共 同 研 究 報 告 書

平成２９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 29 年度共同研究報告書の発行にあたって

平成 29 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. 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・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　10

3. 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・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　14

4. 地表面・水文モデルの開発及びデータ解析・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　18

5. 全球雲解像モデルの開発及びデータ解析・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　22

6. 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・・・・・・・・・・・・・・・・　26

7. 世界海洋大循環モデルの相互比較・・・　29

8. 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・・・・・・・・・・・・・・・・　32

9. 衛星データ及び数値モデルによる全球降水システムの研究・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　36

10. 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 ・・・・・・・・・・・・・・・・・　39

11. 高分解能大気モデル及び領域型気候モデルの開発・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　45

12. 全球雲解像モデルの開発及びデータ解析・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　51

13. 海洋モデルにおけるサブグリッド現象のパラメータ化・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　55

14. 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・・・・・・・・・・・・・・・・・・　60

【一般共同研究】

1. 異常気象とその予測可能性に関する研究・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 63

2. 気候変動予測の不確実性低減に資する海洋大循環モデルの精緻化・・・・・・・・・ 67

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・・・・・・・・・・・・・・・ 71

4. 大気海洋マルチスケール変動に関する数値的研究・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 72

5. 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・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 76

6. 数値モデルを用いた温室効果気体濃度・エアロゾル分布解析・・・・・・・・・・・・・・・・・ 79

7. 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 ・・・・・・・・・ 83

8. NICAM 及び MIROC モデルを用いた地球惑星大気の物質輸送と気候変動の研究・・・ 87

9. 惑星中層大気大循環の力学・・ 91

10. 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・・・・・・ 94

11. 気候モデル・全球雲解像モデルを用いた熱帯大気研究・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 98

12. 地表面状態の変化による大気水循環への影響・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 101

13. 非静力学海洋モデルの汎用化と OGCM とのシームレスな接続・・・・・・・・・・・・・・・ 103

14. 海洋大循環モデルを用いた植物プランクトン多様性の研究・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 108

15. 全球雲解像モデルデータを用いた熱帯雲活動の解析・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 113

16. 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・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 116

17. 放射収支算定のための放射スキームの高速・高精度化・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 121

平成29年度共同研究報告書の発行にあたって

計算機能力の進歩は著しく、大学院生の研究でも従来とは比較にならないくらいの解像度や多数の数値実験で仮説検証に挑むことが可能になってきています。一方で、衛星をはじめとしてエアロゾルや雲微物理等に関わる素過程検証を可能とする新しい観測データも多数登場してきています。温暖化問題等におけるモデルへの期待も含めて、モデル開発を取り巻く環境は著しく充実してきたといってよいと思います。一方で、モデル開発者を「絶滅危惧種」と呼んだ研究者もいるように、ユーザの増加に比して開発者の過疎化傾向が課題となっています。本共同研究にご参加のみなさまには、学生さんや若手研究者、周辺の研究グループも巻き込んで、数値モデルを用いた研究をお進め頂き、モデルを用いてアイデアを具現化し、観測データで見る気象、気候現象の不思議に挑む研究の楽しさを大いに啓蒙して頂ければと思います。なお、本共同研究は、直接大きな気候モデルを扱わなくとも、モデルの検証・高度化や気候システム過程の知見向上に資する観測やデータの解析、数値計算法等に関わる研究をされている方々のご参加も熱烈に歓迎いたします。

平成30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２９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 SR16000ノード時間	FX10ノード時間	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	北海道大学大学院工学研究院　安成　哲平　助教	芳村圭	1,500	1,500	0	120	120
特定研究2	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　五藤　大輔　主任研究員 理化学研究所・計算科学研究機構　佐藤　陽祐　特別研究員	①鈴木健太郎 ②佐藤正樹	2,000	50,000	0	0	0
特定研究3	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	0	0	60	60
特定研究4	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　沖　大幹　教授 Kim Hyungjun　助教 日比野　研志　研究員 東京大学工学系研究科　藪　優太郎　大学院生 石塚　悠太　大学院生	芳村圭	0	4,000	0	0	0
特定研究5	全球雲解像モデルの開発及びデータ解析	海洋研究開発機構　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　ポストドクトラル研究員 池田　美紀子　技術主任 埼玉県環境科学国際センター　原　政之　研究員 富山大学理工学研究部　安永　数明　教授	佐藤正樹	4,000	70,000	0	36	36
特定研究6	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　一柳　錦平　准教授 東京大学　田上　雅浩　研究員	芳村圭	100	100	20	100	120
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	0	51,840	0	0	0
特定研究8	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	5,000	0	0	0
特定研究9	衛星データ及び数値モデルによる全球降水システムの研究	京都大学　重　尚一　准教授 山本　宗尚　特定研究員 武村　一史　大学院生	高薮縁	1,000	1,000	0	200	200
特定研究10	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	0	18,720	0	0	0
特定研究11	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 荒波　恒平　予報官 佐藤　均　調査官 長澤　亮二　技術専門官 下河邉　明　技術専門官 齊藤　慧　技官	木本昌秀	4,000	80,000	0	0	0
特定研究12	全球雲解像モデルの開発及びデータ解析	筑波大学計算科学研究センター　田中　博　教授 松枝　未遠　助教 筑波大学生命環境研究科　栗花　卓弥　大学院生(予定)	佐藤正樹	0	0	60	5	65
特定研究13	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　特任研究員 Wei Yang　大学院生 高橋　杏　大学院生 福澤　克俊　大学院生 小堀　笑理　大学院生 宮寺　凛一　大学院生	羽角博康	2,000	200,000	0	0	0
特定研究14	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　齋藤　冬樹　技術研究員 北海道大学　ｸﾞﾚｰﾍﾞ ﾗﾙﾌ　教授	阿部彩子	1,000	18,720	0	0	0

平成２９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 SR16000 ノード時間	FX10 ノード時間	消耗品 千円	旅費 千円	合計 千円
一般研究1	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	木本昌秀	500	0	0	0	0
			榎本　剛	准教授						
			時長　宏樹	特定准教授						
一般研究2	気候変動予測の不確実性低減に資する海洋大循環モデルの精緻化	海洋研究開発機構	建部　洋晶	主任技術研究員	羽角博康	5,000	10,000	0	0	0
			小室　芳樹	技術研究員						
			鈴木　立郎	技術研究員						
			黒木　聖夫	特任技術研究員						
			小野　純	特任研究員						
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	羽角博康	6,000	0	0	0	0
			田中　雄大	特任研究員						
			後藤　恭敬	大学院生						
一般研究4	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	吉森　正和	准教授	木本昌秀	2,000	40,000	0	0	0
			堀之内　武	准教授						
		北海道大学大学院理学研究院	見延　庄士郎	教授						
			稲津　將	准教授						
		北海道大学大学院理学院	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						
一般研究5	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	木本昌秀	1,000	5,000	0	0	0
			山上　遥航	大学院生						
			木戸　晶一郎	大学院生						
一般研究6	数値モデルを用いた温室効果気体濃度・エアロゾル分布解析	国立環境研究所	齊藤　誠	主任研究員	佐藤正樹	5,000	5,000	0	0	0
			五藤　大輔	主任研究員						
		気象庁気象研究所	丹羽　洋介	研究官						
一般研究7	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	東京大学大学院理学系研究科	佐藤　薫	教授	木本昌秀	20,000	20,000	0	0	0
			三浦　裕亮	准教授	佐藤正樹					
			澁谷　亮輔	大学院生	高橋正明					
			雨宮　新	大学院生						
			南原　優一	大学院生						
一般研究8	NICAM及びMIROCモデルを用いた地球惑星大気の物質輸送と気候変動の研究	情報通信研究機構	黒田　剛史	主任研究員	佐藤正樹	5,000	100,000	0	55	55
		情報通信研究機構	笠井　康子	上席研究員	阿部彩子					
		東北大学大学院理学研究科	早坂　忠裕	教授						
			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						
			秋葉　丈彦	大学院生						
		京都産業大学	佐川　英夫	准教授						
一般研究9	惑星中層大気大循環の力学	九州大学応用力学研究所	山本　勝	准教授	佐藤正樹	500	18,720	0	70	70
一般研究10	海洋循環－低次生態系結合モデルを用いた魚類生息環境場の比較研究	東京大学大気海洋研究所	伊藤　進一	教授	羽角博康	1,000	120,000	0	0	0
			横井　孝暁	特任研究員						
		水産研究・教育機構	瀬藤　聡	グループ長						
一般研究11	気候モデル・全球雲解像モデルを用いた熱帯大気研究	東京大学大学院理学系研究科	三浦　裕亮	准教授	渡部雅浩	15,000	150,000	75	0	75
			末松　環	大学院生						
			王　家瑞	大学院生						
			松岸　修平	大学院生						
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	渡部雅浩	0	2,000	60	30	90
			神澤　望	大学院生						
一般研究13	非静力学海洋モデルの汎用化とOGCMとのシームレスな接続	北海道大学低温科学研究所	松村　義正	助教	羽角博康	0	20,000	0	50	50
		北海道大学大学院環境科学院	大橋　良彦	大学院生						
一般研究14	海洋大循環モデルを用いた植物プランクトン多様性の研究	北海道大学　地球環境科学研究院	増田　良帆	特任助教	岡顕	0	25,000	0	0	0
			山中　康裕	教授						
一般研究15	全球雲解像モデルデータを用いた熱帯雲活動の解析	福岡大学　理学部	西　憲敬	准教授	佐藤正樹	0	0	0	120	120
一般研究16	数値モデルを用いた東アジア大気循環の変動力学の探究	東京大学先端科学技術研究センター	中村　尚	教授	渡部雅浩	3,000	15,000	0	0	0
			小坂　優	准教授						
			田口　文明	特任准教授						
			宮坂　貴文	特任助教						
一般研究17	放射収支算定のための放射スキームの高速・高精度化	東京海洋大学学術研究院	関口　美保	准教授	鈴木健太郎	300	300	50	22	72
			佐藤　拓也	大学院生						
		JAXA/EORC	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						
		東京大学大学院	大方　めぐみ	大学院生						
特定共同合計			14	件						601
一般共同合計			17	件						532
合計			31	件						1,133

単位：千円

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

芳村　圭　（東京大学・大気海洋研究所）

研究目的

太陽光吸収性エアロゾル（Light-Absorbing Aerosols: LAA；Dust，Black Carbon, BC，Organic Carbon, OC）による積雪汚染が存在することによる気候における役割として，東アジアの水循環の強化や中央アジア域の乾燥化などが大きいことが報告されている（e.g., Yasunari et al., 2015）．また，チベットやヒマラヤの高高度地域では，BC による snow-darkening とその snow-albedo feedback が大きな役割を担っていることも近年明らかになてきた（Xu et al., 2016）．今後，気候モデルによる snow-darkening 計算の高度化の需要は益々重要となることが考えられるが，日本の気候モデルである MIROC（e.g., Watanabe et al., 2010; Watanabe et al., 2011）の陸面モデル（MATSIRO: Takata et al., 2003）では，現在，積雪モデルの dirt component を dust と BC を合わせた効果で積雪アルベドを計算している（Yang et al., 1997; Qian et al., 2015）．更には，積雪不純物が融解水などで流れる効果（flushing effect）も入っていない（Qian et al., 2015）．このため，MATSIRO 用積雪モデル MATSNW において，積雪不純物（LAA）の分離計算とその LAA を使ったアルベド計算ができるように MATSNW の高度化を目的に研究を行った．

研究内容

昨年度より行っている MATSIRO の雪氷に関わるスキームにおいて，開発・改善を行っており，昨年度は，dust, BC, OC の積雪中濃度分離計算を可能にする開発を進めたが，今年度は特に積雪アルベドスキームの高度化に必須である積雪密度の時間変化を考慮できるようにモデル開発を進めた．

研究成果

昨年度から，上記特定共同研究課題で MATSIRO（Takata et al., 2003）の積雪モデル高度化として，積雪不純物の分離計算とその分離積雪不純物を使った積雪アルベドの計算スキームの導入に向けて開発を行ってきた．昨年度においては，積雪中の不純物濃度（dust, BC, & OC）の分離計算を行えるようにしたが，今年度は，アルベドスキームの高度化に向けた開発を行った．上記分離した積雪不純物濃度を使ってアルベドを計算するスキームとして，NASA GEOS-5 用に使用されている GOddard SnoW Impurity Module (GOSWIM: Yasunari et al., 2011, 2014)があり，これを MATSNW で既存の Yang et al. (1997)をベースにした積雪アルベドスキームとオプションで選んで計算できるようにすることが，ユーザーの好みも考えて望ましいと考え，この方向で導入を進めた．この GOSWIM で採用しているアルベドスキームは積雪密度から計算した積雪被表面積（Snow Specific Surface Area: SSA）を使用して計算するスキームである（Kondo et al., 1988; Yamazaki et al., 1991, 1993）．ここでネックとなるのが，MATSNW は従来固定の積雪密度（300 kg m^{-3}）を使用しており，上記 GOSWIM 用アルベドスキームでは，アルベドが一定となってしまう．そこで，大きな MATSNW 変更点として，このアルベド目的のために時間変化が反映される積雪密度スキームの導入が必須となる．気象研の積雪モデル SMAP（Niwano et al., 2012）では，雪の粘性（Bader and Weilenmann, 1992; Morris et al., 1997）と圧密を考慮したモデルを使用しており，本研究で採用した．新雪の密度は，Niwno et al. (2012)と同様に，風速によって変化する Yamazaki (1998, 2001)の式を現在は採用している（将来的には変更の可能性もある）．また，上記積雪密度の時間変化スキームを導入するに当たり，もう一つ障害となっているのが，MATSNW が雪の量に応じて積雪層の数が 1-3 層に変化するというものである（Takata et al., 2003）．この MATSNW での積雪層の数が変わることで密度の層との対応不整合性などの複雑性を生み出しており，大きな不安定性の問題・障害につながることがわかった．このため，積雪層の数を3層に固定する方式に切り替えることを決めた．これにより，複雑性を減らすことができる．現在は，簡易的に全層の積雪水量が 90 kg m^{-2} 以上の時には，トップ層は固定の積雪水量（30 kg m^{-2}）とし，下層は積雪水量を 2 分割．これ以外のケースでは，全層の積雪水量を 3 分割としているが，今後この部分も最適な条件などに変更する予定である．その後，上記積雪密度スキームも導入を行った．また，GOSWIM でアルベド計算に使用されている（Yasunari et al., 2011），Narita (1971)の観測データをベースに構築された積雪密度から SSA を計算す

るスキーム（Yamazaki et al., 1991, 1993）も導入した．積雪密度の計算では計算不安定を避けるため，他でも採用されている最大積雪密度（550 kg m^{-3}）（Yasunari et al., 2011）を超えない設定を採用した．テストランを行った 2008 年 3 月 1 日の積雪層トップの積雪密度と SSA の計算例が図 1 である．積雪密度の小さいところで SSA が大きくなっていて対応していることがわかる．

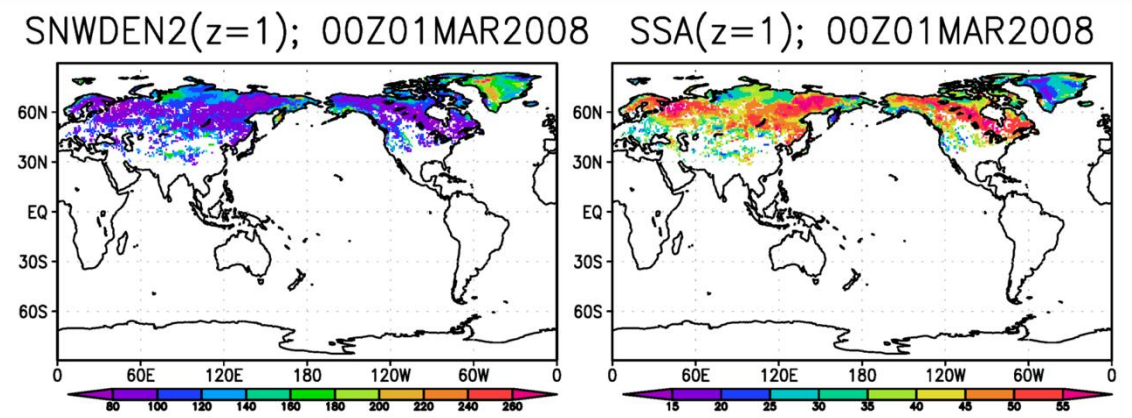


図1．積雪モデルMATSNWで計算された積雪トップ層の(a) 積雪密度（kg m^{-3}）と(b) 積雪被表面積（SSA: m^2 kg^{-1}）（2008年3月1日の日平均値の例）．

問題点と今後の課題

問題点として，図1を見てわかるように，北半球中緯度以北の積雪域において白塗り（未定義値：UNDEF）に計算されてしまっているグリッドがある．ここが何故このように UNDEF と計算されてしまったの問題が解決できなかったため，来年度はまずここの部分を解決する必要がある．その後，上記アルベドスキームの導入や雪氷生物モデル（Onuma, 2016）の導入なども随時行っていく予定である．

MATSIRO・積雪モデルと他のモデルとの統合モデルの応用的開発について

現在，上記積雪モデルの高度化と同時並行で，MATSIRO に新しいモデルを組み込む試みを基盤研究 B（特設分野研究）「気候変動が引き起こす災害・水資源・食資源・大気汚染の年代別リスク変化とその適応策」（代表者：安成哲平）で行っている．方向性として，高度化された積雪モデルは，今後の MATSIRO 開発のメインストリームに随時反映できるように考え，独自開発しつつ，適宜バージョンの違う積雪モデルを他のモデルとの結合モ

デルに反映していく方法を取ることにした（図 2）．その発端として，積雪モデル改良版（2017 年 11 月 8 日時点のもの）に，異なるバージョンの MIROC/MATSIRO に組み込まれた農作物成長モデル MATCRO（Masutomi et al., 2016a, 2016b）の組込みを進めている．第一段階として、Surface type を一律の値に仮定した条件下で，全球で 1 年間に渡るテスト数値計算（オフライン実験）を行い，水稲の収量計算が適正で組込みに問題がないか確認を行った．今後，積雪密度の現在の問題などが解決され，アルベドモデルなども導入できた辺りで，こちらの結合バージョンにアップデートを反映したいと考えている．近い将来的には，積雪モデルの高度化により計算される春季融雪水と農作物の成長計算がリンクできるようにしたいと考えている．

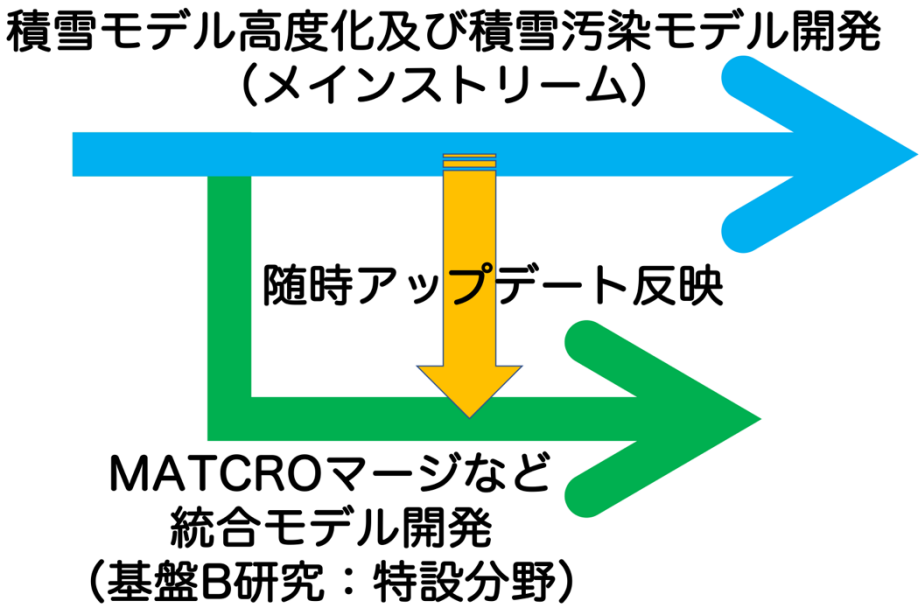


図2．積雪モデルの高度化開発とその積雪モデルを使った他の陸面関連モデルとの結合モデルの今後の開発の方向性の概念図．

参考文献

Bader, H.-P., and P. Weilenmann (1992), Modeling temperature distribution, energy and mass flow in a (phase-changing) snowpack. I. Model and case studies, *Cold Reg. Sci. Technol.*, 20, 157–181, doi:10.1016/0165-232X(92)90015-M.

Kondo, J., Y. Numata, and T. Yamazaki (1988), Parameterization of snow albedo (in Japanese with English abstract), *Seppyo*, 50, 216–224.

Masutomi, Y., K. Ono, M. Mano, A. Maruyama, and A. Miyata (2016a), A land surface model combined with a crop growth model for paddy rice (MATCRO-Rice v. 1) – Part 1: Model description, *Geosci. Model Dev.*, 9, 4133-4154, doi:10.5194/gmd-9-4133-2016.

Masutomi, Y., K. Ono, T. Takimoto, M. Mano, A. Maruyama, and A. Miyata (2016b), , A land surface model combined with a crop growth model for paddy rice (MATCRO-Rice v. 1) – Part 2: Model validation, *Geosci. Model Dev.*, 9, 4155-4167, doi: 10.5194/gmd-9-4155-2016.

Morris, E. M., H.-P. Bader, and P. Weilenmann (1997), Modelling temperature variations in polar snow using DAISY, *J. Glaciol.*, 43, 180–191.

Narita, H. (1971), Specific surface of deposited snow, II (in Japanese with English abstract), *Low Temp. Sci. Ser. A*, 29, 69–79.

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.

Xu, Y., V. Ramanathan, and W. M. Washington (2016), Observed high-altitude warming and

snow cover retreat over Tibet and the Himalayas enhanced by black carbon aerosols, *Atmos. Chem. Phys.*, 16(3), 1303-1315, doi:10.5194/acp-16-1303-2016.

Yamazaki, T. (1998), A multi-layer heat balance model of snow cover adaptable to intensely cold regions (in Japanese with English abstract), *Seppyo*, 60, 131–141.

Yamazaki, T. (2001), A one-dimensional land surface model adaptable to intensely cold regions and its applications in eastern Siberia, *J. Meteorol. Soc. Jpn.*, 79(6), 1107–1118, doi:10.2151/jmsj.79.1107.

Yamazaki T. Sakuraoka, T. Nakamura, and T. J. Kondo (1991), A study of snow metamorphism: I Model description (in Japanese with English abstract), *Seppyo*, 53, 115–123.

Yamazaki, T., J. Kondo, T. Sakuraoka, and T. Nakamura (1993), A one-dimensional model of the evolution of snow-cover characteristics, *Ann. Glaciol.*, 18, 22–26.

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 GOddard SnoW Impurity Module (GOSWIM) for the NASA GEOS-5 Earth System Model: Preliminary comparisons with observations in Sapporo, Japan, *SOLA*, 10, 50-56, doi:10.2151/sola.2014-011.

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.

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　　（名古屋大学大学院工学研究院）
Tran Thi Ngoc Trieu　（国立環境研究所）

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，昨年度に引き続き NICAM-Chem (Goto et al. 2015) モデルの素過程（中でもエアロゾルの大気寿命に大きな影響を与える降水による除去過程）の改良を行うと共に，NICAM-Chem で計算された高解像度全球実験結果を用いて，雲エアロゾルの相互作用の表現に関する考察を行った. NICAM-Chem は雲を直接解像した全球スケールの数値実験が可能であり，降水や雲に関する全球スケールの解析に適している. まず，エアロゾルの降水による除去過程の改良を行い，本年度はエアロゾルの中でも特にブラックカーボン（BC）に着目した. BC 濃度分布は，前年度成果報告および Sato et al. (2016) によって，２週間の時間スケールではあるが，高解像度で計算するこ

とにより北極域の BC 濃度分布がより良く再現できることを示した．本年度は積分期間を３年とし，解析対象期間を長くすることで，BC 濃度の季節変動に関する再現性を調べた．その結果，一般的な気候モデルの水平解像度（220km）ではうまく再現できなかった北極域における BC 濃度変動が NICAM の高解像度モデル(14km)ではうまく再現することができた(図１)．現在この結果は投稿論文としてまとめる準備を行っている．

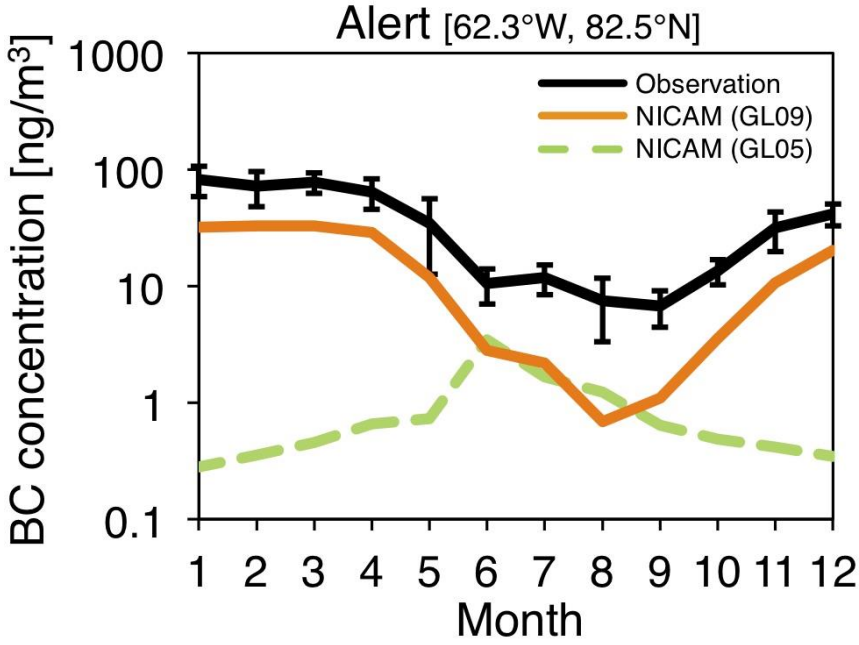


図１：北極域の観測サイト（Alert）での黒色炭素の地表面付近の濃度の季節変化（１ヶ月平均の時系列）．黒線，橙線，緑破線はそれぞれ，観測，NICAM-Chem の 14 km 解像度での計算，NICAM-Chem の 220 km 解像度での計算を示す．

次に雲エアロゾルの相互作用の強度を表す物理量として，エアロゾル数密度（N_a）が変化した時の鉛直積算雲水量（LWP）の変化：

$$\lambda = d[\mathrm{Log}_{10}(\mathrm{LWP})]/d[\mathrm{Log}_{10}(N_a)]$$

を雲を直接解像した NICAM-Chem で計算し，従来から用いられてきた気候モデル（GCM：MIROC）の結果，および衛星観測の結果と比較を行った（図

２）．Chen et al. (2014) や Michibata et al. (2016) の観測によって，λは気象条件や，雲のレジームによって正負の符号が異なることが明らかになっていたが，従来の GCM では年平均をとると，全球のどこでも正の値を示しており GCM は雲とエアロゾルの相互作用を過大評価していることが示唆されていた．この傾向は世界中の GCM はどれも同様であり，λの領域間の差異を生む物理的な要因は明らかではなかった．しかし，本研究では世界で初めて，A-train 衛星による観測で得られたλの領域間の差異を NICAM-Chem の結果から再現することに成功した（図２中央）．詳細な解析をすると，このようなλの正負は，雲上部の蒸発，雲底付近の凝結がエアロゾルが増加したことで促進されることによる雲水の増加と減少で説明できることが明らかになった．また，λが正となる領域と負となる領域では雲の厚さが異なり，雲の厚い領域（力学的には不安定な）ほど蒸発が促進される高度に雲が多くあることにより，エアロゾルが増加した際に雲水が減少しλが負となることが示された．

同時に，GCM ではエアロゾルの増加に伴う凝結・蒸発の促進が十分に起こらず，これにより負のλを再現できないことが明らかになった．

以上のように，従来の気候モデルと比較可能な長期の積分が NICAM の高解像度モデルでも実現でき，従来の気候モデルとの比較解析を行うことによって，科学的な知見を得られたことが本年度の大きな成果である．

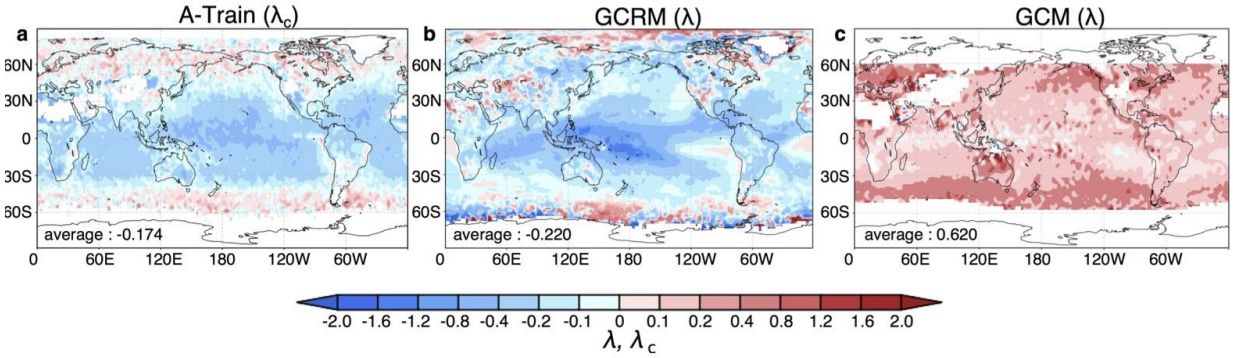


図２：(a) A-train 衛星群による観測，(b) NICAM-Chem (GCRM) ，(c) MIROC (GCM)の計算結果から見積もられたλの全球分布．Sato et al. (2018) の図より作成した．

今後の問題点

本年度は, BC の季節変化や雲エアロゾル相互作用に関する影響を議論し, 気候影響を評価する際に最も重要な放射強制力の見積もり（雲放射強制力やエアロゾルの放射強制力）を行える土台ができた. 来年度以降は放射強制力の見積もりや BC 以外のエアロゾルに関して GCM や衛星との詳細な比較を行う予定である.

参考文献

Chen, Y.-C., M. W. Christensen, G. L. Stephens, and J. H. Seinfeld, 2014: Satellite-based estimate of global aerosol–cloud radiative forcing by marine warm clouds. *Nat. Geosci.*, **7**, 643–646, doi:10.1038/ngeo2214.

Goto, D., and Coauthors, 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.

Michibata, T., K. Suzuki, Y. Sato, and T. Takemura, 2016: The source of discrepancies in aerosol–cloud–precipitation interactions between GCM and A-Train retrievals. *Atmos. Chem. Phys.*, **16**, 15413–15424, doi:10.5194/acp-16-15413-2016.

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. *Sci. Rep.*, **6**, 26561,

Sato, Y., D. Goto, T. Michibata, K. Suzuki, T. Takemura, H. Tomita, and T. Nakajima, 2018: Aerosol effects on cloud water amounts were successfully simulated by a global cloud-system resolving model. *Nat. Commun.*, **9**, 985, doi:10.1038/s41467-018-03379-6.

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、研究代表者（増永）が開発してきた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）に CloudSat 衛星搭載レーダや高分解能赤外サウンダ AIRS など A-Train 網観測を組み合わせ、湿潤対流が大気力学・熱力学場変動に果たす役割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。前年度の成果報告にて手法の詳細を述べたので、ここでは以下の通り簡潔に要約するにとどめる。

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き（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だす方法をとる。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しコンポジット時系列を作成することにより、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。

一方、この手法でルックアップテーブルとして用いられる一次元積雲モデルでは、簡便な定式化ながら積雲対流の発達に伴うエントレインメントとデトレインメントの効果を含んでおり、衛星リトリーバル結果を分析することで対流活動の発達と減衰に伴うエントレインメントとデトレインメントの実態を観察することが可能である。Masunaga and Luo (2016)の論文中では、積雲質量フラックスと大規模場平均質量フラックスの鉛直分布およびその時間変動を中心に議論を展開しており、エントレインメント・デトレインメントに伴う質量流入・放出量変動については触れていなかった。そこで次項では、エントレインメント・デトレインメントに着目し、解析結果を示す。

３．研究成果

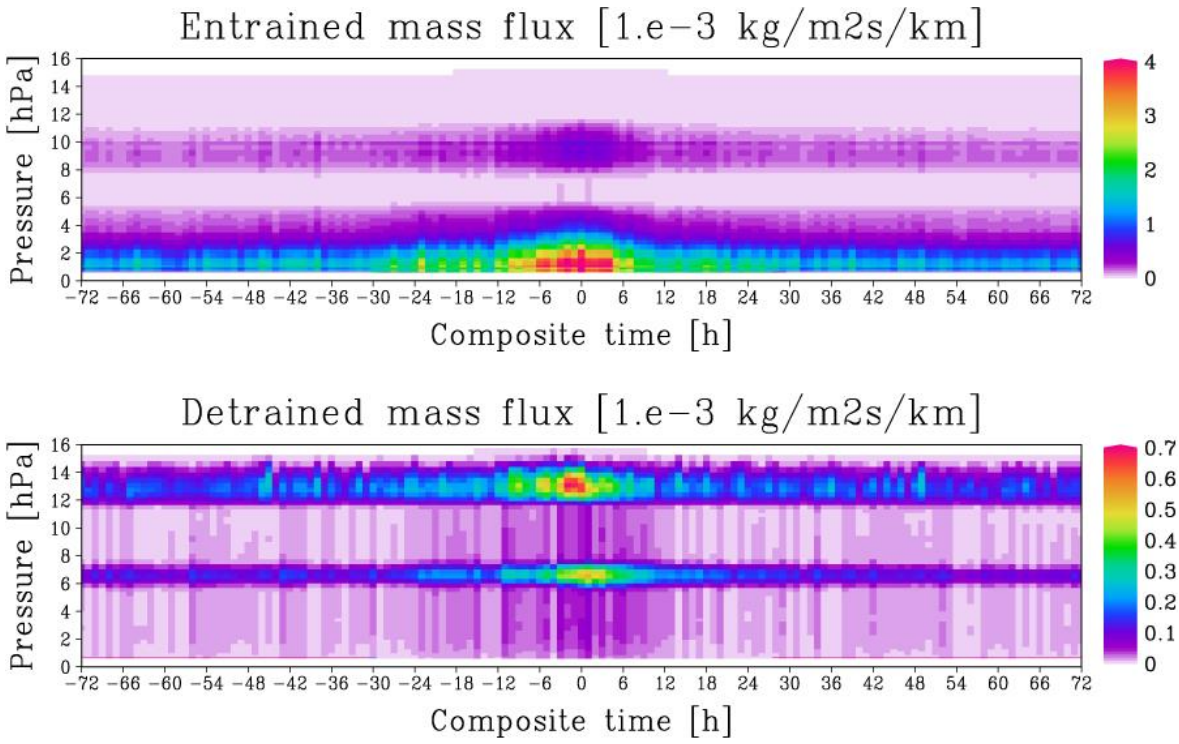


図 1　衛星観測から Masunaga and Luo スキームにより推定されたエントレインメント質量流入量（上）およびデトレインメント質量放出量（下）の時間変化。時刻 0 は対流システムの活動最大時を示す。

図 1 はエントレインメント（上図）およびデトレインメント（下図）により積雲へ流入ないし積雲から放出される質量フラックスのコンポジット時系列を示す。エントレインメントは雲底付近で最大のピークを持ち、強度は弱いが高度 8-10 kmにももう一つのピークが見られる。雲底付近のエントレインメントは、雲内上昇流の加速度が大きいため質量保存を満たすよう大量の質量が起こるためである。一方、上層の弱いピークは凍結過程による浮力増大が寄与している。デトレインメント最大のピークは、圏界面に到達した積雲が急激に減速されるため質量放出が促される 12-14 kmに存在する。6-8 kmに見られる二次的なピークは、凝結物の荷重により浮力が相殺され上昇流が減速する効果に依るものである。

エントレインメント・デトレインメントともに、対流が最も活発化する時刻0付近で強度が最大化することがわかる。これ自体は容易に予想される結果であるが、興味深い点の一つは、圏界面付近のデトレインメント質量放出が時刻 0 にむけて 24 時間余りの時間をかけて徐々に増大を見せていることである。すなわち、強い対流システム発達前でも散発的な孤立積乱雲による対流圏上層のエントレインメントが一定の寄与を担っており、この寄与は対流活発化に伴い徐々に増えていく。このデトレインメントが巻雲の形成と関わっているとすると、対流ピーク時から 1 日前にすでに巻雲の生成が始まることを示唆している。

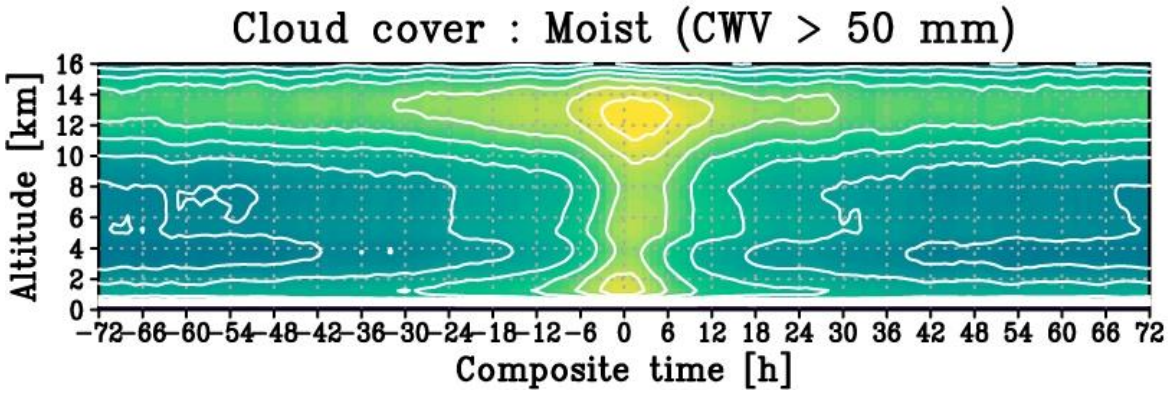


図 2　CloudSat-CALIPSO プロダクトから求めた雲量鉛直分布のコンポジット時系列。時刻 0 での可降水量が 50 ㎜を越える湿潤大気のサンプルから作成。コントア間隔は 0.05。Masunaga and Bony (2018)より。

それを確認するため、CloudSat-CALIPSO 複合プロダクトをもとに導出した雲量のコンポジット時系列を図 2 に示す。12-14 ㎞高度で、実際に―24 時間前後から時刻 0 に向けてゆるやかな雲量の増大が見られ、上述の予想を裏付けている。このような対流ピークに先行する巻雲は、その雲温室効果を通じて局所的な大気熱収支に影響を与え、ひいては来たるべき対流ピークそのものの特徴を形作る一因となっている潜在性がある。この可能性については、最新の研究成果（Masunaga and Bony, 2018）で詳細に議論している。

４．今後の課題

図 1 で示したようなエントレインメント・デトレインメント質量フラックスの時間進化が、衛星データ解析から観測ベースで導出される手法を提案したことは画期的な里程であると自負しているが、いうまでもなくその信頼性はアルゴリズムに内在する種々の不確実性に依存しており、ドップラーレーダ観測などから推定される質量フラックスなど独立な観測データと比較検証する必要がある。一方ここで得られた成果は、様々な積雲パラメタリゼーションの設計に組み込まれる諸物理仮定の妥当性を検討する上で、有用な観測資料となることが期待される。今後、精度検証と応用研究双方のアプローチの可能性を模索していくことが重要である。

米国ニューヨーク市立大学の Luo 博士は、Masunaga and Luo（2016）スキームを深化させてこのような検証・応用研究に発展させていく研究プロジェクトを既に開始させている。Luo 博士らのグループと国際的な研究連携を維持しつつ来年度以降に向けて本研究の方向性を検討

している。

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 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.

Masunaga, H. and S. Bony, 2018: Radiative invigoration of tropical convection by preceding cirrus clouds *J. Atmos. Sci.*, doi:10.1175/JAS-D-17-0355.1, in press.

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	特任准教授	東京大学生産技術研究所
山崎　大	准教授	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
鳩野　美佐子	博士課程学生	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
板谷　知明	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。

研究成果

１．深層学習を用いたダウンスケーリング手法の開発

陸域モデルの精度改善のためには空間詳細な降水データが必要となるが、現状手に入るデータは最小でも５ｋｍ程度であり、さらなる高解像度化（ダウンスケーリング）が必要である。本研究では深層学習を用いた GSMaP 降水データのダウンスケーリング手法を開発した。具体的には、ある時刻の GSMaP の降水量を入力として、国土交通省が観測を行い DIAS が提供する C バンドレーダー雨量（解像度約 1km）の同時刻の降水量を予測す

るディープニューラルネットワーク（DNN; deep neural network）を構築した。 さらに、モデルへの入力として GSMaP の降水量に加えて、ひまわり 8 号衛星観測による高解像度の輝度温度を与えた実験を行い、ダウンスケーリングの精度への影響を検証した。

解析対象領域は東日本：東経 137.5～141.5°、 北緯 34～38°、西日本：東経 133.5～137.5°、 北緯 34～38°の 2 領域である。

構築した DNN モデルが降水のダウンスケーリングを可能かどうかを確認するために、訓練を行なった地域で予測を行い、その精度検証を行う。衛星観測による高解像度輝度温度データとしては気象庁のひまわり 8 号のオリジナルデータを用いた。ひまわり 8 号の輝度温度データは、水平解像度が高い可視光バンド（波長 0.47μm、解像度 1km）である。

モデルの訓練と検証は東日本で行った。訓練期間は、2015 年 6 月から 2016 年 6 月までとし、検証期間は、2016 年 7 月から 2017 年 7 月までとした。訓練データ数は約

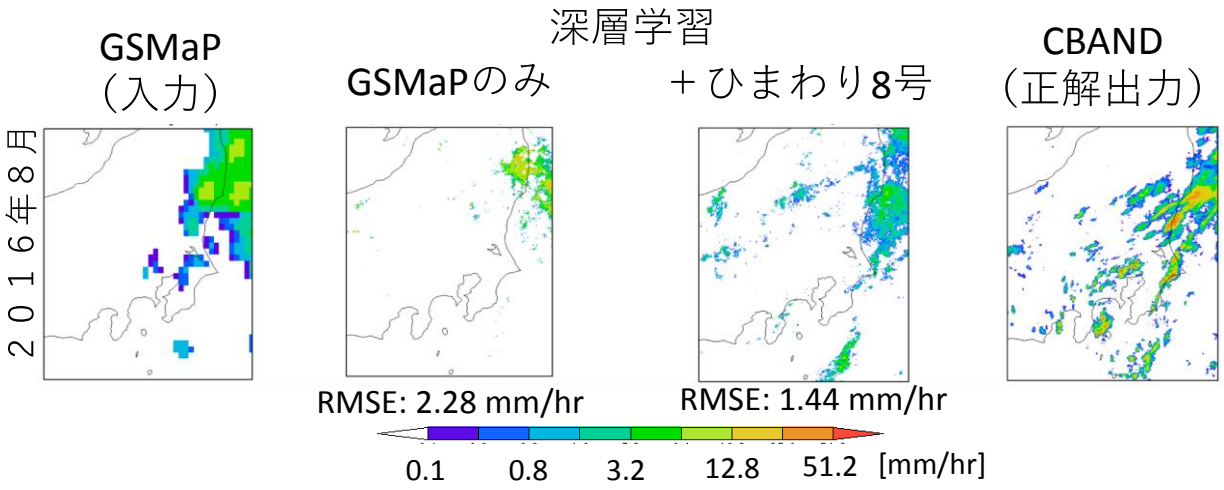


図１．ひまわり 8 号の可視光輝度温度を入力に加えたケースでの GSMaP のダウンスケーリングのスナップショット（期間全体の平均 RMSE を図下に付記）

解像度の低い GSMaP を入力しているにもかかわらず、深層学習を用いた本手法により CBAND の降水場が示すような空間的に細かい変動が再現されている。特に、ひまわり 8 号の可視光輝度温度を入力として利用した結果（図 1 の左から 3 番目）では正解の

CBAND と似通った降水の空間分布が再現された。このような結果から、深層学習による降水空間分布のダウンスケーリングの可能性が示唆された。

２．データ同化アンサンブル気象データを用いた確率予測

不確実性を含む自然現象を扱う際には複数のアンサンブルを用いた確率予測が有用であることはよく知られている。本年度は NICAM/LETKF のデータ同化サイクルで用いられる 100 個のアンサンブルメンバーを外力データとして使い、洪水の確率予測の可能性を検証した（プロダクトを YEE/NICAM と呼ぶ）。用いたモデルシステムは現業の Yesterday’s Earth at EORC(YEE)と同じである。外力データは解像度約 100km の NICAM/LETKF から提供された気象データであり、100 メンバーのアンサンブル実験を構成する。

結果の一例として、図 2 ではメコン川 Saen における河川流量と上流域の降水量をそれぞれ、YEE/NICAM, YEE/JRA55, YEE/GSMaP の 3 バージョンで比較している。YEE/NICAM の流量は他のバージョンと比較して過大評価気味ではあるが、JRA55 と同様の変動を再現しており、メンバーごとのバラツキも十分に表現されている。したがって系統的なバイアスを補正するなどをすれば、YEE/NICAM の 100 アンサンブルメンバーによるノンパラメトリックな洪水確率予測が可能になると考えられる。

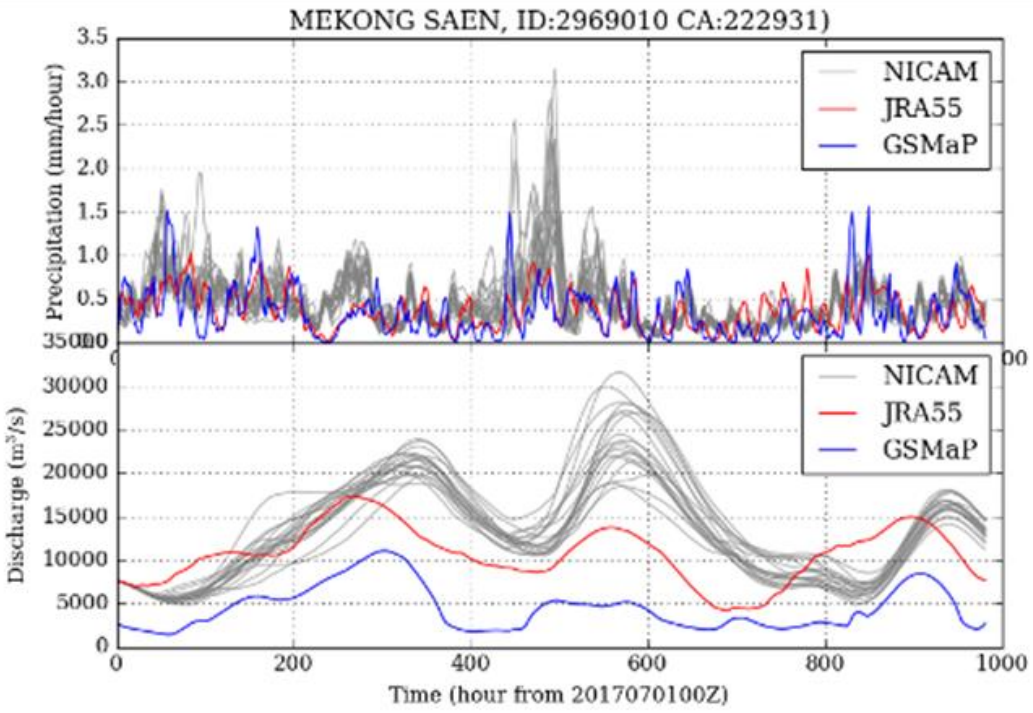


図 2 メコン川 Saen での(上図)上流域降水量と(下図)河川流量の時系列結果。

3.　全球陸面水門量モデルシステムの評価と改良

洪水の予測のためには過去の河川の状態に関する信頼性のあるデータベースが必要となる。YEE システムはその目的のために構築されており、本年度はこの精度の検証作業を引き続き行った。具体的には、

(1) 積雪深と土壌水分の現地観測データとの比較

(2) 氾濫面積の全球比較との結果

などを行った。ここでは積雪深と土壌水分の観測との比較例を示す。図 3 は(a) 積雪深（69.58N 23.53E）と(b)土壌水分（34.5S 146.5E）の時系列の観測との比較結果を示している。どちらも観測とよく一致しており、特に積雪は積雪のはじめから消滅のタイミングまでよく再現されている。他の多くの観測点でも比較を行い、地点によって精度は異なるものの、全体としての精度情報を YEE の検証ドキュメントとしてまとめた。この検証ドキュメント共に、YEE の全データも一般公開となり、他の研究者が様々な研究に使える状態となった。

(a)　(b)

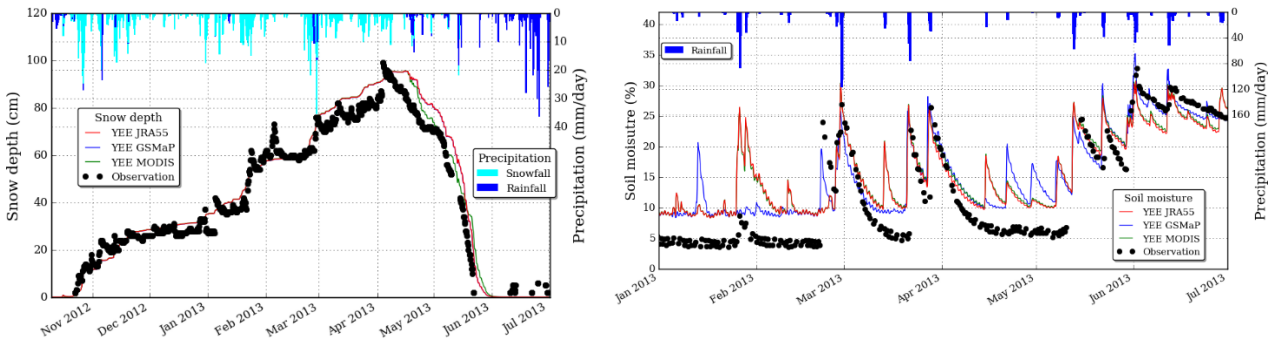


図 3　YEE の(a) 積雪深(cm)と(b)土壌水分(%)の時系列結果の観測(黒点)との比較。

今後の問題点

今年度行った研究は新規機能開発に属するものも多く、すぐに洪水の予測精度向上につながるかどうかは定かではない。しかし、今後も深層学習やアンサンブル確率予測などの新規機能の精度や洪水予測システムへの適用可能性などを検証し、その後は実際の予測システムに組み込んでいく予定である。詳細は説明できなかったが現地の流量観測データに基づくデータ同化システムの準備も始まっており、新時代の洪水予測システムに向けてさらなる研究を進めていく予定である。

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

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・山田洋平・池田美紀子（海洋研究開発機構）・原政之（埼玉県環境科学国際センター）・安永数明（富山大学）

研究目的

本課題では、全球雲解像モデルNICAMや領域気象・気候モデル（SCALE等）を用いた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、客観解析データとの比較検証を行うことにより、雲降水現象のメカニズムの理解を深化し、モデルにおける再現性の向上に向けた課題点を明らかにす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集中観測期間に見られた降水の日周期変動に着目し、NICAMによる計算データの解析およびSCALEによる領域再現計算・解析を実施し、観測との比較による再現性の検証を行った。それぞれのモデルにおける課題点を明らかにし、改善策を検討した。

研究成果

1. NICAMを用いた予測計算における降水日周期変動の再現性

海大陸域では、局地循環を伴う対流活動の日周期変動が卓越し、大規模場に大きな影響を及ぼす。海大陸における多重スケール現象の理解を目的として、JAMSTECでは国際プロジェクトYMC（Years of the Maritime Continent)を主導している。その一環として、スマトラ南西岸において集中観測を実施し（2015年11－12月および2017年11月―2018年1月)、NICAMを用いた予測計算を行った(地球シミュレータを利用)。本課題のH28年度の研究では、2015年の集中観測の予測計算における降水の再現性の検証や雲微物理過程等に関する感度調査を行った。H29年度は、日周期変動の再現性について、全球7㎞格子の7日予測計算（11月各日のデータ30ケース）を用い、GSMaP（JAXA/EORCにより作成・提供）およびNCEP final analysisとの比較解析による検証を行った。

図1にGSMaPとモデルにおける降水日周期の時間―経度図（1.5周期分）を示す。現地観測と同様に、夕方（12UTC；19LT）山岳域で降水が発達し、夜間にか

けて海側（西側）に伝播して、洋上観測点（101.5E）付近で最も強くなる（図１a)。モデルは山岳域での降水発達と降水域の海側への伝播を再現しているが、観測に比べ、沖合での降水強度が弱く、また位相が６時間程度遅い（図１ｂ)。風速や温度場の日周期成分の鉛直構造の解析の結果（図略)、現場観測から示唆される、浅い重力波による降水域の沖合伝播メカニズム（Yokoi et al. 2017）が、モデルでは十分に再現されていないことが分かった。日周期変動に伴う重力波の正確な再現による、降水の日周期の再現性の改善が期待される。

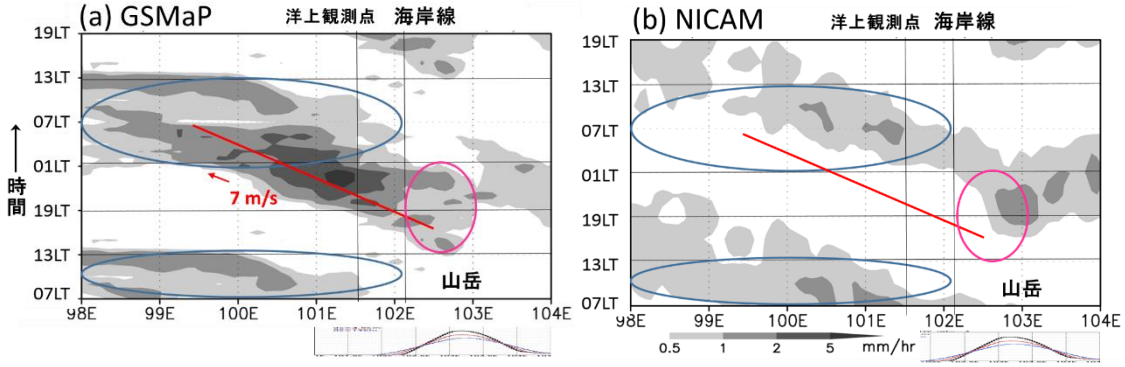


図１ (a)GSMaP, (b)NICAM 予測計算における日内平均降水量の時間―経度図（4S)。2015 年 11 月のコンポジット。1.5 周期分を示す。(日本気象学会 2017 年度秋季大会予稿集 P366 那須野, 図 1 を改変・引用。)

2. SCALE を用いた領域再現計算における降水日周期変動の再現性

日周期変動に関わる局所過程を効率的に精査する上で、領域計算との比較も有意義である。同ケースについて、SCALE を用いた再現計算も行い、降水の再現性の雲微物理過程に対する感度を調べた。NCEP final analysis を初期値・境界値として用い、水平 17.5km 格子（計算領域：75-115E, 18S-18N）と 3.5 km格子（計算領域：88-108E, 10S-6N）の二重ネスト計算を実施した。物理過程については、17.5 km格子計算では 1 モーメント雲微物理スキームと積雲パラメタリゼーション（KF スキーム）を併用し、3.5km 計算では前者のみを使用した。2015 年 11 月 23 日を初期日として、12 月 13 日までの 21 日間積分を行った。

図２に, GSMaP とそれぞれの計算の全期間平均の降水量の水平分布を示す。いずれの計算でも GSMaP のような海岸線付近での降水の極大は再現されておらず、降水量は海上（陸上）で過少（過剰）であり、特に 3.5km 格子計算ではその特徴が顕著であった（図２c)。平均的な日周期の再現性として、全期間について同時刻の降水データを重ね合わせた時間―距離断面を図３に示す。17.5km 格子

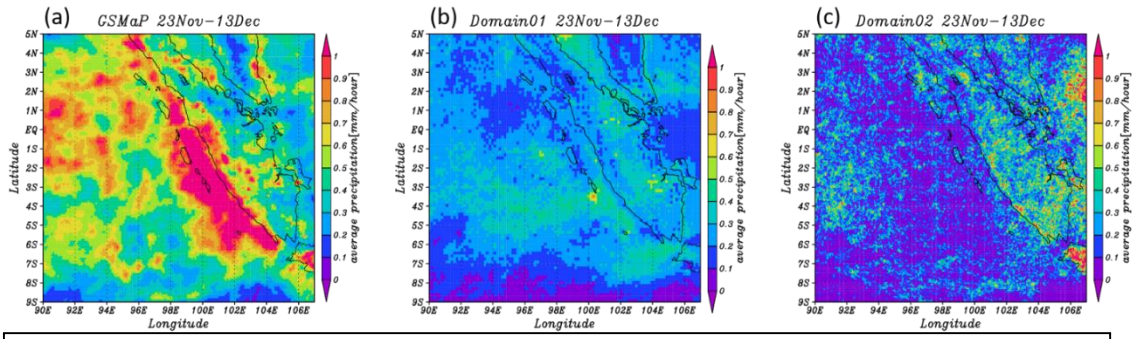


図２ (a)GSMaP, (b)17.5 km格子計算, (c)3.5km 格子計算における、全計算期間平均の降水量の水平分布 (mm/hr)。

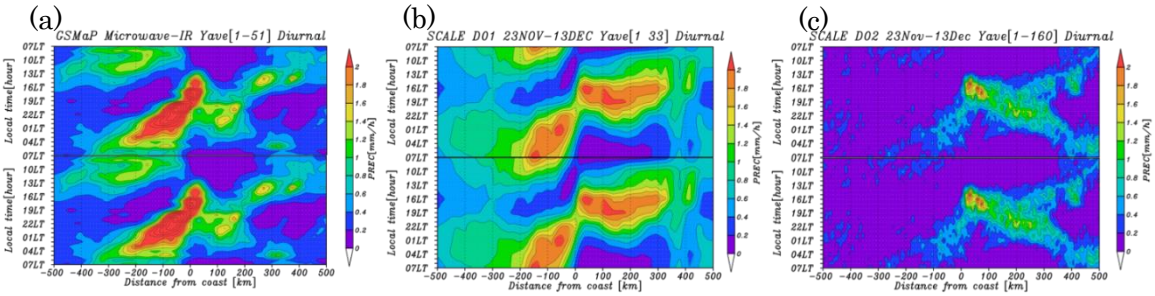


図３ (a)GSMaP, (b)17.5 km格子計算, (c)3.5km 格子計算における、日内平均降水量の時間―距離断面図 (mm/hr)。スマトラ島西岸の海岸線を基点とし, 正は内陸向き。全計算期間のコンポジット。2 周期分を示す。

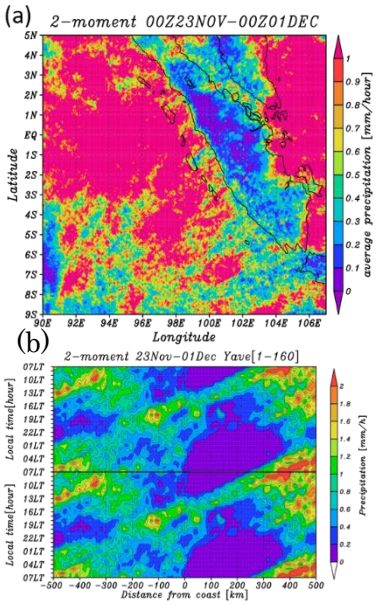


表１ 雲微物理スキームの感度実験におけるパラメータ値一覧 (空欄は標準設定値を使用)。

	N_0r	N_0s	N_0g	EGS	ESI	KK_2000
初期設定	8.0×10^6	3.0×10^6	4.0×10^6	1.0	1.0	OFF
Sens_01		3.95×10^8	5.26×10^7			
Sens_02				0.1		
Sens_03		3.95×10^8	5.26×10^7	0.1		
Sens_04		3.95×10^8	5.26×10^7	0.1	0.1	
Sens_05	4.0×10^7			0.1		ON
Sens_06	4.0×10^7	3.95×10^8	5.26×10^7	0.1		
Sens_07	4.0×10^7	3.95×10^8	5.26×10^7	0.1	0.1	ON
Sens_08	4.0×10^7	3.95×10^8	5.26×10^7	0.1		ON
Sens_09	8.0×10^7	3.95×10^8	5.26×10^7	0.1		ON

図４ (a) 図２に同じ。但し 3.5km 格子２モーメント雲微物理スキーム実験。(b) 図３に同じ。但し 3.5 km格子２モーメント雲微物理スキーム実験。

計算では降水域の沖合への移動がおおまかに再現された一方で（図３b)、3.5km 格子計算では陸上での降水の日周期の発達のタイミングや移動速度等は観測とよく合っていたものの、降水の海上での発達・維持が見られず、沖合への移動が再現されなかった（図３c)。17.5km 格子計算において、雲微物理スキームの凝結物の落下速度に関する幾つかのパラメータを、観測値を基にして変化させた感度実験を９通り行ったが（表１)、大きな変化（再現性の向上）は見られなかった。さらに、3.5 km格子計算において、雲微物理スキームを１モーメント（凝結物の混合比のみを予報変数とする）から、２モーメント（数密度も予報変数に含める）に変更した感度実験をおこなった（図４)。その結果、陸上での降水の日周期が抑制され、海上での降水量が大幅に強化された。今後，２つの雲微物理スキームによる実験結果の乖離の原因について、より詳しい解析を行い、降水の日周期変動の再現性向上に向けた雲微物理過程（1 モーメントスキーム）の高度化について検討を行う。

今後の問題点

２つのモデルに共通して、降水の日周期変動に伴う沖合伝播や沿岸での降水量の極大が十分に再現されなかった。これらの特徴をもたらすメカニズムのうち、日周期に強制された重力波の形成過程や、雲・降水の形成過程について、今後更に詳しく調べ、現象理解と再現性の向上を目指す。

参考文献：

Yokoi, S., and Coauthors, 2017: Diurnal cycle of precipitation observed in the western coastal area of Sumatra Island: Offshore preconditioning by gravity waves. Mon. Wea. Rev., 145, 3745-3761.

略語：

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

SCALE: Scalable computing for Advanced Library and Environment (https://scale.aics.riken.jp/ja/)

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約 40 地点で降水の採水を依頼し，採取された降水サンプルを熊本大学に輸送して水素酸素同位体比を分析した．本研究では，2010 年から 2013 年まで毎週のデータが蓄積されたので，インドネシア全域における降水の酸素安定同位体比の分布および季節変動を明らかにした．

2. 研究内容

インドネシア全域約 40 地点において，2010 年から 2013 年まで 1 週間ごとに降水サンプルを取得し，その酸素水素安定同位体比を分析した．毎週の酸素水素安定同位体比は降水量で加重平均して月データとし，それらの空間分布と季節変動を明らかにした．さらに，降水 $\delta^{18}O$ の月平均値を用いてクラスター解析を行い，季節変動を 4 パターンに区分した．クラスターごとに平均した降水量および $\delta^{18}O$ の季節変化を図 1 に，その分布を図 2 に示す．

図より，クラスター1 と 2 は，乾季（7-10 月）と雨季（11-6 月）が明瞭な季節変化を示しており，降水量と $\delta^{18}O$ に負の相関（降水量効果）が認

められる．これらのクラスターは，インドネシア全域に分布している．クラスター3 は，降水量に 2-3 月と 8-9 月に 2 回のピークがあるが，降水量と $\delta^{18}O$ には明瞭な負の相関は認められない．分布はスマトラ島からカリマンタン西部に限られている．クラスター4 はパプア島の 1 地点のみであり，他のクラスターのように平均されていないためか，降水量は明瞭な季節変化は認められない．$\delta^{18}O$ は 5-7 月と 9-10 月に低く，降水量との相関（降水量効果）は認められない．以上のように，降水 $\delta^{18}O$ の季節変化は 4 パターンに分けられ，クラスター1 と 2 の変動要因は降水量効果によることが示された．

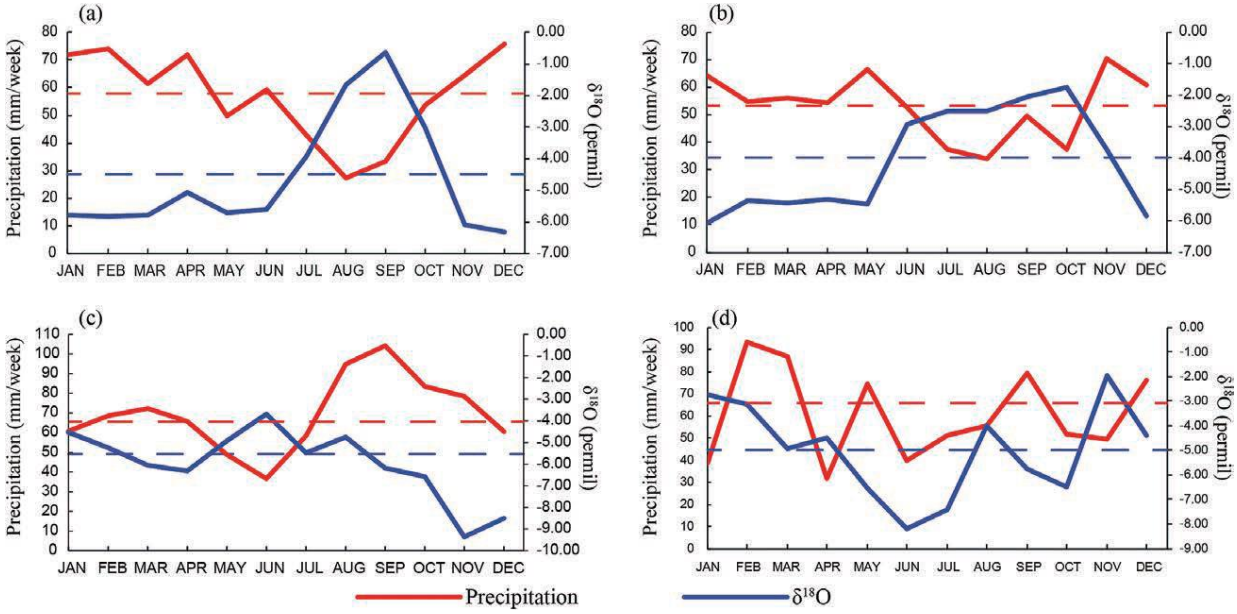


図 1：降水 $\delta^{18}O$ の月平均値をクラスター分析により区分し，平均した降水量および $\delta^{18}O$ の季節変化パターン．(a)～(d)は，クラスター1～4 に対応する．点線は，それぞれの平均値を示す．

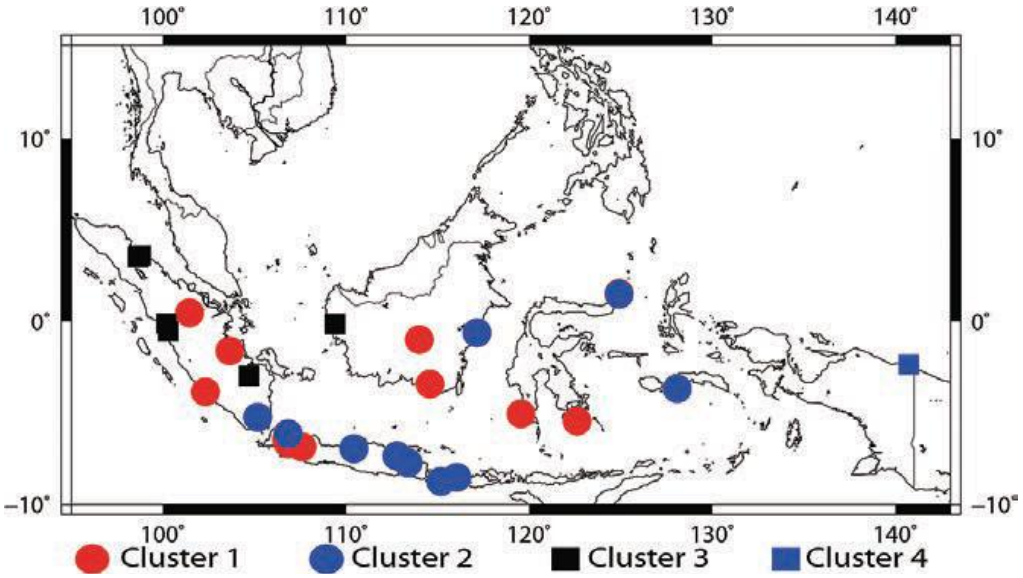


図 2：各クラスターの分布.

3．研究成果

- Rusmawan Suwarman, Kimpei Ichiyanagi, Masahiro Tanoue, Kei Yoshimura, Shuichi Mori, Manabu D. Yamanaka, Halda Aditya Belgaman, and Fadli Syamsudin (2017), El Nino southern oscillation signature in atmospheric stable isotopes over Maritime Continent during wet season, JMSJ, 95(1), 49-66, DOI:10.2151/jmsj.2017-003.（査読付き国際誌）
- Halda Aditya Belgaman, Kimpei Ichiyanagi, Rusmawan Suwarman, Masahiro Tanoue, Edvin Aldrian, Arika I.D. Utami and Sheila D.A. Kusumaningtyas (2017), Characteristics of seasonal precipitation isotope variability in Indonesia, Hydrological Research Letters 11(2), 92-98, 2016, doi:10.3178/hrl.11.92.（査読付き国際誌）

4．今後の問題点

インドネシア全域における降水サンプリングは継続しており，降水同位体比の季節変動や分布は，今後さらに明確になることが期待できる．今後は，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．降水同位体比の分布や季節変動を再現することは，酸素安定同位体比による古気候の復元にも利用できる．

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

海洋モデルにおいて河川流入は、他の大気からの外力と大きく異なり、特定の海岸線付近の格子おける淡水のインプットという形で与えられる。そのため、河川流入データには、他の大気からの外力に対して用いられているような空間補間ルーチンを使うことができず、特別のルーチンを必要とする。

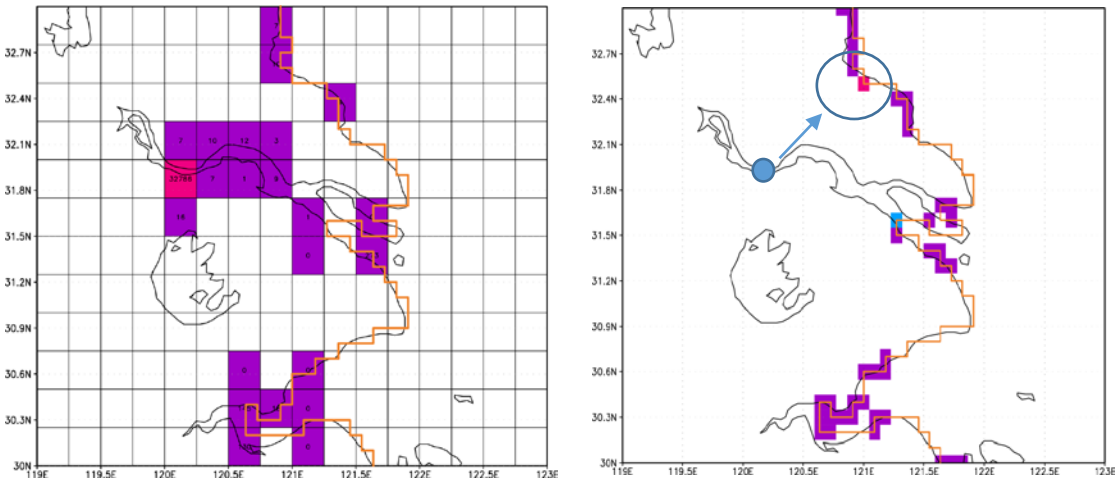


図１：長江付近の河口データの場所(左)と簡便法による海洋モデルにおける淡水のインプット場所(右)

従来、海洋モデルにおける河口を推定するには、「河川流入量データの河口の地点」にもっとも近い海の格子点を、モデルの河口とする簡便的な方法が採用さ

れてきた。しかしながら、「河口データの河口の地点」が河川を海から遡及した場所にある場合(図 1 左)、そこから最も近い海洋モデルの海岸線は本来の河口とはまったく別の場所となる可能性がある(図 1 右)。また「河口データの河口の地点」がモデルの湾奥よりも沖側の場合も、この簡便法では湾奥にあるべきモデルの河口が正しく推定できない。このようにして間違った場所を海洋モデルにおける河口として推定した場合には、付近の塩分分布が非現実的になってしまう恐れがある。従来はこれを防ぐために、煩雑な手作業による河口推定の修正作業をおこなっていた。

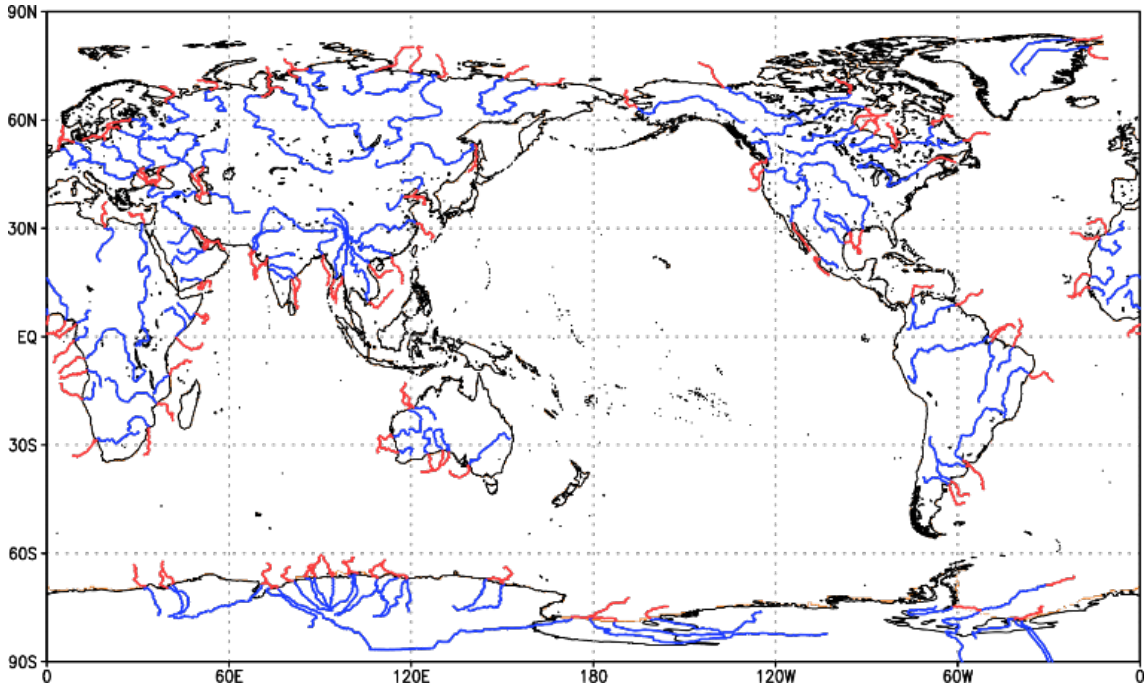


図 2：1km 河道網で描いた、1000km 以上の長さをもつ河川の「本流」（例：ミシシッピ川はミズリー川からの河道)。赤色は海への延長。

このような問題に対処するために、河川流路網(解像度 1/60, 山崎大氏(東京大学)提供、図 2)を用いて、河川網の河川の源流から河口に向かって下り、海洋モデルの海岸線と交わる格子を海洋モデルの河口とすることとした。この「河川網」は地形データを利用して深海まで続いている作成されているため、河川の源流が海洋モデルの陸地にあるかぎり、海洋モデルの海岸線が現実よりも海側に寄っていたとしても、河口を見つけることができる。このようにして海洋モ

デルにおける河口を推定することで、河川の河口による淡水流入を、機械的に海洋モデル妥当な格子に流入させることができるようになった。

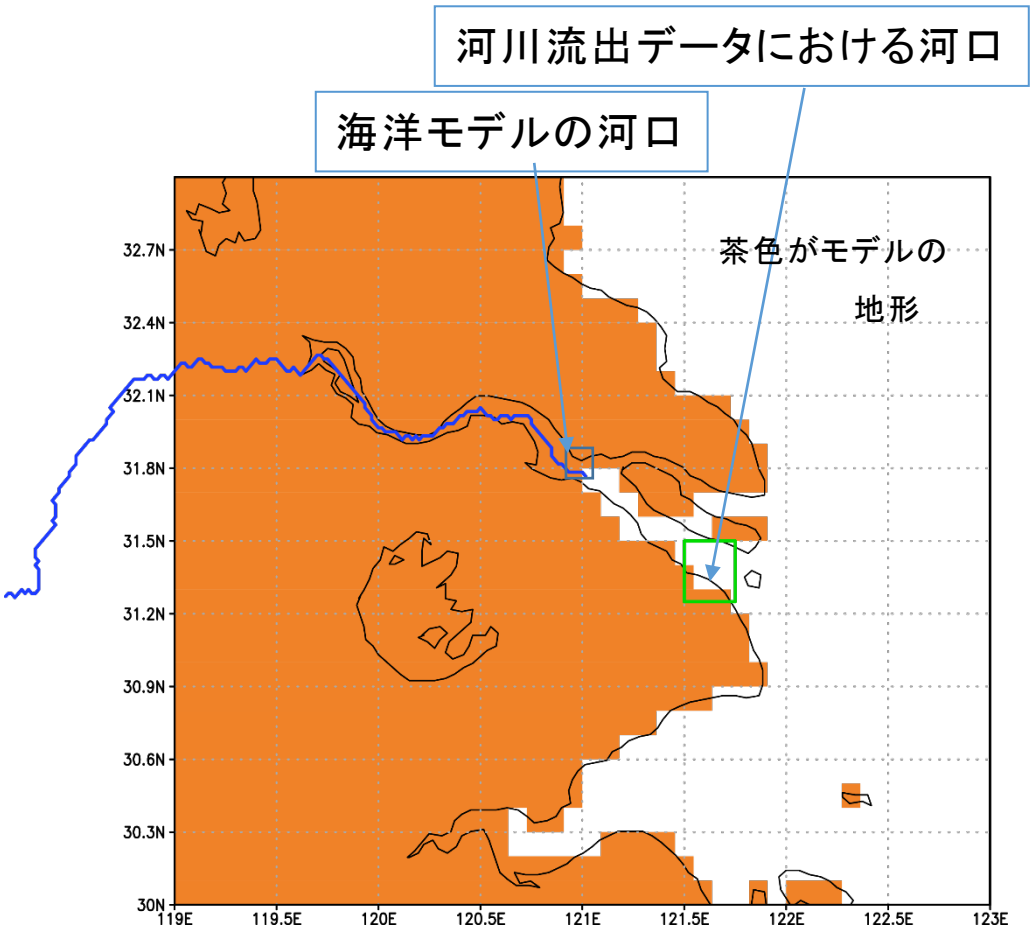


図３：河川流路網を用いた河口の推定。

この河口推定法は、任意の海洋モデルの地形に対して用いることができるため、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に対しても適用可能であり、外力等の条件を揃えることが必須の相互比較にとって有用なツールであると思われる。

今後の問題点

このツールでは三角州のように分岐する河口に対応できないため、三角州が発達している大河川については別途修正しなければならない。

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

主要な温室効果ガスである二酸化炭素（CO_2）やメタン（CH_4）の吸収・排出量の分布や時間変動を大気濃度の観測データから定量的に推定を行う逆解析について、本研究では、そのシステム開発と関連する手法の高度化を目的とする。この逆解析システムでは、4次元変分法を採用することで、衛星観測により得られる膨大な量の濃度データを効率的に利用することが可能となっている。さらに、従来よりも時空間分解能の高い地表面フラックス推定を行うことができるため、温室効果ガスの吸収・排出メカニズムに直結する情報が得られることが期待される。

研究内容

今年度はCO_2の逆解析について、NICAM-TMの水平解像度を上げることで、より高解像度のフラックス推定を試みた。また、CH_4の逆解析システムへの導入にあたり、その前段階としてNICAM-TMによるCH_4の大気輸送実験を行い、モデルの解像度や使用するフラックスデータによって、計算されるCH_4濃度値がどのように変化するかを調べた。

CO_2の逆解析計算はNICAM-TM 4D-Var (Niwa et al., 2017a,b)システムを用い、Niwa et al. (2017b)で用いた水平解像度（glevel-5、格子間隔約240km）から1段階上げて（gleve-6、格子間隔約120km）実験を行った。

CH_4の大気輸送実験については、NICAM-TMの水平解像度をglevel-5、鉛直層数を40層（モデルトップ：45km）としたものをコントロール（gl5vl40）とし、それから水平解像度をglevel-6に上げたもの（gl6vl40）、

鉛直層数を 78 層（モデルトップ：52km）に上げたもの（gl5vl78）の 3 通りの設定で実験を行った。さらに、CH_4 のフラックスデータとして国際的な CH_4 モデル相互比較実験 TransCom-CH_4（Patra et al. 2011）のものと、その TransCom のデータのうち、化石燃料起源を EDGARv4.3 に、森林火災起源を GFEDv4.1s に置き換えたものの 2 種類を用いた。

研究成果

図 1 は glevel-6 で行った CO_2 逆解析結果の 1 例を示す。この解析では、航空機による観測が充実している東南アジア域に着目しているため、東南アジア域以外の領域においては、フラックスの初期値において誤差相関を広範囲にわたって与え（陸域で 1000km、海洋で 3000km の相関スケール）、観測データの不足に起因する擬似的な振動を極力抑制している。そのため、全球でみれば滑らかな分布（図 1a）となっているが、誤差相関を与えていない（フラックス推定の自由度が高い）東南アジア域においては図 1b に示すように、細かな分布が推定されている。同じ 4 次元変分法を使った逆解析の研究は、欧米の研究機関において数例あるが、それらの解像度はこの解像度の 2～4 倍程度低いものとなっており、本研究の解像度は世界的にみても最高レベルであるが、Niwa et al. (2017a)によるオフライン計算の高速化の効果もあり、計算時間は 5 日間（10 ノード使用。解析対象は 15 ヶ月間）と十分に実用可能であることが分かった。

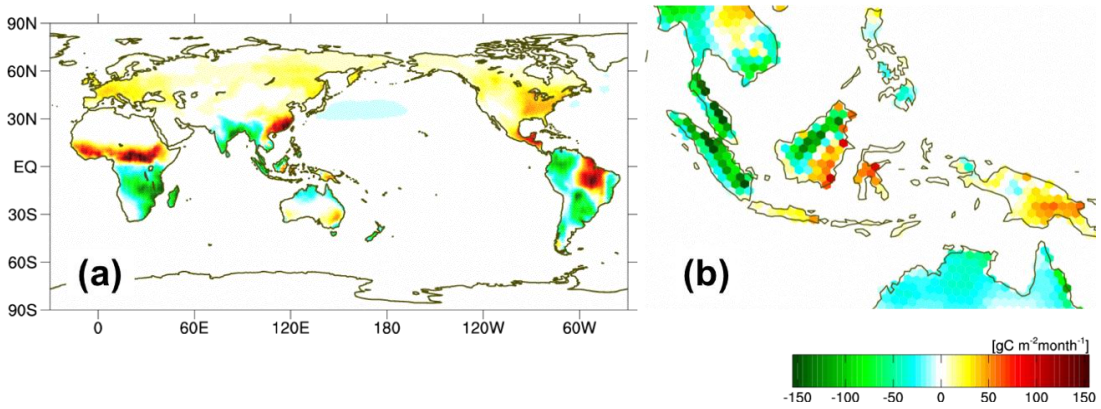


図 1 ：glevel-6 で行った CO_2 逆解析結果。逆解析によって推定された 2015 年 1 月の全球フラックス分布(a)とそれを東南アジア域で拡大したもの(b)。

図 2 は NICAM-TM による CH_4 の大気輸送実験の結果を示す。ここでは、参考のために気象庁南鳥島気象観測所における観測値も併せて示す。まずフラックスデータについて、TransCom-CH_4 のものよりも EDGARv4.3、GFEDv4.1s を用いたデータの方が 2007 年頃からの増加傾向をより現実に近い形で再現していることが分かる（図 2b）。これは主に、EDGARv4.3 のデータの中で、近年の東アジア域における CH_4 排出増加の傾向が表現されていることに起因する。このことから、今後の CH_4 逆解析において、どのデータを初期推定フラックスに用いるか、特に東アジア域の増加傾向の表現の有無によって、逆解析結果に有意な差を生じさせ得ることがわかった。

一方、モデルの解像度依存性については、図２b に示すように、濃度増加速度が解像度によって異なることが分かった。これらは、解像度によって対流圏―成層圏間の輸送量が変わるため、対流圏や成層圏での消失の量に差異が生じるためであると考えられる。それぞれの南鳥島における濃度増加速度は、コントロール実験では 7.7、鉛直層を上げた場合（gl5vl78）では 10.0、水平解像度を上げた場合（gl6vl40）では 5.7 であった（単位は $\times 10^{-9}$ mol mol^{-1} yr^{-1}）。これらの濃度増加速度の違いは、フラックス値に換算すると、全球でおよそ 12 Tg CH_4 yr^{-1} であり、従来のフラックス推定値の不確定性の範囲内ではあるものの、観測されている濃度増加速度の経年変動と比べれば無視できない大きさであり、フラックス推定値の経年変動について解析を行う際には、モデルの解像度依存性と大気輸送の不確定性を評価する必要があることが分かった。

今後の問題点

CO_2 逆解析の高解像度化について、フラックス推定より数百倍計算コストのかかる解析誤差共分散行列の推定に対しては、現状の計算効率ではまだ不十分であり、アルゴリズムの並列化などを行う必要がある。

また、CH_4 の大気輸送実験では、今回、解像度によって濃度増加速度に違いが生じることが分かったため、六フッ化硫黄（SF_6）などの単純トレーサーを用いて、大気輸送計算の不確定性評価を行う必要がある。

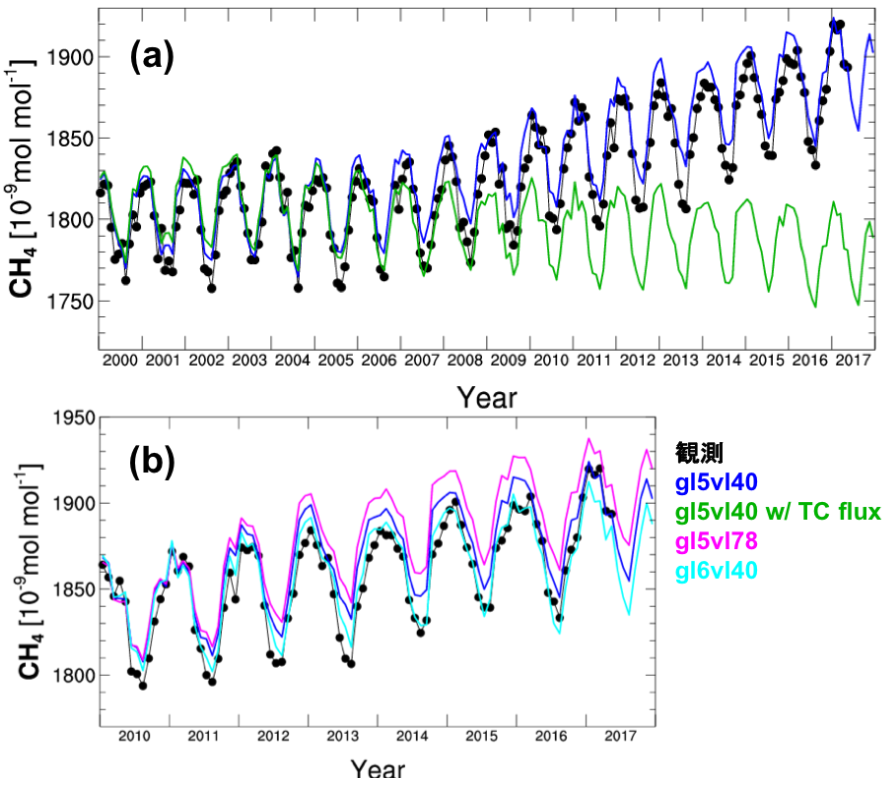


図 2：NICAM-TM による CH_4 の大気輸送実験の計算値と観測値（気象庁南鳥島気象観測所）との比較。黒が観測値、他の色はそれぞれ解像度の異なるモデル計算値を示す。緑は TransCom-CH_4 のフラックスデータを用い結果で、他は EDGARv4.3、GFEDv4.1s を含むフラックスデータを用いた結果を示す。

参考文献

1. Patra, P. K. et al. (2011): TransCom model simulations of CH_4 and related species: linking transport, surface flux and chemical loss with CH_4 variability in the troposphere and lower stratosphere. *Atmos. Chem. Phys.*, 11, 12813–12837.
2. Niwa, Y., et al. (2017a): A 4D-Var inversion system based on the icosahedral grid model (NICAM-TM 4D-Var v1.0) – Part 1: Offline forward and adjoint transport models, *Geosci. Model Dev.*, 10, 1157–1174.
3. Niwa, Y., et al. (2017b): A 4D-Var inversion system based on the icosahedral grid model (NICAM-TM 4D-Var v1.0) – Part 2: Optimization scheme and identical twin experiment of atmospheric CO_2 inversion, *Geosci. Model Dev.*, 10, 2201-2219.

特定共同研究課題名：
衛星データ及び数値モデルによる全球降水システムの研究

分担課題名：
潜熱加熱アルゴリズム開発のための雲解像モデルシミュレーション

共同研究者名（所属）：
重　尚一　（京都大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻・准教授）
山本宗尚　（京都大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻・特定研究員）
武村一史　（京都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：
アジア夏季モンスーンの開始や強さがチベット高原上空の大気加熱と密接な関係を持つことから、同地域の潜熱加熱量を正確に見積もることは重要である。熱帯降雨観測（TRMM）衛星搭載降雨レーダ（PR）によって観測された降水鉛直分布から潜熱加熱鉛直分布を推定する Spectral Latent Heating（SLH）アルゴリズムが開発され（Shige et al. 2004, 2007, 2008, 2009）、熱帯・亜熱帯のプロダクトが公開されているが、チベット高原のような高高度域では、適切な参照テーブルがないために推定は行われず、欠損値となっている。本研究の目的は、高高度域における参照テーブル作成に向け、雲解像モデルによってチベット高原上の降水システムをシミュレーションし、潜熱加熱プロファイルを求める事である。

研究内容：
米国国立大気研究センターを中心に開発が進められているメソ気象モデル WRF（Weather Research and Forecast）-ARW（Advanced Research WRF）（V3.8.1）を用いて、2013 年 5 月 30 日 15:52UTC に TRMM（軌道番号 89089）が捉えたチベット高原上の降水システムを対象にシミュレーションを行った。前日 18UTC を

表 1　WRF 設定一覧

Domain	d01	d02	d03
Horizontal grids	150 × 150	151 × 151	151 × 151
Grid spacing	27 km	9 km	3 km
Integration time	0–24	0–24	0–24
Planetary boundary layer	YSU	YSU	YSU
Microphysics	WSM6	WSM6	WSM6
Cumulus parameterization	Grell-3	Grell-3	Not used
ShortwaveRadiation	Dudhia	Dudhia	Dudhia
Longwave Radiation	RRTM	RRTM	RRTM

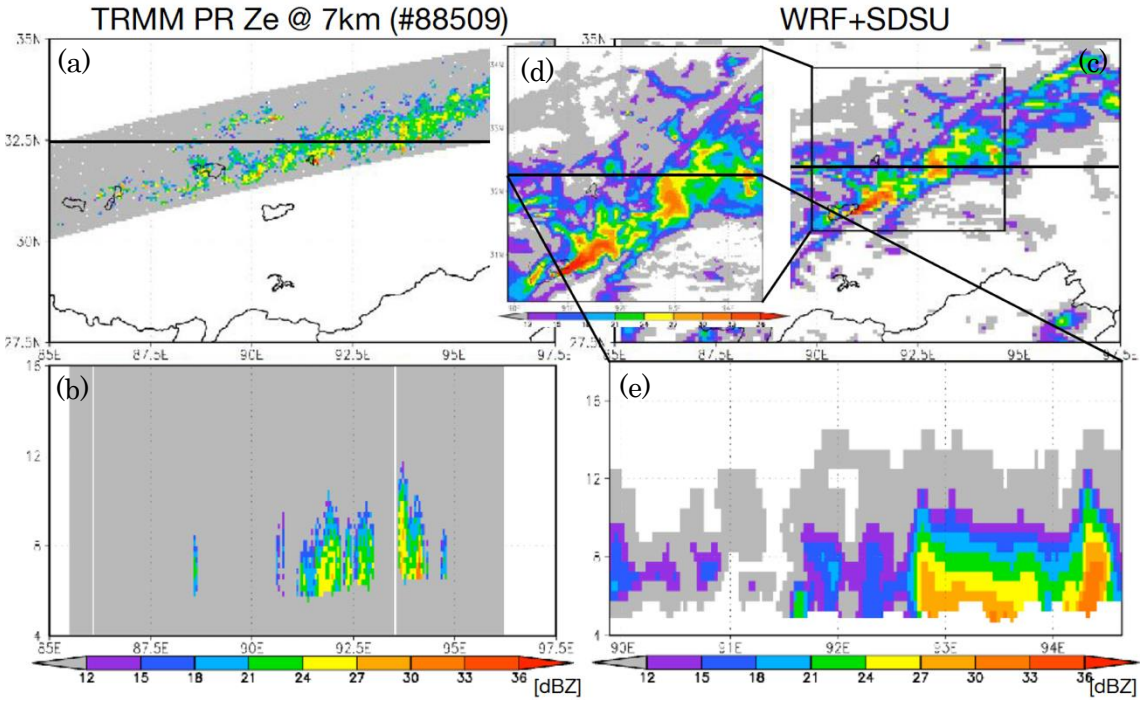


図 1　2013 年 5 月 30 日 15:52UTC に TRMM（軌道番号 89089）が捉えた降水システムの（a）高度 7km におけるレーダ反射強度、(b) 緯度 32.5 度におけるレーダ反射強度の経度-高度断面。WRF と SDSU シミュレーションによる 16UTC（積算時間 23 時間）の（c）d2 および（d）d3 における高度 7km のレーダ反射強度、(e) 緯度 32.3 度におけるレーダ反射強度の経度-高度断面。

初期時刻とし、初期値および境界値データに 6 時間毎の NCEP（米国環境予測センター）FNL（Final Analysis）全球客観解析値（1° × 1°、鉛直 27 層）を用いた。シミュレーションの設定を表 1 に示す。水平解像度 27km から 9km および 3km へのネスティングを施した。さらに、WRF の出力から TRMM PR に相当するレーダ反射強度を求めるため、SDSU（Satellite Data Simulator Unit）(Masunaga et al. 2010) v.2.1.4 を用いた。

研究成果：

TRMM PR の観測と WRF/SDSU から求めたレーダ反射強度の水平・鉛直分布を比較した（図 1)。TRMM の通過時にほぼ一致する 16UTC の結果を解析に用いた。同領域を通過した TRMM PR の観測によれば、降雨システムの一部に対流性降水が含まれていたものの、ほぼ全てでブライトバンドが存在する層状性と判定されていた（図省略)。緯度 32.5 度の TRMM PR のレーダ反射強度の鉛直断面（図 1b）から、降水頂は 10-12km に達するものがあり、下層に向かって増大していた。WRF/SDSU シミュレーションによるレーダ反射強度の水平・鉛直分布は、観測を

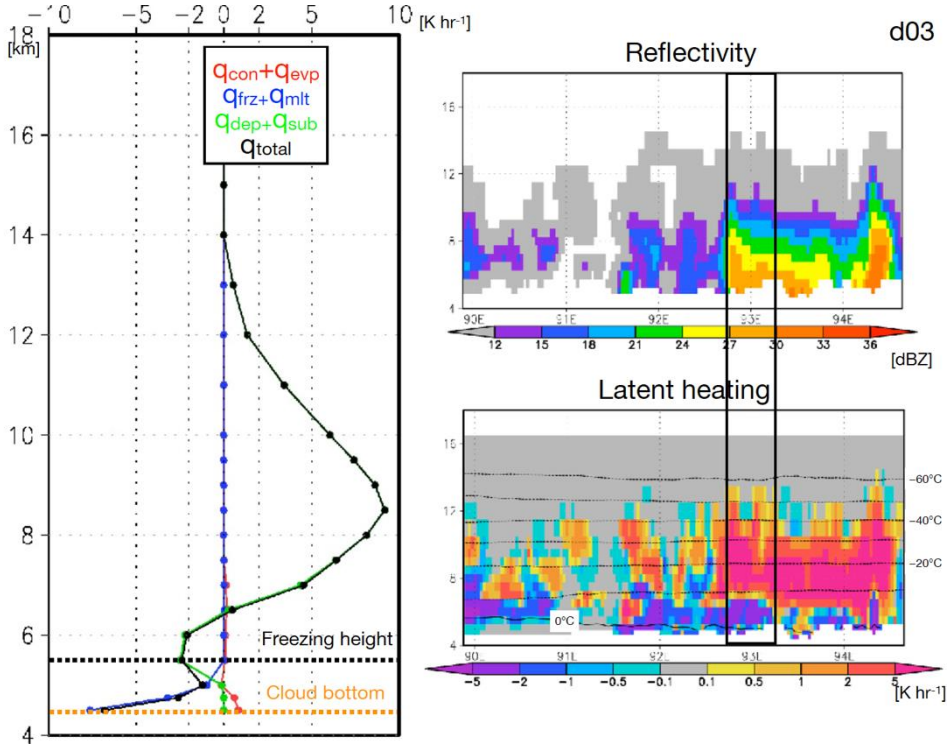


図 2　左に図 1 と同時刻の d3 における（赤）蒸発、（青）凝結、（緑）昇華、および（黒）全潜熱加熱の鉛直分布。0 度高度と雲底高度を黒および黄点線で示す。右上は図 1d に同じで、右下は同域の潜熱加熱の経度-高度断面。黒で囲った領域を平均した。

よく再現していることがわかる（図 1c-e）。同時刻の WRF シミュレーションによると、0 度高度より少し高い高度では昇華による冷却が、0 度高度以下では融解による冷却が卓越しているなど特徴的な潜熱加熱の鉛直分布が得られた。

今後の課題：

昇華の卓越傾向について、WRF では飽和湿潤調整より水蒸気と雲水/雲氷間のやりとりの方が大きい可能性が有り［今回用いた WSM のパラメタリゼーションでは特に大きく出る傾向がある（野村，2017、私信）］、今後、他の雲微物理パラメタリゼーションを試すなどして検証を進め、高高度における SLH 参照テーブルの作成を目指す。

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、氷期ー間氷期間の窒素栄養塩の除去源および供給源の速度変動は、その期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、氷期ー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速度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。そのため、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「氷期と間氷期の物理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動し、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、昨年度までに整備した窒素同位体比を組み込んだ生態系モデルの長期積分を行い、モデルのパフォーマンスを検証した。

研究成果

(1) 観測データとモデル結果の比較

モデル内では全窒素（$^{14}N+^{15}N$）と ^{15}N が、各コンパートメント毎に計算される。それらの計算値から、観測データと比べやすくするため以下の δ 値に換算した。

$$\delta^{15}N=(R_{sample}/R_{std}-1)\times 1000 \quad (1)$$

ここで R_{sample} および R_{std} はそれぞれ各コンパートメントと大気窒素ガスの $^{15}N/^{14}N$ 比をそれぞれ表す。

モデルで計算した表層 120m までの硝酸塩の $\delta^{15}N$ 値とその値が反映されると考えられる表層堆積物の全窒素の $\delta^{15}N$ 値（観測値）を比較した（図1）。大規模な貧酸素水が存在し、大きな同位体分別効果をもつ「水柱内での脱窒」（表）に影響をうける東部太平洋・大西洋および北部インド洋で高い $\delta^{15}N$ 値が存在することが、モデルと観測の両方で確認される。また、南大洋や北部北太平洋で低い $\delta^{15}N$ 値が確認される。このことから、現在のモデルで表層の硝酸塩 $\delta^{15}N$ 値の動態を大まかには再現することができると言える。

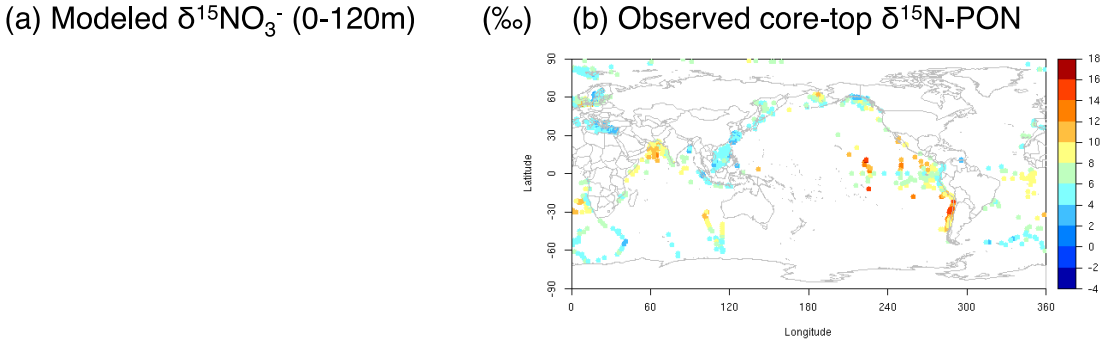


図1　（a）表層（0–120m）の硝酸塩の $\delta^{15}N$（‰）、（b）観測された堆積物表層の全窒素の $\delta^{15}N$（‰）（Tesdal et al., 2013）

(2)　モデルの各コンパートメントの $\delta^{15}N$ 値

モデルでは、表に示す同位体分別を考慮した。モデル内での、海洋表層の硝酸塩、粒子状有機窒素（PON）、植物プランクトン（PP）、動物プランクトン（ZP）および窒素固定生物（DIA）の窒素同位体比のモデル結果を示す（図 2）。

硝酸塩の $\delta^{15}N$ 値は、亜寒帯で約 5–7‰と低い値を示し、熱帯から亜熱帯で約 8–11‰と亜寒帯と比べ高い値を示す。また、（1）で述べたように「水柱内での脱窒」の影響をうける東部太平洋・大西洋と北部インド洋で高い値を示す。

上記のような $\delta^{15}N$ 値を持つ硝酸塩を、植物プランクトンが 5‰の同位体効果を伴って利用する。そのため、植物プランクトンの $\delta^{15}N$ 値はその同位体効果の分だけ低くなる。一方、動物プランクトンの $\delta^{15}N$ 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排出するためである。栄養段階が高くなるにつれ、$\delta^{15}N$ 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再現している。また、窒素ガスを利用できる窒素固定生物は、「水柱の脱窒」の影響を受けた硝酸塩が存在する場

所を除いては 0-2‰程度と低い値をとる。植物プランクトン、動物プランクトンおよび窒素固定生物の死体が粒子状有機窒素（PON）を形成する。その大半は植物プランクトンが占めるため、PON の $\delta^{15}N$ 値は硝酸塩よりは低く、植物プランクトンの $\delta^{15}N$ 値に近いものとなる。

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[1,2,3]
動物プランクトンの排泄	−3	−3 [4]
水柱内における脱窒（WCD）	−25	−20～−30 [5, 6, 7]
堆積物における脱窒（BD）	−1	−6～0 [8, 9]

[1] Sigman et al. (1999), [2] Granger et al. (2010), [3] DiFiore et al. (2010)
[4] Checkley and Miller (1989)
[5] Cline and Kaplan (1975), [6] Brandes et al. (1998), [7] Voss et al. (2001)
[8] Brandes and Devol (2002), [9] Alkhatib et al. (2012)

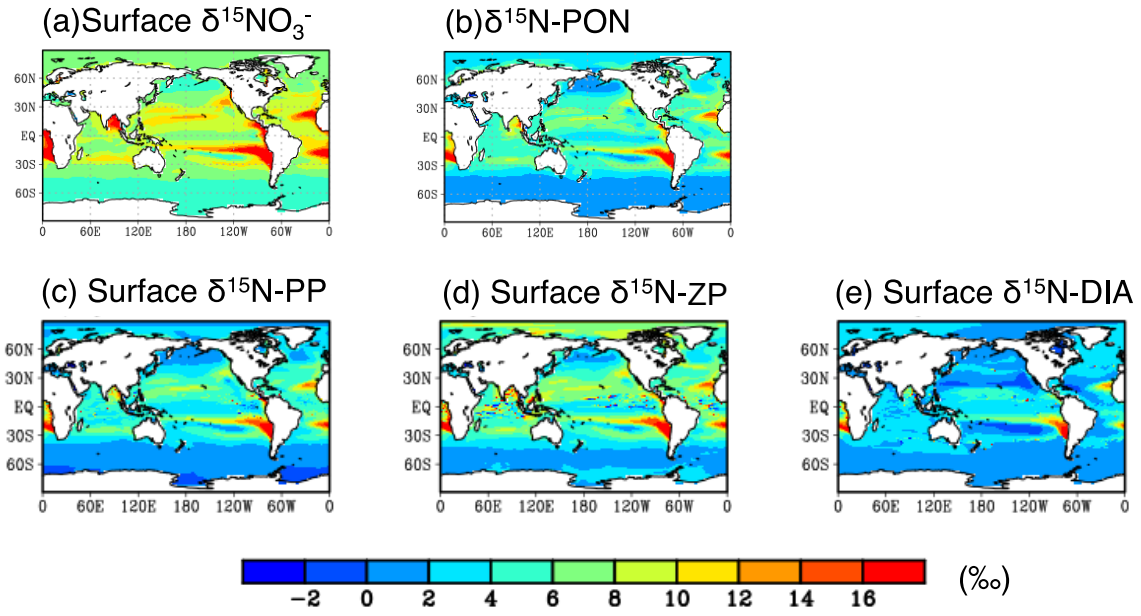


図2　モデルで計算された海洋表層の(a)窒素栄養塩（硝酸塩）、(b)粒子状有機窒素（PON）、(c)植物プランクトン（PP）、(d)動物プランクトン（ZP）、(e)窒素固定生物の窒素同位体比（$\delta^{15}N$, permil（‰））

(3) 「硝酸塩および PON の $\delta^{15}N$ 値」への各生物過程の影響

モデル内で各生物過程が硝酸塩および PON の $\delta^{15}N$ 値に与える影響を把握するため、感度実験を行った(図 3)。植物プランクトンの硝酸塩同化(NO_3^- assimilation)および動物プランクトンの排泄(Excretion)の影響は、その同位体効果をゼロにした計算を行いコントロール(CTL)実験との差をとることにより確認した。また、窒素固定(N_2 fixation)、水柱の脱窒(Water Column Denitrification)および堆積物の脱窒(Benthic Denitrification)の影響は、それらの過程の速度をゼロにした計算を行い CTL 実験との差をとることにより確認した。

硝酸同化の影響は、もともと表層の硝酸塩濃度が低い亜熱帯海域で大きく、表層の硝酸塩濃度が高い亜寒帯海域で小さいことがわかる。この効果は、植物プランクトンが $^{14}NO_3^-$を選択的に取り込むため、残った硝酸塩の $\delta^{15}N$ 値は高くなることにより起こる。

排泄の影響は、硝酸同化の影響に比べると非常に小さく、わずかに表層の硝酸塩の $\delta^{15}N$ 値を下げていることが確認できる。

窒素固定の影響は亜熱帯海域で大きい。亜熱帯海域では、もともと硝酸塩濃度が低く、普通の植物プランクトンの成長が制限されているため、窒素固定生物のニッチが形成されている。そのため窒素固定生物の生物量が多くなるためである。窒素固定生物は、窒素ガスをその成長に利用することができるため、亜熱帯海域の硝酸塩の $\delta^{15}N$ 値を下げる効果を持っている。

水柱の脱窒の影響は、(1)で示したように東部太平洋・大西洋および北部インド洋での影響が大きく、それらの海域での $\delta^{15}N$ 値を高くする効果を持っている。また、水柱の脱窒の影響を受けた水が湧昇する海域の下流では、硝酸塩が少なくなった水の影響で、間接的に窒素固定生物のニッチが形成される。そのため、水柱の脱窒の影響で $\delta^{15}N$ 値が下がる海域が確認される。

堆積物の脱窒の影響は非常に小さく、陸に近いところを除いてはほとんど $\delta^{15}N$ 値は影響されないことが確認される。

今後の予定

今年度、窒素同位体比を組み込んだ生態系モデルのパフォーマンスをチェックし、今後の研究に利用できるところまできた。現在、「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う準備を完了したところである。今後はそれらの気候場を用いたモデル結果と観測結果を比べながら氷期ー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していく予定である。

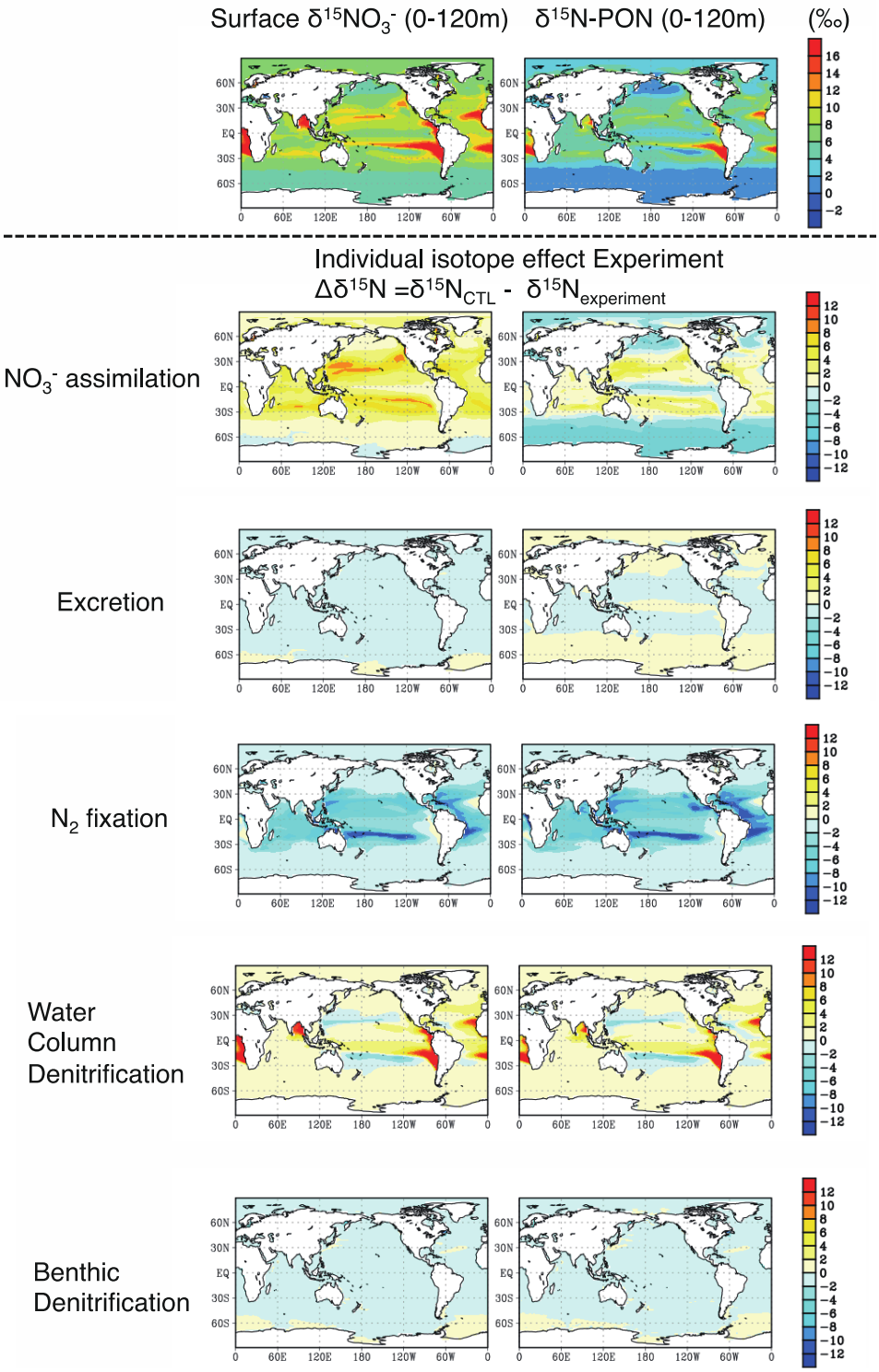


図3 （上）表層硝酸塩および PON の $\delta^{15}N$（‰）、（下）同位体効果の感度実験結果。NO_3^- assimilation、Excretion 実験では、その同位体効果を 0 にして、コントロール（CTL）実験との差を示している。N_2 fixation、Water Column Denitrification、Benthic Denitrification 実験では、それらの過程を 0 にして CTL 実験との差を示している。

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 $\delta^{15}N$ 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}N along food-chains- further evidence and relation between $\delta^{15}N$ 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 CO_2 emission scenario until year 4000 AD, *Global Biogeochemical Cycles*, **22**, 2008.

Shigemitsu et al., Potential use of the N_2/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 $\delta^{15}N$ of organic nitrogen in deep western subarctic Pacific sediment over the last 145ka, *Geochemistry Geophysics Geosystems*, **9**, 2008.

Sigman et al., The $\delta^{15}N$ of nitrate in the Southern Ocean: Consumption of nitrate in surface waters, *Global Biogeochemical Cycles*, **13**, 1149-1166, 1999.

Tesdal, J.-E. et al., Nitrogen isotopes in bulk marine sediment: linking seafloor observations with subseafloor records, Biogeosciences, 10, 101-118, doi:10.5194/bg-10-101-2013, 2013.

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.

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

徳廣貴之　坂本雅巳　荒波恒平　佐藤均　長澤亮二　下河邉明　上田学（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

高分解能（TL959）全球モデルにおいて、これまで開発してきた積雲・雲・放射・陸面・海面などの物理過程の改良を結合した実験を行い、予測精度の向上が確認できたことから、これら物理過程の改良を施した気象庁全球モデルを本年度に現業化した。以下では、この新しい気象庁全球モデルについて、その物理過程の主な改良点や統計検証の結果を報告する。

6.1 物理過程の主な改良点

本年度は、以下の物理過程の改良を施した気象庁全球モデルを現業化し、予測精度の向上を図った。

- 積雲過程
  - 再蒸発過程の陰解法化・融解過程での緩和型方程式の採用
  - 降水フラックス計算手法の適正化
- 雲過程
  - 再蒸発過程の陰解法化・融解過程での緩和型方程式の採用
  - 再蒸発過程において降水の落下速度効果を考慮
  - 積雲過程による降水の併合効果を廃止
- 放射過程
  - 水雲粒有効半径診断方法の改良
  - エーロゾルの化学種・サイズを考慮する新しい放射スキーム導入
  - 積雲上昇流域の放射雲診断スキームの導入
- 陸面過程

- 土壌水分初期値として用いる気候値見直し
- パラメーターの見直し（葉面積指数、植生被覆率、土壌特性）
- 砂漠域の裸地面アルベドや気孔抵抗スキームなどの各種改良・調整

● 海面過程

- 海氷密接度/SST 気候値の日別化
- 海氷密接度推定法の変更

● その他

- 成層圏メタン酸化過程の導入

今回の改良では、気象庁全球モデルがもつ次の課題に対し重点的な対応を行った。

● 台風の発達が強く計算が不安定になりうること

●計算安定性のために設定されている、降水の融解・蒸発に伴う冷却率の上限値による降雪への悪影響(原 2013,2014)

これらの課題への対応として、具体的には、雲・積雲過程における降水の再蒸発・融解の扱いを中心に改良を行った。雲過程においては、降水の再蒸発・融解の扱いを精緻化し、再蒸発では陰解法、融解では融解温度を湿球温度 0◦C とする緩和型方程式を採用してそれぞれの計算安定性を向上させるとともに、降水の融解・蒸発に伴う冷却率の上限値を多くの現象で実用上ほぼ問題にならない値にまで引き上げた。また、積雲過程においても、雲過程と同様、再蒸発過程の陰解法化や融解過程での緩和型方程式の採用を行った。ただし、融解過程の緩和型方程式では、積雲が存在するカラムは概ね湿っていることを仮定し、湿球温度ではなく気温を用いている。この結果、台風の過発達が抑えられ、計算安定性が大幅に向上することが確認された。また、冷却率の上限値の引き上げにより、再蒸発・融解が効く現象において、冷却が不十分で気温が下がらない、上空で蒸発/融解すべき降水/降雪が地上まで達する、地上付近まで降雪・降雨が達して気温が下がりすぎるといった問題点にも改善が見られた。

その他、放射過程の改良によって、放射収支の改善を図った。まず、エーロゾルについて、その化学種や粒子サイズによる、光学特性や鉛直分布の違いを考慮した、新スキームを導入した(Yabu et al. 2017)。この新スキームによって、砂塵や有機炭素が主な領域ではそれらの強い吸光特性を考慮できるようになったことから、サハラ砂漠などでの地表面下向き長波放射の過少が改善した（図 1)。また、積雲中の上昇流域の雲量・雲水量を放射過程において考慮するため、それを診断するスキームを導入した。この結果、熱帯対流域を中心に中層雲量が増加し、地表面への短波入射過剰が緩和された（図 2)。さらに、水雲粒の有効半径について、Martin et al. (1994) の航空機観測に基づく手法を簡略化したものを用いて、全球モデルで予測された雲水量から診断する手法に改良することでも、陸上における地表面への短波入射過剰を緩和することができた（図 2)。

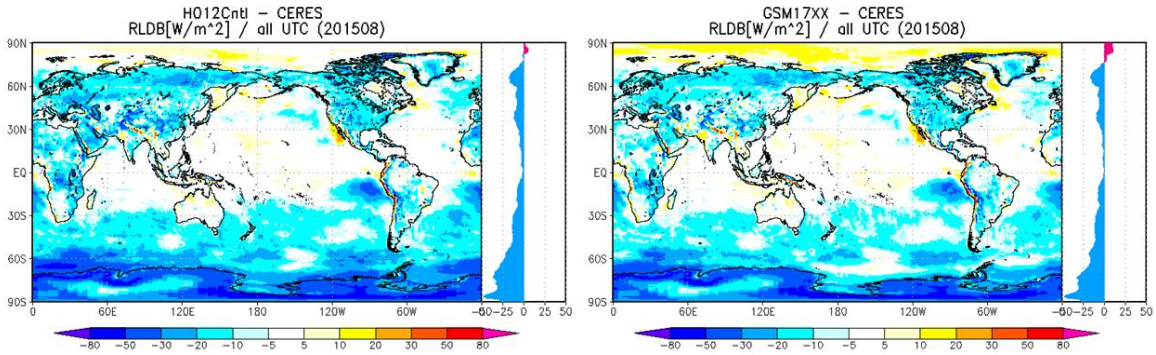


図 1　2015 年 8 月平均の地表面下向き長波放射フラックスの誤差（対 CERES)。左が今回の変更を行う前の気象庁全球モデル、右が変更後。

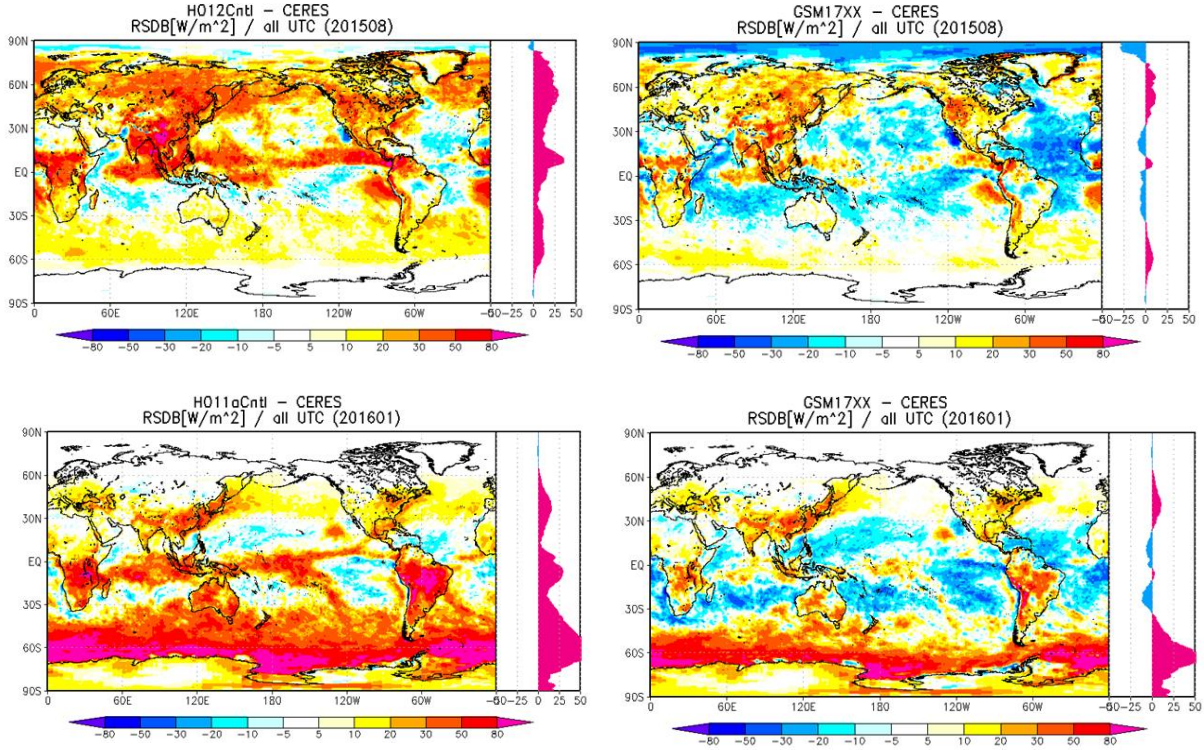


図 2　2015 年 8 月平均（上）及び 2016 年 1 月平均（下）の地表面下向き短波放射フラックスの誤差（対 CERES)。左が今回の変更を行う前の気象庁全球モデル、右が変更後。

6.2 統計検証の結果

本節では、第 6.1 節の変更を施した気象庁全球モデルの解析予報サイクル実験結果から得られた統計検証を示す。検証の対象期間は、2015 年 7 月～9 月（夏期実験）及び 2015 年 12 月～2016 年 2 月（冬期実験）である。ただし、台風に関する検証については、事例数を多くとるため、2015 年 6 月～10 月を検証の対象としている。

図 3 に、台風進路予測の検証結果を示す。予測期間の終わりに改善が示され、雲・積雲過

程の改良が寄与しているとみられる。ただ、サンプル数が少ないことから、統計的に明瞭な改善シグナルがあるとは言えない。台風中心気圧の予測については、その誤差特性に大きな変化はみられないが、雲・積雲過程の改良によって過発達が抑えられている（図略）。

図 4 に、北半球域の 500hPa 高度場の RMSE の比較を示す。夏期・冬期実験ともにどの予測時間でも概ね中立から改善を示し、北半球全体としては改善している。この改善傾向は、250hPa 東西風、850hPa の気温、海面更正気圧でも同様であり（図略）、北半球の中高緯度では標準的なスコアは概ね改善している。図 5 には、200hPa における速度ポテンシャルの 5 日予報とその誤差を示す。放射過程の改良などによって、夏期のアマゾン域などの地表面への短波入射過剰を緩和され、対流活動が適正化されている。

図 6 には、夏期実験における日本付近の 1mm/3h 以上の降水に関するエクイタブルスレットスコア（ETS）及びバイアススコア（BI）を示す。ETS を見ると、どの予測時間でも概ね中立からやや改善であり、予測特性の変化は小さい。一方、BI を見ると、その値は予報期間を通じて減少している。他の閾値においても BI は減少していることから（図略）、降水頻度自体が減少していることが分かる。これは、今回の変更により雲・積雲過程による再蒸発量が増加しているため、地上に届く降水が減少する結果である。BI の 1 からの差の大きさは概ねどの予報時間でも小さくなり、降水頻度の改善を示している。以上のことから、BI が 1 に近づきつつ減少すると同時に ETS では中立以上に保たれているので、夏期の弱い降水の予測精度は概ね改善している。なお、冬期実験における日本付近の 1mm/3h 以上の降水に関する ETS 及び BI に大きな差はみられなかった（図略）。

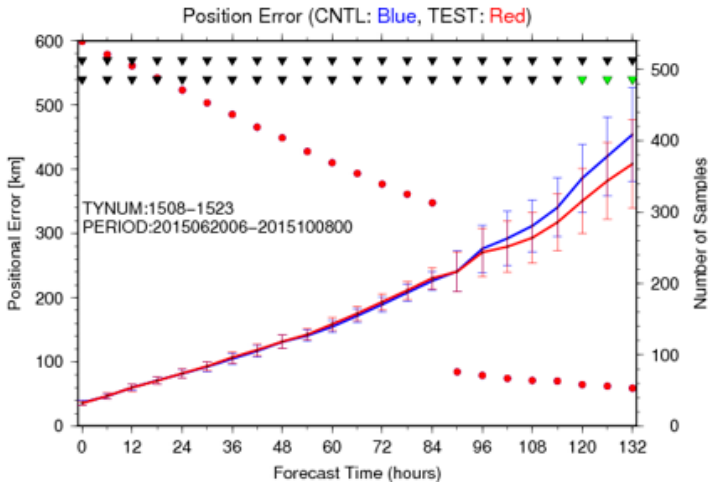


図 3　夏期実験で存在した 16 個の台風を予測対象とした進路予測誤差の比較。赤が変更後、青は変更前。横軸は予測時間。赤点はサンプル数（右軸）。エラーバーは誤差の発生が正規分布に従うと仮定した場合の 95%信頼区間を表す。グラフ上方の三角形が緑色の場合は予測誤差の差が 95%の信頼度で統計的に有意であり、黒色の場合は有意ではないことを示す。なお、上段がデータ系列の相関を考慮した結果であり、下段が相関を考慮しない結果である。

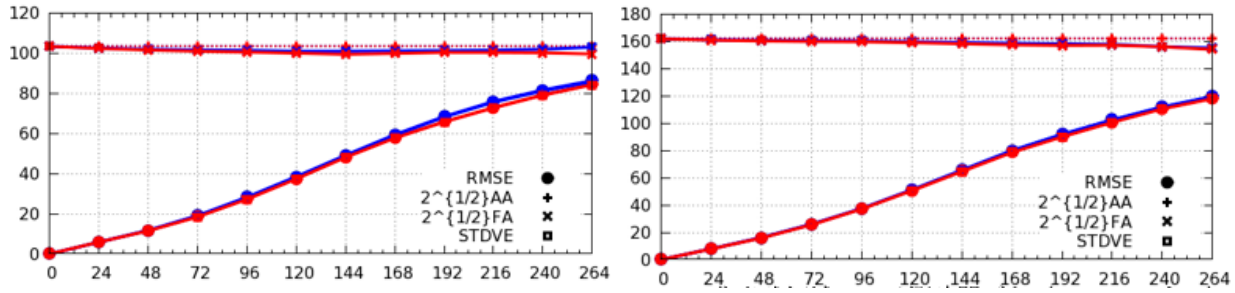


図 4　夏期試験（左）及び冬期試験（右）の北半球領域（20°-90°N）での予測時間ごとの 500 hPa 高度場の解析値に対する RMSE の比較。青線が変更前、赤線が変更後。縦軸が RMSE(m)、横軸が予報時間（0-264 時間）を表す。図の下部に丸および四角で示しているものが RMSE と誤差の標準偏差で、上部に十字（点線）とバツ（実線）で示してあるのが解析活動度と予報活動度である。ただし、標準偏差は RMSE と重なっている。

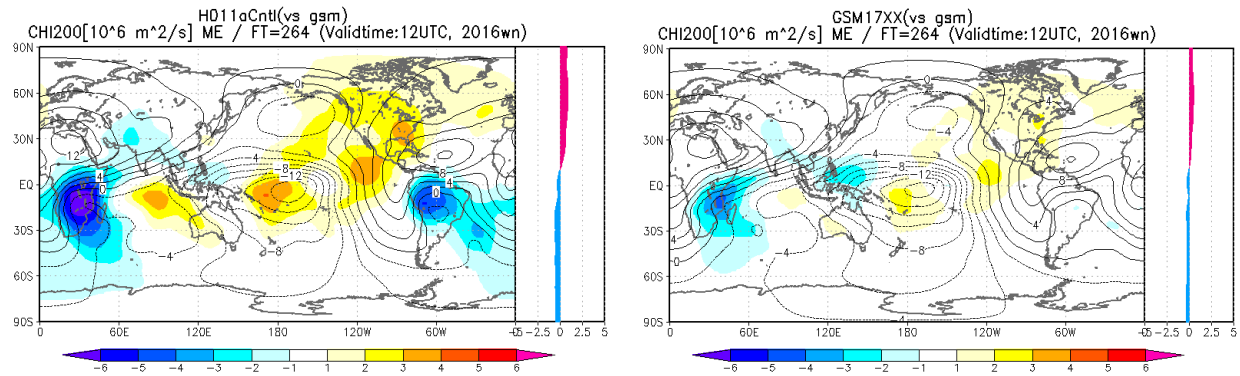


図 5　冬期試験の検証期間についての、200hPa 速度ポテンシャルの対解析値の比較。等値線：11 日予測値、色：予測誤差。左が今回の変更を行う前の気象庁全球モデル、右が変更後。

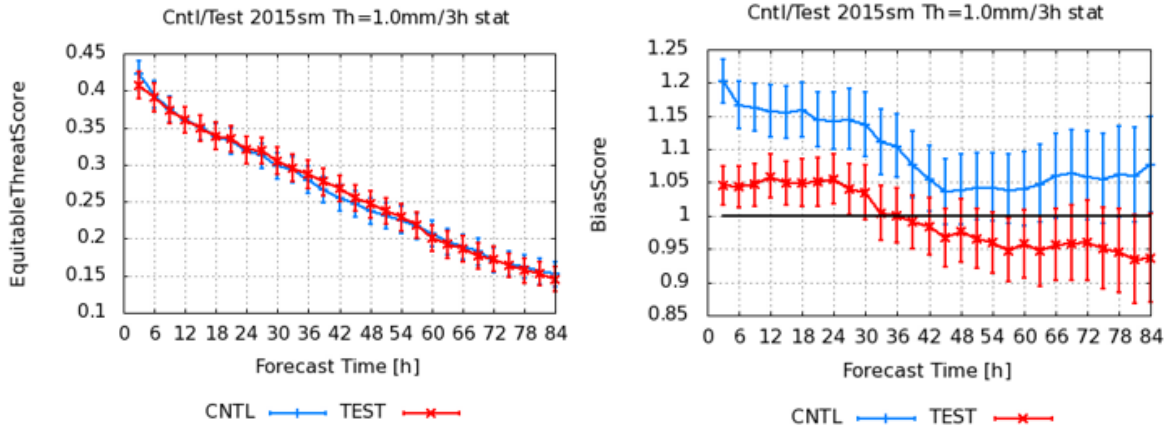


図 6　夏期実験における 1mm/3h 以上の降水量予測についての対解析雨量（陸上）の ETS（左）と BI（右）。赤が変更後、青は変更前。エラーバーは 95%の信頼区間を表す。

7. 今後の課題

気象庁全球モデルには、台風予測精度の更なる向上、冬季の南岸低気圧の表現など多くの課題がある。これらの課題に対応するため、物理過程の統合的な開発に引き続き取り組む。

参考文献

Martin, G. M., D.W. Johnson, and A. Spice, 1994: The Measurement and Parameterization of Effec-tive Radius of Droplets in Warm Stratocumulus Clouds. J. Atmos. Sci., 51, 1823-1842.

Yabu, S., T.Y. Tanaka, and N. Oshima, 2017: Devel-opment of a multi-species aerosol-radiation scheme in JMA's global model. CAS/JSC WGNE Res. Activ. Atmos. Oceanic Modell.

原旅人, 2013: 2013 年 1 月 14 日の関東大雪. 平成 25 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 71-89.

原旅人, 2014: 最近発生した顕著事例に関する検討. 平成 26 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 118-144.

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：北極低気圧の 3 次元構造とラグランジュ運動の解析

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
小柴厚　　筑波大学生命環境科学研究科 D3
佐々木剛史　　筑波大学生命環境科学研究科 M2
栗花卓弥　　筑波大学生命環境科学研究科 M1

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、雲の不確定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。

2017 年度は松枝と栗花の参加により、NICAM を用いた４次元同化の研究にテーマを変更する予定であったが、諸事情により昨年と同じ全球雲解像モデルを用いた北極圏のプロセス研究のテーマに沿った報告とする。

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 北極低気圧の平均構造

北極低気圧（Arctic cyclone）とは、北極海上を長期にわたり迷走する地上の低気圧のことである。一様な北極気団の中で低気圧性循環の渦を巻く北極低気圧は、温帯低気圧のような明瞭な前線を伴わず、むしろ熱帯低気圧の渦に近いスパイラル形状を持つことが多い。ただし、台風のような暖気核はなく、中心付近は対流圏で寒気核になっている。一方で、250 hPa 付近を中心とした圏界面の上部に一貫した暖気核が見られる。相対渦度に注目すると、地上の正の渦度が鉛直方向に延びて 250 hPa まで一様に存在することが確かめられる。低気圧中心から半径 300 km の範囲で平均した相対渦度を、低気圧の移動に沿って追跡すると、低気圧性渦度が対流圏内で盛衰を繰り返しながらも約ひと月間持続するケースが見られた。湿度場には雲のスパイラル構造で湿った領域もあるが、低気圧中心は乾燥している。また、鉛直流を見ると対流圏内は上昇流であり、下部成層圏には一貫した下降流がある。以上のような事例と同様の特徴が、北極低気圧には共通してみられ、温帯低気圧とは異なる低気圧であることが分かる(Tanaka et al. 2012; Aizawa and Tanaka 2016)。

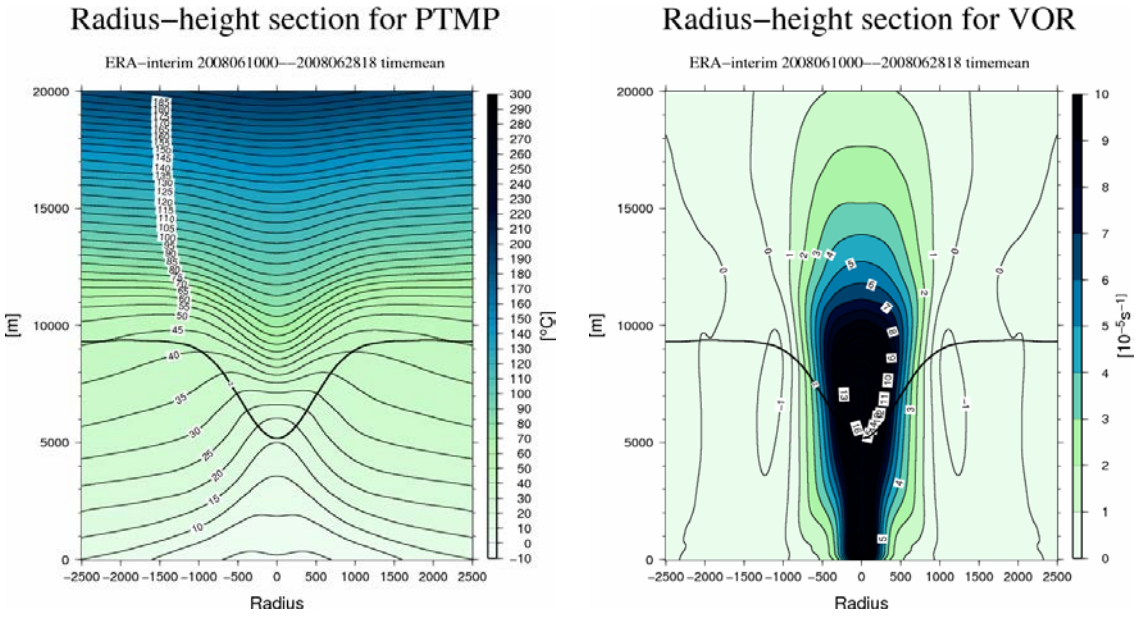


図１　北極低気圧の鉛直構造。左は温位差、右は相対渦度、太実線は対流圏界面を示す。

図１は、2008 年 6 月 10 日から 26 日の期間で SLP から判別した低気圧中心を追跡し、その原点の周りで軸対称平均をしたデータから作図した温位差（左）と相対渦度（右）の構造である。図中の太線は PV から推定した対流圏界面で、中心付近での垂れ下がりが明瞭である。温位の分布から低気圧中心の対流圏には寒気核があり、成層圏では暖気核になっている。相対渦度は地表から下部成層圏まで一貫して低気圧性の渦になっていて、圏界面付近で最も渦が強い。相対渦度が対流圏と成層圏とで結合し、順圧的構造を持つ事が北極低気圧の特徴である(佐々木 2017)。

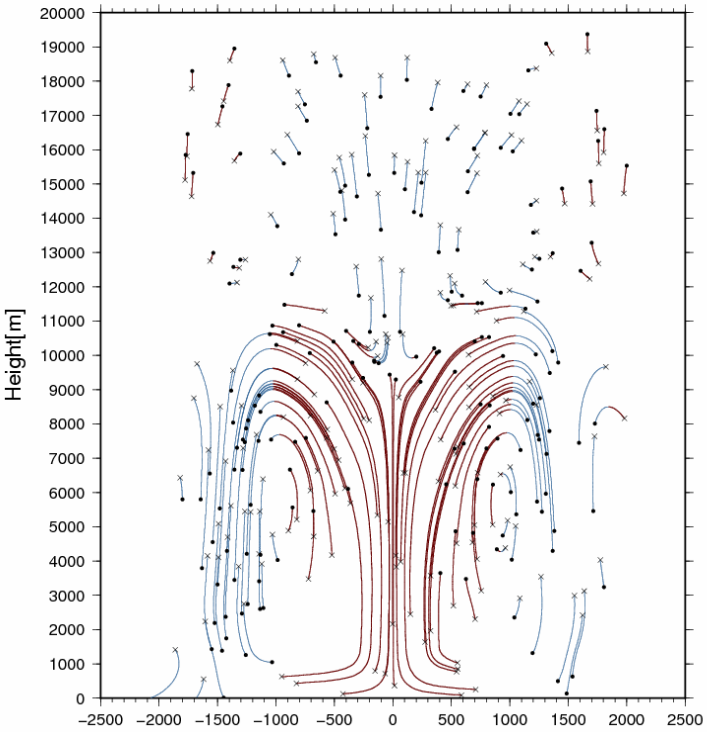


図２　北極低気圧の鉛直循環をラグランジュ的に追跡した流跡線図。赤は上昇流域、青は下降流域を示す。

3.2 北極低気圧の鉛直循環

図 2 は軸対称平均した北極低気圧に伴う鉛直運動をラグランジュ的に追跡した流跡線の分布である。赤線は上昇流、青線は下降流を示し、流跡線の始点にクロス、終点にドットが打ってある。平均流に対する流跡線なので、同一の質量の空気塊の流跡線とは異なる量である。期間平均した循環は、大気下層に収束があり、低気圧中心に上昇流が存在し、高度 10000 m で上空からの下降流と合流して発散場となり、上昇流は頭打ちとなって下降流に転じている。鉛直循環の水平半径は 1000 km 以内で上昇流、その外側で下降流となっている。成層圏の暖気核の領域で下降流があり、断熱圧縮が生じている一方で、対流圏の寒気核の領域で上昇気流があり、断熱膨張が生じている。強い安定成層に打ち勝って鉛直循環を維持する力学的な駆動力の説明が必要である。

3.3 北極低気圧の形成過程

図 3 は鉛直循環の発達初期に見られる構造の急変を示す 2016 年 8 月の事例である。左図の発達初期では鉛直循環の上昇流が下部成層圏にまで侵入しているが、この時点では温帯低気圧の構造に似て中心に暖気核があり、下部成層圏の暖気核の領域で上昇気流が発生している。この温帯低気圧的な構造が北極低気圧の構造に急変する際に、右図のように下部成層圏で下降流となり、その下降流が北極低気圧の半径 1500 km 付近での下降流域に繋がっている。下部成層圏での上昇流が一気に下降流となり、断熱圧縮により下部成層圏の暖気核が形成される。この急変は、南から北上してきた温帯低気圧が北極低気圧化する際に発生している。

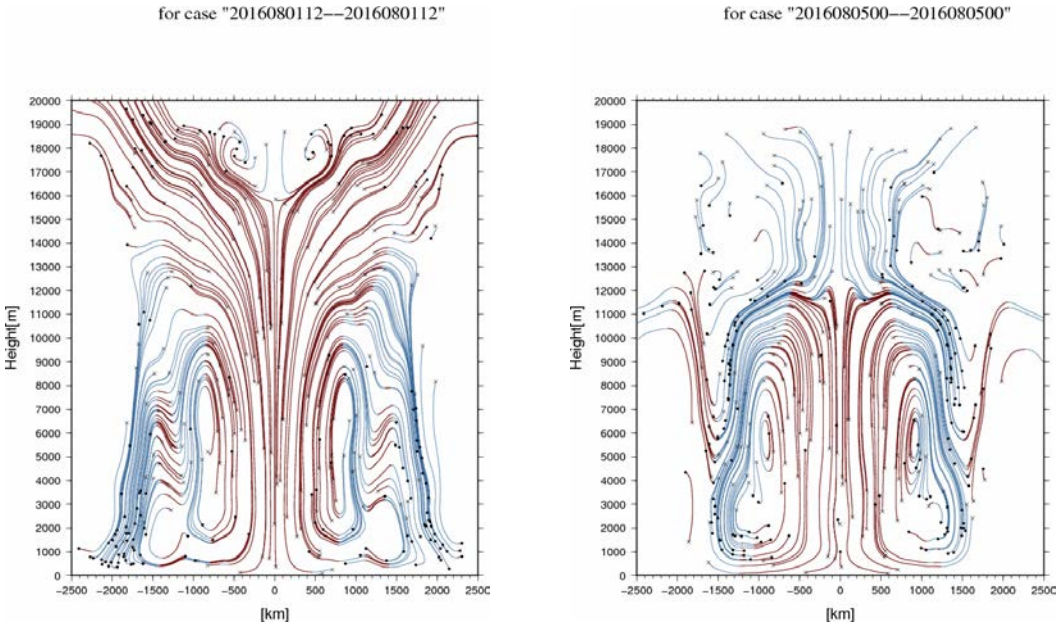


図 3　北極低気圧の鉛直循環の変化。左は 2016 年 8 月 1 日、右は 8 月 5 日の循環で、温帯低気圧が北極低気圧化する際の変化を示す。

4. まとめと今後の課題

Yamagami et al (2017)では、北極低気圧に温帯低気圧が次々と合体することで、北極低気圧の渦が長期間維持されることが示された。ふたつの渦の合体により順圧構造の渦が強化され、下層でのエクマン収束が低気圧中心の上昇気流をもたらして、それが対流圏の寒気核を形成している。したがって、渦の合体による順圧渦度の供給が、北極低気圧の形成と維持の重要なプロセスになっている。今後はこの渦の合体に注目して、事例解析をさらに行うことが研究課題である。

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)
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)
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)

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ますます重要である。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によって、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の中で、現在、最も広く用いられているもの (St. Laurent et al. 2002) は、深海底の近傍における乱流への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を推定するものであるが、その鉛直方向への減衰スケールは、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によれば、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は一様ではない。特に、Hibiya et al. (2017) は、深海底凹凸地形上で半日周波数の潮汐流によって励起された内部波が背景の普遍的定常内部波場との相互作用を通じて散逸していくまでの過程を Eikonal Approach の手法を用いて調べた。その結果、(1) 潮汐流と海底地形との相互作用が弱いとき、海底凹凸地形上から上方へは線形の内部潮汐波が伝播していき、その散逸に伴って形成される乱流ホットスポットの鉛直構造は主に海底凹凸の卓越水平波数によってコントロールされること、具体的には、海底凹凸波数が大きくなってくると乱流ホットスポットはより海底地形の近傍に制限されること、(2) 潮汐流と海底地形との相互作用が強くなってくると、海底凹凸地形上から上方へは準定常風下波が伝播していき、その散逸に伴って形成される乱流ホットスポットの鉛直構造は主に潮汐流の振幅によってコントロールされること、具体的には、潮汐流の振幅が大きくなってくると乱流ホットスポットは次第に海底地形から鉛直上方に広がってくること、が示された。

しかしながら、この理論的結果は理想化した状況を仮定した Eikonal Approach の手法に基づいたものであり、その有効性は十分に検証されていない。そこで本研究では、伊豆−小笠原海域の海面から海底直上までの乱流散逸率の観測結果を数値シミュレーションによって再現し、海底から鉛直上方に発していく内部波を同定することによって、Hibiya et al. (2017) により提唱された理論的予測の有効性の検証を行った。

研究内容：

７つの観測点で観測された海底凹凸地形上の乱流混合過程を調べるために、各観測点の状況に類似した条件を設定した鉛直二次元面内における数値実験を行なった。

用いたモデルの基礎方程式は、リジッド・リッド近似とブシネスク近似を施したナヴィエ−ストークスの運動方程式、密度保存式、および連続の式である。境界条件は、水平方向を周期境界、海底と海面をスリップ固定壁とした。各観測点における半日周潮の順圧潮汐流を海面・海底境界条件として与え、モデルを駆動した。背景場には Garrett-Munk (GM) によって定式化された普遍平衡内部波スペクトル (Munk, 1981) を仮定した。全ての数値実験において、計算領域は幅 50 km、深さ 2 km とし、解像度は水平 20 m、鉛直 5 m である。

また、各観測点の海底地形から 400 m スケールの平滑化成分を取り除いても乱流散逸率にほぼ影響がなかったことから、内部波を励起する際に支配的な役割を果たす海

底地形凹凸は 400 m 以下のスケールのものであると考え、この平滑化成分を取り除いた海底地形を用いた。コリオリパラメータは各観測点における値を使用するとともに、簡単のため、基本密度成層における浮力振動数は全水深で一定で、各観測点の海底地形付近における浮力振動数に等しいものと仮定した。

研究成果：

数値実験によって得られた各観測点における乱流散逸率は、海底から鉛直約200 m上方までは、観測結果と概ね一致する鉛直分布を持っていた（図1)。特に、海底直上での散逸率の大きさとその鉛直方向への減衰スケールとの関係について、計算結果は観測結果を良く再現していると判断された。さらに、海底地形凹凸上で励起される内部波の性質を調べるために、海底地形上における水平流速のパワースペクトルを計算したところ、地形の卓越波数に顕著なピークが表れていることが確認された（図2)。

励起される内部波と乱流散逸率の鉛直分布との特性に基づいて、７観測点は以下の３つのグループに分類できた。潮汐流の振幅が中位、海底地形凹凸が緩やかな観測点（グループ１）では、複数発生しているスペクトルのピークは、線形内部潮汐波の分散関係上にあり、これらの地点では線形内部潮汐波が発生していることが示唆された。乱流散逸率は、海底地形直上での値が大きくなると、その鉛直方向の減衰スケールは小さくなるという、先行研究によって指摘されたTrade-offの関係が確認された。

潮汐流の振幅が小さく、海底地形凹凸が比較的激しい観測点（グループ２）では、線形内部潮汐波の分散関係上に加えて準定常風下波の分散関係上にもスペクトルのピークが存在することから、両者が混在して鉛直伝播していることが示唆された。本グループでは、グループ１と比べて海底地形上での乱流散逸率は大きくなるものの、その鉛直方向の減衰スケールはグループ１の減衰スケールの最大値と同程度まで達していた。

さらに、より潮汐流の振幅が大きく、海底地形凹凸の粗い観測点（グループ３）では、内部潮汐波の分散関係式上ではなく、風下波の分散関係上にスペクトルのピークが存在しており、この地点では風下波が発生していることが示唆された。本グループは他の２グループに比べて、海底地形上の乱流散逸率もその鉛直方向の減衰スケールも著しく大きくなっていた。

このように、本研究の結果は、乱流散逸率の鉛直構造の特徴が海底地形から鉛直上方に伝播していく内部波の性質によって強く支配されていること、すなわち、それが

潮汐流と海底地形との弱い相互作用のもとで励起された（鉛直群速度が小さくて海底地形の近傍で散逸してしまう）線形内部波なのか、あるいは、潮汐流と海底地形との強い相互作用のもとで励起された（鉛直群速度が大きくて減衰しながらも鉛直上方まで伝播できる）準定常風下波なのかに強く依存しているという Hibiya et al. (2017) による理論的予測の有効性を示すものと言える（図3）。

今後の問題点：

本研究では限られた７点のみの数値実験結果に基づいて議論しているため、得られた知見の検証のためにはより多くのケーススタディを行う必要がある。また、数値計算は、観測結果を理論的予測と結びつけるために鉛直二次元面内で行ったため、三次元的な海底地形の変化については考慮されていない。さらに、本研究で用いた海底地形は、低波数成分を除去しているため、水深の大きな変化に伴う潮流の変化についても考慮できていない。これらの点が及ぼす影響を評価するために、今後より現実に即した海底地形で数値計算を行う必要がある。

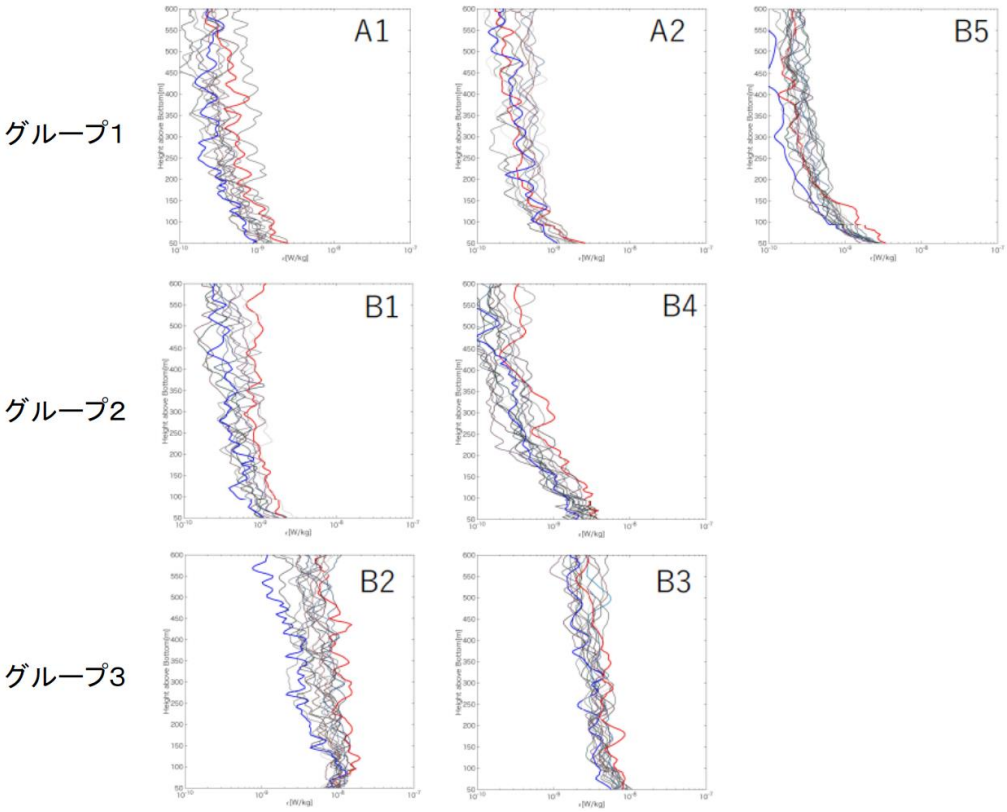


図 1. 各観測点に対する数値実験で得られた乱流散逸率の鉛直分布。横軸は乱流強度、縦軸は海底地形からの距離で、赤線が大潮時、青線が小潮時の乱流散逸率を表す。また、上段、中段、下段の順にグループ 1, 2, 3 の観測点の結果を表す。

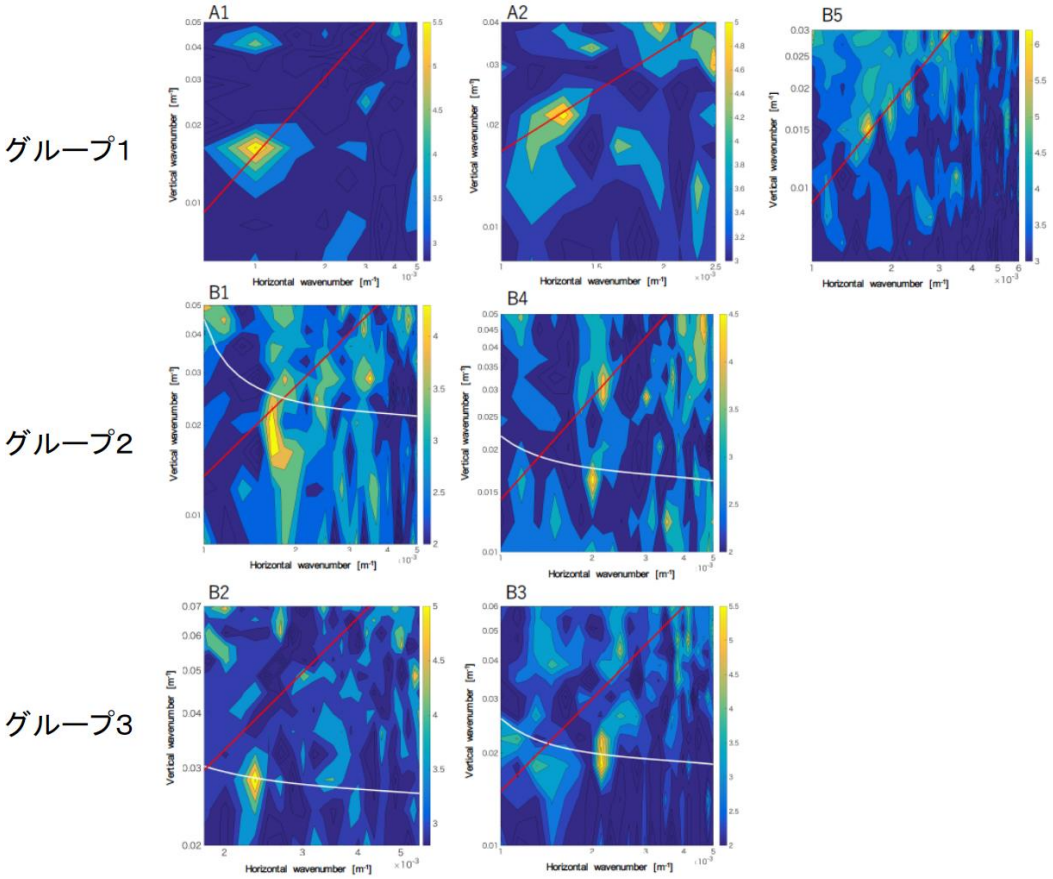


図 2. 数値実験から得られた各観測点周辺 20 km の地形上、鉛直 250 m 範囲内のパワースペクトルを、GM 背景場のみで計算したパワースペクトルで割ったもの。縦軸、横軸はそれぞれ波の鉛直波数[m^{-1}]、水平波数[m^{-1}]を表し、カラーバーはパワースペクトルの大きさを対数スケールで表している。各図中の赤線は線形内部潮汐波の分散曲線、白線は準定常風下波の分散曲線を示す。上段、中段、下段の順にグループ 1, 2, 3 の観測点の結果を表す。

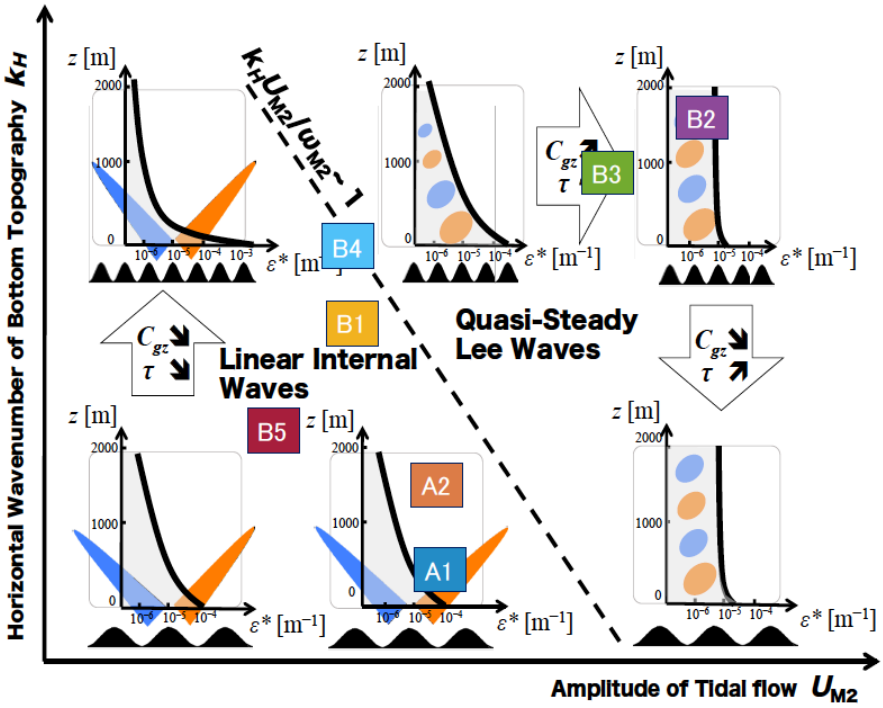


図 3. 潮流の振幅 U と海底地形の波数 k で分類した海底地形上に形成される乱流ホットスポットの鉛直スケールの概念図。

特定共同研究課題：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

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

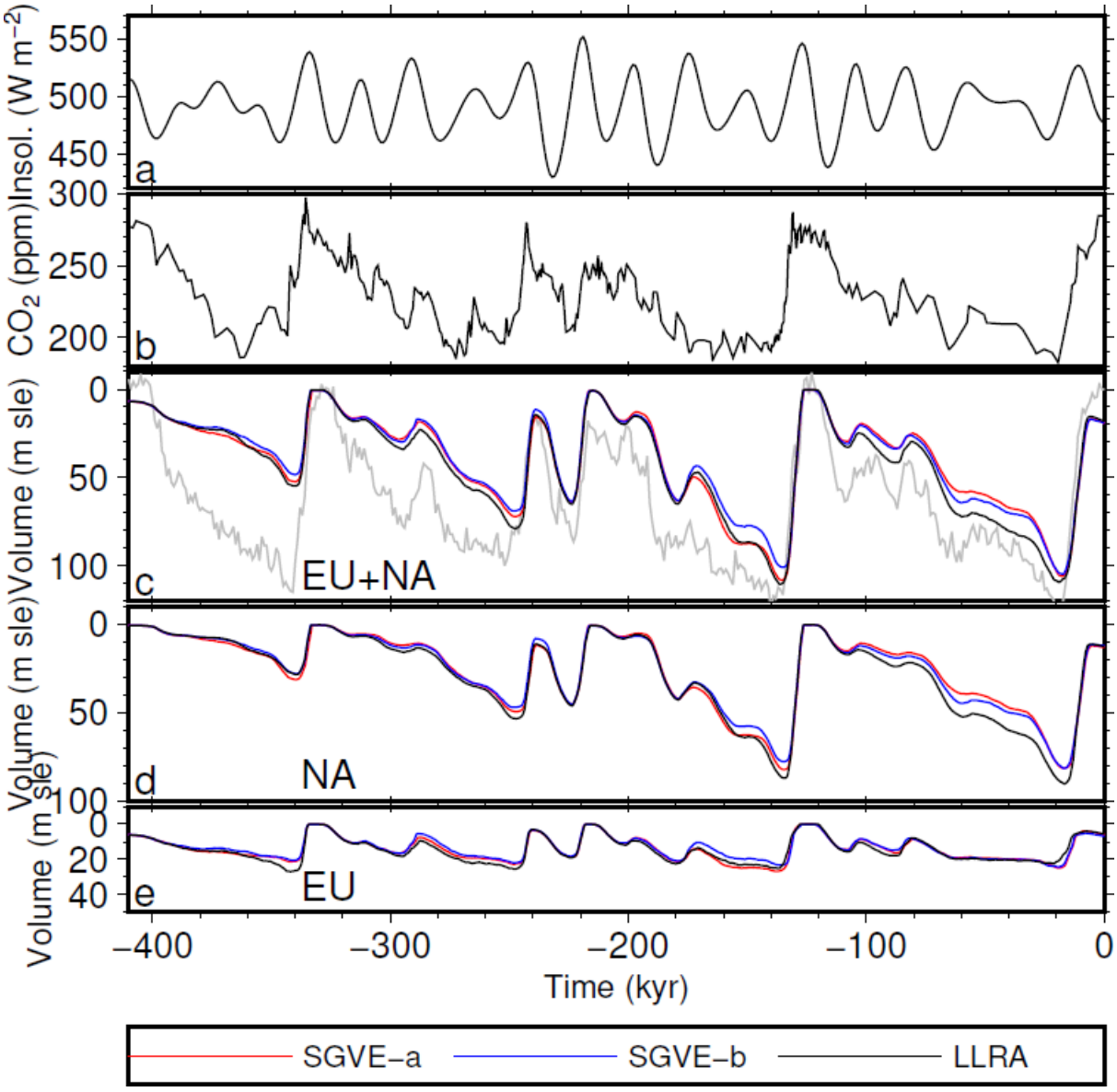
過去の北半球氷床に見られる十万年スケールの氷期間氷期変動にとって氷床変動に対する固体地球の応答が重要な過程であると考えられている。Abe-Ouchi et al. (2013) では気候、氷床、固体地球のそれぞれの過程を結合したモデルによって、固体地球の応答の遅れが十万年周期の氷床変動再現にとって重要であることを明らかにした。ただし、そこで用いた固体地球モデルはマントル密度と特徴的な時間スケールをパラメタとする簡易モデルであり、固体地球の粘弾性応答をきちんと考慮していなかった。そこで本研究では Abe-Ouchi et al. (2013) の実験を、固体地球モデルを交換して追試することにより、氷床変動再現がどのように影響されるかを明らかにし、簡易モデルによる従来の実験結果の再現性を評価した。

研究成果

使用したモデルは氷床気候固体地球結合モデル IcIES である。実験設定は Abe-Ouchi et al. (2013) に準拠する。ここでは用いた固体地球モデルを紹介する。従来用いた簡易モデルは、マントル密度と特徴的な時間スケールで表現したものであり、Le Meur & Huybrechts (1996) の分類によると Local Lithosphere Relaxed Asthenosphere (LLRA) モデルに相当する。局所的な荷重(氷厚)の変化が氷床とマントルの密度比に応じてある時間であらかじめ設定した平衡時の高度に緩和する手法である。三次元粘弾性モデルは Self Gravitating Visco-Elastic (SGVE) モデルに相当し、本研究では Okuno and Nakada (2001) の開発によるモデルを採用した。このモデルの主要なパラメータは地殻の厚さ、下部マントルの粘性、および上部マントルの粘性である。同様に荷重の変化に対して基盤高度の変位を計算するモデルである。

図が実験結果である。粘弾性モデルとしては、比較的よく用いられるパラメタの組み合わせ二種類で行った。SGVE-a は上部および下部マントルの粘性を10×10^{20} Pa s, 2×10^{21}Pa s としたものであり、SGVE-b は5×10^{20}Pa s, 10×10^{21}Pa s とした。地殻の厚さはいずれも 100 km とした。簡易モデルは Abe-Ouchi et al. (2013) と同じく、マントル密度 4500 kg m^{-3}, 時間スケールは 5000 年で行った。

実験結果から簡易モデルを用いても、氷期間氷期の特徴的な 10 万年変動は定性的に遜色なく再現できていることが分かった。細かく見ると特に氷床が大きくなる時代にそれぞれのモデルの違いが現れることが分かる。氷床の体積変動など全般的な振る舞いに関しては、簡易固体地球モデルを用いても十分議論でき、Abe-Ouchi et al. (2013) の議論は有効であると考えられる。



図。IcIES の入力と実験結果。(a) 入力日射変動(b)入力二酸化炭素変動(c)再現された氷床体積変動(北米とヨーロッパの和)(d,e)北米とヨーロッパの氷床体積変動。

今後の問題点

本研究で採用した粘弾性モデルのパラメタの組み合わせは代表的なものではあるが、不確定性の大きな量であり、様々な値が提唱されている。多くの組み合わせを採用して同様の実験を行うことにより、固体地球変動の不確定性をさらに議論できると考えられる。また、氷床の地理的分布に関しての解析が不十分であり、今後の課題である。

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：

昨年度に実施したAGCMを用いたアンサンブル再予報実験で見出した、2007年3月初旬に生起した成層圏惑星規模波の下方伝播イベントと関連する上部成層圏における前駆現象の力学的起源を明らかにするため、非発散順圧モデルを用いて東西非一様なアンサンブル平均予測値の力学安定性解析を行った。

研究成果：

（１）モデルと手法

本年度の研究では、成層圏循環の力学的安定性を調べるためにMatsuno and Hirota（1966）や Hirota（1967）で用いられた球面上の非発散順圧渦度方程式に基づく力学的安定性安定性解析を行った。但し、基本場として与える流線関数は、昨年度実施した気象研究所大気大循環モデル（MRI-AGCM, Mizuta et al., 2006; 2012）を用いたアンサンブル予報実験から得られるアンサンブル平均予測値とした。また、基本場で全波数21よりも大きな波数成分をゼロとおき、小さな空間スケールを持つ構造を基本場から除去した。なお、擾乱場は、全波数63で三角形切断した。

（２）結果

以下では、65°N以北で領域平均した100 hPaでの下向きのE-Pフラックス（EPz100）の解析値が最大となる2007年3月5日をday 0と表記する。また、day 0でのEPz100予測

値のアンサンブル平均がほぼ0で、しかもそのスプレッドが大きい、2007年2月23日（day －10）を初期日とするアンサンブル予報を用いて上部成層圏循環の力学安定性解析を行った。

まず、Fig. 1に、day －10を初期値とする予報から得られる各予報日における5 hPa流線関数アンサンブル平均予測値を基本場として与えて固有値解析を行って得られた擾乱の成長率に相当する固有値の実数部 σ_rを示す（成長率が0.1 day^{-1}以上のモードのみを示す）。また、固有値の虚数部 σ_iがゼロの定在モードを赤丸で、$\sigma_i \neq 0$の移動性モードを黒丸で示した。この図から、各日で最大成長率を持つ第一不安定モードの成長率は3月1日（day －4）に最大となることがわかる。対応するe-folding timeは1.3 daysで、しかも、擾乱の空間構造が地理的に固定して増幅する定在性不安定モードである。さらに、その成長率は対流圏に内在する傾圧不安定モード（e-folding timeは2～3 days）よりもかなり大きく、上部成層圏には予測可能性を制限するpredictability barrierが存在することを示唆している。また、大きな成長率を持つ不安定モードは、下方伝播と有意に関連する前駆擾乱が出現する直前に存在することは大変興味深い。

Figure 2に、日々の5 hPa流線関数アンサンブル平均予測値（最上段）に対して得られた、day －9，－5，－4，－3における第一不安定モード（中段）と第二不安定モード（最下段）の水平構造を示す。まず、day －9 の基本場では東西波数1成分が卓越するが、どちらの不安定モードも、基本場における二つの渦の赤道側の端に相当する40°N－50°Nの緯度帯に沿う東西波数6程度の比較的小さい空間スケールを持つ

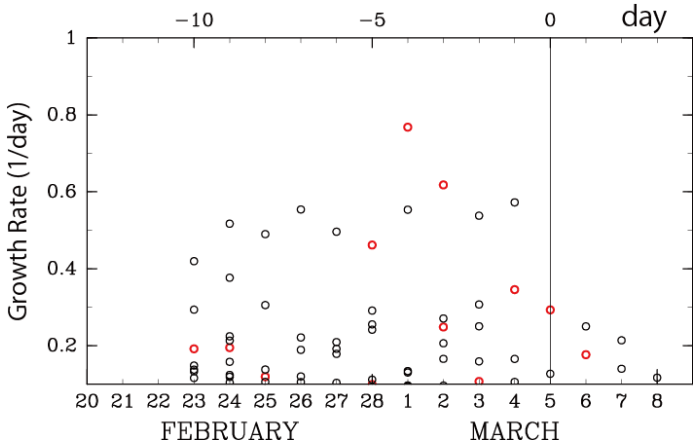


Fig. 1 Growth rate of unstable modes computed for the basic flow composed of the T21 truncated 5-hPa streamfunction of the ensemble mean field on each prediction date of the forecast starting from day −10 (unit: day^{-1}). Red (black) circles correspond to stationary (transient) modes with a zero (non-zero) imaginary component of the eigenvalue.

移動性擾乱として特徴づけられる。これらのモードは帯状風の順圧不安定性によって生ずる伝統的な順圧不安定擾乱に対応すると考えられる。一方、day －5以降の期間では、不安定モードは高緯度域で大きな振幅を持ち、東西波数1及び2成分が卓越する惑星規模擾乱で特徴づけられることがわかる。なお、この時期の基本場における極渦は極度に変形しており、スカンジナビア半島付近に存在する極渦に伴う循環によって、高気圧性渦がユーラシア域から北太平洋域まで延伸する。また、Fig. 2で示された第一不安定モードは、昨年度の研究で示された下方伝播イベントと有意に関連する回帰場や、アンサンブルスプレッドの第一EOFとよく似た空間構造を持つことは大変興味深い。特に、day －3における第一不安定モードとスプレッドの第一EOFの空間構造とは極めて類似する。すなわち、第一不安定モードは、ユーラシア北部とアラスカ上空に作用中心を持つ特徴的な波列を含む波数2成分で特徴づけら

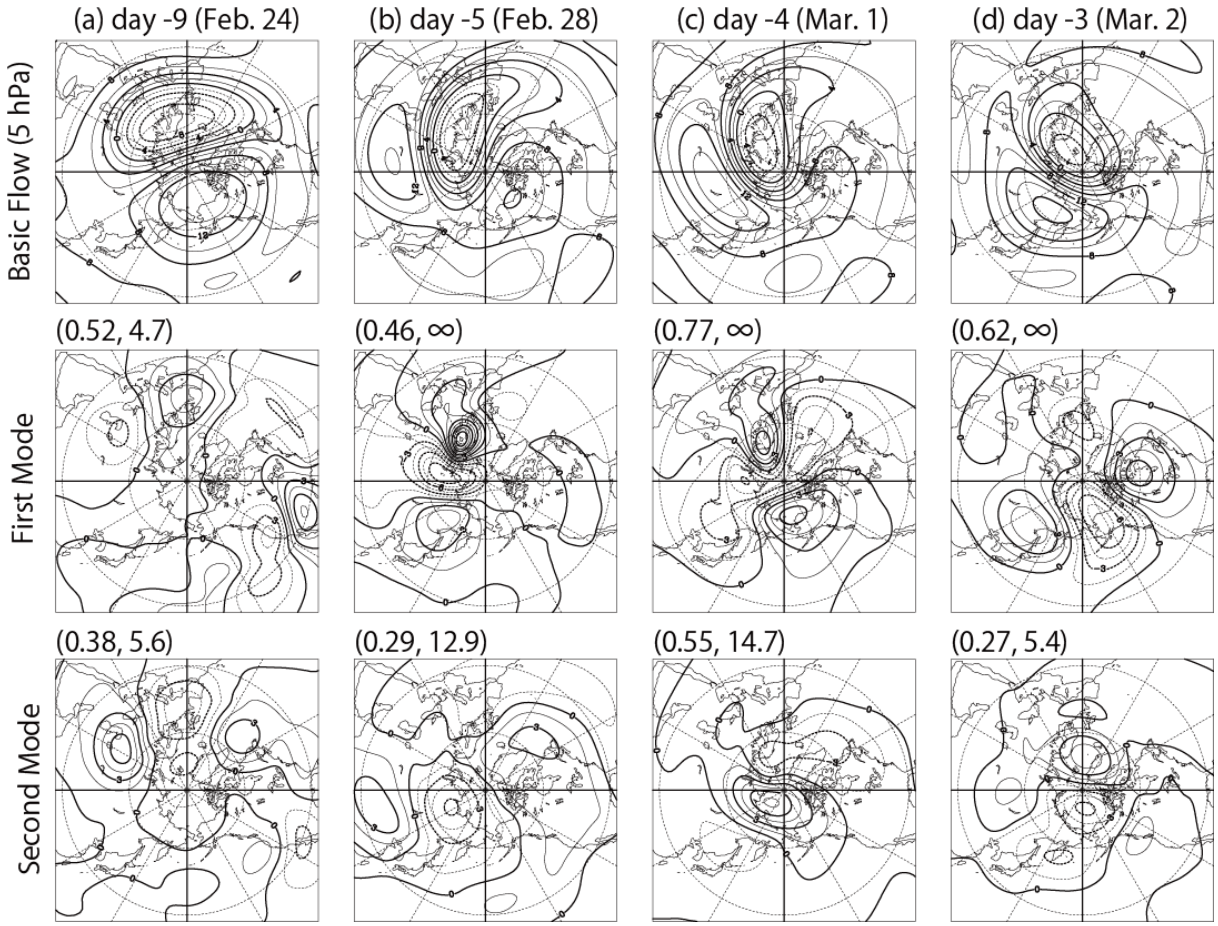


Fig. 2 (top) Horizontal structure of the basic flow given by the T21 truncated 5-hPa streamfunction field (unit: 10^7 m^2 s^{-1}) of the ensemble mean prediction on day −9 (a), day −5 (b), day −4 (c), and day −3 (d) for the forecast staring from day −10. (middle and bottom) Streamfunction field for the first and second unstable modes computed for the basic flow. The first (second) number in parentheses at the top of each panel indicates the growth rate (unit: day^{-1}) and the period (unit: day) of the unstable mode, respectively. Stationary modes with a zero imaginary component of the eigenvalue are designated by the period of the infinity (∞).

れる。また、これら二つの作用中心は、基本場における高気圧性渦と東西方向に約90°ずれた位相構造を持つ。さらに、40°N以北の領域で評価した、第一不安定モードと第一EOFの水平構造の空間相関は－0.60で、空間パターンの類似性は統計的にも有意である。従って、これらの不安定モードが基本場に重畳して発達すると、成層圏上層の高気圧性渦を、その極性に依存して、さらに下流側あるいは上流側へと変位させ、下方伝播と関連する回帰場と同様に、対流圏から成層圏に入射した惑星規模波を下方あるいは上方に伝播させる。さらに、day －5からday －3の期間において、定在性の不安定モードが大きな成長率を持つことは、回帰場やスプレッドの第一EOFが地理的に固定したパターンで特徴づけられることとも整合的である。

（３）まとめ

今年度は、昨年度の研究で見出した、2007年3月初旬に生起した成層圏惑星規模波の下方伝播イベントと関連する上部成層圏における前駆現象の力学的起源を明らかにするため、非発散順圧モデルを用いて東西非一様なアンサンブル平均予測場の力学安定性解析を行った。その結果、下方伝播が生ずる直前の時期に、極度に変形した極渦で特徴づけられる上部成層圏循環は順圧不安定となり、前駆現象とよく似た惑星規模の定在性不安定モードが出現することが明らかになった。このモードの成長率は0.8 day^{-1}と極めて大きく、この時期の上部成層圏循環の予測可能性が極めて低下したことと整合的である。また、不安定擾乱の位相は基本場とは東西方向に約90°ずれているため、不安定擾乱の極性に依存して、不安定擾乱と基本場が重畳した場における成層圏惑星規模波の鉛直位相は高さとともに東、あるいは西に傾く。その結果、成層圏惑星規模波は下方、あるいは上方に伝播する。このように本研究によって、対流圏から入射した大振幅の惑星規模波によって極度に変形された極渦で特徴づけられる東西非一様な上部成層圏循環は力学的に不安定であり、その結果生ずる惑星規模の不安定擾乱が増幅して成層圏惑星規模波の下方伝播が生じたと理解できる。

今後の問題点：

不安定擾乱の鉛直構造やEnergeticsを解明するため、非発散順圧渦度方程式を鉛直に拡張した多層モデルを作成して固有値解析を実施する。

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)[1], 鈴木立郎 [2], 小室芳樹 [3], 黒木聖夫 [4], 小野純 [3]
1: 国立研究開発法人 海洋研究開発機構 気候モデル高度化研究 PT
2: 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
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
4: 国立研究開発法人 海洋研究開発機構 ビッグデータ活用予測 PT

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、全球海洋熱塩循環の駆動源の一つである, 潮汐により励起された内部波の砕破に伴う海水の鉛直混合過程が, 南大洋における気候形成へ与える影響を調べた。

研究内容

全球深層海洋を数 1000 年の時間スケールで巡る熱塩循環は, 深層対流域である両半球極域海洋を出発点とし, 深層から表層への海水湧昇域である北太平洋を終着点とする (Broecker 1991; Marshall and Speer 2012)。極域深層対流は, 冬季海面冷却により形成された高密度な海水が表層から深層まで沈降することに伴って生じる。北太平洋での湧昇は, 南大洋から赤道を越えて北上してきた密度の比較的高い深層海水が微細スケールの乱流に伴う鉛直拡散過程を介して浮力を獲得することで維持される。極域深層対流過程に関する物理過程及び観測的描像については一定の知見が得られている一方で, 北太平洋全域の深層循環の実態は未だ十分に把握されていない。北太平洋深層水の湧昇を維持するために必須な海水の乱流鉛直拡散は, 主に海底地形上を通過する順圧潮汐流及び大気擾乱の両者から海洋へ供給されたエネルギーが, 内部重力波の非線形干渉を介して微細な乱流過程へカスケードダウンしてゆくことにより生じると考えられている。1990 年代半ばから活発に行われてきたモ

デリング研究，特に全球海洋大循環モデルを用いた研究では，モデル内の鉛直渦拡散係数としてパラメタ化された海洋微細乱流過程は，全球熱塩循環を質的にも量的にも大きく制御することが報告されている (e.g., Hasumi and Suginohara 1999)。しかしながら，海洋中の微細な乱流過程の海盆規模での直接観測は困難であり，パラメタ化された鉛直渦拡散係数(以下, K_v)には大きな不確実性が存在している。

今年度、本研究では、最新の高解像度潮汐モデルから得られた内部潮汐エネルギーの全球散逸率マップ (Niwa and Hibiya 2014)を全球気候モデルへ導入することにより，海水の混合過程の表現が，特に南大洋における気候形成へ与える影響について調べた。ここでは，経験的に得られた鉛直一次元鉛直拡散係数 (Tsujino et al. 2000)及び上述の潮汐モデルから見積もられた内部潮汐エネルギー散逸率を基に 3 次元的に診断された鉛直拡散係数を使用した，二種類の気候モデル実験を実施した（以下，前者を CTRL，後者を TED とする）。両実験では，MIROC5.2 と呼ばれる気候モデルが共通に使用されている。また，2 千年を越える積分を実施することで，準定常的な場を得た。

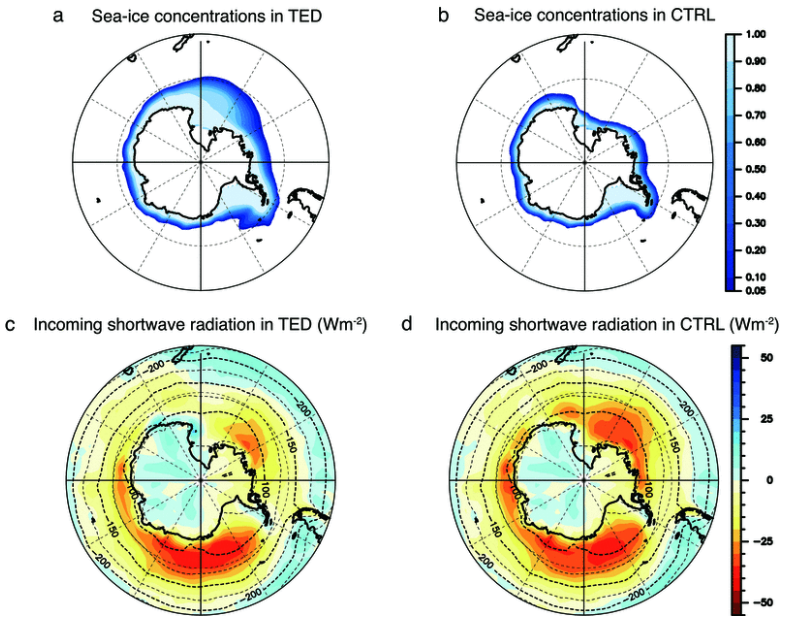


図 1.冬季海氷密接度及び下向き短波放射のバイアス（色）。短波放射バイアスは ERBE (Barkstrom 1994)を基準とした。下図の線は CTRL における値を示す。

両実験における気候場の差は，特に南大洋において顕著であった。図 1 に示され

るように，ロス海における海氷面積は TED で増加しており，また，これに伴って，下向き短波放射のバイアスは軽減されている。これらの差異は対流圏下層にとどまらず，大気移動性擾乱の強度や対流圏中層の大気大循環場にまで及んでいた（図は省略）。TED における海氷増加は，ロス海における深層対流の弱化とこれに伴う深層の比較的暖かい水の表層への輸送抑制が直接的な原因であった（図 2）。また，深層対流の弱化は，主に太平洋海盆における子午面循環の変化とこれに伴って生じる太平洋から南大洋へ輸送される水塊特性の変化によって説明される。南大洋での下向き短波の過大評価，海氷面積の過小評価は，気候変動に関する政府間パネル第 5 次評価報告書に参画した気候モデルの多くで見られる共通バイアスとして認識されている (e.g., Bodas-Salcedo et al. 2012; Williams et al. 2013)。本研究では，これらバイアスが，微細海洋乱流過程の表現にも依存しうることを示すことができた。

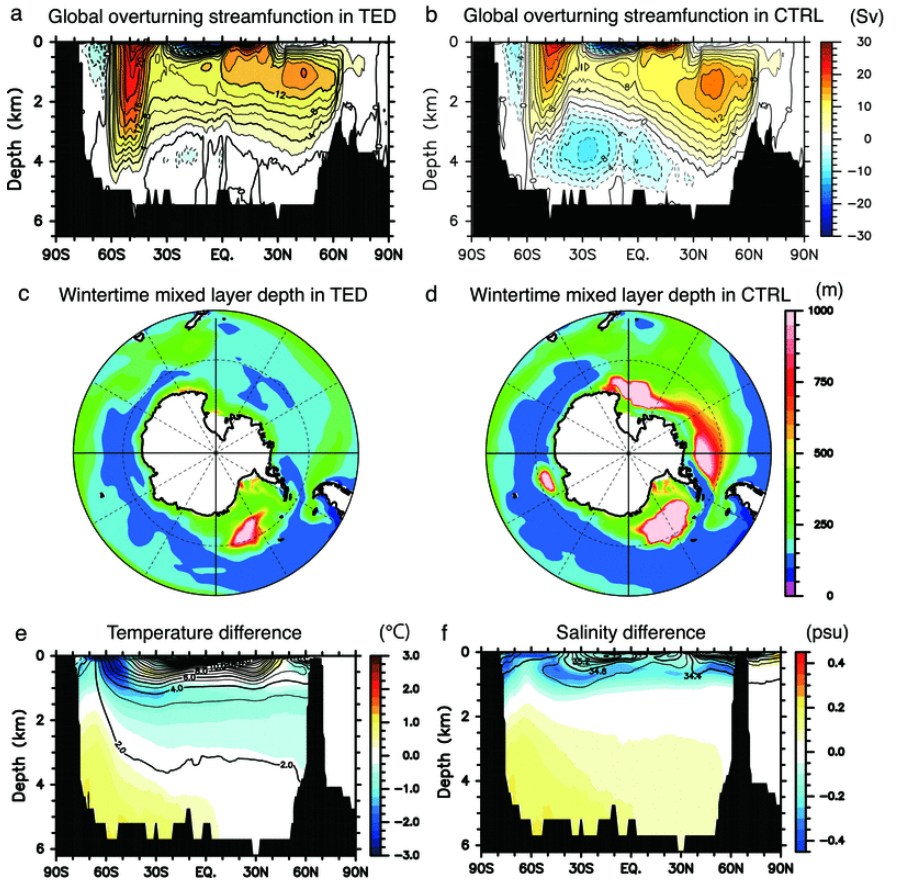


図 2. (a), (b) 全球海洋子午面循環流量流線関数，(c), (d) 冬季混合層深度，及び(e), (f) TED と CTRL における太平洋海盆で平均した水温及び塩分の差。(e), (f)における線

は, CTRL の値を示す。

参考文献

Barkstrom, B. R. The Earth Radiation Budget Experiments. Bull. Amer. Meteor. Soc. 65, 1170-1185 (1984).

Bodas-Salcedo, A., Williams, K. D., Field, P. R. & Lock, A. P. The surface downwelling solar radiation surplus over the Southern Ocean in the Met Office Model: The role of midlatitude cyclone clouds. J. Clim. 25, 7467-7486 (2012).

Broecker, W. S. The great ocean conveyor. *Oceanogr.* **4**, 79-89 (1991).

Hasumi, H., and N. Suginohara, 1999: Effects of locally enhanced vertical diffusivity over rough bathymetry on the world ocean circulation. *J. Geophys. Res.* **104**, 23367-23374.

Marshall, J. & Speer, K. Closure of the meridional overturning circulation through Southern Ocean upwelling. *Nature Geosci.* **5**, 171-180 (2012).

Niwa, Y. & Hibiya, T. Generation of baroclinic tide energy in a global three dimensional numerical model with different spatial grid resolutions. Ocean Modell. 80, 59-73 (2014).

Tsujino, H., Hasumi, H. & Suginohara, N. Deep Pacific circulation controlled by vertical diffusivity at the lower thermocline depth. J. Phys. Oceanogr. 30, 2853-2865 (2000).

Williams, K. D., Bodas-Salcedo, A., Déqué, M., Fermepin, S., Medeiros, B., Watanabe, M., Jakob, C., Klein, S.A., Senior, C. A. & Williamson, L. D. The transpose-AMIP II experiment and its application to the understanding of Southern Ocean cloud biases in climate models. J. Clim. 26, 3258-3274 (2013).

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：
観測に基づく鉛直混合分布を数値モデルに組み込む手法に関する研究

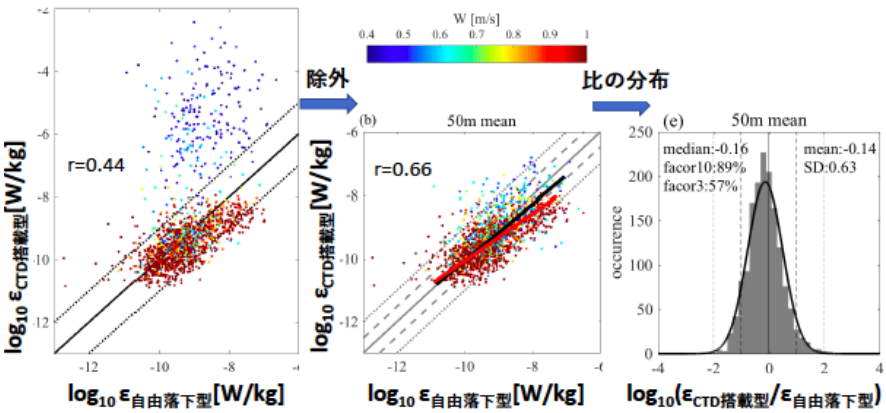
共同研究者名：安田一郎・後藤恭敬
（東京大学大気海洋研究所・海洋物理学部門・海洋大循環分野）

概要：

本年度は、当研究室で開発した、高速水温計を通常の海洋観測機器である CTD に取り付けて、乱流エネルギー散逸率を測定できる観測手法（Goto, Yasuda and Nagasawa 2016; 2018 Journal of Atmosphere and Ocean Technology）を用いて、気象庁、海洋研究開発機構、東大大気海洋研の航海において取得された、広域・深海に至る乱流観測データを収集し、北太平洋での放射性炭素同位体分布をもっともよく表現している海洋モデル（Oka and Niwa, 2013 Nature Communications）と比較した。その結果、潮汐を駆動源として評価されているモデルで用いられているエネルギー散逸率は、観測された散逸率に比較して１０倍以上過大となっていることが明らかになった。一方、分布についてはモデルと観測は比較的良い相関を示していた。大きな違いは、モデルでの遠方場（内部潮汐波動の発生源から離れた伝搬性内部波動による散逸）の与え方に問題があり、鉛直構造を浮力振動数の２乗に比例する構造にし、背景場を非常に小さくすると、観測と整合的なモデルの場となることが示された。今後改善された混合の分布を用いてモデルを駆動するなど、発展させたいと考えている。

引用文献

1) Y. Goto, I. Yasuda and M. Nagasawa (2016): Turbulence estimation using fast-response thermistors attached to a free-fall vertical microstructure profiler. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 33, 2065-2078.1
2) Y. Goto, I. Yasuda and M. Nagasawa (2018): Comparison of turbulence intensity from CTD-attached and free-fall microstructure profilers. Journal of Atmosphere and Ocean Technology, 35, 147-162, DOI: 10.1175/JTECH-D-17-0069.1



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[1]，**堀之内 武**[1]，**見延 庄士郎**[2]，**稲津 將**[2]
玉置 雄大[3]，**勝山 祐太**[3]，**井田 東吾**[3]，**相河 卓也**[3]
植木 聡明[4]
[1]北海道大学 大学院地球環境科学研究院
[2]北海道大学 大学院理学研究院
[3]北海道大学 大学院理学院
[4]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，海面水温の上昇が引き起こす上層雲の変化とその変化が気候に及ぼす効果について調べる．また，MIROC4m を用いて，中高緯度における南北半球の非対称な温暖化が熱帯の降雨分布に与える影響とその背後にあるメカニズムを明らかにする．どちらも，最終的には気候モデルによる将来予測結果を理解し,その不確実性を評価･低減することを目的としている．

2．研究内容

海面水温上昇と上層雲の応答に関しては，現在，データ解析と論文執筆を平行して進めており，成果としてある程度まとまった時点での報告を予定しているため，ここでは詳細を記載しない．本報告書では，中高緯度における南北半球の非対称な温暖化による熱帯の降雨分布への影響を中心に記述する．

地球温暖化は，北極域で現在特に急速に進行しているが，南大洋での温暖化の程度は小さく，南北で非対称な応答が特徴的である．この南北非対称性は，約 100 年後の将来においても予測されている．本研究では，このような中高緯度の南北非対称な温暖化が熱帯の降雨分布に与える遠隔影響について調べた．大気海洋大循環モデル，大気大循環モデルと海洋混合層

モデル，単体の大気大循環モデル，単体の海洋大循環モデルを階層的に用いることで，大気の役割，海洋の役割を明らかにした．基本となる大気海洋大循環モデル MIROC4m を用いた数値実験は，海洋研究開発機構の地球シミュレータ上で実施されたが，研究の中心課題の 1 つである海洋の力学的効果の検証については，本共同研究により利用可能となった東京大学情報基盤センターの PRIMEHPC Fujitsu FX10 System 上で海洋大循環モデルを用いて実施され，本研究において不可欠な役割を果たした．

大気海洋大循環モデル実験では，海水温と塩分を将来予測実験で得られた値に中高緯度のみ緩和しながら，産業革命前から 21 世紀末までの時間積分を実施した．この中高緯度温暖化実験では，同一モデルによる将来予測実験で得られた，北緯 10 度を境にした 20 世紀末と 21 世紀末の熱帯降雨の南北変化量の差の約 47%（10−1 月平均）が再現された．すなわち，中高緯度の温暖化が熱帯の降雨分布に大きな影響を及ぼす可能性が示された．

同様の実験を海洋の力学過程を含まない場合についても行ったところ，どちらの場合でも熱帯の降雨分布が南から北へ移動する傾向にあるが，海洋の力学効果は降雨分布の南北移動を緩和する働きがあることが示された．これと整合する結果は最近の先行研究によっても報告されており，次のように解釈されている．海洋循環の変化が抑制された実験では，南北半球間の熱輸送変化をすべて大気，すなわち低緯度におけるハドレー循環が担うため，それに伴う降水帯の変化が大きく現れる．一方で，海洋循環がその一部の（結果的には大気より多くの）熱輸送変化を分担すると，ハドレー循環の応答は弱まり，降水帯の変化も抑制される．

本研究では，海洋の役割を明らかにするために，さらに表 1 に示す海洋大循環モデルを用いた数値実験を行った．その結果，大気と海洋の熱力学的な（力学的効果のない）応答によって生じた風応力の差が赤道湧昇を弱め，それによって引きこされる海面水温上昇とハドレー循環の応答が，熱帯の降雨分布の赤道を超えた北へのシフトを抑制するという解釈を得た．すなわち，先行研究で提案されたエネルギー論的な解釈に対して，新しい視点を提供した．

表 1　海洋大循環モデルによる実験（Yoshimori et al., 2018, Table 1 を基に作成，最後の 40 年を解析）

実験名	風応力の差	初期条件	積分期間
O-CTL	なし（標準実験）	任意	2050 年
O-AOR40	中高緯度のみ温暖化させた大気海洋大循環モデルによる 20 世紀末と 21 世紀末の差	O-CTL の 2001 年	50 年
O-ASR40	中高緯度のみ温暖化させた大気大循環・海洋混合層モデルによる 20 世紀末と 21 世紀末の差	O-CTL の 2001 年	50 年

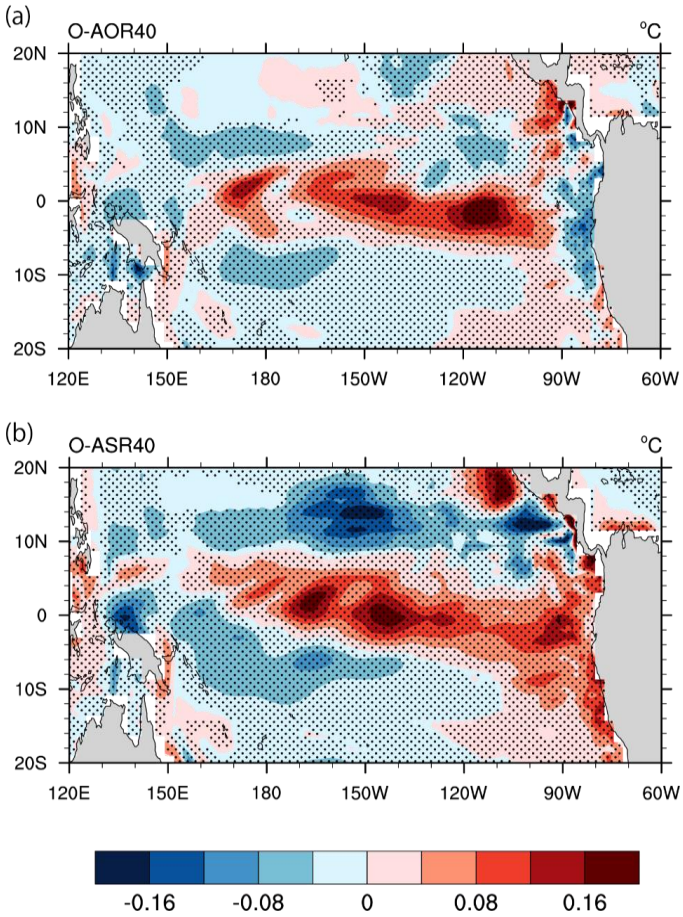


図 1　海洋大循環モデルにおける風応力差に対する海面水温の応答．(a) 表 1 の O-CTL と O-AOR40 の差，(b) 表 1 の O-CTL と O-ASR40 の差．図中の点は，t 検定において有意（有意水準 5%）な差を示す．（Yoshimori et al., 2018, Fig. 13 より転載．
© Copyright AMS 2018）

3. 研究成果

本研究の結果は，将来予測における熱帯の降雨分布の変化に関する一側面のみに注目したものである.当然,中高緯度からの遠隔影響だけでなく，放射強制に対する熱帯そのものの応答も大きいはずである．最終的には，これらを統合し，その信頼性を含めて検証していく必要がある．一方で，これまで多数の類似の目的を持った研究が海洋の力学的効果を考慮せずに実施され，その解釈が確立されてきた背景を考えると，今回提示した新しい視点が与えるインパクトは大きいと期待される．また，前述していないが，下記の論文では，中緯度の大気の定在波と非定常擾乱の変化がハドレー循環の応答に及ぼす効果についても言及しており，これまでのエネルギー論的な視点だけでなく，角運動量を考慮した理解の重要性も示唆している.

- Yoshimori, M., A. Abe-Ouchi, H. Tatebe, T. Nozawa, and A. Oka (2018): The importance of ocean dynamical feedback for understanding the impact of mid-high-latitude warming on tropical precipitation change. J. Climate, doi:10.1175/JCLI-D-17-0402.1.

4. 今後の課題

本研究では，中高緯度から熱帯への遠隔影響について，海盆間の応答の違いやその相互作用について十分に明らかにできていない．また，風–蒸発–海面水温（WES）フィードバックの果たす役割や放射フィードバックの果たす役割についても明らかにしていくことが期待される．南北非対称な温度変化による熱帯降雨分布への遠隔影響という点では，古気候で顕著に見られる大西洋子午面循環の弱化による熱帯降雨分布の南への移動との間におけるメカニズムの共通性や相違性を整理していく必要がある．さらに，中高緯度の温暖化によって引き起こされた平均場における赤道湧昇の弱化が，エルニーニョ・南方振動現象に与える影響なども興味深い課題である.

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・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

～正のインド洋ダイポールモード現象に伴う亜表層の塩分偏差の形成メカニズム～

１．はじめに

インド洋ダイポールモード現象(IOD)の発生に伴い，海洋の表層および亜表層に顕著な塩分偏差が出現することが，近年の塩分観測の充実により明らかにされてきた(Thompson et al. 2006; Zhang et al. 2013)．塩分偏差は成層への影響を介して IOD に伴う海面水温偏差に影響を与える可能性が示されていることから(Kido and Tozuka 2017)，その定量的な理解は重要である．しかし，海面塩分偏差の形成要因としては降水の変化に伴う淡水フラックス偏差や海洋循環の変化に伴う塩分移流偏差などが指摘されているが(Zhang et al. 2013; Li et al. 2016)，亜表層の塩分偏差についてはその形成メカニズムに関する定量的な理解は未だ十分でない．そこで，本研究では領域海洋モデル ROMS を用いて，熱帯インド洋における塩分変動を現実的に再現するとともに，塩分収支解析を行うことによって，塩分偏差の形成プロセスを定量的に理解することを目指した．

２．海洋モデル

熱帯インド洋の塩分変動を再現するため，領域海洋モデル ROMS(Shchepetkin and McWilliams 2005)を用いた．領域は熱帯インド洋(30° -110° E, 30° S-30° N)であり，水平解像度は0.5° ×0.5° ，鉛直方向には40層配置した．境界の北側・西側は閉境界，東側・南側は開境界とし，海洋同化プロダクト ORAS4(Balmaseda et al. 2013)の値を用いた.強制には 3 時間毎の長波/短波放射，降水量，海上風速/気温/比湿および河川流量を用いた．風応力および顕熱・潜熱フラックスは COARE3.0 のバルク式から算出した.WOA2013 の 1 月の水温・塩分場を初期値とした 30 年間のスピンアップののち，1958-2015 年まで積分を行った．積分時には塩分変化傾向式の各項を on-line で保存し，5 日毎に平均したものを出力した.

３．結果

まず，ROMS によって再現された塩分の平均場を観測データと比較したところ，インド洋に特有な東西の塩分コントラストをはじめ，基本的な特徴をよく再現していた．さらに，正の IOD(pIOD)発生年における躍層付近の塩分偏差をコンポジット図から確認したところ，赤道インド洋東部(熱帯インド洋南東部)に正(負)の塩分偏差が見られた(図 1)．これらの空間パターンおよび振幅は観測データの結果とよく一致していた.

上記の亜表層の塩分偏差の形成要因を明らかにするため，顕著なシグナルが見られた Box1(92° E-98° E, 2° S-2° N: 図 1 太実線)および Box2 (75° -85° E, 8° S-3° S:図 1 細実線)について，塩分収支式の各項の偏差を比較した(図 2)．その結果，Box1 に見られる正偏差は主に鉛直移流からの寄与が支配的であったのに対し，Box2 での負偏差は東西・鉛直移流偏差に起因していた．さらに，各領域における塩分移流偏差の各項を分解して調べたところ，いずれの領域についても，IOD に伴う流速偏差による気候値の塩分場の移流が偏差の形成に重要な役割を果たしていることがわかった.

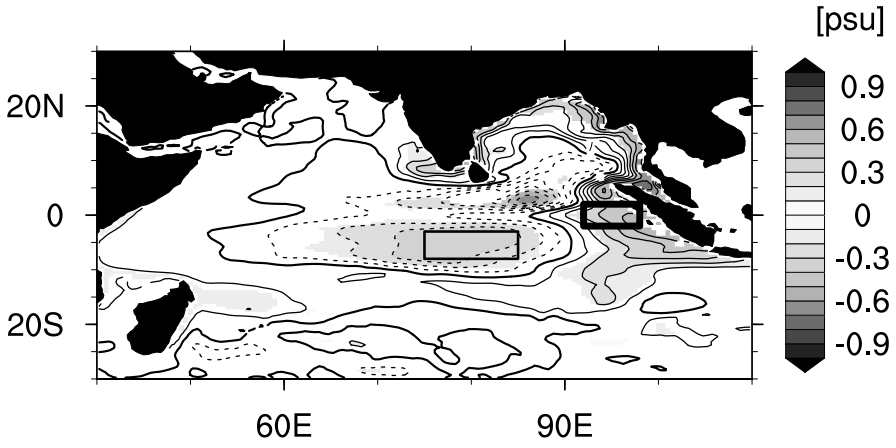


図 1: 各 pIOD 年 9-11 月における，深さ 40-80 [m]における塩分偏差のコンポジット図. 実線・破線はそれぞれ正・負偏差を表しており，等値線間隔は 0.1 [psu]. 陰影は偏差が信頼度 95%で有意であることを示している.

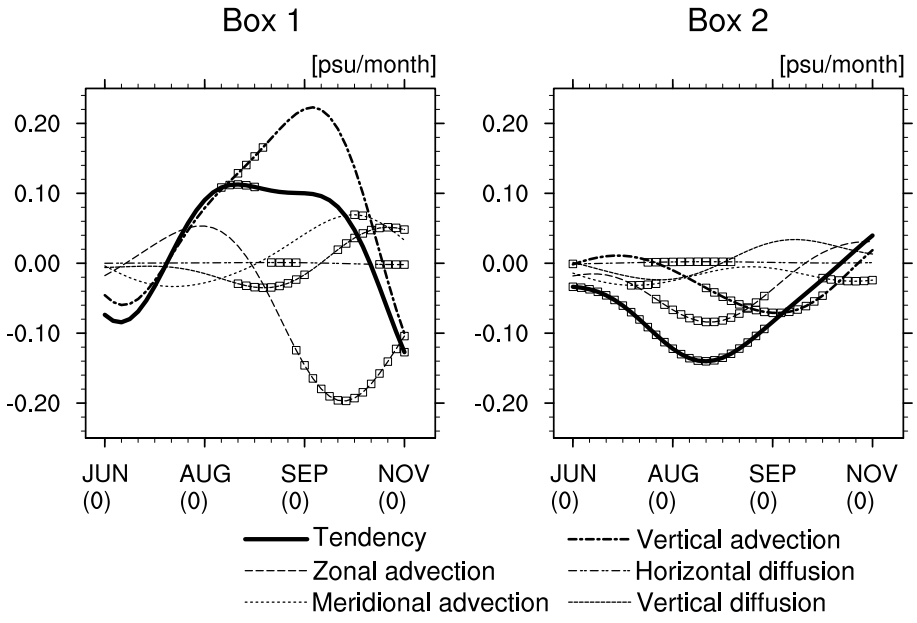


図 2: 各 pIOD 年の 6-11 月にかけての，深さ 40-80[m]で平均した塩分変化傾向式各項の偏差のコンポジット図(単位: [psu/month]). 左側は Box 1，右側は Box 2 での領域平均値を示す. 各線の意味は凡例に示す. マーカーは偏差が信頼度 95%で有意であることを示している.

研究課題

数値モデルを用いた温室効果気体濃度・エアロゾル分布解析

国立環境研究所　主任研究員　齊藤　誠
国立環境研究所地域環境研究センター　五藤　大輔
気象庁気象研究所海洋・地球化学研究部　丹羽　洋介

研究目的

温室効果ガス（GHG）の時空間変動を把握し、その吸収排出量の全球分布を理解することを目的に、人工衛星を用いた GHG 観測が日本やアメリカ、ヨーロッパ、中国等で実施されている。日本では 2009 年に温室効果ガス観測技術衛星（GOSAT）が打上げられ、9 年以上経過した現在も全球の二酸化炭素（CO_2）およびメタン（CH_4）の大気濃度分布観測を継続中である。また、2018 年度には GOSAT の後継機にあたる温室効果ガス観測技術衛星 2 号（GOSAT-2）の打上げが予定されており、GOSAT および GOSAT-2 による長期間に渡る継続的な全球 GHG 観測が計画されている。

GOSAT や GOSAT-2 を含め、人工衛星による GHG 観測では、地球表面で反射した太陽光や、地球表面および地球大気から放射される輝度スペクトルを観測し、そこに GHG やエアロゾルの鉛直プロファイル、地表面気圧等の初期情報を与えることで GHG 大気濃度分布を導出する。このため、GHG 大気濃度分布をより正確に導出するためには、センサの精度や観測する輝度スペクトルの波長帯、バンド数のみならず、GHG やエアロゾル等の時空間分布についての初期情報の精度も重要となる。この初期情報の精度向上を目指し、GOSAT-2 では CO_2 および CH_4 の気柱平均濃度（レベル 2 プロダクト）を導出する際に必要な CO_2・CH_4、またエアロゾルに関する初期情報を非静力学正 20 面体格子大気モデル NICAM に準拠した数値モデル NICAM-TM および NICAM-SPRINTARS を用いて推定することが決定している。同時に、GOSAT-2 レベル 2 プロダクトを用いた全球 CO_2・CH_4 吸収排出量推定値（レベル 4 プリダクト）には、同 NICAM-TM 4D-Var システムが使用される。

本年度は、NICAM-TM および NICAM-SPRINTARS を GOSAT-2 プロジェクトにおいて定常利用するためのシステム開発(モデル移植、実走試験、初期データ解析）を重点的に進めた。また、モデルの水平解像度の違いが対象気体の空間分布推定に及ぼす影響についての感度解析に向けた準備を進めた。

研究内容

国立環境研究所（NIES）ではベクトル処理用計算機（SX-ACE, OS: SUPER-UX）とスカラ処理用計算機（UV20, OS: SUSE Linux Enterprise Server 11）の大型計算機を定常運用している。GOSAT-2 レベル 2 プロダクトの先験情報およびレベル 4 プロダクトの作成には、現時点においては NIES が運用するこれらの計算機の利用を想定している。また、今後 GOSAT-2 プロジェクトにおける各種モデルシステムの高解像度化、および定常処理を前提とした演算速度の高速化への要望が高まることが想定されるため、NICAMN-TM(および NICAM-TM 4D-Var)・NICAM-SPRINTARS 両モデルシステムのベクトル計算機への移植・実装作業に重点的に取り組んだ。

本移植作業においては、当ベクトル計算機特有の問題に対処したコード修正以外にも、モデルの水平解像度が約 112 km に相当する glevel=6 以上の高解像度モデル計算の際にエラーが発生する事態を受け、モデル内のナッジング処理、restart ファイルの入出力等、複数の箇所において計算機システムに合わせたコードの修正を実施した。また、GOSAT-2 レベル 2 プロダクトで必要となるエアロゾル情報を計算・出力するために、NICAM-SPRINTARS における有機炭素・黒色炭素、砂塵等に関するコードの一部に改変を加えた。ナッジング処理用気象データには、気象庁が提供する気象庁 55 年長期再解析モデル格子データ(JRA-55)を使用し、2009 年から 2017 年までの 9 年分のモデル入力データを、モデル水平解像度 glevel=5 および 6 用にそれぞれ作成した。NICAM-TM の入力情報となる CO_2 および CH_4 フラックスについては、CarbonTracker が提供する CO_2 および CH_4 フラックスデータを基に、glevel=5 および 6 用のモデル入力デ

ータを作成した。

研究結果

GOSAT-2 プロジェクトにおいて、レベル 2 プロダクト等を処理するためのデータ処理運用システム（G2DPS）と、本課題で取り組んでいるモデルシステムの結合仮テストを 2018 年 2 月に実施した（本テストは 2018 年 4 月に実施）。この仮テストでは、対象期間を 2017 年 10 月に設定し、G2DPS の本運用と同じ処理（G2DPS 経由で気象データを入手、各種前処理、ベクトル計算機上での NICAM-TM・NICAM-SPRINTARS の実走、各種後処理、計算結果を G2DPS へ転送）を実施し、システム全体の動作確認を行った。このテストは無事に終了し、GOSAT-2 の打上げに向けた準備が確実に進捗していることを確認したとともに、モデル計算結果は GOSAT-2 レベル 2 プロダクト用アルゴリズムへ提供された。今後はこの処理における初期解析結果を適宜 NICAM-TM・NICAM-SPRINTARS へフィードバックする予定である。

今年度準備した気象入力データについては、水平風速成分および気温に関するモデル出力値と JRA-55 データを比較し、glevel=5 および 6 ともに入力データおよびモデル動作に異常が無いことを確認した。この結果を受け、CO_2 および CH_4 の全球濃度分布について上記 2 つの水平解像度を用いた計算を実施した。また、今年度は CO_2 および CH_4 フラックス入力データの違いが大気濃度場推定値に及ぼす影響についても確認するため、複数の入力データを用いたモデル実走を実施した。この入力データの違いが大気濃度場の時空間分布に大きな影響（CO_2 で数 ppm、CH_4 で数 10 ppb）を及ぼしていることを確認しており、今後はこの計算結果の解析も進める予定である。

今後の問題点

今年度はシステム開発に多大な時間がとられたため、モデル計算結果の解析および考察に十分な時間を割くことが出来なかった。来年度は、今年度に準備した環境を効率的に利用し、モデル実験とその解析に重点を置く

予定である。一方、今年度使用した NICAM モデルは古いバージョンを使用していることから、来年度は最新版への更新作業に取り組む必要がある。

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・雨宮新・南原優一（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的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的混合が存在する。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気レーダーである。本研究は PANSY レーダーのフルシステムによる観測が行われた 2016 年 4 月から 8 月の 5 ヶ月間を対象と

し、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長期再現実験を行った。これは中間圏を含んだ非静力学モデルによる世界初の長期現実大気再現実験となる。

研究成果

現実大気に十分近い場から外的強制力なしに発生する重力波を長期間解析するため、MERRA 再解析データを初期値として 7 日間のシミュレーションを複数行った。この時、次に行うシミュレーションの期間は前のシミュレーション期間と 2 日分重なるようにした。このように作成した複数のデータのうち、それぞれのデータの後半の 5 日間を繋げることで一連の連続的なデータを作成した。NICAM によって再現された中間圏の風速場を調べたところ、PANSY レーダーによる観測と比べて擾乱の振幅が約 1.5 倍ほど大きいものの、位相構造を良く再現していた (図 1)。また平均東西風の緯度高度断面は MERRA 再解析データと整合的であった。さらに中間圏の風速擾乱の位相速度スペクトルを観測・モデルについて調べたところ、モデルで計算されたスペクトル構造と季節変化は観測と非常によく整合した。

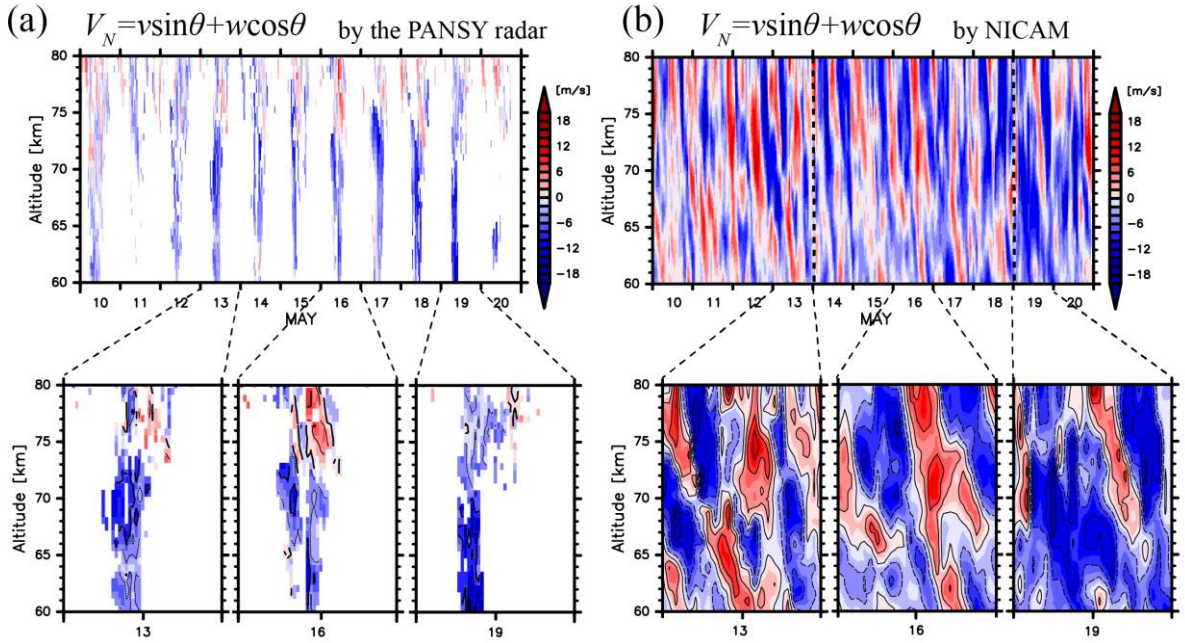


図 1: (a) 2016 年 5 月 10 日から 20 日に PANSY レーダーによって観測された天頂角 10^{o} の北向き視線速度（$v\sin\theta + w\cos\theta$）の時間高度断面図。(b) NICAM によって再現された同期間の北向き視線速度。黒破線は繋ぎ合わせた個々の数値シミュレーションの切れ目の日付を表す。

次に得られたモデルデータを用いて、東西、南北、鉛直風擾乱の周波数パワースペクトルを計算し、2016 年 6 月から 8 月において平均した。東西、南北風擾乱のスペクトルは周期 12 時間にピークを持ち、これより高周波数領域では周波数の約-5/3 乗に比例する構造を持っていた。また鉛直風擾乱のスペクトルは周期 2 時間から 5 日間の間でフラット（つまり周波数の 0 乗に比例）な構造を持っていた。さらに、南北風擾乱から 1 日及び半日太陽同期潮汐を除いた擾乱のスペクトルの緯度構造を調べたところ、南緯 30 度から 75 度にかけて慣性周期よりもやや長い周期にピークを持っていることが分かった。一方、南緯 78 度から 90 度においては、周期約 8 時間にピークが見られた。また、鉛直運動量フラックスの東西・南北成分のスペクトルを調べたところ、鉛直運動量フラックスの東西成分は慣性周期よりもやや長い周期に負のピークを持っていた。一方、鉛直運動量フラックスの南北成分は慣性周期よりも短い周期領域で正、長い周期領域で負の値を持つことが分かった (図 2)。

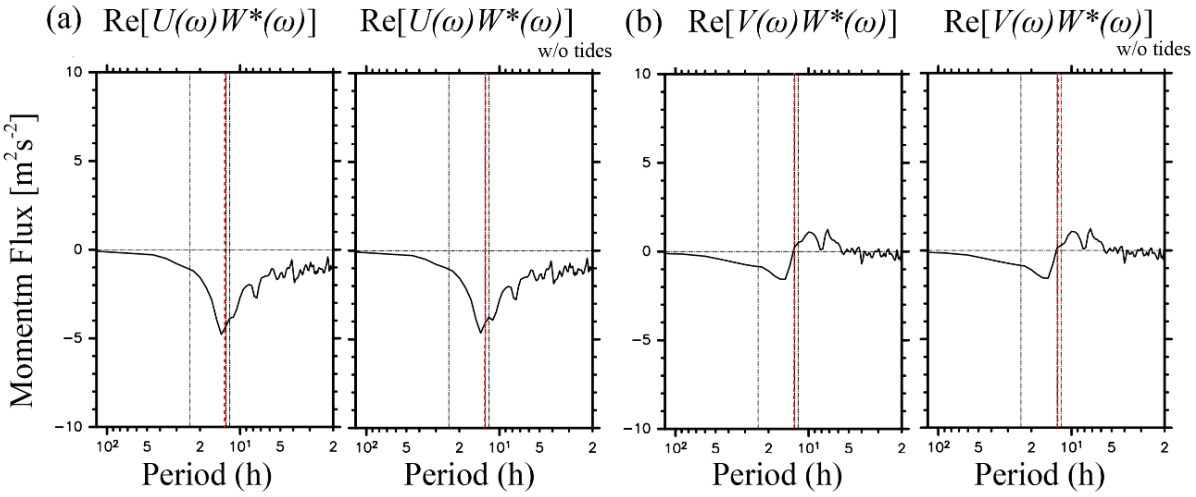


図 2: NICAM によって計算された昭和基地高度 70 ~ 75 km における、2015 年 6 ~ 8 月で平均した (a) 鉛直運動量フラックス東西成分, および (c) 南北成分のスペクトルと、太陽同期潮汐波の成分を除いたスペクトル。黒破線は周期 12 時間と 24 時間、赤破線は昭和基地における慣性周期を表す。

最後に、30 時間未満の周期成分として定義した重力波の運動エネルギー、ポテンシャルエネルギー、運動量フラックス、エネルギーフラックスの空間構造を調べた。運動量フラックスやエネルギーフラックスの大きな値は、極夜ジェット

の軸に沿うようにして分布していた。鉛直運動量フラックスの東西成分は主に負であり、極夜ジェットのやや極側で負の極大値を取ることが分かった。鉛直エネルギーフラックスが極夜ジェットの軸に沿って正であることから、重力波は平均風に向かって西に伝播していることが示唆された。さらに鉛直運動量フラックスの南北成分は極夜ジェットの中心と赤道側で負、極域側で正であり、重力波が極夜ジェットのやや極側に集中するように伝播していることが示唆された。

極域中間圏における周期 12 時間前後の大振幅擾乱は、今まで潮汐波としてのみ議論されてきた。本研究はこの擾乱が 1000 km 以上の水平波長を持つ準慣性周期の慣性重力波である可能性があることを明らかにした。また先行研究による中間圏の高解像度観測データと比較し、NICAM は中間圏擾乱の統計的振る舞いを良く再現することが分かった。また、準慣性周期の慣性重力波は特に大きな負の運動量フラックスを持つことが明らかになった。

本研究内容は論文として、国際誌 Journal of Atmospheric Chemistry and Physics に投稿予定である。

今後の課題

まず、PANSY レーダーによる観測データを用いた擾乱の詳細なパラメータ解析を行い、NICAM による結果との比較を行う必要がある。また中間圏で見られた慣性周期付近のエネルギーピークの起源について明らかにしたい。さらに、PANSY レーダーにより夏期に観測される高度 80 km から 95 km の擾乱について解析するため、モデルトップをさらに高く設定できるよう開発を行う必要がある。このような非常に高いモデルトップを持つ大気モデルは熱圏を含む全大気をカバーするため、熱圏や電離圏の運動量・エネルギー収支の更なる理解にとっても非常に重要なデータが得られることが期待される。

研究課題名

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

共同研究者名

黒田剛史・笠井康子　(情報通信研究機構)
早坂忠裕・笠羽康正・寺田直樹・中川広務・青木翔平・鎌田有紘・秋葉丈彦
(東北大学大学院理学研究科)
佐川英夫　(京都産業大学)
佐藤正樹・阿部彩子　(東京大学大気海洋研究所)

研究目的

本研究では「物質輸送」と「気候変動」をキーワードに、地球・火星・金星を対象に大気モデルを用いた研究を、大気汚染予測への応用、比較惑星気象学、惑星のハビタビリティなど多方面への学術的・社会的展開を見据えた上で進める。

地球大気における物質輸送に関わるトピックとして、大気エアロゾル･PM2.5の輸送とその予測が挙げられる。特にPM2.5による健康被害は世界的に深刻であり、日本では大陸からの越境汚染が国内でのその濃度に与える影響は大きい。そのため、ヘルスケア等への利活用も見据え、データ同化の手法を用いた予測システムの構築が重要で、中でも高時空間分解能(水平5km・10分間隔)でエアロゾルの光学的厚さデータを取得している静止衛星「ひまわり8号」は日本周辺の広範囲のデータを取得している点でも適したものといえる。

火星大気はダスト循環が気象に与える影響が大きく、前世紀末より周回探査機が次々と火星周回軌道に投入され、約10火星年分に渡る大気観測データ(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。最近では2014年9月に火星軌道に投入された米国の火星探査機MAVENが大気散逸の様子を、また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がHDO/H_2O同位体比や大気微量物質に焦点を当てた観測を行っており、これらの観測は火星の「気候変動」解明のためのヒントにもなっている。

金星大気は日本の探査機「あかつき」が2015年12月より周回観測を行っており、多波長での雲の撮像からスーパーローテーションに代表されるその力学の様相を解き明かしつつある。また観測からSO_2やCOの分布の導出も進められており、雲物理・化学過程を含めたモデルとの比較を通してこれらの物質の分布変動メカニズムに迫ることで、その気候維持過程に対する示唆も得られることが期待される。

研究内容

大気エアロゾル･PM2.5 の輸送とひまわり 8 号データの同化については NICAM-

SPRINTARS を使用した。火星と金星については MIROC をベースとした全球大気モデルの開発を進めており、特に DRAMATIC (Dynamics, RAdiation, MAterial Transport and their mutial InteraCtions) MGCM と名付けられた火星モデルは、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., 2016 など]、金星モデルについても、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[伊藤ほか, 2016]。本課題ではこれらの実績を土台に、探査機観測との比較を通した様々な物質輸送･気候メカニズムの解明に向けた取り組みを行っている。

研究成果

1. NICAM-ひまわり8号データ同化計算

NICAM-SPRINTARSをglevel=7(全球水平分解能約56km)で使用し、1時間毎にひまわり8号のエアロゾル光学的厚さ観測データについてモデル出力と比較を行い、モデル内のエアロゾル鉛直分布は維持したまま光学的厚さが観測と合うようにナッジング同化した結果と、同化なしでの計算結果との比較を図1に示す。今後は鉛直分布の評価、よりPM2.5量に特化した同化予測計算、同化手法の改善などについて検討する予定である。

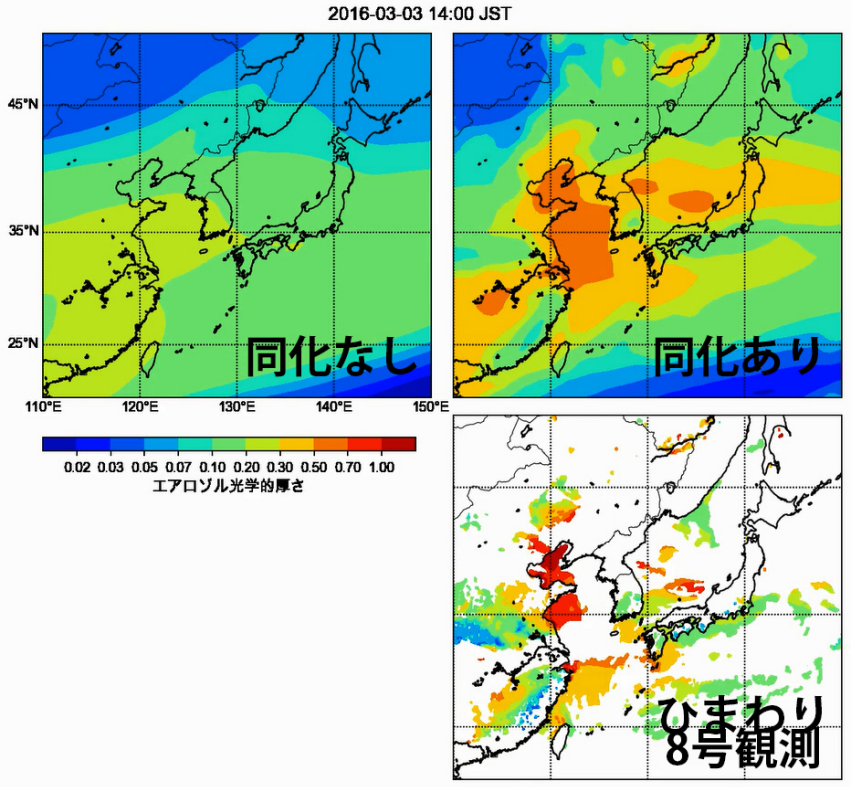


図 1：NICAM-SPRINTARS を用いた日本周辺のエアロゾル光学的厚さ計算結果について、同化なし計算(左上)、ひまわり 8 号同化あり計算(右上)、ひまわり 8 号観測データ(右下)の比較。計算は 2016 年 2 月 20 日 9:00JST から大気中にエアロゾルがない状態で開始、地表からの放出は Goto et al. [2015]に基づき、同化計算は 3 月 1 日 9:00JST より開始。

2. 火星大気シミュレーション(ダスト循環・古気候)

DRAMATIC MGCMにダスト巻き上げスキームを導入し、水平分解能T106 (グリッド間隔約67km)でのダスト循環の再現を可能にした[Kuroda and Kadowaki, 2017](図2)。現在はこのダスト循環と水循環・HDO/H_2O同位体分別[Kuroda, 2017]を融合させたモデルの開発に取り組んでおり、観測との比較検証により詳しい気候診断を行うことができるモデルへと発展させる。また古気候シミュレーションでは水循環スキームを液体の水(海の過程、降水・河川流量の計算)に対応させ、約38億年前の火星において液体の水が地表に存在しうる条件について、地表(海)の熱慣性が影響している可能性を示した[鎌田, 2018]。

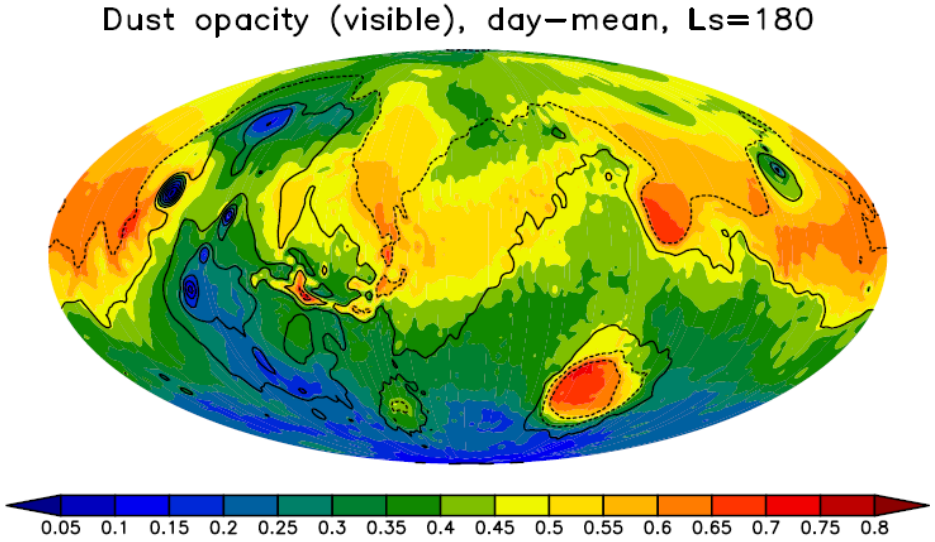


図 2：水平分解能 T106 の DRAMATIC MGCM で再現された、Ls=180(北半球秋分)における全球のダスト光学的厚さの分布。ダスト巻き上げのパラメタリゼーションは風の応力と対流の効果を考慮している[Kuroda and Kadowaki, 2017]。

3. 金星硫酸雲分布のシミュレーション

硫酸雲の生成・消滅過程と硫酸蒸気の生成源となる SO_3, SO_2, H_2O の大気化学過程を導入した金星 GCM[伊藤ほか, 2016]を改良し、硫酸雲分布の変動が大気放射過程に反映されるようにした上で、現実的な硫酸雲と硫酸蒸気の分布が得られるようになった(図 3)。今後はこのモデルを用いて、雲分布のみならず SO_2 や CO などの分布についても、「あかつき」や Venus Express、地方望遠鏡観測などとの比較を行い、金星の大気循環及び気候システムについて深いアプローチを行う。

<u>今後の問題点</u>

より観測と整合し、また予測に用いることができるように、地球においては同化手法の改良、火星及び金星においては雲生成・放射・化学スキームの改良を行い、同化による予測計算を火星や金星にも適用させることを見据えた開発を進める。

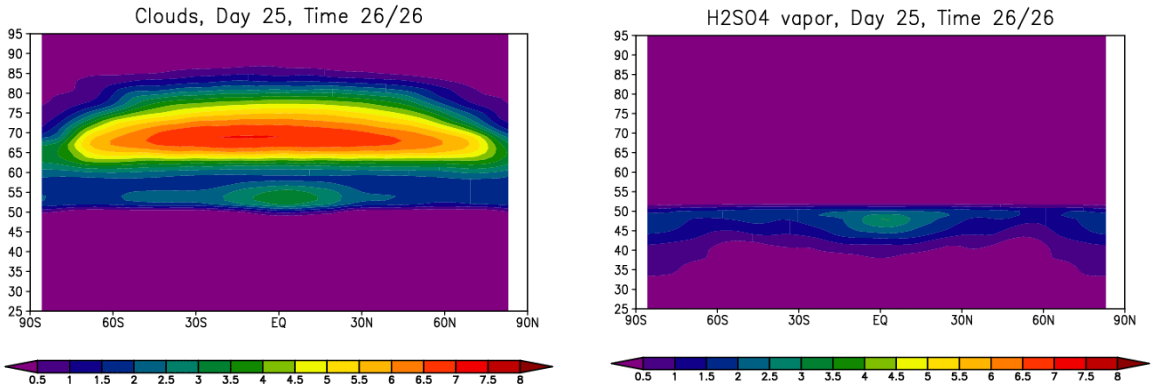


図 3 : 金星 GCM で再現された、経度平均の硫酸雲(左)と硫酸蒸気(右)の質量混合比の分布。(縦軸:高度[km]、横軸:緯度)。

参考文献

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, Application of a global nonhydrostatic model with a stretched-grid system to regional aerosol simulations around Japan, *Geoscientific Model Development*, 8, 235–259, 2015.

伊藤一成, 黒田剛史, 笠羽康正, 寺田直樹, 池田恒平, 高橋正明, GCM study of the Venusian cloud formation and distribution: Effects of atmospheric chemistry and circulation. *第 29 回大気圏シンポジウム講演集*, JAXA リポジトリ, 2016.

鎌田有紘, Study of early Mars using a 3-D coupled model between atmosphere and hydrosphere: Comparison of observed and modeled distributions of valley networks, *東北大学修士論文*, 2018.

Kuroda, T., A.S. Medvedev, E. Yiğit and P. Hartogh, 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, doi: 10.1175/JAS-D-16-0142.1, 2016.

Kuroda T., Simulation of the Water Cycle Including HDO/H_2O 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.

Kuroda, T. and M. Kadowaki, Simulation of the Small-Scale Dust Activities and their Mutual Interactions on the Atmospheric Dynamics using a High-Resolution Mars General Circulation Model. Abstract book of '*Dust in the Atmosphere of Mars and Its Impact on Human Exploration*', Lunar and Planetary Institute, 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），佐藤　正樹（東大・大気海洋研，所内担当教員）

研究目的：

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

（1） 厚い雲で覆われた惑星の大気大循環の力学の解明

（2） 金星の下層大気と中層大気の力学結合過程の解明

（3） 現実的な金星大気大循環モデルの開発

を研究目的と定めた．

研究内容：

厚い雲で覆われた惑星の大気大循環力学を解明するために（目的1），中層大気雲層加熱で駆動する大気大循環の水平解像度依存性と多重平衡について調査した．簡略化した金星実験設定では，下層大気の極域間接循環が，T42 以上の水平解像度で形成された．この極域間接循環は，Gierasch メカニズムを弱める方向に働き，雲層内のスーパーローテーションを弱める．また，極域間接循環が解像できない低解像度実験では，多重平衡が出現しやすい．

金星の下層大気と中層大気の力学結合（目的2）の研究では，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」と「数年スケールの帯状流年々変動」についてまとめた．この研究では，U_{MAX} と V_{MAX} と dT_{MAX} の時系列データの散布点を説明する推定曲線を導出し，スーパーローテーションの年々変動メカニズムを新たに提案した．

現実的な大気大循環モデルの開発（目的3）に関しては，昨年度に引き続き，金星放射伝達を組み込んだ大気大循環モデル(Ikeda 2011)を用いた実験の解析を行っ

た．本年度は，地形が大気大循環に与える影響を解析し，観測されている循環や波動と比較した．

研究成果：

上で挙げた研究目的ごとに，得られた成果を以下に示す．

（1）惑星中層大気の雲層加熱で駆動する大気大循環について，水平解像度依存性と多重平衡について調査した結果をまとめた．簡略化した金星実験設定（Lebonnois et al. 2013; Yamamoto and Takahashi 2016）では，高緯度ジェットの下層で形成される極域間接循環は，T42以上の水平解像度が要求される．この間接循環は，上層のGierasch-Rossow-Williamsメカニズムを弱める方向に働くため，雲層のスーパーローテーションは弱化するが，下層の東西風がやや強化される．結果として，間接循環の存在は，全角運動量を増大させる．また，間接循環が解像できない低解像度実験では，多重平衡解が出現しやすい結果が得られた．間接循環がないと，下層大気への角運動量輸送効率が下がり，初期に与えたスーパーローテーションの角運動量が大気中に残りやすい．それゆえ，初期値を静止状態にした実験よりも，高速の超回転が形成されたと推察される．このように，Gierasch-Rossow-Williamsメカニズムにおける極域間接循環は，雲層のスーパーローテーションを弱め，長期間安定な大気大循環の多重平衡状態を壊す方向に働くことを明らかにした（Yamamoto and Takahashi 2018, *Journal of Geophysical Research: Planets,* doi:10.1002/2017JE005385）

（2）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」と「数年スケールの帯状流年々変動」についてまとめた．U_{MAX} と V_{MAX} と dT_{MAX} の時系列データの散布点は，「雲層内の温度風方程式」と「雲層より上の流線関数の診断方程式」から得られる推定曲線の周辺にプロットされる．また，赤道ケルビンの強制が弱いと，その散布分布は線状になるが，強制が強いと，その散布分布は小さい点状になる．前者の分布は，高緯度ジェットの盛衰に伴う年々変動を反映して線上構造になる．後者は強制波の臨界高度吸収によって最大風速が拘束されるので，年々変動は小さく点状の構造になると考えられる．

数値実験の解析により，14 日周期の極域ロスビー波と高緯度ジェットの盛衰に伴うスーパーローテーションの年々変動プロセスを，新たに提案した（山本・高橋，日本流体力学会年会 2017; Yamamoto and Takahashi 2018, *Icarus,* **303,** 131-148）.

（３）Ikeda (2011)の放射コードを組み込んだ大気大循環モデルを用いて，地形が金星大気大循環構造に与える影響について調査した．雲頂付近では中緯度ジェットが形成され，赤道付近では 90 m s^{-1} 程度の東西風が形成される．中緯度ジェット極大より上層では，太陽放射と赤外放射の南北不均衡が見られ，極向き帯状平均子午面流が強い(>8 m s^{-1})．雲頂付近では，ジェットの低緯度側では 1－2 m s^{-1} 程度の極向き子午面流が見られる．ジェットの極大域では，潮汐波と傾圧波による渦熱輸送によって駆動する間接循環が形成される．Herrnstein & Dowling (2007)と異なり，地形に起因する東西風構造の南北非対称は小さいが，アフロディテ大陸やマクスウェル山がある緯度帯で自転と逆向きの弱いサブローテーションが地表付近で形成される．これらの山地や高地が角運動量の供給場所として重要であることが示唆される．

雲層より下ではおおむね中立層となるが，40 km 付近で弱い安定成層が形成される．また，地形を与えた実験では，高度 10－20 km あたりで弱い安定成層が形成されるが，地形を除いた実験では，この下層の安定成層は形成されない．このように，地形は下層大気の安定度にも影響を与える．

雲層では，4－8 日の短周期波動に加え，熱潮汐波と地形性定在波が見られる．地形固定座標系で 1 金星日平均した 69 km の東西風速は，アフロディテ大陸の直上で数 m s^{-1} ほど低下する．これは Bertaux et al. (2016)の結果と矛盾しない．このような定在波による赤道域の風速変化は Yamamoto & Takahashi (2009)でも見られる．温度分布に関しては，アフロディテ大陸の直上の雲頂気温が東西方向に急変するが，Fukuhara et al. (2017)で報告されている弓状の巨大重力波は形成されなかった（山本他, JpGU-AGU Joint Meeting 2017; 2017年度日本気象学会春季大会）.

今後の問題点：

厚い雲で覆われた惑星の大気大循環の力学の解明に関しては，熱強制に対する依存性の調査や無次元パラメーターを用いた循環構造の整理が必要である．また，金星中層大気 GCM でみられた赤道ケルビン波の南北風成分やそれに伴う熱輸送の力学を解明する必要がある．現実的な金星大気大循環モデルの開発では，高解像度化や惑星探査あかつきへの適用にむけた改良が必要になる．

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）
瀬藤聡（水産研究・教育機構中央水産研究所）
CURCHITSER Enrique（Rutgers University）

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領し、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 および OAKFOREST 上で構築、積算し、CCSR Ocean Component Model (COCO; Hasumi, 2006)上で計算された低次生態系モデルと相互比較する。本年度は、領域海洋モデル ROMS の改良を行い、多くの回遊性魚種において重要となる黒潮流路の再現性について検証および改良を行った。

研究成果

コミュニティーモデルでもある領域海洋モデル ROMS を北西太平洋用に設定してきたが、地形データ etopo2 において日本海溝に未定義値が含まれており、また親潮の南下が過大評価されることから、5500m よりも深い地形はすべて 5500m と仮定しなおして計算を実行した。また、モデル領域の南端付近に微小に含まれる赤

道付近において不安定擾乱が多く発生し、内部領域の流速場に影響を与えるため、赤道域での粘性係数を大きくし、不安定擾乱の発生を強制的に抑制した。この結果、内部領域における流速場は安定した。

海洋循環モデルの計算を近年まで延長するため、側方境界条件と大気外力の変更を実施した。具体的には、SODA (Simple Ocean Data Assimilation) ver.2.1.6 の計算結果を側方境界条件に、CORE2 (Coordinated Ocean-ice Reference Experiments)を海表面境界条件とした 1958 年から 2008 年までの数値実験設定から、SODA (Simple Ocean Data Assimilation) ver.3.3.1 の計算結果を側方境界条件に、CORE2, MERRA, JRA-55 を海表面境界条件とした 1980 年から 2015 年までの数値実験設定を加えて計算を実施した。この計算において、黒潮流量が台湾東方において、東シナ海へ流入せず、太平洋側に流路を取る現象が頻発することが確認された。モデル内での流速場を調べた結果、東シナ海へ流入する地点と側方境界との水平距離が 200 ㎞程度であり、中規模渦が発生した場合に流路が偏向され、太平洋側の流路を取ることがわかった。これは、側方境界における水温、塩分、東西流速、南北流速の緩和領域が 20 格子（約 140 ㎞）に設定されているため、実質的に流速場が境界条件で束縛されている水平スケールが 70 ㎞以下になっており、黒潮の東シナ海への流入口と境界との間に、中規模渦などが発生しやすい状況になっているためだと推測された。このため、モデル領域南東側側方境界における緩和領域を 100 格子に変更した数値実験を短期間だが実施し、黒潮が東シナ海に流入しやすくなったことを確認した。

一方、水産研究・教育機構が開発した北西太平洋海洋循環モデル FRA-ROMS に海洋低次栄養段階生態系モデル eNEMURO を結合させたモデルを用いた将来予測実験を実施し、将来の餌料環境を含む海洋環境予測結果を得た。これらの予測環境条件を用いてオフラインで小型浮魚類成長－回遊モデル eNEMURO.FISH を駆動したところ、水温バイアスと餌料密度バイアスの影響でモデル内でのサンマの成長が著しく低下することが判明した。水温バイアスを補正することで現実的なサンマの成長が得られるようになることも確認できた。さらに、サンマの尾数変動も陽に表現できるよう population dynamics を結合させた。これにより資源（生物量）変動も表現することができるようになった。

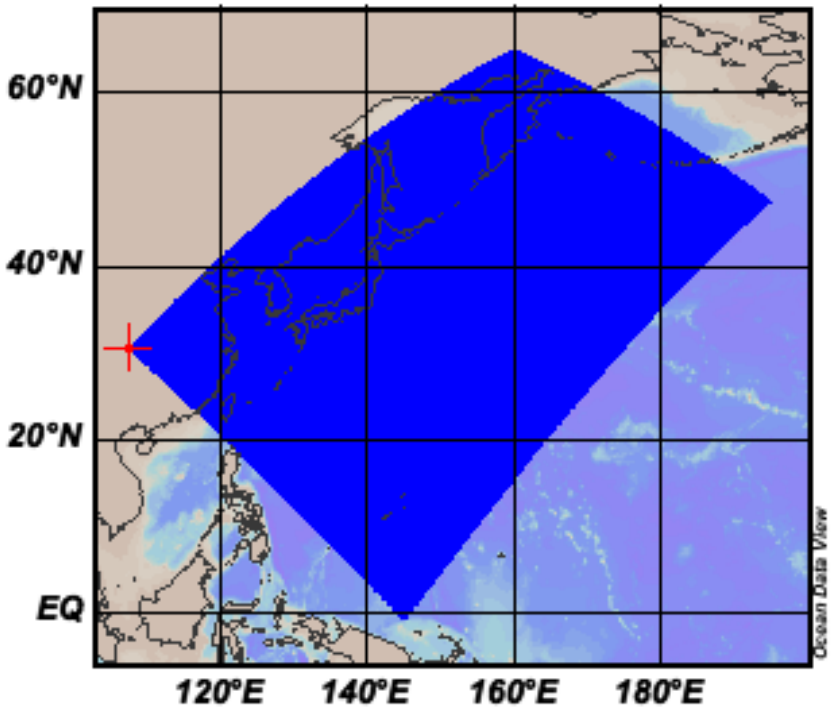


図 1. 領域モデル ROMS 北西太平洋版のモデル領域（青色）

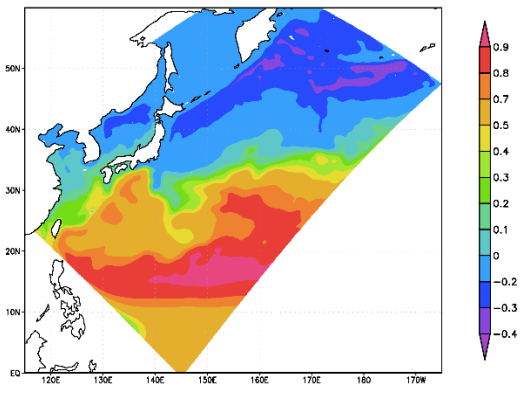


図 2. CORE2 を大気境界条件に用いた場合の海面高度分布（全期間平均）

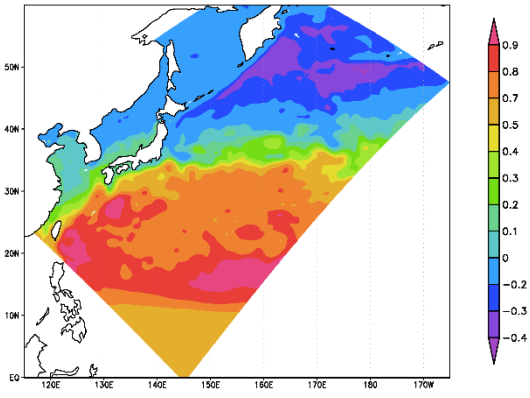


図 3. JRA55 を大気境界条件に用いた場合の海面高度分布（全期間平均）

今後の問題点

側方境界条件の緩和領域を拡大することで黒潮の東シナ海での流路は現実的になりつつあるが、黒潮続流域では親潮の差し込みが強すぎて、蛇行が大きくなっている。親潮側の粘性係数などを調整し、現実的な海洋構造の上で、NEMURO.FISH を結合させ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 Co mput ational 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. Zvalinsy (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.

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）[1]

末松　環[1]

王　家瑞[1]

松岸 修平[1]

神野 拓哉[1]

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

熱帯大気研究にとって気候モデル MIROC や全球雲解像モデル NICAM は欠くべからざる道具である。MIROC や NICAM の大気モデルの構成は、格子スケールの流れを記述する力学コアと格子内スケールの物理現象を記述する物理過程の 2 つの部分に大別することができる。力学コア部分には、MIROC は球面調和関数を用いたスペクトル法を、NICAM は正 20 面体格子を用いた有限体積法を採用しているが、スペクトル法は大規模並列計算機での計算効率に問題があり、一方で、NICAM の採用する予報変数の A-grid 配置は大気重力波の分散関係の表現に大きな問題があることが知られている。そのため、より信頼度の高いシミュレーションを可能にするべく正 20 面体格子を想定した平面 6 角形格子で変数の B-grid 配置について研究を行った。

研究内容

平面 6 角形格子を用いた B-grid 配置についての過去研究としては、Ringler and Randall (2002)の ZM-grid スキームがある。しかしながら、平面 6 角形格子では質量定義点の数にくらべて速度定義点の数が 2 倍あり、そのことが原因となって速度場に計算モードが存在する問題があった。ZM-grid スキームを正 20 面体格子に適用した研究例は無いが、モデルを構築してみると超粘性項を付加しない場合には計

算モードを構成する偽の流れにより赤道付近から質量が流失してしまうという問題が起こり、超粘性項を付加しても偽の慣性振動が卓越してしまうという問題が残った。本研究では、図 1 に示す B1-grid 配置と B2-grid 配置の浅水モデルの質量の時間変化を完全同期することで、同期 B-grid (SB-grid)スキームと呼ぶ新しい B-grid スキームを提案した。変数配置は ZM-grid スキームと同じであるが、速度の時間発展方程式の非線形項の表現に違いがある。ZM-grid スキームでは非線形項を通じて B1-grid モデルと B2-grid モデルの速度場が相互作用し、その結果として速度場の計算モードの存在が解に含まれてしまっていたが、SB-grid スキームでは非線形項が B1-grid モデルでは B1-grid の速度場のみ、B2-grid モデルでは B2-grid の速度場のみで構成されているため、計算モードの原因となる相互作用の効果が含まれていない。このことにより、SB-grid モデルでは計算モードを除去することができる。

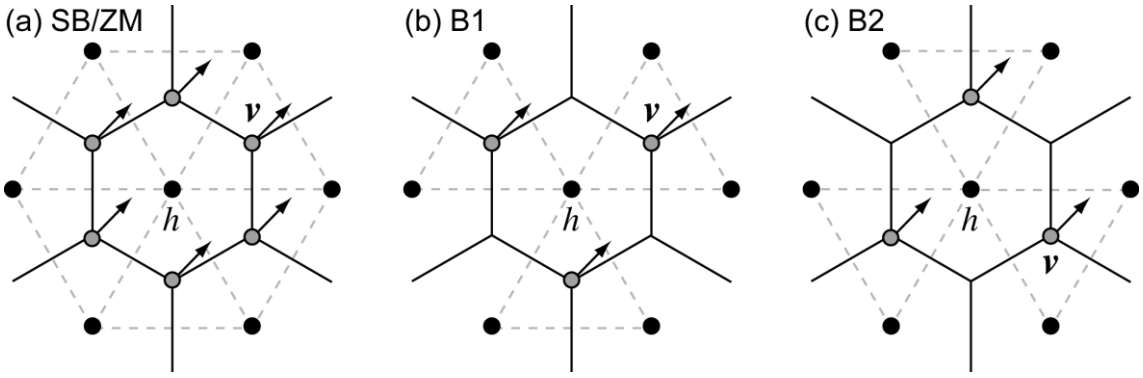


図 1： 6 角形格子の変数配置。(a) SB-grid と ZM-grid、(b) B1-grid、(c) B2-grid。

研究成果

平面 6 角形格子上に浅水モデルを構築し、数値実験を行った。方程式は無次元化し、重力加速度を 1.0、コリオリパラメーターを 1.0、格子間隔を 2.0、時間刻みを 0.2、特徴的な深さスケールとして 1.0 に設定した。図 2 には、中心付近に微少な強制を与えたときの中心 6 角形での深さ、領域積分したエンストロフィーの初期値からのずれを規格化したもの、中心 6 角形の右上角における速度、のそれぞれの時間変化を示している。Z-grid スキームを用いた参照解と、SB-grid スキーム、ZM-grid スキーム、および、A-grid スキームを比較している。この図から、A-grid スキームでは散逸過程が適切に表現できないこと、ZM-grid スキームでは時間とともに速度

場に計算モードが卓越し始めること、SB-grid スキームはエンストロフィーの保存では Z-grid スキームに及ばないものの、深さと速度の時間変化については参照解と同等の結果を得ることができることが分かる。

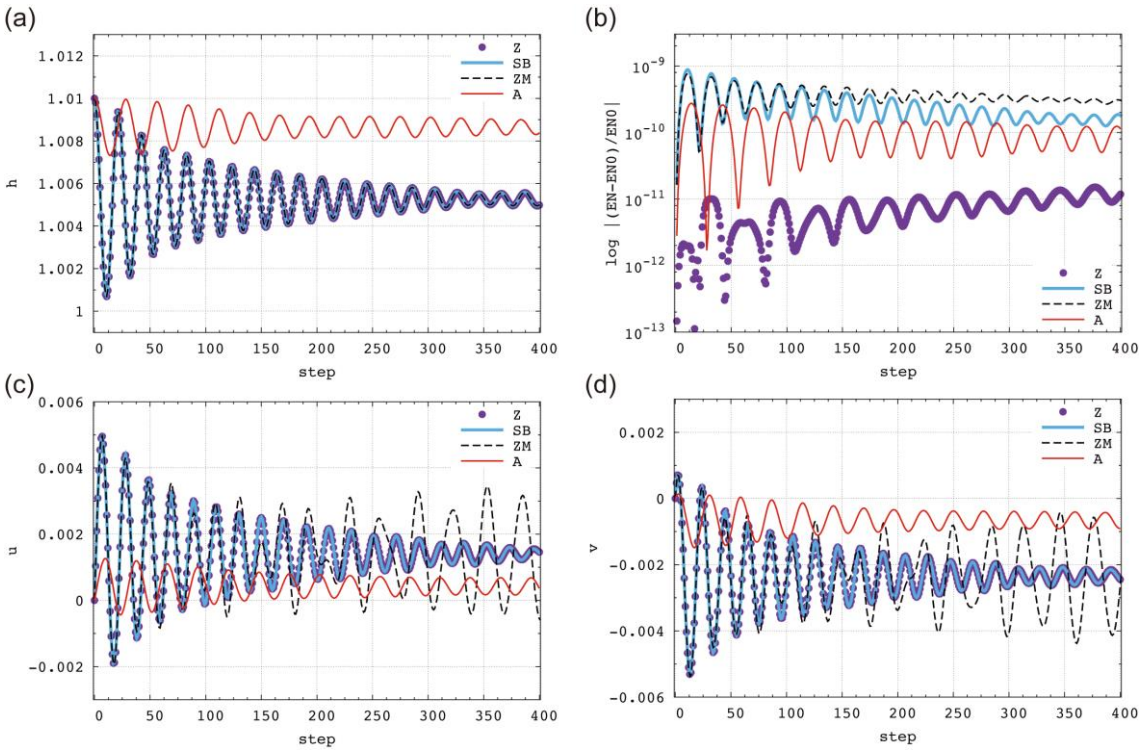


図 2：(a) 強制を与えた中心 6 角形での深さ、(b) 領域積分したエンストロフィーの初期値からのずれを初期値で規格化したもの、(c) 中心 6 角形の右上角の速度の x 成分、(d) 中心 6 角形の右上角の速度の y 成分、の時間変化。

今後の問題点

平面 6 角形では大きな問題なく期待通りの性能が示されたが、次の段階として正 20 面体格子でのテストが必要となる。本報告書執筆時において、既に正 20 面体格子上での動作を確認しているが、傾き演算子の精度改善が必要であったほか、非線形項が十分小さくなく地衡流バランスが支配的でない場合には速度場についても同期が必要であった。これらの結果を論文にまとめるとともに、さらなる拡張として 3 次元大気モデルでのテストが考えられる。

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 30 年 3 月 28 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のかについて、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 29 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のかについて、地表面状態の変化に着目し、調査する。平成 29 年度は、大規模なアンサンブルデータセット(d4pdf)などを利用し、海面水温の強制によりアジアモンスーン域の大気水循環の年々変動がどの程度説明可能かを定量的に評価する。また、大気水循環を知る上で重要と考えられる気候モデル内部での降水量と水蒸気量の関係について、調査する。

・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を大規模なアンサンブルデータセットを用いて評価した。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(d4pdf)では、海面水温の影響により説

明できる降水量の年々変動は、限られた地域のみで確認できた。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言うのが、現時点での結論である。この研究結果については、平成 29 年度に投稿したが、査読結果が思わしくなかったため、現在再投稿の準備中である。出版になり次第、すぐに公表する。

また、降水量と水蒸気変動の関係については、全球気候モデルの全球平均水蒸気量は、総じて乾燥傾向があり、特に熱帯海洋域で顕著である。さらに、降水発生時の水蒸気量が低く、観測よりも低い水蒸気量で降水が発生している（気候モデルの大気が観測と同等の水蒸気量を保持できない）可能性がある。この結果については、現在、論文改訂中のため、出版後すぐに公表する。

・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、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。また、大規模なアンサンブルデータを用いると、気候モデルの結果を、シグナルとノイズに分離できるなど、新しい統計的な解析が可能になる一方で、気候モデルのバイアスがより顕在化になる。そのため、得られた結果の気候モデル依存性がより高くなる可能性がある。今後はこの問題についても検討する。最後に降水量と水蒸気変動の関係から、気候モデルの降水特性の問題点が分かりつつあるので、気候モデルの高度化につなげたいと考えている。

非静力学海洋モデルの汎用化と OGCM とのシームレスな接続

松村義正[1] 大橋良彦[2] 羽角博康[1]
[1]東京大学大気海洋研究所 [2]北海道大学低温科学研究所

研究目的

近年の著しい計算機資源の発展により，特に沿岸域を対象とした現実設定での超高解像度海洋数値シミュレーションが可能となりつつある．しかしながら，既往の研究で用いられてきた海洋大循環モデル(ocean general circulation model, OGCM)は，より大規模な現象を対象として開発されてきたため，静力学平衡を仮定しており，水平と鉛直のアスペクト比が 1 に近づくような微小スケールプロセスを直接扱うことができない．他方，静力学平衡を仮定しない非静力学モデルは，その計算負荷などからこれまで狭い領域・短い時間スケールを対象とした理想化実験に利用されるにとどまっており，現実的設定での大規模シミュレーションは実施されてこなかった．本課題では，大気海洋研究所において筆者らが開発している海洋非静力学モデル kinaco を高度化し，現実設定での高解像度非静力学海洋シミュレーションの実現を目指す．

研究内容

1) Generalized length scale 乱流クロージャーモデルの実装

OGCM においては，特に海面における混合層形成や栄養塩の湧昇に重要となる鉛直乱流混合過程を直接解像することができず，何らかのパラメタリゼーションにより鉛直渦拡散係数・渦粘性係数を診断して用いることで乱流混合を表現している．他方，非静力学モデルにおいては，解像度が十分に高ければ Smagorinsky モデル等の large eddy simulation (LES)の発想に基づくサブグリッドスケールモデルにより陽に乱流混合過程が実現される．このため kinaco ではこれまで特に鉛直混合パラメタリゼーションを導入してこなかった．しかしながら現在利用可能な計算機資源を最大限に用いたとしても,LES が成立する解像度にて現実設定で沿岸～大陸斜面域(数 100km スケール)をカバーしつつ数ヶ月以上のシミュレーションを実施することは現実的でない．そこで沿岸～大陸斜面スケール・数 100 m 程度の格子解像度での現実設定シミュレーションに用いることを想定し，kinaco に Generalized Length Scale 乱流クロージャーモデル (Umlauf and Burchard, 2003; 以下 GLS モデル)を実装した．

GLS モデルは大気･海洋大循環モデルで広く用いられている乱流クロージャーモデルである Mellor and Yamada Level 2.5 (Mellor and Yamada, 1974)や k-ε モデル(Rodi, 1987)を一般化したものとして表現され，サブグリッドスケールの乱流運動エネルギー k と，一般化乱流長さスケール ϕ （詳細は割愛）の 2 変数を予報することにより高次の

乱流統計量を近似し，鉛直渦粘性係数/渦拡散係数を診断する．経験的なパラメタが少なく，境界近傍での壁関数も不要という利点があるため，近年多くの海洋モデルで採用された実績があり，kinaco でもこれを導入した．ただし，OGCM における乱流混合パラメタリゼーションの実装においては，しばしば(GLS モデルに限らず一般に)本来 3 次元の移流拡散方程式によって扱うべき予報変数(GLS モデルにおいては k 及び ϕ)を，水平格子毎の鉛直一次元問題として扱っている．このような近位は，水平格子幅が十分に大きく，格子をまたぐ水平移流の時間スケールに対し，乱流運動エネルギーの生成から散逸までの時間スケールが十分短いとみなせる場合には正当であるが，本課題で実現を目指す O(100) m 以下の水平解像度においては成立しない可能性がある．そこで kinaco における GLS スキームの実装においては，k, ϕ ともに温位・塩分といったトレーサーと同様の 3 次元移流拡散方程式に従うとした．これにより，例えば河口近傍での強いシアにより生成された乱流運動エネルギーが，河川水駆動の循環により流下方向に移流されて散逸することで，より遠方で乱流混合を励起する過程が表現可能となった．なお，乱流クロージャーモデルにて診断される鉛直渦拡散係数・渦粘性係数はしばしば極めて大きな値となるので，時間刻み幅を制約する陽解法は適さず，陰解法を用いる必要がある．kinaco では鉛直方向にも並列化を実施しているため，陰解法による鉛直粘性・拡散は待機と通信が発生するため実効性能の悪化が懸念されたが，東京大学情報基盤センターOFP 上で実測したところ，全体のパフォーマンスに与える影響は軽微であった．

また，この GLS モデルの独自の拡張として，昨年度までに開発した浮遊堆積物を陽に扱う粒子追跡モデルと結合し，沈降する浮遊堆積物が開放する位置エネルギーを各格子内での乱流運動エネルギーのソース項として加えることで，粒子の沈降を鉛直混合にフィードバックする手法を新たに提唱しテストしている．予備的実験においては日本の河川規模の浮遊堆積物含有量では著しい差は生じなかった(図 1)が，例えばハイパーピクナル流が実現されるような膨大な浮遊堆積物が存在する状況では，粒子の沈降自体が混合を励起するエネルギー源になる可能性があるため，今後はより大規模な河川の出水を想定した数値実験に取り組む予定である．

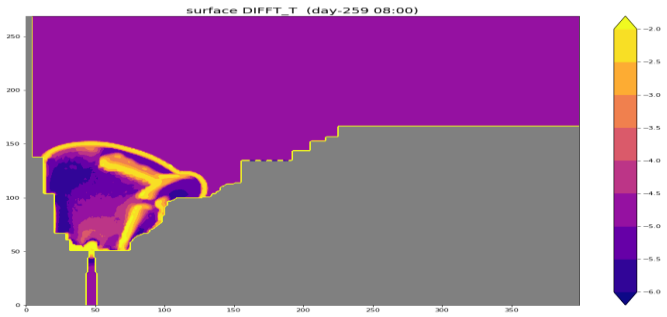


図 1: 出水時における由良川河口域での数値実験(設定は Hoshiba et al.と同一)において，GLS モ

デルで診断された鉛直拡散係数．河口直近及び河川プルーム先端で 10^{-2} m^2/s を超える．

２） 三陸沿岸を対象とする非静力学ダウンスケールモデルの構築

東北マリンサイエンス事業と連携し，1)で述べた現実設定での高解像度非静力学海洋シミュレーションの対象として三陸沿岸域のダウンスケールモデルの構築に取り組んでいる．今年度はまず第一段階として，141°-143° E, 38°-40.5° N の領域を対象に水平解格子幅 12 秒（およそ 300 m），鉛直 39 層の解像度で予備的ランを実施した．海底地形・海陸境界は JTOPO-30 (日本水路協会)を線形補完して作成した．まず全領域の温位・塩分を海洋研究開発機構より提供いただいた FOR A 1/50 度 再解析値の 2013 年 9 月平均値に緩和するスピンアップを実施した後，同 FORA 再解析の流速（hourly）及び温位・塩分（3-hourly）を側面境界条件として与えて 2013 年 9 月を対象に 30 日間の積分を実施したところ, 概ね良好な結果が得られた(図 2)．

今後は長期の実験を実施しつつ，大槌湾近傍を対象とするより高解像度のダウンスケールモデルを構築を目指す．ただしモデル地形に関しては現状ではいくつかの湾が閉じているなど不備があるため，国土地理院による高解像度海岸線データ等を参照し地形データを精緻化する必要がある．

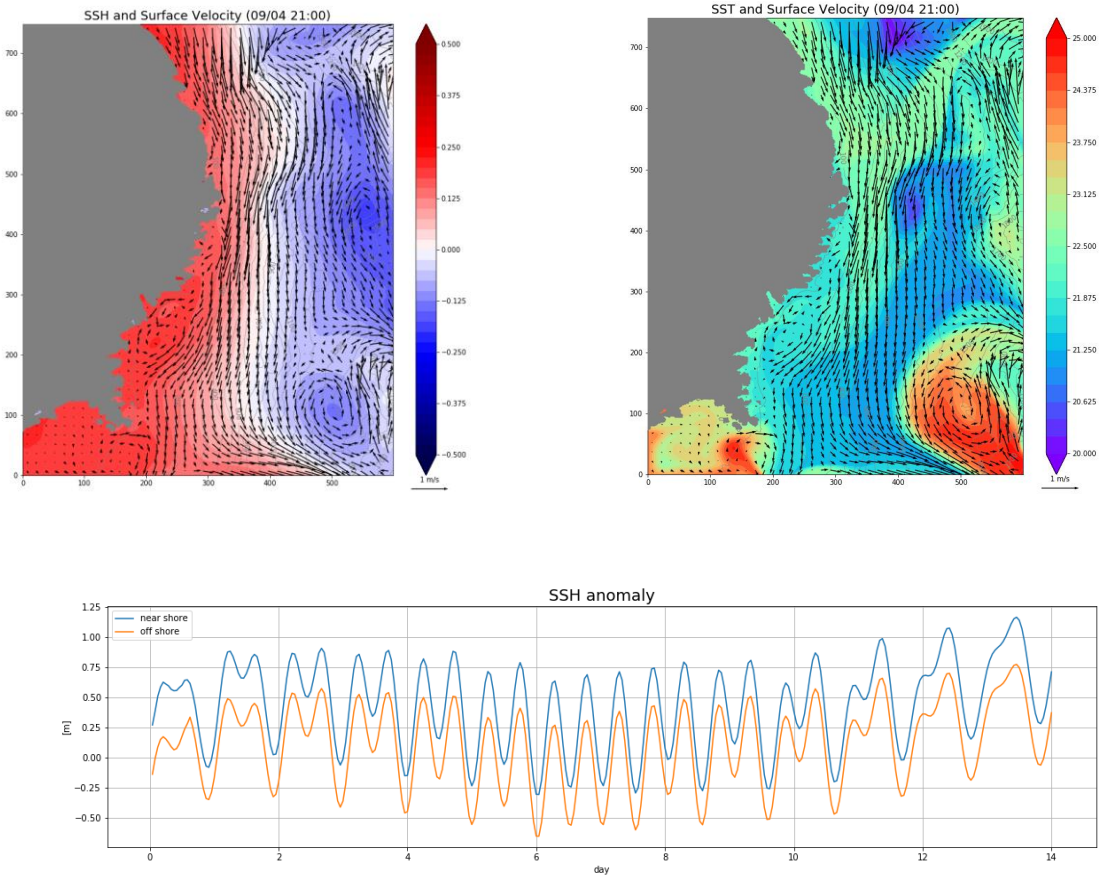


図 2 上段）9/3 21:00 における海面高度偏差（左）および海面水温(右)，ベクトルは表層流速．下段）領域中央および沿岸浅海域での潮位変動．概ね現実的な場と時間変動が再現できている．

3) グリーンランド北西フィヨルド域での氷河融解水の追跡

グリーンランド氷床の融解が近年加速していることが報告されているが，海洋に流出する氷河融解水の挙動は氷河前縁フィヨルドの循環・物質輸送・生物生産に重要な影響を及ぼすと考えられている。北極域研究推進プロジェクト (ArCS)において現場直接観測が実施されているグリーンランド北西ボードウィンフィヨルド近傍海域を対象に，氷河融解水の挙動を明らかにすべく数値モデリング研究を実施している．氷河末端の接地面が海洋中に存在する場合，接地面に存在する水路から海洋に流出する氷河融解水は海水との密度差により急激に浮力を得て上昇し湧昇プルームを形成するため，その陽なシミュレーションには非静力学モデルが必要とされる．昨年度は単一のフィヨルド内部を対象に数値実験を実施したが，本年度は領域を拡大し，複数のフィヨルドが連結する湾(70° -65.5° W, 77.1° -77.8° N)を対象として，現実地形で水格子幅平 50 m の高解像度実験を実施した．各フィヨルド上流の氷河毎に異なる融解水トレーサーを導入し，それぞれの湾内循環への寄与を調べた(図 3). 海面濁度の衛星観測画像と対応する結果が得られており，今後は氷河融解量の経年変動による影響等をより詳細に解析していく予定である．

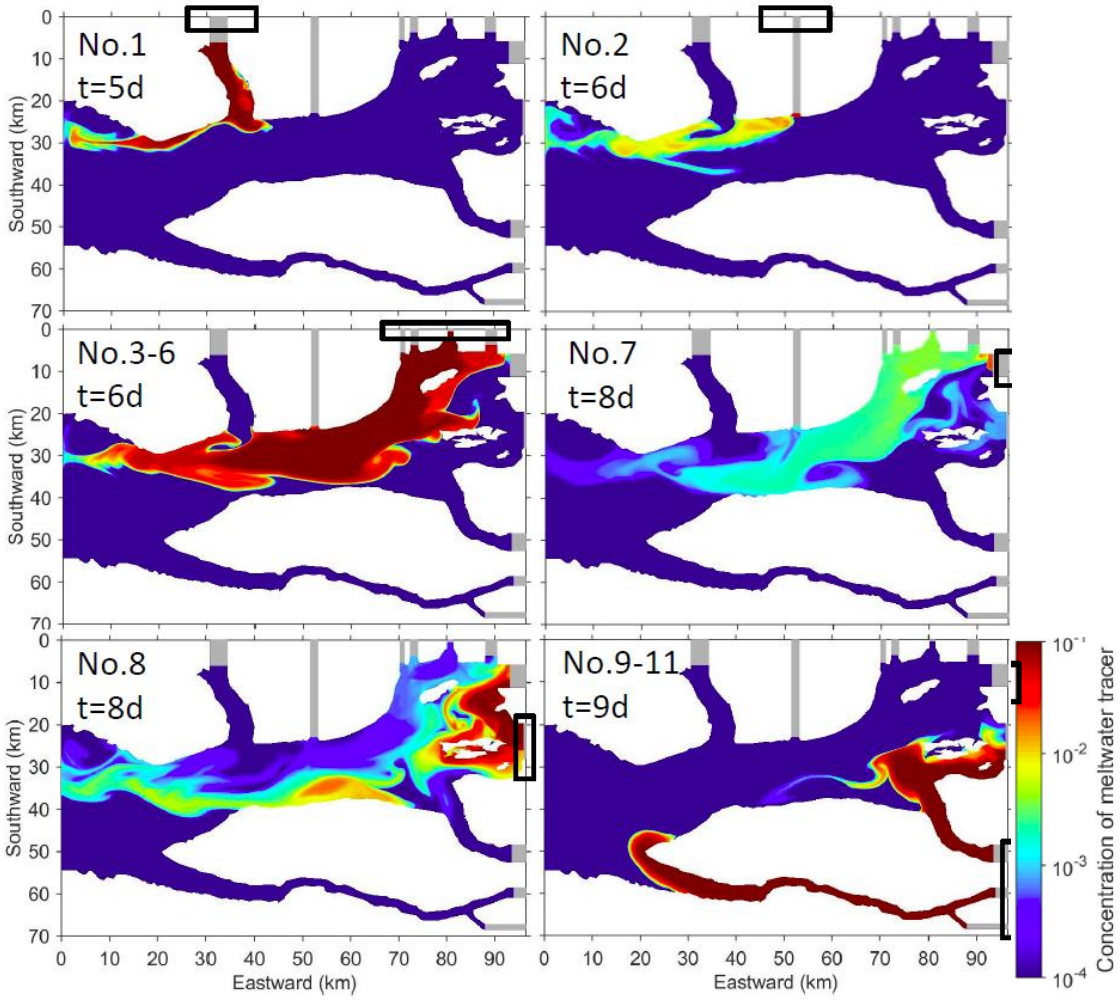


図 3: 積分開始 5 日後の各融解水トレーサーの分布（海氷面濃度）.

研究課題名

海洋大循環モデルを用いた植物プランクトン多様性の研究（一般共同研究）

共同研究者名

山中康裕　北海道大学地球環境科学研究院　教授
増田良帆　北海道大学地球環境科学研究院　博士研究員

研究目的

現在、海洋大循環モデルと結合した植物プランクトン多様性モデルを構築しているのは世界でもMITグループ（Follows et al., 2007）と北大(Masuda et al., 2017)の2グループしか存在しない。CREST プロジェクト「植物プランクトン群集の多様性に注目したナウキャスト技術開発」（研究代表者　山中康裕）で開発されたモデルをベースに新たな植物プランクトンモデルを構築し、植物プランクトン多様性の形成要因を解明する研究を行う。将来的には開発したモデルを用いて温暖化実験を行い、気候変動に対する海洋生態系の応答、炭素循環・物質循環の変化に関する新たな知見を得ることを目指している。

研究内容

本研究で開発しているモデルは一連の研究 Pahlow and Oschlies (2013)、Pahlow et al. (2013)、Smith et al. (2015)で提唱された理論モデル、FlexPFT（Flexible phytoplankton functional type）モデルをベースに構築されている。このモデルは、植物プランクトンのサイズ多様性を表現出来る、植物プランクトンの順化（馴化）過程を表現出来るという2つの大きな特徴がある。順化とは周囲の環境変化に対して生物個体が順応する過程であり、植物プランクトンの場合、体内の炭素・窒素・クロロフィル比が順化によって変化する。この順化が何故重要かというと、クロロフィル量の増加は光合成速度の増加・植物プランクトンの成長速度の増加を導くので、結果的に光合成によって吸収される二酸化炭素量の増加・一次生産の増加を意味するからである。我々グループはどちらかというとサイズ多様性の表現に重きを置いて FlexPFT を導入した訳だが、FlexPFT で提案された新たな順化スキームがクロロフィル鉛直分布の再現性を劇的に改善するという事が本年度に明らかになった。

海洋大循環モデルと結合した海洋物質循環モデルでは、順化に関して2つのタイプのモデルが従来用いられてきた。一つは順化を考慮しないモデルであり、もう一つは Geider et al. (1998)に基づく順化を採用したモデルである。前者は NPZD モデル（物質循環モデルとしては最も単純なモデル）や日本で開発されてきたモデル(NEMURO, MEM)で用いられており、後者は世界中の主な PFT モデル（数種の植物プランクトングループを設けるモデル）で用いられている。順化の無いモデルでは、植

物プランクトンの炭素濃度、窒素濃度、クロロフィル濃度の比（以下 C:N:chl）は固定されている。Geider のモデルは経験式であり、移流・拡散方程式を解く必要のある 3 つの予報変数（C、N、chl）を必要とする。つまり順化の無いモデルに比べると、植物プランクトンに関する計算量が約 3 倍になる。これは大きなデメリットであり、Geider の順化を採用しているモデルでも C:N あるいは C:chl のどちらかを固定比としているモデルの方が多数派である。ところが、FlexPFT は C:N:chl の可変性を表すのに 1 つの予報変数しか必要としない。これは植物プランクトンの環境変化に対する応答が瞬時に行われるという仮定が置かれているからである。この仮定は Ward（2017）によって単純な環境下での検証が行われており、その妥当性が確かめられている。FlexPFT では環境条件（光・温度・栄養塩濃度）によって C:N:chl は一意に決まる。N を予報変数として計算しておけば、C や chl も環境に応じて自動的に決まる訳である。

FlexPFT はリソースの最適分配に基づく理論モデルである。このモデルはある極限において、経験式として良く知られている Droop のセルクォータモデル(Droop, 1968)と一致することが証明されている。リソースの分配・最適化は以下に示す 3 レベルで行われる。

1. 葉緑体中の葉緑素濃度の決定。
   葉緑素形成による光合成量増加のメリット、葉緑素形成による呼吸量増加のデメリットのバランスで決まる。光環境のみに依存。
2. 細胞内のリソースは構造体(DNA や細胞膜等)の形成、栄養塩の獲得、葉緑素の形成の 3 つに割り当てられる。構造体の割合は不変だが、栄養塩獲得と葉緑素形成に割り振る割合は光・栄養塩環境によって変化する（図 1）。
3. 栄養塩獲得に割り当てたリソースは更に外部環境から細胞内への栄養塩輸送と酵素形成の 2 つに割り当てられる。栄養塩環境のみに依存。

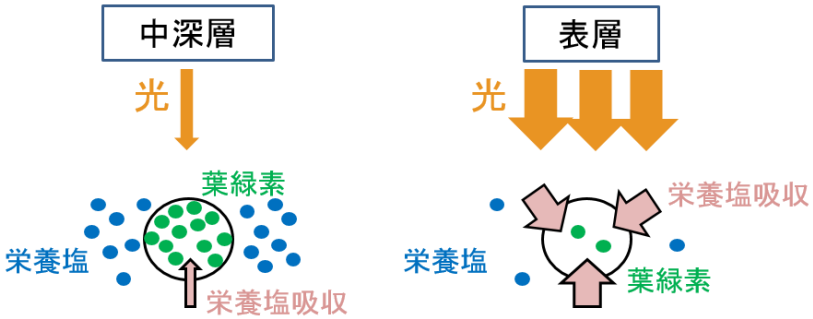


図 1 栄養塩獲得、葉緑素形成へのリソース配分

開発した植物プランクトンモデルは窒素循環と鉄循環を計算している。結合した物理モデルは水平解像度 1 度×0.5 度の MRI.com である。植物プランクトン 12 種、動物プランクトン 12 種モデルについて、計算開始から 2 年目の結果を以下に示す。海洋

表層のクロロフィル濃度分布は観測を良く再現しており、亜熱帯と亜寒帯の差、外洋と沿岸の差が良く再現されている(図 2)。160E を横切る鉛直断面におけるクロロフィル濃度分布を図 3 に示す。観測では明確な亜表層クロロフィル極大が確認されており、亜熱帯では 100 m 以深に存在する。緯度が高くなるにつれて亜表層クロロフィル極大の深度は浅くなり、亜寒帯では深度 40 m 近辺に存在する。我々のモデルはこの緯度による亜表層クロロフィル極大深度の変化を良く再現している。また、クロロフィル濃度が高い場所が狭い深度範囲に集中している点も再現されている。我々のグループが従来用いてきた MEM では全体的にクロロフィルが観測よりも浅い深度に分布しており、亜表層クロロフィル極大の再現性は低い。これはパラメータ調整で改善出来るものでは無く、順化の無いモデルが植物プランクトンの C:chl を固定比としている為に生じる問題だと考えられる。Geider の順化を採用したモデルの結果についても確認してみた所、亜表層クロロフィル極大の構造自体は存在していたものの、その緯度による変化は再現されていなかった(インターネット公開の為、図無し)。

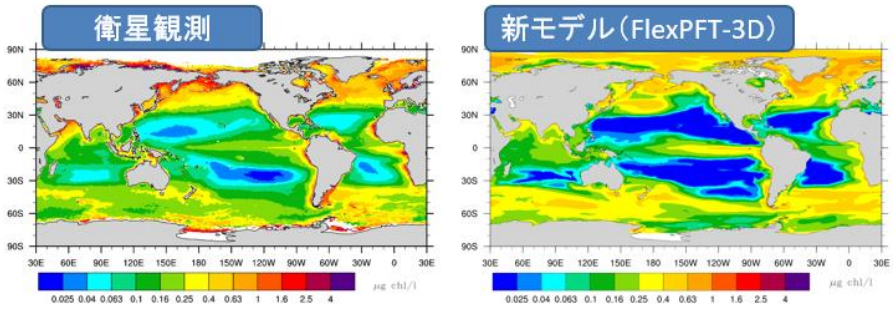


図 2 海洋面クロロフィル濃度

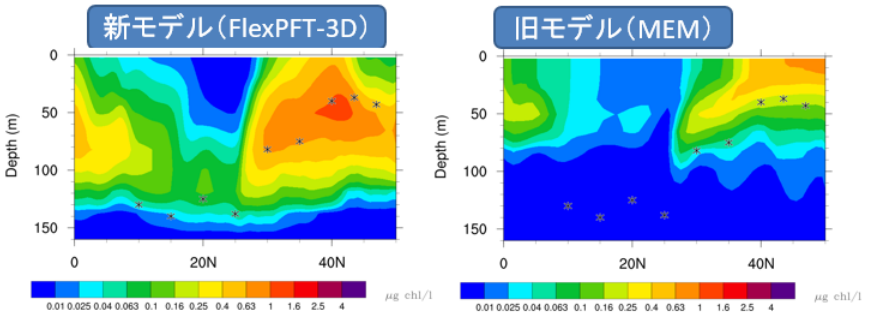


図 3 160E 鉛直断面におけるクロロフィル濃度分布、'*'は観測によるクロロフィル亜表層極大深度を示す(Sugie and Suzuki, 2016)。

植物プランクトンサイズ分布の再現性について最後に述べる。ピコ、ナノ、マイクロプランクトンの海表面での占有率を計算し、衛星から見積もられた占有率と比較した所、良い一致が見られた。(インターネット公開の為、図なし)。亜熱帯ではピコプランクトンの占有率が 70%を超える。中緯度ではピコ、ナノ、マイクロプランクトンが比較的似た占

有率で共存していた。マイクロプランクトンの占有率が 35%を越える様な場所は亜寒帯の沿岸部等の限られた海域のみであった。

研究成果

Yoshio Masuda、 Yasuhiro Yamanaka、 Next generation phytoplankton model - introduction of acclimation and size diversity、 Mini workshop to discuss plankton ecosystem model equations（国内ワークショップ）、 横浜、 2017 年 8 月 8 日。
増田良帆、 山中康裕、 次世代の植物プランクトンモデル －サイズ多様性と順化過程の表現、 日本海洋学会 2017 年度秋季大会、 仙台、 2017 年 10 月 15 日。

今後の問題点

植物プランクトン多様性モデルを作成していたら、物質循環モデルとしても従来のモデルより遥かに再現性が高く、かつ理論上の計算量も少ないモデルが出来たというのが今年度の成果である。理論計算量の少なさを最大限に生かすために、本稿で紹介した植物プランクトン 12 サイズモデルに加えて、植物プランクトン 1 サイズモデルを構築中であり、同様にクロロフィルの海表面及び鉛直分布の高い再現性を持つことが確認されている。このモデルは移流・拡散を計算する必要のある予報変数の数が 7(Phy, Zoo, NO_3, NH_4, DON, FeD, FeP)であり、NPZD+鉄モデルと大差ない。よって、計算負荷もこれらのモデルとほぼ同等である。低い計算負荷は特に高解像度モデルに有用な性質であるが、現在は開発者兼ユーザーが一人しかいないという状況であり、とても手が回らない状況である。本年度に開発したモデルは多様性・生態系モデルとしても、物質循環モデルとしても非常に大きなポテンシャルを持っており、モデルの開発・データ解析に関する研究協力者を増やしていくのが大きな課題である。

参考文献:

Droop, M. R., 1968, Vitamin B12 and marine ecology. IV. The kinetics of uptake, growth and inhibition in Monochrysis lutheri, Journal of Marine Biological Association of the United Kingdom, 48, 689-773.

Follows, M. J., S. Dutkiewicz, S. Grant, S. W. Chisholm, 2007, Emergent biogeography of microbial communities in a model ocean, Science, 315, 1843-1846.

Geider, R. J., H. L. MacIntyre, T. M. Kana, 1998, A dynamic regulatory model of phytoplanktonic acclimation to light, nutrients, and temperature, Limnology and Oceanography, 43, 679-694.

Masuda, Y., Y. Yamanaka, T. Hirata, H. Nakano, 2017, Competition and community assemblage dynamics within a phytoplankton functional group: Simulation using an eddy-resolving model to disentangle deterministic and random effects, Ecological Modelling, 343, 1-14.

Pahlow, M., A. Oschlies, 2013, Optimal allocation backs Droop's cell-quota model, Marine Ecology Progress Series, 473, 1-5, doi:10.3354/meps10181.

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

Smith, S. L., M. Pahlow, A. Merico, E. Acevedo-trajes, Y. Sasai, C. yoshikawa, K. Sasaoka, T. Fujiki, K. Matsumoto, M. C. Honda, 2015, Flexible phytoplankton functional type (FlexPFT) model: size-scaling of traits and optimal growth. Journal of Plankton Research, doi:10.1093/plankt/fbv038.

Sugie, K., K. Suzuki, 2016, Characterization of the synoptic-scale diversity, biogeography, and size distribution of diatoms in the North Pacific. Limnology and Oceanography, doi:10.1002/lno.10473.

Ward, B. A., 2017, Assessing an efficient "Instant Acclimation" approximation of dynamic phytoplankton stoichiometry, Journal of Phytoplankton Research, 39, 803-814.

1. 研究課題

全球雲解像モデルデータを用いた熱帯雲活動の解析

福岡大学　准教授　西　憲敬

2. 研究目的

中部太平洋域の熱帯収束帯において、東西数千 km におよぶ雲帯がほぼ同時に南北に分割する現象を見いだしてその解析を行っている(Hamada et al., 2013, JMSJ pp 2035-)。この現象は衛星画像の動画を目視で観察すると比較的容易に見いだすことができる。その形態は明瞭だが、客観解析においては再現性がよくなく、それにともなう力学場はうまくとらえることができない。全球雲解像モデル NICAM の出力において類似の現象が検出されていることがわかっており、これまで行われた実験結果のアーカイブを解析すれば、多数の現象発生を取り出すことができることが期待できる。モデル出力の風や気圧などの力学場を雲活動と合わせ解析することができれば、現実大気観測ではできなかった、現象発生のメカニズムを探求できると期待される。主に力学的不安定現象を念頭において、モデル出力の解析を行うことを目的とする。

3. 研究内容

全球雲解像モデル(NICAM)の数値実験出力を用いて、熱帯収束帯(ITCZ)内でみられる大規模雲域の南北分割現象についての解析をおこなう。分割現象を主観的な方法で見いだし、その中でどのような雲活動の変化および循環場の変化が起きているかを観察することによって、実際の大気で起きている現象の機構を説明するヒントを見いだす。

4. 研究成果

まず、3 ヶ月間の MJO 再現実験についての出力を解析した。現実大気で観測されるものに類似した現象が 1 ケース認められた(図 1)。ただし完全な複数の帯状構造への分割ではなく、北側の帯は何本かの南西から北東方向に延びる帯の集まりという形状であって、現実のものと全く同じではなかった。3 次元雲構造解析を行ったところ、南北に分離していく雲はほとんどが上部対流圏の巻雲であることがはっきりした。巻雲は基本的には南北風で移流しているようすであったが、雲のある部分には明瞭な上昇流が認められ、そのために巻雲が長く維持されているようであった。しかし、この上昇流の発生原因はまだはっきりしない。この事例においては、雲帯の分離が進んでいく経度には南北方向に発散する風の場があった(図 2)。南側の帯付近に残って

いる深い対流を伴う積雲クラスターからの発散流がその大部分を担っているように見えた。しかし、現実大気ではこのようなクラスターが認めがたい状況でも南北発散が認められている例が多数見受けられることから、今回出力が現実の分割をどれほど再現しているかについてさらなる検討が必要である。

解析例数をふやすために、さらに 3 種類の異なる空間解像度による別の数値実験の 1 年間の出力を調べた。解像度 14km の RUN について解析したが、ITCZ が現実にあるような南北に狭い東西の帯として認められなかったことから、分割現象を明瞭に取り出すことはできなかった。つづいて 7km 解像度の結果を解析した。この RUN では、ITCZ がより現実的な形状をしていたが、その中では円形に近いクラウドクラスターが高い頻度で発生し続けているようすであり、現実のように積乱雲の発生が止んで帯状の雲帯がきれいな形態で広がっていくようすはあまりみられず、分割というより、それぞれのクラスターのライフサイクルがよく見えるような結果であった。

5. 今後の問題点

主に解像度の違いによる積乱雲の表現の差によって ITCZ 内の雲システムの形状が大きく異なることがわかったので、さらに多くの異なる RUN について帯状雲域の形成とその変化について解析を行う必要がある。次には同じシリーズの 3.5km 解像度の RUN 結果を解析する予定である。また、帯状分割にこだわらずに、一般的なクラスターの時間変化、とくに巻雲形成過程について、NICAM データを使って調べていくことも意義深いと考えられる。

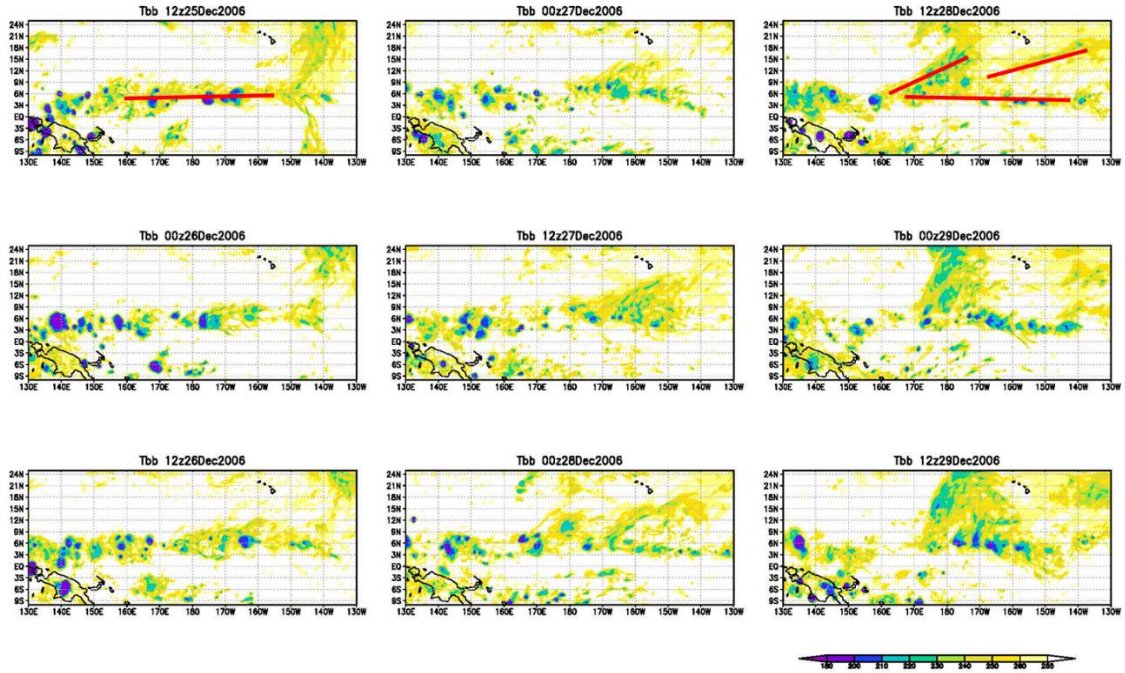


図 1: MJO 実験にみられた雲帯分割現象。外向き長波放射データから簡便な方法で計算された 12 時間ごとの等価黒体温度を示す。赤線は雲帯と認識されたもの。

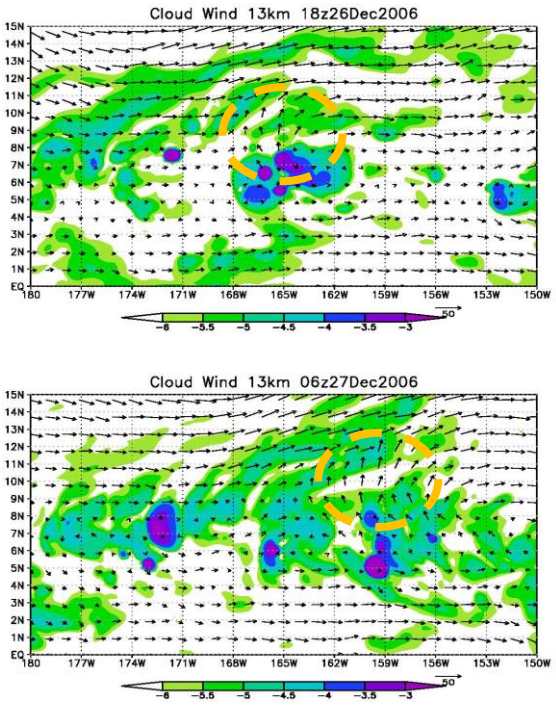


図 2: MJO 実験でみられた 12 時間ごとの雲と風の分布。色は鉛直積分された凝結物量の対数で、矢印は高度 13km における水平風。破線の円形は、南風の卓越領域を示している。

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

夏季北西太平洋域において季節内~経年変動の時間スケールで卓越する大気循環変動として太平洋-日本（PJ）パターンが知られている（Nitta 1987; Kosaka and Nakamura 2010）．PJ パターンは我が国に夏の異常気象をもたらす主要因の一つで，その発達は 2017 年 8 月の異常低温の主要因でもあった．PJ パターンはエルニーニョ・南方振動（ENSO）衰退後に発達しやすいことが知られている．ENSO は典型的には春～初夏に発達し始め，12 月に極大を迎え，翌夏を迎える前に赤道太平洋海面水温偏差は消失する．しかしその影響はインド洋に蓄積され，ENSO 衰退直後の夏に PJ パターンを励起することが示されている（Xie *et al.* 2016）．このインド洋蓄熱効果の季節的持続性は数十年規模で変調し，これに伴い ENSO と翌夏の PJ パターンの相関も数十年規模で変調することが知られている（Kubota *et al.* 2016）.

しかし，PJ パターンの励起源は ENSO だけではない．ENSO からの影響が長期変調する中で，PJ パターンそのものがどのように変調してきたかを明らかにし，その要因を調査することが本研究の目的である.

研究内容

JRA-55 再解析データ (Kobayashi *et al.* 2015)の気圧面データ及び海面気圧，CMAP 降水量 (Xie and Arkin 1997)，ERSST ver. 5 (Huang *et al.* 2017)，APHRODITE 降水量 (ver. 1101; Yatagai *et al.* 2012) 及び地表気温 (ver. 1204R1; Yasutomi *et al.* 2011) を用いた.

Kosaka and Nakamura (2010)は 1979-2007 年の夏季北西太平洋における 850hPa 渦度の経験直交関数（EOF）第 1 モード（EOF1）として PJ パターンを抽出した. 後で示すように, PJ パターンの卓越性は長期変調するため，EOF1 の構造は解析期間に依存する．ここでは 1975 年~1999 年を参照期間とし，6~8 月の月々の 850hPa 渦度偏差（計 75 ヶ月）に対し EOF 解析を行

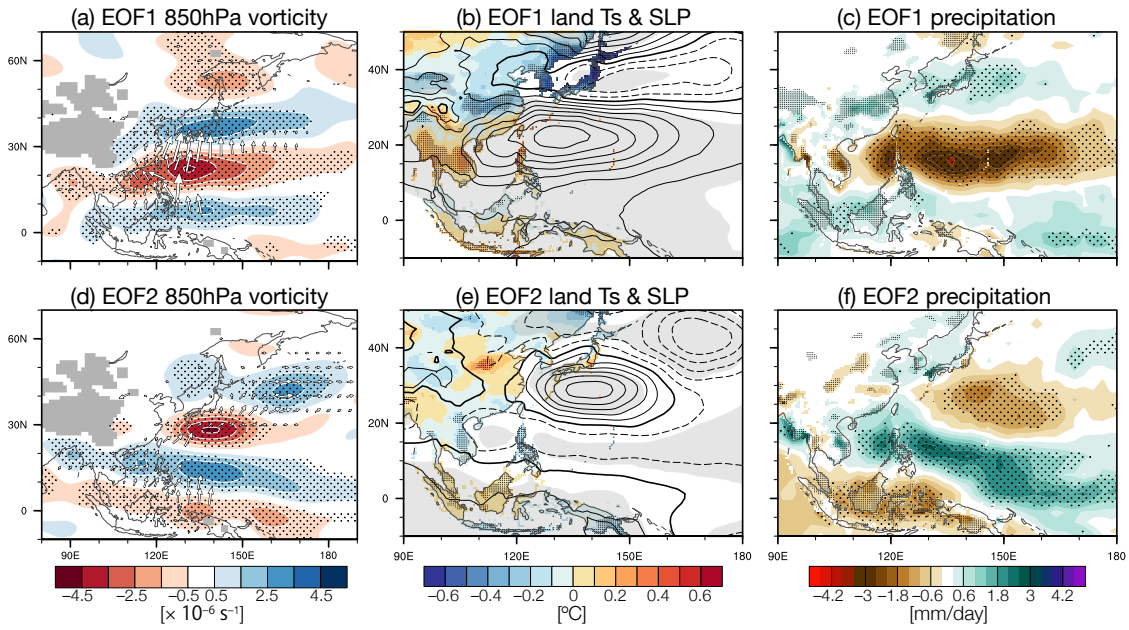


図 1. 北西太平洋 (0º-60ºN, 100º-160ºE) における 1975~1999 年 6~8 月の月々の 850hPa 渦度偏差に対する EOF 解析. (a-c) PC1 と (d-f) PC2 に回帰した (a,d) 850hPa 渦度偏差(陰影), (b,e) 陸上気温(陰影; APHRODITE)及び海面気圧(等値線; 0.2 hPa 毎), (c,f) 降水量(海上は CMAP, 陸上は APHRODITE). 点描(灰陰影)は色付き陰影(等値線)で示した偏差が 95%信頼水準を満たすことを示す. (a,d)の矢印は Takaya and Nakamura (2001) の波活動度フラックスを表す.

った. 後で示すように, この期間は ENSO の翌夏への持続影響が強い期間である. この EOF1 は PJ パターンに対応するが, 長期変調の理解には第 2 モード (EOF2) が重要であることがわかり, その構造及び励起源の解析も行った. EOF1 及び EOF2 に対応する主成分時系列をそれぞれ PC1, PC2 とする. さらに, JRA-55 全期間 (1958~2017 年) の夏季の月々の偏差場を EOF1･EOF2 パターンに射影した時系列の十年規模変調を解析した. 加えて 19 年の移動 EOF 解析により, 卓越変動の空間構造の変調も調べた.

研究成果

参照期間 (1975~1999 年) の EOF1は PJ パターンを抽出する (図 1 上; 説明分散 21.9%). PJ パターンは対流圏下層大気循環及び降水量の 20ºN 付近と本州付近との南北ダイポール構造で特徴付けられる. これに対して EOF2 は南北に位相が 1/4 波長ずれた構造を示す(図 1: 説明分散 16.2%). その下層循環及び降水偏差はマリアナ諸島のグアム島及び小笠原諸島付

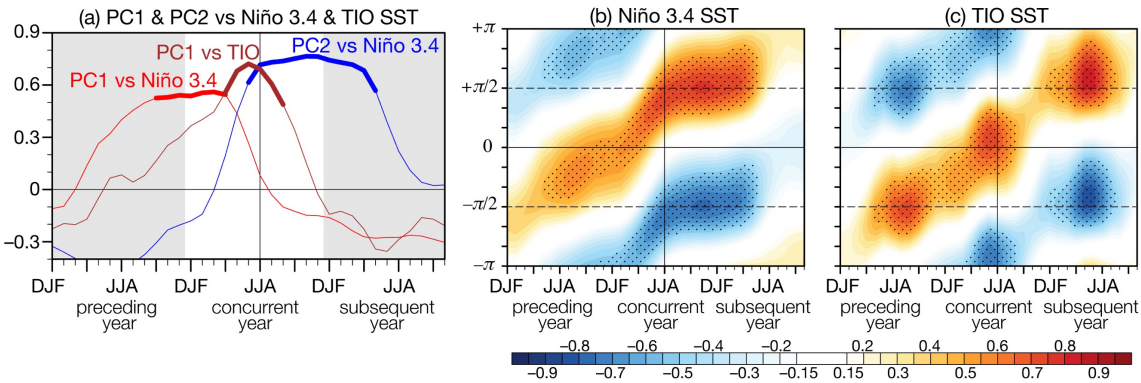


図 2. 1975-1999 年の EOF 解析から得た PC1 及び PC2 の 6-8 月季節平均値と Niño 3.4 及び熱帯インド洋 (TIO; 20ºS-20ºN, 40º-100ºE) 海面水温(3 ヶ月移動平均)とのラグ相関. (a) PC1 と Niño 3.4(赤)及び TIO(茶)海面水温との相関, 及び PC2 と Niño 3.4 海面水温(青)との相関. (b,c) PC1 と PC2 の線形結合時系列に対する Niño 3.4 (b), TIO (c) 海面水温との相関. 縦軸は位相 θ. (a) の太線及び (b,c) の点描は 95%信頼水準を満たすことを表す.

近に極大を持つことから, この遠隔影響パターンをマリアナ-小笠原 (MB) パターンと呼ぶことにする.

すでに知られているように, PJ パターンは先行する冬季の ENSO とのラグ相関と熱帯インド洋海面水温との同時相関を持つ(図 2a). 対照的に, MB パターンは発達期の ENSO と高い相関を有する. PJ パターンと MB パターンの線形結合を許し, (有次元の) PC1 と PC2 をそれぞれ $\cos\theta$ と $\sin\theta$ の重みで線形結合した時系列に対してもラグ相関解析を行うと, 発達する ENSO との最大相関は $\theta = \pm\pi/2$ に, 同時ないし直前の熱帯インド洋海面水温との最大相関は $\theta = 0$ 及び $\pm\pi$ 付近にあり, 両パターンと ENSO の関係の明瞭な違いがわかる (図 2b,c).

夏季北西太平洋域における卓越変動の長期変調を調べるために 19 年移動 EOF 解析を行った. その第 1 モード ($\widetilde{\text{EOF1}}$) 及び第 2 モード ($\widetilde{\text{EOF2}}$) の空間構造の変調を, PJ・MB パターン (参照期間の EOF1・EOF2) との空間相関により評価すると (図 3), $\widetilde{\text{EOF1}}$ と PJ パターン, 及び $\widetilde{\text{EOF2}}$ と MB パターンの

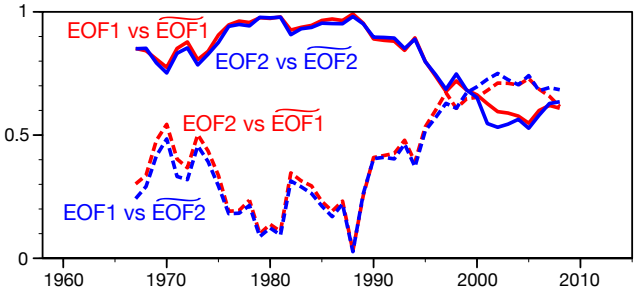


図 3. 参照期間(1975~1999 年)の EOF1 及び EOF2 と, 19 年移動 EOF 解析に基づく $\widetilde{\text{EOF1}}$ 及び $\widetilde{\text{EOF2}}$ との空間相関. 横軸は 19 年窓の中央の年を表す.

類似性は 1990 年代以降低下し，今世紀に入ってからは逆に$\widetilde{\text{EOF2}}$が PJ パターンに近く，$\widetilde{\text{EOF1}}$が MB パターンに近い構造を持つようになったことがわかる．

この卓越変動の入れ替わりは，PJ パターンの振幅の長期変調に起因する．参照期間の EOF1 及び EOF2 を JRA-55 全期間の夏季の月々偏差に射影した時系列（それぞれ PC1†, PC2†とする）の振幅変化を見ると（図 4c），MB パターンの振幅は安定しているのに対し，PJ パターンの振幅は 1960 年代から 80 年頃にかけて強化し，その後 90 年代以降は弱化傾向にある（図 4c）．特に今世紀に入ってからは，PJ パターンが説明する分散は MB パターンのそれと同程度かわずかに下回る．

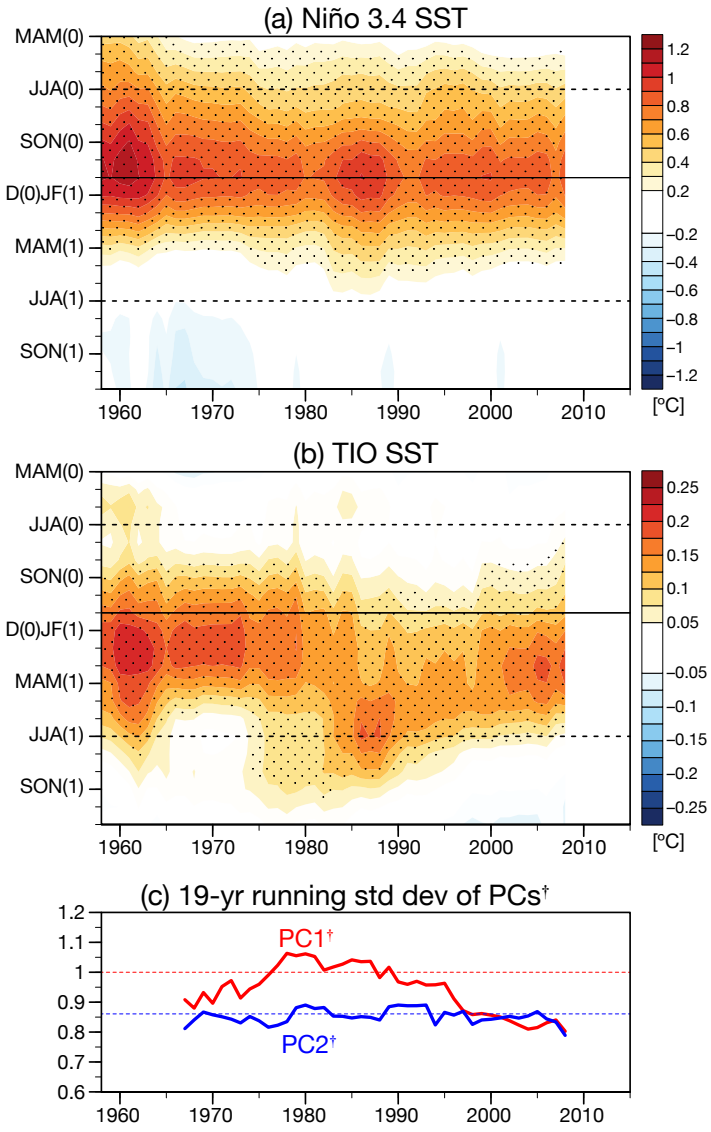


図 4. (a,b) 11-1 月の Niño 3.4 海面水温に対する 3 ヶ月移動平均海面水温の 19 年移動ラグ回帰偏差．(a) Niño 3.4, (b) TIO．点描は 95%信頼水準を満たすことを表す．(c) PC1†（赤）及び PC2†（青）の 19 年移動標準偏差（実践）．破線は参照期間の PC1・PC2 の標準偏差を示す．参照期間（1975-1999 年）の PC1 の振幅で規格化してある．横軸は 19 年窓の中央の年を表す．

この PJ パターンの振幅の変調には，ENSO の影響の持続性の変化が寄与している．ENSO に起因する熱帯インド洋海面水温偏差の持続性には顕著な十年規模変調があり，持続性が高かった 1970 年代~90 年代には PJ パ

ターンの振幅が強かった．このことは，この時期の PJ パターンの振幅強化がほぼ季節平均値の経年変動によってもたらされていたこととも整合する（図は略）．対照的に，ENSO は年代を問わず発達期の夏季にはすでに有意なシグナルを持っており（図 4a），このため MB パターンは顕著な振幅変化を示してこなかったと考えられる．

今後の問題点

本研究は発達期と衰退期の ENSO が下記北西太平洋域に励起する遠隔影響は，ほぼ空間直交といえるほど明瞭な違いを持つことを示した．特に発達期の ENSO の影響は十年規模で大きく変調することはなく，安定して MB パターンを励起するのに対し，衰退期の ENSO による PJ パターンの励起は ENSO によりインド洋海面水温偏差の持続性に強く影響され，これが数十年規模で PJ パターンの強度を大きく変調させることが明らかになった．これに伴い，夏季北西太平洋域の卓越変動は数十年規模で変わる．

この長期変調が夏季北西太平洋・東アジアの季節予測にどのような影響をもたらしてきたかを明らかにすることは，今後起こりうる予測可能性の変化を知る手がかりとなるであろう．また，PJ パターンについては多くの研究がなされてきたのに対し，本研究で新たに同定された MB パターンについては，その大気変動としての維持メカニズムや，ENSO による励起メカニズムはほとんど分かっていない．今後，観測データの解析及び線形傾圧モデルや大気大循環モデル実験を用いてこれらを解明することが今後の課題である．

参考文献

Huang, B. *et al.* (2017) *J. Climate*, 8179–8205.
Kobayashi, S. *et al.* (2015) *J. Meteor. Soc. Japan,* **93**, 5–48.
Kosaka, Y. and H. Nakamura (2010) *J. Climate*, **23**, 5085–5108.
Kubota, H., Y. Kosaka and S.-P. Xie (2016) *Int. J. Climatol.*, **36**, 1575–1589.
Nitta, T. (1987) *J. Meteor. Soc. Japan*, **65**, 373–390.
Takaya, K. and H. Nakamura (2001) *J. Atmos. Sci.* **58**, 608–627.
Xie, P. and P. A. Arkin (1997) *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **78**, 2539–2558.
Xie *et al.* (2016) *Adv. Atmos. Sci.*, **33**, 411–432.
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）
大方　めぐみ　（東京海洋大学 学術研究院）
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

今年度は広帯域放射伝達モデル *MstrnX* の気体吸収テーブルの大々的な更新を目指し、気体吸収スペクトルの基礎研究として、連続吸収プログラム MT_CKD の評価および、波長、気圧（高度）、温度における気体吸収の変化に対する内挿法および解像度の検討を行った。また、MIROC に導入されている放射過程の高速化の検討を行い、サブルーチン PTFIT2 についてオリジナルよりも 35%計算速度を向上させた。

3. 研究成果

まず、平成 28 年 7 月に ver. 2.8、12 月に ver.3.0、平成 29 年 8 月に ver.3.2 がリリースされた連続吸収プログラム MT_CKD の評価を行った。MT_CKD は観測と HITRAN データベースを用いた線吸収との差を計算するように調整されている。図 1 に示す通り、水蒸気の self-broadening では

吸収が比較的弱いところでバージョン間の違いが大きく現れているが、foreign-broadening では大きな違いがない。また、ver. 2.8 と ver. 3.0 の違いは、self-broadening では波数 200 cm^{-1} 以下、foreign-broadening では波数 600 cm^{-1} 以下に現れている。また、ver.3.2 では波数 2000cm^{-1} 以上の領域に新たな水蒸気の self-broadening のデータが追加され、波数 1800-3500cm^{-1} の領域の温度依存性も追加された。

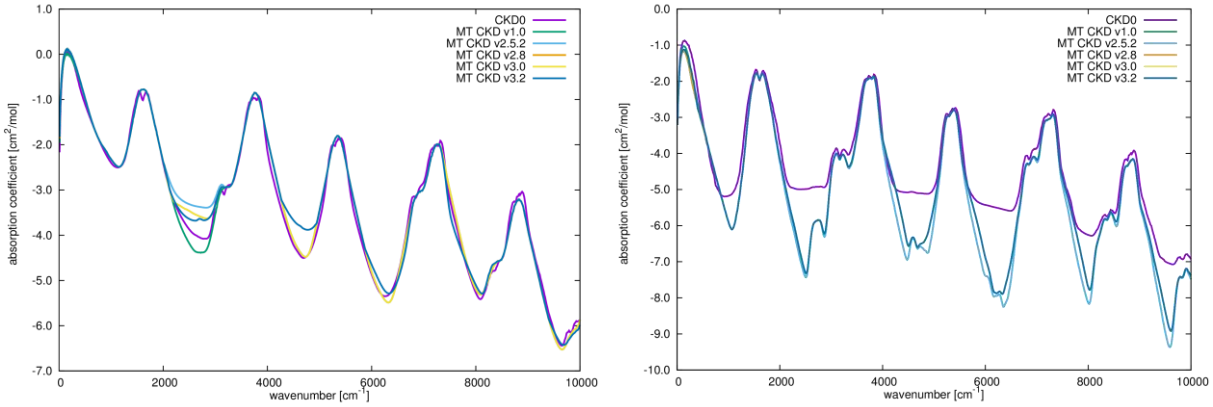


図 1. 連続吸収プログラムの計算結果のバージョン間の比較。左図は水蒸気の self-broadening、右図は foreign-broadening。縦軸は吸収係数、横軸は波数、紫は CKD 0、緑は MT CKD ver.1、水色は ver. 2.5.2、橙色は ver. 2.8、黄色は ver.3.0、青は ver.3.2 を示す。

また、波長、気圧（高度）、温度における気体吸収の変化に対する内挿法および解像度の検討を行った。LBLRTM で計算した吸収係数に対し、波長方向 1 点おきに線形、2 次、3 次内挿した結果と比較したところ、3 次内挿で最も良い結果が得られた。ただし、ピークでの結果を比較したところいずれも 1%のオーダーとなり、内装法について検討の余地があることがわかった。気圧についても同様の比較を行ったところ、線形内挿よりも高次内挿法の方が誤差が小さくなったが、オーダーは同程度であること、現在の 26 点で解像度が十分であることが確認された。温度の内挿法については、現在は 200,260,320K の 3 点で計算し、以下に示す式 [Zhang et al., 2003]で導出しているため、この式の精度を確認した。

$$k(T) = k_{260}\left(\frac{T}{260}\right)^{a+bT}$$

$$a_1 = \log(200/260), \quad a_2 = \log(320/260),$$
$$b_1 = \log(k_{200}/k_{260}), \quad b_2 = \log(k_{320}/k_{260}),$$
$$b = \frac{(b_2/a_2 - b_1/a_1)}{120}, \quad a = \frac{b_2}{a_2} - 320b.$$

温度の範囲外では誤差が大きくなるが、範囲内であれば大きな誤差がないことがわかった。ただし、今回の確認では吸収係数をそのまま確認に使ったため、*MstrnX* のテーブルに用いている相関 *k*-分布での適用がもっともらしいか確認する必要がある。また、計算速度の面ではベキ乗を排除した方が良いので、内挿法の適用についても検討をおこなった。20K ごとの吸収係数を用いて内挿により吸収係数を導出し、LBLRTM から導出した吸収係数と比較したところ、線型内挿では上記の式と精度はあまり変わらないが、高次内挿およびスプライン内挿法ではより良い結果が得られた。この結果を踏まえて、吸収係数テーブルの再更新を行う予定である。

さらに、今年度は放射スキームの高速化について検討を行った。吸収係数の内挿に使用する PTFIT2 というサブルーチンについて、一層ずつ探す方法からコーディングで整数に変換する方法を試みたところ、PTFIT 2 が 35%高速化した。その他のルーチンについては期待されるような効果が望める箇所は見つからなかったが、引き続き検討を行っていきたい。

4. 今後の課題

今年度は気体吸収テーブルの再更新を見据えた基礎研究を行った。また、放射スキームの高速化検討に伴い、放射コードの全般的な見直しも行った。アルゴリズム上の変更は難しいが、気体吸収部分の計算法や大粒子による散乱の導入も継続して行う予定である。