持った弱い冷却



しか表現できなかったものが、比較的現実的な強い冷却を表現できるようになった。熱帯における融解層付近で適切な冷却を表現できるようになった結果、そこを雲頂とする積雲 (cumulus congestus) が増え、Johnson et al. (1999) で知られているような積雲の三層構造をよりはっきりと表現できるようになった (図 2)。

次に、積雲対流スキーム内の降水フラックスの取り扱いに不適切な点があったため、その修正を行った。積雲対流スキームでは、上昇流から放出された降水は、雲底より上で対流性下降流 (ダウンドラフト) を飽和させるように再蒸発し、雲底より下では環境場に対して蒸発する。降水の再蒸発により積雲中の降水フラックスは減少するが、ダウンドラフト中の取り扱いに問題があり、降水フラックスを過大評価していることが分かった。この過大に評価された降水フラックスが雲底以下での環境場に対する再蒸発の計算に用いられる結果、降水の再蒸発による冷却を過大評価していた。本不整合を修正したところ、気象庁全球モデルが抱えるモデルバイアスの一つである熱帯下層の低温バイアスを低減できることが分かった。

雲スキームにおける雲水から降水への変換過程 (auto-conversion) では、雲中において上からの降水がある場合に雲水から降水への変換が促進される効果 (coalescence 効果) を考慮している。これまでは、上からの降水として、積雲対流スキームによって計算された降水と雲スキームによって計算された降水を合計したものを使用していた。しかし、気象庁全球モデルの他の部分では積雲と雲スキームの雲の重なる効果を考慮していないため、積雲による降水を雲スキームにおいて使用することはモデル内で整合していない。そこで coalescence 効果での上からの降水に積雲対流スキームで計算された降水を加える処理を廃止することとした。これによる全球的な循環場の変化はほとんどなかったが、これまでは雲

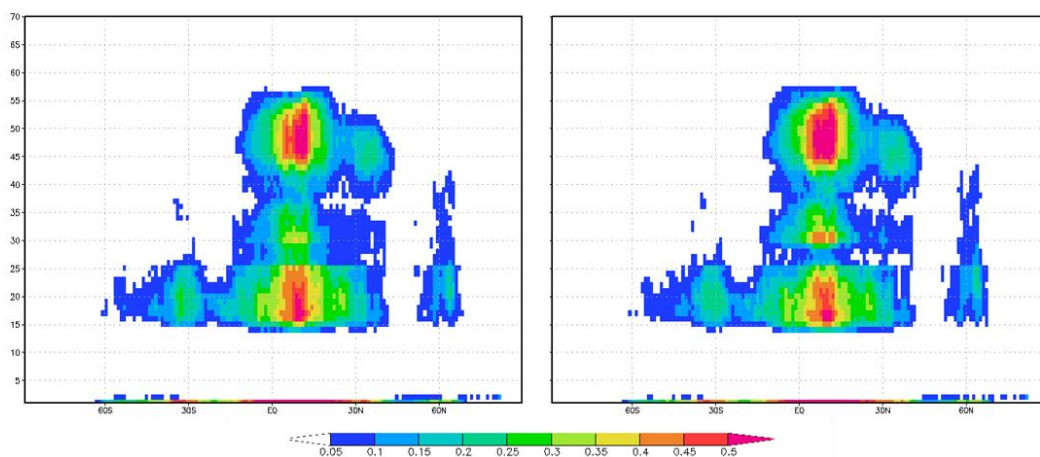


図 2 ある初期時刻の予報時間 24 時間における帯状平均した積雲の雲頂の出現頻度。横軸は緯度で、縦軸はモデル層番号である。左図は再蒸発・融解過程の改良を加える前のものであり、右図は改良を加えたものである。色が雲頂の出現頻度を示している。改良後では、熱帯中層において出現頻度が増加している。なお、解析予報サイクル実験における結果であり、両者の初期値は一致していない。

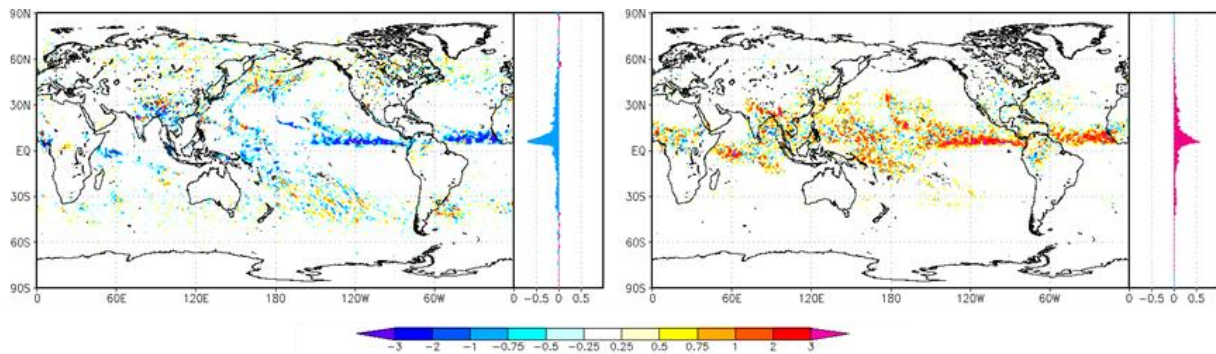


図3 Coalescence 効果での上からの降水に積雲対流スキームで計算された降水を加える処理を廃止する前後の降水の変化。廃止後から廃止前の降水を減算したもの。左図は雲スキームによる降水の変化で、右図は積雲対流スキームによる降水の変化である。各図の右側にある小さい図は、帯状平均値を示している。熱帯収束帯を中心に、雲スキームによる降水が減り、積雲対流スキームによる降水が増えているが、総量としてはほとんど変わっていない。

スキームによる寄与が小さくなかった熱帯収束帯における降水が、雲スキームによる寄与が減り、積雲対流スキームによる寄与が増えるという変化を示すことがわかった(図3)。ただし、両者を合計した降水の総量としてはほとんど変化がなかった。

## 7. 今後の課題

第6.1、6.2節で示した研究成果は、放射過程や陸面過程などの他の改良と結合して実験を行っている。引き続き気象庁現業全球モデルへの導入を目指し、実験と評価を進める。

## 参考文献

ECMWF, 2015: IFS Documentation – Cy41r1, Part IV Physical Processes, Chapter 6 Convection.

Johnson, R., T. Rickenbach, S. Rutledge, P. Ciesielski, and W. Schubert, 1999: Trimodal Characteristics of Tropical Convection. *J. Climate*, **12**, 2397–2418.

Kawamoto, K., T. Nakajima, and T. Y. Nakajima, 2001: A global determination of cloud microphysics with AVHRR remote sensing. *J. Climate*, **14**, 2054–2068.

Kessler, E., 1969: On the distribution and continuity of water substance in atmospheric circulation. *Meteorological Monographs*, **10**, American Meteorological Society, Boston, MA.

JMA, 2013: Outline of the operational numerical weather prediction at the Japan Meteorological Agency, available at <http://www.jma.go.jp/jma/jma-eng/jma-center/nwp/outline2013-nwp/index.htm>

Martin, G. M., D. W. Johnson, and A. Spice, 1994: The Measurement and



Parameterization of Effective Radius of Droplets in Warm Stratocumulus Clouds. *J. Atmos. Sci.*, **51**, 1823–1842.

米原, 2016: 全球数値予報システムの物理過程改良の概要. 平成 28 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 1–3.

## 特定共同研究課題

### 「衛星データと数値モデルの複合利用による温室効果気体の解析」

#### 分担課題

#### 「4次元変分法を用いた逆解析システムの開発」

丹羽洋介

気象庁 気象研究所 海洋・地球化学研究部第四研究室

### 研究目的

二酸化炭素 ( $\text{CO}_2$ ) やメタン ( $\text{CH}_4$ ) は、主要な温室効果ガスであるにもかかわらず、地球表面における放出・吸収のメカニズムの理解が未だ不十分であり、地表面フラックスの定量的な評価には大きな不確定性が存在する。しかし近年、地上における高時間分解能観測や航空機・衛星による大気濃度の高密度観測が充実しつつあり、これらの観測データを効率的に利用することで、温室効果ガスの地表面フラックスの不確定性を低減することが出来ると期待される。そこで本研究では、観測データの情報を従来よりも効率的に抽出することが可能な4次元変分法 (4D-Var) を用いたインバージョン解析システム (NICAM-TM 4D-Var) を開発し、またモデルの高解像度化など、システムの高度化を行うことを目的とする。

### 研究内容

本研究で開発した4次元変分法システム (図1) では、最適値探索において準ニュートン法を応用した POpULar を使い、大気輸送計算には20面体格子モデル NICAM (Sato et al., 2014) をベースとした大気輸送モデル NICAM-TM (Niwa et al., 2011) を用いた。4次元変分法は最適な解を求めるために反復計算を要するため、大気輸送のモデル計算を出来るだけ軽くする必要がある。また、地表面フラックスから大気濃度を計算するフォワード計算だけでなく、大気濃度から地表面フラックスへ現実とは逆の時間方向に計算を行うアジョイントモデルも必要である。そのため本研究では、気温や鉛直拡散などの気象場を外部データとし、トレーサー輸送のみを計

算するオフラインモデルとそのアジョイントモデルを開発した。また、開発したシステムの検証のため、CO<sub>2</sub> フラックスのインバージョン解析について、疑似観測データを使った双子実験を行った。

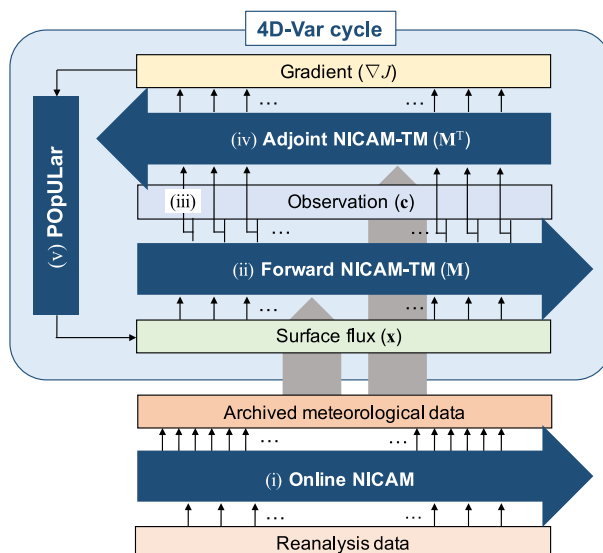


図 1 : NICAM-TM 4D-Var の概念図

さらに今後のモデル高解像度化を目指して、再解析データを NICAM に馴染ませる（同化する）ために（図 1 の(i)に相当）、IAU 法（Bloom et al., 1996）を新たに導入した。IAU 法は従来のナッジング法に比べ、線形なシステムに対してはフィルター特性に優れており、より高精度の高解像度計算を行うことが出来ると期待される。

## 研究成果

開発したオフラインのフォワードモデルおよびアジョイントモデルは、十分な精度を有していることを確認した。また、フォワード、アジョイントモデル共に 1 年積分で約 7 分（glevel-5, 10MPI-4SMP のハイブリッド並列の場合）と、数十回に及ぶ 4 次元変分法の反復計算にも十分対応出来る計算効率であることがわかった（Niwa et al., 2017）。また、インバージョン解析の双子実験では、初期誤差共分散行列に対して理想的な条件ではあるものの、地上観測データから CO<sub>2</sub> フラックスの分布や季節変動パターンを再現することに成功し、4 次元変分法システムにより、適切にフラック

スの最適化を行えることが分かった (Niwa et al., 2016, in review)。

また、NICAM-TM を使った高解像度実験 (ストレッチグリッドを使い、東アジアに格子点を集中させた。最小格子間隔は 15km 程度) について、ラドンをトレーサーとして、ナッジングと IAU の比較を行った。その結果、IAU を使っても、ナッジングを使った場合とほぼ同様の計算結果が得られた (図 2)。しかし詳細に見ると、図 3 で示すように、細かな濃度変動が IAU では再現されていることも見て取れた (IAU では 2 つの濃度ピークが観測地点に到達しており、僅かではあるが、図 2 に示す観測値とより整合的である)。

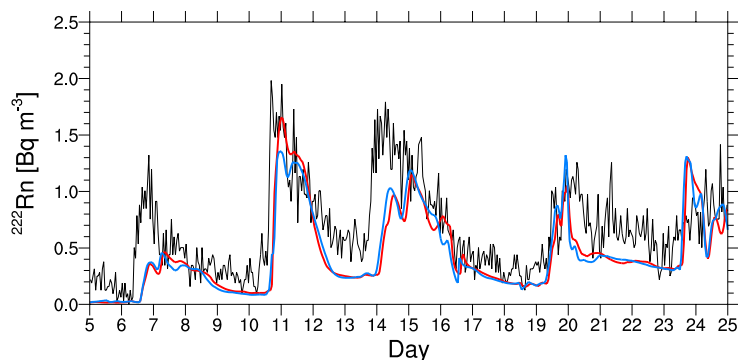


図 2: 南鳥島におけるラドンの時系列 (2014 年 1 月 5 日から 1 月 24 日まで)。黒が観測値。赤、青がそれぞれナッジング、IAU 法を使った NICAM-TM の計算値。

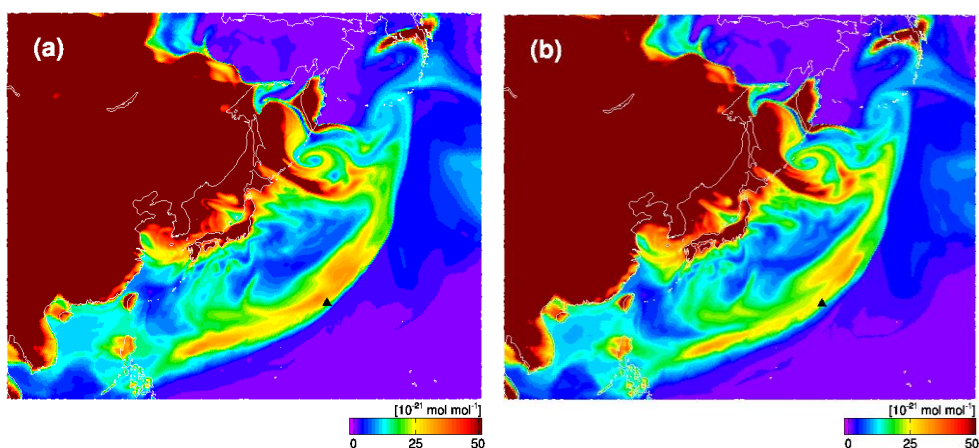


図 3 : NICAM-TM で計算された 2014 年 1 月 10 日におけるラドン濃度の地表面分布。(a)はナッジング、(b)は IAU を用いた場合。▲は南鳥島の位置を示す。

## 今後の問題点

IAU はナッジングと比べて計算時間が 1.5 倍と大きいため、図 2,3 で示した程度の差であれば、ナッジングの方が実用に際しては適しているといえる。今後、より高解像度の実験や IAU のアルゴリズム改良を通して、再現性向上の可能性を探っていく。

## 略語一覧

4D-Var : four-dimensional variational method

IAU : Incremental Analysis Update

NICAM : Nonhydrostatic ICosahedral Atmospheric Model

NICAM-TM : NICAM-based Transport Model

POpULar : Preconditioned Optimizing Utility for Large-dimensional analyses

## 参考文献

Bloom, S. C., et al. (1996): Data assimilation using Incremental Analysis Updates, *Mon. Wea. Rev.*, 124, 1256-1271.

Niwa, Y., et al. (2011): A Three-Dimensional Icosahedral Grid Advection Scheme Preserving Monotonicity and Consistency with Continuity for Atmospheric Tracer Transport, *J. Meteorol. Soc. Jpn.*, 89, 255-268.

Niwa, Y., et al. (2016): A 4D-Var inversion system based on the icosahedral grid model (NICAM-TM 4D-Var v1.0): 2. Optimization scheme and identical twin experiment of atmospheric CO<sub>2</sub> inversion, *Geosci. Model Dev. Discuss.*, in review.

Niwa, Y., et al. (2017): A 4D-Var inversion system based on the icosahedral grid model (NICAM-TM 4D-Var v1.0) – Part 1: Offline forward and adjoint transport models, *Geosci. Model Dev.*, 10, 1157-1174.

Satoh, M., et al. (2014): The Non-hydrostatic Icosahedral Atmospheric Model: description and development, *Progress in Earth and Planetary Science*, 1, 1-32.

## 特定共同研究課題名

世界海洋大循環モデルのパフォーマンスの相互比較

## 分担課題名

AORI / 気象研の世界海洋大循環モデルのパフォーマンスの相互比較

## 共同研究者名

中野英之・辻野博之・坂本圭・浦川昇吾（気象研究所海洋・地球化学研究部）  
羽角博康（東京大学大気海洋研究所）

## 研究目的

本研究は、東京大学大気海洋研究所、気象研究所で、それぞれ独自に開発された海洋大循環モデル（OGCM）の定常状態における水塊・海流・熱輸送等の相互比較を通じて、気候形成および気候変動のメカニズムにおける海洋の役割を調べると共に、それぞれのモデルの改良に役立てることを目的とする。

## 研究内容

気象研の海洋大循環モデル(MRI.COM)および大気海洋研の海洋大循環モデル(COCO)は、鉛直座標として深度座標を採用している。一方、海洋の水塊は密度面に沿って動くため、水塊の解析やモデルのパフォーマンスを調べるには密度面座標における変換が必須である。気象研および大気海洋研における従来の方法では、海洋大循環モデルを用いた海洋のシミュレーションを基本となる状態変数を数日間の平均値として出力しつつ高速なスパコンの超並列計算で行った後に、別の解析プログラムを用いて低速なワークステーションにてシングルCPU上にて等密度面座標変換を含む後処理を行ってきた。

しかしながら、近年の高解像度シミュレーションで出力される膨大な量の出力を非力なワークステーション上で処理するには、メモリ、計算速度、中間ファイルの保存量域の確保のいずれの面からも困難が生じるようになってきている。

この問題に対処する手段の一つとして、海洋モデル本体に解析プログラムを埋め込むという方法がある。この方法には、今までの解析プログラムを超並列に対応させる方法に比べていくつかの利点が存在する。

1. 面倒な並列化の処理や、差分化における格子情報の取得は、海洋モデルにすでに組み込まれているルーチンをそのまま使えるため、プログラムを書

くことが容易であること。

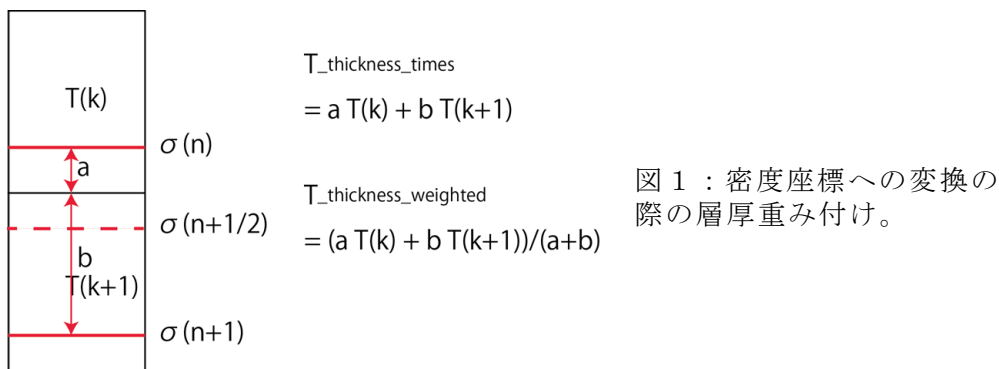
2. ステップごとの処理も可能であるため、平均化に伴う誤差が減少すること。
3. 実験実行中に基本的な解析を同時に進めることができるため、実験のやりなおしを含めた評価を迅速に行うことができる。
4. 保守されている海洋モデルに組み込まれていることにより、多くの目にさらされ、プログラムの洗練化、バグの発見などが進むことが期待されること。

一方、以下のような欠点も存在する。

1. オンラインで解析をすすめると計算コストが増大する。
2. 計算をする前にあらかじめ解析項目を設定する必要がある。
3. 深さを求める際の補間方法は計算負荷の観点から Akima 法のような高次のものではなく、線形補間のような計算負荷の軽い手法を用いる必要がある。

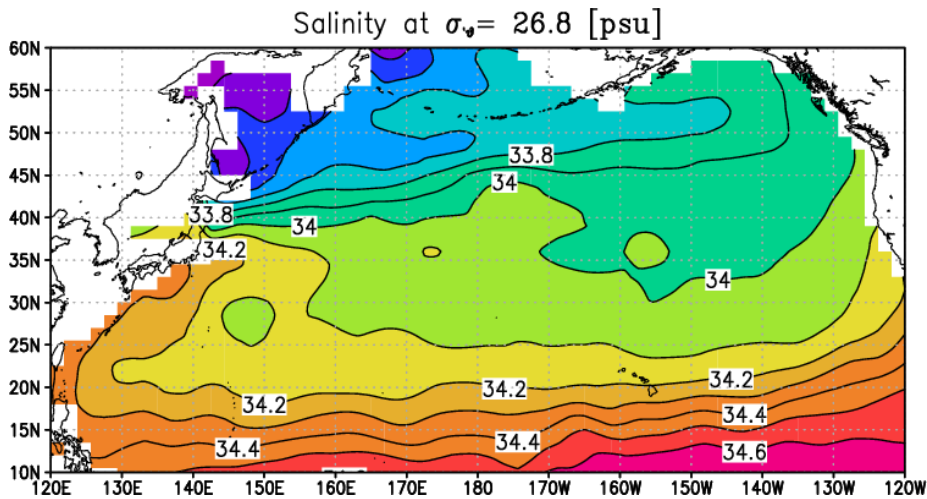
以上の利点、欠点を、実際に MRI.COM に等密度面等の解析を処理するサブルーチンを埋め込み、実際の全球海洋モデルを用いて評価することとした。現状で評価可能な項目は、

1. 等密度面変換に関する項目
2. 渦度のバランスの評価
3. ポテンシャル渦度に関する項目



である。密度変換は、図 1 のような層厚み付けによって行った。層厚み付けは、点での補間に比べて多少なまった構造となるが、層厚をかければ全体の質量が保存する、渦輸送の理論などと整合するなどの好ましい性質がある。

(a)



(b)

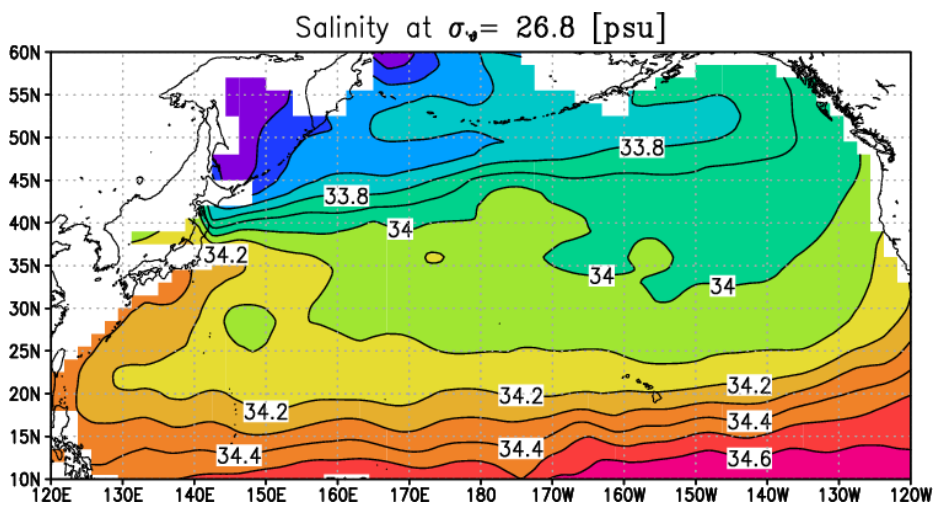


図 1:  $\sigma=26.8$  面における塩分分布。(a) モデル中で層厚平均に求めたもの。

(b) オフラインで Akima 法に依る補間によって求めたもの。

層の深さを求める際は、モデルの計算負荷の観点から線形補間を用いているが、Akima 法による補間の場合とほぼ同等の結果を得ている。

欠点 1 を評価するため、全体の計算における解析の占める割合を求めたところ



ろ、計算項目にもよるが、おおよそ 2 割程度であった。また、これはあまり並列数に依存しなかった。密度面に関する変換では、一番計算負荷が大きいのは、各密度面の深さを算出するところで、一旦密度面を計算してしまえば、トレーサー等はその密度座標に変換するコストは小さかった。

2 の欠点に関しては、MRI.COM は出力された結果を用いて処理をするオフライン計算にも対応しているため、実験終了後に追加の解析項目を処理することは容易である。

### 今後の問題点

今後は渦運動フラックスなどの解析結果も容易に出力できるようにする必要がある。また、出力方法に全球積算が必要であるが要請の高い子午面流線関数などの出力も今検討を行う必要がある。

## 特定研究課題名

気候モデル及び観測データを用いた気候変動とその予測可能性の研究

## 分担課題名

気候予測のためのモデル初期値化の研究

## 共同研究者名

石井 正好, 新藤 永樹, 吉田 康平, 小山 博司 (気象研究所 気候研究部)

木本 昌秀, 渡部 雅浩 (東京大学 大気海洋研究所)

## 研究目的

気候モデルの各種物理スキームを高度化するとともにアンサンブルに基づく高度な初期値化手法を開発し、気候変動予測実験を行い、季節から十年規模の時間スケールで卓越する自然変動現象の予測可能性を調査する。こうした実験結果から気候再現バイアスを低減するための知見を得て、気候モデル高度化や初期値化システムのさらなる高度化を目指す。さらに、観測とモデルに含まれる不確定要因が気候再現・予測結果にもたらす不確実性を評価し、その低減を目指した研究を実施する。

## 研究内容

前年度までに開発した初期値化手法を活用し、各種観測データを取りこんだ結合モデルによる長期的なデータ同化実験を行い手法の高度化を進める。また、季節から十年スケールの気候変動を対象としたシームレスな予測実験を実施し、気候モデルの高度化を行う。さらに、これらのツールを活用した予測の不確実性を定量化するシステム開発やこれに必要な科学的アプローチについての検討を進め、観測データや気候モデルの不確実性を考慮した気候予測の不確実性についての理解を深めるための考察を行う。

## 研究成果

アンサンブルカルマンフィルタによる新しい初期値化システムを昨年度までに開発している。ただ、予定していた予測による初期値化システムの評価については、進捗が芳しくないため報告は省略する。以下では、国内で1960年以前に行われた観測のデータレスキューの重要について。気候再解析実験の結果も踏まえつつ指摘する。

本研究で取り組む長期的気候再解析、いわゆる150年気候再解析では、アンサンブルカルマンフィルタ(EnKF)に基づくデータ同化を行うが、使用する大気観測データは、専ら、長期的に観測数が充実している地表面観測データのみである。データ同化を実現する手法は Hunt et al. (2007) のアンサンブルカルマンフィルタ(EnKF)に基づく。150年気候再解析は温暖化予測計算に使用される気候モデルを使用するが、大気、海洋の全ての独立変数に対して歴史的な観測データによ

り最適化を行う。大気・海洋間の結合過程まで含めて最適化を行うことはせず、それぞれのモデルコンポーネントで、それぞれに対応する実観測データを用いてデータ同化する。大気の同化間隔は 6 時間、海洋は 5 日間とする。使用する観測データは、米国海洋大気庁編集の国際地上気圧データバンク(International Surface Pressure Databank: ISPD バージョン 3.2.8; Cram et al. 2015)、台風ボーガス (IBTrACS バージョン 03r05; Knapp et al. 2010)、海面水温ならびに海水氷密度 (COBE-SST2 ; Hirahara et .al. 2014)、格子点値化した海洋表層水温・塩分観測 (Ishii and Kimoto 2009) である。海面水温データについては、COBE-SST2 に含まれる観測誤差を振幅とする摂動を海面水温と海水氷密度に与える。この摂動は時空間で連続し、COBE-SST2 で表現されない海洋の中小規模渦の成分も含んでいる。使用するモデルは、大気の解像度 300 km 程度、海洋は緯経度 1 度程度の、MIROC3 の中解像度版である。EnKF でデータ同化を行うにあたっては、35 組の気候モデルのアンサンブル計算を行う。

昨年度、上記の仕様で実施した 150 年再解析の試みを行い、信頼性の高い歴史的観測データベースがあれば、150 年の気候再解析は実現可能であることを報告した。その再解析に新しい観測データを入力して、観測データの重要性を再確認する実験を実施した。

現在、データレスキューは国際研究プログラムや世界気象機関の指導のもとで、国際的に活発に進められている。そんな中で、日本国内のデータレスキューは滞っている。文科省気候変動リスク情報創生プログラムで、国内で観測された国内 4 地点 (函館、東京、神戸、福岡) での 1960 年以前の地上気圧データが電子化されたので、150 年気候再解析で用いて、それらのデータの再解析への効果を調べた。150 年再解析で使用している ISPD には、それらのデータは含まれていない。

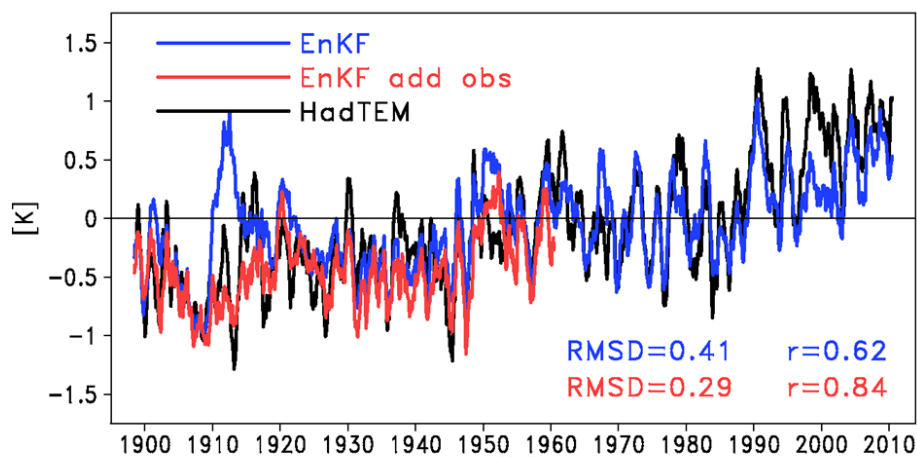
図 1 では、日本域の、陸上における年平均気温と降水量について、150 年気候解析の結果と気象庁が公開する地点データの平均値とを比較した。気温のトレンドや両者の数年から 10 年規模の時間スケールの変動の対応は良いことが分かる。電子化した 4 地点のデータを追加することで気温の再現性が向上していることが分かる。青線にみられる、1960 年以降とそれ以前の黒線との対応関係の違いは、新しい観測データを使用することで小さくなっている。残念ながら、大気モデルの解像度が粗いことや少々ラフな評価をしていることもあり、降水量については期待どおりの結果にはなっていない。

## 今後の問題点

今後、気候再解析の出力を実用に耐えうる品質まで高めていくには、より高解像度の気候モデルを用いて、より多くの品質の高い観測データを用意することが必要である。日本域では 1960 年代以前の観測データの整備が急務となっていることは、前年に指摘とおりで、状況は変わっていない。海洋のデータについては、データの発掘という意味でのデータレスキューは概ね済みであり、現在は高品質の海洋データベースを再構築する International Quality Controlled Database (IQuOD) なる国際プロジェクトが進行中である。海上気象データについては、大気の陸上データよりはデータ整備が進んでおり、良く知られた International Comprehensive Data Set (ICODS) に収録されている。国内データに関しては、戦前に日本海軍が行なった観測デー

タが未整備であり、現在、筆者らによって電子化が進められているところである。

### 日本域で平均した地上気温時系列



### 日本域で平均した年降水量時系列

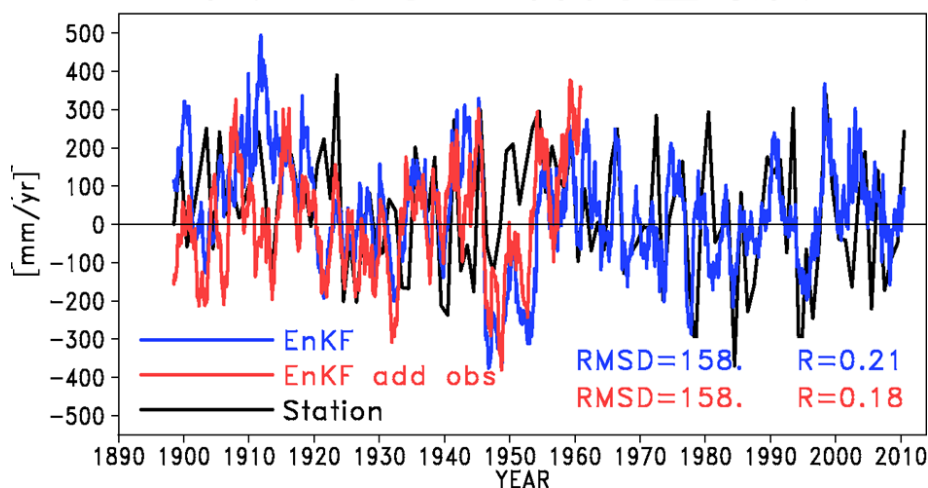


図 1: 150 年気候再解析での日本域気温(上)と降水量(下)の時系列 (青)。電子化した国内 4 地点のデータを加えて再計算したものを赤線で示す。黒は観測データ。1900 年から1960 年の期間についての、観測との根二乗平均差(RMSD)と相関係数を(R)を各パネルの右下に示す。

#### 引用文献

1. Cram, T.A., G. P. Compo, and the other coauthors, 2015: The International Surface Pressure Databank version 2. *Geoscience Data Journal*, 2, 31-46. DOI: 10.1002/gdj3.25.
2. Hirahara, S., M. Ishii, and Y. Fukuda, 2014: Centennial-scale sea surface temperature analysis and its uncertainty. *J. Climate*, 27, 57-75, doi: 10.1175/JCLI-D-12-00837.1.
3. Ishii, M. and M. Kimoto, 2009: Reevaluation of historical ocean heat content variations with time-varying XBT and MBT depth bias corrections. *J. Oceanogr.* 65, 287-299.
4. Knapp, K. R., M. C. Kruk, D. H. Levinson, H. J. Diamond, and C. J. Neumann, 2010: The International Best Track Archive for Climate Stewardship (IBTrACS): Unifying tropical cyclone best track data. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 91, 363-376.

特定共同研究課題名：全球雲解像モデルの開発及びデータ解析

分担課題名：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

共同研究者名：那須野智江・野田暁・中村晃三・原政之・山田洋平・池田美紀子（海洋研究開発機構）

### 研究目的

本課題では、全球雲解像モデルNICAMを用いた水平格子間隔数 km～十数 km の数値計算および計算結果の解析を行い、現場観測や衛星観測、客観解析データや現業予報データとの比較検証を行うことにより、モデルにおける雲降水現象のメカニズムの理解および再現性の向上に関する指針を得ることを目的とする。

### 研究内容

2015年11-12月にスマトラ南西岸において実施された”Pre-YMC”集中観測（JAMSTEC）を対象とするNICAMを用いた全球7 km格子の準リアルタイム予測計算について、観測との比較検証を行った。観測期間中に発生したマッデン・ジュリアン振動（MJO）現象や、スマトラを含む「海大陸域」の局所的な降水現象の再現性を定量的に評価し、課題の明確化および改善策の検討を行った。

### 研究成果

海大陸域では、局地循環を伴う日周期変動が活発な対流活動をもたらし、大規模場に大きな影響を及ぼす。対流を介した多重スケールの相互作用が卓越するため、海大陸域のMJO現象の予測は難しく、現業予報の大きな課題となっている。多重スケールの対流現象を統一的な枠組みで扱うことのできるNICAMはこの課題に適したモデルである。

海大陸における多重スケール現象のメカニズム理解を目的として、2017-2019年に国際集中観測プロジェクト”the Years of the Maritime Continent”（YMC）が計画されている。YMCの予備研究として、JAMSTECでは2015年11-12月にスマトラ南西岸において”Pre-YMC”集中観測を実施し、その一環として、NICAMを用いた全球7 km格子（7日積分）および14 km格子（30日積分）の予測計算を実施した（地球シミュレータを利用）。本課題では、これらの予測計算データを用いて現場観測および衛星観測データとの比較解析を行い、モデルの再現性の評価を行った。本報告では、7 km格子計算（11月1日から12月25日までの0000

UTC を初期日として 55 ケース、計算初期値は NCEP final analysis から内挿)の結果について、降水に注目した解析結果を示す。検証のための観測データとして、GSMaP (JAXA/EORC により作成・提供) を用いた。

図 1 に、観測期間後半の赤道域の降水の時間—経度断面を示す。12 月初旬までは、主な対流域はインド洋上 (60–90E) にあるが、12 月 10 日頃から海大陸域 (100–120E) に移り、ゆっくり東進している (図 1 a)。これは、MJO の活発化および伝播に対応する。MJO の発生初期 (12 月前半) には、数日周期の西進擾乱や位相速度の速い東進擾乱がインド洋から海大陸域において繰り返し発生している。これらは慣性重力波や赤道ケルビン波に対応する。また、海大陸上では 11 月から 12 月初旬にかけて降水の日周期変動が明瞭に見られ (100E, 110E)、MJO の通過前の不安定な大気状態の影響 (Fujita et al. 2011) が示唆される。図 1 b に、7 日予測計算について、異なる初期日からの計算結果を平均した時系列を示す。観測に見られる MJO の発達と東進、赤道波に伴う伝播性の降水、海大陸域における日周期変動などがよく再現されている。定量的には、観測に比べ、全般に弱い降水域が多く無降水域が少ない。この原因として、異なる初期日の計算における降水分布のばらつきの影響が挙げられるが、領域集中格子を用いた CINDY2011/DYNAMO 集中観測期間を対象とする予測計算では、降水強度の過小傾向は見られなかったことから (Nasuno et al. 2017)、他の要因も考えられる (後述)。また、計算では日周期変動が広範囲に見られる。これは、全ての計算においてそれぞれの初期日の同時刻を初期条件として用いていることが主な原因と推察される。

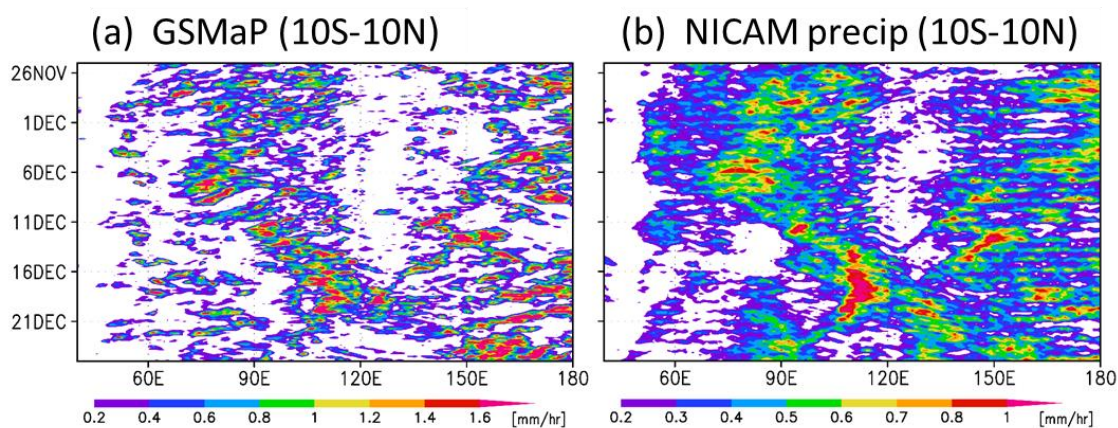


図 1 Pre-YMC 期間の降水 (10S-10N 平均) の経度—時間図。(a)衛星観測 (GSMaP) (b)NICAM (7 km格子) 予測計算 (7つの異なる初期日計算のコンポジット)。

図2にインド洋域、海大陸域、暖水域全体における平均降水量の観測値との比較を予測時間(lead time)別に示す(全ての初期日からの計算結果の統計量)。いずれの領域においても、平均降水量は計算開始時刻から3日目にかけて増減するものの(初期値とモデルの基本状態の不整合による、まとまった凝結熱放出および反動を反映)ほぼ観測値に近く、CINDY2011/DYNAMO 期間の予測計算での過剰誤差(観測の約1.3倍)を改善している(図2a)。これは、強い降水の過剰な発生傾向(Nasuno et al. 2017)がPre-YMCの予測計算では緩和されたことによる(図1)と推測される。一方、対象期間の降水時系列について観測との相関は予測時間と共に低下し、CINDY2011/DYNAMO 期間の予測計算よりも再現性が低い。これには、対象期間や顕著なMJO事例の発生回数の違いが関係すると推測される。

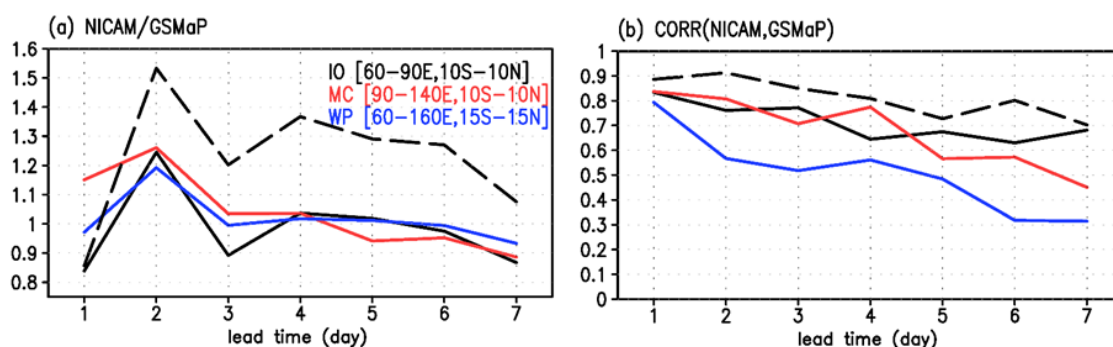


図2 NICAM 7km 格子予測計算 (55 ケース) の平均降水量の観測 (GSMaP) との比較。(a) 降水量の観測に対する比率 (b)降水量時系列の観測値との相関係数。Pre-YMC (実線) および CINDY2011/DYNAMO (破線) 期間。インド洋域(60-90E, 10S-10N ; 黒)、海大陸域 (90-140E, 10S-10N ; 赤)、暖水域 (60-160E, 15S-15N ; 青)。横軸は予測時間 (日数)。

Pre-YMCの予測計算において過剰降水が軽減された原因について、モデルの解像度や物理過程の設定の影響が考えられる。H27年度の研究成果報告で、NICAMの雲微物理過程におけるパラメタ設定の違いにより台風の発生・発達に系統的な違いが見られたことを示した。過剰降水の見られたCINDY2011/DYNAMOの予測計算では、パラメタ調整なしの設定(ケースP; Nasuno 2013)を用いたが、Pre-YMCの計算では、MJOの再現性を優先したパラメタ設定(ケースM; 雨、雪、霰の落下速度を低下; Miura et al. 2015)を応用した。H27年度の研究成果から、ケースMを用いることによりケースPに比べ対流の集中化が抑制されたことが推



測される。雲微物理過程の設定に関する予備調査として、全球 14 km 格子の NICAM を用いた比較計算を行った。図 3 に MJ0 活発化前（2015 年 12 月 3 日）を初期日とする 30 日計算の結果を示す。降水分布や強い降水の発生頻度について、予想どおりの傾向が確認された。加えて、ケース M の設定では MJ0 や短周期の擾乱に伴う降水域の伝播がより連続的に表現され、ケース P では降水域が停滞して強化する傾向が見られた。

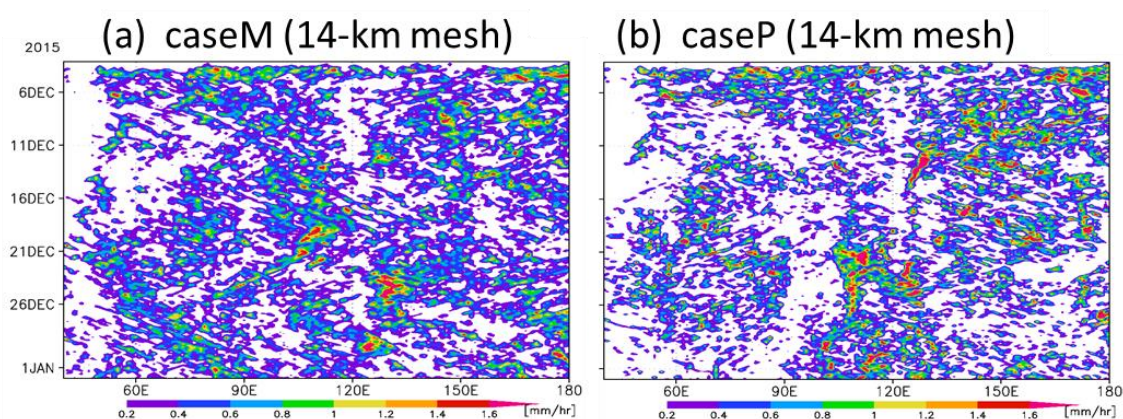


図 3 雲微物理過程の設定 (a) ケース M、(b) ケース P に関する感度計算（14km 格子、2015 年 12 月 3 日初期日、30 日積分）における降水（10S-10N 平均値）の時間—経度図。

### 今後の問題点

雲微物理過程の設定の最適値はモデルの解像度にも関係することから、対流の多重スケールのメカニズムをより現実的に予測し理解するために、今後 7 km 以下の格子を用いた感度計算を系統的に行い、モデルのパラメタ値の選定やスキーム等の高度化を行う必要がある。

### 参考文献：

- Fujita et al. (2011), J. Meteor. Soc. Japan, 89A, 317-330.  
 Miura, H. et al. (2015), J. Meteor. Soc. Japan, 93A, 115-137.  
 Nasuno, T. (2013), SOLA, 9, 69-73.  
 Nasuno, T. et al. (2017), submitted to J. Meteor. Soc. Japan.

### 略語：

CINDY2011/DYNAMO: Cooperative Indian Ocean Experiment on Intraseasonal Variability in the Year 2011 / Dynamics of the Madden-Julian Oscillation  
 GSMaP: Global Satellite Mapping of Precipitation



JAMSTEC: Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

JAXA/EORC: Japan Aerospace Exploration Agency / Earth Observation Research  
Center

NCEP: National Centers for Environmental Prediction

NICAM: Nonhydrostatic Icosahedral Atmospheric Model

## 特定共同研究課題

- ① 人工衛星とモデルによる放射収支及びパラメータの評価・大気粒子の生成過程のモデリング
- ② 全球雲解像モデルの開発及びデータ解析

## 分担課題名

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

## 共同研究者名

五藤大輔 （国立環境研究所）

佐藤陽祐 （理化学研究所・計算科学研究機構）

## 研究目的

特定共同研究課題で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(特に二次生成粒子の生成過程)に着目したエアロゾル化学の精緻化と、大気粒子と雲の相互作用に関するモデリングの高精度化を行うことを目的とした。

## 研究内容

本年度は、NICAM-Chem（Goto et al., 2015）で計算したエアロゾル光学的厚さを AERONET 地上観測網及び MODIS 衛星観測と比較し、検証を行った。前年度の解析結果を基にモデルの素過程を見直し、改良し、より良い再現性が得ることができた。また、雲微物理量や日射量等に関する検証も行った。加えて、エアロゾルの気候への影響を評価するために、エアロゾル有無実験を行い、その差分に着目し解析を行った。これらの成果に関して、現在投稿論文としてまとめているところである。

また高解像度で全球スケールの実験ができる NICAM-Chem の強みを活かして、全球を 3.5km メッシュで覆った実験を行い、大気汚染物質の一つである黒色炭素（ブラックカーボン：BC）が北極に輸送されるメカニズムに関

する調査を行った。Bond et al. (2013) によれば、北極域には BC の発生源が少ないとされ、中緯度工業地帯から放出された BC が低気圧や北極前線付近でできる擾乱によって北極に輸送されると考えられてきた。しかしこれまで気候予測に用いられてきた大気大循環モデル (GCM) は北極域の BC を地上観測などに比べ過小評価していることが知られていた (Koch et al. 2009)。

本研究で行った 3.5km 解像度の数値実験により、解像度が高いことで、BC の輸送に主要な役割を果たす低気圧と前線の再現性が向上し (図 1)、低気圧に伴う雲に除去される BC の量が減少する。その結果、中緯度から北極に輸送される BC の量が増加していることが明らかになった。また数値実験の結果を地上観測と比較すると、高解像度ほど観測をよく再現する結果が得られた (図 2)。これらの結果は Sato et al. (2016) として Scientific Reports 誌に掲載された。

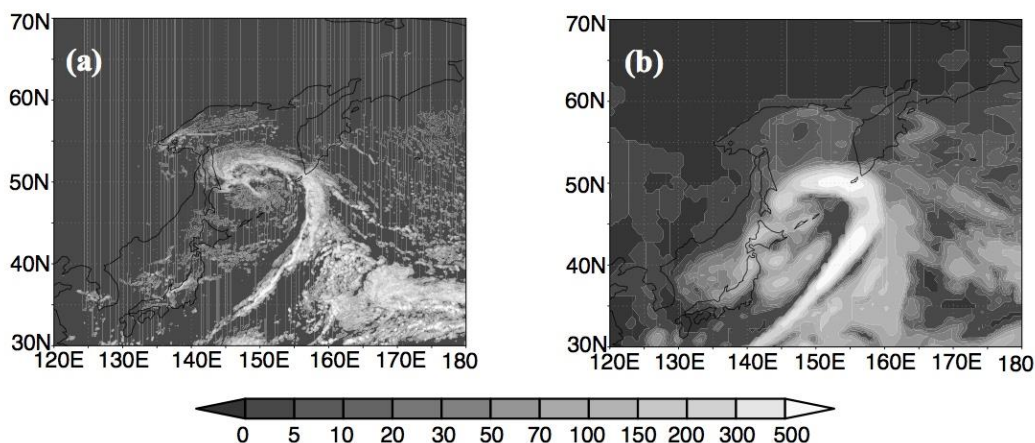


図 1 : (a) 3.5km 解像度および、(b)56km 解像度の NICAM-Chem により得られた日本付近に発生した低気圧周辺の雲水量 (LWP) の分布。単位は  $\text{g}/\text{m}^2$  である。Sato et al. (2016) の図より作成した。

### 今後の問題点

本年度までに衛星観測や AERONET などの地上観測などとの比較を通して、NICAM-Chem を用いた高解像実験の結果の妥当性が評価され、BC の長距離輸送などに関して科学的な知見を得ることもできたが、エアロゾルによる気候への影響を議論できるほどの長期の積分は行っていない。そこで今後は、今年度の取り組みによって妥当性が評価された NICAM-Chem を用いて

長期の積分を行うことが重要であるため、来年度以降に実施していく。

加えて、雲を直接解像できることが NICAM-Chem の強みであるが、エアロゾルが雲に与える影響の評価はまだ十分できていない。そこで来年度以降は、エアロゾルのみならず、雲とエアロゾルの相互作用に着目した数値実験や解析を行っていくことが必要である。

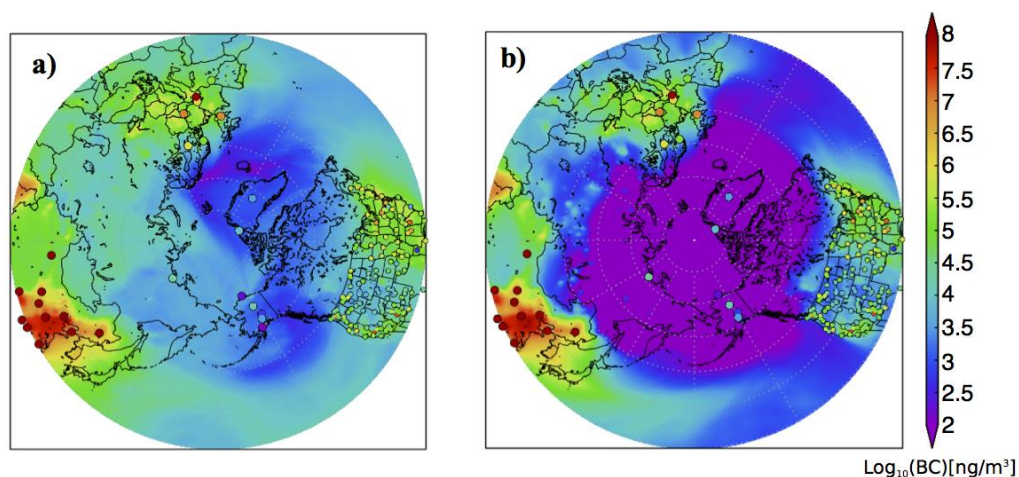


図 2 : (a) 3.5km 解像度および、(b)56km 解像度の NICAM-Chem により得られた北極域の BC の地表質量濃度（シェード）および、地上観測から得られた BC の質量濃度（○で囲まれたシェード）。単位は対数表示で  $\text{ng}/\text{m}^3$  である。Sato et al. (2016) の図より作成した。

## 参考文献

- [1] Bond, T.C., S.J. Doherty, D.W. Fahey, P.M. Forster, T. Berntsen, B.J. DeAngelo, M.G. Flanner, S. Ghan, B. Kärcher, D. Koch, S. Kinne, Y. Kondo, P.K. Quinn, M.C. Sarofim, M.G.Schultz, M. Schulz, C. Venkataraman, H. Zhang, S. Zhang, N. Bellouin, S.K.Guttikunda, P.K. Hopke, M. Z. Jacobson, J.W. Kaiser, Z. Klimont, U. Lohmann, J.P. Schwarz, D. Shindell, T. Storelvmo, S.G. Warren, and C.S. Zender (2013), Bounding the role of black carbon in the climate system: A scientific assessment, *J. Geophys. Res. Atmosphere*, **118**, 1-173, doi:10.1002/jgrd.50171
- [2] Koch, D., M. Schulz, S. Kinne, C. McNaughton, J.R. Spackman, Y. Balkanski, S. Bauer, T. Berntsen, T.C. Bond, O. Boucher, M. Chin, A. Clarke, N. De Luca,

- F. Dentener, T. Diehl, O. Dubovik, R. Easter, D.W. Fahey, J. Feichter, D. Fillmore, S. Freitag, S. Ghan, P. Ginoux, S. Gong, L. Horowitz, T. Iversen, A. Kirkevåg, Z. Klimont, Y. Kondo, M. Krol, X. Liu, R. Miller, V. Montanaro, N. Moteki, G. Myhre, J.E. Penner, J. Perlwitz, G. Pitari, S. Reddy, L. Sahu, H. Sakamoto, G. Schuster, J.P. Schwarz, Ø. Seland, P. Stier, N. Takegawa, T. Takemura, C. Textor, J.A. van Aardenne, and Y. Zhao (2009), Evaluation of black carbon estimations in global aerosol models, *Atmos. Chem. Phys.*, **9**, 9001–9026, doi:10.5194/acp-9-9001-2009
- [3] Goto, D., T. Dai, M. Satoh, H. Tomita, J. Uchida, S. Misawa, T. Inoue, H. Tsuruta, K. Ueda, C.F.S. Ng, A. Takami, N. Sugimoto, A. Shimizu, T. Ohara, and T. Nakajima (2015), Application of a global nonhydrostatic model with a stretched-grid system to regional aerosol simulations around Japan. *Geosci. Model Dev.*, **8**, 235-259, doi:10.5194/gmd-8-235-2015
- [4] Sato, Y., H. Miura, H. Yashiro, D. Goto, T. Takemura, H. Tomita, and T. Nakajima (2016), Unrealistically pristine air in the Arctic produced by current global scale models. *Scientific Reports*, **6**, 26561, doi:10.1038/resp26561

## 東京大学大気海洋研究所気候システム研究系「共同研究」報告書（別紙）

### 1. 特定共同研究課題名：

地表面・水文モデルの開発及びデータ解析（芳村圭准教授）

### 2. 分担課題名：

アンサンブルシミュレーション結果から得られた最大雨量・風速頻度の統計的抽出手法の開発

### 3. 共同研究者名

筆保弘徳（横浜国立大学教育人間科学部）

山崎聖太（横浜国立大学大学院教育学研究科）

小林直弘（横浜国立大学大学院教育学研究科）

### 4. 研究目的：

本課題全体の目的は、数値モデルの開発及びデータ解析を行うことである。そして本申請者の研究分担は、統計的有意かつ効果的に抽出する手法を開発し、アンサンブルシミュレーションで得られた大量の強雨域・強風域パターンに適応させる。

### 5. 研究内容

領域大気モデルを用いた台風のアンサンブルシミュレーションを行うことで、それらの結果を高解像度かつ信頼度の高い統計量を示す手法を検討する。また、地球温暖化対策に資するアンサンブル気候予測データベース(d4PDF)を利用し、本研究で開発した手法を適応する。

### 6. 研究成果

大きく2つのテーマを設けて研究を進めている。

#### 6. 1 台風経路アンサンブルシミュレーションによる強風域パターンの分類

##### 6. 1. 1 手法

本テーマは、台風経路アンサンブルシミュレーションを用いて、全国各地の台風強風変化分布を作成することを目的とする。分布に偏りのない多くの台風経路を得るため、シフト法を用いて台風経路アンサンブルシミュレーションを実施した。シフト法とは、大気の格子点値(Grid Point Value: GPV)の緯度・経度を書き換え数値モデルに入力することで、大気場を本来の位置からずらしてシミュレートする手法である。初期・境界値には、気象庁55年長期再解析(JRA-55 (Kobayashi et al. 2015))の1.25度

格子データを利用し、海面温度および地上 2 m 温度を除く物理量に関して緯度経度の書き換えを行った。

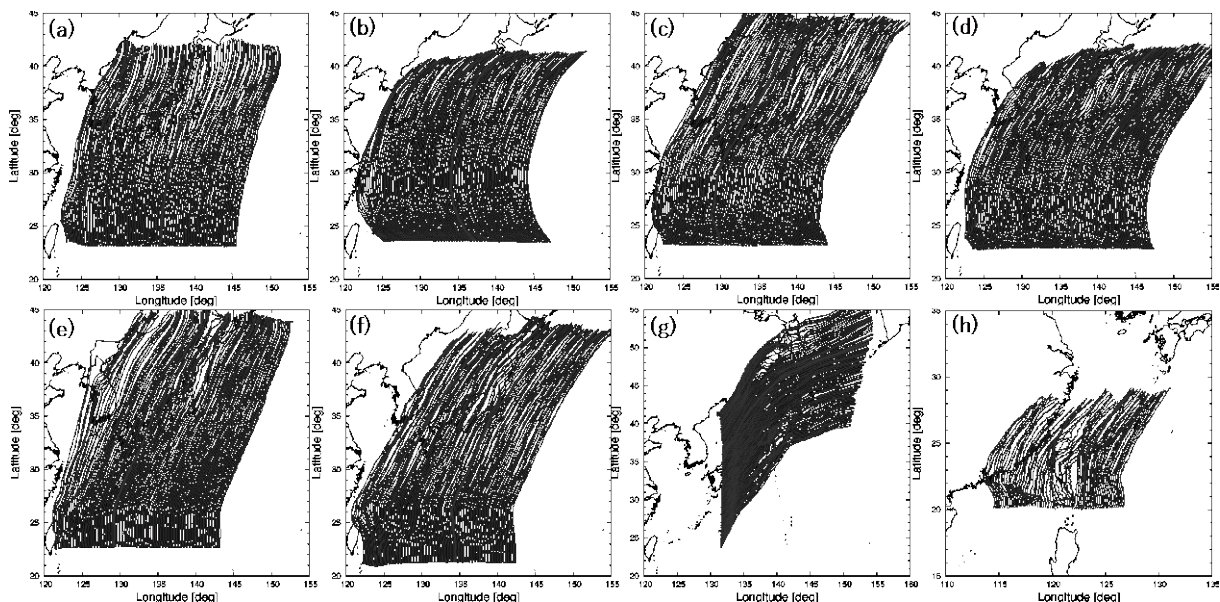


図 1. 各事例の台風経路アンサンブルシミュレーションにより得られた台風経路。それぞれ(a)T5822、(b)T5915、(c)T6118、(d)T9512、(e)T0406、(f)T1326、(g)T0418、(h)T1515を基にした結果。

数値モデルには Weather Research and Forecasting Model (WRF-ARW)モデル Version 3.6.1 (Skamarock et al. ,2008)を用いた。以降に示す結果は全て Domain2 における水平解像度 5 km の計算結果を利用している。各事例の台風はそれぞれ 61~121 ケースを計算し、計 828 本の台風経路が得られた(図 1)。これらの台風の中心位置は海面更正気圧の領域平均が最低値をとる地点として定義している。

台風経路アンサンブルシミュレーションにより、台風の中心位置、台風最大風速、そしてそれぞれの格子点における地上 10 m 風速が得られる。これらのデータを基に強風分布「台風ノモグラム」を以下の手順により作成する(図 2)。まず、台風最大風速は台風の中心から 200 km の範囲内において半径 5 km 毎の円周で地上 10 m 風速を平均した値の最大値と定義している。台風最大風速が得られたら、それぞれの台風中心位置で各位置に台風が存在した時刻のある地点における「風速比」を計算する。風速比とは、台風強度に応じて変動する地上風速を規格化するため、地点の地上風速を台風最大風速で割り百分率で表したものである。最後に、地点を中心とした円内を 71 個の等面積のセルに分割して風速比を表示させる。本研究では一般の方でも分かりやすい防災情報になることを考慮して、従来まで利用されてきた等値線による可視化から上記のセルの色による可視化を行った。その他、台風が各セルに位置した時における地



点の平均風向を示すことで、台風の通過に伴う風向を把握できるようにした。

### 6. 1. 2 台風ノモグラム手法の開発

図 2 は、各台風事例の経路を用いて作成した横浜の台風ノモグラムおよび全台風事例の経路を用いて作成した横浜の台風ノモグラムである。なお、台風経路の不足により T1515 に関しては横浜の台風ノモグラムは作成できていない。円の中心が横浜を示し、色は各セルで平均した風速比を表す。各セルのベクトルは、それぞれのセルに台風が位置した時の横浜での平均風向を示している。台風が横浜の西を通過した時には南風、東を通過した時には北風になることが読み取れる。それぞれの事例で作成した台風ノモグラムの示す風速比分布はやや異なるものの、台風が横浜の北西を通過した時に風が強くなり、北東を通過すると弱くなる傾向が共通して得られた。

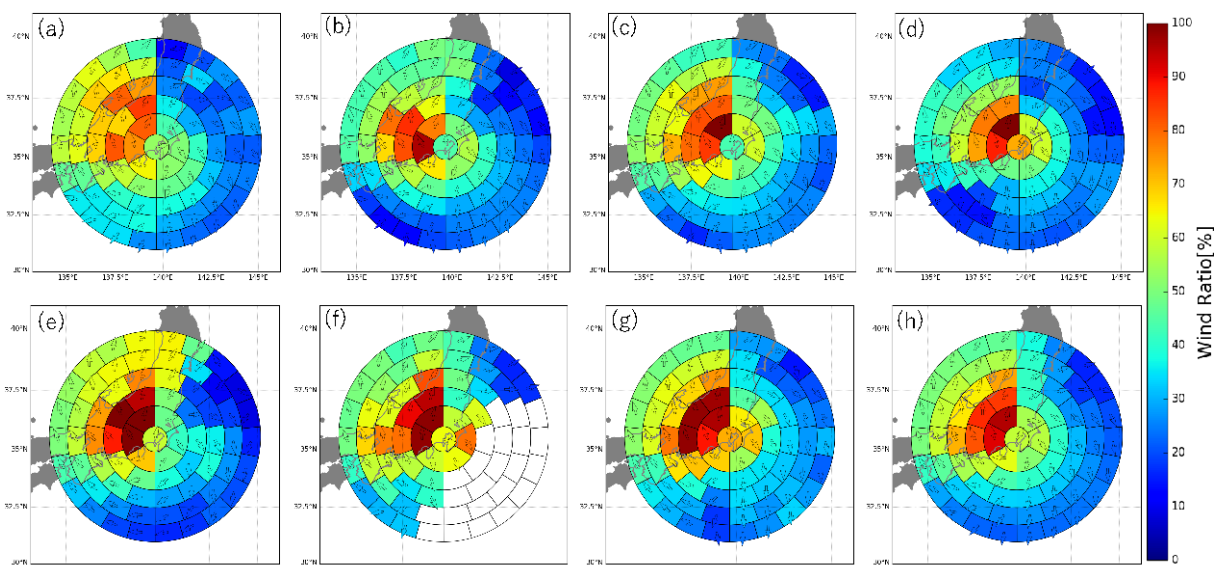


図 2. 各事例で作成した横浜の台風ノモグラムと全事例を合わせ作成した横浜の台風ノモグラム。それぞれ(a)T5822、(b)T5915、(c)T6118、(d)T9512、(e)T0406、(f)T1326、(g)T0418、(h)全事例。

### 6. 1. 3 まとめ

8 事例の台風を対象に台風経路アンサンブルシミュレーションを実施し、全国の台風ノモグラムを作成した。本研究で開発された台風ノモグラムは台風に伴う地域の強風ハザード評価に利用できる。



## 6. 2 現在気候と将来気候で比較した流れパターンの検出

### 6. 2. 1 手法

Yoshida and Fudeyasu(2016 ; 以降 YF16)の手法により、d4PDF の全球大気モデルの出力結果から北太平洋における現在気候と将来気候の流れパターン検出を行った。その解析結果を用いて、流れ場パターンの将来気候の各 SST シナリオ間の差とともに、現在気候と将来気候の環境場の差を調べた。分類した流れ場パターンは、シアーライン(SL)、東西風合流域(CR)、モンスーン渦(GY)、偏東風波動(EW)、そして先行台風によるエネルギー散逸(PTC)の 5 種類である。本研究では規準化は必要ないため、スコア(SCR)を以下のように定義した。

$$SCR_{SL} = ( \partial u / \partial y )_{ave} \exp (A_{SL} \text{ dist} )$$

$$SCR_{CR} = ( \partial u / \partial x )_{ave} \exp (A_{CR} \text{ dist} )$$

$$SCR_{EW} = ( \partial v / \partial x )_{ave} \exp (A_{EW} \text{ dist} )$$

ここで、 $( \partial u / \partial y )_{ave}$ は東西風の南北シアの強さ、 $( \partial u / \partial x )_{ave}$ は東西風の勾配の強さ、 $( \partial v / \partial x )_{ave}$ は水平風の南北成分の東西勾配、また  $\exp (A_{PAT} \text{ dist} )$ は各流れパターン(PAT)と台風発生位置の間の距離である。

本研究では、気象研究所全球大気モデル MRI-AGCM3 の格子間隔 60km、6 時間間隔の瞬間値データを気象場の解析に使用した。将来実験は、CMIP5 の 6 種 SST シナリオがそれぞれ存在する。本研究で用いた 4°C 上昇実験は、全球平均気温が産業革命(1850 年)以前と比較して 4°C 上昇した場合を想定したものである。解析対象は現在気候が 2010 年の 7 月から 10 月、将来気候が 2051 年の 7 月から 10 月である。将来気候における 2051 年は、全球平均気温が 2°C 上昇したと想定される。解析対象領域は北太平洋領域(30° E~100° W、0° ~40° N)とした。使用したメンバー数は、過去実験が 13 メンバー(m001~m013)、将来 4°C 上昇実験が 6 種の SST が各 13 メンバーの 78 メンバー(m101~m113)である。

### 6. 2. 2 解析結果

ここでは 5 つの流れ場のパターンのうち、SL と CR、EW の 3 パターンを説明する。MIROC5 のスコアはいずれの流れ場パターンにおいても、他の SST シナリオのスコアよりも値が低い傾向が見られた。特に 9 月の MIROC5 に関しては、EW の中央値が  $7.3 \times 10^{-3}$ 、最大値は  $9.5 \times 10^{-3}$  などと、全てのメンバーのスコアが  $1.0 \times 10^{-2}$  を割る一方で、他の SST シナリオは全てのメンバーのスコアが  $1.0 \times 10^{-2}$  を上回った。また、MPI-ESM-MR と MRI-CGCM3 のスコアは、いずれの流れ場パターンにおいてもおおむね類似していた。

現在気候と将来気候の各 SST シナリオ間でスコアを比較した。現在気候のスコアは

EW で将来気候の各 SST シナリオよりも値が低い傾向が見られた。ただし、現在気候と MIROC5 のスコアは他の流れ場パターンも含めて類似していた。特に 9 月の現在気候に関しては、中央値が  $8.1 \times 10^{-3}$ 、最大値は  $9.9 \times 10^{-3}$  などと、全てのメンバーのスコアが  $1.0 \times 10^{-2}$  を割り、MIROC5 のスコアと非常に近接していた。一方で、現在気候と HadGEM2-AO のスコアは差が顕著であった。

### 6.2.3 今後の展望

本テーマでは、YF16 の手法を将来気候に応用し、すべての領域・時間について寄与量推定スコアを算出し、将来気候の各 SST シナリオ間で、現在気候と将来気候間のスコアの差について調べた。将来気候間では、MIROC5 のスコアが各流れパターンにおいて低い傾向が見られた。また、現在気候と MIROC5 のスコアはおおむね近似する傾向が見られた。これらの傾向は、特に EW で顕著であった。今後は将来非温暖化実験、2090 年(4 度上昇時)についても実験を行う。そして、スコアの変化にもたらず温暖化の影響、2051 年と 2090 年のスコアの差を検証する。

**特定共同研究課題：** 気候研究のための気候・氷床モデル開発と古気候数値実験

**分担課題：** 氷床変動の再現に関する大規模氷床モデルの開発

**共同研究者：** 齋藤 冬樹・技術研究員・海洋研究開発機構

グレーベラルフ・教授・北海道大学

セディック ハキム・博士研究員・北海道大学

阿部 彩子・教授・東京大学

## 研究目的

数値モデル開発は氷床力学の理解にとって重要な手法であり、氷床流動モデルは気候変動に対する氷床（南極・グリーンランド・過去の北米氷床など）の応答の再現のために特に適している。

本研究の主眼は各氷床変動の再現とそのメカニズムの統合的な理解であり、氷床・棚氷モデル IcIES の開発・運用を軸とし、大規模な氷床流動計算を行うことによって、局所的な変動から大規模な変動までの再現とその不確定性の評価を課題とする。

## 研究内容

南極氷床やグリーンランド氷床の将来の温暖化に対する応答が近年特に注目されている。Saito et al (2016)などの議論により、例えばグリーンランド氷床の百年スケールの温暖化応答実験においては現在氷床の再現の精度が重要な要素であることが示唆されている。またそれと同程度に温暖化による融解量の変化の不確定性が氷床変動推定の不確定性に大きく影響を与えることも議論されている。

これまで IcIES を用いた氷床変動計算は、ほとんどの実験で表面質量収支計算を Positive Degree-Day 法などの経験式を用いて行ってきたが、より現実的な表面質量収支計算を可能とするために、気候モデルとのより密に結びついた氷床気候結合モデル開発が期待されている。

気候モデルとの結合にはモデル間の相互作用を導入するために、氷床モデルにとって入/出力、気候モデルにとっては逆に入/出力となる要素をきちんと考慮しなければならない。本研究課題では、気候モデルにとって入力となる IcIES からの出力要素を再検討した。

## 研究成果

氷床モデルからの出力で、気候モデル、特に海洋モデルへの入力として考えられるのは融解水および冰山分離による淡水供給である。このうち冰山分離量を淡水供給フラックスとして計算することは、氷床モデルできちんと取り扱うのがそれほど自明ではない。冰山分離は氷床の端で起こるが、現状ではなんらかの仮定をもちいて対象となる格子にある氷を全て計算する系から除外するように表している。またその格子でも表面や底面の融解が起こっているため、どの程度の氷が分離しているか、という計算を厳密に行うには、技術的原理的に可能ではあるが、細心の注意を要する。現在行われている氷床モデル比較の国際プロジェクト `initMIP` の中間的な報告によると (Goelzer, private comm.) 参加氷床モデルの多くが、氷収支の計算に問題があることが報告されている。

IcIES で行われている氷床変動計算を項目ごとに分けて時系列として図示したものが図である。局所的には氷厚の時間発展は表面および底面における質量収支と流動フラックスの発散、そしてそれ以外の項目に分かれている。この内最後の項目が、氷床全体として考えた時に冰山分離へ加えられるべき淡水供給項である。その項目を氷床縁辺部だけで取り出し、積分することで全体からの冰山分離項とした。図で分かる通りほぼ収支が閉じているが、若干の誤差が生じていることが明らかとなった。

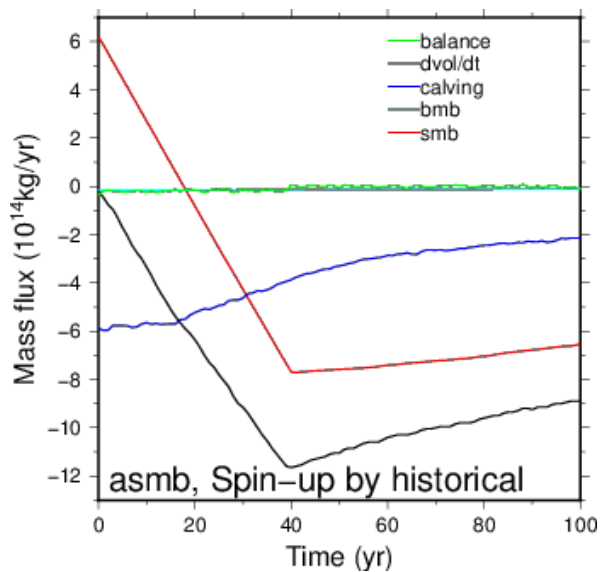


図: initMIP 実験の内温暖化シナリオ実験についての氷質量収支の時系列。表面質量収支(赤)、底面質量収支(水色)、冰山分離(青)、氷床質量時間変動(黒)、それらの収支(緑)を表す。底面質量収支はこの実験では非常に小さく、緑と黒の線は図の上ではほぼ重なっている。

## 今後の問題点

本年度実装した氷床からの冰山分離量の計算スキームでは、保存は比較的良好に保たれていることが分かったが、完全ではない。気候モデルとの結合は特に水収支の完全性を注意しなければならない。今後の改良が期待される。

一つの原因として考えられるのはモデル特有の性質として、表面質量収支計算がその格子にある氷量より多く計算される場合の処理である。現実的には存在する氷より多く融解することは不可能ではあるが、現状融解量計算はその情報と独立しておこなわれるために、そのような状況になる格子が数値計算上出現することである。その処理を行うことで、計算上の収支がより厳密に保たれることが期待される。今後の結合モデル開発に向けて修正・改良を行い、より精度よく氷床変動が求められる氷床モデル開発を行う予定である。

## 特定共同研究課題名(特定共同研究)

地表面・水文モデルの開発及びデータ解析

## 分担課題名(特定共同研究)

雪氷汚染モデルの改善・開発によるモデルの高度化及びデータ解析

## 共同研究者名

安成 哲平（北海道大学・大学院工学研究院）

## 研究目的

北半球中緯度春季は、太陽光吸収性エアロゾル(Light-Absorbing Aerosols: LAA;ダスト, ブラックカーボン, オーガニックカーボン)による積雪汚染が気候へ与える影響(地域によって水循環の強化や乾燥化など)が大きいことが指摘されている(e.g., Yasunari et al., 2015). また, アメリカ北西部では, 春の雪解けの早まりと春夏の気温増加が森林火災増加と関連するという報告もある(Westerling et al., 2006). 今後, 温暖化していく中で雪氷変動と気候の関係は益々重要な注目すべき要素の一つとなることが容易に予想され, 陸面モデルの雪氷モデルの高度化が重要になると考えられる. 日本の気候モデルであるMIROC(e.g., Watanabe et al., 2010; Watanabe et al., 2011)には, 陸面モデルにMATSIROが使われている(Takata et al., 2003). 現在, MATSIROの積雪モデルではdirt componentをダストとブラックカーボン(BC)を合わせた要素(分けていない)を考慮して積雪アルベドを計算している(Yang et al., 1997; Qian et al., 2015). 更には, LAAであるオーガニックカーボン(OC)や積雪層に液体水(降水や融解水)があった際に積雪不純物を流す効果(flushing effect)は入っていない(Qian et al., 2015). このような現状であるため, MATSIRO内の積雪モデルに積雪不純物の観点を中心に既存積雪・雪氷スキームの改善及び新たなスキームの開発・導入を行うことを目的に研究を行った.

## 研究内容

MATSIROの雪氷に関わるスキームにおいて, 以下の要素の開発・改善を行う:

(1)現在, 取り入れられているLAAの積雪内での取り扱い部分の見直し, 改善を行う(例えば, 雪中液体水による物質流出効果の考慮, ダストとBCの質量濃度の取り扱いの分

離, 質量濃度の再配分などのスキームについて); (2) Greenland や山岳氷河の消耗域における雪氷生物活動によるアルベド低下スキームの導入に向けた開発を行う。

## 研究成果

本年度より, 上記特定共同研究課題における分担課題の元, MIROC の陸面モデルである MATSIRO (Takata et al., 2003) の特に積雪モデルに関連した開発を開始した。これまで共同研究代表者は NASA の GEOS-5 モデルの開発を行ってきたが (Yasunari et al., 2011, 2014, 2015), 日本の代表的な気候モデルの一つである MIROC の開発に関わるのは初めてであったため, 本年度前半は, 東大や MIROC/MATSIRO の開発者とやりとりを積極的に行い MIROC の構造やコードそのものについてまずは理解することに主に時間を費やした。現在も引き続き MIROC の構造について勉強中である。

研究計画(1)においては, 既存の MATSIRO モデルスキームにおいては, 積雪アルベドへの積雪不純物の影響として, dust と black carbon (BC)の混合の質量濃度(太陽光吸収性の差を考慮した重み付け質量濃度及び通常の混合質量濃度を別個に計算)として積雪汚染を Yang et al. (1997)の式に適応して計算している(e.g., Qian et al., 2015)。しかしながら, dustとBCの挙動はそもそも雪の中で異なるため(e.g., Conway et al., 1996), 本来は別々の取り扱いが望ましい。更に, このダストとBCを合わせた扱いによって, Qian et al. (2015)で議論されているように, CMIP5 で提出されている”sootsn”という本来積雪中のBCの質量のみであるべき変数が実際にはダスト+BCの合計質量になってしまっているため,

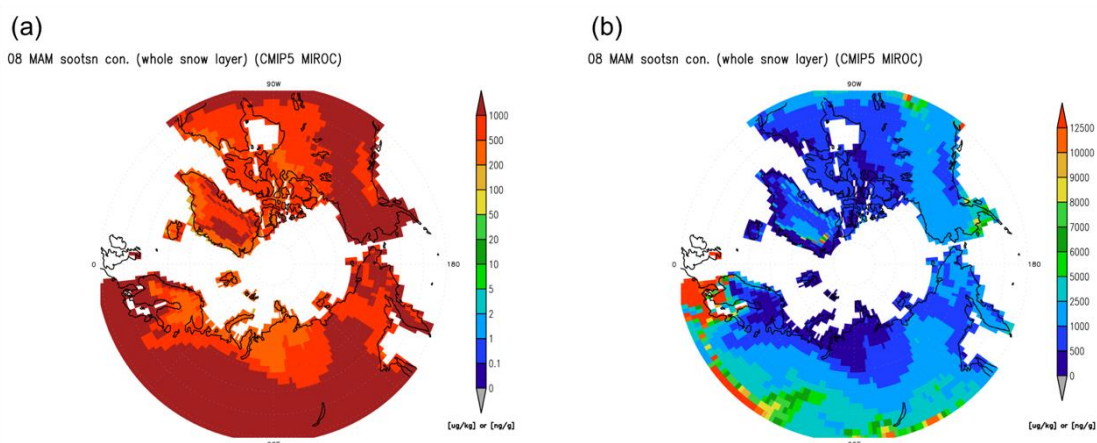


図1. CMIP5 (<https://pcmdi.llnl.gov/projects/esgf-llnl/>) に提出された積雪中BCの質量変数 (sootsn) 及び, 積雪水量変数 (snw) から計算した2008年春季 (3-5月) の積雪中sootsn濃度. (a) Qian et al. (2015)の図2で使用した積雪中BCのスケールでプロットしたsootsn濃度; (b) 一般的な積雪中ダスト濃度に対応するスケールでプロットしたsootsn濃度 (e.g., Kuchiki et al., 2015) .

ユーザーが純粋に MIROC からの積雪中 BC を他との比較で使用できないという問題が起こってしまっている(図1). 図1a を見ていただくとわかるが, 一般的な積雪中の BC 濃度のスケールでは, オーバーレンジになってしまっていて, 図 1b の積雪中ダスト濃度の範囲でようやく濃度の変化がわかるようになる. この問題は早急に解決しなければならない. また, 雪中の有機炭素(Organic Carbon: OC)においては計算そのものが MATSIRO には入っていない(e.g., Watanabe et al., 2011; Qian et al., 2015). そこで, offline 用の MATSIRO の現状のものでまずテストランを行ってパフォーマンスをチェックした後, 手始めにダスト, BC, OC を別々に積雪中の質量濃度を計算できるようにコードを修正し, 九州大学の竹村俊彦教授から頂いたこれらのエアロゾルの日平均沈着量データを forcing に使用して, テストランを 2007/1/1 から 2008/8/1 の期間において行った. 図 2 が offline MATSIRO で計算を行ったダスト, BC, OC の積雪層トップでの質量濃度である. 液体水による flushing out 効果がまだ入っていないので, あくまで初期テストの結果であるが, 明瞭に積雪不純物が分けられ, オーダー的にはそれほどおかしくない積雪中質量濃度の分布がそれぞれ得られていると考えられる. 現在, この質量濃度は, 吸収係数の重み付けなどもあるため Yang et al. (1997)の積雪アルベドモデルにはまだ反映はできていない.

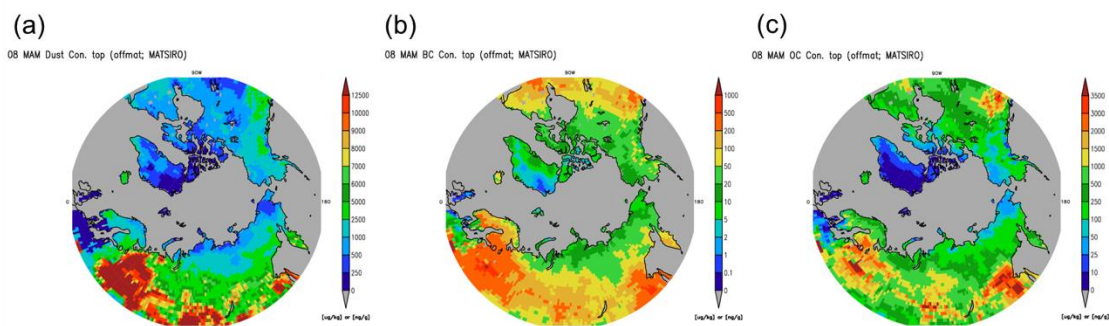


図2. 積雪モデル内でのダスト, BC, OCの質量濃度をそれぞれ分けて計算できるように改善したOffline MATSIROを使ったテストシミュレーションの結果(2008年の3-5平均値). 積雪層トップの(a)ダスト濃度; (b)BC濃度; (c)OC濃度.

研究計画(2)においては, モデル開発については(1)の後に追加予定の項目であるが, 今年度は辿り着くことができなかった. 雪氷生物によるアルベド計算を行うに当たり, 雪氷生物の成長モデルとして Onuma (2016)のスキームを導入することを考えている. そのための打ち合わせとして, 2016年9月1日に東京大学本郷工学部1号館において, MATSIRO 開発関係者及び大沼博士(現在, 芳村研所属)を交えて, 今後の MATSIRO 開発の打ち合わせを行い, 今後のモデル開発のために大変有意義な議論を行うことができた. 2016年10月から大沼研究員が芳村研に所属となったため, 今後(1)の進行状



況に合わせて、(2)の雪氷生物成長モデルの導入のため大沼研究員と協力しながら進めていきたいと考えている。

また、2017年1月11日に東大本郷工学部1号館にて開催された第二回陸モデル開発検討会に参加し、陸面モデル開発者と今後のモデル開発について研究打ち合わせを行った。また、2017年3月22日岡山国際ホテルで行われた2016年度GCM検討会においても今年度の進捗状況について話題提供を兼ねて報告を行った。

### 今後の問題点

今後、Yasunari et al. (2014)で考慮されているような、積雪内に液体水があった場合に積雪不純物を流す効果を追加する予定である。また、現在MATSIROは積雪モデルにおいて積雪密度は固定値( $300 \text{ kg m}^{-3}$ )を使っているが(Takata et al., 2003)、今後Yasunari et al. (2014)の積雪アルベドスキームを例えばオプションで選択して計算できるようにしたいと考えており、その場合には時間変化を考慮した積雪密度が必要となるため、積雪密度の時間変化を計算できるスキームを追加する必要がある。時間変化の積雪密度モデルは、Niwano et al. (2012)で気象研究所の積雪モデルSMAPが採用しているものを取り入れることを検討し、現在MATSIROのコード修正を行っている状況である。また、その後研究計画(2)の方にも着手したいと考えている。

### 謝辞

GCM検討会に参加する際の旅費は、文部科学省北極域研究推進プロジェクト「環境技術等研究開発推進事業費補助金」(ArCS: Arctic Challenge for Sustainability Project)によってサポートされた。

### 参考文献

- Conway, H., A. Gades, and C. F. Raymond (1996), Albedo of dirty snow during conditions of melt, *Water Resour. Res.*, 32(6), 1713–1718, doi:10.1029/96WR00712.
- Kuchiki, K., T. Aoki, M. Niwano, S. Matoba, Y. Kodama, and K. Adachi (2015), Elemental carbon, organic carbon, and dust concentrations in snow measured with thermal optical and gravimetric methods: Variations during the 2007–2013 winters at Sapporo, Japan, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 120, 868–882, doi:10.1002/2014JD022144.

- Niwano, M., T. Aoki, K. Kuchiki, M. Hosaka, and Y. Kodama (2012), Snow Metamorphism and Albedo Process (SMAP) model for climate studies: Model validation using meteorological and snow impurity data measured at Sapporo, Japan, *J. Geophys. Res.*, 117, F03008, doi:10.1029/2011JF002239.
- Onuma, Y. (2016), Modeling of snow algal growth and its effect on snow surface albedo based on snowfield observations, *Ph.D. Dissertation*, Chiba University, 242 pp.
- 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.
- Takata, K., S. Emori, and T. Watanabe (2003), Development of the minimal advanced treatments of surface interaction and runoff, *Global Planet. Change*, 38(1-2), 209–222, doi:10.1016/S0921-8181(03)00030-4.
- Watanabe, M., et al. (2010), Improved climate simulation by MIROC5: Mean states, variability, and climate sensitivity, *J. Climate*, 23, 6312–6335, doi: 10.1175/2010JCLI 3679.1.
- 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.
- Westerling, A. L., H. G. Hidalgo, D. R. Cayan, and T. W. Swetnam (2006), Warming and earlier spring increase Western U.S. forest wildfire activity, *Science*, 313, 940-943, doi: 10.1126/science.1128834.
- Yang, Z.-L., R. E. Dickinson, A. Robock, and K. Ya Vinnikov (1997), Validation of the snow submodel of the biosphere–atmosphere transfer scheme with Russian snow cover and meteorological observational data, *J. Climate*, 10, 353–373, doi:10.1175/1520-0442(1997)010<0353:VOTSSO>2.0.CO;2.
- 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.
- Yasunari, T. J., 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 GOrddard 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.

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.

(別紙様式 5)

### 特定共同研究課題名

古海洋研究のためのモデル開発及び数値シミュレーション

### 分担課題名

窒素同位体比を組み込んだ海洋生態系モデルの開発

### 共同研究者名

重光雅仁 (国立研究開発法人 海洋研究開発機構)

### 研究目的

海洋の生物利用態窒素(窒素栄養塩)は、海洋表層の生物生産を制限していると考えられている。そのため、氷期-間氷期間の窒素栄養塩の除去源および供給源の量の変動は、その間の生物生産変動に影響する可能性がある(Eugster and Gruber, 2013)。窒素栄養塩の除去源および供給源それぞれの生物過程は異なる同位体効果を有している。これらの生物過程によって影響されると考えられる海洋表層の窒素栄養塩の同位体比情報は、表層から深層に輸送される有機物の窒素同位体比に反映され、海底堆積物に伝搬される(例えば、Shigemitsu et al., 2008、Shigemitsu et al., 2010)。したがって、海底堆積物に記録された窒素同位体比の変動から、氷期-間氷期間の窒素栄養塩の除去源および供給源それぞれの変動や海洋表層の生物生産の変動を推察することができる。

しかし、海洋内の窒素栄養塩は生物過程によって影響されるだけでなく、海洋の流れや混合によっても影響されるため、堆積物に保存された窒素同位体比情報のみから、詳細な窒素栄養塩動態の変動を復元することは難しい。

そこで本研究では、海洋の窒素栄養塩に影響を与える生物過程を考慮した生態系モデルに窒素同位体比の計算を組みこみ、そのモデルを海洋大循環モデルに結合し、全球の窒素栄養塩動態を解析できるツールを開発することを目的とした。当該モデルによって計算された「氷期と間氷期の場における沈降粒子の窒素同位体比」の結果を、堆積物の記録と比較することで、どの生物過程によって、どの程度窒素栄養塩量が変わり、その変動がどのように氷期の生物生産や炭素循環に影響したかについての示唆が得られることが期待される。

### 研究内容

本研究では、まず窒素栄養塩の海洋外部からの主要な供給源である「窒素固定」および海洋外部への主要な除去源である「脱窒」を考慮している生態系モデルを整備した。その後、当該モデルで計算される各生物コンパートメントに  $^{15}\text{N}$  を予報変数として加え、また同位体分別を伴う生物過程については、同位体効果を考慮することにより、窒素同位体比を組み込んだ海洋生態系モデルを開発した。

## 研究成果

(1) ベースとなる生態系モデルとして、単純な NPZD (nutrient, phytoplankton, zooplankton, detritus) モデルに「窒素固定」と「水柱内での脱窒」を考慮している Schmittner et al. (2008) の生態系モデルを用いることとした。当該モデルの予報変数は、窒素固定生物、窒素固定生物以外の植物プランクトン、動物プランクトン、窒素栄養塩、リン栄養塩、デトリタスおよび溶存酸素である。当該モデルは、脱窒のうち、水柱内で起こる脱窒 (WCD) は考慮しているものの、海底堆積物内で起こる脱窒 (BD) は考慮していない。そこで BD を考慮することにした。

BD は、Shigemitsu et al. (2016) でも用いた Bohlen et al. (2012) のアルゴリズムを用いて計算することとした。当該アルゴリズムは、海底堆積物に到達する有機炭素フラックスを BD の速度に換算するものである。BD を加えた上記生態系モデルを、あらかじめ MIROC3.2 によって計算された海洋の物理場を用いて、オフライン計算した。100 年積分した後の BD、WCD および窒素固定 (NF) 速度のモデル結果 (空間分布) を深度積算し図1に示す。BD は、表層での生物生産が高く、深度が浅い陸に近い場所において高くなっている。これは、海底に到達する有機物の量が多い場所で BD 速度が高いことを示している。WCD は、モデル内では溶存酸素濃度が  $5 \mu\text{M}$  以下の水塊で急激に速度が速くなるパラメタリゼーションを用いているため、酸素濃度が低い水塊が存在する東部赤道太平洋およびインド洋北部で高くなる。また、NF は海洋表層の窒素栄養塩濃度が低く、水温の高い亜熱帯海域で高くなる傾向を示す。これらの海域では、窒素栄養塩濃度が低いため、窒素固定生物以外の植物プランクトンは優先できないが、窒素固定生物は窒素栄養塩によって制限されないため優先していると考えられる。これらのモデル結果は、これまで得られている観測結果と矛盾しない。

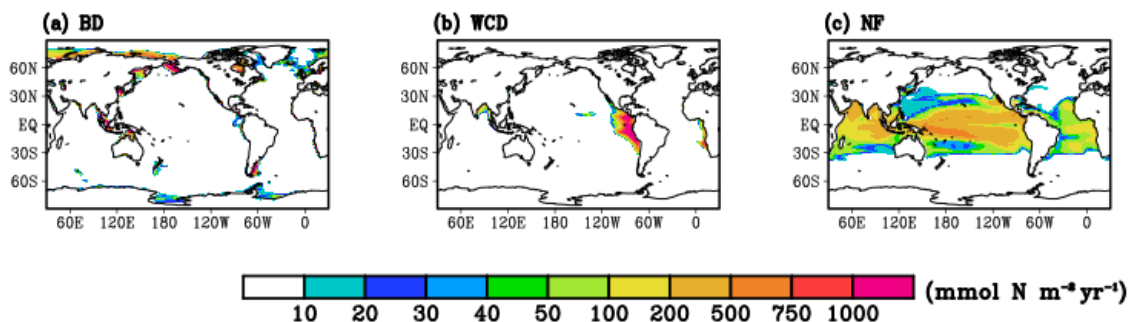


図1 深度積算した窒素栄養塩の海洋外部への除去源((a)堆積物における脱窒:BD、(b)水柱における脱窒:WCD)および供給源((c)窒素固定:NF)の速度( $\text{mmol N m}^{-2} \text{yr}^{-1}$ )。

(2) 整備した上記の生態系モデルに、窒素同位体比計算を組み込んだ。ここでは、表に示す生物過程において同位体分別を考慮した。同位体分別のモデル内での考慮の仕方は、Giraud et al. (2000)の方法に従った。

表に示す同位体分別を考慮しながら計算した海洋表層の窒素栄養塩、植物プランクトンおよび動物プランクトンの窒素同位体比のモデル結果を示す(図 2)。モデル内では、全窒素( $^{14}\text{N} + ^{15}\text{N}$ )と $^{15}\text{N}$ が各コンパートメントに対して計算される。それらの値から、観測データと比べやすくするために、以下の $\delta$ 値に換算した。

$$\delta^{15}\text{N} = \left[ \frac{^{15}\text{N}/^{14}\text{N}}{R_{\text{std}}} - 1 \right] \times 1000 \quad (1)$$

ここで、 $R_{\text{std}}$ は大気窒素ガスの $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ 比を表す。

窒素栄養塩の $\delta^{15}\text{N}$ 値は熱帯から亜熱帯で約8-11‰と亜寒帯と比べ高い値を示す。この値から約5‰程度低い値で、植物プランクトンの $\delta^{15}\text{N}$ 値が存在する。これは、表層の窒素栄養塩の $\delta^{15}\text{N}$ 値から同化の際の同位体効果の大きさ分だけ低くなるためである。一方、動物プランクトンの $\delta^{15}\text{N}$ 値は約3‰程度植物プランクトンの値よりも高くなっている。これは、排泄の際軽い窒素を体外に出すためである。栄養段階が高くなるにつれ、 $\delta^{15}\text{N}$ 値が上がることはよく知られており(Minagawa and Wada, 1984)、当該モデルはこれをよく再現していることがわかった。

表 モデル内で考慮した同位体分別を伴う生物過程

同位体分別を考慮する生物過程	同位体効果の大きさ(‰)	文献値
植物プランクトンによる窒素栄養塩の同化	-5	-4~-10 <sup>1,2,3</sup>
動物プランクトンの排泄	-3	-3 <sup>4</sup>
水柱内における脱窒(WCD)	-25	-20~-30 <sup>5,6,7</sup>
堆積物における脱窒(BD)	-1	-6~0 <sup>8,9</sup>

<sup>1</sup> Sigman et al. (1999), <sup>2</sup> Granger et al. (2010), <sup>3</sup> DiFiore et al. (2010)

<sup>4</sup> Checkley and Miller (1989)

<sup>5</sup> Cline and Kaplan (1975), <sup>6</sup> Brandes et al. (1998), <sup>7</sup> Voss et al. (2001)

<sup>8</sup> Brandes and Devol (2002), <sup>9</sup> Alkhatib et al. (2012)

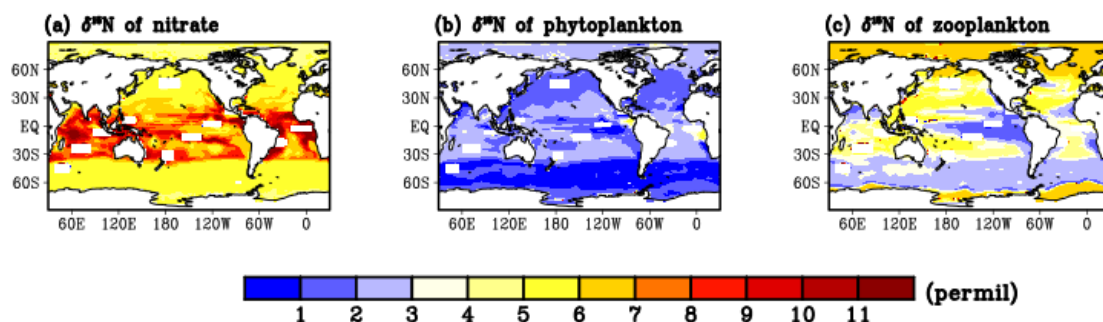


図2 モデルで計算された海洋表層の(a)窒素栄養塩(硝酸塩)、(b)植物プランクトンおよび

(c) 動物プランクトンの窒素同位体比 ( $\delta^{15}\text{N}$ , permil(‰))

今後の問題点

現在までのところ、本研究で開発したモデルは 100 年程度の時間積分しかしていない。当該モデルは、窒素栄養塩に関して、海洋全体で保存する系から開いた系となっているため、全球平均濃度に長期的増加もしくは減少傾向を生じる可能性がある。そのため、数千年程度の時間積分しながら、系の振る舞いを考察するとともに、合わせて観測結果とモデル結果を比べながら、パラメータ調節を行う必要がある。その後、現在気候場および氷期気候場における再現シミュレーションを行い、それらのモデル結果と観測結果を比べながら氷期-間氷期間における窒素栄養塩量や生物生産変動について議論する。

参考文献

- Alkhatib et al., The nitrogen isotope effect of benthic remineralization-nitrification-denitrification coupling in an estuarine environment, *Biogeosciences*, **9**, 1633-1646, 2012.
- Bohlen et al., Simple transfer functions for calculating benthic fixed nitrogen losses and C:N:P regeneration ratios in global biogeochemical models, *Global Biogeochemical Cycles*, **26**, 2012.
- Brandes and Devol, Isotopic fractionation of oxygen and nitrogen in coastal marine sediments, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **61**, 1793-1801, 1997.
- Brandes et al., Isotopic composition of nitrate in the central Arabian Sea and eastern tropical North Pacific: A tracer for mixing and nitrogen cycles, *Limnology and Oceanography*, **43**, 1998.
- Checkley and Miller, Nitrogen isotope fractionation by oceanic zooplankton, *Deep Sea Research*, **36**, 1449-1456, 1989.
- Cline and Kaplan, Isotopic fractionation of dissolved nitrate during denitrification in the Eastern Tropical North Pacific Ocean, *Marine Chemistry*, **3**, 271-299, 1975.
- DiFiore et al., Poleward decrease in the isotope effect of nitrate assimilation across the Southern Ocean, *Geophysical Research Letters*, **37**, 2010.
- Eugster et al., The dynamics of the marine nitrogen cycle across the last deglaciation, *Paleoceanography*, **28**, 116-129, 2013.
- Giraud et al., Modeling  $\delta^{15}\text{N}$  evolution: First palaeoceanographic applications in a coastal upwelling system, *Journal of Marine Research*, **58**, 609-630, 2000.
- Granger, et al., N and O isotope effects during nitrate assimilation by unicellular prokaryotic and eukaryotic plankton cultures, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **74**, 1030-1040, 2010.
- Minagawa and Wada, Stepwise enrichment of  $^{15}\text{N}$  along food-chains- further evidence and relation between  $\delta^{15}\text{N}$  and animal age, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **48**, 1135-1140, 1984.
- Schmittner et al., Future changes in climate, ocean circulation, ecosystems, and biogeochemical cycling simulated for a business-as-usual  $\text{CO}_2$  emission scenario until year 4000 AD, *Global Biogeochemical Cycles*, **22**, 2008.
- Shigemitsu et al., Potential use of the  $\text{N}_2/\text{Ar}$  ratio as a constraint on the oceanic fixed nitrogen loss, *Global Biogeochemical Cycles*, **30**, 2016.
- Shigemitsu et al., Seasonal characteristics of the nitrogen isotope biogeochemistry of settling particles in the western subarctic Pacific: A model study, *Earth and Planetary Science Letters*, **293**, 180-190, 2010.
- Shigemitsu et al., Time variations of  $\delta^{15}\text{N}$  of organic nitrogen in deep western subarctic Pacific sediment over the last 145ka, *Geochemistry Geophysics Geosystems*, **9**, 2008.
- Sigman et al., The  $\delta^{15}\text{N}$  of nitrate in the Southern Ocean: Consumption of nitrate in surface waters, *Global Biogeochemical Cycles*, **13**, 1149-1166, 1999.
- Voss et al., Nitrogen isotope patterns in the oxygen deficient waters of the Eastern Tropical North Pacific Ocean, *Deep Sea Research 1*, **48**, 35-49, 2001.

## 特定共同研究課題名

特定衛星データと数値モデルの融合による雲の素過程の研究

## 分担課題名

衛星観測と数値モデルの横断的活用による積雲・大規模スケール相互作用の実態**解明**

増永 浩彦

名古屋大学 宇宙地球環境研究所

### 1. 研究目的

衛星アルゴリズムと数値モデルはそれぞれ固有の不確実性を内在し、そのいずれかを単純に真値と仮定し他方を検証することはできない。しかし、個々の不確実性の特性を踏まえたうえで、衛星観測と数値モデルを注意深く相互検証することは可能である。たとえば、申請者が開発中の衛星積雲鉛直速度の推定手法では簡略化な Single Column モデルを内蔵しており、より力学的整合性に優れた雲解像モデルを用いた検証・改良が重要である。一方、申請者は衛星観測から大規模場鉛直流速を求める手法も開発しており、数値モデルの大気循環場の再現性を精査する観測資料として有用である。本研究では、衛星観測と数値モデルの協働を通じ、積雲スケール・大規模場相互作用の理解の深化を目指す。

本特定課題で想定されるさまざまな雲の素過程の中で、本分担課題ではとくに熱帯域の積雲対流と大規模環境場を対象とする。研究代表者(増永)は、熱帯降雨観測衛星 (TRMM)・CloudSat 衛星搭載レーダと高分解能赤外サウンダ AIRS による観測を組み合わせ、湿潤対流と大気熱力学場の相互作用の解明を期す研究を行ってきた。一方、AORI 担当教員(鈴木准教授)は衛星観測および雲微物理モデルや雲解像モデルを駆使した雲物理特性の研究に実績がある。共同研究を通じ、衛星・数値モデル融合研究の新たな分野の開拓を目的とする。

### 2. 研究内容

本研究で主に進める衛星データ解析は、Masunaga and Luo (2016)で開発された手法が基礎となっている。以下に、この研究の動機およびの概略を述べる。

先行研究 Masunaga and L'Ecuyer (2014)では、衛星データに基づく熱力学収支解析から大気の大規模場(～数 100 km)平均上昇流速を導出する手法を開発した。一方、低緯



度で大気循環を駆動する主要因は水平スケールのより小さい無数の積雲の集合体であり、大規模平均場とは独立に積雲が担う質量鉛直フラックスを推定することが、大気力学の全体像を理解する上で重要である。しかし、積雲質量フラックスを観測から推定することは容易でない。本研究ではこの問題に対する新たなアプローチとして、衛星観測データから積雲質量フラックス推定する解析手法を新規開発した。まず CloudSat および MODIS 衛星データを用いて雲頂における雲塊の浮力を推定しておく(Luo et al., 2010)、雲内の鉛直速度鉛直分布を構築する。雲内の速度構造を衛星から直接知ることには現在の衛星観測技術では困難だが、本研究ではあらかじめ簡便な鉛直一次元積雲モデルをもとにさまざまな雲内鉛直速度を構築し、その中から衛星観測による雲頂浮力と整合する解をベイズ推定の原理に従い選び出す方法をとった。

### 3. 研究成果

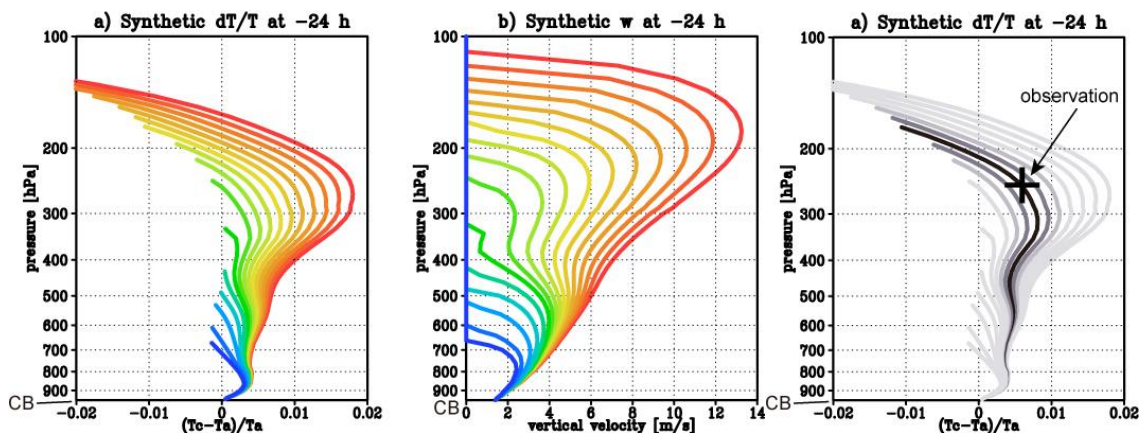


図 1 鉛直一次元積雲モデルで計算された積雲の浮力（左）および鉛直速度（中）の鉛直分布。エントレインメント率を 0（赤線）から  $0.4 \text{ km}^{-1}$ （青線）まで段階的に変化させて雲頂高度の異なる様々な積雲を表現している。右は衛星観測から得られる雲頂高度・雲頂浮力を参照し解を得る際の概念図。色が濃いほど観測値の再現性が高いプロファイルを示し、その再現確率で加重平均したプロファイルを解と定義する。

図 1 は、鉛直一次元積雲モデルにより計算された浮力（衛星観測値と比較する便宜上雲内と環境場の気温差を用いて表現している）および鉛直速度の鉛直分布を示している。この一連の鉛直プロファイルを衛星観測から得られる雲頂高度および雲頂浮力と比較し、その一致の度合いをもとに観測と整合的な鉛直分布を推定する。

これらの観測値を、激しい降水システムの出現前後の時間軸上に投影することにより、降水発達に伴う大気質量フラックスの動態が明らかになる。図 2 にその一例を示す。積雲の鉛直速度そのものはほぼ一貫して Top Heavy な構造を示すが、積雲質量フラックス（鉛直速度に積雲雲量と大気密度を掛けた量）は激しい降水システムの活動最大時（時間軸上の 0 に相当する）の前後で急激な増大を示している。すなわち、個々の積雲の鉛直構造は対流発達過程の位相にあまり依存しないが、積雲群の空間的な広がりの変動が積雲

質量フラックスの変調において支配的な要因であることを示唆している。この解析結果は現時点では暫定的な初期成果であるが、今後解析手法の精緻化を試み、最終的には熱帯対流力学のさらなる理解および全球気候モデルの積雲パラメタリゼーション評価にあたりユニークな観測資料を与えることを期待される。

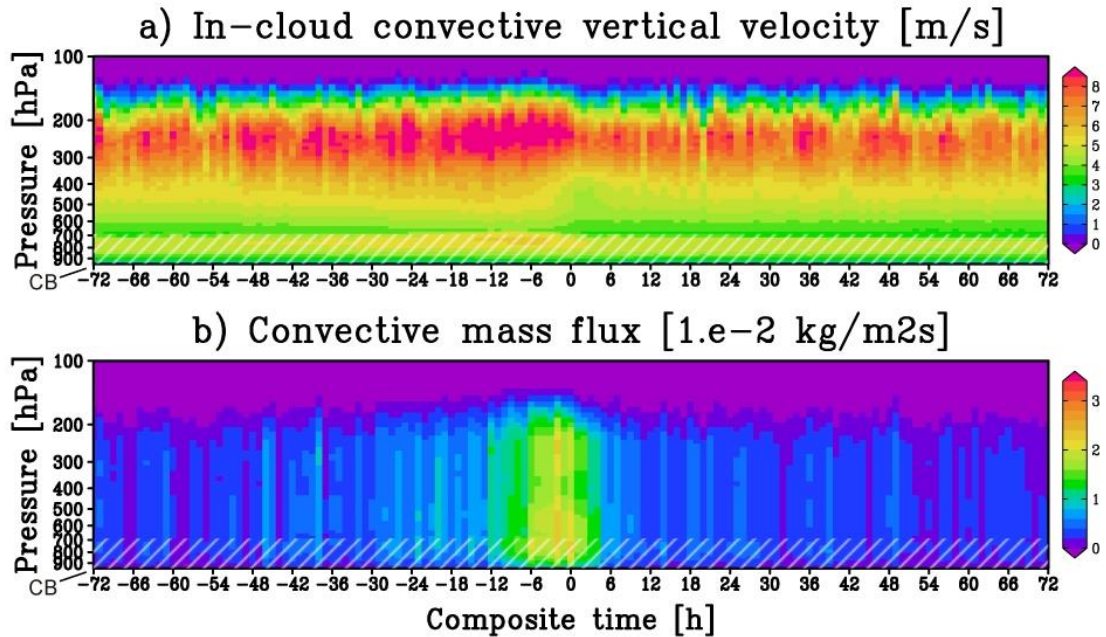


図2 衛星観測から推定された積雲内鉛直速度（上）および積雲質量フラックス（下）の時間変化。時刻0は対流システムの活動最大時を示す。

#### 4. 今後の問題点

上に述べた解析手法は初期成果であり、多くの技術的改善の余地が残されている。とくに、積雲内鉛直速度の鉛直分布は簡便な一次元モデルの仕様に依存しており、種々の不確実性が内在している。今後の改良に向けた戦略として、積雲上昇流の観測入力値としてMODIS 雲頂温度のみを使っている現在の推定手法を改め、CloudSat レーダ反射強度の鉛直分布をまるごと入力値に加える可能性について検討している。レーダ反射強度の組み込みにあたり、これまでは無視してきた降水粒子の処理が課題となるが、降水粒子の落下を表現する方程式を追加することで整合的かつ実用的な組み込みが可能である。具体的には、降水混合比  $q_r$  を決定する式

$$(w_c - V_t) \frac{dq_r}{dz} = q_{\text{auto}}$$

(ここで  $w_c$  は鉛直速度、 $V_i$  は降水粒子落下速度、 $q_{\text{auto}}$  は Autoconversion による降水生成率)を一次元モデルに導入し、降水鉛直分布を計算する。 $V_i$  をパラメタリゼーションする際の不確実性など課題はあるが、AORI 担当教員の鈴木准教授は CloudSat レーダ反射強度と MODIS 雲光学的厚さをもとに雲微物理過程の実態を解明する研究の第一人者であり(最近の研究例では Suzuki et al., 2015 など)、既存の知見を参考に手法の精緻化を今後進めていく予定である。

## 参考文献

- Luo, Z. J., G. Y. Liu, and G. L. Stephens, 2010: Use of A-Train data to estimate convective buoyancy and entrainment rate, *Geophys. Res. Letts.* **37**, L09804, doi:10.1029/2010GL042904
- Masunaga, H. and Tristan S. L'Ecuyer, 2014: A mechanism of tropical convection inferred from observed variability in the moist static energy budget. *J. Atmos. Sci.*, **71**, 3747-3766.
- Masunaga, H., and Z. J. Luo, 2016: Convective and large-scale mass flux profiles over tropical oceans determined from synergistic analysis of a suite of satellite observations. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **121**, doi:10.1002/2016JD024753.
- Suzuki, K., G. Stephens, A. Bodas-Salcedo, M. Wang, J.-C. Golaz, T. Yokohata, and T. Koshiro, 2015: Evaluation of the warm rain formation process in global models with satellite observations. *J. Atmos. Sci.*, **72**, 3996-4014, doi:10.1175/JAS-D-14-0265.1.

# 大気海洋マルチスケール変動に関する数値的研究

吉森 正和<sup>1</sup>, 堀之内 武<sup>1</sup>, 佐藤 友徳<sup>1</sup>, 見延 庄士郎<sup>2</sup>, 稲津 将<sup>2</sup>  
市川 悠衣子<sup>3</sup>, 玉置 雄太<sup>3</sup>, 勝山 祐太<sup>3</sup>, 井上 史也<sup>3</sup>, 井田 東吾<sup>3</sup>  
植木 聡明<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 北海道大学 大学院地球環境科学研究所

<sup>2</sup> 北海道大学 大学院理学研究院

<sup>3</sup> 北海道大学 大学院理学院

<sup>4</sup> 北海道大学 大学院環境科学院

## 1. 研究目的

東京大学大気海洋研究所等で開発されてきた気候モデル MIROC5 を用いて、理想化数値実験を行い、熱帯降雨帯に関する季節変動と大陸を含むモデルの国際的な相互比較プロジェクト (TRACMIP: Tropical Rain belts with an Annual cycle and a Continent Model Intercomparison Project) に参加した。数値実験とモデル比較を繰り返すことで、モデル間の振る舞いの違いを理解し、モデル改善への知見を得ることを目的とする。

## 2. 研究内容

TRACMIP では、外部からの摂動に対する気候システムの平衡応答（と数十年スケールの応答）を調べる。このため、大気大循環モデルに海洋混合層モデルを結合し、季節性を考慮しつつ計算時間ができる限り短くて済むように、海洋混合層の厚さを 30 m にとる。海水は融解点以下の温度でも凍結せず、海氷は生成しない。太陽放射は、季節や時刻によって変化するが、年毎には変化しない。

実験リストを表 1 に示す。標準実験 (AquaControl) は、陸の無い、いわゆる水惑星実験であり、地球の公転軌道も円軌道としている。ただし、海洋熱輸送の南北半球非対称性の効果は含まれている。4 倍 CO<sub>2</sub> 増加実験 (Aqua4xCO<sub>2</sub>) では、気候感度の影響も含め、CO<sub>2</sub> 増加に対する熱帯の降

雨変化を調べる．温暖化に対する最も基本的な応答のモデル間比較を提供する．標準実験に対して，熱帯（30°S-30°N，0°-45°E）に矩形の陸地を設置したものが，LandControl 実験である．モデル間の複雑な陸面過程の違いによる影響を省くため，TRACMIP では 0.1 m の厚さをもつ海洋混合層で陸面を表現する．さらに，陸上では，アルベドを海面より 0.07 大きくし，蒸発効率も半分にする．AquaControl と LandControl を比較することにより，陸の存在が熱帯の大気循環や降雨分布に与える影響を明らかにする．モンスーンの基本的な理解へつながることも期待される．LandOrbit は，地球の公転軌道の離心率を大きくすることによって，北半球の夏に受け取る日射を減少させ，南半球の夏に受け取る日射を増加する．この日射量の変化は，完新世中期から現在への変化の約半分の大きさに相当し，古気候への応用を視野に入れて設計されている．

表 1 TRACMIP の実験設定

実験名	陸地	CO <sub>2</sub> 濃度	離心率
AquaControl	なし	現在	0.00
LandControl	熱帯矩形	現在	0.00
Aqua4xCO <sub>2</sub>	なし	4 倍	0.00
Land4xCO <sub>2</sub>	熱帯矩形	4 倍	0.00
LandOrbit	熱帯矩形	現在	0.04

図 1 と図 2 にそれぞれ，MIROC5 の基本的な結果を示す．陸の存在は，図 1a と図 2a のアルベドの違いではっきり確認できるが，蒸発を通して潜熱フラックスが減少し，顕熱フラックスが増加したことから確認できる（図 1c,d と図 2c,d）．すなわち，陸上でボーエン比が増加する．降水は，陸上の赤道付近で増加するが，陸の南北両端では減少している．また，陸上では海上よりも蒸発量が減少しているにも関わらず，赤道付近では海上よりも降水量が多くなる（図 2b）．これは海陸コントラストによって生じた大気循環場によってもたらされたと考えられる．背後にあるメカニズ

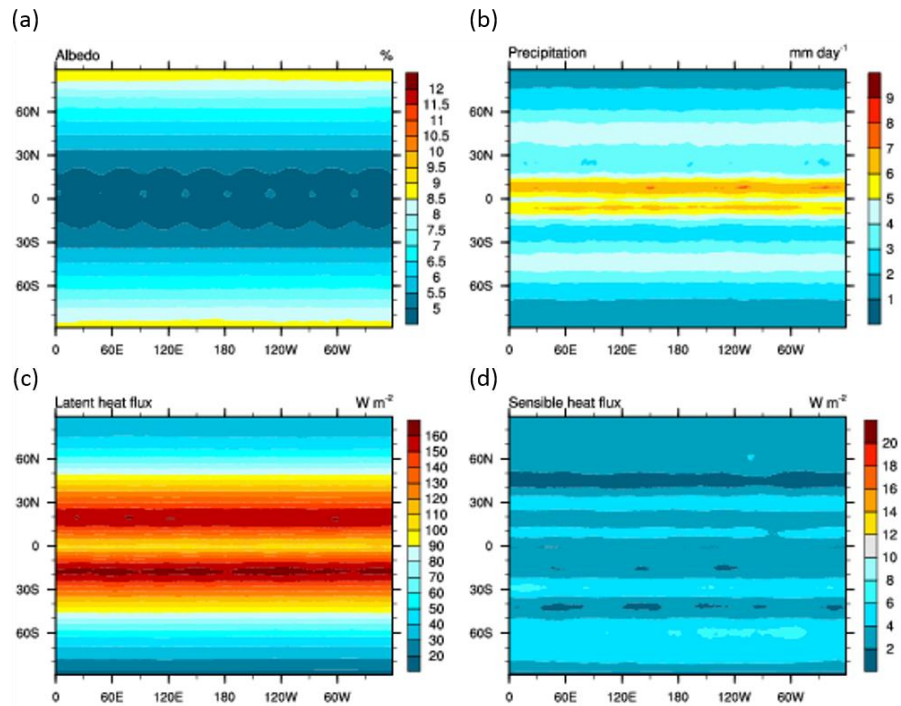


図 1 MIROC5 の AquaControl の平衡状態（年平均）：(a) 地表面アルベド（%），(b) 降水量（mm/day），(c) 潜熱フラックス（ $W/m^2$ ），(d) 顕熱フラックス（ $W/m^2$ ）. (c)と(d)は上向き正.

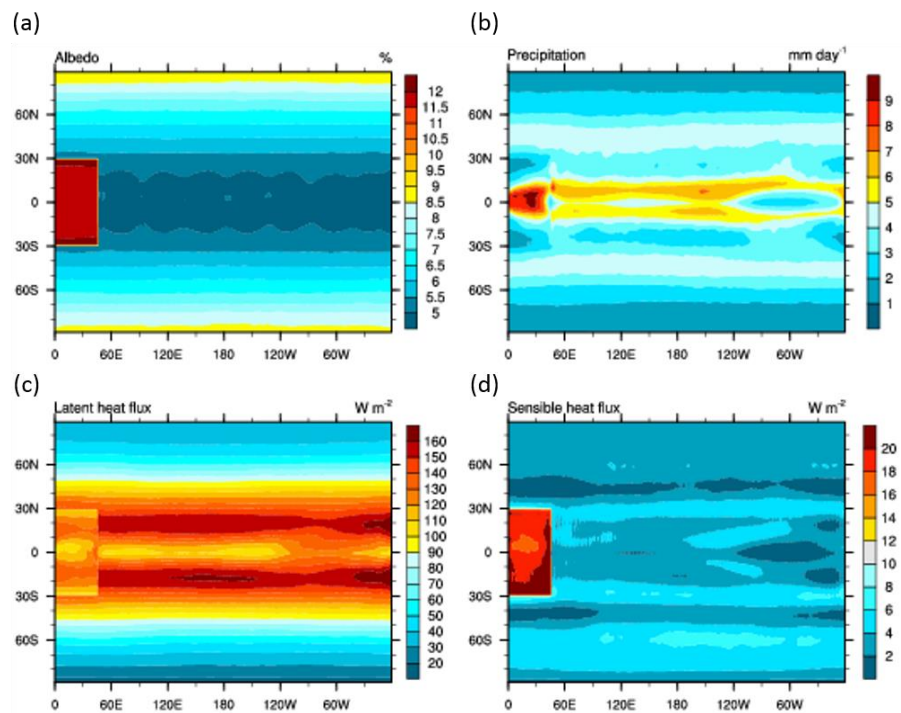


図 2 図 1 と同じ，ただし，LandControl の平衡状態.



ムの解明については今後の課題である。

### 3. 研究成果

TRACMIP では、世界の 13 の包括的な大気大循環モデルと 1 つの簡易大気モデルが使用された。TRACMIP は 2016 年に全実験データが公開されたばかりであり、多くの成果が今後予想されるが、現時点ではモデルの共通性や相違性について簡単な分析が行われ、今後エネルギーを集中して解決すべき課題が Voigt et al. (2016)によってまとめられた段階である。熱帯の降雨以外にも、アルベドフィードバック無しでの極域温暖化増幅、陸無しでの南北両極域温暖化応答の非対称性、気候感度の背景温度依存性などがモデル比較により確認されたことは、注記に値する。

- Voigt, A., M. Biasutti, J. Scheff, J. Bader, S. Bordoni, F. Codron, R. D. Dixon, J. Jonas, S. Kang, N. P. Klingaman, R. Leung, J. Lu, B. Mapes, E. A. Maroon, S. McDermid, J. Park, R. Roehrig, B. E. J. Rose, G. L. Russell, J. Seo, T. Toniazzo, H.-H. Wei, M. Yoshimori, and L. R. Zeppetello, 2016: The Tropical Rain belts with an Annual cycle and a Continent Model Intercomparison Project: TRACMIP. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 8(4): 1868–1891, doi:10.1002/2016MS000748.

### 4. 今後の問題点

TRACMIP は 2016 年に全実験データが公開されたばかりであり、多くの成果が今後予想される。標準実験におけるモデル間のばらつきは懸念材料かつ今後精査されるべき課題ではあるが、それぞれの実験における応答のモデル間の多様性は興味深く、その詳細な分析は示唆に富むことが期待される。たとえば、陸の存在に対する地表面温度分布や降水分布の応答にはいくつかの共通性と相違点を確認される (Voigt et al. 2016, Figs. 10 and 11)。また、熱帯降雨だけでなく、フィードバックの解析を通して、気候感度や極域温暖化増幅に関する知見を提供できることが予想される。

# 底層水形成域の高解像度・高精度モデリング

松村義正<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>北海道大学低温科学研究所 <sup>2</sup>東京大学大気海洋研究所

## 研究目的

極域海洋は海氷や氷床が存在するという点で、他の海域とは大きく異なる。本課題は海氷や棚氷に起因する極域海洋固有の現象を高解像度数値モデルにより再現し、その実態を明らかにすることを目指す。得られる知見はパラメタリゼーションの高精度化等を通じて気候モデルの高度化にも貢献することが期待される。

## 研究内容

我々は前年度までに非静力学海洋モデルにオンラインの粒子追跡スキームを組みこむことで、懸濁物質やフラジルアイスのような海水中に浮遊する多数の固相粒子をラグランジュ的に扱い、その軌跡や履歴を追跡することが可能な海洋分散混相流モデルを開発した。本年度はそれを用いて高濁度のグリーンランド氷河融解水が駆動するフィヨルド内循環と堆積物輸送に関する数値実験を実施した。

グリーンランド氷床の表面融解水は、氷河を貫通するムーランを通過して岩盤に到達し、陸上の堆積物を懸濁物質として取り込みながら氷河末端で海洋に流出する。淡水である融解水は海水より軽いため直ちに湧昇し、氷河末端で高濁度の融解水プルームを形成してフィヨルド内の鉛直循環を駆動する (Chu, 2014; Carroll, 2015)。融解水プルームは栄養塩に富んだ中層水を取りこんで表層に運ぶ役割も担っており近傍海域での生物生産への貢献が指摘されている。他方、表層に高濁度のプルームが広がると日射を遮るために生物生産を抑制する可能性もある。本研究では特に氷河融解水によるフィヨルド内の陸起源懸濁物質の供給・輸送ならびに除去過程に着目して数値実験を実施した。

実験領域はグリーンランドのカービング氷河に接続する小規模なフィヨルドを模した 3.2 km × 12.8 km × 600 m の矩形型海洋であり、格子解像度は水平 50 m × 鉛直 10 m とする。短辺側面に垂直に切り立ったな氷河末端が接地深 500 m で海底斜面と接続している (図 1a)。氷河末端接地面に幅 200 m、高さ 50 m のトンネル様の融解水出水口を設け、ここから領域内に高濁度の融解水を供給する。なおこのトンネル構造は数値モデル上は海底地形と Losch (2008) に基づく棚氷モデルの組み合わせによって実現されているが、本研究の設定においては棚氷-海水間の熱力学的相互作用を無効化しているため、海洋の熱による氷河末端の融解は生じない。沖側の境界は流出境界とする。温位・塩分の初期値は水平一様とし、夏季のグリーンランドフィヨルド域の典型的な成層構造を与えた (図 1b)。氷河末端からトンネルを通過するように結氷温度の淡水を流入させ、同時にトンネル内で底面から堆積物粒子を継続的に投入することで出水口から高濁度氷河融解水を供給する。流出量とし



て  $300, 1000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  の 3 通りの実験を実施し、すべての実験において 1 個あたり  $10 \text{ kg}$  の懸濁物質を代表する浮遊堆積物粒子を毎秒  $100$  個投入した ( $10^3 \text{ kg s}^{-1}$  の懸濁物質供給に相当)。堆積物粒子はその粒径に応じて Rubey の式 (Rubey, 1933) による海洋の鉛直流速に相対的な沈降速度で沈降し、海底に到達すると除去される。現実の氷河融解水中懸濁物質の粒径分布が明らかでないため、本研究では  $10 \mu\text{m}$  (細かいシルトに相当),  $30 \mu\text{m}$  (荒いシルトに相当),  $100 \mu\text{m}$  (細かいシルトに相当) の 3 種類の粒径を用いて感度実験を実施した。

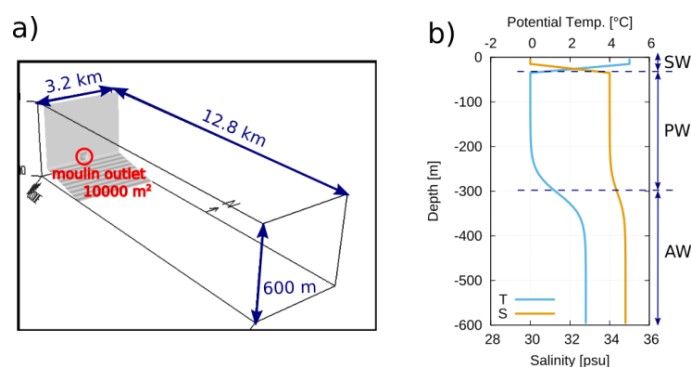


図 1 a) 実験領域. b) 初期の温位 (水色) と塩分 (オレンジ) の鉛直構造. 松村ら (2017) 図 2 より引用.

もっとも融解水流入量が多く懸濁物質粒径の小さい実験 A1 の結果を簡単に紹介する。出水口から流出した融解水は実験開始後直ちに氷河末端に沿って湧昇し、海面に到達後はバルジを形成して表層を広がり、1 時間後にはフィヨルド全幅を満たす。その後は融解水によってもたらされた浮力が駆動する鉛直循環により表層で冲向きの流れが形成され、高濁度域が起き向けに移流されていく。ただし高濁度水塊が海面に露出しているのは氷河末端近傍のみであり、それより遠方では高温低塩の表層水の直下に潜り込み亜表層に広がっていく。氷河末端近傍では高濁度域はフィヨルド全幅を一様に占めているが、より沖側では地球自転の影響により沖に向かって右側の壁面に捕捉されている。概ねフィヨルド末端より  $2 \text{ km}$  以上遠方では懸濁物質含有量のピークが  $50 \text{ m}$  深に位置するが、これは北西グリーンランド ボードウィンフィヨルドでの濁度の現場観測 (大橋, 2015) と整合する。また懸濁粒子粒径を変化させた感度実験では、シルトサイズ (直径  $30 \mu\text{m}$  以下) に相当する粒子は  $10 \text{ km}$  以上遠方まで輸送されるのに対し、砂粒として分類される直径  $100 \mu\text{m}$  の粒子の大半は氷河末端から  $4 \text{ km}$  以内で沈降し、それ以上遠方に輸送ないことが示された。

今後は低次生態系モデルと結合し、融解水の上昇プルームによる栄養塩の表層への供給と懸濁物質による光遮蔽効果がそれぞれの程度フィヨルド内の基礎生産に影響するかを定量的に評価することを目指す。

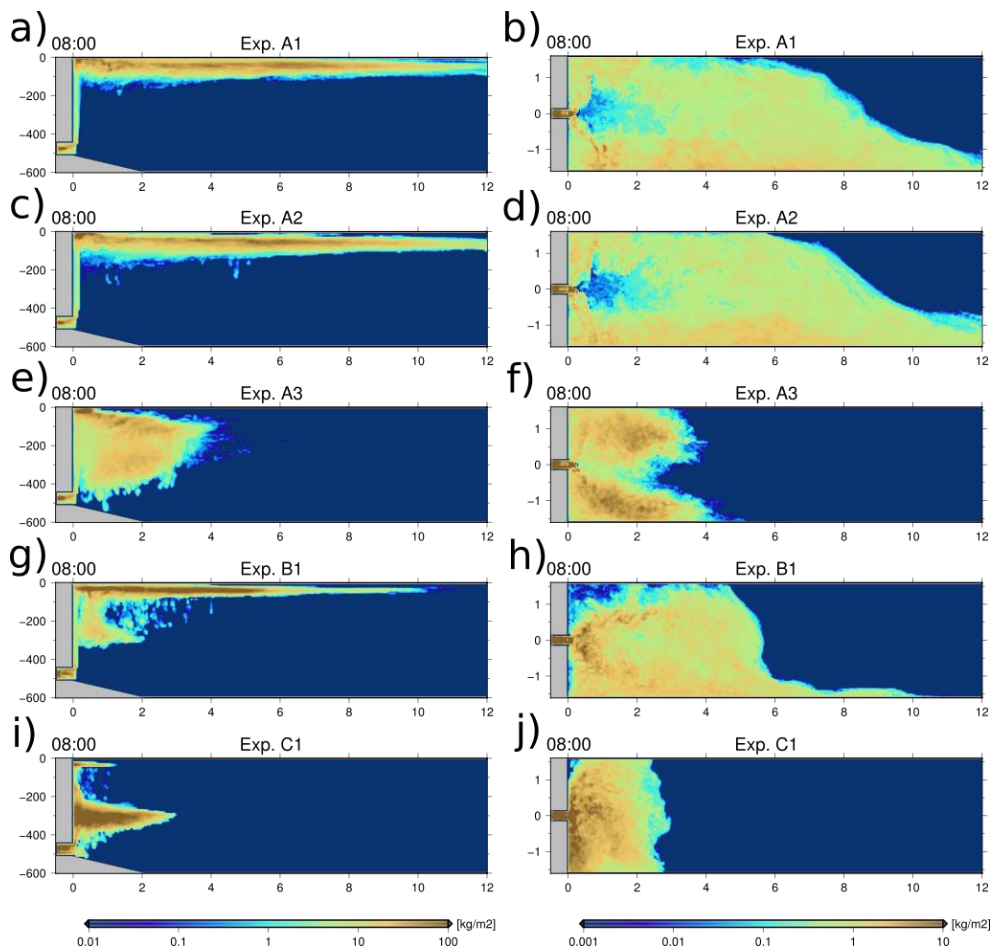


図2. 各実験における8時間目のフィヨルド横断方向に積分した懸濁物質含有量（左列）と鉛直方向に積分した懸濁物質含有量（右列）. 実験 A1, A2, A3 は懸濁粒子粒径  $10\ \mu\text{m}$  で融解水流入をそれぞれ  $1000, 300, 100\ \text{m}^3/\text{s}$  としたケース, 実験 B1, C1 は融解水流入を  $1000\ \text{m}^3/\text{s}$  で一定とし, 懸濁物質粒径をそれぞれ  $30, 100\ \mu\text{m}$  に変化させたケース. 松村ら(2017) 図4より引用.

#### 参考文献:

松村義正, 大橋良彦, 青木茂, 杉山慎: 氷河融解水を起源とする高濁度水プルームの数値モデリング, 低温科学, **75**, pp. 77-84 (2017).

**研究課題名：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**

**H28 年度：天皇海山域での乱流混合過程についての数値的研究**

**共同研究者名：安田一郎・田中雄大**

**(東京大学大気海洋研究所・海洋物理学部門・海洋大循環分野)**

**背景：**

潮汐流と急峻な海底地形の相互作用によって発生した内部潮汐波は、最終的に砕波し、異なる水塊を鉛直方向に混合する事で、海洋循環や物質循環に大きな影響を与える。鉛直混合は、海底地形が急峻な海域の海底付近で特に強化される事が示唆されており、北西太平洋に位置する天皇海山域も鉛直混合のホットスポットである事が示唆されている (Decloedt and Luther 2010)。しかし、本海域での鉛直混合強度に関する知見は不足しており、その時空間分布については明らかになっていない点が多い。そこで、本研究では、天皇海山域の内部潮汐波の発生・伝播・散逸過程を明らかにする事を目的に、現実的な地形を入れた 3 次元高解像度の潮汐モデルを用いた数値実験を行なった。

**モデル設定：**

静水圧近似・ $\beta$  面近似を施した MITgcm (Marshall et al. 1997) を用い、天皇海山北側 (北緯 45 度付近) の推古海山、神武海山などを含む領域で計算を行った (図 1 参照)。モデルの水平格子間隔は、緯度方向 0.015 度、経度方向 0.02 度、鉛直格子間隔は、4000m 深までは 20m 間隔とし、4000m 以深では、最大 100m まで徐々に間隔を広げ、計 240 層とした。モデルの海底地形の作成は、ETOPO1 データ (Amante and Eakins 2009) を使用した。初期成層は、World Ocean Atlas 09 の夏季 (7-9 月) 水温・塩分データ (Locarnini et al. 2010; Antonov et al. 2010) を領域内で平均し、水平一様に与えた。また、本研究では、一様な水平・鉛直渦粘性係数 ( $A_H=10 \text{ m}^2/\text{s}$ 、 $A_V=10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ ) 及び、渦拡散係数 ( $K_H=1 \text{ m}^2/\text{s}$ 、 $K_V=10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ ) と、一様な海底摩擦係数 ( $C_d=2.5 \times 10^{-3}$ ) を与えた。外部境界では、Egbert and Erofeeva (2002) の順圧潮汐モデルから得た半日周潮 (M2 潮) 及び日周潮 (K1 潮) の外部潮汐の振幅位相を用いてモデルを駆動し、静止状態から 8 日間計算を行った。

**結果：**

本研究では、Tanaka et al. (2013) に倣い、鉛直混合強度の指標として、以下の式で表されるエネルギー散逸率  $\epsilon$  を用いる。

$$\epsilon = r_c A_H \left( \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial v}{\partial z} \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial y} \frac{\partial u}{\partial z} \frac{\partial}{\partial y} \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial y} \frac{\partial v}{\partial z} \frac{\partial}{\partial y} \frac{\partial v}{\partial z} + r_c A_V \left( \frac{\partial}{\partial z} \frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \frac{\partial}{\partial z} \frac{\partial v}{\partial z} \frac{\partial}{\partial z} \frac{\partial v}{\partial z}$$

但し、 $\rho_c$ は基準密度、 $(u, v)$ は $(x, y)$ 方向の流速、 $(x, y, z)$ は空間座標である。図 1 は、最終 1 日間で平均したエネルギー散逸率の鉛直積算値の水平分布を表している。推古海山の南側（170.5 °E、44 °N 付近）や西側（169.5 °E、44.5 °N 付近）など、強い鉛直混合が予想される海域は、天皇海山域内でも局在化している結果となった。図 2 は、44.8°N での、平均エネルギー散逸率の鉛直断面分布である。海山山頂西側から斜面にかけての海底付近で強い鉛直混合が見積もられた。

本海域は、日周期が慣性周期よりも大きい緯度帯に位置する事から、この海底付近での強い鉛直混合は、千島海峡 (Tanaka et al. 2010) やベーリング海大陸斜面域 (Tanaka et al. 2013) と同様、海底地形に捕捉された日周期の内部潮汐波動が関与していると考えられる。図 3 は、調和解析によって取得した、44.8°N での日周期の潮流振幅の断面図を表しているが、推古海山西側の海底付近で大きな日周潮流速振幅が見られている。この日周期内部潮汐波の伝播過程を捉えるため、2510m 深での日周期のポテンシャル水温アノマリ空間分布の時系列を描いた (図 4)。日周期のシグナルが、海山を右に見るよう伝播する様子が見られ (図 4a, b の緑矢印参照)、地形性捕捉波の伝播特性と整合的であった。また、推古海山南側 (170.5 °E、44 °N 付近) を通過後、伝播する様子が見られなくなる事から (図 4c, d の緑矢印参照)、日周期の内部波が推古海山南側で散逸する事が考えられた。

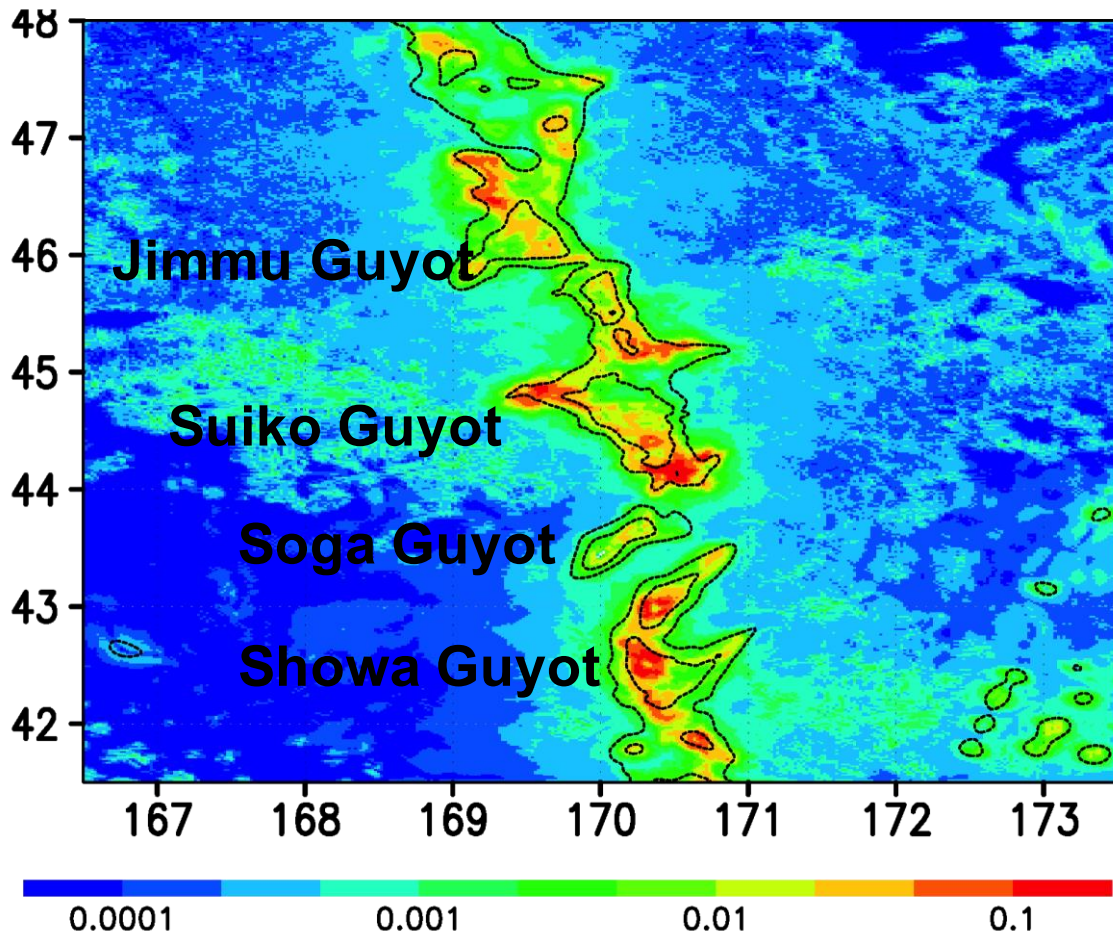
今後、推古海山南側で行った、おしよろ丸航海観測結果と比較する事で、モデルに与えたパラメータを再度検討するとともに、本海域での潮汐による鉛直混合過程の理解がさらに進む事が期待される。

## 引用文献

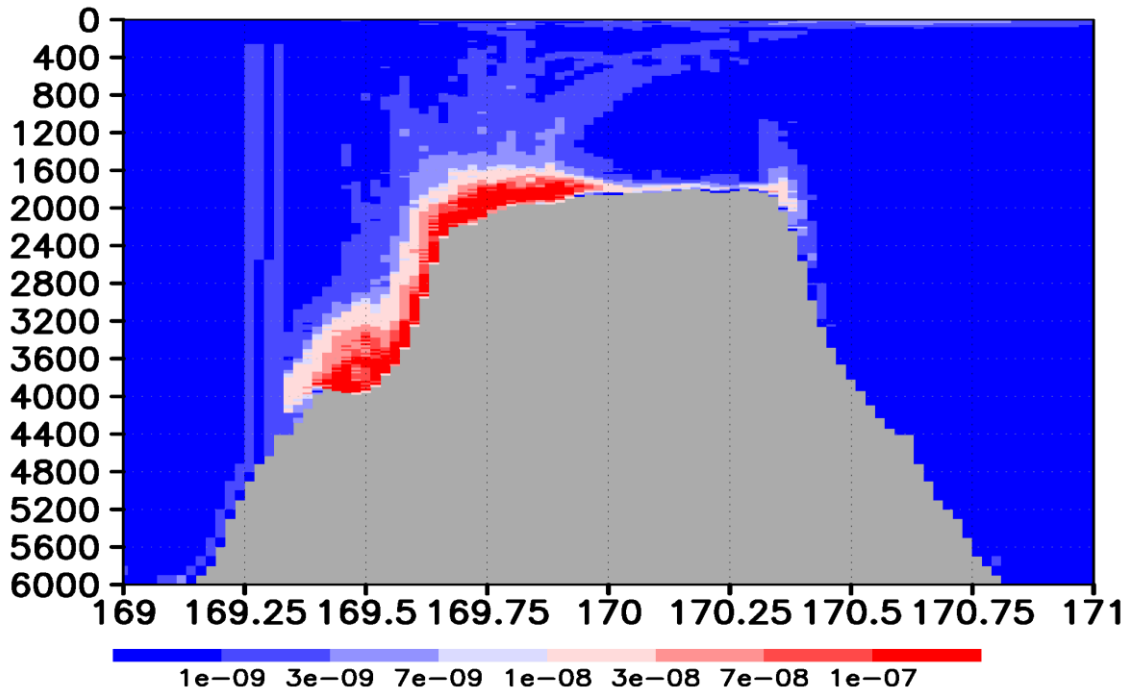
- 1) Amante, C., and B. W. Eakins (2009), ETOPO1 1 arc-minute global relief model: Procedures, data sources and analysis, NOAA Tech. Memo. NESDIS NGDC-24, 19 pp. NOAA NESDIS NGDC, Boulder, Colo.
- 2) Antonov, J. I., D. Seidov, T. P. Boyer, R. A. Locarnini, A. V. Mishonov, H. E. Garcia, O. K. Baranova, M. M. Zweng, and D. R. Johnson (2010), NOAA atlas NESDIS 69, in World Ocean Atlas 2009, vol. 2, Salinity, edited by S. Levitus, 184 pp., U.S. Gov. Print. Off., Washington, D. C.
- 3) Decloedt, T., and D. S. Luther, 2010: On a Simple Empirical Parameterization of Topography-Catalyzed Diapycnal Mixing in the Abyssal Ocean. *J. Phys. Oceanogr.*, **40**, 487 - 508.
- 4) Egbert, G. D., and S. Y. Erofeeva (2002), Efficient inverse modeling of barotropic ocean tides, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **19**, 183–204.



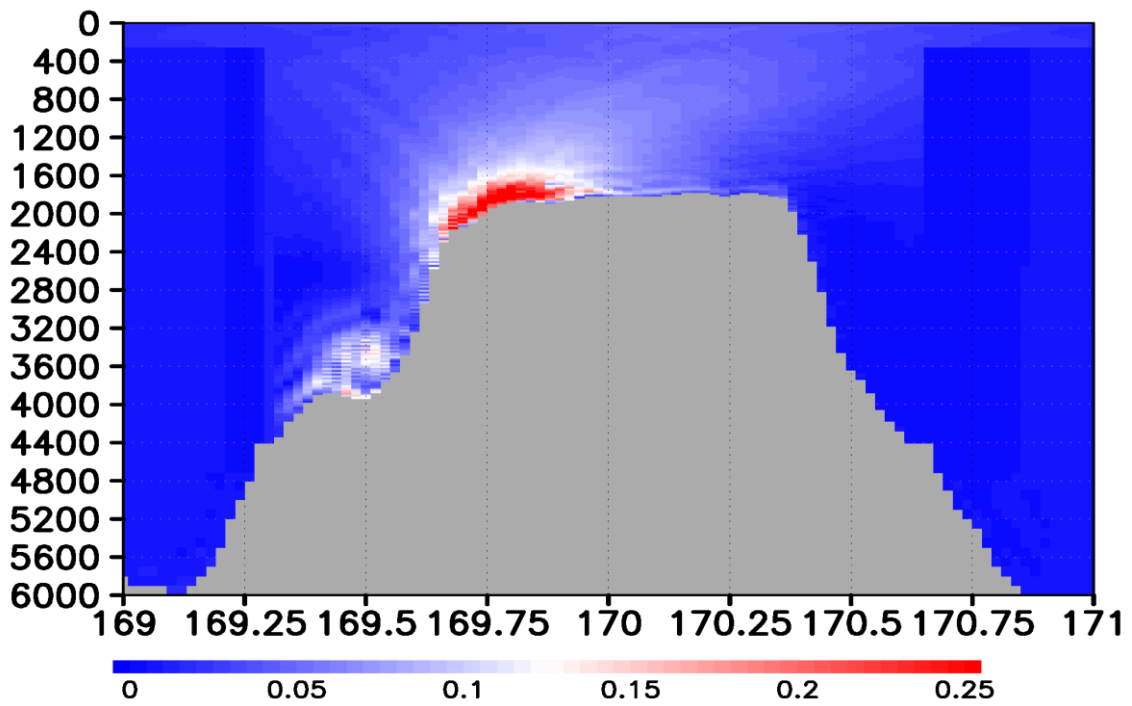
- 5) Locarnini, R. A., A. V. Mishonov, J. I. Antonov, T. P. Boyer, H. E. Garcia, O. K. Baranova, M. M. Zweng, and D. R. Johnson (2010), NOAA atlas NESDIS 68, in World Ocean Atlas 2009, vol. 1, Temperature, edited by S. Levitus, 184 pp., U.S. Gov. Print. Off., Washington, D. C.
- 6) Tanaka, T., I. Yasuda, Y. Tanaka, and G.S. Carter (2013) Numerical study on tidal mixing along the shelf break in the Green Belt in the southeastern Bering Sea, *J. Geophys. Res.*, **118**, 1-19, doi:10.1002/2013JC009113, 2013
- 7) Tanaka, Y., T. Hibiya, Y. Niwa, and N. Iwamae (2010), Numerical study of K1 internal tides in the Kuril straits, *J. Geophys. Res.*, **115**, C09016, doi : 10.1029/2009JC005903.



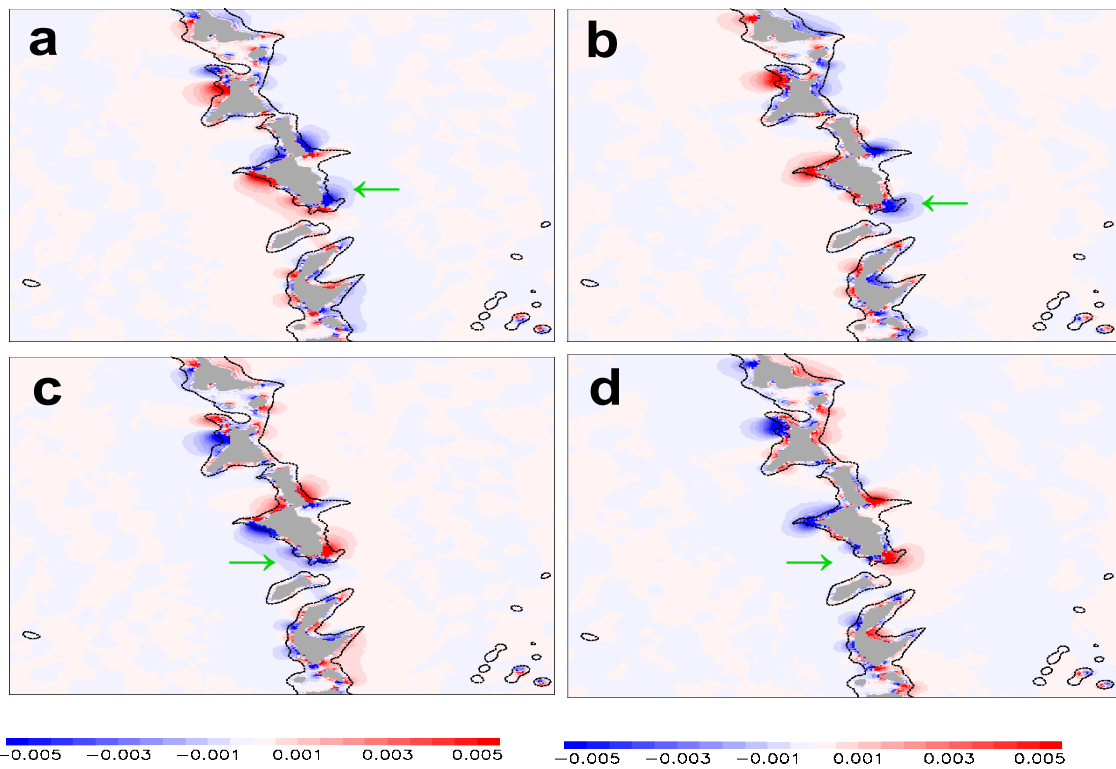
**Figure 1.** A map of model-predicted depth-integrated energy dissipation averaged over the final 1 day period (Unit:  $W/m^2$ ). The horizontal and vertical axes are longitude ( $^{\circ}E$ ) and latitude ( $^{\circ}N$ ). Dotted lines are 2000 and 4000 m depth contours.



**Figure 2.** A cross-sectional distribution of the energy dissipation rates averaged during the final 1 day period along 44.8 °N (Unit: W/kg). The horizontal and vertical axes are longitude (°E) and Depth (m).



**Figure 3.** A cross-sectional distribution of the amplitude of zonal diurnal velocity along 44.8 °N (Unit: m/s). The horizontal and vertical axes are longitude (°E) and Depth (m).



**Figure 4.** A map of the diurnal potential temperature variations at a depth of 2510 m after (a) 7, (b) 7.25, (c) 7.5, and (d) 7.75 days from the start of calculation (Unit °C). Dotted lines are 4000 m depth contours. Green arrows highlight the position of the same trough. The horizontal and vertical axes are longitude and latitude.

## 研究課題名

気候変動現象に伴う大気海洋相互作用とその予測可能性

## 共同研究者

東塚 知己・大石 俊・山上 遥航・木戸 晶一郎  
(東京大学大学院理学系研究科)

## 研究目的

インド洋ダイポールモード現象等の気候変動現象に伴う大気海洋相互作用の理解は進んできているが、現象の多様性については、まだ不明な点が残されている。また、ニンガルー・ニーニョ現象等の沿岸ニーニョ現象については、定量的なメカニズムの理解が得られておらず、予測可能性についてもほとんど調べられていない。そこで、本研究では、様々な大循環モデルを用いて、そのメカニズムに関する研究や予測可能性の研究を行う。

## 研究内容・研究成果・今後の問題点

～二種類のインド洋ダイポールモード現象に伴う海面水温偏差の形成機構の違い～

### 1. はじめに

インド洋ダイポールモード現象 (IOD) は熱帯インド洋で生じる大気海洋結合現象である (Saji et al. 1999)。この IOD に伴う海面水温偏差の空間パターンは、イベントによって異なり、東 (西・中) 部インド洋熱帯域の海面水温偏差が負 (正) となるタイプ (Canonical IOD) と、東・西 (中) 部インド洋熱帯域の海面水温偏差が負 (正) となるタイプ (IOD Modoki) の 2 種類に分類することが可能である (Endo and Tozuka 2016)。上記の 2 タイプの IOD に伴う降水量偏差には、東アフリカ等で顕著な違いが見られることから、形成機構の違いを正確に理解することは重要な課題である。

そこで、本研究では、混合層の熱収支解析を行い、この 2 タイプの IOD に伴う SST 偏差の形成機構の違いを調べた。

### 2. モデル・混合層熱収支解析



海洋大循環モデル MOM3 (Pacanowski and Griffies 1999) は、水平解像度  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 、鉛直 25 層の太平洋・インド洋海盆モデル ( $15^\circ \text{ E}-70^\circ \text{ W}$ ,  $52^\circ \text{ S}-30^\circ \text{ N}$ ) を使用した。NCEP/NCAR 再解析データの月平均気候値データで 20 年間スピンアップした後、日平均データで 1978 年から 2012 年まで積分した。

また、混合層の熱収支解析の式は、以下のように表される。

$$\frac{\partial T_{mix}}{\partial t} = \frac{Q_{net} - q_d}{\rho_0 C_p H_{mix}} - \vec{u}_{mix} \cdot \nabla T_{mix} - \nabla \cdot (\kappa \nabla T_{mix}) + (vertical)$$

ここで、右辺は順に海面熱フラックス項、水平移流項、水平拡散項、鉛直項（鉛直拡散、エントレインメント）を示す。混合層厚は、海面密度よりも密度が  $0.125 \text{ kg/m}^3$  増大する深さとして定義した。

### 3. 結果

IOD を分類する際に定義した熱帯インド洋の西極 ( $40^\circ \text{ E}-55^\circ \text{ E}$ ,  $10^\circ \text{ S}-15^\circ \text{ N}$ )、中央極 ( $65^\circ \text{ E}-85^\circ \text{ E}$ ,  $15^\circ \text{ S}$ -赤道)、東極 ( $90^\circ \text{ E}-110^\circ \text{ E}$ ,  $10^\circ \text{ S}$ -赤道) のそれぞれで混合層の熱収支解析を行い、正の Canonical IOD と正の IOD Modoki に対するコンポジット解析の結果を比較した。2 つのタイプの IOD で海面水温偏差の符号が異なる西極の解析結果のみを掲載する (図 1)。

Canonical IOD の際には、西極に正の海面水温偏差が現れるが、主に正の水平移流偏差によることが明らかになった (図 1a)。水平移流偏差を分解し、そのメカニズムの詳細を調べたところ、主に、水平流偏差に伴うことがわかった (図 1c)。また、鉛直過程も正の海面水温偏差の形成に寄与するが、混合層厚偏差と水温差偏差に伴うエントレインメント偏差の寄与が大きいことが明らかとなった (図 1e)。

一方、IOD Modoki の際には、西極に負の海面水温偏差が現れるが、こちらも主に負の水平移流偏差により (図 1b)、Canonical IOD と同様、水平流偏差の寄与が大きいことが明らかになった (図 1d)。また、鉛直過程全体としての寄与は小さいが、エントレインメント偏差も負の海面水温偏差の形成に寄与していた (図 1f)。

以上の結果より、Canonical IOD と IOD Modoki の海面水温偏差は、異なるメカニズムによって形成されていることが明らかになった。本研究の成果は、IOD の多様性の理解につながることを期待され、今後は、多様な IOD の予測可能生の違いについても調べる必要がある。

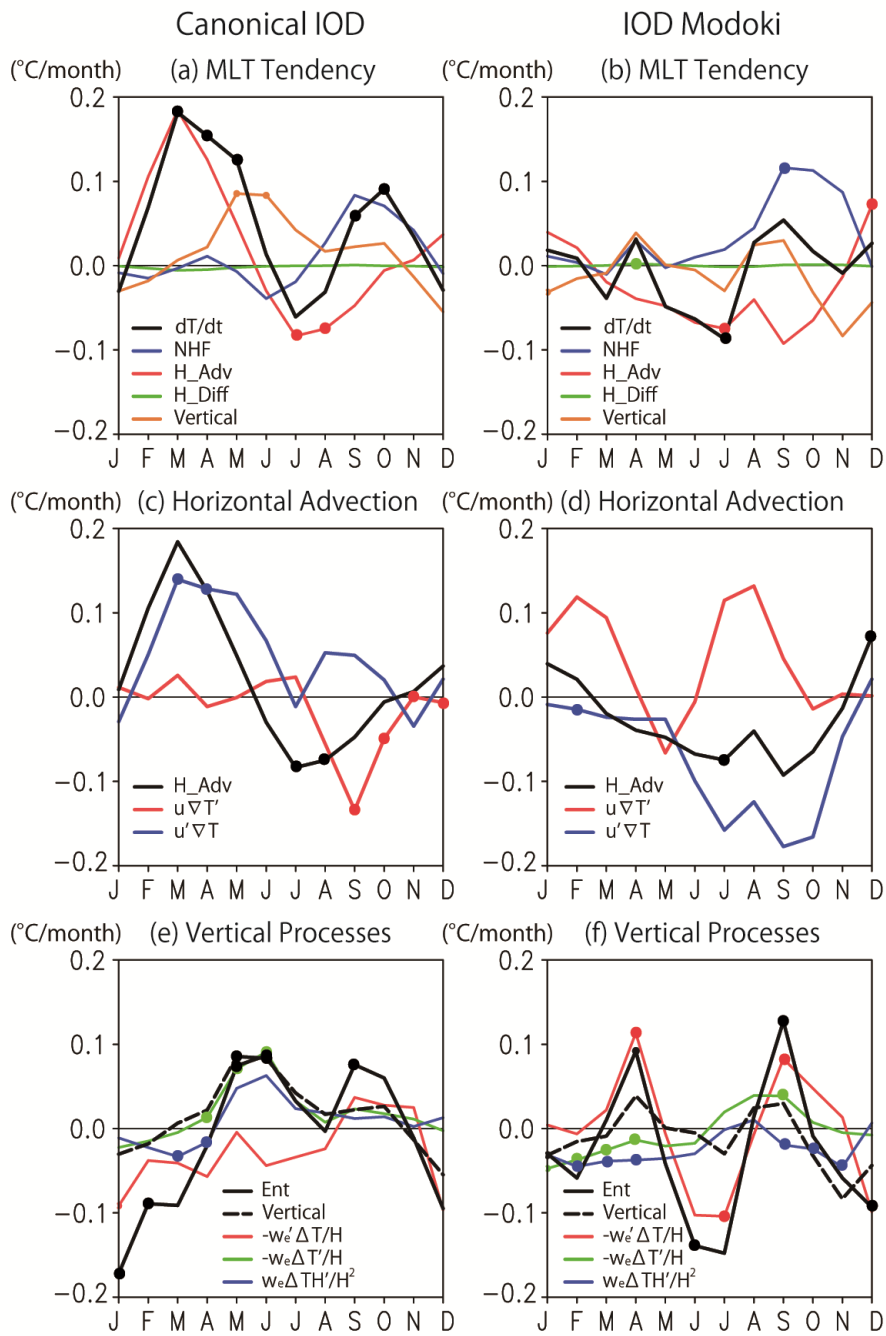


図 1 : IOD の西極における混合層の (上段) 熱収支偏差、(中段) 水平移流偏差の各成分、(下段) 鉛直過程偏差の各成分のコンポジット図 : (a), (c), (e) Canonical IOD、(b), (d), (f) IOD Modoki。信頼区間 80%で有意な偏差に●を付けている。

## 一般共同研究

研究課題：全球高解像度非静力学モデルを用いた物質境界と混合の数理的研究

共同研究者：佐藤薫・三浦裕亮・澁谷亮輔・安田勇輝・雨宮新（東京大学 大学院理学系研究科）

## 研究目的

近年、対流圏から熱圏に至るまでの全大気を対象にし、多くの高精度・高分解能の観測が行われている。一方コンピューター分野においても計算の効率化や高精度化が進み、重力波や積雲のパラメタリゼーションに頼らない数値モデルによってこれらを全球的に直接解像しようとする研究が盛んに行われている。このようなモデルの高精度化に伴い、大気の微視的なカオスの混合を直接解像出来る環境が整ってきている。現在、対流圏から中間圏や熱圏における観測データは得られる物理量が限られており、全球的な運動量やエネルギー収支の把握には数値モデルによるすべての物理量の現実的な再現が有効である。一方、モデルによって対流圏から中間圏・熱圏を正確に再現するためには、①対流圏熱帯の湿潤対流や冬季中間圏・熱圏に見られる強い鉛直流が表現できる非静力学モデルであること、②乱流等の大気の微細構造や大気重力波が直接表現出来るほどに高解像度であること、が必要となる。しかし現在、対流圏から熱圏までを包括して小スケール重力波を表現できるほど高解像度な非静力学モデルは存在しない。大気中には乱流や波によるカオスの混合が存在する。一方で、対流圏界面や極夜ジェットなどは物質のバリアとして働いている。このような大気内部において構造を持った物質混合プロセスは、存在自体は知られているもののその物理過程については十分解明されておらず、乱流や波を直接解像出来る高解像度モデルによる研究が待たれている。

本研究は対流圏から熱圏までをカバーする高解像度非静力学モデルを開発し、物質混合プロセスの物理過程を解明することを目的としている。また、物質混合プロセスを位相幾何学的な視点も含めて多角的に理解することも目指す。

## 研究内容

南極昭和基地大型大気レーダー（PANSY レーダー）は対流圏から中間圏までの3次元風速の鉛直プロファイルを高い高度・時間分解能かつ高精度で連続観測することができる南極最大の大型大気レーダーである。2015年3月16日から24日にかけて、PANSY レーダーのフルシステムによる観測が初めて行われた。この

期間顕著な太陽フレアイベントが発生したがこれに関連すると思われる強い中間圏エコーが観測され、そのデータを解析したところ顕著な波型擾乱が現れていたことが分かった。今年度はこれらの波状擾乱の空間構造や力学特性、発生源について調べるため、この期間を対象として高度領域を中間圏まで拡張した非静力学正二十面体モデル NICAM を用いた対流圏から中間圏の大気擾乱の再現実験を行った。

### 研究成果

南極昭和基地大型大気レーダー (PANSY レーダー) は対流圏から中間圏までの 3 次元風速の鉛直プロファイルを高高度・時間分解能かつ高精度で連続観測することができる南極最大の大気レーダーである。2015 年 3 月 16 日から 24 日にかけて、PANSY レーダーのフルシステムによる観測が初めて行われた。この期間顕著な太陽フレアイベントが発生したことに関連すると思われる強い中間圏エコーが受信され、顕著な波型擾乱が検出された。時間高度断面図に見られるこの波状擾乱の構造は、鉛直波長が約 14 km、対地周期が約 12 h、鉛直位相速度が下向きに約 0.3 m/s であった (図 1)。

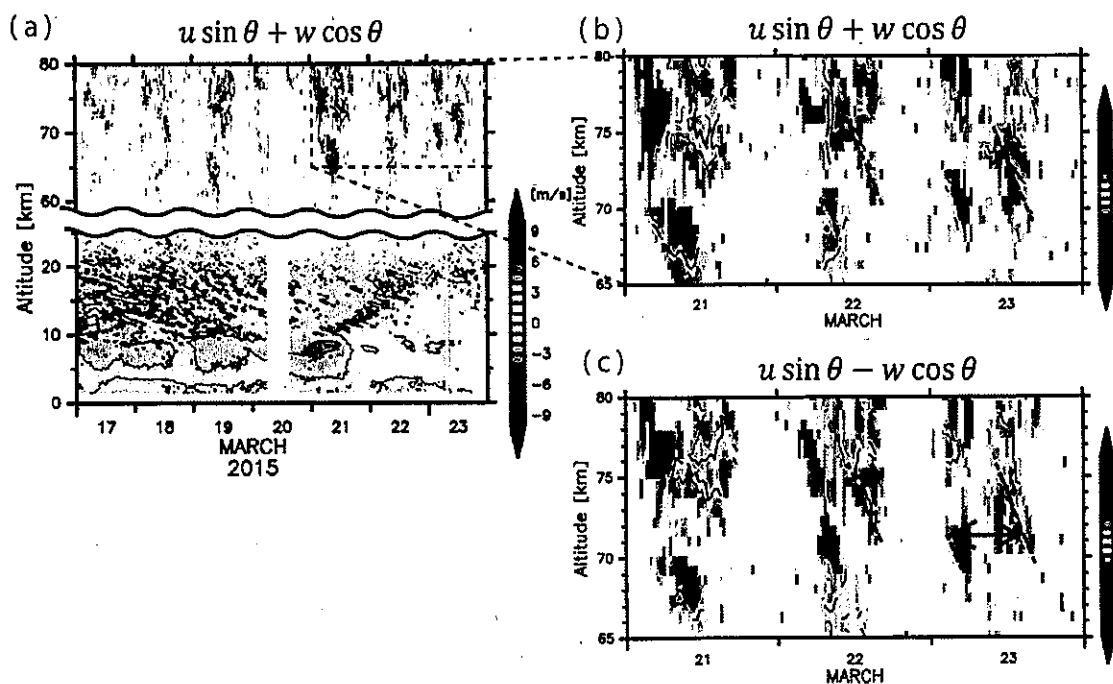


図 1: (a) 2015 年 3 月 17 日から 23 日に PANSY レーダーによって観測された天頂角  $10^\circ$  の東向き視線速度 ( $u \sin \theta + w \cos \theta$ ) の時間高度断面図。(b, c) 2015 年 3 月 21 日から 23 日に PANSY レーダーによって観測された天頂角  $10^\circ$  の (b) 東向き視線速度 ( $u \sin \theta + w \cos \theta$ )、(c) 西向き視線速度 ( $u \sin \theta - w \cos \theta$ ) の時間高度断面図。黒実線は波型構造の位相線を表す。

そこで PANSY レーダーにより観測された擾乱が慣性重力波であると仮定し、ホドグラフ解析を用いて水平波長を推定したところ、これらは水平波長が約 1200 km 以上の慣性重力波である可能性があることがわかった。これらの擾乱の空間構造や力学特性、発生源を調べるため、この期間を対象として高度領域を中間圏まで拡張した非静力学正二十面体モデル NICAM を用いて、対流圏から中間圏の大気擾乱の再現実験を行った。

再現実験は新たに開発した水平格子構造 (Shibuya et al., 2016) を適用した NICAM を用いた。水平格子間隔は南緯 30 度以南ではほぼ一様均一に約 35 km である。鉛直方向の解像度は地表付近およびスポンジ層を除いて 400 m で一定とした。モデルトップは 87 km であり、スポンジ層をモデル上端 7km の高度領域に設定した。

NICAM により再現された中間圏の風の場合には、PANSY レーダー観測で検出されたものとよく似た周期約 12 時間前後で振幅の大きな ( $\sim 40$  m/s) 波状構造が見られた。これらの擾乱の特性を調べるため、まず 1 日周期及び半日周期太陽周期潮汐波、ならびに東西・南北に 1000km 以下の水平波長を持つ擾乱 (先行研究において重力波としてよく解析される) の振幅をそれぞれ比較した。これらの波の振幅は高々 10 m/s と弱く中間圏に卓越する波状擾乱はこれらの波によるものではないことがわかった。一方これらの 3 種類の波を取り除いた残りの成分は観測された擾乱とよく似た大きな振幅を持っていることが確認できた。そこで、昭和基地上の中間圏に現れた 5 つの波束に着目し、波の各パラメータを位相構造から直接求めた。水平波長は約 2000km であり、鉛直波長は約 13 km、対地周期は約 12 h であった。これらのパラメータは慣性重力波の分散関係式や偏波関係式と調和的である。したがって、観測された中間圏で顕著な波状擾乱は水平波長約 2000km の慣性重力波であった可能性が高いと結論できる。

次に高度 70km 付近で NICAM 再現実験において顕著に見られた重力波の波束をレイトレーシングの方法で後方追跡することにより、波束の伝播経路と発生源を調べた。昭和基地付近で 3 月 21 日 0600UTC に高度 70km、 $90^{\circ}$  W、 $70^{\circ}$  S 付近に存在していた大きな振幅を持つ波束は、高度 20km、 $90^{\circ}$  W、 $30^{\circ}$  S 付近から約 36 時間ほどかけて伝播したことがわかった。高度 20km 付近においてこの擾乱は中緯度対流圏界面ジェットのコアに捕捉されたような構造を持っていた。これは、先行研究における理想実験で示されている傾圧不安定波の発達過程においてバランス流から自発的に放射される重力波の構造とよく似ている。また 3 月 19 日 00UTC 前後に存在していた波束を後方追跡したところ、3 月 18 日 12UTC には  $40^{\circ}$  E、 $70^{\circ}$  S、高度約 50km に位置していたが、ここで振幅が急激に弱くな

っていた。また高度約 50km 付近でのこの擾乱の構造は、バランス流から自発的に放射される重力波の理論的位相構造によく似ていた(図 2)。これはこの波束が極渦からの自発的放射によって高度 50 km 付近で発生した可能性を示唆している。

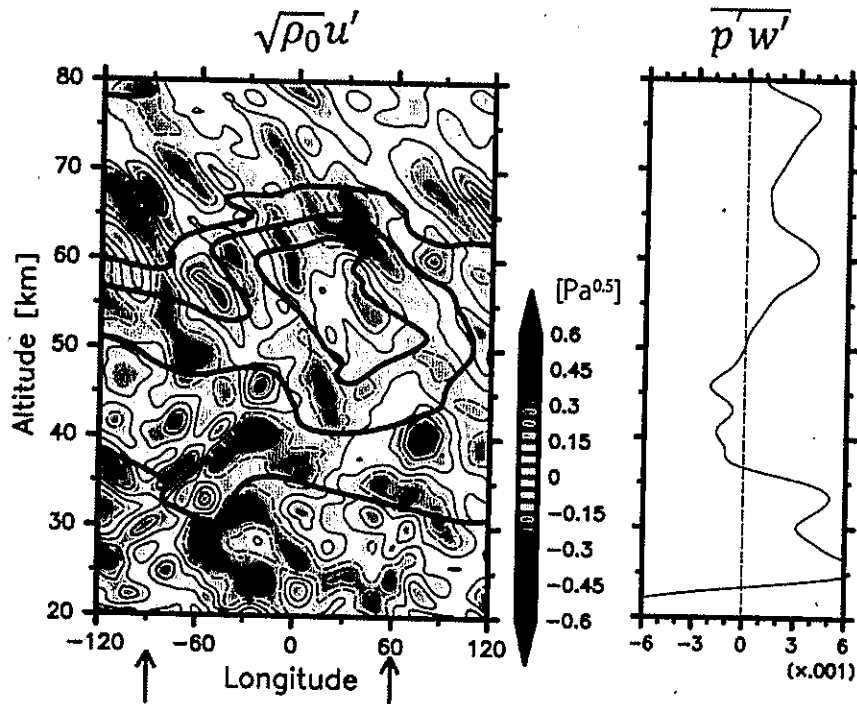


図 2: (a) 2015 年 3 月 18 日 15UTC、69°S における  $\sqrt{\rho_0}u'$  の経度高度断面図 ( $\rho_0$  は密度、 $u'$  は東西・南北方向に 1000km 以下の水平波長を持つ擾乱の東西成分)。黒実線は東西方向の水平波数 3 以下の擾乱の東西成分を表す。(b) -90°E から 60°E までで平均したエネルギーフラックスの鉛直プロファイル。

極域中間圏における対地周期 12 時間前後の振幅の大きな擾乱の存在自体はいくつかの観測的先行研究でも指摘されており、潮汐波として議論されることが多かった。本研究は PANSY レーダーと NICAM を相補的に用いることでこの波状擾乱が約 2000 km の水平波長を持つ擾乱であり、これらが極渦や中緯度対流圏界面ジェットの自発的調節過程により発生した慣性重力波である可能性があることを明らかにすることができた。

本研究内容は論文として、国際誌 Journal of Atmospheric Chemistry and Physics に投稿中であり、現在 Discussion paper として改訂中である。

#### 今後の課題

本研究は PANSY レーダーによって観測された中間圏の波状擾乱の事例解析を行った。今後はこのような波状擾乱の季節依存性について、PANSY レーダー

全群による長期観測データおよび NICAM による長期シミュレーションを組み合わせた研究を行う予定である。

一般共同研究

研究課題：気候モデル・全球雲解像モデルを用いた熱帯大気研究

共同研究者

三浦 裕亮（課題代表）<sup>1</sup>

末松 環<sup>1</sup>

王 家瑞<sup>1</sup>

松岸 修平<sup>1</sup>

1: 東京大学 大学院理学系研究科 地球惑星科学専攻

#### 研究目的

It is known that the climatology of cloud-system-resolving models are strongly sensitive to the settings of cloud microphysics parameters. One of important model parameters is the fall speed of rain, which controls the spatial extent and the spreading speed of cold pools under precipitating clouds. It can not only influence the location and lifetime of each convective system but also modulate the climatological distribution of surface precipitation. Even though the rain fall speed is a critical tuning parameter of cloud-system-resolving models, we cannot determine it with sufficient physical basis because it is quite difficult to obtain a universal value or function for the rain fall speed in observations/experiments. Thus, it is important to develop a convenient method to measure the rain fall speed under various conditions. The aim of this study is to test and improve the immersed boundary method (IBM) in a simulation of a falling rain droplet.

#### 研究内容

The multiphase flow simulation has been a subject of intensive research in the Computational Fluid Dynamics (CFD) field. It is not only important in engineering field, but also in meteorology because the capability of multiphase flow simulation may help us understand more about the motion of ice particles, raindrops, and surface ocean wave, so that their impacts on large scale fluid motions can be analyzed systematically. However, the



treatment of complex moving boundary is an extremely time consuming, formidable task in a traditional boundary conforming fluid solver. A number of workarounds have been proposed such as the volume-of-fluid method (VOF), the level set method (LS), and the immersed boundary method (IBM). These methods provide a relatively efficient way to simulate multiphase flow on fixed rectangular grids, without a necessity to regenerate a complex mesh system that conforms to the interface at every time step. So far, many multiphase flow simulations using these so-called “mixed Eulerian-Lagrangian methods” have been carried out and demonstrated to agree with the experimental results to some extent. However, most of the simulations are confined to lab-scale fluid flow with moderate-to-low density ratio. It is still very difficult to perform long time scale multiphase flow simulations of high density ratio such as water-air interaction. Therefore, a successful simulation of a free-fall water droplet in the air until it reaches its terminal velocity is an important cornerstone for successful large scale, high density-ratio multiphase flow simulations and future applications in the atmospheric science.

### 研究成果

In this work, a multigrid finite volume Direct Numerical Simulation (DNS) solver implemented with the IBM was developed to tackle the problem of water droplet simulations. In the IBM, the interfacial jump conditions are replaced by adding a forcing term into the Navier-Stokes equations that spreads across a few grid cells by the discretized delta function. The interface is tracked by a series of connected Lagrangian markers. However, we found that the pointwise behavior of the discretized delta function on Cartesian grid causes the unphysical parasitic currents tangential to the interface. These spurious currents are a consequence of the discretization error of delta function. In particular, a discretized delta function must satisfy the non-solenoidal condition to eliminate the parasitic currents. A new method is proposed in which the parasitic currents are completely removed. It is verified through some standard test cases. Due to instability, success has been limited to simulations for free-fall water droplets with diameter smaller than 1.0 mm in 2D and 0.1mm in axis-symmetric flow. Simulations of oscillating and free-fall droplet with small density ratio have been carried out as well.

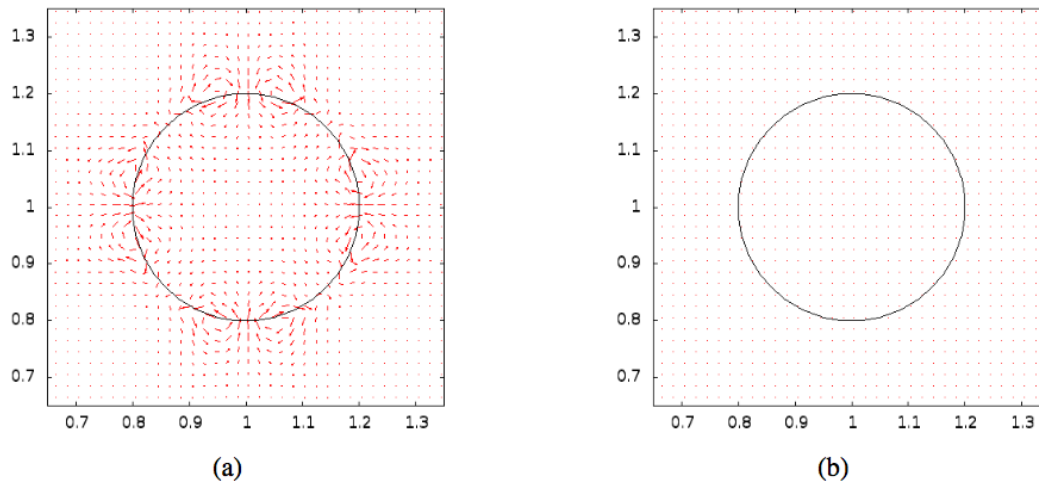


Figure 1. Velocity field of the 2D static droplet simulation after the steady state is reached. (a) A conventional method and (b) the new scheme. Spurious flow around the boundary of the droplet is eliminated with the new scheme.

#### 今後の問題点

Besides some progresses have been achieved in this work, there remains problems that need to be addressed in the future such as improving its stability. Coalescence and phase transfer are other needs to be incorporated into the IBM in the future for widening its application in the atmospheric science.

## 一般共同研究

研究課題: 数値モデルを用いた東アジア大気循環の変動力学の探求

共同研究者: 中村 尚・小坂 優・田口 文明・宮坂 貴文

(東京大学先端科学技術研究センター)

## 研究目的

エルニーニョ・南方振動 (ENSO) は典型的には北半球冬季に極大を迎え、遠隔影響を介して熱帯のみならず中高緯度の天候に影響する。これが世界中で異常気象をもたらす一方で、ENSOが大気内部変動に比べてゆっくりと時間発展するため数ヶ月前から天候を予測する季節予測の源にもなっている。特に我が国においては、エルニーニョ現象・ラニーニャ現象がそれぞれ暖冬・寒冬をもたらす傾向が経験的に知られている。

ENSOは赤道中央太平洋と海洋大陸付近とで逆符号となるような東西ダイポール型の対流活動偏差を伴う。このうち赤道中央太平洋の対流偏差に伴う非断熱加熱は大気内部モードである太平洋-北米 (PNA) パターン (Wallace and Gutzler 1981) を励起し北米に強く影響することが知られている。一方、我が国を含む東アジアにおける冬季の気候偏差には海洋大陸上の対流活動偏差からの遠隔影響も寄与すると考えられるが、強いフィードバックにより大きな振幅を持つ PNA パターンと明確に区別することが困難であり、これまで同定されてこなかった。

本研究は海洋大陸域における対流活動の経年変動に伴う北半球への遠隔影響を同定し、その地域気候影響を調べる。このために2つの方法を用いる。第一の手法では観測及び再解析データに基づき、熱帯海洋変動の影響を除去する。第二の手法では大気大循環モデルを用いる。

## 研究内容

観測データとして、JRA-55再解析 (Kobayashi et al. 2015), NOAA 外向き長波放射 (OLR; Liebmann and Smith 1996), GPCP 降水量 (Adler et al. 2003), HadISST の海面水温 (SST; Rayner et al. 2003), APHRODITE 降水量 (ver. 1101; Yatagai et al. 2012) 及び地表気温 (ver. 1204R1; Yasutomi et al. 2011) を用いる。12月~2月 (DJF) 平均の経年変動を対象とし、1979/1980年以降を解析する。

手法 1 では、まず熱帯(20°S-20°N) SST に対して経験直交関数 (EOF) 解析を行い、その第 1 ~ 第 5 主成分時系列に対する回帰偏差を各変数から除去する。この残差を熱帯 SST 変動に相関しない変動とみなす。特に OLR の残差を以下では rOLR と呼ぶ。その熱帯インド洋-太平洋 (20°S-20°N, 30°E-70°W) における EOF 第 1 モード (rOLR EOF1; 図 1b) は北オーストラリア・海洋大陸域に極大をもつ単極構造に近く、これと逆符号の弱い偏差を赤道西インド洋および赤道中央太平洋に伴う。これは海洋大陸域と赤道中央太平洋に同程度の振幅の偏差をもった双極構造を示す ENSO 成分 (上の SST PC1 に対する回帰偏差; 図 1a) とは対照的である。以下、rOLR PC1 に対する回帰偏差は残差変動に対するものであるが、統計的有意性を除き、結果は残差でなく全変動を用いたときと同一である。

手法 2 は大気大循環モデル AM2.1 (Anderson et al. 2005) を用い、NOAA OISST (Reynolds et al. 2007) に基づく気候値を全球で与えた 200 年の CLIMO 実験を解析する。OLR EOF1 は観測データに基づく rOLR EOF1 と同様に海洋大陸に極大を持つが、熱帯インド洋の逆符号の偏差が観測よりも強い (図 1c)。

## 研究成果

ENSO に伴う北半球対流圏上層の循環偏差は PNA 的な遠隔影響パターンで特徴付けられる (図 2a)。一方、rOLR EOF1 においては海洋大陸域の対流活発化に伴い北西太平洋上で北東向きの波活動度フラックスを伴う

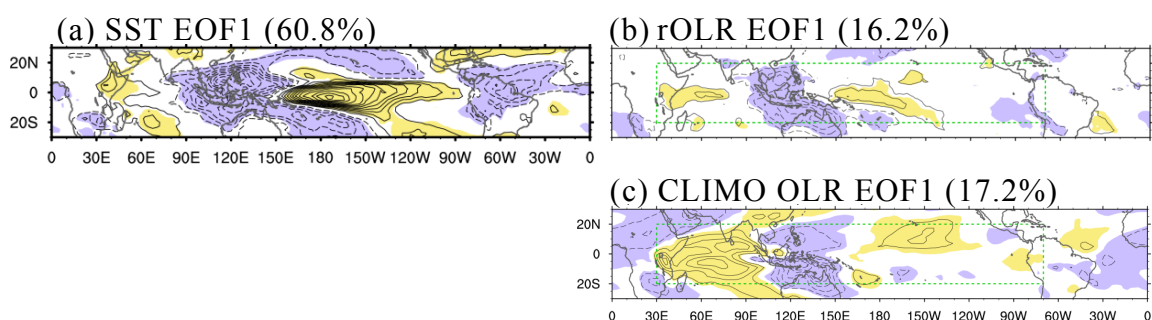


図 1. OLR 回帰偏差. (a) 熱帯 (20°S-20°N) SST PC1, (b, c) 熱帯インド洋-太平洋 (20°S-20°N, 30°E-70°W; 点線で囲った領域)における(b) rOLR PC1, (c) CLIMO 実験における OLR PC1 への回帰偏差. 等値線間隔は  $2 \text{ W m}^{-2}$  でゼロの等値線は省略. 陰影は t 検定で 95%信頼水準を満たすことを表す.

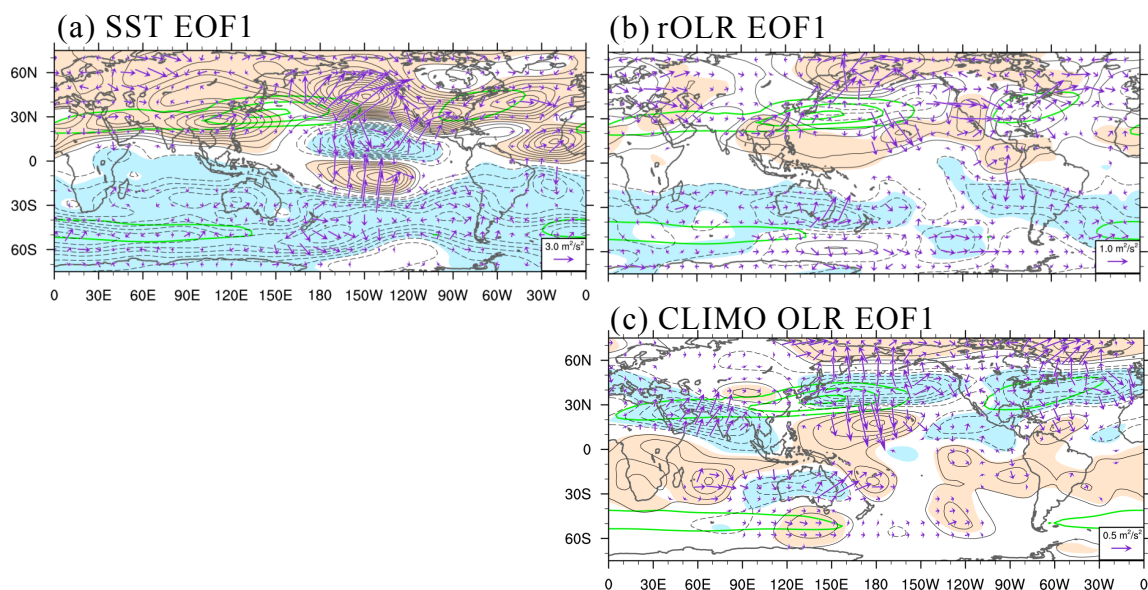


図 2. 図 1 と同様，ただし 300hPa 流線関数偏差．等値線間隔は(a, b) 5, (c)  $3 \times 10^5 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  でゼロの等値線は省略．陰影は t 検定で 95%信頼水準を満たすことを表す．矢印は Takaya and Nakamura (2001)の波活動度フラックスを示す．緑の等値線は気候平均 300hPa 東西風速 ( $30, 45, 60 \text{ m s}^{-1}$ )を表す．

明瞭な波列が見られ，北東向きのロスビー波伝播を示唆する (図 2b)．同様な遠隔影響パターンは SST 変動の影響を完全に排した CLIMO 実験からも抽出される (図 2c)．ただし西部熱帯インド洋での対流活動偏差に伴うと考えられる循環偏差がインド洋で重畳している．海洋大陸域の対流活発化に伴う北西太平洋の波列シグナルは ENSO に伴う循環偏差にも認められるが，顕著な PNA パターンや東西一様成分と重なって捉えにくい．本研究は観測データの統計解析と数値実験の二つの方法で，海洋大陸域の対流活動偏差に伴う遠隔影響の抽出に成功した．

ENSO (ここではラニーニャ現象) および rOLR EOF1 の日本列島への気候影響は，いずれも北西季節風の強化を伴う低温・本州日本海側での降水量増加・太平洋側での降水量減少で特徴付けられる (図 3)．ENSO に比べ rOLR EOF1 における海洋大陸付近の OLR 偏差の振幅は半分程度であるにも関わらず，日本の陸上への影響は同程度であることは特筆に値する．このため，熱帯 SST に束縛されない対流活動変動が遠隔影響を介して日本

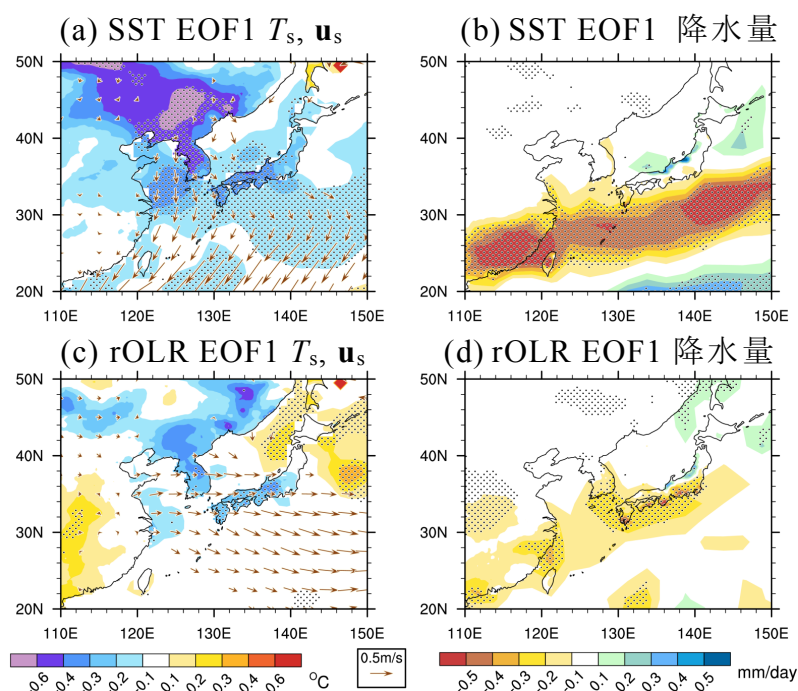


図 3. (a, b) SST PC1, (c, d) rOLR PC1 に回帰した (a, c) APHRODITE 陸上気温・SST・10m 風速偏差, (b, d) 降水量偏差 (海上は GPCP, 陸上は APHRODITE). 点描は陰影で示した偏差が t 検定で 95%信頼水準を満たすことを表す。

の冬季天候の季節予測可能性を制限していることが示唆される。

### 今後の問題点

本研究により、海洋大陸域の対流活動変動において熱帯 SST と相関しない成分が無視できないことが示された。この変動に対するマッデン・ジュリアン振動の寄与は小さいことが追加解析から示唆されている。この変動の起源を調べることで、冬季東アジア気候の経年変動メカニズムの理解と予測の向上に貢献できると考えられる。

### 参考文献

- Adler, R. F. *et al.* (2003) *J. Hydrometeor.* **4**, 1147–1167  
 Anderson, J. L. *et al.* (2005) *J. Climate* **17**, 4641–4673.  
 Kobayashi, S. *et al.* (2015) *J. Meteor. Soc. Japan* **93**, 5–48.  
 Liebmann, B. and C. A. Smith (1996) *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **77**, 1275–1277.  
 Rayner, N. A. *et al.* (2003) *J. Geophys. Res.* **108**, 4407.  
 Reynolds, R. W. *et al.* (2007) *J. Climate* **20**, 5473–5496.  
 Takaya, K. and H. Nakamura (2001) *J. Atmos. Sci.* **58**, 608–627.  
 Wallace, J. M. and D. S. Gutzler (1981) *Mon. Wea. Rev.* **109**, 784–812.  
 Yasutomi, N., A. Hamada and A. Yatagai (2011) *Global Environ. Res.* **15** (2), 165–172.  
 Yatagai, A. *et al.* (2012) *Bull. Amer. Meteor. Soc.* **93**, 1401–1415.

## 研究課題名 放射スキームの高速・高精度化

共同研究者

関口 美保 (東京海洋大学 学術研究院)

坂西 溪 (東京海洋大学大学院)

中島 映至 (JAXA/EORC)

竹中 栄晶 (JAXA/EORC)

橋本 真喜子 (JAXA/EORC)

### 1. 研究目的

気候システムの中での放射過程とは、大気を駆動するエネルギーの分布を解くことであり、これをモデル中で再現することは気象・気候を読み解く上で重要である。大気海洋研究所で開発されている放射コードは大きく分けて2種類（広帯域放射伝達モデル *mstrnX*、狭帯域放射伝達モデル *star* シリーズ）あり、様々な研究分野において活発に利用されているが、それぞれ気体吸収の精緻化や高速化など、更新が必要な状態である。本研究では、主に気体吸収過程の高精度化を目指して研究を進める。

### 2. 研究内容

今年度は昨年度に引き続き広帯域放射伝達モデル *MstrnX* の気体吸収テーブルについて主に更新を行った。昨年度は赤外域のみであった更新部分を近赤外域にも拡張し、二酸化炭素の吸収帯を考慮しているバンド以外についても更新を行った。しかし、本更新を加えたパラメータテーブルをそのまま最新版の MIROC に導入して計算を行ったところ、20 世紀実験の再現性が悪く、CMIP には用いられないことになった。そのため、本更新による影響を精査する必要があると考え、バンドを1つずつ更新後のものに入れ替え、影響について考察を行った。

### 3. 研究成果

放射テーブルの更新において、気体吸収線データベースを HITRAN2004 から HITRAN2012 に更新した。最適化の手法においては、設定する初期値

を二通り（completely correlated および uncompletely correlated）、最適化中に積分点を減らしていく方法と増加させる方法の二通り、計四通り行い、最も差の少ないものを選択した上で、放射強制力の誤差が  $0.1\text{W/m}^2$  以下の結果を採用した。これより、昨年度作成した気体吸収テーブルは 29 バンド 144 点から、29 バンド 147 点に更新された。放射コードのみの計算では、どのバンドでも誤差が小さくなり、4 倍増状態での再現性が向上した。

*mstrnX* では、太陽放射領域と地球放射領域は完全に分離して考えていたが、MIROC の近赤外領域において、太陽入射と赤外射出の両方を同時に考慮するバンドを設定することとしたため、今回の更新では近赤外領域のバンドについて、太陽入射、赤外射出の両方を考慮した場合について最適化手法を適用した。しかし、この領域では最適化手法による収束が難しく、誤差を十分に小さくすることができなかった。これは、大気上端から大気中を伝達する太陽入射と、地表面及び地球大気から射出される射出の光路長が大きく異なるためと考えられる。このため、両方の放射伝達を同時に考慮するのは難しいという結論に至った。諸外国の他の放射伝達コードも、この 2 つは別々に考慮されており、*mstrnX* でも別に取り扱うのが望ましいと考えられる。この改良には放射テーブルだけでなく本体を更新する必要があるため、来年度以降に取り組む予定である。

また、本更新を加えたパラメータテーブルをそのまま最新版の MIROC に導入して計算を行ったところ、放射収支としては良い結果が得られたが、20 世紀の気温上昇を再現する実験では、更新前のものと比べて弱かった（図 1）。その他の物理過程が更新前の放射テーブルに合わせて調整されていることが主な原因として挙げられる。そこで、放射テーブル変更の影響を定量的に評価するため、更新したバンドを一つずつ更新前のものに入れ替え、バンドごとの影響の調査を行った。

AGCM で pi-control10 年積分、海面水温固定とし、後半 6 年間平均を比較した。共通して偏差が大きい場所は、陸上ではチベット、中東、アルゼンチン、会場では ITCZ、亜熱帯域、極域であった。エネルギー収支



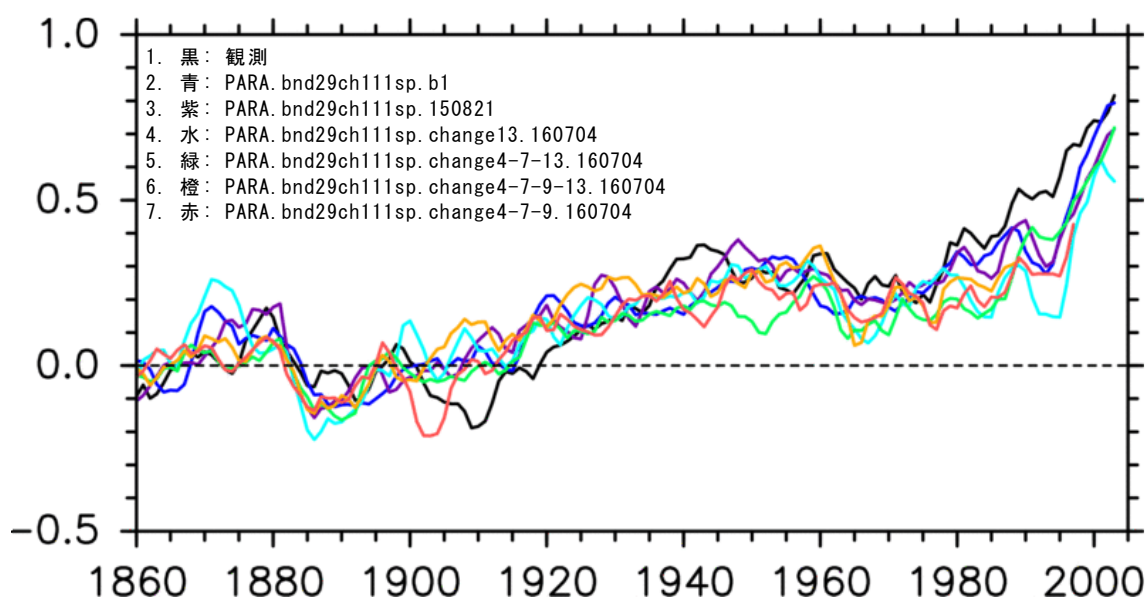


図1：20世紀の気温上昇と放射テーブルごとの再現実験の結果（提供：JAMSTEC 建部博士）

にも影響が現れたが、中高緯度域では雲の変化による影響が大きく現れた。これにより、全雲量も最大 0.05 程度変化し、特に上層の雲量の応答が見られた。今回は 10 年積分で変化を見たため、雲量の変化の応答を見るのであればもっと長い期間の積分が必要と考えられる。

#### 4. 今後の課題

本更新において吸収線データベースを更新しているが、連続吸収プログラムについては、平成28年7、12月に更新が行われたため、まだ未着手である。今年度判明した近赤外域の取り扱いの変更と合わせて、気体吸収テーブルの再更新および *mstrnX* 本体の更新を行っていく予定である。また、大粒子による散乱の導入も継続して行う。

また、今年度行った、放射テーブルによる MIROC への影響評価についても引き続き研究を進める。これにより、放射伝達モデルによるエネルギー収支、温度場や水蒸気、雲への影響が明らかになることが期待できる。ブラックボックスとして扱われることの多い放射伝達モデルの理解が進むことも期待できる。

**研究課題名：** 異常気象とその予測可能性に関する研究

**共同研究者名：** 向川 均 （京都大学防災研究所・教授）

榎本 剛 （京都大学防災研究所・准教授）

時長 宏樹（京都大学防災研究所・特定准教授）

### **研究目的：**

本研究課題では、異常気象に関連する大気大循環の変動を長期間の全球客観解析データの解析から明らかにするとともに、大気大循環モデルを用いた数値実験や予報データの解析などによって、その変動メカニズムと予測可能性を解明することを目的としている。

### **研究内容：**

2007年3月初旬に生じた下部成層圏での惑星規模波下方伝播事例の予測可能性と、下方伝播が生ずるメカニズムを解明するため、気象研究所アンサンブル予報実験システムを用いて実施した、毎日12UTCを初期時刻とする高頻度のアンサンブル再予報実験結果の解析を行った。

### **研究成果：**

#### **（1）実験設定**

本研究では、気象研究所大気大循環モデル (MRI-AGCM, Mizuta et al., 2006; 2012) を用いた。モデルの設定はNoguchi et al. (2016)と同様に、水平解像度を TL159（水平格子間隔は約 110 km）、モデル上端を 0.1 hPa、鉛直層数は60層とした。オゾン分布は帯状平均気候値で与え、海面水温は、初期時刻に観測された偏差を時間変動する気候値に加えた値で指定した。また、各予報の積分期間は34日で、毎日12 UTCを初期時刻とする25メンバーからなるアンサンブル予報を実施した。初期値は、成長モード育成（Breeding of Growing Mode; BGM）法によって生成される摂動を、解析値として用意した ERA-Interim 再解析データに符号を加味して付け加えることにより用意した。すなわちアンサンブル予報は、摂動を含まないコントロールメンバー1個と、摂動を含む24個のメンバーによって構成される。

## (2) 下方伝播の予測可能期間

成層圏惑星規模波の下方伝播を、100hPa等圧面の北緯65度以北で領域平均したE-Pフラックスの鉛直成分の値（以下、EPz100）で評価した（Fig.1）。また、解析値では、EPz100（Fig.1の青線）は2007年3月5日（以下、day 0）で極小となるため、day 0でのEPz100予測値に着目した。すると、Fig.1から、day -6（2007年2月27日）を初期値とするアンサンブル予測では、ほぼ全てのメンバーが、day 0にEPz100が負となることを予測している。一方、day -8以降を初期値とするアンサンブル平均予測値では、day 0でのEPz100が負となる。従って、この成層圏惑星規模波の下方伝播イベントの予測可能期間はおよそ8日間程度と見積もられる。

一方、day 0でのEPz100予測値のスプレッドは、予測期間が長くなるほど大きくなる（Fig. 1）。ただし、day -11を初期値とするアンサンブル予測では、多くのメンバーでday 0のEPz100予測値は正となるが、day -9が初期値の場合には、逆に負となるメンバー数が多くなる。このため、両者のメンバー数がほぼ等しいday -10（2007年2月23日）を初期値とするアンサンブル予測を用いて、day 0でのEPz100予測値と関連する循環場について相関解析を行った。

## (3) 回帰分析

ここでは、day -10（2007年2月23日）を初期値とするアンサンブル予測の全25メ

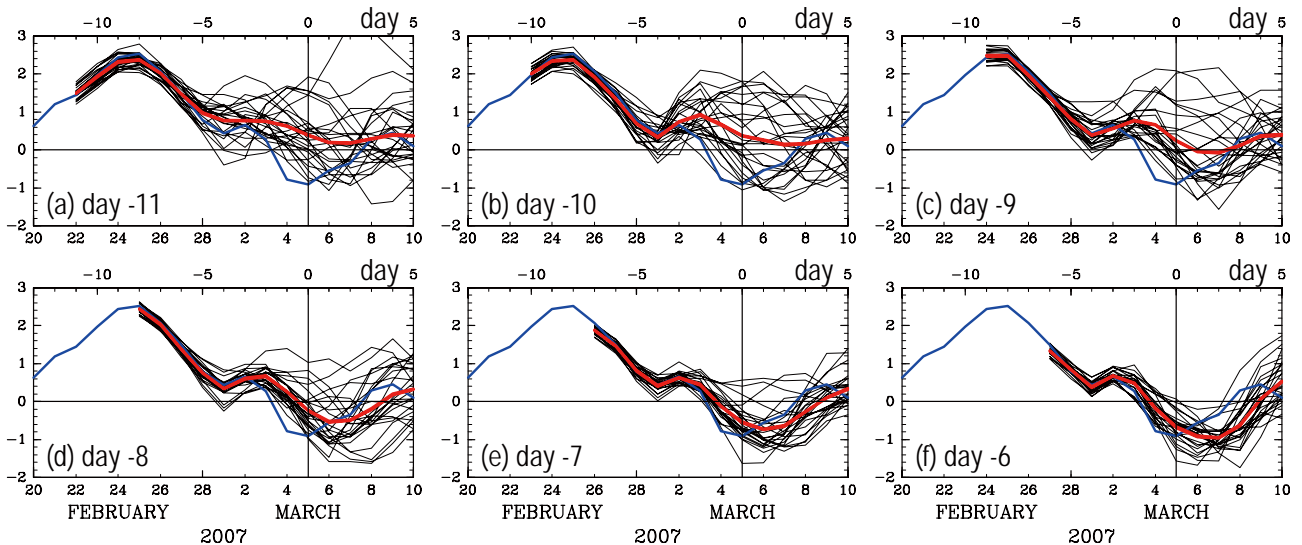


Fig. 1 Time evolution of EPz100 (unit;  $10^5 \text{ kg s}^{-2}$ ). Blue lines indicate the analysis, black lines the prediction of each ensemble member, and red lines the corresponding ensemble mean. The date corresponding to day 0 (5 March 2007) is denoted by the vertical line in each panel, and the initial date of the forecast is shown in the left-bottom corner of each panel.

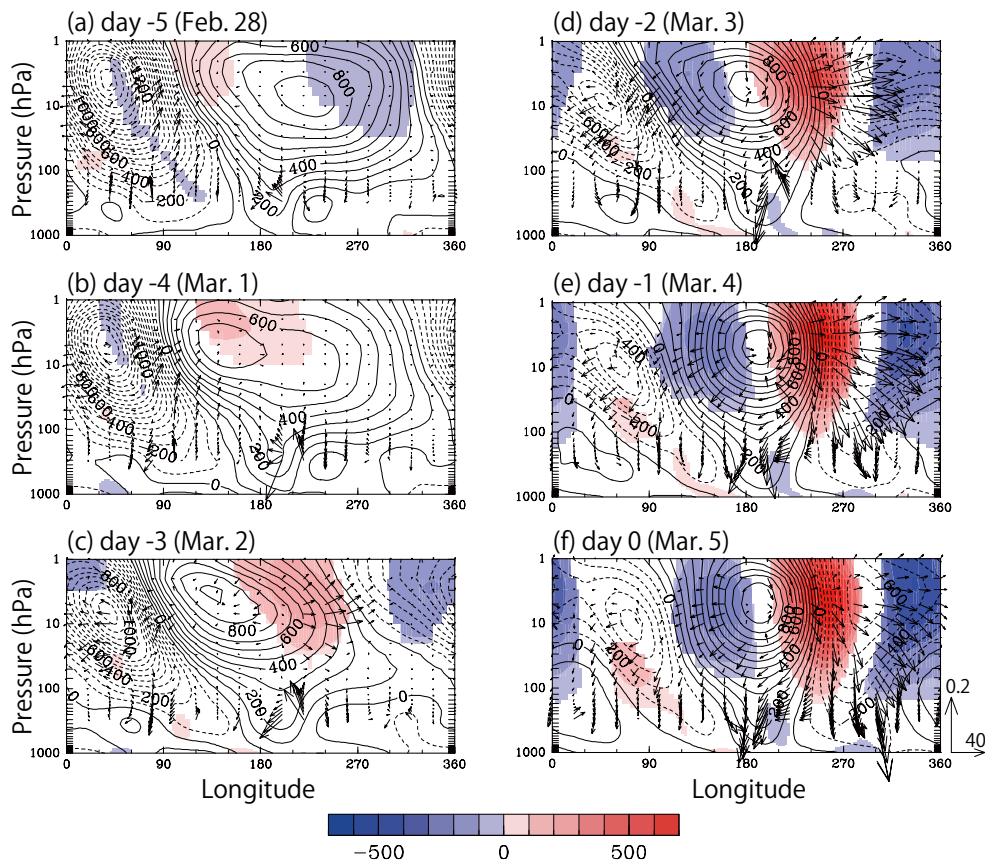


Fig. 2 Longitude-height cross section of the ensemble mean (contour; unit: m) and the regressed anomaly (color shade; unit: m) of the predicted eddy geopotential height averaged over  $60^{\circ}\text{N}$ – $70^{\circ}\text{N}$  with respect to EPz100 on day 0. The arrows indicate vertical and zonal components of the anomalous 3-D Plumb flux above 300 hPa (unit:  $\text{m}^2 \text{s}^{-2}$ ) associated with the composited (ensemble mean plus regressed anomaly) eddy height field. Contour interval is 100 m. Regions where the regressed anomaly has a statistical significance at 95 % are shaded with different tones designated by the bottom color bar. The 3-D Plumb flux is scaled by the inverse of the pressure. Arrows at the right bottom indicate the scale of longitudinal and vertical components of 3-D Plumb flux at 1000 hPa.

ンバー予測値を用いて、day 0におけるEPz100予測値と関連する循環場について回帰分析を行った。

Fig. 2の色塗りで、北緯60度から70度で平均した東西非一様高度場の回帰偏差を、等値線でそのアンサンブル平均予測値を示す。なお、Fig. 2では、EPz100が負、すなわち、下方伝播が生ずる場合の回帰偏差場を示す。また、図の矢印は、回帰偏差とアンサンブル平均予測場との合成場に伴う3次元波活動度フラックス (Plumb, 1985) の、アンサンブル平均予測場に伴うそれからの偏差を示す。

まず、アンサンブル平均予測場を見ると、惑星規模波束に伴う波活動度はday -5からday -3の期間で、西ユーラシア上空の東経90度付近において対流圏から成層圏に上方伝播していることが分かる。この上方伝播に伴い、惑星規模擾乱の位相は高さとともに西に傾く。上方伝播した波活動度は、成層圏中層で東向きに伝播し (day

-2と day -1) 、それに伴い日付変更線付近の高気圧性偏差の振幅が次第に大きくなる。そして、day -1以降では西半球側で高度場の位相はほぼ鉛直に立ち、惑星規模擾乱の鉛直構造はほぼ順圧的となる。このため、アンサンブル平均予測場では、成層圏下層での波活動度の下方伝播はほとんど認められない。

次に、回帰偏差場に注目すると、day -5やday -4では、対流圏内には有意な偏差は存在しないことが分かる。また、3次元波活動度フラックスの上向き偏差も、成層圏下部の東経90度付近を中心にわずかに認められるが、持続性はなく組織的でもない。一方、day -5に成層圏中上層の東経120度付近に存在する正偏差領域は次第に東進し、day -3以降では日付変更線を越えて西半球側で次第に定在的となり増幅する。また、西経50度付近と東経120度付近では負偏差が発達し始める。しかも、高度偏差場は順圧的で、その東西位相はアンサンブル平均予測場とはほぼ1/4波長ずれている。このため、アンサンブル平均予測場と回帰場との合成高度場の位相は西半球側の成層圏下層で高さとともに東方向に傾き、波活動度の下方伝播が顕著となる。一方、対流圏内には高度場の顕著な回帰偏差は存在しない。このように、対流圏ではなく成層圏に起源を持つ順圧的な擾乱が下方伝播と有意に関連することが明らかになった。

さらに、上部成層圏における循環偏差は、高度場のアンサンブルスプレッドの第1主成分とほぼ同じ水平構造を持ち、上部成層圏でのスプレッド増幅率は下方伝播直前に極大となることも示された。これらのことは、この循環偏差は、上部成層圏循環の力学的不安定性に起因して自励的に成長する不安定モードであることを強く示唆している。

### 今後の問題点：

非発散順圧渦度方程式を用いた固有値解析を実施し、この循環偏差と上部成層圏循環の力学的不安定性との関係について詳しい解析を行う。

## 一般共同研究

「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」

## 共同研究者

建部洋晶（課題代表）<sup>1</sup>

田中幸夫<sup>2</sup>，鈴木立郎<sup>1</sup>，小室芳樹<sup>3</sup>，黒木聖夫<sup>1</sup>，小野純<sup>2</sup>

1: 国立研究開発法人 海洋研究開発機構 統合的気候変動予測研究分野

2: 国立研究開発法人 海洋研究開発機構 気候変動リスク情報 PT

3: 国立研究開発法人 海洋研究開発機構 北極環境変動総合研究センター

## 研究目的

季節から地球温暖化スケールの気候変動予測精度の向上及び不確実性の低減に資するため、気候モデルの主要素の一つである海洋大循環モデルの精緻化を行う。また、予測可能性の検証及びこれに関わる物理プロセスの解明に取り組み、ここから得られる知見をモデル精緻化作業へフィードバックする。今年度は、北極海氷及び環北極気候の予測可能性を、理想的条件下での気候モデル実験を実施することで検証した。

## 研究内容

極域海洋特有の海氷とその変動は、地球規模での気候変化のみならず物質循環や海洋生態系に影響を及ぼす要因の一つである。とりわけ、北極海は地球温暖化の影響を強く受ける海域の一つであり、近年の夏季北極海での急激な海氷減少は日本を含む中緯度気候への影響や北極航路の利用という観点から、科学的・社会的関心を集めている。

先行研究によると、北極海の家氷面積および海氷体積にはそれぞれ 1～2 年および 3～4 年の潜在的予測可能性のあることが示されている。一方、これまでの研究では、2007 年や 2012 年 9 月の北極海で観測された海氷急減という極端な現象についての予測可能性については十分に議論されていない。本研究では、北極海氷の変動メカニズムと予測可能性を調べることを目的とし、気候モデル実験を実施した。使用したモデルは MIROC5.2 である。西暦 2000 年の外部境界条件下で約 1000 年間の長期積分を実施し（リファレンス実験）、最後の 200 年間データを解析には使用した。

リファレンス実験から得られた 9 月の海水面積および海水体積の時間変化(図 1)から, 衛星観測で捉えられたような海水大激減イベントが 200 年間で 2~3 度起こっていることがわかる. 大激減年の海水面積および海水体積の減少率は, 200 年の平均値に対して 25% および 45% 程度であった.

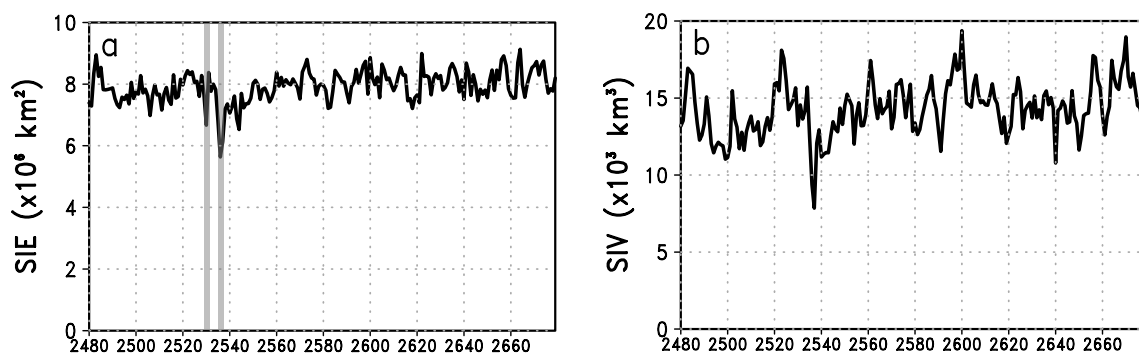


図 1. リファレンス実験から得られた環北極域における 9 月の(a)海水面積と(b)海水体積の時系列. 図 a 中の灰色陰影は 2530 年と 2536 年の激減年を示す.

図 2 は最も海水面積が減少した 2536 年 9 月の海水密接度および海水厚の空間分布を示す. 海水密接度はロシア側の海域で顕著に低く, 2007 年 9 月の海水分布とよく似た特徴を示している. 多氷年との差を取ると, 海水はロシア側の沿岸から北極点までの広い範囲で 40~80% の低密接度化が起こり, 厚さは 2m も薄くなっていた (図略). 衛星観測が捉えた 2007 年 9 月の海水大激減の原因は先行研究により議論されているが, その一つは 2007 年 7~8 月に現れたポーフォート海上の高気圧とラプテフ海上の低気圧で特徴付けられる海面気圧のダイポールアノマリー構造である. これに伴う風系場が海水をロシア沖合へ押し流したことで開放水面の面積が増加し, 大激減につながったと考えられている.

図 3 は 2536 年大気場と海洋・海水場の空間分布を示す. 2536 年晩春~夏の海面気圧場は, ポーフォート海上に高気圧偏差, カラ海上に低気圧偏差という特徴を示している. 低気圧偏差の場所は観測と異なるものの, 海面気圧のダイポール構造が認められる. この海面気圧偏差に伴う風によって海水は沖合へ移動し (図 3b のベクトル), 氷縁位置は 7 月(図 3b の青色)から 8 月(図 3b の橙色)にかけて大きく後退した. また, 7 月と 8 月の氷縁位置の間で 0.5~2psu の低塩化が起こっている. 8 月と 9 月の氷縁位置 (図 3b の橙色と赤色)はほとんど変わらないことから, 6 月から 8 月にかけての海



面気圧ダイポール構造に伴う風によって海水が沖合へ押し流れたことで海水域が大きく後退し、開放水面域に入射した熱によって海水融解が促進されたことが海水激減につながったと推察される。

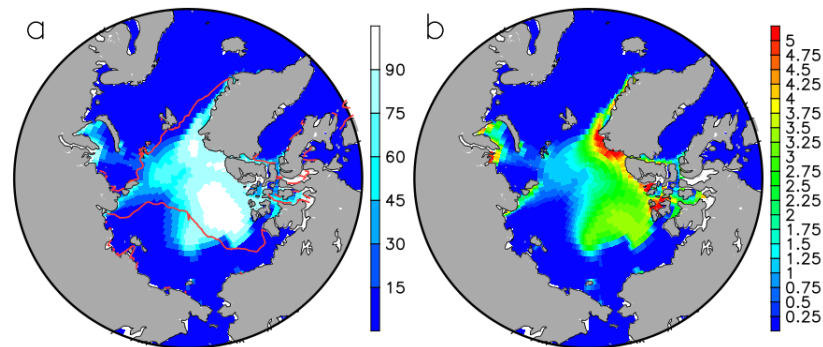


図 2. 海水大激減年（2536 年）9 月における(a)海水密度度(%)と(b)海水厚(m)の空間分布. 図 a の赤線は 2007 年 9 月における観測の氷縁位置（海水密度度 15 %で定義）を示す.

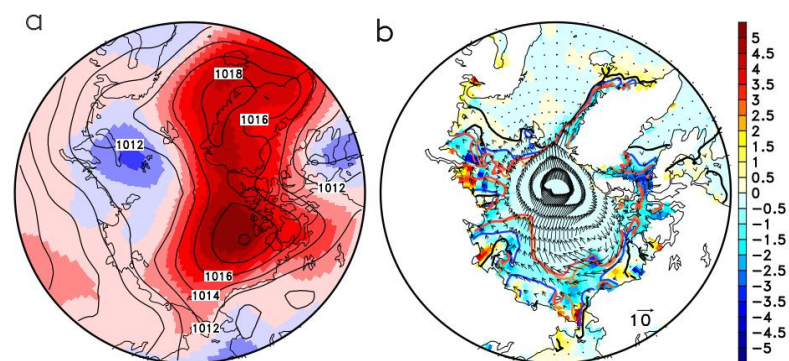


図 3. (a) 2536 年の 6~8 月平均の海面気圧偏差(色塗り)と海面気圧(等値線). (b) 2536 年の 7 月から 8 月にかけての海面塩分変化（色塗り）, 7 月の海水速度(ベクトル), 氷縁位置（黒色: 6 月, 青色: 7 月, 橙色: 8 月, 赤色: 9 月）を示す.

上で述べた海水大激減の予測可能性を調べるため、パーフェクトモデルによる予測実験を行った。予測開始月は 2535 年 10 月, 2536 年 1 月, 2536 年 4 月, 2536 年 7 月の 4 ケース, アンサンブル数は 8 とした。予測初期値は標準偏差  $10^{-4}$  K の空間的にランダムなガウシアンノイズをリファレンスランの海面水温場に加えることで作成した。図 4 は、予測された海水面積偏差と RMSE のリードタイム依存性を示す。対象前年 10 月及び対象年 1 月開始の場合、モデルは冬季を除いてリファレンスランの結果を予測できていない。一方、4 月あるいは 7 月開始の場合、モデルは海水激減を予測できている。



RMSE で判断すると, 4 月開始の場合はリードタイム 5 ヶ月, 7 月開始の場合はリードタイム 7 ヶ月まで連続的にスキルが高いと言える.

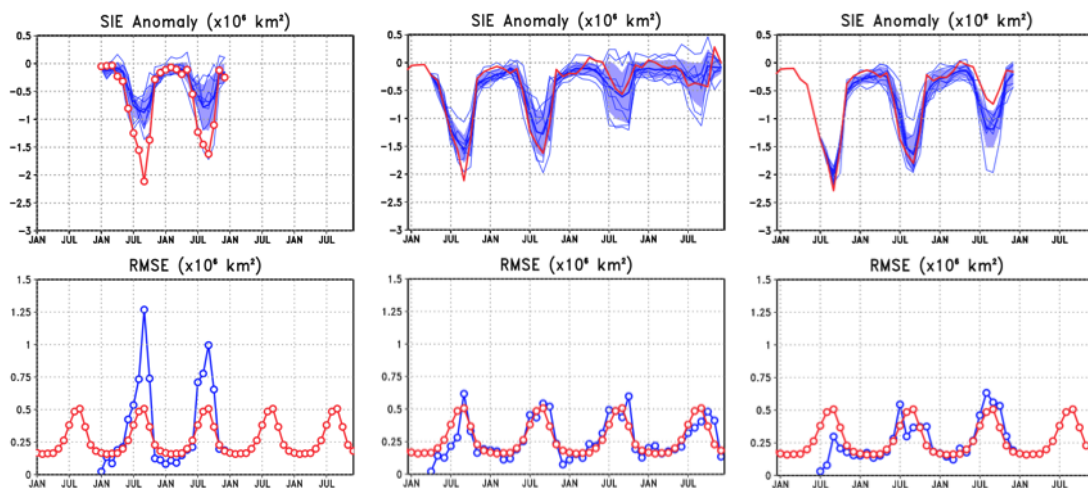


図 4. 2536 年(左)1 月, (中)4 月, (右)7 月開始の予測実験から得られた海氷面積偏差 (リファレンス実験の 200 年間月別気候値からの偏差)と RMSE のリードタイム依存性. 青色:予測, 赤色:リファレンス実験. 海氷面積偏差の青塗りはスプレッド, RMSE の赤色はリファレンス実験の月別標準偏差をそれぞれ示す.

図 5 は, リファレンス実験と予測実験から得られた 2536 年 9 月の海氷密接度の空間分布を示す. 1 月開始の予測実験の氷縁位置はリファレンス実験よりも低緯度側にあるのに対し, 4 月および 7 月開始の予測実験の氷縁位置はリファレンス実験とほぼ重なっていることがわかる. 7 月開始の予測実験では, 太平洋側の氷縁位置までピッタリと重なっている. 氷縁位置の違いをもたらす原因として考えられるのは, 海面気圧偏差のダイポール構造が予測できているかであろう. 図 5e-h に 6~8 月平均の海面気圧偏差と海面気圧の空間分布を示す. 7 月開始の予測実験 (図 5g)は, リファレンス実験の空間構造をかなりよく予測できていることがわかる. また, 4 月開始の予測実験 (図 5f)はダイポール構造を予測しているが, 気圧傾度が弱いため太平洋側の海氷残存に影響を与えたと推察される. 一方, 1 月開始の予測実験 (図 5e)では, カラ海上も高気圧偏差となり, ダイポール構造が予測できなかったために海氷がより多く残ったと考えられる.

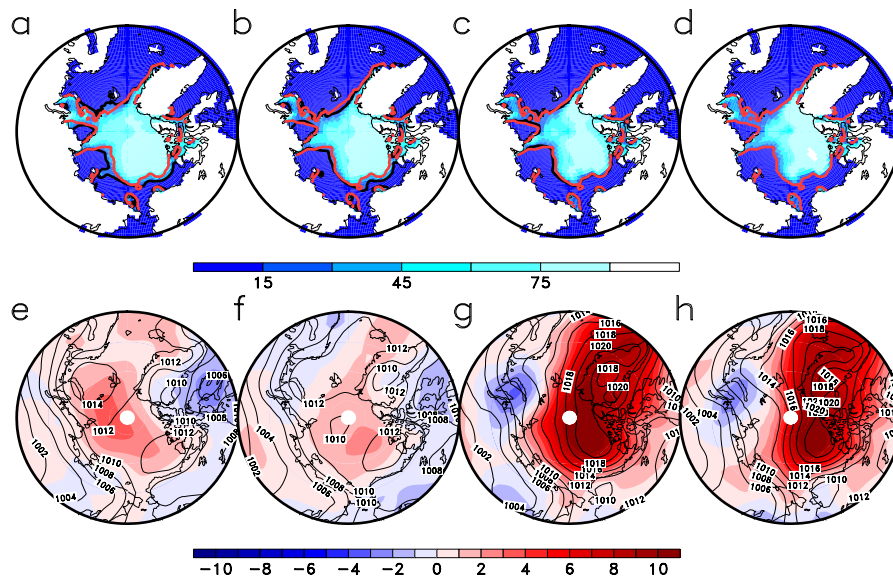


図 5. 2536 年(a) 1 月, (b) 4 月, (c) 7 月開始の予測実験および(d)リファレンス実験から得られた 2536 年 9 月における海水密接度(色塗り, %)の空間分布. 図中の赤線と黒線はそれぞれリファレンス実験と予測実験の氷縁位置(海水密接度 15%で定義)を示す. 2536 年(e) 1 月, (f) 4 月, (g) 7 月開始の予測実験および(h)リファレンス実験から得られた 2536 年 6~8 月平均の海面気圧偏差(色塗り, hPa)と海面気圧(等値線, hPa)の空間分布.

以上のことから、リファレンス実験の大激減イベントに関しては、ボーフート海上の高気圧偏差とカラ海上の低気圧偏差からなる海面気圧偏差のダイポール構造が予測できるかどうか海水分布の予測に極めて重要であったと結論付けられる。しかしながら、200 年間で海面気圧偏差のダイポール構造は何度も起こっていたにも関わらず、大激減につながった年は 2530 年と 2536 年の二度だけである。他の重要な気候変動モードとの重ね合わせが重要であることは容易に想像できるが、今後の課題として現在解析中である。

平成 29 年 3 月 31 日

・研究課題名（一般共同研究）

地表面状態の変化による大気水循環への影響

・共同研究者名（所属）

高橋洋（首都大学東京）、神澤望（首都大学東京）

・研究目的

気候変動により大気水循環がどのように変化するかについて、地表面状態の変化による、大気水循環への影響を定量的に見積もることを目指す。人間活動で想定される地表面状態の変化により、どのようなプロセスの変化が相対的に大きいのかについて（地表面のエネルギー収支による効果、雲が変わる効果、循環が変わる効果など）大雑把に分離できる可能性があり、大気水循環変動の理解にもつながる。

・研究内容

平成 28 年度に引き続き、気候変動により大気水循環がどのように変化するかについて、地表面状態の変化に着目し、調査する。全球気候モデルの土壌水分について年々変動を含む土壌水分の観測値を境界条件として設定し、地表面と大気の結合をあり／なしの条件（初期値のみかもしくは、適当な時定数でナッジング）で実験により、どのような地域で大気水循環や地表面のエネルギー収支に影響が大きいのかを調べる。また可能であれば、大規模なアンサンブルデータセット (d4pdf) などを利用し、地表面状態の大気水循環への影響を定量的に評価する。

・研究成果

地表面状態の変化による大気水循環への影響を、大規模な AMIP 型のアンサンブル実験から抽出する方法を検討するため、まずは、比較的簡単に調べられる海面水温の影響の評価から着手した。一般的に、熱帯域では、海面水温が降

水量変動に大きく寄与していると考えられているが、本研究で利用した実験データでは、海面水温の影響は、限られた地域のみで抽出できた。つまり、これまでの研究で指摘されているよりも、海面水温の影響は限定的かもしれないというのが、現時点での結論である。この研究結果については、現在投稿中のため、公表できる段階になり次第、すぐに公表する。

・今後の問題点

一般的に海面水温よりも地表面状態の影響は、検出が難しいため、今後どのような解析や実験を行うかについて、引き続き検討したい。

## 研究課題名

地球型惑星の古気候と気候変動の研究

## 共同研究者名

黒田剛史・笠井康子・鷲和俊 (情報通信研究機構)

笠羽康正・寺田直樹・中川広務・青木翔平・鎌田有紘 (東北大学大学院理学研究科)

佐川英夫 (京都産業大学)

阿部彩子 (東京大学大気海洋研究所)

## 研究目的

火星の気象については、前世紀末より Mars Global Surveyor、Mars Express、Mars Reconnaissance Orbiter といった探査機が次々と火星周回軌道に投入され、それらによって既に数火星年分に渡る膨大な量の大气観測データ(温度、ダスト・氷雲・水蒸気の光学的厚さおよび混合比)が蓄積されている。さらに2016年10月に火星軌道に投入された欧州・ロシアの火星探査機 ExoMars Trace Gas Orbiter は、HDO/H<sub>2</sub>O 同位体比や大气微量物質にも焦点を当てた研究を予定している。火星大气大循環モデル(MGCM)は、それらから力学・放射・輸送・化学のメカニズムなどの科学的な解釈を引き出す上で重要な役割を果たす。

また、現在の火星環境は非常に寒冷・乾燥していて、液体の水の存在はほぼ絶望視されているが、これまでの観測から過去の火星地表面に液体の水が潤沢に存在した証拠を示す地形がいくつも発見されていることから、太古の火星は液体の海が存在するほどの温暖な環境であったと考えられている。MGCM は現在よりも大气が濃かったと考えられる火星古気候の再現実験にも用いられているが、現在よりも弱い太陽活動の影響もあり、先行研究[Forget et al., 2013]では液体の海が存在できるような環境の再現には至っていない。さらに気候変動においては、下層大气でみられる現象が熱圏・電離圏に及ぼす影響に迫る「大气上下結合過程」の研究が昨今注目を集めている。2014年9月に火星周回軌道に投入された米国の火星探査機 MAVEN は、その過程の観測的研究を進めている。

本研究では MGCM を用いて、太古の火星環境と現在の水環境に迫るとともに、下層大气で生成される大气重力波が中間圏・下部熱圏に与える影響に着目し、水平高分解能 MGCM を用いた理論研究も進めている。合わせて比較惑星気候学の見地から、金星大气の気候についても JAXA の金星探査機「あかつき」との連携を見据えて、金星大气大循環モデル(VGCM)を用いた研究に取り組んでいる。

## 研究内容

DRAMATIC (Dynamics, RAdiation, MAterial Transport and their mutual InteraCtions)

MGCM と名付けられた MIROC モデルをベースとした MGCM は、今日までに大気力学について数多くの科学的成果を挙げており [Kuroda et al., 2013 など]、水平高分解能計算による重力波の研究にも用いられている [Kuroda et al., 2015]。また MIROC モデルをベースとした VGCM についても、硫酸蒸気の生成・消滅に係る大気化学過程を導入することにより、現実的な雲生成過程の再現に至っている [伊藤, 2016]。本課題ではこれらの実績を土台に、火星については古気候や現在の環境における水循環の再現実験、主に季節依存性に焦点を当てた重力波の生成と伝播の研究に取り組み、金星については硫酸雲モデル・放射コードの改良を行うことで、地球型惑星の気候を決定するメカニズムについて多角的な研究を進めた。

## 研究成果

### 1. 火星古気候のシミュレーション

現在の火星表面に水が流れた痕と思われる地形が赤道域を中心に多く発見されていることから、現在の地球と同等の地表面気圧を持っていたと考えられている35~40億年前の火星環境をターゲットにDRAMATIC MGCMを用いたシミュレーションを行い、液体の水が存在しうる条件を探る研究に着手した。現在の75%の太陽放射強度を仮定した上で、地表面気圧が0.1~5気圧の純粋二酸化炭素大気についての計算を進めており、放射効果にはCO<sub>2</sub>分子同士のcollision induced absorption(衝突誘起吸収)も含めたCO<sub>2</sub>分子の赤外放射及び近赤外太陽光吸収を導入している。またCO<sub>2</sub>氷雲の生成とその放射効果も、オプションとして導入している。

計算結果の一例を図1に示す。過去の火星において起こりうる様々な離心率・軌道傾斜角を仮定した計算も行ったが、現状の仮定では先行研究[Forget et al., 2013]による示唆と同様、CO<sub>2</sub>氷雲の放射効果の有無に関わらず液体の水が安定して存在する温度の再現は困難であり、実現するとしても離心率0.15以上、軌道傾斜角10度以下という発現可能性0.008%の条件が必要である。今後は水循環の導入や地表面パラメータ(熱慣性など)についても様々なパラメータでの計算を試し、引き続き液体の水が安定して存在する環境の再現に向けたシミュレーション研究を行う。

### 2. 火星大気水循環シミュレーション

DRAMATIC MGCMを用いた水循環及びHDO/H<sub>2</sub>O同位体分別のシミュレーションについて、学会発表を行った[Kuroda, 2017]。現状の主な課題は、氷雲の放射効果を入れた結果が非現実的なことで、雲微物理過程の導入・改良が必要と考えられる。今後はベルギーのExoMars Trace Gas Orbiter測器チームと緊密に連携し、このモデルを活用した火星の水環境・大気化学過程の研究を進める予定である。

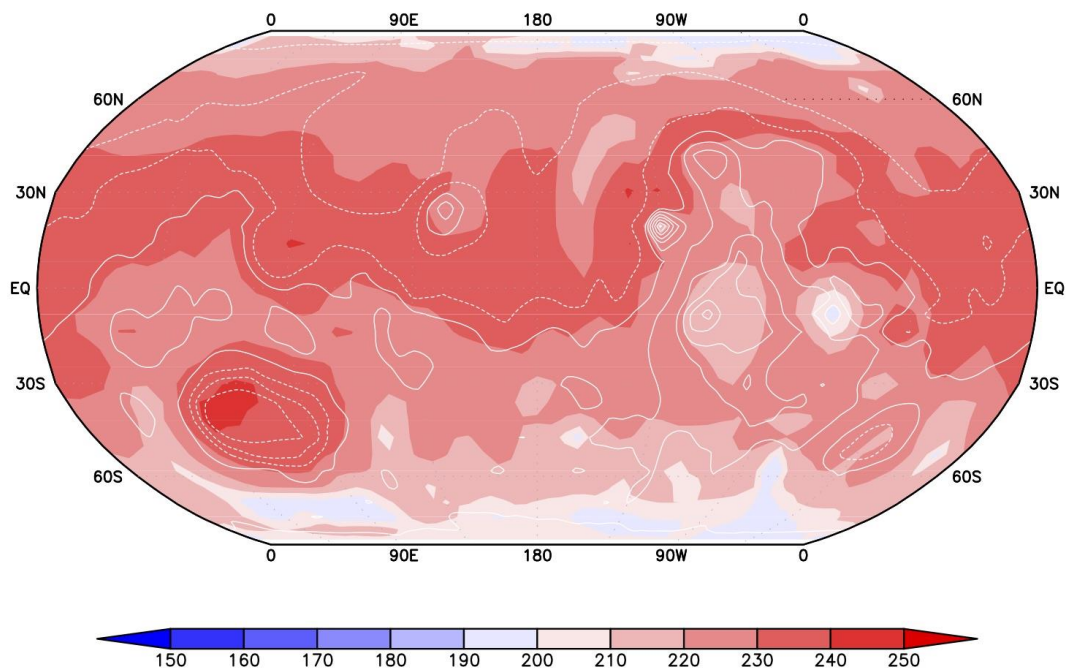


図 1：火星古気候の計算結果の一例として、平均地表面気圧を 1000hPa に設定した場合の年平均地表面温度の計算結果。現在の 75%の太陽放射強度、円軌道、現在と同様の軌道傾斜角(約 25 度)を仮定、CO<sub>2</sub> 氷雲の放射効果は考慮していない。

### 3. 火星大気の高分解能シミュレーションから見られる重力波の励起・伝播

前年度に引き続き、水平高分解能(T106) DRAMATIC MGCMを用いた重力波の励起・伝播の研究を進めた。1火星年通した高分解能計算を行い、重力波の特徴の季節変化を解析して、北半球秋分と北半球冬至の結果の比較及び水平波数別の効果をまとめた論文がJournal of the Atmospheric Scienceに掲載された[Kuroda et al., 2016]。またこの高分解能計算の結果はMAVENミッションで得られた観測データとの比較検証にも用いられ、合わせて論文発表に至っている[Medvedev et al., 2016; Terada et al., 2017]。

### 4. GCMを用いた金星の硫酸雲分布の研究：雲放射の影響

前年度までに硫酸雲の生成・消滅過程と硫酸蒸気の生成源となる SO<sub>3</sub>, SO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O の大気化学過程を導入した VGCM を開発し、低・中緯度において現実的な雲分布の再現に至った[伊藤, 2016]が、モデルの中で得られる硫酸雲分布の変動が大気放射過程に反映されていなかった(水平一様、鉛直方向固定の雲分布を仮定)。今年度は雲分布の変化を大気放射過程に反映させるように VGCM の改良に着手し、それによって雲分布は従来よりも上方及び極域方向への移流が促進される結果が得られた(図 2)。今後は金星探査機「あかつき」で得られる雲画像との比較を通して、金星の雲と循環についてより深いアプローチを行う。



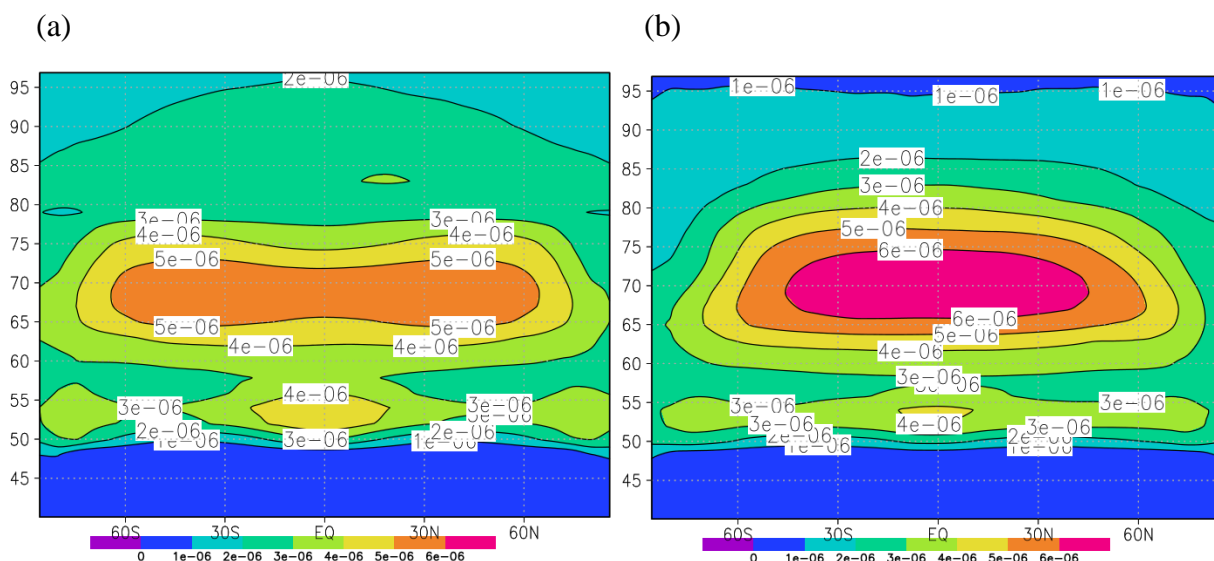


図 2：モデル内での硫酸雲分布の変化が大気放射過程に反映されたモデル(a)と、反映されず大気放射過程では空間・時間一様の雲分布を仮定したモデル(b)についての経度平均の硫酸雲質量混合比の計算結果の比較(縦軸:高度[km]、横軸:緯度)。

## 今後の問題点

火星については水循環スキームの改良、大気化学過程の導入、そして上端高度を150km程度にまで上げて、重力波などの力学過程に加え下層の水・物質循環と上層における水素・酸素原子の散逸過程との絡みについての理論研究に今後着手する。金星については雲と放射についてより現実的なシミュレーションが行えるような改良を施し、「あかつき」観測との詳細な比較を通してその気候メカニズムにアプローチする。

## 参考文献

- Forget F. et al., 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, 2013.
- 伊藤一成, GCM study of the Venusian cloud formation and distribution: Effects of atmospheric chemistry and circulation, 修士論文, 東北大学大学院理学研究科, 2016.
- Kuroda T. et al., Carbon dioxide ice clouds, snowfalls, and baroclinic waves in the northern winter polar atmosphere of Mars, *Geophysical Research Letters*, **40**, 1484–1488, 2013.
- Kuroda T. et al., A global view of gravity waves in the Martian atmosphere inferred from a high-resolution general circulation model, *Geophysical Research Letters*, **42**, 9213–9222, 2015.
- Kuroda T. et al., Global Distribution of Gravity Wave Sources and Fields in the Martian Atmosphere during Equinox and Solstice Inferred from a High-Resolution General Circulation Model, *Journal of the Atmospheric Science*, **73**, 4895–4909, 2016.
- Kuroda T., Simulation of the Water Cycle Including HDO/H<sub>2</sub>O Isotopic Fractionation on the Present Mars Using DRAMATIC MGCM. Abstract book of 'Sixth international workshop on the Mars atmosphere: modelling and observations', University of Granada, Granada, Spain, 2017.
- Medvedev A.S. et al., Comparison of the Martian thermospheric density and temperature from IUVS/MAVEN data and general circulation modeling. *Geophysical Research Letters*, **43**, 3095–3104, 2016.
- Terada N. et al., Global distribution and parameter dependences of gravity wave activity in the Martian upper thermosphere derived from MAVEN/NGIMS observations, *Journal of Geophysical Research Space Physics*, **122**, 2374–2397, 2017.



## 一般共同研究

研究課題名：惑星中層大気大循環の力学

共同研究者（所属）：山本 勝（九大・応力研），角田 裕磨（九大・総理工），  
西田 侑加（九大・総理工），佐藤 正樹（東大・大気海洋研）

### 研究目的：

金星のように厚い雲で覆われた天体では，特有の大気大循環や雲の構造（スーパーローテーション，Y字形雲模様，極域渦）が観測されている．しかしながら，これらの大気力学的な理解は十分ではない．本研究では，

- （1）厚い雲で覆われた惑星の大気大循環の力学を解明すること
- （2）金星下層大気擾乱が中層大気スーパーローテーションの維持および崩壊に及ぼす役割を解明すること
- （3）金星放射伝達を組み込んだ大気大循環モデルによる大気大循環構造を解明すること

が主目的である．

### 研究内容：

金星 GCM 相互比較実験(Lebonnois et al. 2013)を用いて，エクマン数と熱減衰数を固定し，ロスビー数が大気大循環に与える影響を調査した（上記の目的（1））．特に，極域間接循環が出現するパラメーター域の循環構造を調査した．また，地球の GCM を用いた先行研究では，自転速度の代わりに惑星半径を変えてロスビー数のみを変化させる手法も使われているが，惑星半径を変えた実験と自転速度を変えた実験の相似性について十分に検証されていない．これゆえ，惑星の自転速度と半径を変えた実験を行い，循環構造の相似性についても調査した．

目的（2）は，Yamamoto and Takahashi (2012)の金星中層大気 GCM を用いて，赤道波による中層大気スーパーローテーションの維持および崩壊について解析した．また，Yamamoto and Takahashi (2009)の GCM を用いて，金星下層大気ジェットが中層大気スーパーローテーションに与える影響について調査した．

目的（3）に関しては，金星放射伝達を組み込んだ大気大循環モデル(Ikeda 2011)を用いて，大気大循環構造を調べ，観測されている循環や波動と比較した．

## 研究成果：

中層大気雲層域の加熱で駆動する惑星大気大循環について調査した成果(詳細は前年度報告書に記載)は、Yamamoto and Takahashi (2016, *J. Geophys. Res. Planets*, **121**, 558, doi:10.1002/2015JE004983)として本年度掲載された。この研究を発展させて、惑星の自転速度と半径を変えた実験を行い、エクマン数と熱減衰数を固定し、ロスビー数  $Ro$  が大循環に与える影響を調査した。自転周期を 16 日にした実験( $Ro$  が小さい実験)では、赤道を挟んで単一の直接循環が卓越する。しかし  $Ro$  が大きくなるにつれて、雲層より下層の極域で間接循環が強くなり、240 日周期の自転にした実験では極域間接循環も卓越する。この極域間接循環は、高緯度で形成されたジェットの傾圧不安定で生じる間欠的な極向きの熱フラックスによって駆動している。 $Ro$  が小さくなるにつれて( $Ro \sim 20 \Rightarrow Ro \sim 4$ )、子午面循環が強くなり、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る。子午面循環による極向き運動量輸送の鉛直積分値は、擾乱による赤道向き運動量輸送とバランスする。その結果、Gierasch メカニズムが有効に機能し、それに伴い帯状平均東西風が強くなる。惑星半径を変えた実験については、自転速度を変えた実験と帯状平均東西風の代表値がほぼ同じになり、同じ  $Ro$  について大気大循環構造は相似となった。しかしながら、 $Ro$  が同じであっても卓越する波動の特性が異なる。したがって、自転速度の代わりに惑星半径によって  $Ro$  を変えた実験では、スーパーローテーションにおける擾乱の寄与を議論する際、注意が必要である(角田ほか, 2016 年度日本気象学会秋季大会)。

赤道ケルビン波を下端から強制した金星中層大気 GCM 実験を 8 ケース行い、東西風最大値  $U_{MAX}$ 、子午面風最大値  $V_{MAX}$ 、南北温度差最大値  $dT_{MAX}$  の時系列データの 3 変数空間の振る舞いについてまとめた。 $U_{MAX}$  と  $dT_{MAX}$  の時系列データの散布点は、雲層内の温度風関係から推定される直線に沿ってプロットされる。また、雲層より上の流線関数の診断方程式から  $V_{MAX}$  は  $U_{MAX}$  の 2 次関数として導出され、これらの散布点はこの推定曲線の周辺にプロットされる。 $U_{MAX}$ 、 $V_{MAX}$ 、 $dT_{MAX}$  空間における散布点の振る舞いは、大気大循環の崩壊の様子を明瞭に示すことができる。本研究では、「強い中緯度ジェットから弱い中緯度ジェットに遷移するタイプ」と「中緯度ジェット卓越から赤道ジェット卓越に遷移するタイプ」の 2 種の帯状風崩壊形態がみられた(山本・高橋, 日本流体力学会年会 2016)。

Yamamoto and Takahashi(2009)を用いて、温度初期値は Seiff et al.(1985)を仮定し、東西風速初期値は雲頂付近で  $100 \text{ m s}^{-1}$  になる分布を仮定した実験を行った。計算開始から 30 金星日までの間、時定数 3 日で全層の東西風を初期帯状流速場に緩和させる。その後、下層大気（およそ高度 40 km 以下）の帯状平均東西風を時定数 3 日で初期帯状流速場に緩和し、中層大気が平衡状態になるまで計算した。コントロール実験 C では初期及び下層の帯状流が  $\pm 40$  度の低緯度で等速になる分布を仮定し、実験 J では初期及び下層の帯状流が高緯度でジェットを持つ分布を仮定した。加えて、実験 Jre では、実験 J の擾乱成分を 3 日の時定数で減衰させ、波の影響を取り除いた。これら 3 つの実験を比較することで、下層大気の流れ場とそれに関連した擾乱が中層大気に与える影響を調査した。実験 C の帯状平均した東西風では、中緯度の雲層上端付近に最大風速を持つ。下層で弱い高緯度ジェットがある実験 J では、実験 C よりも中緯度のジェットが弱められ、赤道上で東西風が極大となっている。実験 J と実験 C を比較すると、下層ジェットの存在が雲層より上の高緯度東西風を  $20 \text{ m s}^{-1}$  も弱め、赤道の雲層上部の東西風を  $10 \text{ m s}^{-1}$  程強めている。実験 J の鉛直渦運動量フラックスでは、中高緯度に顕著な負のフラックスが確認されたが、実験 C では見られない。この鉛直運動量フラックスにより、高緯度上層の風速の減衰が生じたと推察される。また、下層大気の流れ成分を減衰させた実験 Jre では鉛直渦運動量フラックスや中層大気の流れが実験 C と似た構造になることから、金星下層大気ジェットに伴う擾乱が中層大気東西風構造に影響を与えていることが確認できる（西田ほか、2016 年度日本気象学会春季大会）。

金星放射伝達を組み込んだ大気大循環モデルで得られた温度および大循環構造について調査した。雲頂付近で  $120 \text{ m s}^{-1}$  の中緯度ジェットが形成され、赤道付近では  $80\text{--}90 \text{ m s}^{-1}$  の帯状平均東西風が形成される。中緯度ジェットのコアの上では  $8 \text{ m s}^{-1}$  を超える極向き帯状平均子午面流が見られ、雲層内の低緯度では  $1\text{--}2 \text{ m s}^{-1}$  程度の極向き帯状平均子午面流が見られる。モデルで得られた温度構造は金星と似ており、低緯度域では雲底付近の不安定層が形成される。低緯度では高度 40–50 km の弱い安定層が形成され、高緯度ではほぼ中立状態が雲底付近から下層大気に広がる。東西流と南北流に関して、帯状平均と昼面平均(UV 観測における帯状平均)の間で明瞭な差異が生じる。熱潮汐波の極向き成分によって昼面の強い子午面流が形成される。この昼面の子午面流は帯状平均子午面流よりもかなり大きい。高度 70 km 付近

の昼面について平均した水平渦熱フラックスおよび運動量フラックスは、共に、中緯度ジェットの高緯度側で極向き大きな値をもつ。低緯度域では、これらの渦フラックスは相対的に小さい赤道向きとなるが、フラックスの大きさや向きには高度依存性が見られる (Yamamoto 他, DPS48/EPSC 11 Meeting, 2016 年度日本気象学会秋季大会)。

#### 今後の課題：

厚い雲で覆われた惑星の大気大循環の力学に関しては、今回調査していない角運動量の鉛直輸送の  $Ro$  数依存性についても整理しなければならない。また、熱強制に対する依存性についても調査する必要がある。金星下層大気擾乱が中層大気スーパーローテーションの維持および崩壊に及ぼす役割については、鉛直伝播する波の性状について、さらに解析を進める予定である。金星放射伝達を組み込んだ大気大循環モデルでは、地形の影響が中層大気に与えるインパクトを明らかにするために、今後、地表高度データや高解像度化にむけた改良が必要となる。

一般共同研究

研究課題名：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

共同研究者：伊藤進一・横井孝明・羽角博康（東京大学大気海洋研究所）

### 研究目的

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。

### 研究内容

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 OAKLEAF-FX10 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ことを計画した。本年度は、まず、低次生態系モデルと魚類回遊モデルを外した形で、物理場のみを駆動実験を行い、ROMS-NEMURO.FISH の物理場の再現性について検証を行った。

### 研究成果

1958年から2007年までの50年間に渡り ROMS-NEMURO.FISH の駆動実験を行った。初期条件と外部境界には同化データである SODA 2.1.6 を使用し、また大気境界には CORE2 を使用した。また、地形データには etopo2 のデータを使用した。etopo2 の地形データでは日本海溝に、未定義値が含まれていたためそれらの領域の地形の深さを 9000 m とし、計算を実行した。計算途中で、境界付近で流速発散する現象が複数回生じたが、境界値による問題と判断されたため、当該部分の計算を

スキップさせることで回避した。これらの過程を経て得られた 50 年分の計算結果から、海面での流線関数（図 1）、渦運動エネルギー（図 2）の月平均気候値および、水温（図 3）と塩分（図 3）の鉛直断面分布からから妥当性を検討した。

成果については、

Kuroda H., T. Setou, S. Kakehi, S. Ito, T. Taneda, T. Azumaya, D. Inagake, Y. Hiroe, K. Morinaga, M. Okazaki, T. Yokota, T. Okunishi, K. Aoki, Y. Shimizu, D. Hasegawa and T. Watanabe, 2016, Recent advances in Japanese fisheries science in the Kuroshio-Oyashio region through development of the FRA-ROMS ocean forecast system: Overview of the reproducibility of reanalysis products. *Open J. Mar. Sci.*, 7, 62-90, doi:10.4236/ojms.2017.71006.

伊藤進一, 2016, 海洋低次栄養段階生態系モデルの歴史と NEMURO, 月刊海洋, 548, 291-301.

にて公表した。

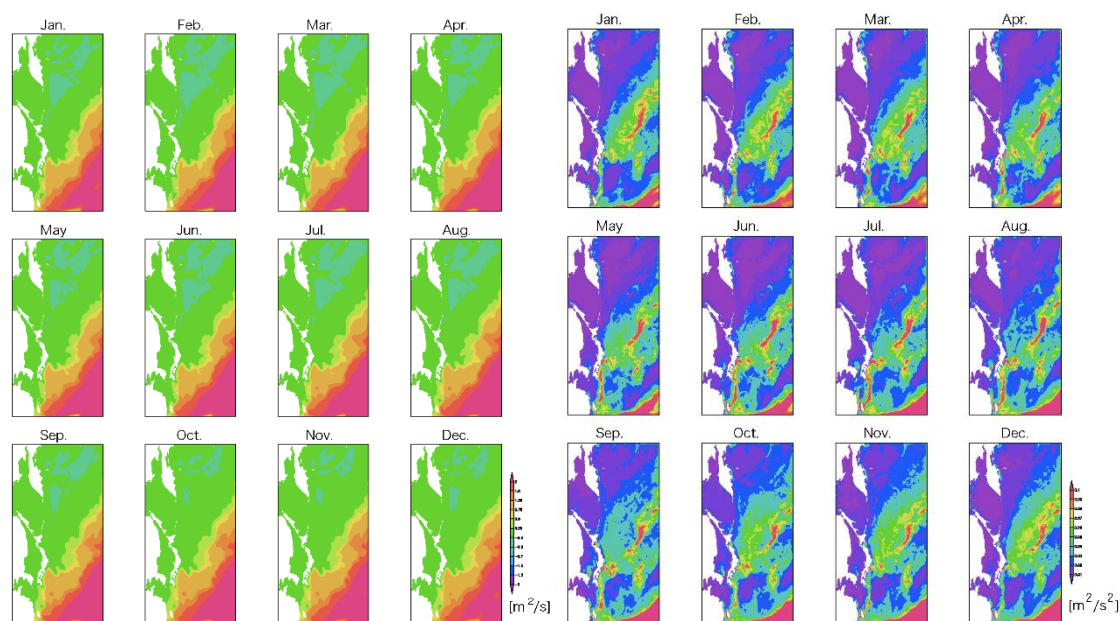


図 1. 海表面における流線関数の月平均気候値

図 2. 海表面における渦運動エネルギーの月平均気候値

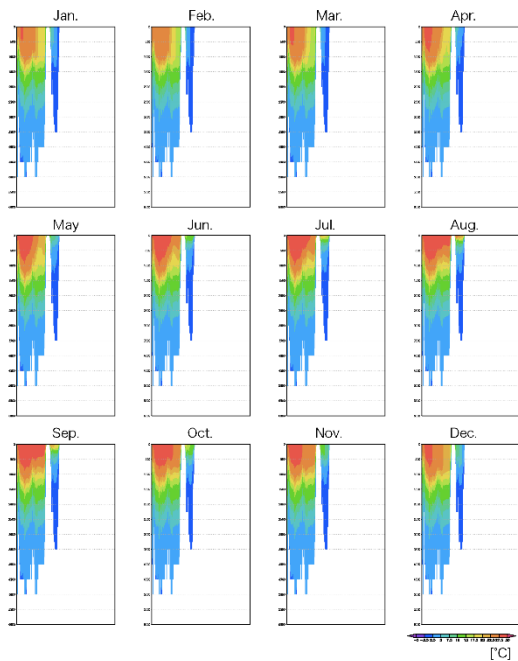


図 3. 東経 137 度線に沿った水温の  
月平均気候値

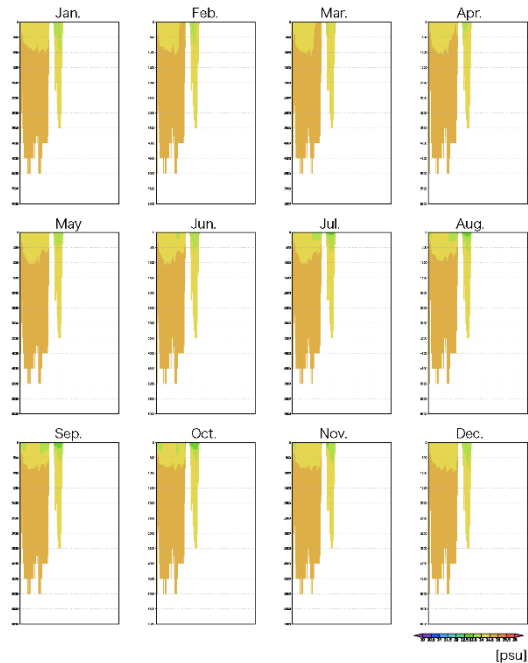


図 4. 東経 137 度線に沿った塩分の  
月平均気候

### 今後の問題点

これまでの計算で得られた結果より、赤道域で強い流速が現れ、それが周辺域に不自然な影響を及ぼしていること、および日本海溝域で海底が周辺域よりも深いために生じる不自然な流れが生じていることが確認されている。これらを改善するために、前者は赤道域に強力なスポンジ層を与えることで、後者は 5500 m 以深の海底を一律 5500 m で置き換え鉛直解像度を高くすることで対応を行う予定である。

また、これまでには物理場のみの ROMS の試験的駆動を行ってきたが、これに NEMURO.FISH を結合させた実験を行う予定である。また、ROMS-NEMURO.FISH の計算に SODA2.1.6 と CORE2 を使用するために、計算期間が 1958 年から 2007 年に限られてしまうため、2008 年以降の計算ができなかった。この点を補うため、SODA3.3.1 を使用し、および新たな外力を探してきて適用することで、計算期間の延長した実験を行う予定である。

## 参考文献

- 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.
- Hasumi H., CCSR Ocean Component Model (COCO) version 4.0. CCSR Report No. 25, 103 pp., 2006.
- 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.
- Kishi M. J., M. Kashiwai, D. M. Ware, B. A. Megrey, D. L. Eslinger, F. E. Werner, M. N. Aita, T. Azumaya, M. Fujii, S. Hashimoto, D. Huang, H. Iizumi, Y. Ishida, S. Kang, G. A. Kantakov, H. Kim, K. Komatsu, V. V. Navrotsky, S. L. Smith, K. Tadokoro, A. Tsuda, O. Yamamura, Y. Yamanaka, K. Yokouchi, N. Yoshie, J. Zhang, Y. I. Zuenko, V. I. Zvalinsky (2007) NEMURO –a lower trophic level model for the North Pacific marine ecosystem. *Ecol. Model.*, 202, 12-25.
- 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.



(別紙様式5)

東京大学大気海洋研究所気候システム研究系「共同研究」報告書

平成 29年 3月 31日

東京大学大気海洋研究所長 殿

申請者 (代表者)

所属機関 京都大学大学院理学研究科

職 名 准教授

氏 名 重 尚一

下記の共同研究について別紙のとおり報告します。

記

1. 研究課題

一般座標系及び重合格子法により地形表現を行う雲解像モデルの開発

2. 共同研究者

氏 名	所 属	備 考
武村 一史	京都大学大学院理学研究科	

### 3. 研究目的

報告者らは一般座標系及び重合格子法を地形表現に用いることにより、急峻な地形や谷・崖などの複雑な地形の表現が可能な雲解像モデルの開発を行っている。これまでに一般座標系及び重合格子法による急峻・複雑な地形の表現 (Takemura et al. 2016)、雲微物理過程の実装に成功している。本研究は、これまでに開発した雲解像モデルが保存性を保証するように開発・改良を行うことを目的とする。

### 4. 研究内容

現在の気象モデルの地形表現には地形準拠座標系が広く用いられているが、地形準拠座標系では急峻地形上で誤差を引き起こすことが指摘されている。報告者らはこれまでに一般座標系及び重合格子法を地形表現法に採用した大気モデルを開発し、急峻地形の表現に成功している。一般座標系は、数値的に生成した直交性が高い座標系を用いる手法であり、重合格子法では単一の格子では表現できない複雑地形に対し局所的に格子を生成し重ね合わせて計算領域を表現する手法である。重合格子法では格子間の情報交換を行う必要があり、一般的には双線形補間などで境界値を補間する手法 (非保存性補間法) が用いられる。しかしながら、この手法では保存性が損なわれる。本研究では保存性を保証するために、境界に流入するフラックスの補間を行う手法 (保存性補間法) を実装した。

重合格子法は地球科学分野では直交で均一な 2 つの格子を用いて全球を表現する Yin-Yang 格子 (Kageyama and Sato 2004) が用いられており、Yin-Yang 格子用の保存性補間法が開発されている (Peng et al. 2006)。しかし、一般的な重合格子法では格子が非直交で格子間隔が異なることが多く、この保存性補間法はそのような非直交、格子間隔の異なる格子では未検証である。そこで本研究では移流実験による検証を行った。移流実験では初期条件として幅 15、振幅 1 のコサインヒルを配置し、各方向の移流速度は 1、境界条件は周期境界条件とした。移流スキームには有限体積型マルチモーメント法の CIP-CSLR 法 (Constrained Interpolation Profile Conservative Semi-Lagrangian with Rational Function, Xiao et al. 2002) を採用した。CIP-CSLR 法では 1 次有理関数の補間関数をセル内で構成しセル境界上のフラックスを計算する手法で、安定性が高い保存性を満たした計算が行える。計算領域は 2 次元として格子間隔 1、格子点数 100 点の格子 A により表現され、格子 A の中央に格子点数 30 の格子 B を重ね合わせる。格子 B の格子間隔、座標軸のなす角は表 1 にまとめられているように実験ごとに変化させた。コントロール実験 (CTL) では格子 B を用いずに計算し、テスト名の頭文字に N が付いた実験では非保存性補間法を用いて、それ以外では保存性補間法を用いた。各設定で領域 5 周分の時間積分を行い比較した。

表 1. 移流実験の格子設定

テスト名	CTL	R10 & NR10	R08 & NR08	R06 & NR06	R12 & NR12	O60 & NO60
格子 A の格子間隔	1	1	1	1	1	1
格子 B の格子間隔		1	0.8	0.6	1.2	1
格子 B の座標軸のなす角		90°	90°	90°	90°	60°

また、保存性補間法及び CIP-CSLR 法をこれまでに開発したモデルに実装し、半径 1 km の半円型山岳上で山岳波の数値実験を行った。初期条件として浮力振動数  $0.01 \text{ s}^{-1}$ 、水平風速を  $10 \text{ ms}^{-1}$  で一定とした。格子間隔は水平、鉛直ともに 200 m とし、領域は水平に 100 km、鉛直に 30 km である。山岳周辺は極座標系の格子を重ね合わせた。

## 5. 研究成果

図 1 は CTL、R10、NR10 の設定での実験結果であり、正規化した保存量の変動量 (図 1a)、解析解からの誤差の  $l_2$  ノルム (図 1b)、誤差の無限大ノルム (図 1c) を示しており、それぞれ保存性の指標、大域的な誤差の指標、局所的な誤差の指標を示している。CTL と R10 では保存量が一定で保存性が満たされている (図 1a)。それに対し、NR10 では変動量が増大しており、 $l_2$  ノルム (図 1b) と無限大ノルム (図 1c) が CTL と R10 に比べ、ともに大きく増大している。図 2 は R08、NR08、R12、NR12、O30、NO30 の設定での同様の図である。どの格子においても R10 と NR10 の場合と同様に、保存性補間法を用いた場合は保存性を満たしており (図 2a)、誤差ノルムの増大も非保存性補間法を用いた場合に比べ少なくなっている (図 2b,c)。図 3 は R06、NR06 の設定での同様の図である。R06 では、保存性は満たされている (図 3a) もの、 $l_2$  ノルム、無限大ノルムがともに NR06 に比べ激しく増加している (図 3b,c)。

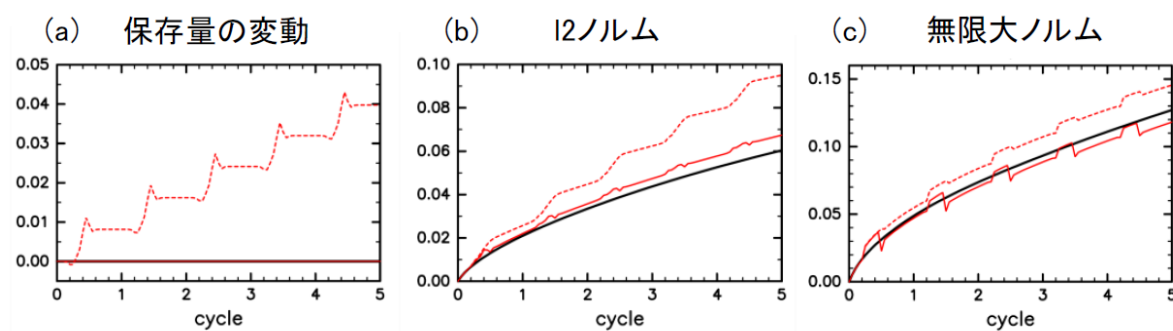


図 1. CTL (黒色実線)、R10 (赤色実線)、NR10 (赤色点線) の移流実験の結果。(a) 正規化した保存量の変動の時間変化、(b)  $l_2$  ノルムの時間変化、(c) 無限大ノルムの時間変化。

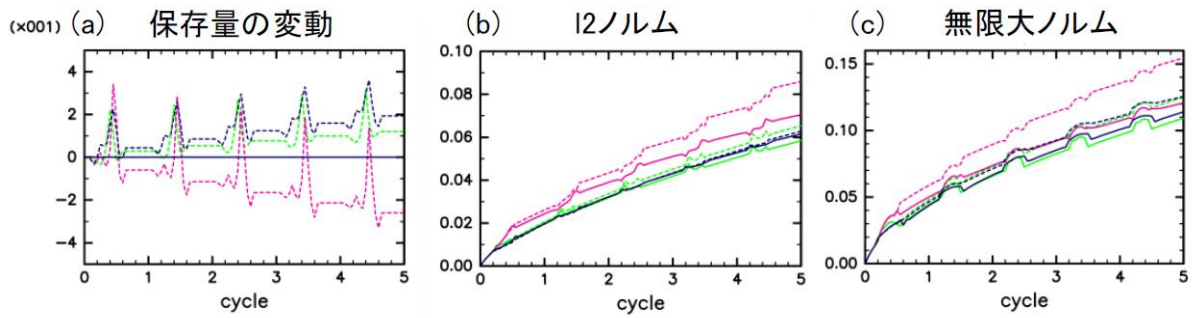


図 2. R08 (緑色実線)、NR08 (緑色点線)、R12 (桃色実線)、NR12 (桃色点線)、O60 (紺色実線)、NO60 (紺色点線) の図 1 と同様の移流実験の結果。

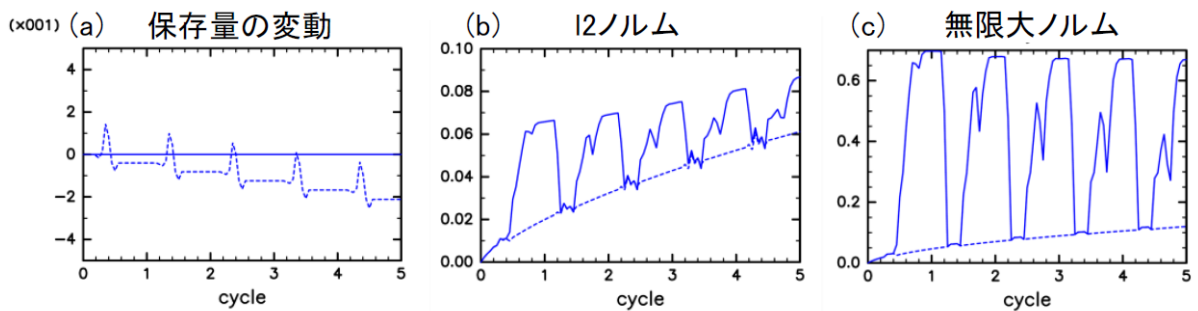


図 3. R06 (青色実線)、NR06(青色点線) の図 1 と同様の移流実験の結果。

以上の移流実験の結果から、格子間隔の変化が小さければ異なる格子間隔の格子及び非直交格子で保存性補間法を適用できることが示された。R06 で誤差が大きくなるのは保存性補間法により引き起こされた格子 B の誤差の情報が格子 A へと伝達されないためである。

図 4 は山岳波の数値実験の結果であり、1 時間後の鉛直風速を示している。山岳により励起される山岳波が滑らかに再現されており、保存性補間法及び CIP-CSLR 法の実装に成功したことがわかる。

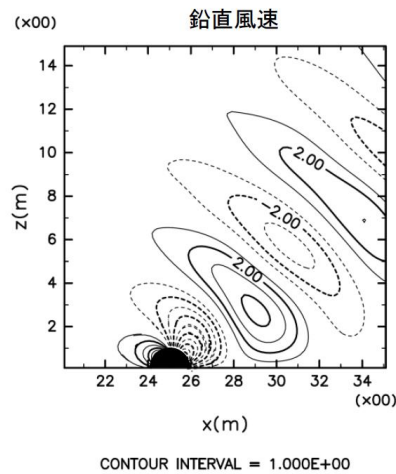


図 4.山岳波の数値実験の結果。1 時間後の鉛直風速。等値線間隔は  $1 \text{ ms}^{-1}$ 。

## 6. 今後の問題点

開発した雲解像モデルを用いた地形性降水の数値実験を行い、急峻・複雑な地形が降水の強度や分布へ与える影響について研究する予定である。

## 参考文献

- Kageyama, A., and T. Sato, 2004: “Yin-Yang grid”: An overset grid in spherical geometry. *Geochemistry, Geophys. Geosystems*, **5**, Q09005, doi:10.1029/2004GC000734. <http://doi.wiley.com/10.1029/2004GC000734> (Accessed December 24, 2014).
- Peng, X., F. Xiao, and K. Takahashi, 2006: Conservative constraint for a quasi-uniform overset grid on the sphere. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **132**, 979–996, doi:10.1256/qj.05.18. <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1256/qj.05.18/abstract>.
- Takemura, K., K. Ishioka, and S. Shige, 2016: Development of a non-hydrostatic atmospheric model using the Chimera grid method for a steep terrain. *Atmos. Sci. Lett.*, **17**, 109–114, doi:10.1002/asl.633. <http://doi.wiley.com/10.1002/asl.633>.
- Xiao, F., T. Yabe, X. Peng, and H. Kobayashi, 2002: Conservative and oscillation-less atmospheric transport schemes based on rational functions. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **107**, 1–11, doi:10.1029/2001JD001532.