

# 共 同 研 究 報 告 書

平成30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 30 年度共同研究報告書の発行にあたって

平成 30 年度共同研究応募及び配分一覧

## 【特定共同研究】

|                                    |    |
|------------------------------------|----|
| 1. ①衛星データと数値モデルの融合による雲の素過程の研究      |    |
| ②全球雲解像モデルの開発及びデータ解析 .....          | 4  |
| 2. 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 ..... | 6  |
| 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 ..... | 8  |
| 4. 大気モデルにおけるパラメタリゼーションの研究 .....    | 10 |
| 5. 全球雲解像モデルの開発及びデータ解析 .....        | 14 |
| 6. 全球雲解像モデルの開発及びデータ解析 .....        | 18 |
| 7. 世界海洋大循環モデルの相互比較 .....           | 20 |
| 8. 高分解能大気モデル及び領域型気候モデルの開発 .....    | 24 |
| 9. 海洋モデルにおけるサブグリッド現象のパラメータ化 .....  | 28 |
| 10. 全球雲解像モデルの開発及びデータ解析 .....       | 32 |

## 【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                        | 35 |
| 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             | 39 |
| 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              | 44 |
| 4. 大気海洋マルチスケール変動に関する数値的研究                    | 45 |
| 5. 気候変動現象の形成メカニズムと塩分が果たす役割                   | 47 |
| 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               | 49 |
| 7. 大型大気レーダーと全球高解像度モデルを相補的に用いた中層大気大循環の階層構造の解明 | 51 |
| 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 | 55 |
| 9. 惑星中層大気大循環の力学                              | 59 |
| 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          | 62 |
| 11. 気候モデル・全球雲解像モデルを用いた熱帯大気研究                 | 67 |
| 12. 地表面状態の変化による大気水循環への影響                     | 70 |
| 13. 陸面モデルの積雪スキームの高度化及びデータ解析                  | 72 |
| 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               | 77 |
| 15. 全球雲解像モデルデータを用いた熱帯雲活動の解析                  | 81 |
| 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                | 85 |
| 17. 放射収支算定のための放射スキームの高速・高精度化                 | 89 |
| 18. 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             | 92 |

平成30年度共同研究報告書の発行にあたって

2018年の「今年の漢字」は「災」でした。ことに7月は、200名以上の命を奪った平成30年7月豪雨に引き続き、熱中症によって亡くなった方が1000名を超えるという「災害級」の猛暑が、深くわれわれの記憶に刻まれました。それだけでなく、9月には50メートル級の強風を伴う台風が相次いで西日本、東日本を襲いました。人々の防災に対する関心は、否応なく高まっています。気象に携わるわれわれも、現象の監視、予測の向上はもちろんのこと、人々にできるだけ早く避難して頂き、被害を最小限に食い止めることができるよう、貢献したいと思います。

本共同研究は、比較的時間スケールの長い「気候」を謳ってはおりますが、「シームレス予測」という用語がよく使われるようになったことで象徴されたとおり、現業だけでなく研究でも多岐にわたる時空間スケールの現象を扱い、それらの相互作用を定量的に見極める流れになってきています。リモートセンシングを活用した新しい観測データも続々と現れ、数値モデルやデータ同化技術が、シームレスに現象のメカニズム解析を進めるために欠かせない道具となってきています。研究室単位ではなかなか扱いにくい、これら複雑で大型の道具を縦横に使った研究が進められるよう、本共同研究がその一助となることができれば幸いです。

平成31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30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<br>区分       | 研 究 課 題                                           | 研 究 組 織                                                   | 気候系<br>担当<br>教員                                                                                                      | 配 分 額              |           |           |           |
|----------------|---------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|-----------|-----------|-----------|
|                |                                                   |                                                           |                                                                                                                      | ノード時間              | 消耗品<br>千円 | 旅 費<br>千円 | 合 計<br>千円 |
| 特定<br>研究<br>1  | ①衛星データと数値モデルの融合による雲の素過程の研究<br>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<br>Thi Ngoc Trieu Tran<br>名古屋大学大学院 工学研究科<br>佐藤 陽祐 | 五藤 大輔 主任研究員<br>特別研究員<br>助教<br>佐藤 正樹                                                                                  | 鈴木 健太郎<br>100, 000 | 0         | 0         | 0         |
| 特定<br>研究<br>2  | 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                         | 国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構 第一宇宙技術部門<br>地球観測研究センター                 | 菊池 麻紀 研究開発員                                                                                                          | 鈴木 健太郎             | 0         | 0         | 0         |
| 特定<br>研究<br>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         | 30        |
| 特定<br>研究<br>4  | 大気モデルにおけるパラメタリゼーションの研究                            | 東京大学生産技術研究所<br><br><br><br><br><br><br>東京大学工学系研究科         | 芳村 圭 准教授<br>平林 由希子 准教授<br>Kim Hyungjun 特任准教授<br>山崎 大 助教<br>新田 友子 特任助教<br>日比野 研志 特任研究員<br>石塚 悠太 修士課程学生<br>竹島 滉 修士課程学生 | 木本 昌秀              | 4, 000    | 0         | 0         |
| 特定<br>研究<br>5  | 全球雲解像モデルの開発及びデータ解析                                | 富山大学                                                      | 安永 数明 教授<br>奥川 棕介 修士課程1年生(予定)                                                                                        | 佐藤 正樹              | 90, 000   | 100       | 120       |
| 特定<br>研究<br>6  | 全球雲解像モデルの開発及びデータ解析                                | 国立研究開発法人海洋研究開発機構<br><br>埼玉県環境科学国際センター                     | 那須野 智江 主任研究員<br>野田 暁 研究員<br>山田 洋平 ポストドクトラル研究員<br>原 政之 研究員                                                            | 佐藤 正樹              | 100, 000  | 0         | 0         |
| 特定<br>研究<br>7  | 世界海洋大循環モデルの相互比較                                   | 気象庁気象研究所                                                  | 中野 英之 主任研究官<br>辻野 博之 室長<br>坂本 圭 主任研究官<br>浦川 昇吾 研究官                                                                   | 羽角 博康              | 34, 560   | 0         | 0         |
| 特定<br>研究<br>8  | 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                                               | 坂本 雅巳 予報官<br>荒波 恒平 予報官<br>佐藤 均 調査官<br>下河邊 明 技術専門官<br>松川 知紘 技官<br>上田 学 技官<br>鍋谷 堯司 技官                                 | 木本 昌秀              | 16, 000   | 0         | 0         |
| 特定<br>研究<br>9  | 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<br><br><br><br><br><br><br>九州大学応用力学研究所      | 日比谷 紀之 教授<br>田中 祐希 助教<br>永井 平 特任研究員<br>高橋 杏 大学院生<br>福澤 克俊 大学院生<br>柳町 隆裕 大学院生<br>張 愛琦 大学院生<br>大貫 陽平 助教                | 羽角 博康              | 200, 000  | 0         | 0         |
| 特定<br>研究<br>10 | 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<br>筑波大学生命環境研究科                             | 田中 博 教授<br>松枝 未遠 助教<br>栗花 卓弥 大学院生                                                                                    | 佐藤 正樹              | 0         | 60        | 5         |

平成30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<br>区分       | 研 究 課 題                                   | 研 究 組 織                                                              | 気候系<br>担当<br>教員                                                                                                                                                                     | 配 分 額          |           |           |           |
|----------------|-------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|-----------|-----------|-----------|
|                |                                           |                                                                      |                                                                                                                                                                                     | ノード時間          | 消耗品<br>千円 | 旅 費<br>千円 | 合 計<br>千円 |
| 一般<br>研究<br>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<br>榎本 剛 准教授<br>時長 宏樹 特定准教授                                                                                                                                                  | 木本 昌秀          | 200       | 0         | 0         |
| 一般<br>研究<br>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<br>小室 芳樹 技術研究員<br>黒木 聖夫 特任技術研究員                                                                                                                                       | 羽角 博康          | 100,000   | 0         | 0         |
| 一般<br>研究<br>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<br>川口 悠介 助教<br>李 根淙 特任研究員<br>矢部いつか 大学院生D1                                                                                                                                  | 羽角 博康          | 6,000     | 0         | 0         |
| 一般<br>研究<br>4  | 大気海洋マルチスケール変動に関する数値的研究                    | 北海道大学大学院理学研究院<br>北海道大学大学院地球環境科学研究院<br>北海道大学大学院理学研究院<br>北海道大学大学院理学院   | 稲津 将 教授<br>堀之内 武 准教授<br>見延 庄士郎 教授<br>玉置 雄太 大学院生<br>勝山 祐太 大学院生<br>相河 卓也 大学院生                                                                                                         | 木本 昌秀          | 60,000    | 0         | 0         |
| 一般<br>研究<br>5  | 気候変動現象の形成メカニズムと塩分が果たす役割                   | 東京大学大学院理学系研究科                                                        | 東塚 知己 准教授<br>木戸 晶一郎 大学院生                                                                                                                                                            | 木本 昌秀          | 20,000    | 0         | 0         |
| 一般<br>研究<br>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 地球環境研究センター<br>気象庁気象研究所 海洋・地球化学研究部                            | 齊藤 誠 主任研究員<br>五藤 大輔 主任研究員<br>丹羽 洋介 主任研究官                                                                                                                                            | 佐藤 正樹          | 5,000     | 0         | 0         |
| 一般<br>研究<br>7  | 大型大気レーダーと全球高解像度モデルを相補的に用いた中層大気大循環の階層構造の解明 | 東京大学大学院理学系研究科                                                        | 佐藤 薫 教授<br>南原 優一 大学院生<br>小新 大 大学院生                                                                                                                                                  | 木本 昌秀<br>羽角 博康 | 100,000   | 0         | 0         |
| 一般<br>研究<br>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    | 東北大学大学院理学研究科<br><br><br><br><br><br>情報通信研究機構<br><br>京都産業大学<br>大阪府立大学 | 寺田 直樹 准教授<br>笠羽 康正 教授<br>早坂 忠裕 教授<br>中川 広務 助教<br>Pradeep Khatri 助教<br>青木 翔平 客員研究者<br>秋葉 丈彦 大学院生<br>島海 克成 大学院生<br>笠井 康子 上席研究員<br>黒田 剛史 主任研究員<br>佐川 英夫 准教授<br>前澤 裕之 准教授<br>築山 大輝 大学院生 | 佐藤 正樹<br>阿部 彩子 | 100,000   | 0         | 110       |
| 一般<br>研究<br>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          | 200       | 0         | 70        |
| 一般<br>研究<br>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<br><br>水産研究・教育機構<br>Rutgers Univ.                        | 伊藤 進一 教授<br>横井 孝暁 特任研究員<br>瀬藤 聡 グループ長<br>CURCHITSER Enrique 准教授                                                                                                                     | 羽角 博康          | 51,840    | 0         | 0         |
| 一般<br>研究<br>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<br>末松 環 大学院生<br>王 家瑞 大学院生<br>松岸 修平 大学院生<br>神野 拓哉 大学院生                                                                                                                     | 渡部 雅浩          | 16,200    | 75        | 75        |
| 一般<br>研究<br>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<br>神澤 望 大学院生                                                                                                                                                                | 渡部 雅浩          | 2,000     | 60        | 30        |
| 一般<br>研究<br>13 | 陸面モデルの積雪スキームの高度化及びデータ解析                   | 北海道大学大学院工学研究院<br>WDB株式会社                                             | 安成 哲平 助教<br>渡邊 達博 技術補佐員                                                                                                                                                             | 阿部 彩子          | 1,500     | 0         | 120       |
| 一般<br>研究<br>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 博士研究員<br>山中 康裕 教授                                                                                                                                                             | 岡 顕            | 25,000    | 0         | 0         |
| 一般<br>研究<br>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         | 100       |
| 一般<br>研究<br>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<br>小坂 優 准教授<br>田口 文明 特任准教授<br>宮坂 貴文 特任助教                                                                                                                                    | 渡部 雅浩          | 50,000    | 0         | 0         |
| 一般<br>研究<br>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<br><br>JAXA/EORC                                              | 関口 美保 准教授<br>大方 めぐみ 博士研究員<br>中島 映至 センター長<br>竹中 栄晶 招聘研究員<br>橋本 真喜子 プロジェクト研究員                                                                                                         | 鈴木 健太郎         | 500       | 50        | 22        |
| 一般<br>研究<br>18 | 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              | 東京大学大気海洋研究所<br>北海道大学大学院環境科学院                                         | 松村 義正 助教<br>大橋 義彦 大学院生                                                                                                                                                              | 羽角 博康          | 10,000    | 0         | 50        |
| 特 定 共 同        |                                           |                                                                      | 合 計                                                                                                                                                                                 | 10 件           | 544,560   | 160       | 155       |
| 一 般 共 同        |                                           |                                                                      | 合 計                                                                                                                                                                                 | 18 件           | 538,440   | 185       | 502       |
| 合 計            |                                           |                                                                      |                                                                                                                                                                                     | 28 件           | 1,083,000 | 345       | 1,002     |

## 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

### 大気粒子と短寿命気体及び雲との相互作用に関するモデリング研究

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

五藤 大輔, 国立環境研究所, E-mail: goto.daisuke(at)nies.go.jp

佐藤 陽祐, 名古屋大学大学院・工学研究科, E-mail: y-sato(at)energy.nagoya-u.ac.jp

Tran Thi Ngoc Trieu, 国立環境研究所, E-mail: thi.tran(at)nies.go.jp

Daisuke Goto, National Institute for Environmental Studies

Yousuke Sato, Graduate School of Engineering, Nagoya University

Tran Thi Ngoc Trieu, National Institute for Environmental Studies

#### 要旨 (明朝 9pt)

非静力学エアロゾル輸送モデル NICAM-Chem を稼働させ、東アジアを対象としたエアロゾル数値実験を実施した。今年度は、モデルで得られた大気汚染の4次元構造を詳細に検証するために、ひまわり 8 号及び COMS/GOCI から得られるエアロゾルの衛星観測、環境省大気汚染物質広域監視システムや国立環境研究所ライダーによる地上観測といった複数の観測データを利用した。この結果、モデルがひまわりで得られた高エアロゾル光学的厚さ（鉛直積算量）の事例をうまく再現できている場合であっても、ライダーで得られたエアロゾル消散係数の鉛直分布をうまく再現できないことがある、ということが明らかとなった。このように、複数の観測結果を組み合わせることで、エアロゾルの輸送過程についてモデルを詳細に評価することができ、モデルの改良すべきポイントが明確化され、今後のモデル改良の指針が示された。

#### 1. はじめに

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

#### 2. 問題設定・方法

本年度は、NICAM-Chem によるエアロゾルシミュレーションを行い、複数の観測データによってモデル検証を行うことで、大気汚染物質の4次元構造の再現性に注目した。対象は、2016年5月の日本周辺とし、最小解像度約10kmのストレッチ格子法を用いたシミュレーションを行った。モデル検証用の観測データは、日本の静止衛星（ひまわり/AHI）と韓国の静止衛星（COMS/GOCI）によるエアロゾル光学的厚さ AOT、環境省大気汚染物質広域監視システム（そらまめくん）による地上 PM<sub>2.5</sub> 濃度観測、国立環境研究所ライダーによるエアロゾル消散係数の鉛直分布観測といった複数のものを準備した。

#### 3. 結果と考察

NICAM-Chem は、Goto et al. (2019)の図2で示した2016年5月18日の結果を見ると、ひまわり/AHI 及び COMS/GOCI で検知されたシベリア森林火災由来の越境大気汚染の水平構造を非常によく再現できていることがわかった。次に、本報告書の図に示したように、大気汚染分布の4次元構造を比較し、モデル結果を評価するために、エアロゾル濃度の指標である AOT（エアロゾル光学的厚さ；上段）、地上 PM<sub>2.5</sub> 濃度（中段）、球形エアロゾル消散係数の鉛直分布（下段）の比較を行った。その結果、2016年5月18日については、モデルがひまわりで得られた高 AOT（鉛直積算量）及び低 PM<sub>2.5</sub> 濃度を概ね再現できたことがわかった。しかし、エアロゾル消散係数の鉛直分布に注目すると、モデルでは地表面から高度 5km まで高濃度エアロゾルが分布しているが、観測ではモデルほどの鉛直方向に広がりが見られなかった。また高度 1km 以下では、モデルが観測を過大評価であることがわかった。この要因としては、モデルの境界層内での鉛直拡散が過大評価していることが考えられるが、今後も詳細なモデル過程の検証を継続して行う必要がある。なお、本報告書の結果は北日本だけのものを示したが、Goto et al. (2019)では関東と福岡における結果も提示しており、同様の結論が得られた。

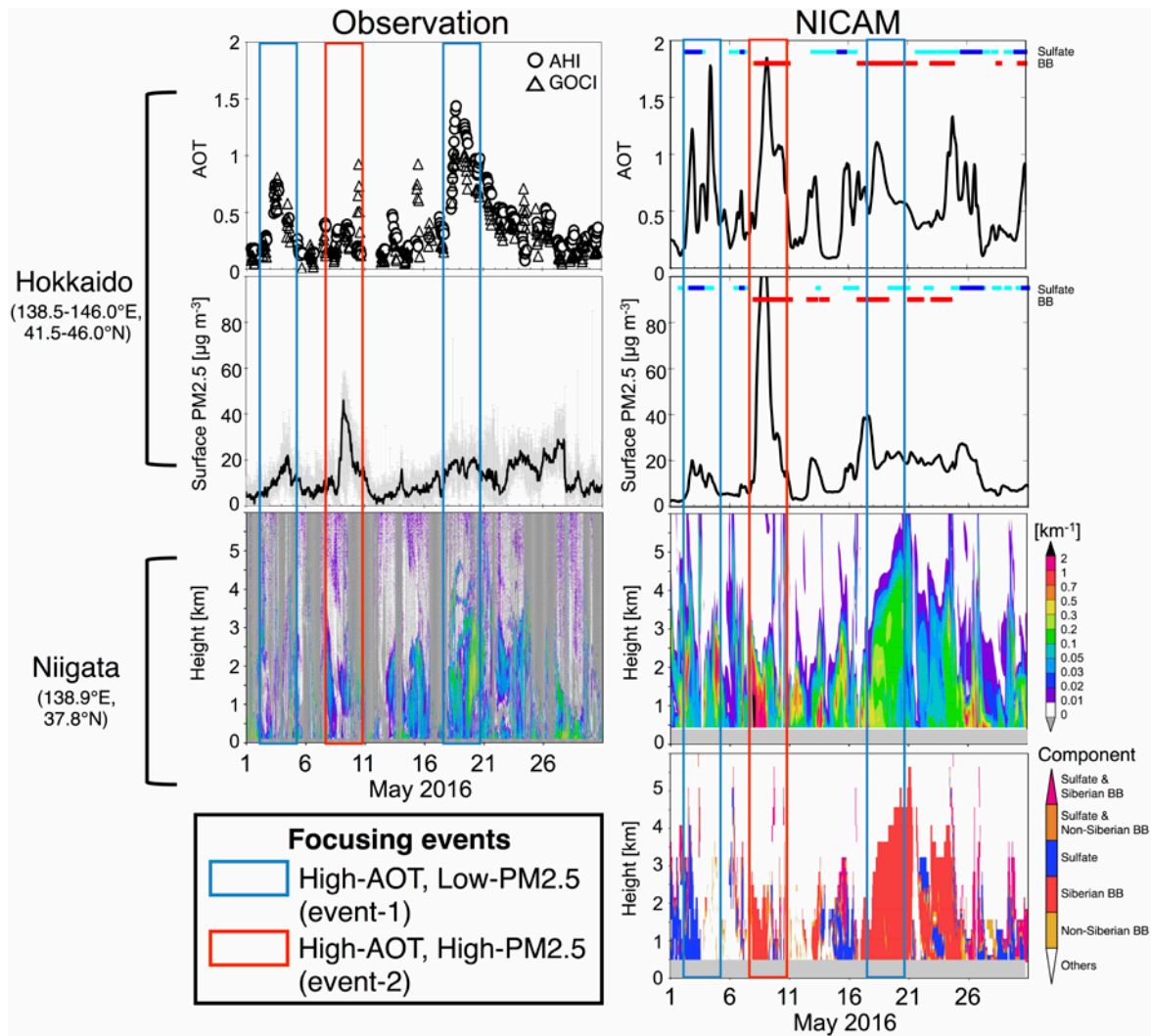


Fig 1 Hourly variations in the AOT, surface PM<sub>2.5</sub> concentrations, and extinction coefficients for spherical particles according to multiple measurements (left panels) and as simulated by NICAM (right panels) in northern Japan, including Hokkaido (138.5E-146.0E, 41.5N-46.0N) and Niigata (138.9E, 37.8N). The AOT was retrieved from the Himawari-8/AHI and GOMS/GOCI. The surface PM<sub>2.5</sub> concentrations were observed by the Atmospheric Environmental Regional Observation System (AEROS) at Hokkaido. The extinction coefficients were retrieved from NIES-LIDAR. The shaded gray areas in the vertical profiles represent undefined values because of cloud and raindrop contamination and altitude effects. The marks of closed squares in colors around the top in the panels of NICAM-simulated AOT and surface PM<sub>2.5</sub> concentrations represent the periods of the high contribution of sulfate in blue (>30% of the total AOT) and in cyan (>50% of the total AOT) to the total AOT and those in the high (>50%) contribution of carbonaceous aerosols in red (for Siberian biomass burning) to the total AOT. The bottom-right panel represents the temporal variation of the major species for the extinction of spherical aerosols obtained by NICAM. The results were defined as those in the high (>50%) contribution of sulfate to the total extinction and those in the high (>50%) contribution of carbonaceous aerosols (Siberian biomass burning, BB, and non-Siberian BB) to the total extinction when the total extinction exceeded 0.02 km<sup>-1</sup>. This figure is referred from Figure 8 in Goto et al. (2019).

#### 4. まとめと今後の展望

複数の観測結果を組み合わせることで、エアロゾルの輸送過程についてモデルを詳細に評価することができ、モデルの改良すべきポイントが明確化され、今後のモデル改良の指針が示された。今後は、この精緻化されたモデルを用いて、エアロゾルと雲の相互作用に注目した数値実験を行い、その相互作用に関する理解を深めていきたい。

#### 参考文献

Goto D., Kikuchi M., Suzuki K., Hayasaki M., Yoshida M., Nagao T.M., Choi M., Kim J., Sugimoto N., Shimizu A., Oikawa E., Nakajima T. (2019) Aerosol model evaluation using two geostationary satellites over East Asia in May 2016. *Atmospheric Research*, 217, 93-113, doi:10.1016/j.atmosres.2018.10.016

# 衛星搭載レーダ及びライダーを用いた全球雲降水相の実態解明

## Investigation on the Global Behavior of Cloud-Precipitation Phase using Satellite-borne Radar and Lidar

菊池 麻紀, JAXA・地球観測研究センター, E-mail: kikuchi.maki(at)jaxa.jp

鈴木 健太郎, 東大・大気海洋研, E-mail: ksuzuki(at)aori.u-tokyo.ac.jp

Maki Kikuchi, Earth Observation Research Center, Japan Aerospace Exploration Agency

Kentaroh Suzuki, Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo

### 要旨

本研究では衛星搭載レーダ及びライダーを用いて、降水を伴う低層の積雲から深い積乱雲まで5種に識別された全球の降水レジームについて、水雲・プレート型氷晶 (2D-plate)・3次元配向型氷晶 (3D-ice)・降雨・降雪など粒子の鉛直構造を観測的に同定した。鉛直構造解析には、気温で規格化したレーダ反射因子プロファイル (CFED ダイアグラム) を用い、先行研究による粒子種テーブルを参照することで、降水レジーム毎に粒子構造を推定した。例えば、積乱雲 (Deep) は、上層で3D-ice、中層に降雪、低層に降雨で構成される比較的簡素な構造である一方、低高度で降水を伴う背の高い雲 (Shallow Cold) は、2D-plate やドリズルなど様々な粒子種構成となることが示唆された。さらに本研究では Deep の成長ステージを雲頂付近の浮力により特徴付け、その鉛直構造が成長期から衰退期にかけて“雲モード”から“降水モード”へ推移する様子を観測的に示した。特に、強い降水は、成長段階の中でも衰退期にかけて発生していたことがわかった。本報告書は、Kikuchi and Suzuki [2019]を基に作成した。

### 1. はじめに

降水形成における粒子の水滴から氷晶への熱力学的相変化による潜熱の放出は、その対流システムの加速に大きく影響する。一般に、水雲は氷雲よりも大気中での滞留時間が長いため、この相変化は対流システムの寿命に深く寄与するため、降水雲システムの鉛直構造は、地球の水循環と放射収支の決定要素の一つである (Stephens et al. 2012; 2018)。しかし、降水雲システムの鉛直鉛直構造は十分に理解されてなく、とりわけ降水レジーム毎の構造や成長過程におけるその推移に関する理解は乏しい。本研究では、A-Train と呼ばれる衛星コンステレーションを構成する多種の観測センサ (雲レーダ、ライダー、光学イメージャ、マイクロ波放射計) によるデータを複合的に解析することで、降水レジーム毎の鉛直粒子種を同定し、さらにその構造が対流システムの成長ステージにおいてどのように推移するかを明らかにすることを目的とした。

### 2. 降水レジーム識別手法

本研究では、降水レジームを同定する手法として、Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) 観測データを用いた先行研究 (Masunaga et al. [2005]; Matsui et al. [2016]) による手法を、CloudSat 衛星と Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observations (CALIPSO) 衛星に応用した (図1)。分類される降水レジームは、Shallow Water, Shallow Cold, Mid Warm, Mid Cold, Deep の5種類である。先行研究では、TRMM に搭載されている光学イメージャ VIRS と降雨レーダ PR のそれぞれから雲頂高度と降水頂高度 (エコー頂高度) を算出していたのに対し、本研究では、CloudSat の雲レーダ CPR と CALIPSO のライダー CALIOP から両者を算出した。この手法では、能動型センサである CPR と CALIOP を用いることで、VIRS よりも直接的に雲頂高度を検知することが可能となり、従来手法の課題となっていた異なる雲システムによる多層構造を同一システムと誤識別する課題 (Stephens and Wood [2007], Matsui et al. [2016]) を改善することが特徴である。

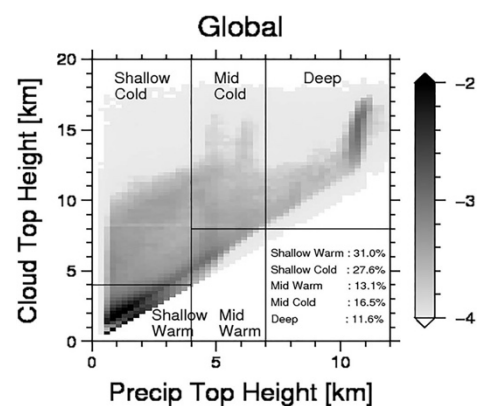


図1 本研究で用いた降水レジームの定義. CloudSat と CALIPSO による観測頻度をグレースケールで示す。

### 3. 降水レジームの鉛直粒子構造

降水雲システムの鉛直構造は、Contoured Frequency by Temperature Diagram (CFED; Hashino et al. [2016]) と呼ばれる気温で規格化したレーダ反射因子プロファイルで表現し、2章の手法を用いて降水レジーム毎に算出した (図2)。CFED と同じく、レーダ反射因子と気温のダイアグラムで作成された粒子種テーブル (Kikuchi et al. [2016]) を CFED に重ねることで、各プロファイルの代表的な鉛直粒子構造を解釈した。例えば、雲頂高度・降水頂高度がともに低い Shallow Warm は、主に水雲やドリズルから構成される期待通りの鉛直分布となり、暖かい雨のプロセスが支配的な降水レジームであることが示唆される。降水頂高度が比較的雲頂高度に近い Deep と Mid Warm では、上層に3次元に配向する氷晶 (3D-ice)、下層に Rain (一部 Snow)

からなる比較的簡素な粒子構造であるのに対し、Shallow Cold と Mid Cold では、プレート型氷晶 (2D-plate) やドリズルを含む多種構造が示唆される結果となった。

#### 4. 成長段階に応じた鉛直構造推移

さらに、本研究では、雲頂温度と、雲頂での気温との差 ( $\Delta T$ ) を浮力の指標とした手法 (Luo et al. [2009]) を導入し、Deep の成長ステージに応じた鉛直構造の推移を解析した。ここで、雲頂温度は Aqua 衛星搭載光学イメージャ (MODIS)、気温はヨーロッパ中期予報センター (ECMWF) のデータを利用した。図 3 は、 $\Delta T$  によって、Deep の鉛直構造を成長期・成熟期・衰退期に分けた結果である。レーダ反射因子の強い粒径依存性を考慮すると、成長期ではレーダ反射因子が比較的低く、3D-ice や 2D-plate の“雲モード”に近いプロファイルを示すのに対し、成熟期へ移行するにつれ、レーダ反射因子が大きい Snow や Rain の“降水モード”へ系統的に推移している様子がみられた。さらに、その過程において、最も強い降水は、成長段階後半の衰退期にもたらされていることが示唆された。

以上のように、本研究では、複数の衛星による同時観測データを複合的に解析することにより、降水雲システムの成長・衰退過程における粒子構造の遷移を観測的に示唆する結果が得られた。

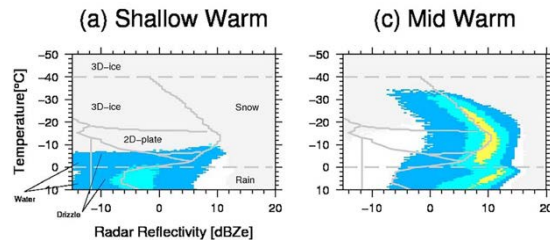


図 2 降水レジーム毎のレーダ反射因子プロファイル。各ダイアグラムには、Kikuchi et al. [2017] によって提案された雲降水粒子識別を重ねている。

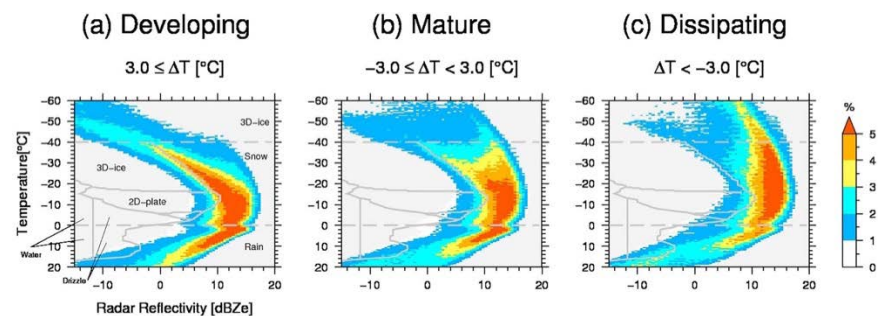


図 3 Deep レジームの成長ステージ毎の鉛直プロファイル：(a) 成長段階；(b) 成熟段階；(c) 衰退段階

#### 参考文献

- (1) Kikuchi, M., & Suzuki, K. (2019). Characterizing vertical particle structure of precipitating cloud system from multiplatform measurements of A-Train constellation. *Geophysical Research Letters*, 46, 1040-1048. <https://doi.org/10.1029/2018GL081244>
- (2) Stephens, G. L., Li, J., Wild, M., Clayson, C. A., Loeb, N., Kato, S., L'Ecuyer, T., Stackhouse Jr, P. W., Lebsock, M., & Timothy, A. (2012). An update on Earth's energy balance in light of the latest global observations. *Nature Geoscience*, 5, 691-696. <https://doi.org/10.1038/ngeo1580>
- (3) Stephens, G., Winker, D., Pelon, J., Trepte, C., Vane, D., Yuhas, C., L'Ecuyer, T., & Lebsock, M. (2018). CloudSat and CALIPSO within the A - Train: Ten years of actively observing the Earth system. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 99(3), 569-581. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-16-0324.1>
- (4) Masunaga, H., L'Ecuyer, T. S., & Kummerow, C. D. (2005). Variability in the characteristics of precipitation systems in the Tropical Pacific. Part I: Spatial structure. *Journal of Climate*, 18(6), 823 - 840. <https://doi.org/10.1175/JCLI-3304.1>
- (5) Matsui, T., Chern, J. - D., Tao, W. - K., Lang, W., Satoh, M., Hashino, T., & Kubota, T. (2016). On the land-ocean contrast of tropical convection and microphysics statistics derived from TRMM satellite signals and global storm-resolving models. *Journal of Hydrometeorology*, 17(5), 1425-1445. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-15-0111.1>
- (6) Stephens, G. L., & Wood, N. B. (2007). Properties of tropical convection observed by millimeter-wave radar systems. *Monthly Weather Review*, 135(3), 821-842. <https://doi.org/10.1175/MWR3321.1>
- (7) Hashino, T., Satoh, M., Hagihara, Y., Kubota, T., Matsui, T., Nasuno, T., & Okamoto, H. (2013). Evaluating cloud microphysics from NICAM against CloudSat and CALIPSO. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118, 7273-7292. <https://doi.org/10.1002/jgrd.50564>
- (8) Kikuchi, M., Okamoto, H., Sato, K., Suzuki, K., Cesana, G., Hagihara, Y., Hayasaka, T., & Oki, R. (2017). Development of algorithm for discriminating hydrometeor particle types with a synergistic Use of CloudSat and CALIPSO. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 122, 11,022- 11,044. <https://doi.org/10.1002/2017JD027113>
- (9) Luo, Z., Liu, G. Y., Stephens, G. L., & Johnson, R. H. (2009). Terminal versus transient cumulus congestus: A CloudSat perspective. *Geophysical Research Letters*, 36, L05808. <https://doi.org/10.1029/2008GL036927>

備考 本報告書の図は Kikuchi and Suzuki [2019] から引用した。

# 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

## 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

#### A Study on the cumulus- and large-scale interactions based on a combined analysis of satellite measurements and numerical models

増永 浩彦, 名古屋大学宇宙地球環境研究所, E-mail: masunaga@nagoya-u.jp  
Hirohiko Masunaga, Institute for Space-Earth Environmental Research, Nagoya University

#### 要旨

低緯度大気における鉛直積算水蒸気量の頻度分布は、熱帯湿潤域と亜熱帯乾燥域のはざまに当たる約 48 mm の極小値を挟んで二極構造を持つことが知られる。熱帯と亜熱帯を分かつこの「48 mm 境界」付近で水蒸気量がしばしば特異な変動を示すことが、最近の観測研究からわかってきた。本研究では、熱帯亜熱帯境界における水蒸気の動態解明が熱帯気候場の形成機構の理解に新たな進展をもたらすと考え、水収支・エネルギー収支解析を大気力学場診断に活用する独自手法を衛星観測データに適用した。まず、Aqua 衛星搭載マイクロ波放射計 AMSR-E から 48 mm 境界を同定し、その熱帯側・亜熱帯側に広がる雲構造と放射加熱の実態を CloudSat・CALIPSO 両衛星の雲レーダ・ライダー観測データを用いて明らかにした。また Aqua 衛星赤外サウンダ AIRS から得られる気温・湿度データを組み合わせ水・エネルギー収支解析を実施し、48 mm 境界を挟んで大気の熱力学的状態が定性的に変化することを突き止めた。一方、熱帯・亜熱帯大気の熱力学場を簡略化し表現する概念数値モデルを構築し、観測から示唆される 48 mm 境界付近の水蒸気動態を理論的に説明する道筋を示した。この成果は、既存の静的な気候区分に代わり、日々ゆらぐ気象場と密接に連動する動的な熱帯・亜熱帯という新たな描像を提示するものである。

#### 1. はじめに

よく知られたハドレー循環の描像は、多雨で湿潤な熱帯と晴天で乾燥した亜熱帯という低緯度固有の気候場を、大気力学の立場から一通り矛盾なく説明する。一方、熱帯と亜熱帯を隔てる「境界」の動態が最近の研究で注目されている。Mapes ら ([1]) は衛星観測から得られる熱帯海洋上の鉛直積算水蒸気量（可降水量）の頻度分布が、48 mm 付近の極小値を挟んで二極構造を形成することを指摘した。このヒストグラムによれば、赤道に近い緯度帯（たとえば  $10^{\circ}\text{S}$ - $10^{\circ}\text{N}$ ）では 55 mm 付近に単独の最大値が見られるが、亜熱帯を含む広範囲（ $30^{\circ}\text{S}$ - $30^{\circ}\text{N}$ ）の頻度分布では 30-35 mm に第二の極大値が出現する。従って 48 mm の極小値は、熱帯大気を表現する湿潤ピークと亜熱帯大気に対応する乾燥ピークを分かつ熱帯・亜熱帯境界を定義すると考えられる。しかし古典的なハドレー循環像はこの「境界」に固有な物理的作用を説明する機能を内在しておらず、従って水蒸気分布二極構造の謎を解き明かす回答を持っていない。

二極構造の起源を説明する手掛かりの一つとして Mapes ら ([1]) は、亜熱帯海洋上の下層気塊が境界（すなわち水蒸気量 48 mm ライン）を越えて熱帯側に侵入する瞬間、気塊の水蒸気量がラグランジュ的に急上昇する（すなわち気塊が急激な湿潤化を経験する）観測事例を示した。熱帯・亜熱帯境界で 48 mm をまたぐ速やかな水蒸気量変化が起こることは、すなわち気塊中の水蒸気量が 48 mm 付近の値に留まる時間が相対的に短いことを意味し、48 mm の値が観測される頻度が他の水蒸気値と比較して低いこと、つまり 48 mm を極小値として水蒸気頻度分布が二極構造を持つことが確率的に説明される。水蒸気分布の二極構造問題の本質は、熱帯と亜熱帯の境界を動的に支配する水蒸気の変動特性にあると言い換えてもいい。

気候モデルは水蒸気頻度分布の二極構造を再現するだろうか？ Mapes ら ([1]) はこの疑問に暫定的な答えを与えている。彼らが調査した 3 つの大気大循環モデルのうち、一つのモデルは衛星観測と整合的な二極構造を表現した一方、他の二つはヒストグラム形状もピーク位置もまちまちであった。水蒸気が全球水収支や温室効果を通じて地球気候形成に中心的な役割を果たす事実を鑑みると、気候モデルにおける二極構造再現性の評価とその要因解明は、これまで検討されてこなかった新たな視点から将来気候予測の信頼性を検証する機会につながると期待される。

本研究は、熱帯亜熱帯境界をまたぐ大気の熱力学的状態を衛星観測をもとに解析しその成り立ちを物理的に考察するとともに、数値モデル検証手法のあらたなアプローチに道を示すことを目的とする。

## 2. 問題設定・方法および結果

右表に示す一連の衛星データプロダクトを解析に用いた。主要な変数である鉛直積算水蒸気量に加え、大気熱力学収支を調査するため降水量・潜熱（蒸発）フラックス・放射加熱率を、さらに大気の大気熱力学構造の精査にあたり気温と比湿の鉛直プロファイル解析する。使用するデータはすべて A-Train 編隊に属する衛星に由来しており、サンプリングの整合性を確保するため AMSR-E と AIRS 観測データは CloudSat 観測と同期する衛星直下の観測値のみを解析に使用する。

CloudSat 軌道が水蒸気量 = 48 mm の等高線を横切る地点を同定し、この地点をゼロ点とし軌道方向（ほぼ南北断面に相当する）に沿った距離の関数として各変数をコンポジットする解析を試みた。なお 48 mm という閾値の必然性を検証するため、水蒸気量閾値を 35 mm から 60 mm まで変更してコンポジット解析を繰り返し比較した。

鉛直積算水蒸気量と降水量のコンポジット結果を右図に示す。水蒸気量（上図）は閾値（x 軸のゼロ点）に向けて極側（x 軸正值）から赤道方向（図左方向）に向けて増加するが、深熱帯側に向け一定値（48 mm）に向け収束する様子を示す。また、降水量（中図）は閾値付近でいったん増大したのち、深熱帯で  $80\text{--}90\text{ W/m}^2$  に収束する。次に見るように水蒸気量 48 mm が大気熱収支のエネルギー的中立点に相当すること、および熱帯の平均海面蒸発量が  $85\text{ W/m}^2$  であることを鑑みると、水蒸気量と降水量は熱帯亜熱帯境界でいったん極大値に達したのち深熱帯内部でエネルギー収支および水収支の平衡状態に漸近していくことがわかる。

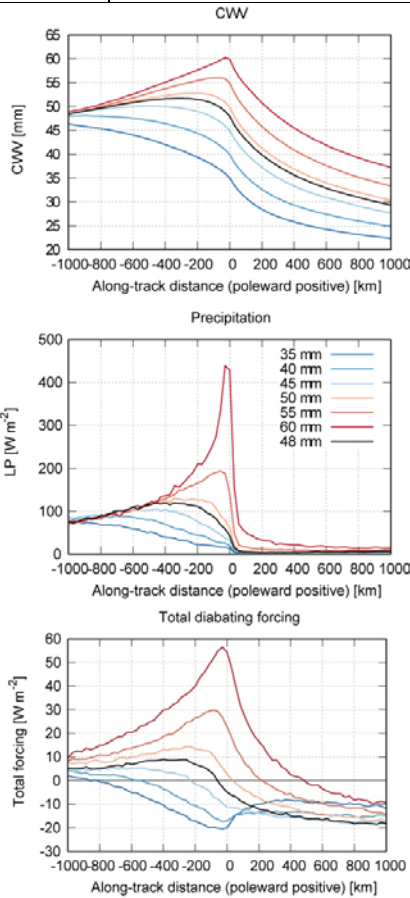
大気の大気全エネルギー強制力（鉛直積算放射加熱 + 潜熱 + 顕熱）のコンポジット解析結果を下図に示す。黒線に着目すると、おおよそ横軸 0 km を境として赤道（熱帯）側に向かって正の強制力、極（亜熱帯）側で負の強制力を示す。すなわち熱帯における大気への熱エネルギー注入および亜熱帯における大気からの熱エネルギー放出が進行していることを示唆し、このコンポジット手法が熱帯と亜熱帯で期待されるエネルギー収支の実態を妥当に捉えていることが確認された。なお、水蒸気量の閾値を 48 mm から別の値に変えたケースでは、全エネルギー強制力が正負を変える地点は横軸 0 km から左右に大きく外れ、物理的整合性を失う。すなわち、48~50 mm が熱帯亜熱帯境界を与える必然的な臨界値であることが大気熱収支の観点から示唆される。

これら衛星観測データ解析を物理的に解釈するツールとして、[2]と[3]で構築した理論的枠組をもとに簡単な概念モデルを構築した。このモデルは、亜熱帯から熱帯へ侵入する大気塊が含む水蒸気量のラグランジュ的時間進化を予報するものである。このモデルによれば、熱帯亜熱帯境界での湿潤化・降水激化ならびに深熱帯域で熱収支・水収支の平衡状態への漸近が自然に再現できることが示された。またモデル結果の解析すると、境界における湿潤化は、対流圏下層の浅い上昇流の強化が関係していることが示唆された。本研究結果は、現在原著論文にまとめており論文誌へ投稿目前である。

## 参考文献

- [1] Mapes, B. E., E.-S. Chung, W. M. Hannah, H. Masunaga, A. J. Wimmers, and C. S. Velden, 2018: The meandering margin of the meteorological moist Tropics. *Geophys. Res. Lett.*, **45**, 1177-1184, doi:10.1002/2017GL076440.
- [2] Masunaga, H. and Y. Sumi, 2017: A toy model of tropical convection with a moisture storage closure. *J. Adv. Model. Earth Syst.*, **9**, doi:10.1002/2016MS000855.
- [3] Masunaga, H. and S. Bony, 2018: Radiative invigoration of tropical convection by preceding cirrus clouds. *J. Atmos. Sci.*, **75**, 1327-1342, doi:10.1175/JAS-D-17-0355.1

| 変数       | 衛星観測装置           | データプロダクト       |
|----------|------------------|----------------|
| 放射加熱率    | CloudSat-CALIPSO | 2B-FLXHR-LIDAR |
| 水蒸気/降水ほか | AMSR-E           | RSS daily      |
| 潜熱（蒸発）   | AMSR-E           | RSS + バルク方程式   |
| 気温・比湿    | AIRS             | AIRX2RET       |



## 1. 研究課題

特定共同研究課題名 大気モデルにおけるパラメタリゼーションの研究

分担課題名 統合陸域シミュレータ ILS の開発

## 2. 共同研究者名

|              |                 |
|--------------|-----------------|
| 芳村 圭         | (東京大学生産技術研究所)   |
| 平林 由希子       | (東京大学生産技術研究所)   |
| Hyungjun KIM | (東京大学生産技術研究所)   |
| 山崎 大         | (東京大学生産技術研究所)   |
| 新田 友子        | (東京大学生産技術研究所)   |
| 日比野 研志       | (東京大学生産技術研究所)   |
| 石塚 悠太        | (東京大学大学院工学系研究科) |
| 竹島 滉         | (東京大学大学院工学系研究科) |

## 3. 研究目的

陸モデルは、約 50 年前の気候モデルに地表面水文過程を取り入れた試みから、気候モデルの一部として、また水文モデルとして、開発・利用が続けられてきた。現在解決すべき課題のひとつとして、長期に渡って解決されていないバイアスの改善が挙げられる。例えば、気候モデル MIROC による結合実験では、夏季に観測よりも気温が高く乾燥する傾向がある。これは第 5 期結合モデル相互比較プロジェクト (Coupled Model Intercomparison Project Phase 5; CMIP5) に参加したモデルの多くに共通しており<sup>1)</sup>、原因のひとつとして陸域過程が適切に表現されていないことが考えられる。また、MIROC の陸モデルである陸面モデル MATSIRO では、観測よりも土壌水分が湿潤で流出量が少ないというバイアスが存在する。モデルの精緻化のためには、適切な物理過程導入が必要であり、例えばよく検証された要素モデルを簡易化して導入することが解決につながる可能性がある。また、陸は大気と海洋に比べて本質的に複雑で不均一であるため、より高解像度に表現することが望ましい。しかしながら、これまでの気候モデルでは、陸域は大気と同じ空間解像度で計算されることが多く、ひとつの格子を複数のサブ格子に分割するモザイクスキーム実装などの取り組みが行われてきたものの、陸域の特性を十分に表現できているとは言

えない。また、これまで気候モデルの一部として開発されてきたため、パラメタリゼーションとして必要以上に単純化されている可能性もある。これらの課題を解決するためには、新しい物理過程を組み込みやすく異なる格子系を用いることが可能な、陸を独立させた新しいフレームワークの方が望ましい。一方で、空間解像度および時間ステップが大気モデルのそれらと同一であることを基本とする強固な結合手法と、なるべく同じ精度で変数をやり取りしなければならない。そこで、適切な格子系による高解像度化の実現、よく検証された要素モデルの簡素な導入の実現、大気・海洋モデルやその他のモデルと物理的に整合した形での結合の実現を目指して、統合陸域シミュレータ (Integrated Land Simulator; ILS) の開発に着手した。本共同研究では、開発の第一段階として、陸面モデル MATSIRO<sup>2)</sup>と河川氾濫モデル CaMa-Flood<sup>3)</sup>を結合したオフライン実験と、MIROC6 AGCM との結合に向けたテストを行うことを目的とする。

#### 4. 研究内容

ILS の陸域は複数のコンポーネントから成り、これらを汎用カップラーJcup<sup>4)</sup>を用いて結合し、MPMD (Multiple Program - Multiple Data) 方式で実行する。個々のコンポーネントの候補として、陸域の物理過程を計算する MATSIRO、河川氾濫モデル CaMa-Flood、人間活動を表現した全球水文モデル H08<sup>5)</sup>、またハザードを計算するモデル等が挙げられる。MATSIRO は、可読性を向上させ新スキームを実装しやすくするために、MIROC から独立させ、Fortran90 でコードを書き換えた。また、I/O は独立したコンポーネントとした。これにより、I/O と大気モデルを入れ替える形で大気モデルとの結合や、複数のコンポーネントで同じフォーマットの入出力が可能になる。Jcup は異なるコンポーネント間のデータの送受信と空間内挿を担当する。これまで、大気・海洋モデルの結合等に用いられた実績があり、ILS と大気モデル・海洋モデルの結合にも同じフレームワークを用いることが可能である。開発と検証を進めた最新版の ILS を大気・海洋モデルと結合することで、気候モデル全体の精緻化・性能向上に貢献することを目指している。また、境界条件作成のためのツールを作成し、ソースコード管理のためにバージョン管理ソフト Git を導入した。

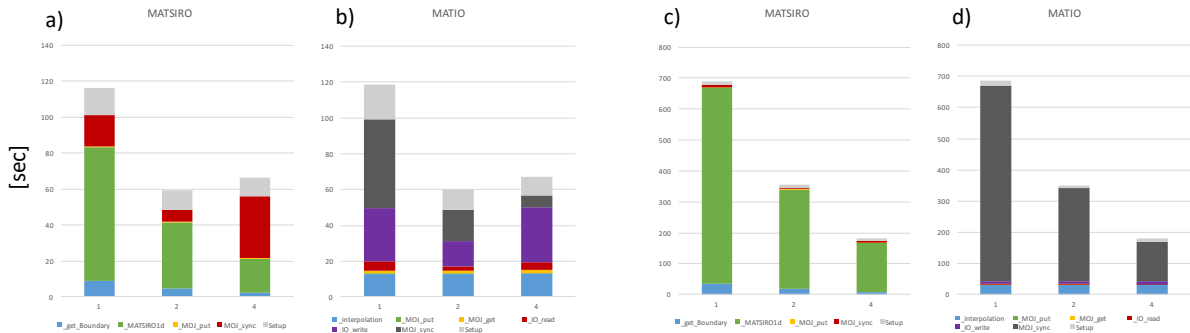


図 1 計算性能の比較。クラスタマシンにおける a) MATSIRO と b) MATIO の計算時間。c-d) a-b) と同様で、ES を用いた場合。

## 5. 研究成果

I/O コンポーネント、MATSIRO、CaMa-Flood を結合して、オフライン実験を行った。気象フォーシングデータとして、GSWP3 を用いた。3 コンポーネントの計算の流れは、以下ようになる。まず、I/O コンポーネントで短波放射、長波放射、降雨量、降雪量、風速、気温、比湿、地上気圧の 8 変数をファイルから読み込み、MATSIRO に送る。MATSIRO はこれらの変数を受け取って計算を行い、出力となる 30 変数を I/O コンポーネントに、流出量を CaMa-Flood に送る。CaMa-Flood では流出量を受け取って計算を行い、計算結果の 12 変数を I/O コンポーネントに送る。最後に、I/O コンポーネントが MATSIRO と CaMa-Flood からデータを受け取り、ファイルに出力する。書き換えたコードの再現性は、1 地点を対象にした MATSIRO のみのサイト実験で、MIROC のフレームワークと書き換えた MATSIRO のコードを含む新しいフレームワークで結果が完全に同じになることを確認している。計算結果は、複数の観測データと比較を行った。次に、計算性能を調べるために、東大のクラスタマシン、京、Oakforest-PACS、地球シミュレータで PE 数を倍増させてテスト実験を行った。簡単のため、MATSIRO と I/O コンポーネントの 2 コンポーネントのみでテストした結果、クラスタマシン、京、Oakforest-PACS では似たような結果となり、PE 数を増やしていくとファイルへの書き込みが全体の律速になることがわかった (図 1-a, b)。一方、地球シミュレータでは MATSIRO の計算が律速になっていることがわかった (図 1-c, d)。最後に、MIROC6 AGCM との結合のテストを行った。オフライン実験で I/O

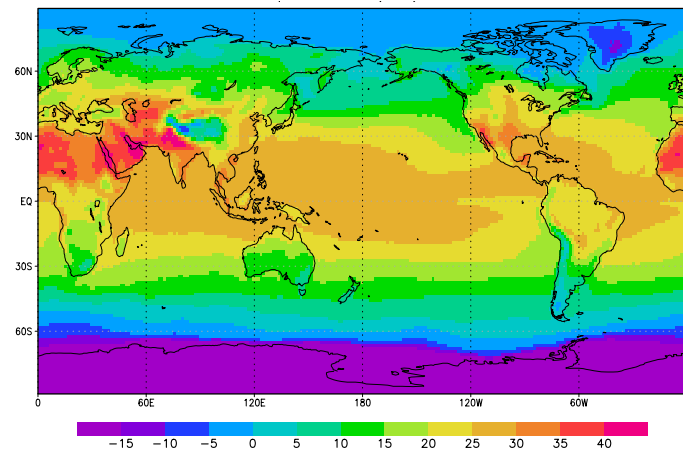


図2 MIROC6 AGCM と ILS の結合実験 1979 年 6 月の 2m 気温 (°C)

コンポーネントから読み込んでいた気象要素を Jcup を通して AGCM から受け取るように変更し、6 ヶ月間のテスト実験を行った結果、気象場や水熱収支に問題なく計算できることがわかった (図 2)。

## 6. 今後の問題点

本年度は、陸オフライン実験と計算性能評価、MIROC6 AGCM との結合テストを行い、気候モデルとの結合に向けた課題を検討した。来年度以降は、ベクトル機向けのチューニング、大気モデルとの最適な結合方法の検討、大気海洋モデルとの結合テストを通して、気候モデルとの結合を進める予定である。

## 7. 参考文献

- 1) Mueller, B., and Seneviratne, S. I.: Geophys. Res. Lett., 41, 128–134 (2014) Systematic land climate and evapotranspiration biases in CMIP5 simulations.
- 2) Nitta, T. et al.: J. Climate, 27, 9, 3318–3330 (2014) Representing variability in subgrid snow cover and snow depth in a global land model: Offline validation.
- 3) Yamazaki, D. et al.: Water Resour. Res., 47, 4, W04501 (2011) A physically based description of floodplain inundation dynamics in a global river routing model.
- 4) Arakawa et al.: Procedia Comput. Sci., 4, 1516–1525 (2011) Data exchange algorithm and software design of KAKUSHIN coupler Jcup
- 5) Hanasaki, N. et al.: Hydrology and Earth System Sciences, 12, 1007–1025 (2008) An integrated model for the assessment of global water resources–Part 1: Model description and input meteorological forcing.

**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：** 雲解像モデルにおける物理過程の高度化

**共同研究者名：** 安永数明（富山大学）・奥川 椋介（富山大学）

### 研究目的

本課題では、東京大学・海洋研究開発機構・理化学研究所において共同開発している全球雲解像モデル NICAM や、理化学研究所において開発している雲解像モデル SCALE (Scalable computing for Advanced Library and Environment) を用いて、熱帯域や中緯度域の雲降水システムを対象に水平格子間隔数 km の数値計算を行う。計算結果を様々な観測データと比較することで、幅広い地域における雲降水過程の数値モデルによる再現性について調べる。また色々な感度実験を行い、その結果を比較することで、数値モデルにおける様々な物理過程（雲微物理、乱流、放射等々）の高度化・精緻化に関する課題を明らかにする。

### 研究内容

本年度は、SCALE を用いて熱帯の多島海（海大陸域）を対象とした幾つかの数値実験を行い、沿岸降水帯の再現性を調べた。より具体的には、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（Pre-YMC）期間に見られた沿岸域の降水帯に着目し、SCALE による領域再現実験の結果と観測との比較による再現性の検証を行った。特にモデルの雲微物理過程における降水の再現性の違いを比較し、改善策を検討した。

### 研究成果

海大陸域は、世界で最も降水量の多い地域の 1 つであり、地球規模の熱・水循環に重要な役割を果たしている。この地域の気候学的な降水分布の極大は、海岸線付近に集中していることが知られている（例えば Ogino et al. 2016）。本研究では、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（Pre-YMC）期間中について、沿岸降水帯に着目した再現実験をおこなった。使用したモデルは領域モデル SCALE で、初期値・境界値として、NCEP (National Centers for Environmental Prediction) final analysis を使用した。計算領域は東西方向に 85-115E、南北方向に

12S-8N, 水平格子間隔は(南北, 東西共に) 3.5 kmで, 鉛直には約 80 層, 雲微物理過程として 1 モーメントスキームを使用している(積雲パラメタリゼーションは使用していない)。数値実験は, 11 月 22 日を初期日として, 12 月 13 日までの 21 日間積分をおこなった。

図 1 に, 計算期間で平均した(主として)マイクロ波を用いた衛星観測から見積もられた降水量(GSMaP: Global Satellite Mapping of Precipitation)と, モデルによって再現された降水強度の分布を示す。モデルでは, GSMaP のような沿岸域(海側)での極大は, 再現されていない(図 1 b)。これは, SCALE だけの特殊な問題ではなく, 他の様々なモデルにおいても, 海大陸域の沿岸降水帯の正確な再現はできていない(例えば Love et al. 2011, Vincent et al. 2017)。そこで, この沿岸降水帯の再現性の向上を目指して, 幾つかの感度実験を実施した。

図 1 : 計算期間で平均した降水の水平分布 (mm/hr)。(a) 衛星観測から見積もられた降水 (GSMaP) と, (b)モデルによって計算された降水。

熱帯海洋上においては, 大気中の総水蒸気量(可降水量)と降水量は強い比例的な関係性を持つことが知られている(例えば, Bretherton et al. 2004)。モデルによる計算期間平均の可降水量を NCEP final analysis と比較すると, スマトラ島西岸の海上で 1~2 mm 程度過小に再現されていた(図略)。このことから水蒸気に着目し, その収支式を基に感度実験を構成した。ただし, 水蒸気収支式は(被説明変量の)降水量を含むため, 本研究では MSE 収支式を水蒸気の収支式として使用した。行った感度実験は, 雲氷の落下速度を小さくする実験(ICE\_Run), 下面の境界条件としての

SST データを、NCEP final analysis から NOAA OI-SST に入れ替えた実験 (SST\_Run), 移流項に関する実験として上空の雪を増加させるように、切片パラメータ・捕捉率の値を変更した実験 (MP\_Run), ICE\_Run と SST\_Run を組み合わせた実験 (ICE+SST\_Run) の合計 4 つである。ここで、ICE\_Run は、上層の氷雲を増やす効果を持ち、放射加熱を通じて大気中の水蒸気量を増加させることが期待される。また SST\_Run で使用した OI-SST データは、NCEP final analysis よりも沿岸域において高温であり、地表面熱フラックスを通じて大気中の水蒸気量を増加させることが期待される。MP\_Run は、Deposition Growth を通じた Top-Heavy な加熱プロファイルにより、大気中の水蒸気量が減少することが期待される。

図 2 は、それぞれの感度実験で再現された降水強度の分布（計算期間平均）である。ICE\_Run では、計算期間平均の可降水量は CNTL に比べ計算領域全体で増加し（図略）、それに対応する形で、降水強度も計算領域全体で増加していた（図 2 a）。しかし、沿岸降水帯に関しては、CNTL 同様はつきりしなかった。SST\_Run では、可降水量、降水強度共に CNTL に比

図 2 : 感度実験における再現された降水の分布 (mm/hr)。 (a) ICE\_Run, (b) SST\_Run, (c) MP\_Run, (d) ICE+SST\_Run の結果。

べて、スマトラ島南西岸で増加した（図 2 b）。一方で MP\_Run では、可降水量と降水強度共に CNTL に比べて沿岸域で顕著に減少した（図 2 c）。また MP\_Run では、降水域がまとまる傾向にあったのは興味深い。沿岸域の降水量を増やす結果を示した 2 つの ICE\_Run と SST\_Run を組み合わせた ICE+SST\_Run では、可降水量が沿岸域を含め計算領域全体で増加し、降水の分布は衛星観測で得られたものと同様に、スマトラ島南西岸の沿岸域で極大をもつ分布となった（図 2 d）。しかし ICE+SST\_Run において、計算期間で平均した水蒸気の鉛直プロファイルを、現地観測のゾンデデータと比較したところ、CNTL にみられた全層にわたるドライバイアスのうち、6km より上層では改善が見られたが、下層のバイアスは変わらなかった（図略）。

#### 今後の問題点

上記のように、沿岸降水帯の再現性に改善がみられた ICE+SST\_Run においても、現地観測のゾンデデータに比べて、下層の水蒸気量で依然として過少となっていた。この下層のドライバイアスは、モデルの水平解像度が不足しているために、小規模の積雲の水蒸気の上方輸送効果が過小評価されている可能性や、（上層の雲氷、雪、雹等の落下速度に比べて）降水の落下速度が速すぎて蒸発冷却が十分でない可能性が考えられる。2019 年度は、この 2 点に着目しながら実験を続けていく予定である。

#### 研究発表

- 奥川 椋介，安永 数明，2018: SCALE-RM を用いたスマトラ島西岸の沿岸降水帯に関する数値実験，熱帯気象研究会（名古屋）
- 奥川 椋介，安永 数明，2018: SCALE-RM を用いたスマトラ島西岸の沿岸降水帯に関する数値実験，日本気象学会秋季大会，114，B164（仙台）

#### 参考文献

- Bretherton et al., 2004: Relationships between water vapor path and precipitation over the tropical oceans. *J. Clim.*, **17**, 1517-1528.
- Love et al., 2011: The diurnal cycle of precipitation over the Maritime Continent in a high-resolution atmospheric model. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **137**, 934-947.
- Ogino, et al., 2016: How Much is the Precipitation Amount over the Tropical Coastal Region? *J. Clim.*, **29**, 1231-1236.
- Vincent, and Lane, 2017: A 10-year austral summer climatology of observed and modeled intraseasonal, mesoscale, and diurnal variations over the maritime continent. *J. Clim.*, **30**, 3807-3828.

# 全球雲解像モデルの開発及びデータ解析

## 全球非静力学モデルの高度化および気象予測研究への応用

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

那須野 智江, 海洋研究開発機構, E-mail: nasuno(at)jamstec.go.jp  
野田 暁, 海洋研究開発機構, E-mail: at\_noda(at)jamstec.go.jp  
中野 満寿男, 海洋研究開発機構, E-mail: masuo(at)jamstec.go.jp  
山田 洋平, 海洋研究開発機構, E-mail: yoheiy(at)jamstec.go.jp  
池田 美紀子, 海洋研究開発機構, E-mail: mikikoi(at)jamstec.go.jp  
原 政之, 埼玉県環境科学国際センター, E-mail: mikikoi(at)jamstec.go.jp  
八代 尚, 理化学研究所 計算科学研究センター, E-mail: hisashi(at)riken.jp  
Tomoe Nasuno, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology  
Akira Noda, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology  
Masuo Nakano, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology  
Yohei Yamada, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology  
Mikiko Ikeda, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology  
Masayuki Hara, Center for Environmental Science in Saitama  
Hisashi Yashiro, Center for Computational Science, RIKEN

#### 要旨

海大陸西部（インドネシア周辺域）における対流活動の実態を明らかにし、その気象・気候への影響に関する理解を深めることを目的として”Years of the Maritime Continent (YMC)”集中観測プロジェクト期間を対象とする全球非静力学モデル NICAM を用いた計算データを活用し、日周期変動に関する解析を行った。対流の振舞いを理解する上で重要となる水蒸気の鉛直輸送量を高解像度（7 km メッシュ）計算データから算出し、海陸での違いや年による環境場の違いの影響を調べた。その結果、陸上では夕方（朝）に極大（極小）をもつ水蒸気輸送の日周期が明瞭に見られた。海上では日周期の位相が反転し、日周期の振幅は陸上が海上の約 2～3 倍であった。これらの特徴は 2015 年（強い El Nino 年）と 2017 年（La Nina 年）に共通して見られたが、特に 2015 年の陸上で振幅が最も大きかった。全体として、海上では 2017 年に 2015 年に比して顕著な湿潤化が対流圏全層で見られ、陸上では特に 2015 年の対流圏下層で顕著な湿潤化が見られた。これらの結果は、陸上、特に El Nino の特徴をもつ環境場において、日周期変動による水蒸気輸送が大規模場に影響を及ぼすことを示唆する。

#### 1. はじめに

全球非静力学モデルによる高解像度数値実験は、気象・気候に関する変動現象をシームレスに調べるための研究手法として有用である。本課題では、全球雲解像モデル NICAM (Satoh et al. 2014) を用いた数 km～十数 km メッシュの数値実験および解析を行うことにより、雲降水現象のメカニズムの理解およびモデルにおける再現性の向上に関する指針を得ることを目的としている。世界有数の対流活動域である海大陸（インドネシア周辺域）では、海陸分布や局地的循環により駆動される日周期変動が卓越し、大規模場に大きな影響を及ぼす。海洋研究開発機構では国際プロジェクト YMC (Years of the Maritime Continent) 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；池田・那須野, 2018）。H29 年度の研究については、2015 年の予測計算における降水の再現性の検証結果を報告した。本年度は、対流の振舞いを理解する上で重要となる水蒸気輸送について定量化を行い、海陸での違いや年による環境場の違いの影響の観点から考察する。

#### 2. 問題設定・方法

全球高解像度計算では、直接計測の困難な鉛直風速を含む、対流活動に深く関わる物理量を時空間的に密な分解能で取得することができる。この利点を活かし、NICAM (7km メッシュ) による 7 日計算（1 回/日、0000 UTC 初期値）の 6 時間間隔の出力（風速、水蒸気量）を用いて水蒸気の移流項を算出した（具体的な手順は Nasuno et al. 2017 に詳述）。本研究では、スマトラ島を含む海大陸西部（90–120E, 12S–8N; Fig. 1 e, f の描画範囲）を対象領域とし、陸上と海上の其々について、2015 年（11 月 1 日 - 12 月 25 日初期日、55 セット）および 2017 年（11 月 15 日 - 翌年 1 月 15 日初期日、62 セット）其々のセットの各時刻のコンボジットの比較を行った。ここでは、移流項の主成分である鉛直輸送項について結果を示す。

#### 3. 結果と考察

鉛直水蒸気移流の鉛直分布のコンボジット解析から、陸上では水蒸気の上方輸送による湿潤化が夕方（1200 UTC; 1900 LT）に極大、朝（0000 UTC; 0700 LT）に極小となり、海上では逆位相となること、陸上での日周期の振幅（日内較差）が海上の 2～3 倍に及ぶことが分かる（Fig. 1 a–d）。これらは、降水の日周期変動に関する観測事実（e.g., Yokoi et al. 2017）と整合的である。顕著な El Nino 年であった 2015 年と La Nina 年であった 2017 年では、海大陸における対流の振る舞いが大きく異なる。

り、2015 年（2017 年）には海大陸で対流活動が抑制（促進）される傾向が見られた。数値計算はこの傾向をよく再現しており、

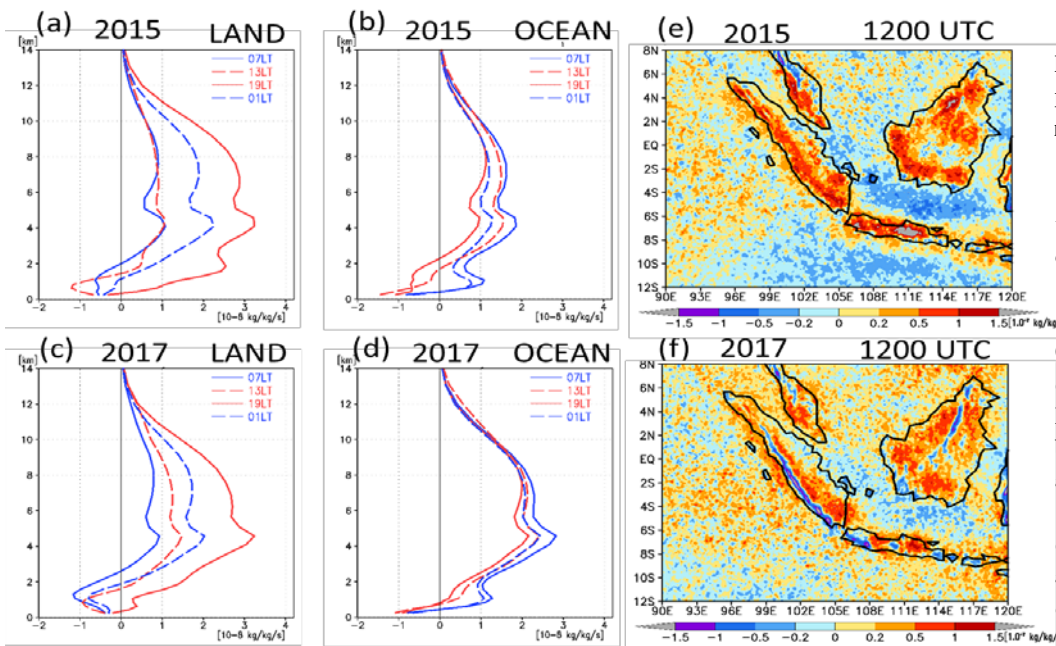


Fig. 1 Composite profiles of vertical moisture advection over (a) (c) land and over (b) (d) ocean averaged in the western maritime continent [domain shown in (e) (f)] at 0000 UTC (0700 LT; blue solid), 0600 UTC (1300 LT; blue dashed), 1200 UTC (1900 LT; red solid), and 1800 UTC (0100 LT; red dashed) and the horizontal maps ( $z = 2$  km) at 1200 UTC during (a) (b) 2015 and (c) (d) (f) 2017 campaign periods.

対応して、特に海上において El Nino に伴う上昇流の弱化による湿潤化の抑制傾向が明瞭に見られる (Fig. 1 b, d)。陸上では年による差異は海上ほどではないが、ピーク時刻である夕方に、2015 年には対流圏下層（高度 2 km 付近）において 2017 年の約 2 倍の湿潤化が見られる (Fig. 1 a, c)。高度 2 km における水蒸気輸送の水平分布を比較すると、2015 年には海上での乾燥化傾向と山岳域を中心とする陸上での強い湿潤化が確認できる (Fig. 1 e, f)。この結果は、陸上では大規模な上昇流が抑制された状況下で、局所的なメカニズム（例えば日射に起因する地面付近の大気的不安定化）により日周期変動に伴う水蒸気輸送が強化され、対流活動が活発化することを示唆する。これはまた、海大陸の陸上では、El Nino 年には、海面水温偏差への応答として強化される下層東南風の山岳強制上昇により正の降水偏差が生ずるという Jiang and Li (2018) らの主張とも整合的である。日周期変動による水蒸気輸送が大規模場や季節内振動現象に及ぼす影響に関しては、陸上で特にインド洋で対流活動が活発化する環境場において大きくなることが示唆される。

#### 4. まとめと今後の展望

地球上の気象・気候場における海大陸の対流活動の役割の理解を深めることを目的として、YMC 集中観測期間を対象とする全球 7 km メッシュ計算データを用いた日周期変動に関する解析を行った。対流の振る舞いを理解するため、水蒸気の鉛直輸送量を算出し、海上と陸上や環境場の違いについて調べた結果、陸上（海上）では夕方（朝）に極大をもつ（降水の変動と整合的な）水蒸気輸送が見られ、その振幅は陸上の方が有意に大きかった。また、2015 年と 2017 年の比較から、海面水温偏差等による大規模な力学場・熱力学場の変動と海上での水蒸気輸送の変動はよく対応するが、陸上では局所的なプロセスを介してより複雑な応答が現れることが分かった。この結果は、季節内振動の位相（対流活発域の海大陸に相対的な位置）に伴う大規模場の変動についても当てはまる (Nasuno 2019)。今後の研究において、El Nino 現象等の年スケールの大気海洋変動の影響と季節内の変動現象の影響についてより詳しく調べ、日周期変動と大規模場の相互作用を明らかにしていくことは重要な課題である。また、モデリングの観点からは、陸上での局所的なプロセスを適切に表現するための雲微物理過程や地表面過程、地形の表現等の観測データによる検証と精緻化が重要な課題として挙げられる。これまでの研究を基にこれらの課題に取り組みたい。

#### 参考文献

- (1) Satoh, M., Tomita, H., Yashiro, H., Miura, H., Kodama, C., Seiki, T., Noda, A. T., Yamada, Y., Goto, D., Sawada, M., Miyoshi, T., Niwa, Y., Hara, M., Ohno, Y., Iga, S., Arakawa, T., Inoue, T., Kubokawa, H., 2014: The Non-hydrostatic Icosahedral Atmospheric Model: Description and Development. Progress in Earth and Planetary Science, 1, 18.
- (2) 池田美紀子、那須野智江, 2018: 全球非静力学モデルを用いた準実時間予測計算システムの構築と JAMSTEC 集中観測における実利用, JAMSTEC Research and Development, 27 (9), 47-56.
- (3) Nasuno, T., K. Kikuchi, M. Nakano, Y. Yamada, M. Ikeda, H. Taniguchi, 2017: Evaluation of the near real-time forecasts using a global nonhydrostatic model during the CINDY2011/DYNAMO. J. Meteor. Soc. Japan, 95, 345-368.
- (4) Yokoi, S., S. Mori, M. Katsumata, B. Geng, K. Yasunaga, F. Syamsudin, Nurhayati, and K. Yoneyama, 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.
- (5) Jiang, L., and T. Li, 2018: Why rainfall response to El Niño over Maritime Continent is weaker and non-uniform in boreal winter than in boreal summer. Clim. Dyn., 51, 1465-1483.
- (6) Nasuno, T. 2019: Moisture transport over the western Maritime Continent during the 2015 and 2017 YMC Sumatra campaigns in global cloud-system-resolving simulations, in revision.

## 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

Open-MP やキャッシュチューニング等の基本的な手法はコンピューター業界では確立されたものではあるが、個々のソフトウェアに適応して十分な高速化を得るためにはかなりの試行錯誤が必要となる。海洋モデルではトレーサーの移流の精度を上げると再現性のパフォーマンスが向上することがわかっている。MRI.COM は現状では Prather (1986)により提唱された Second-Order Moments Scheme (SOM)を標準の移流スキームとして用いている。このスキームは各格子におけるトレーサーの二次のモーメントを保存させることで移流されるトレーサーの形状などをよく保存することができる。このスキームは非常に精度が高いが、その代償としてメモリーや計算量が多く、現状では海洋モデルで最も計算負荷が高いルーチンとなっている。SOM のルーチンの計算効率を上昇させることは全体の海洋モデルの計算効率上昇に大きく貢献するため、本年度は、まず SOM ルーチンのキャッシュチューニングを試みた。SOM では数多くの配列を使用するが、調査の結果、Original のコードでは配列の個数が多すぎるためキャッシュからはみ出ることで速度低下が現れていることがわかった。（図 1.）Tune 後の新コードでは毎回同時に呼ばれる配列を一つの配列にまとめることで、4%ほどあった L1 キャッシュミスが 25-50%程度減少することで、SOM のルーチンで 17%の速度向上を得、OGCM 全体でも 5%程度の高速化に繋がった。

## original

```
fx (i,j,k) = alfq * (sx(irm,j,k) + ss * 3.0d0 * alf1 * sxx(irm,j,k))
fxx(i,j,k) = alf  * alfq * sxx(irm,j,k)
fy (i,j,k) = alf  * (sy(irm,j,k) + ss * alf1 * sxy(irm,j,k))
fz (i,j,k) = alf  * (sz(irm,j,k) + ss * alf1 * szx(irm,j,k))
fxy(i,j,k) = alfq * sxy(irm,j,k)
fzx(i,j,k) = alfq * szx(irm,j,k)
fyy(i,j,k) = alf  * syy(irm,j,k)
fzz(i,j,k) = alf  * szz(irm,j,k)
fyz(i,j,k) = alf  * syz(irm,j,k)
```

## Tune 後

```
ff(ix, i,j,k) = alfq * (sx(irm,j,k) + ss * 3.0d0 * alf1 * sxx(irm,j,k))
ff(ixx,i,j,k) = alf  * alfq * sxx(irm,j,k)
ff(iy ,i,j,k) = alf  * (sy(irm,j,k) + ss * alf1 * sxy(irm,j,k))
ff(iz ,i,j,k) = alf  * (sz(irm,j,k) + ss * alf1 * szx(irm,j,k))
ff(ixy,i,j,k) = alfq * sxy(irm,j,k)
ff(izx,i,j,k) = alfq * szx(irm,j,k)
ff(iyy,i,j,k) = alf  * syy(irm,j,k)
ff(izz,i,j,k) = alf  * szz(irm,j,k)
ff(iyz,i,j,k) = alf  * syz(irm,j,k)
```

図 1: SOM の original コードと Tune 後のコード

また、OpenMP 指示行の挿入による高速化も試みた。気象研で用いられている FX100 においては、OpenMP 指示行がなくとも自動並列化が働くため効果は限定的であるが、OpenMP 指示行を挿入した方が `prefetch` がループ内により多くの配列に働き（図 2）、結果として L1 キャッシュミスを一割程度下がり、わずかではあるが高速化に繋がった。このように、OpenMP の方は劇的な改善至らないことが多いが、地道な努力で少しずつの改善を積み重ねていくことができる可能性を示した。

### Original Code

```
do k = 1, km
  <<< Loop-information Start >>>
  <<< [PARALLELIZATION]
  <<< Standard iteration count: 4
  <<< Loop-information End >>>
  do j = 1, jmu
    <<< Loop-information Start >>>
    <<< [OPTIMIZATION]
    <<< PREFETCH(HARD) Expected by compiler :
    <<< dzu, dzumin
    <<< PREFETCH(SOFT) : 48
    <<< SEQUENTIAL : 48
    <<< ddzu: 24, aind1: 24
    <<< Loop-information End >>>
    do i = 2, imu
      aind1(i,j) = 0.D0
      dzumin(i,j,k) = dzu(i,j,k)
      ddzu(i,j) = dzu(i,j,k) - dzu(i-1,j,k)
      if (ddzu(i,j) > 0.D0) then
        dzumin(i,j,k) = dzu(i-1,j,k)
        aind1(i,j) = 1.D0
      else
        ddzu(i,j) = -ddzu(i,j)
      end if
    end do
  end do
end do
```

### Tuned Code

```
!$omp parallel
!$omp do private(i,j,aind1,aind2,ddzu,ddzv,h11,h12,h13,h14)
do k = 1, km
  do j = 1, jmu
    <<< Loop-information Start >>>
    <<< [OPTIMIZATION]
    <<< PREFETCH(HARD) Expected by compiler :
    <<< dzu
    <<< PREFETCH(SOFT) : 72
    <<< SEQUENTIAL : 72
    <<< dzumin: 24, (unknown): 48
    <<< Loop-information End >>>
    do i = 2, imu
      aind1(i,j) = 0.D0
      dzumin(i,j,k) = dzu(i,j,k)
      ddzu(i,j) = dzu(i,j,k) - dzu(i-1,j,k)
      if (ddzu(i,j) > 0.D0) then
        dzumin(i,j,k) = dzu(i-1,j,k)
        aind1(i,j) = 1.D0
      else
        ddzu(i,j) = -ddzu(i,j)
      end if
    end do
  end do
end do
```

図 2: OpenMP 指示行挿入前(original code)と挿入後(tuned code)のコードおよび診断メッセージ。後者では Prefetch にかかる配列サイズが 48 から 72 へと 1.5 倍になっていることがわかる。

### 今後の問題点

高速化はスパコンのアーキテクチャ依存であるところが大きく、今回の最善が時期スパコンでの最善とは限らない。気象研究所では 2020 年 3 月にスパコンシステムの更新が見込まれている。これらのスパコンでの対応が必須となると思われる。以後、可能であれば GPU の利用なども考慮する必要があるかもしれない。

## 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

坂本雅巳 荒波恒平 佐藤均 下河邊明 松川知紘 上田学 鍋谷堯司（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地形性抵抗・積雲による運動量輸送・陸面などの物理過程の精緻化を結合した実験を行った。以下では、現在開発中の気象庁全球モデルの物理過程について改良点と確認された効果を報告する。

### 6.1 予測精度の向上に向けた物理過程の研究

本年度は、以下に示す気象庁全球モデル（気象庁 2019）の課題などに対する物理過程の検討を行った。

- 日本付近でトラフが浅く表現される誤差
- 熱帯上層の東風が強いバイアス
- 夏期の中央アジアなど乾燥域の夜間にみられる地上気温の高温バイアス

具体的には、以下に示した物理過程の精緻化を気象庁全球モデルに適用し、データ同化サイクルを含む実験を実施して、予測の変化を確認した。

- 地形性抵抗の扱い
  - これまで、サブグリッド地形により生じる大気の抵抗効果に関しては、Iwasaki et al.(1989)による重力波過程及び、境界層過程における混合長の調整により取り扱っていた。今回、特に対流圏の下層においてより抵抗効果を精緻に表現するため、Lott and Miller (1997), Vosper(2015)による重力波過程と blocked flow 過程及び、Beljaars et al. (2004)による地形性乱流抵抗のパラメタリゼーションを採用した。
- 陸面過程

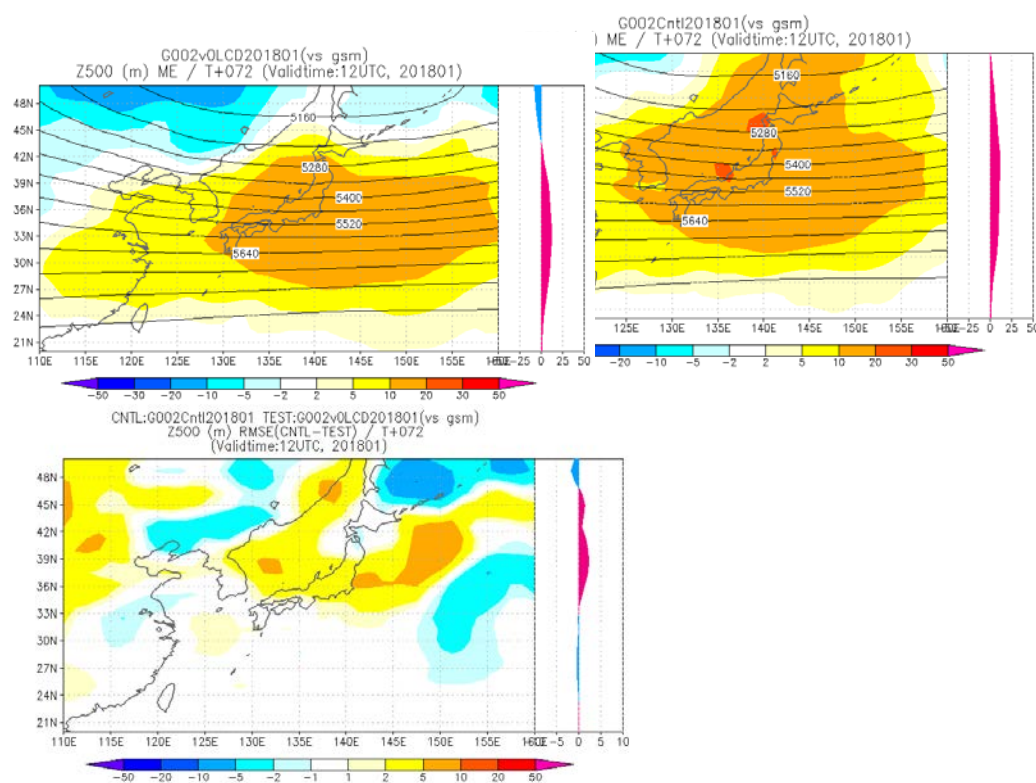
- ▶ 夏期の中央アジアなど乾燥域の夜間にみられる地上気温の高温バイアスを抑制するため、裸地面の蒸発と下草断熱効果の計算方法を変更した。関連して、地上比湿の多湿バイアスを抑制するため、日陰を考慮した気孔抵抗の扱い等の調整を行った。

#### ● 積雲による運動量輸送の扱い

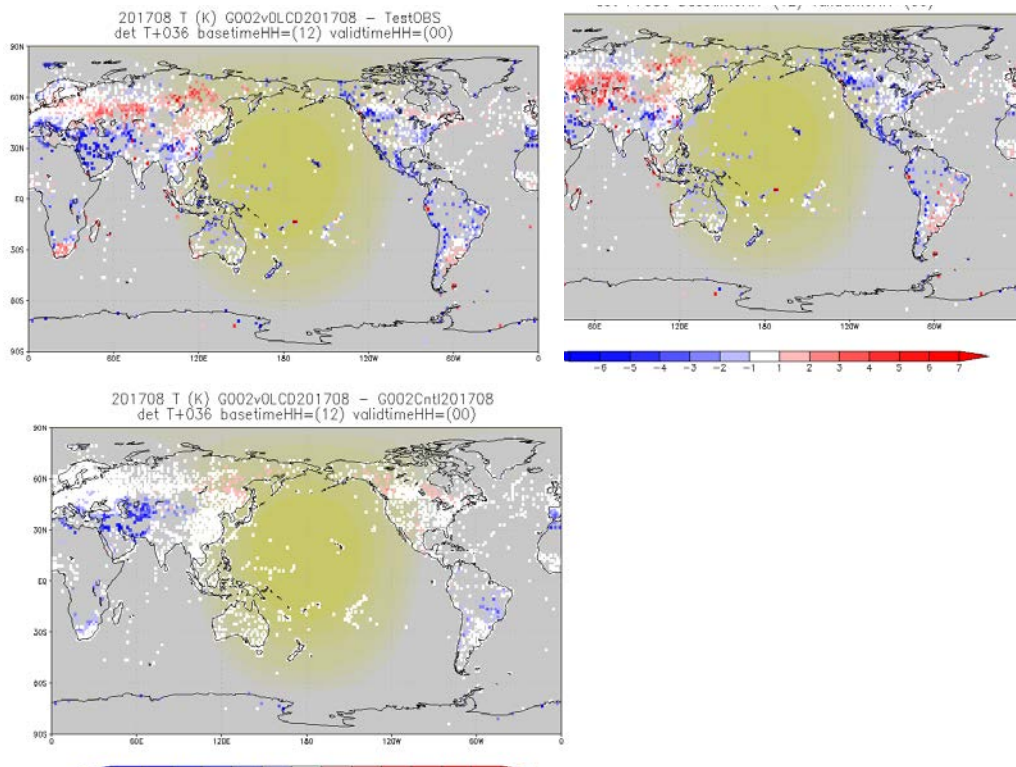
- ▶ 積雲による運動量輸送の扱いを精緻化するため、運動量の輸送で用いる雲モデルを熱・比湿の輸送で用いるものと揃え、また気圧傾度力による効果を加えるなどの変更を行った。

## 6.2 予測誤差の変化

冬期の日本付近でトラフの予測の変化を確認するために、現在の気象庁全球モデル (CTRL) と変更を加えたモデル (TEST) について、2018 年 1 月の 12UTC を初期値とする 72 時間予報の 500hPa 高度 (Z500) の平均誤差 (ME) と二乗平均平方根誤差 (RMSE) を図 1 に示す。Z500 の ME も RMSE も日本周辺で減少しており、改善の効果が確認できる。



夏期の中央アジアなど乾燥域の夜間の気温予測の変化を確認するために、2017 年 8 月の 12UTC を初期値とする 36 時間予報 (中央アジア付近が早朝となる時刻) の地上気温を SYNOP 通報に対する CTRL と TEST の ME と両者の差を図 2 に示す。チベットから中央アジアの南部で気温が下がって ME が減少していることが確認できる。



また、熱帯の対流圏上層でラジオゾンデ観測に対して東風が強すぎる問題についても、200hPa 付近にあったバイアスが軽減する効果が確認できた（図略）。

当初の目的である問題点に対する改善の効果は概ね確認できた。しかし、急峻な地形のある地域で成層圏上層でデータ同化での衛星観測データの利用数が減少し、熱帯の対流圏下層の風の予測精度が悪化するなどの新たな問題点も見つかった。

### 6.3 統計検証の結果

2017 年 7 月～10 月の 4 か月間でデータ同化サイクルと予報の実験を行い、台風予測の変化についても確認を行った。今回の物理過程の変更を加えても台風進路予測については大きな改善は確認できなかった（図略）。台風の中心示度と強度については、示度がやや深まり、強めの台風を予測する傾向があった。

図 3 に北半球の Z500 の RMSE の比較を示す。2017 年 8 月・2018 年 1 月ともに予報期間の後半に、RMSE が減少する傾向であることが確認できる。日本域や北半球の海面気圧の解析値に対する検証でも改善する傾向がみられる。その一方で、850hPa と 250hPa の風については、解析値に対してもラジオゾンデ観測に対しても誤差が増える傾向であった。

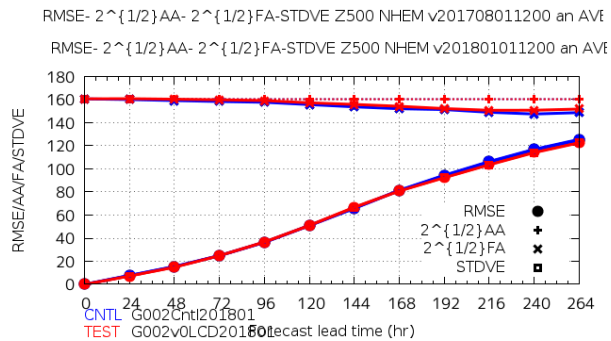


図3. 2017年8月（左）及び2018年1月（右）の北半球領域（20° -90° N）の予報時間毎のZ500の解析値に対するRMSEの比較。青線が現在の気象庁全球モデル

## 7. 今後の課題

今年度は、日本付近でトラフが浅く表現される問題や、夏期の中央アジアなど乾燥域の夜間高温バイアスを改善するための物理過程の研究に取り組んだ。数値予報実験を行う中で、急峻な地形の地域での成層圏での衛星観測利用数減少、熱帯の対流圏下層の風の予測精度が悪化などの問題点も見つかり、今回の物理過程の変更は今年度中に現業数値予報システムに適用できなかった。変更を加える物理過程の精査とそれらの調整を進めながら、現業数値予報システムの精度向上が行えるような物理過程の統合的な開発に引き続き取り組むことにする。

## 参考文献

- Beljaars, A. C. M., A. Brown, and N. Wood, 2004: A new parametrization of turbulent orographic form drag. *Q.J.R. Met. Soc.*, **130**, 1327-1347.
- Iwasaki, T., S. Yamada, and K. Tada, 1989: A parameterization scheme of orographic gravity wave drag with two different vertical partitionings part I: Impacts on medium-range forecasts. *J. Meteor. Soc. Japan*, **67**, 11 - 27.
- Lott, F., and M. Miller, 1997: A new subgrid - scale orographic drag parametrization: Its formulation and testing. *Q.J.R. Met. Soc.*, **123**, 101-127.
- Vosper, S. B., 2015: Mountain waves and wakes generated by South Georgia: implications for drag parametrization. *Q.J.R. Met. Soc.*, **141**, 2813-2827.
- 気象庁 2019: 全球モデルの改良と展望. 数値予報課報告・別冊 65 号, 気象庁予報部.

**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）  
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）  
柳町 隆裕（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）  
張 愛琦（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）  
大貫 陽平（九州大学応用力学研究所・助教）

**研究目的：**

海洋の深層循環は、内部波が散逸する際に生じる鉛直乱流混合によって浮力を得た深層水が湧昇することで維持されている。しかしながら、海洋中深層における乱流混合過程には未知な点が多く、既存の海洋大循環モデルで用いられている混合パラメタリゼーションは、現実の乱流混合過程を正しく表現しているとは言い難い。気候システムの理解に向けて、混合パラメタリゼーションの高精度化は喫緊の課題である。

これまでの乱流観測によって、潮汐流が粗い海底地形上を通過する際に発生する内部波（内部潮汐）が乱流混合の「ホットスポット」を形成することが明らかになってきた。この結果を受けて、国内外のグループにおいて、内部潮汐が引き起こす局所的な乱流混合過程を海洋大循環モデルに組み込む動きが加速している。しかしながら、既存の混合パラメタリゼーションでは、内部潮汐が海底から鉛直上方へとエネルギーを伝える距離（乱流混合の減衰スケール）を500 mに固定する方法が主流であり、内部潮汐波の波長や振幅、コリオリ周波数といった、海域によって異なる要素を考慮していないという問題点がある。

Hibiya et al. (2017) は、深海底凹凸地形上で半日周期の潮汐流によって励起された内部波が背景の普遍的平衡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。彼らは、海底地形上を通過する潮汐流が生成する内部波を、斜め方向へ直進するビーム型構造を持つ内部潮汐と、波束が上方へ大きく広がる準定常風下波に分類し、波動の種類に応じて混合の減衰スケールに大きな違いが生じることを示した。ただし、この研究では、潮汐によって生成した内部波は周囲の波との相互作用によって減衰することを仮定している。

これに対して、現実のビーム型の内部潮汐は、一方向に集中してエネルギーを伝えるため強い流速シアや密度面変位を伴うことが多く、これらによって引き起こされる不安定が乱流生成において重要であることが、近年の研究によって指摘されている (Dauxois et al. 2018)。そこで本研究では、Eikonal Approachでは捉えきれなかった大振幅波の不安定を明らかにするために、新たに開発した理論計算手法を用いて幅広いパラメータ領域についてビーム波の安定性解析を実施した。

## 研究内容：

内部重力波の周波数は、波数ベクトルの水平成分と鉛直成分の成す角度のみに依存するため、回転成層流体中において局所的に周期強制を与えると、周波数に応じて水平面から一定の角度を持つ方向に集中して波動が伝播する。このような波動は一般に内部波ビームと呼ばれる。密度成層が一様な場合、有限振幅の内部波ビームは Boussinesq 近似下での Navier-Stokes 方程式の厳密解となる (図1a)。このような有限振幅のビーム波に重ね合わさった微小擾乱の運動は、周期的に時間変動する係数を持った偏微分方程式で記述される。

一般に、周期的に変動する場の安定性は、Floquet 理論に基づいて議論することができる。この理論によれば、背景ビーム波の振動の一周期ごとにおける擾乱の変化は、単一の行列 (モノドロミー行列) によって表すことができる。したがって、モノドロミー行列の固有値を解析することで、系の安定/不安定を判別し、さらに、発達する不安定擾乱の空間構造や成長率 (成長時間スケールの逆数) を定量化することが可能である (図1b)。本研究では、擬スペクトル法を用いて方程式を離散化し、時間発展式を数値的に積分することで、モノドロミー行列を直接構成するプログラムを作成した。

浮力周波数を  $N$ 、コリオリ周波数を  $f$ 、ビーム波の周波数を  $\sigma$ 、ビーム波の流速シアを  $S$  とし、粘性・拡散の影響を無視すると、系は3つの無次元パラメータ  $f/\sigma$ ,  $N/\sigma$ ,  $S/N$  によって規定される。これらのパラメータに依存して系の安定性がどのように変化するのかを、大型計算機システムを利用することで、非常に幅広いパラメータ領域にわたって解析した。

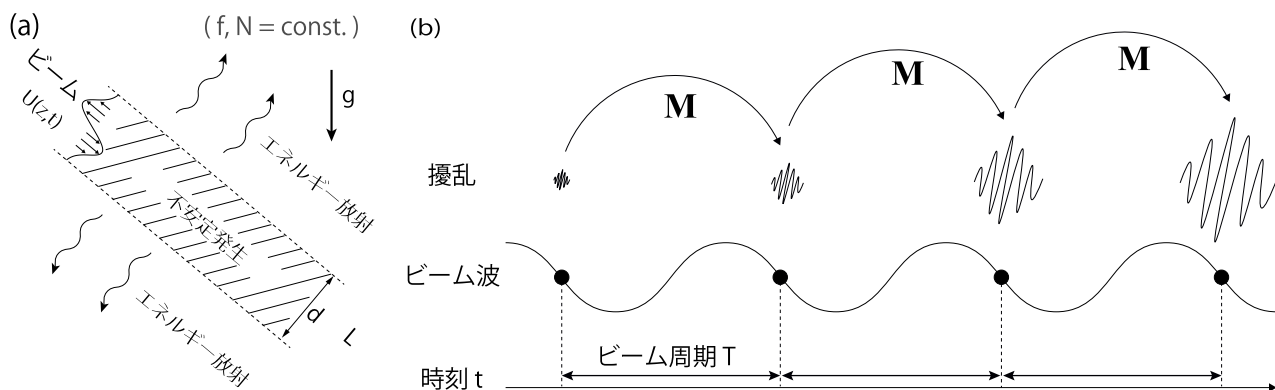


図 1. 研究手法を表す模式図。(a)回転成層流体中を鉛直斜め方向へ群速度進行するビーム型の波動場を考える。ビームの内部で不安定励起された擾乱のエネルギーが、内部波として外部へ放射されるプロセスを数値的に再現する。(b)Floquet 理論の模式図。ビーム波の一周期間における擾乱成分の時間変化は、単一の行列  $M$ (モノドロミー行列)によって表される。擾乱の長期的な振る舞い、すなわちビームの安定性は、この行列の固有値によって判別できる。

## 研究成果：

ビーム波の振幅(すなわち  $S/N$ )が小さいときは、ビーム波の不安定は  $f/\sigma$  が 0.5 以下の条件においてのみ生じ、特に  $f/\sigma = 0.5$  のときに不安定成長率は最大となる。このとき、擾乱成分はほぼ水平方向の波面を持ち、ビーム波に伴う流速シアを斜めに横切ることによってエネルギーを獲得する(図2)。これらの特徴は、内部波間の三波共鳴相互作用の一種である parametric subharmonic instability の性質として広く知られているものであり、小振幅ビームに対する本研究の計算結果は先行研究と整合している。

これに対して、ビーム波の振幅を大きくしていくと結果は著しく変化する。 $f/\sigma$  が 0.5 を上回る領域でも不安定が発生するようになる一方で、最大不安定成長率は  $f/\sigma$  が 0.3–0.4 程度のときに見られるようになる(図3)。すなわち、潮汐によって励起された大振幅の内部波ビーム中における不安定は、より低緯度側を中心としつつも広い緯度帯で生じるようになる。これらの結果は、小振幅のビーム波を対象とした既存の研究では捉えることができなかった新しい知見である。

## 今後の問題点：

本研究で得られた不安定擾乱の成長率を、ビーム波の伝播距離を規定する減衰パラメータとして解釈すれば、冒頭に述べた乱流混合の鉛直上方への減衰スケールを決定する有用な情報として用いることが可能であろう。しかしながら、本研究は、有限振

幅ビーム波と相互作用して成長する微小擾乱を対象とした準線形的な解析であり、成長する擾乱どうしの非線形的な相互作用は考慮に入れていないという問題点がある。成長した擾乱がやがて砕波し乱流散逸する過程を明らかにするために、今後の研究では流体方程式のすべての非線形項を含めた直接数値シミュレーションが不可欠である。

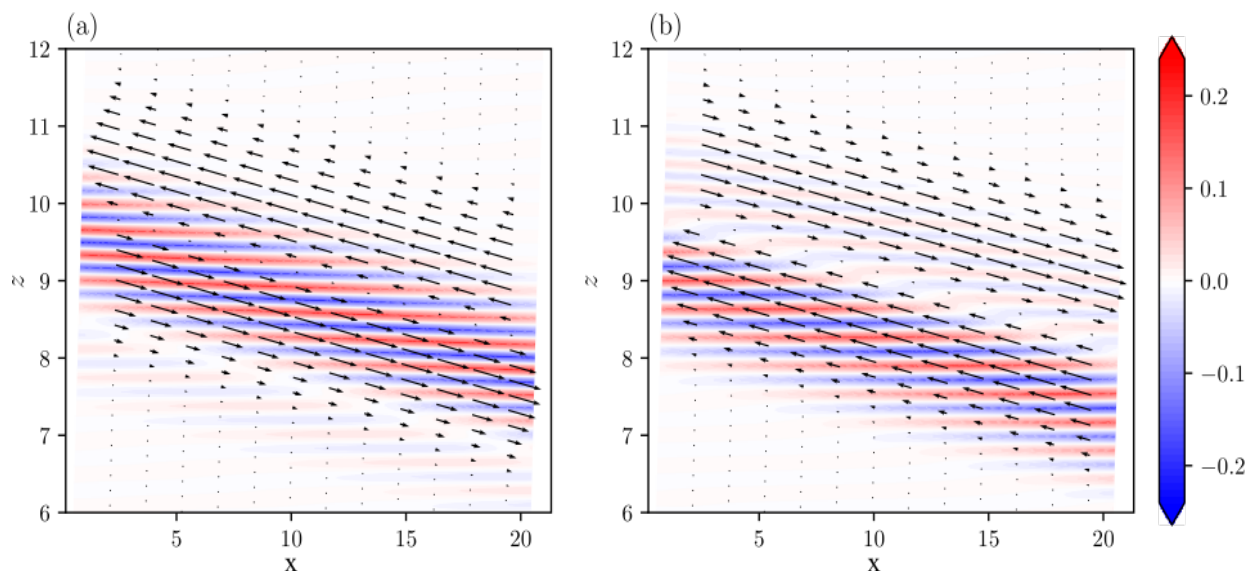


図 2.  $S/N = 0.05$ ,  $f/\sigma = 0.5$ ,  $N/\sigma = 10$  における、背景ビーム波の流速(矢印)と最大不安定モードの擾乱の流線関数(カラー)を鉛直面内に描いたもの。(a)と(b)はそれぞれ異なる時刻での様子を表す((b)は(a)の半ビーム波周期後)。

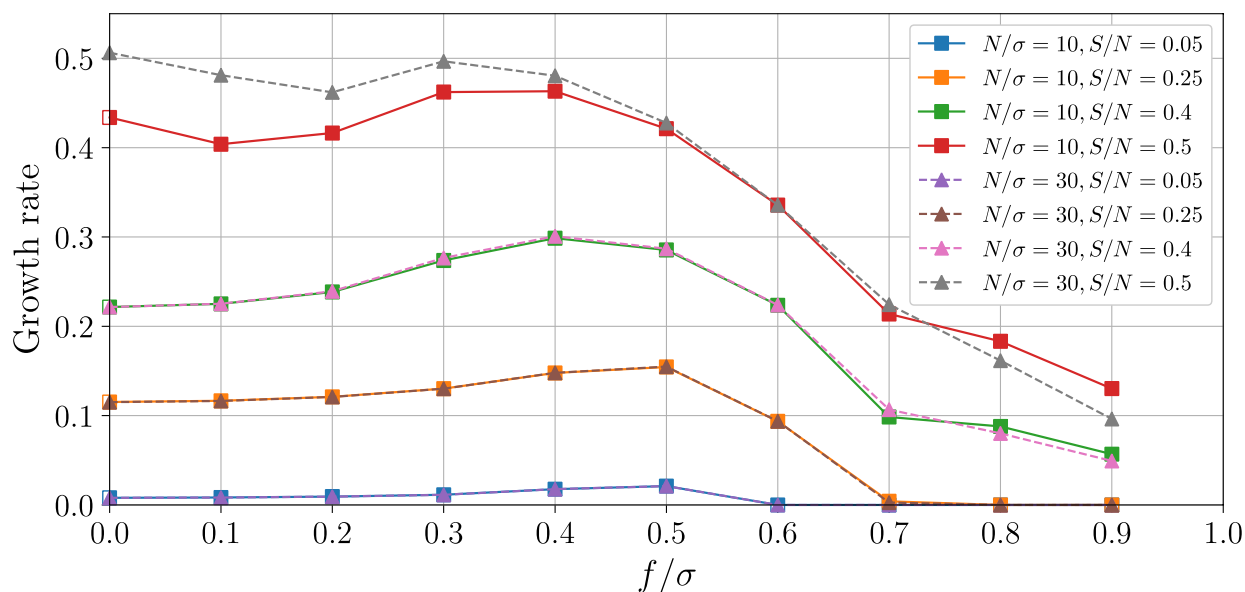


図 3. 様々な振幅のビーム波中で発達する擾乱の最大不安定成長率を  $f/\sigma$  の関数として描いたもの。成長率はビーム波の周波数  $\sigma$  で規格化されている。

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次元構造と発達維持機構の解析

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

栗花卓弥 筑波大学生命環境科学研究科 M2

## 1. 研究目的

東京大学大気海洋研究センター（AORI）と理化学研究所複合系気候科学研究チームでは、次世代大気大循環モデルと期待されている非静力正20面体大気モデル NICAM (Nonhydrostatic ICosahedral Atmospheric Model) を開発してきた。NICAM は超並列計算機対応で開発されており、筑波大学の超並列計算機 COMA (PACS-IX 1PF) と OFP-Tsukuba 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。

2018 年度は松枝と栗花に加えて山上、松信、石山の参加により、NICAM を用いた北極低気圧の発生維持機構のテーマに沿った報告を行う。

## 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=9 (14km) 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)、NCEP-FNL再解析

### 3. 結果

#### 3.1 全球雲解像モデル NICAM をもちいた北極低気圧の数値実験

東京大学 AORI の佐藤正樹教授のグループとの共同研究により、全球雲解像モデル NICAM を用いた北極低気圧の数値実験を実施した。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。しかし、熱帯低気圧のような潜熱加熱はないため、そのエネルギー源が熱帯低気圧とは大きく異なっている。先行研究によると、北極低気圧中心付近の対流圏下層は寒気核、下部成層圏が暖気核となっており、この暖気核の形成が北極低気圧の発生維持に重要であることがわかってきた。この暖気核は、北極圏周辺で発生発達する温帯低気圧が北極圏に侵入し、北極低気圧と融合することで供給されている。当センターの COMA および OFP を用いることで、NICAM の解像度を g1-9 まで上げて 2016 年 8 月に発生した北極低気圧を初期値問題として再現した。用いた初期値は NCEP FNL 再解析データである。

#### 3.2 北極低気圧と温帯低気圧の合体

図 1 は 250 hPa 面における北極低気圧の暖気核に、北上する温帯低気圧の暖気核が融合 (merging) する様子を再現したものである。はじめに北極上空に暖気核があり (左 8 月 13 日 18Z)、バレンツ海には温帯低気圧に伴う暖気核が東に

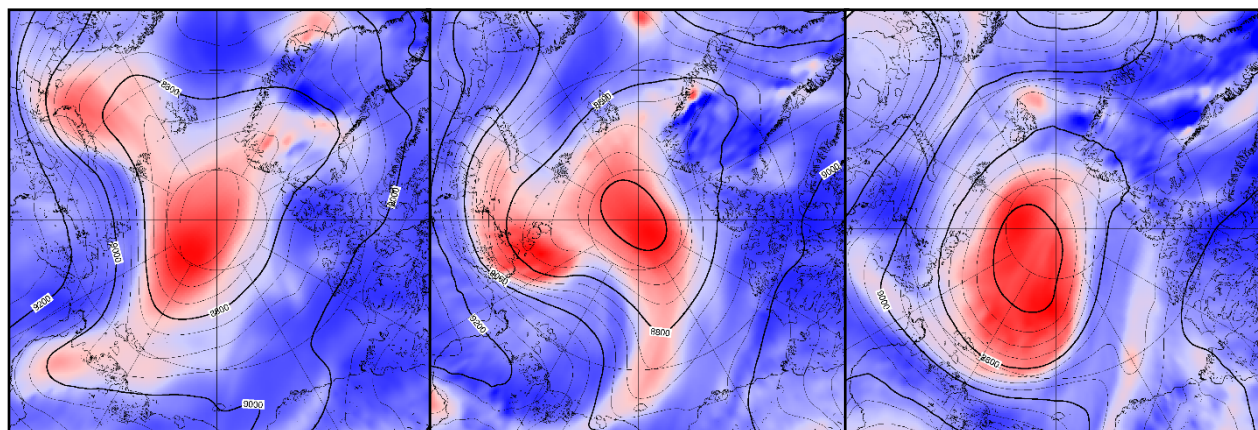


図 1 北極低気圧の 250 hPa 面における暖気核の merging の再現実験。  
実線は地上気圧、カラーは上層暖気核の温度を示す。

進みながら北上して（中 8 月 14 日 18Z）、北極上空の暖気核と合体する（右 8 月 15 日 18Z）。この暖気核の融合により、低気圧性の順圧渦度が発達し、地上摩擦によるエクマン収束で生じた上昇気流が断熱冷却により下層の寒気核を形成していることを実証した。（田中、石山、松信）

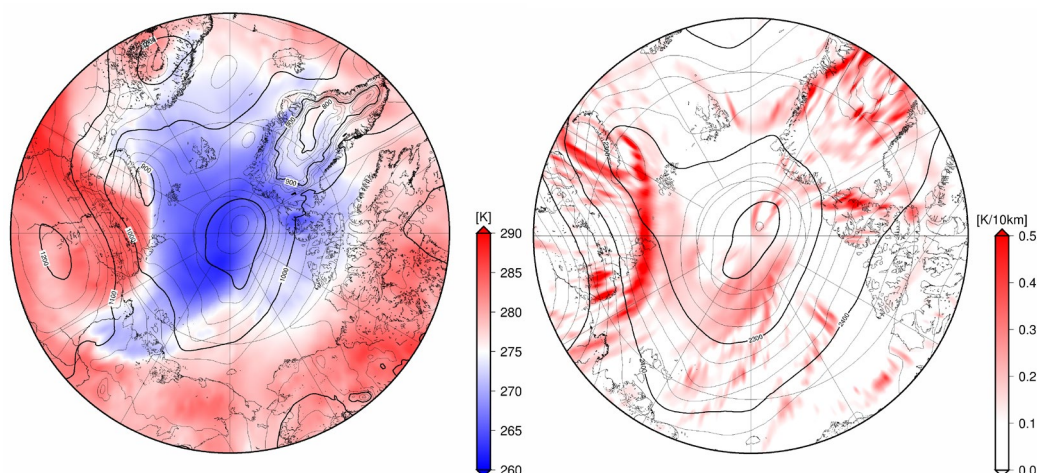


図2 850 hPa 面の温度分布（左）と 700 hPa 面での水平温度勾配。

### 3.3 北極低気圧の寒気核と温帯低気圧の前線

図2（左）は8月13日18Zの大気下層 850 hPa 面の温度分布であり、（右）はその温度勾配の大きさの分布である。北極低気圧の中心に寒気核がみられるが、バレンツ海には暖気があり、両者の間に前線がみられる。温度勾配の図でみると、この前線が T-Bone 構造をしており、高緯度側の温暖前線を串刺しにするように寒冷前線が形成されている。この構造は傾圧性により発達する温帯低気圧の特徴である。この温帯低気圧の渦度のフィラメントが北極低気圧本体の渦度に絡まるように移動し、やがて合体することで北極低気圧の渦度が強化される（石山 2018）。

## 4. まとめと今後の課題

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、下部成層圏では暖気核の合体が確認された。対流圏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、北極低気圧のエネルギー源をより明確に理解することが研究課題である。

**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 （京都大学大学院理学研究科・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：**

成層圏突然昇温（SSW）の予測可能期間は、イベントに依存して大きく変動することがこれまでの研究により明らかとなっている。一方、昨年度の研究により、東西非一様な上層成層圏循環は、力学的に大変不安定となることが明らかになった。そこで、本研究では、SSWの予測可能性と東西非一様な成層圏循環の力学的安定性との関係を明らかにするため、アンサンブル再予報実験により2009年1月に生じた極渦分裂型SSWと2010年1月に生じた極渦変位型SSWの予測可能性を比較するとともに、非発散順圧モデルを用いて、これら2つのSSWイベントにおける成層圏循環の力学的安定性解析を実施した。なお、いずれのSSWイベントでも、1月24日（以下、day 0）に成層圏極域で東風が出現した。

### **研究成果：**

#### **（１）結果**

##### **a. アンサンブル予報実験**

Noguchi et al. (2016) と同様に、水平解像度TL159、鉛直総数60層（モデル上端は0.1hPa）の気象研究所AGCMを用いて、メンバー数25のアンサンブル予報実験を毎日実施した。その結果、2009年SSWの予測可能期間は一週間程度と短く、しかも、SSWに伴い成層圏極域で東風が出現する直前の1月20日から23日の期間で、アンサンブルメンバー間のスプレッドが急に大きくなることが示された。一方、2010年SSWの予

報期間は2週間程度と比較的長く、東風が出現する1月23日頃のスプレッドも比較的小さい。このため、2009年のSSWに比べ2010年のSSWは、比較的予測しやすいことが明らかになった。

#### b. 非発散順圧渦度方程式を用いた安定性解析

Mukougawa et al. (2017) と同様に、各気圧面でのアンサンブル平均予測場を基本場として実施した非発散順圧方程式に基づく力学安定性解析を実施した。Fig. 1は、5hPa流線関数アンサンブル平均予測場を基本場として実施した安定性解析結果を示す。2009年の場合、SSW極大期直前の1月20日付近で、1.0/dayを越える極めて大きな成長率を持つ不安定モードが出現することが分かる。一方、2010年SSWの場合、そのように大きな成長率を持つ不安定モードは存在しない。

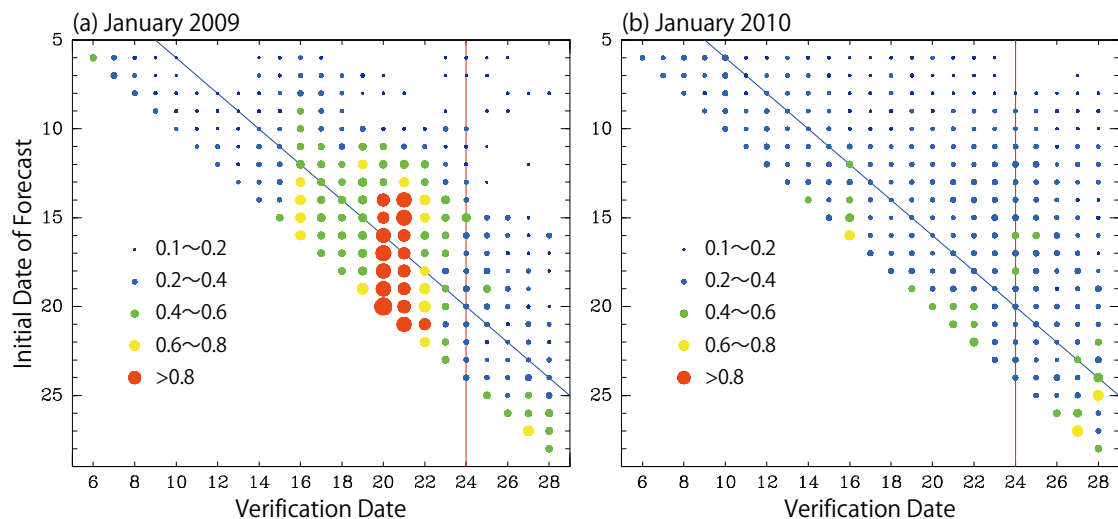


Fig. 1 (a) Growth rate (unit:  $\text{day}^{-1}$ ) of the most unstable mode computed for the basic flow composed of the T21 truncated 5-hPa streamfunction of the ensemble mean field on each prediction date (the abscissa) of the forecast starting from 6 to 28 January 2009 (the ordinate) during 2009 winter. The radius of the filled circle is proportional to the growth rate, and its color also indicates the range of the growth rate as shown in the legend. The vertical red line denotes day 0 (24 January), and the slanting blue line 4-day forecasts. (b) As in (a), except for 2010 winter.

次に、各気圧面での流線関数のアンサンブル平均予測値を基本場とした場合の安定性解析の結果をFig. 2に示す。ここで、基本場として用いるアンサンブル予報の予報期間は4日とした。Fig. 2aより、2009年の場合、1月20日付近の5hPaから2hPa の上部成層圏領域で、1.0/day以上の極めて大きな成長率を持つ不安定モードが出現することが分かる。一方、2010年のSSWの場合 (Fig. 2b) には、SSW極大期の直前には、どの高度領域においてもそのように大きな成長率を持つ不安定モードは存在しない。また、2009年の場合、上部成層圏の不安定モードの成長率は、対流圏でのそれに比べても、かなり大きい。

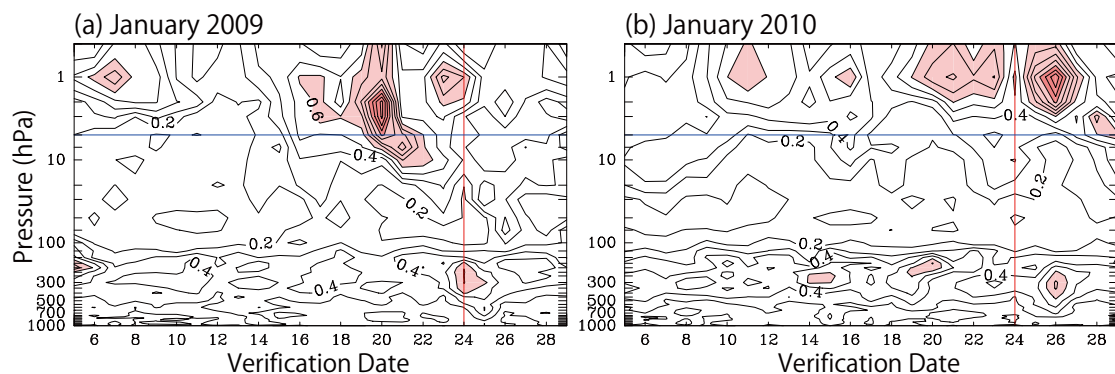


Fig. 2 (a) Growth rate (unit:  $\text{day}^{-1}$ ) of the most unstable mode computed for the basic flow composed of the T21 truncated streamfunction at each pressure level (the ordinate) of the 4-day ensemble mean forecast on each verification date (the abscissa) during 2009 winter. Contour interval is  $0.1 \text{ day}^{-1}$ , and regions where the growth rate is larger than 0.6 ( $1.0 \text{ day}^{-1}$ ) are lightly (heavily) shaded in red. The vertical red line denotes day 0 (24 January), and the horizontal blue 5 hPa. (b) As in (a), except for 2010 winter.

Fig. 3に2009年のSSW極大期直前に得られた不安定モードの水平構造を示す。ここで、基本場は、5hPa流線関数のアンサンブル平均4日予報とした。基本場では、波数2が卓越し、極渦が分裂する直前の状態を示している。得られた不安定モードの水平

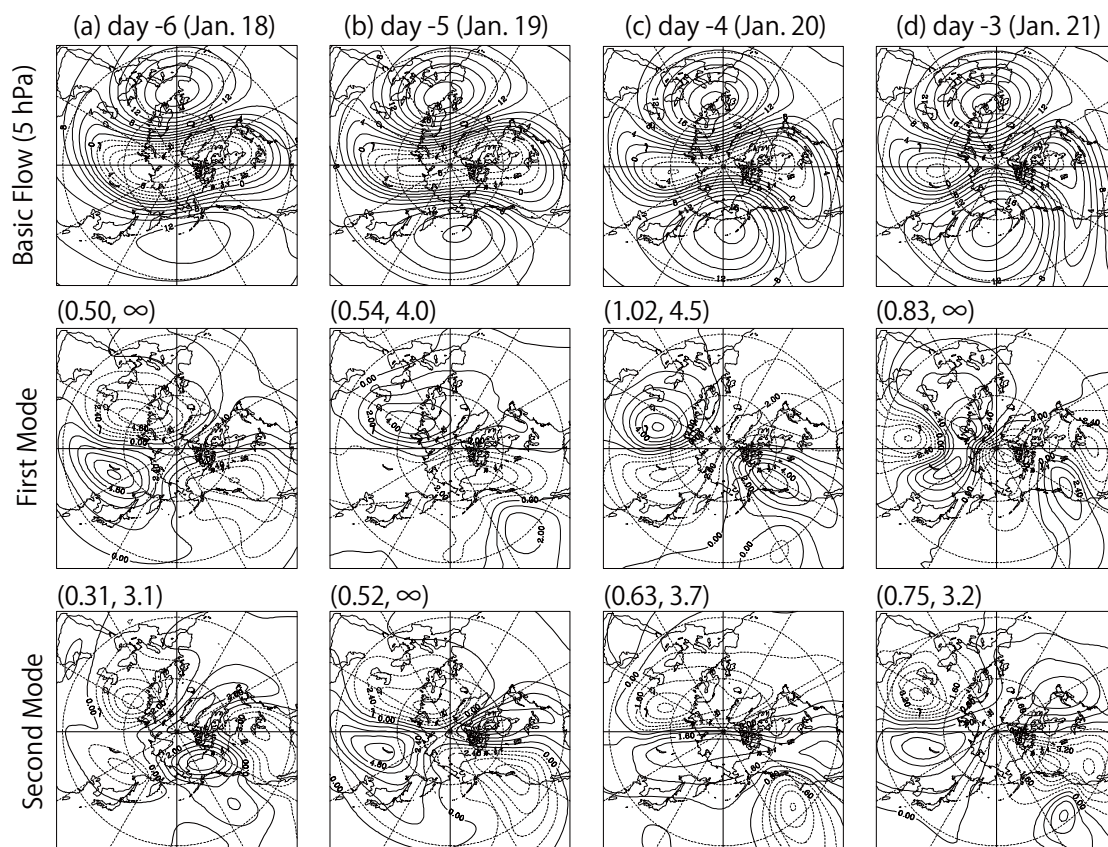


Fig. 3 (top) Horizontal structure of the basic flow given by the T21 truncated 5-hPa streamfunction field (unit:  $10^7 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ ) of the 4-day ensemble mean forecast on day -6 (a), day -5 (b), day -4 (c), and day -3 (d) during 2009 winter. (middle and bottom) Streamfunction field 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:  $\text{day}^{-1}$ ) 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 ( $\infty$ ).

構造では、1月20日には、第1不安定モードで波数2が卓越し、その位相は基本場とは東西方向に90度ずれている。このため、この不安定モードが基本場に重畳すると、極渦はさらに引き延ばされるか、あるいは元に戻ることになる。また、このように波数2が卓越する不安定モードは、2009年1月17日から1月21日の期間で出現することが確認できた。さらに、その水平パターンは、1月20日頃の5hPa高度場のアンサンブルスプレッド第1主成分ともよく似ている。このため、2009年SSWにおいてSSW最盛期直前に予報スプレッドが大きくなるのは、このような成長率の極めて大きい不安定モードが上部成層圏循環に存在するためと考えられる。言い換えると、2009年に生じた極渦分裂型SSWでは、極渦が分裂する直前に、上部成層圏循環が力学的に極めて不安定となる予測障壁（predictability barrier）が存在したと示唆できる。他方、2010年に生じた極渦変位型SSWの場合には、そのようなpredictability barrierは成層圏循環中には存在しない。このため、2009年SSWの予測可能期間は2010年SSWに比べて、極端に短くなったと推測できる。

## （２）まとめ

気象研究所AGCMを用いて実施したアンサンブル予報実験により、2009年1月の極渦分裂型SSWの予測可能期間は7日程度と、2010年1月の極渦変位型SSWの予測可能期間（14日程度）に比べかなり短いことが明らかになった。また、非発散順圧渦度方程式に基づく安定性解析により、2009年1月のSSWの生起時に、上部成層圏循環は力学的に極めて不安定な状態となることが明らかになった。一方、2010年1月のSSWの生起時の成層圏循環には、成長率が大きい不安定モードは存在しない。従って、成長率の大きな不安定モードの存在と対応する「予測障壁」が上部成層圏循環に内在したために、2009年1月のSSWの予測可能期間が極端に短くなったと考えられる。

## 今後の問題点：

東西非一様な成層圏循環で、成長率の大きな不安定性が生じる条件や、不安定モードの3次元構造などについてさらに解析を進める必要がある。

## 引用文献：

- Mukougawa, H., Noguchi, S., Kuroda, Y., Mizuta, R. and Kodera, K., 2017: Dynamics and predictability of downward propagating stratospheric planetary waves observed in March 2007. *J. Atmos. Sci.*, **74**, 3533-3550.
- Noguchi, S., Mukougawa, H., Kuroda, Y., Mizuta, R., Yabu, R. and Yoshimura, H., 2016: Predictability of the stratospheric polar vortex breakdown: An ensemble reforecast experiment for the splitting event in January 2009. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **121**, 3388-3404.

## 一般共同研究

### 「気候変動予測の不確実性低減に資する海洋大循環モデルの精緻化」

## 共同研究者

建部洋晶（課題代表）<sup>1</sup>，小室芳樹<sup>2</sup>，黒木聖夫<sup>3</sup>，小野純<sup>2</sup>

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 北極環境変動総合研究センター

3: 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、モデル精緻化の一環として、北極域を極めて高い水平解像度で表現した全球海洋大循環モデルの構築と実験を行った。

## 研究内容

北極域では近年、夏季海氷面積の急減に象徴される急激な変化が生じている。その影響は、たとえば北極海の地域的な海氷の変化が北半球中緯度冬季の気候に影響を与えるとされるように（e.g., Inoue et al., 2012; Nakamura et al., 2016）、極域内にとどまらず全球に及ぶことが種々の研究から示されている。したがって、数値モデルで全球的な気候変動を議論する際に、極域の再現性が良好であることの意義は大きい。しかし、全球長期気候予測に用いられるような比較的粗い解像度（典型的には水平1度）の海水-海洋モデルでの再現性を見ると、特に北極海海洋の内部構造や周辺海域との海水流出入に多くの問題が存在することが知られている（e.g., Ilıcak et al., 2016）。このような問題が生じる原因の一つとして、北極海の主要な水路の狭さや変形半径の小ささに比較してこの種のモデルの解像度が不足していることが挙げられる。そこで我々は、全球気候モデルにおける北極海の再現性向上という大目標に向け、全球海氷-海洋モデルの北極域部分をネスティング手法により高解像度化したモデルの開発を進めている。

今年度、本研究では、ネスティングモデルを現実的な大気境界条件を用いて 10 年間積分し、結果を解析した。用いたモデルの概略は以下の通りである。2-way ネスト版の海氷-海洋モデル COCO (Kurogi et al., 2013, 2016) を用いた。モデル座標系として、北緯 63.3 度より南で緯度-経度座標・それより北の北極域を別の二極座標系で覆う三極座標系 (Murray, 1996) を採用し、この北極域部分をほぼ計算領域とする内モデルを全球外モデルにネス

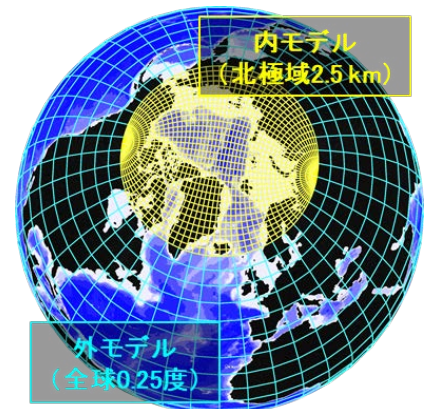


図 1. モデルの座標系

トさせた構造となっている (図 1)。内・外モデルの水平解像度はそれぞれ約 2.5 km と 0.25 度、鉛直層数は内外共通の 62 層 (うち表層 500 m に 31 層) である。外モデルのみを用い 50 m 以深の温度塩分を気候値 (PHCv3; Steele et al., 2001) に緩和してスピニアップした結果を初期条件とし、気象庁再解析データ JRA-55 をベースとした海洋モデル駆動用データセット JRA55-do ver. 1.3 (Tsujino et al., 2018) の 1990-1999 年を海面境界条件として用いた。

積分 10 年目の 388 m 深における温位分布を、典型的な気候モデルに用いられる水平解像度 1 度のモデル (CMIP6 向け COCO を同一の大気境界条件で駆動) での結果・観測に基づく気候値と共に図 2 に示す。この深さでは大西洋起源の温かい水が北極海盆に流れ込んでおり、気候値 (図 2(c)) にはそのシグナルが見られるが、1 度モデルではこの流れは再現できず、結果として海盆全体に低温バイアスが見られる (図 2(b))。ネストモデルでは気候値同様温かい水の流入が見られ (図 2(a))、高解

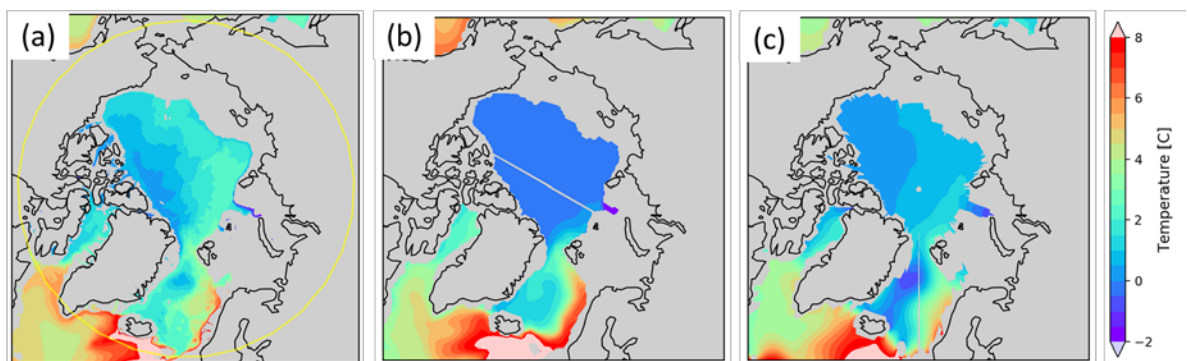


図 2. (a) ネストモデルにおける 388 m 深の温位。積分 10 年目 (1999 年) 平均。図中、黄色の円は内・外モデル境界を示す (図 3 以降も同様)。(b) 水平解像度 1 度の全球モデルにおける 388 m 深の温位。1999 年平均。(c) 観測に基づく 400 m 温位の気候値 (PHCv3)。

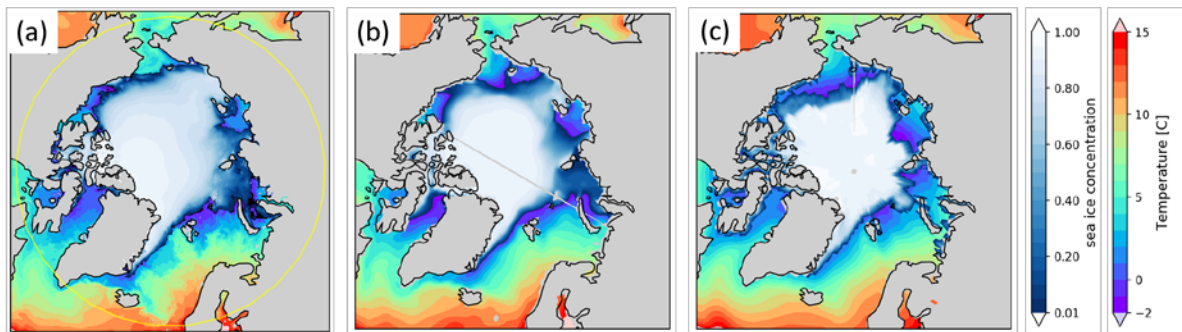


図 3. (a) ネストモデルにおける積分 10 年目（1999 年）9 月の海水氷密接度と海面水温の分布。(b) 水平解像度 1 度の全球モデルにおける 1999 年 9 月の海水氷密接度・海面温度分布。(c) 観測推定値（海水：HadISST; Rayner et al., 2003, 水温：PHCv3）。

像度化に伴う再現性向上が確認できる。一方、積分 10 年目 9 月の海水分布（図 3）を見ると、ネストモデルでは海水氷縁に複雑な空間構造が見られるものの、北極域全体としてみると 1 度モデルの間にそれほど大きな違いはない。北極域で積分した海水面積・体積の 10 年間の時系列を見ても、両モデルの違いは小さい（図省略）。この傾向は北極域を高解像度化した異なるモデルでの実験結果と同様であり（Wang et al., 2018）、海水-海洋モデルにおける海水分布は解像度よりも境界条件で決まる部分が多いことを示している。

ネストモデルの 97 m・388 m・1990 m における渦運動エネルギー(EKE)と流速の

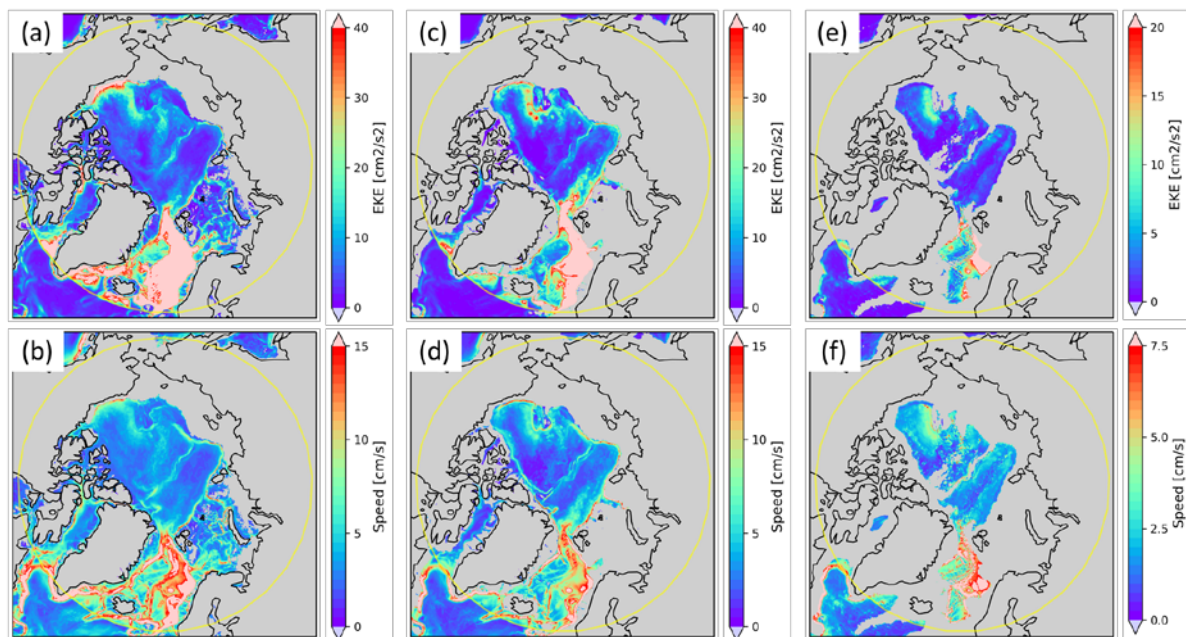


図 4. (a) ネストモデル 97 m 深の渦運動エネルギー(EKE)。計算方法は本文を参照。(b) ネストモデル 97 m 深の流速。10 年間平均値。(c,d) (a,b)と同じ、ただし 388 m 深。(e,f) (a,b)と同じ、ただし 1990 m 深。(a-d)とカラスケールが異なることに注意。

分布を図 4 に示す。ここで EKE は  $0.5[(u - \bar{u})^2 + (v - \bar{v})^2]$  ( $\bar{u}, \bar{v}$  は 10 年平均流速) で定義し、実際の計算は 5 日平均出力を用いて行った。EKE は地形に沿った流れの速い領域を中心に、表層のみならず深層まで大きくなっている。これと比較すると、1 度モデルのみならずネストモデルの外モデル (0.25 度) のみを単独で積分した場合でも、北極海盆の EKE は極めて小さい (図省略)。ネストモデルを用いることで初めて北極海盆内の渦活動のある程度表現できたことが確認できる。興味深いことに、ネストモデルでは、現実の北極海でも見られる地形に沿った流れが上層のみならず深層に至るまで他のモデルに比べ強い傾向があった。これは渦活動による流れの順圧的な強化を示唆する結果であり、今後より解析を深めていきたいと考えている。

現状、ネストモデルの結果には、ボーフォート海の表層に見られる低塩分水が時間経過と共に消失する (図省略) など、再現性になお複数の問題を抱えている。来年度以降は早急にモデルの改善を進めた後、気候モデルによる将来予測実験の結果を大気境界条件として与える将来予測ダウンスケーリング実験等に発展させ、気候変動予測精度の向上につなげる計画である。

## 参考文献

- Ilicak, M. et al., An assessment of the Arctic Ocean in a suite of interannual CORE-II simulations. Part III: Hydrography and fluxes, *Ocean Modelling*, 100, 141-161, doi:10.1016/j.ocemod.2016.02.004, 2016.
- Inoue, J., M. E. Hori, and K. Takaya, The Role of Barents Sea Ice in the Wintertime Cyclone Track and Emergence of a Warm-Arctic Cold-Siberian Anomaly, *J. Clim.*, 25, 2561-2568, doi:10.1175/JCLI-D-11-00449.1, 2012.
- Kurogi, M., H. Hasumi, and Y. Tanaka, Effects of stretching on maintaining the Kuroshio meander, *J. Geophys. Res. Oceans*, 118, 1182-1194, doi: 10.1002/jgrc.20123, 2013.
- Kurogi, M., Y. Tanaka, and H. Hasumi, Effects of deep bottom topography on the Kuroshio Extension studied by a nested-grid OGCM, *CLIVAR Exchanges*, 69, 19-21, 2016.
- Murray, R. J., Explicit generation of orthogonal grids for ocean models, *Journal of Computational Physics*, 126, 251-273, 1996.
- Nakamura, T., K. Yamazaki, K. Iwamoto, M. Honda, Y. Miyoshi, Y. Ogawa, Y. Tomikawa, and J. Ukita, The stratospheric pathway for Arctic impacts on

- midlatitude climate, *Geophys. Res. Lett.*, 43, 3494–3501, doi:10.1002/2016GL068330, 2016.
- Rayner, N. A., D. E. Parker, E. B. Horton, C. K. Folland, L. V. Alexander, D. P. Rowell, E. C. Kent, and A. Kaplan, Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century *J. Geophys. Res.* Vol. 108, D14, 4407, doi:10.1029/2002JD002670, 2003.
- Steele, M., R. Morley, and W. Ermold, PHC: A global ocean hydrography with a high-quality Arctic Ocean. *J. Clim.*, 14, 2079–2087, 2001.
- Tsujino, H. et al., JRA-55 based surface dataset for driving ocean–sea-ice models (JRA55-do), *Ocean Modelling*, 130, 79-139, <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2018.07.002>., 2018.
- Wang, Q., C. Wekerle, S. Danilov, X. Wang, and T. Jung, A 4.5 km resolution Arctic Ocean simulation with the global multi-resolution model FESOM 1.4. *Geosci. Model Dev.*, 11, 1229-1255, doi:10.5194/gmd-11-1229-2018, 2018.

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・李 根淙

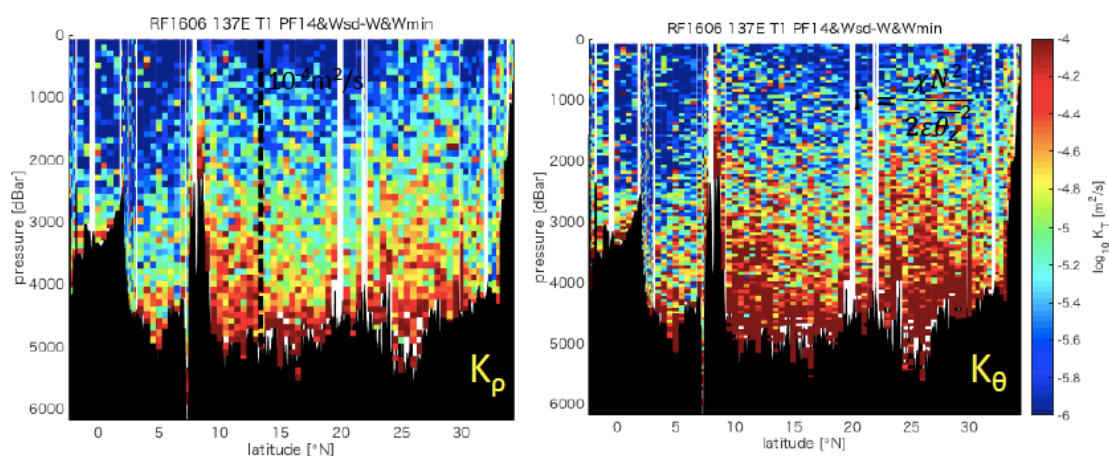
(東京大学大気海洋研究所・海洋物理学部門・海洋大循環分野)

## 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に適用したデータの解析を進めた。西部北太平洋東経 137 度ライン (気象庁凌風丸 RF1606 航海) で得られた、日本からニューギニアの海面から海底までの密度拡散係数  $K_\rho$  と水温拡散係数  $K_\theta$  を比較した (図) 結果、深層で  $K_\theta$  が  $K_\rho$  に比べて有意に大きくなっていた。エネルギー散逸率  $\varepsilon$  から密度拡散係数  $K_\rho (= \Gamma \varepsilon N^{-2})$  で通常仮定する  $\Gamma=0.2$  が海洋深層では成り立っておらず、浮力レイノルズ数  $Re_b = \varepsilon / (\nu N^2) = 30$  で平均  $\Gamma=0.35$  から  $Re_b=103$  で  $\Gamma=0.9$  と大きい値を取っていた。この結果は、太平洋の深層循環を決める深層の鉛直拡散がエネルギー散逸率と  $\Gamma=0.2$  を元にした  $K_\rho$  よりも数倍になることを意味しており、海洋循環モデルの精度向上に寄与する結果と考えられる。

## 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

稲津 將・見延 庄士郎（北海道大学大学院理学研究院）

堀之内 武・吉森 正和・松村 伸治（北海道大学大学院地球環境科学研究院）

玉置 雄大・勝山 祐太・相河 卓哉（北海道大学大学院理学院）

## 1. 研究目的

本研究の目的は、貴研究所の共同利用によって、大気海洋マルチスケール変動の解明を目指した数値的研究を推進することである。このため、北海道大学のチームでは、熱帯から中緯度に至るさまざまなスケールの気象擾乱の特性および予測を、貴研究所が開発した数値モデル等を用いて調査している。

## 2. 将来の北半球中緯度ジェット変化の解明

Coupled Model Intercomparison Program phase 5 (CMIP5) に基づいたシミュレーション結果によると、将来の中緯度ジェットは南半球では極側にシフトすると予測されているが、北半球では明瞭に現れていない。一般に、将来のジェットの位置や強さは南北温度勾配を変化させるプロセスに依存しており、北極海の海水減少による北極温暖化が北半球ジェットの極向きシフトを抑制していると指摘されている。一方、熱帯温暖化は極向きシフトに寄与するとされ、これらの相反する効果が共存することで将来予測の不確実性を生じていると理解されている。しかし、本研究では、温暖化に伴った中緯度海面水温前線帯の変化が重要であり、結果として熱帯と中緯度温暖化の競合が将来の北半球ジェットに本質的な役割を果たしていることが分かった。

使用したモデルは T85 (水平解像度 1.4°), 鉛直 26 層の大気大循環モデル(DCPAM5) であり、次の 4 種類の実験を行った。1) 過去の全球海面水温 (SST)・海氷分布, 2) 将来の全球 SST・海氷, 3) 将来の北極海海氷, 4) 将来の中緯度 SST (35°N 以北)と北極海海氷の境界条件の下、それぞれ 30 年間実験を行った。これらの実験から、ジェットの変化に対する全球温暖化、北極温暖化、中緯度温暖化、熱帯温暖化の影響を評価した。使用した境界データは CMIP5 モデルによる 20 世紀再現実験および RCP8.5 シナリオ実験の出力データを、過去(1970-1999)と将来(2070-2099) に関して 30 モデルの平均にしたものである。なお、ジェットの変化は SST 強制力が支配的であるため、放射強制力は 2000 年のレベルに固定している。

CMIP5 の 30 モデルの解析から、将来の SST 上昇は北太平洋では強い海流域（黒潮）の北側で最も大きいものに対し、北大西洋では強い海流域（メキシコ湾流）でピークを持ち、これらの SST 変化に対応するようにジェットも変化している（図 1）。将来の再現実験においても（図 2a）、北大西洋ジェットの極向きシフトが良く再現されており、

中緯度温暖化による結果と整合的である (図 2c). 北極海の海氷減少の影響は限定的であることから (図 2b), 北大西洋では中緯度温暖化がジェットシフトに支配的であるといえる. 一方, 北太平洋ではジェットが弱化的であり, 中緯度温暖化の影響が強く現れているが, CMIP5 モデルでは不明瞭な変化でありモデル間の一致も乏しい (図 1). これは熱帯温暖化による亜熱帯ジェット強化 (図 2d) と中緯度温暖化によるジェット弱化的の相反する作用が共存することで, 北太平洋ジェットの将来変化に不明瞭さをもたらしていると考えられる.

将来の北大西洋ジェットは中緯度温暖化が本質的であるが, 北太平洋ジェットはモデルに依存しやすく, 特に積雲の応答が本質的である熱帯温暖化の予測向上が中緯度大気循環の予測向上にも繋がると考えられる. また近年, 中緯度気候変動に対する北極海の海氷減少の影響に関する議論が盛んに行われているが, 今後, 中緯度 SST 変化の理解と高精度の予測を一層求められることが予想される.

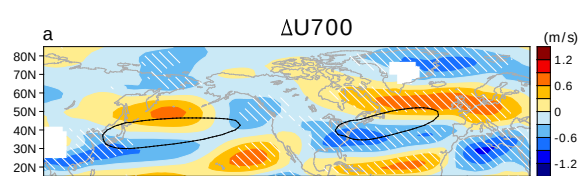
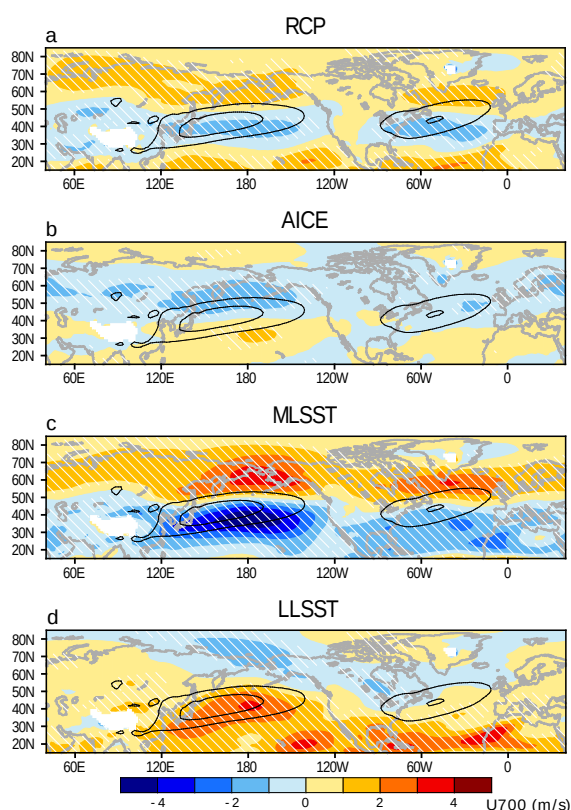


図 1 : CMIP5 モデルによる 700 hPa 年平均東西風速の将来変化. 実線は過去の平均値で 10m/s を表示. 斜線はモデルの 80%以上が同符号の変化を示す.

図 2 : 図 1 と同じ. ただし, モデル実験による (a) 全球温暖化, (b) 北極海海氷減少, (c) 中緯度温暖化, (d) 熱帯温暖化の効果. 実線は過去の平均値で 10 m/s 以上を 5 m/s 間隔で表示. 斜線は 99%の有意水準を表す.

## 参考文献

Matsumura, S., S. Ueki, and T. Horinouchi, 2019: Contrasting responses of mid-latitude jets to the North Pacific and North Atlantic warming. *Geophys. Res. Lett.*, in press.

# 気候変動現象の形成メカニズムと塩分が果たす役割

## Generation mechanisms of climate variation phenomena and the role of salinity

東塚 知己, 東大・理学系研究科, E-mail: tozuka(at)eps.u-tokyo.ac.jp  
木戸 晶一郎, 東大・理学系研究科, E-mail: skido(at)eps.u-tokyo.ac.jp  
Tomoki Tozuka, Graduate School of Science, The University of Tokyo  
Shoichiro Kido, Graduate School of Science, The University of Tokyo

### 要旨

本研究では、領域海洋モデルを用いた感度実験に基づき、インド洋ダイポールモード現象に伴う塩分偏差の形成に貢献するプロセスの相対的な寄与を定量的に調べた。その結果、風応力偏差に起因する海流偏差が塩分偏差の形成において支配的な役割を果たしている一方で、淡水フラックスも二次的な役割を果たしていることが明らかになった。また、中規模渦による非線形移流効果も重要な役割を果たしていることが示された。

### 1. はじめに

インド洋ダイポールモード現象 (IOD) は熱帯インド洋で生じる大気海洋結合現象であり (Saji et al. 1999)、正の IOD は東 (西) インド洋熱帯域に負 (正) の海面水温 (SST) 偏差を伴う。この現象はインド洋沿岸諸国だけでなく、日本を含む世界各国の気候に影響を及ぼすため (Saji and Yamagata 2003)、予測精度を向上させることは重要な課題である (Luo et al. 2007)。

IOD に伴う風偏差や降水偏差等の大気偏差は、海流や海面淡水フラックス等の偏差をもたらすため、IOD に伴う塩分偏差の発展において重要な役割を果たすが (Kido and Tozuka 2017)、その相対的な寄与に関する先行研究は、定性的な議論にとどまっている。そこで、本研究では、領域海洋モデルを用いた感度実験を行うとともに、完全に収支が閉じる塩分収支解析を行い、その定量的理解を試みた。

### 2. モデル

本研究で使用したモデルは、領域海洋モデル ROMS (Shchettin and McWilliams 2005) である。領域は、インド洋熱帯域をカバーする  $30^{\circ}$  E- $110^{\circ}$  E,  $46^{\circ}$  S- $32^{\circ}$  N で、水平解像度  $1/3^{\circ} \times 1/3^{\circ}$ 、鉛直 40 レベルの領域モデルである。World Ocean Atlas 2013 の水温・塩分場を初期値とし、JRA55-do の大気再解析データ (Suzuki et al. 2018; Tsujino et al. 2018) の 3 時間間隔データの気候値を用いて、30 年間スピンアップした。その後、1958 年から 2015 年まで JRA55-do の大気再解析データの 3 時間間隔データで駆動した。側壁境界条件は、海洋同化データの ORAS4 (Balmaseda et al. 2013) を使用した。各プロセスの寄与を調べるために実施した実験は、表 1 の通りである。MR 以外の実験では、各正の IOD 年 (7 イベント) の 1 月 1 日から 1 年間積分した。また、IOD 成分なしのデータは、3 時間間隔データの気候値と 120 日のハイパス・フィルターを施した偏差データの和をとることで作成した。

表 1: 領域海洋モデル ROMS による感度実験

| 実験名      | 海面・側壁境界条件         |
|----------|-------------------|
| MR       | 全変数 3 時間間隔データ     |
| NoIOD    | IOD 成分なし          |
| NoPRCP   | 降水量のみ IOD 成分なし    |
| NoSWR    | 短波放射のみ IOD 成分なし   |
| NoWND    | 風応力/風速のみ IOD 成分なし |
| NoSTRESS | 風速のみ IOD 成分なし     |
| NoBDRY   | 側壁境界条件のみ IOD 成分なし |

### 3. 結果と考察

本領域モデルが、熱帯インド洋における正の IOD に伴う水温、塩分、海流偏差を比較的良く再現できることを確認した上で、モデル実験結果の解析を行った (Fig. 1)。

感度実験の結果より、熱帯インド洋南西部における正の海面塩分偏差は、主に負の降水量偏差により形成されていることが明らかになった。一方、インド洋赤道域の中央部から東部にかけての負の海面塩分偏差は、風応力偏差によって引き起こされた東西流偏差によって形成されていた。これらは、先行研究 (Zhang et al. 2013; Li et al. 2016; Kido and Tozuka 2017) で示唆されていたメカニズムを支持するものであった。また、特に熱帯インド洋南西部では、海面塩分偏差の空間パターンの決定において、中規模渦による非線形移流効果が、重要な役割を果たしていることが初めて示された。

一方、東インド洋赤道域の正の垂表層塩分偏差と赤道から少し離れた海域に見られる負の垂表層塩分偏差は、ほぼ全て風応力の効果によって説明されることが、感度実験より明らかになった。また、塩分収支解析を行い、移流偏差を分解すると、水温勾配偏差ではなく、海流偏差の寄与が支配的であることがわかった。さらに、短周期変動による非線形効果の鉛直シフトが、東インド洋赤道域の正の垂表層塩分偏差の形成に貢献していることが明らかになった。

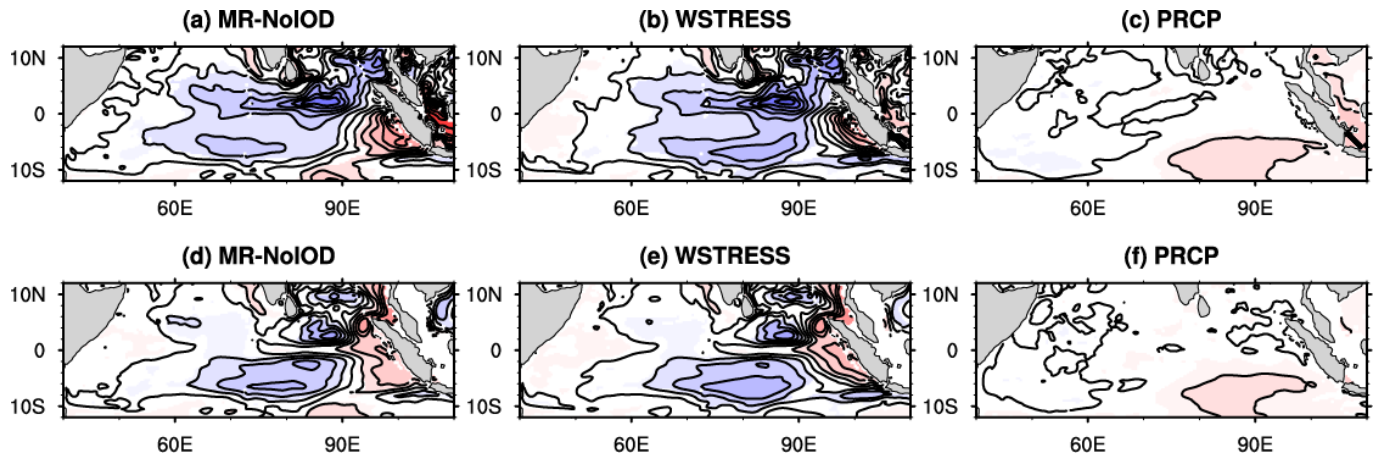


Fig. 1 (a) Composite of the upper 30 m salinity difference between MR and NoIOD run during Sep.-Nov. of seven positive IOD events (in psu). (b) As in (a), but for the wind stress effect (MR-NoSTRESS). (c) As in (a), but for the precipitation effect (MR-NoPRCP). (d)-(f) As in (a)-(c), but for subsurface salinity anomalies averaged from 50 m to 100 m depth, respectively. The contour intervals are 0.1 psu, and anomalies significant at the 90% confidence level by a two-tailed t test are shaded. (Adopted from Kido et al. 2019)

#### 4. まとめと今後の展望

領域海洋モデルを用いた感度実験を通して、IODに伴う塩分偏差の形成メカニズムが本研究で初めて定量的に示された。今後は、今年度の研究でその形成メカニズムが定量的に明らかになった塩分偏差が、IODに伴う水温偏差にそのような影響を与えるのかを調べていきたいと考えている。

#### 参考文献

- (1) Saji, N. H., B. N. Goswami, P. N. Vinayachandran, and T. Yamagata, 1999: A dipole mode in the tropical Indian Ocean. *Nature*, 401, 360-363.
- (2) Saji, N. H., and T. Yamagata, 2003: Possible impacts of Indian Ocean dipole events on global climate. *Clim. Res.*, 25, 151-169.
- (3) Luo, J. J., S. Masson, S. Behera, and T. Yamagata, 2007: Experimental forecasts of the Indian Ocean Dipole using a coupled OAGCM. *J. Clim.*, 20, 2872-2880.
- (4) Kido, S., and T. Tozuka, 2017: Salinity variability associated with the positive Indian Ocean Dipole and its impact on the upper ocean temperature. *J. Clim.*, 30, 7885-7907.
- (5) Shchepetkin, A. F., and J. C. McWilliams, 2005: The regional oceanic modeling system (ROMS): A split-explicit, free-surface, topography-following-coordinate oceanic model. *Ocean Modelling*, 9, 347-404.
- (6) Suzuki, T., D. Yamazaki, H. Tsujino, Y. Komuro, H. Nakano, and S. Urakawa, 2018: A dataset of continental river discharge based on JRA-55 for use in a global ocean circulation model. *J. Oceanogr.*, 74, 421-429.
- (7) Tsujino, H. et al., 2018: JRA-55 based surface dataset for driving ocean-sea-ice models (JRA55-do). *Ocean Modelling*, 130, 79-139.
- (8) Balmaseda, M. A., K. Mogensen, and A. T. Weaver, 2013: Evaluation of the ECMWF ocean reanalysis system ORAS4. *Q. J. Roy. Meteorol. Soc.*, 139, 1132-1161.
- (9) Zhang, Y., Y. Du, S. Zheng, Y. Yang, and X. Cheng, 2013: Impact of Indian Ocean Dipole on the salinity budget in the equatorial Indian Ocean. *J. Geophys. Res. Oceans*, 118, 4911-4923.
- (10) Li, J., C. Liang, Y. Tang, C. Dong, D. Chen, X. Liu, and W. Jin, 2016: A new dipole index of the salinity anomalies of the tropical Indian Ocean. *Sci. Rep.*, 6, 24260.
- (11) Kido, S., T. Tozuka, and W. Han, 2019: Anatomy of salinity anomalies associated with the positive Indian Ocean Dipole. *J. Geophys. Res. Oceans*, submitted.

# 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

## Analysis of atmospheric distributions of greenhouse gases and aerosols using numerical models

齊藤 誠, 環境研・地球環境研究センター, E-mail: saito.makoto(at)nies.go.jp

五藤 大輔, 環境研・地域環境研究センター, E-mail: goto.daisuke(at)nies.go.jp

丹羽 洋介, 環境研・地球環境研究センター, E-mail: niwa.yosuke(at)nies.go.jp

Makoto Saito, Center for Global Environmental Research, NIES

Daisuke Goto, Center for Regional Environmental Research, NIES

Yosuke Niwa, Center for Global Environmental Research, NIES

### 要旨

大気中の温室効果気体の時空間変動を正確に把握するため、モデリング技術の高度化、観測による検証が必要不可欠である。本研究では、第2の温室効果気体であるメタン( $\text{CH}_4$ )について、逆解析を行い、地表面フラックスの最適化とともに大気  $\text{CH}_4$ 濃度の時空間変動の再現性向上を試みた。地上および航空機による観測データとの比較から逆解析後の  $\text{CH}_4$ 濃度のモデル再現性が向上していることが確認された。また、温室効果気体の濃度再現精度について、水平解像度に対する依存性の評価にも着手した。

### 1. はじめに

地球表層における炭素循環の変化を捉え、地球温暖化予測、また、排出量削減に資する科学的知見を得るためには、大気中の温室効果気体濃度を正確に把握する必要がある。このためには大気輸送モデルによる温室効果気体のモデリング技術の高度化および観測データを用いた検証を同時に行うことが必要不可欠である。また、排出起源の特定には、エアロゾルなど人間活動に起因する物質に対してもモデリングを行い、温室効果気体と複合的に解析を行うことが望まれる。本年度は特に大気中のメタン( $\text{CH}_4$ )濃度の時空間変動について、モデルの再現性を向上させるため、地上観測ネットワークを用いて大気濃度から地表面フラックスを推定する逆解析を実施した。さらに、濃度再現性の系統的なモデル解像度依存性を評価するため、水平解像度を3段階に変えた輸送実験も実施した。

### 2. 問題設定・方法

この逆解析では4次元変分法(4D-Var)と大気輸送モデル NICAM-TM (Niwa et al., 2011)をベースとする逆解析システム NICAM-TM 4D-Var (Niwa et al., 2017a, b)を用いて、2000年から2017年までの18年の期間を対象として解析を行った。逆解析における  $\text{CH}_4$ フラックスの初期推定値には人為起源排出データ EDGAR4.3.2 (Janssens-Maenhout et al., 2019)や森林火災起源データ GFED4.1s (van der Werf et al., 2017)などを用い、さらに湿地や水田からの生物起源の  $\text{CH}_4$ 排出には陸域生態系モデル VISIT (Ito and Inatomi, 2012)による計算値を用いた。また大気中での  $\text{CH}_4$ の消失源である水酸基ラジカルとの反応については、Patra et al. (2011)で用いられた OH の3次元分布データ(気候値)を各年に対して繰り返しモデルに与えた。

最適化された  $\text{CH}_4$ フラックスを、再度、大気輸送モデル NICAM-TM に入力し、大気  $\text{CH}_4$ の時空間変動の再現を行った。計算した結果は逆解析に用いた地上観測および逆解析には用いなかった上空の航空機観測(e.g., Niwa et al., 2014)と比較を行い、3次元的な  $\text{CH}_4$ 濃度分布の再現性評価を行った。さらに、モデルの水平解像度をデフォルトの223 km から112 km, 56 km と上げた計算も行い、異なる解像度による再現性評価の解析も着手した。この解像度依存性の感度実験については、Niwa et al., (2012)で得た二酸化炭素( $\text{CO}_2$ )フラックスを用いて、 $\text{CH}_4$ だけではなく  $\text{CO}_2$ についても濃度再現性の評価を行った。

### 3. 結果と考察

Figure 1(a)に  $\text{CH}_4$ 逆解析で得られた  $\text{CH}_4$ 地表面フラックスを示す。西シベリアや南アジア、東アジアなどで顕著な  $\text{CH}_4$ 排出の分布が得られているが、これらの地域の排出量について本研究で行った逆解析では、西シベリアや南アジアでは初期推定値から増加、東アジアでは減少の傾向が見られた。ここで得られた  $\text{CH}_4$ フラックスを用いて NICAM-TM による大気  $\text{CH}_4$ 濃度の再現実験を行った結果の一例を Fig. 1(b)に示す。ここでは南極点における観測値との比較を行っているが、季節変動、また、2000年代前半の停滞、その後の増加といった経年変動が良く再現されていることがわかる。また、逆解析とは独立の航空機観測との比較では、日本上空で  $\text{CH}_4$ 濃度の再現性が向上され、逆解析の妥当性を確認することができた。また、東南アジアや西太平洋上空での航空機観測との比較では、夏季に頻繁に観測される高濃度イベントがモデルでも再現されていることがわかった。しかし、この高濃度イベントのピークの大きさについては、場合によってはモデルの解像度に大きく依存していることも確認された。Fig. 2に NICAM-TM によって再現された  $\text{CO}_2$ および  $\text{CH}_4$ の上空10 kmにおける濃度分布(9月)を示す。図から、地表から離れた上部対流圏であっても高濃度の温室効果気体が分布していることがわかる。特にメタンについては、夏季のアジアモンスーンによる大陸上での活発な対流活動と湿地や水田などの生物起源  $\text{CH}_4$ 排出の増加が掛け合わされることにより、高  $\text{CH}_4$ 濃度の空気塊が上部対流圏へと持ち上げられ、大陸から日本上空、西太平洋上空に輸送されている様子が見てとれる。また、モデルの水平解像度をあげることで、このような現象がより微細な構造を持つこともわかった(Figs. 2d-f)。

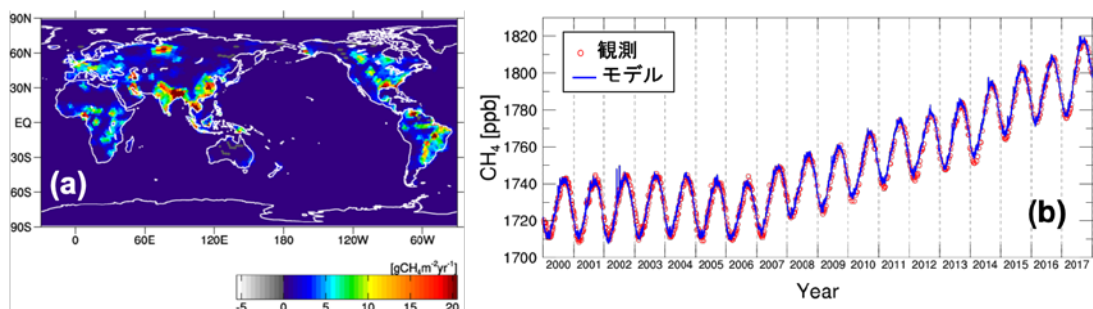


Fig. 1 (a)  $\text{CH}_4$ 逆解析により最適化された  $\text{CH}_4$ 地表面フラックスの平均値 (2000–2009 年間) の分布。(b) 南極点における  $\text{CH}_4$ 濃度の時系列。逆解析で得られたフラックスと大気輸送モデル NICAM-TM を用いて計算された結果 (青線) と NOAA/ESRL による観測結果 (赤丸) を示す。

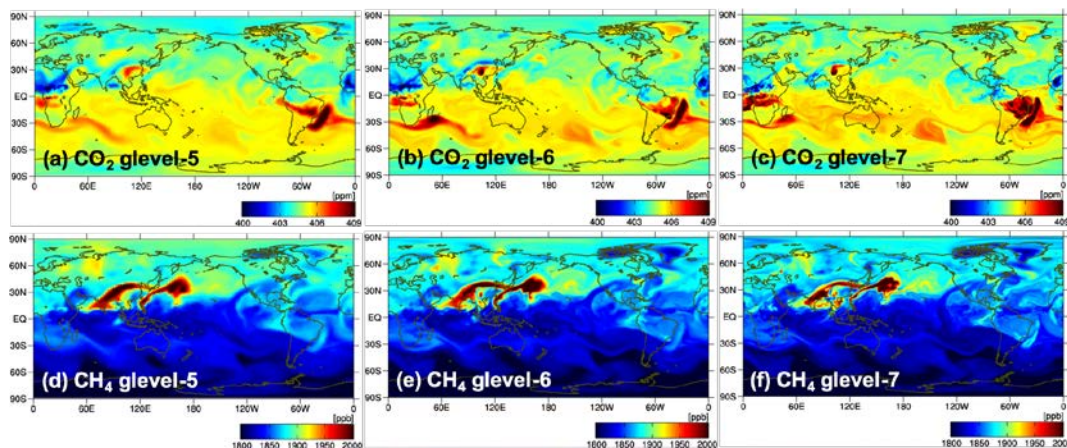


Fig. 2 上空約 10 km における (a–c)  $\text{CO}_2$ 濃度と (d–f)  $\text{CH}_4$ 濃度の NICAM-TM による再現分布 (2017 年 9 月 17 日 18 時 (GMT))。NICAM の水平解像度を 223 km (glevel-5 : 左)、112 km (glevel-6 : 中央)、56 km (glevel-7 : 右) と変えたものを示す。

#### 4. まとめと今後の展望

本年度は  $\text{CH}_4$  の逆解析を実施して、大気中の  $\text{CH}_4$  時空間変動のモデル再現性を向上させた。今後は  $\text{CO}_2$  についても同様の逆解析システムを用いて、従来よりも高精度なフラックスおよび濃度分布を得ることを試みる。また、 $\text{CO}_2$  濃度や  $\text{CH}_4$  濃度、またエアロゾルの時空間変動の再現精度について、系統的な解像度依存性を評価する。さらに、本研究で得られた成果を温室効果ガス観測技術衛星 2 号 (GOSAT-2) におけるリトリバルの先験情報として用いることで、GOSAT-2 データの品質向上も図る (Saito, et al., 2019)。

#### 参考文献

- (1) Ito A. and M. Inatomi, 2012: Use of a process-based model for assessing the methane budgets of global terrestrial ecosystems and evaluation of uncertainty, *Biogeosciences*, 9, 759–773.
- (2) Janssens-Maenhout, G., et al., 2017: EDGAR v4.3.2 Global Atlas of the three major Greenhouse Gas Emissions for the period 1970–2012. *Earth Syst. Sci. Data Discuss.*, doi:10.5194/essd-2018-164, in review.
- (3) Niwa, Y., et al., 2011: A three-dimensional icosahedral grid advection scheme preserving monotonicity and consistency with continuity for atmospheric tracer transport. *J. Meteor. Soc. Japan*, 89, 3, 255–268.
- (4) Niwa, Y., et al., 2012: Imposing strong constraints on tropical terrestrial  $\text{CO}_2$  fluxes using passenger aircraft based measurements, *J. Geophys. Res.*, 117 (D11303), doi:10.1029/2012JD017474.
- (5) Niwa, Y., et al., 2014: Seasonal Variations of  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$  and CO in the Mid-troposphere over the Western North Pacific Observed using a C-130H Cargo Aircraft. *J. Meteorol. Soc. Japan*, 92(1), 50–70.
- (6) 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.
- (7) 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  $\text{CO}_2$  inversion. *Geosci. Model Dev.*, 10, 2201–2219.
- (8) Patra, P. K., et al., 2011: TransCom model simulations of  $\text{CH}_4$  and related species: linking transport, surface flux and chemical loss with  $\text{CH}_4$  variability in the troposphere and lower stratosphere, *Atmos. Chem. Phys.*, 11, 12813–12837.
- (9) Saito, M., et al., 2019: Overview of Model Systems for Global Carbon Dioxide and Methane Flux Estimates Using GOSAT and GOSAT-2 Observations, *Journal of the Remote Sensing Society of Japan*, in press.
- (10) van der Werf, G. R., et al., 2017: Global fire emissions estimates during 1997–2016. *Earth Syst. Sci. Data*, 9, 697–720.

# 掲載準備中

# 掲載準備中

# 掲載準備中

# 掲載準備中

## 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

寺田直樹・笠羽康正・早坂忠裕・中川広務・Pradeep Khatri・青木翔平・秋葉丈彦・鳥海克成 (東北大学大学院理学研究科)

笠井康子・黒田剛史 (情報通信研究機構)

佐川英夫 (京都産業大学)

前澤裕之・築山大輝 (大阪府立大学)

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、大気質予測への応用、比較惑星気象、太陽系内外惑星・衛星のハビタビリティ、アストロバイオロジー、将来火星有人探査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。さらにこの試みは、今後火星で静止衛星的な大気観測を用いたダスト分布の予測を行うことに向けての試験としての意味合いも持つ。

火星大気は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及び混合比)が蓄積されているとともに、最近では微量化学物質の詳細観測が始まっており、また金星大気についても日本の探査機「あかつき」や地上望遠鏡などから、硫酸雲や大気組成の観測が進んでいる。また火星においては表層の観測や飛来隕石の分析から、約38億年前においては現在よりも濃密な大気を持ち、液体の海が存在したことの示唆も得られている。雲物理過程や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分布・気候変動メカニズムに迫ることで、火星・金星の気候維持過程に対する示唆を得て、さらに太陽系外惑星への適用など幅広い展開を目指す。

## 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、越境汚染の予測を想定して2018年3月10日(清浄時)と3月25日(越境汚染時)について、それぞれ2日前の0:00GMT (9:00JST)から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(図1)をナッジング(モデル内のエアロゾル鉛直分布は維持したまま、光学的厚さと観測を合わせる)した計算結果について、得られた光学的厚さを図2、地上PM2.5量を図3に示す。地上PM2.5量は環境省「そらまめ君」の観測結果と比較すると過小評価になっているのが現状の課題で、CALIPSOなどのライダー観測によるエアロゾル鉛直分布を用いてひまわり8号観測から地上PM2.5量を導出するアルゴリズム[Khatri and Hayasaka, 2018]を用いた同化計算による改善に着手している。

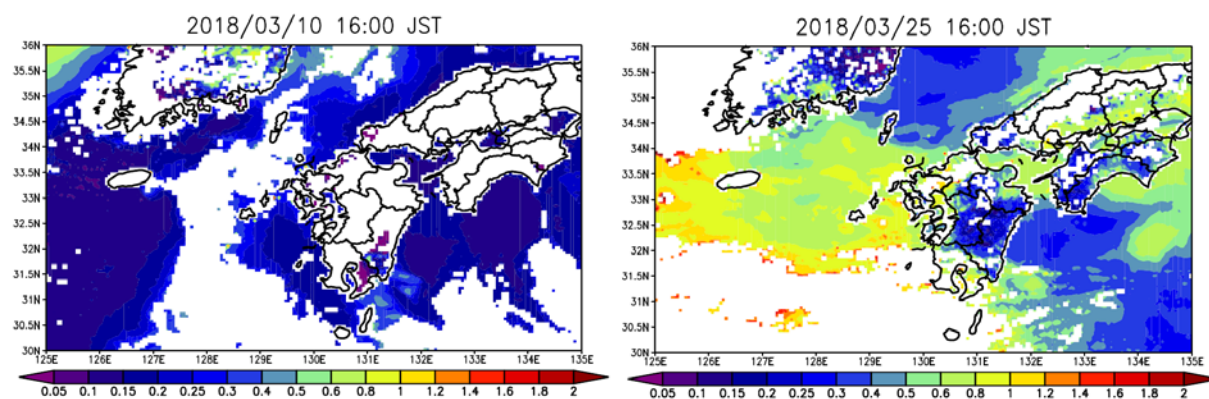


図1：ひまわり8号観測によるエアロゾル光学的厚さ(JAXA P-Tree 提供) [Yoshida et al., 2018]。左が清浄時(2018年3月10日16:00JST)、右が越境汚染時(2018年3月25日16:00JST)。

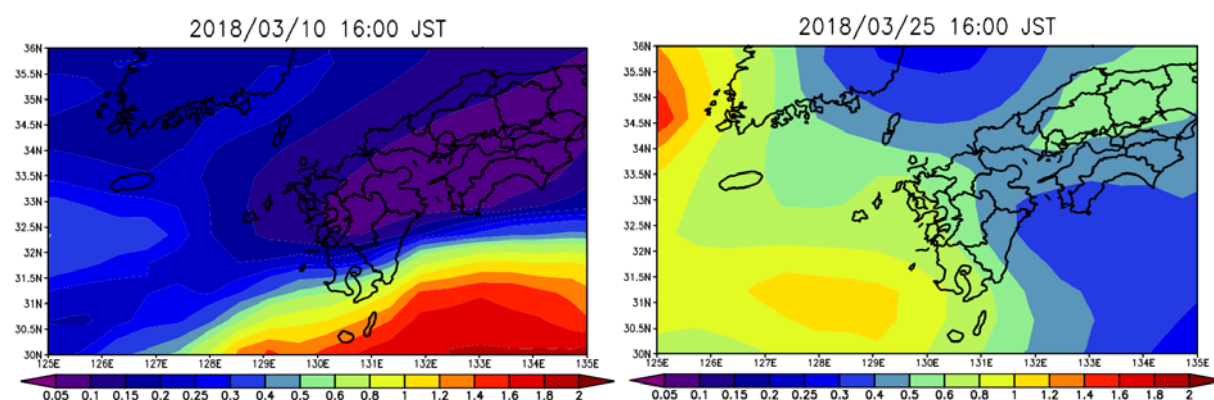


図2：NICAM-SPRINTARSを用いて、エアロゾル光学的厚さについてひまわり8号観測による観測をナッジング同化した計算結果。時刻はそれぞれ図1に同じ、同化は2018年3月8日9:00JST(左)及び2018年3月23日9:00JST(右)から1時間毎。地表からの放出はGoto et al. [2015]に基づく。

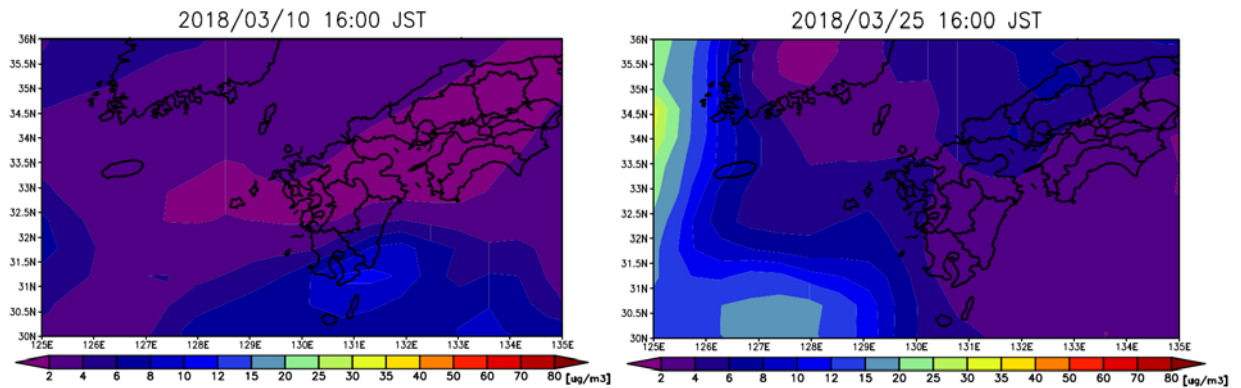


図3：図2の計算で得られた地上PM2.5量 $[\mu\text{g m}^{-3}]$ 。時刻はそれぞれ図2に同じ。

## 2. 火星大気シミュレーション

MIROCモデルを用いた約38億年前の古火星気候シミュレーションについては、二酸化炭素を主成分とする最大2気圧の大気環境シミュレーションに気相・液相・固相を考慮した水循環スキームと液体の海、さらに古火星の温暖化に寄与する混合比1～20%の水素分子の存在[Ramirez, 2017]を仮定して $\text{CO}_2\text{-H}_2$ の衝突誘起吸収による放射効果を導入することで降水を再現し、その分布について現在の火星地表面に残るValley networkの分布との比較を行い、論文投稿を行って現在改訂中である[Kamada et al., under revision]。加えて火星古気候の水循環に影響を与えうる積雲対流過程について、汎惑星的な適用が可能なKain-Fritschスキームを用いた検討を行った[鳥海ほか, 2018]。

また現在の火星大気環境シミュレーションについても水循環とダスト循環の結合に加え、大気化学過程の導入に着手し、本格観測を開始したExoMars Trace Gas Orbiterをはじめとする探査機観測チーム、海外の火星大気モデリングチームとの連携を進めている。さらに情報通信研究機構で計画中の超小型火星テラヘルツ探査機による水・酸素分子等の観測に向けた検討にも、このモデル結果の活用を予定している。

## 3. 金星大気シミュレーション

硫酸雲の生成・消滅過程と硫酸蒸気の生成源となる $\text{SO}_3$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ の大気化学過程を導入した金星GCM[伊藤ほか, 2016]を改良し、硫酸雲分布の変動を大気放射過程に反映させるモデルを開発した。前年度までに作られたモデルについてバグ修正するとともに、改良による結果の変化の検証を行い、雲量の計算結果において幾分かの改善が見られた[秋葉, 2019]。今後はこのモデルを用いて、雲のみならず $\text{SO}_2$ や $\text{CO}$ 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。

## 今後の問題点

これまで地球・火星(現在及び古気候)・金星について独立して大気モデルの開発・検証を行ってきたが、今後は独立しての観測データを用いた検証・利活用を継続するとともに、これらのモデルを統合し汎用性を持たせて、対象を太陽系内の惑星にとどめず太陽系外惑星のハビタビリティやアストロバイオロジー研究への適用を見据えた開発も行っていく。その上で、いかにして汎用性の高い放射過程・雲生成過程・表層過程などのスキームを開発するかが今後の課題となる。

## 参考文献

- 秋葉丈彦, 金星大気大循環モデルを用いた雲・放射相互結合の研究. 東北大学修士論文, 2019.
- 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.
- Kamada, A., T. Kuroda, Y. Kasaba, N. Terada, H. Nakagawa and K. Toriumi, A coupled atmosphere–hydrosphere global climate model of early Mars: A ‘cool and wet’ scenario for the formation of water channels. *Icarus*, under revision.
- Khatri, P. and T. Hayasaka, Inferring surface PM2.5 from satellite observation. 日本気象学会 2018年度秋季大会, 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.
- Ramirez, R., A warmer and wetter solution for early Mars and the challenges with transient warming. *Icarus*, 297, 71–82, 2017.
- 鳥海克成, 鎌田有紘, 黒田剛史, 笠羽康正, 寺田直樹, 中川広務, 村田功, 青木翔平, 火星古気候モデルに向けた積雲対流スキームの定量的評価. 日本惑星科学会2018年秋季講演会, 2018.
- Yoshida, M., M. Kikuchi, T. M. Nagao, H. Murakami, T. Nomaki, and A. Higurashi, Common retrieval of aerosol properties for imaging satellite sensors. *J. Meteor. Soc. Japan*, 96B, 193–209, 2018.

## 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．本研究の目的は，

- (1) 金星放射伝達を組み込んだ大気大循環モデルをもちいて，温度および大循環構造を調査し，地形や太陽光加熱が大循環および熱構造に及ぼす影響を明らかにする．
- (2) 金星下層大気で生じた擾乱が，中層大気スーパーローテーションに及ぼす役割を明らかにする．
- (3) 地球流体力学の無次元数を用いて，厚い雲で覆われた惑星大気の大循環および波動のパターンを整理する．

と定めた．

## 研究内容：

現実的な大気大循環モデルの開発（上記の研究目的 1）に関しては，Ikeda(2011)が東京大学大気海洋研究所で開発した放射伝達コードと金星の地形を組み込んだ金星 GCM を用いて，太陽座標と地理座標から見た金星大気大循環構造について整理した．雲追跡の観測で得られた大気循環構造と比較することで，現実金星大気の構造を議論した(Yamamoto, Ikeda, Takahashi & Horinouchi 2019, Icarus, 321, 232-250)．

上記の研究目的(2,3)に関連して，遅い自転および小さい惑星における球面の赤道ケルビン波の構造を調査し，その成果をまとめた(Yamamoto 2019, Icarus, 322, 103-113)．球面の赤道ケルビン波(Longuet-Higgins 1968)をタイタンや金星に適用し，金星中層大気 GCM(Yamamoto & Takahashi 2018, Icarus, 303, 131-148)の結果と比較・検討した．

研究成果：

## 1. 放射コードを導入した金星大気大循環モデルから推測された「太陽座標および地理座標で観測される大気構造」について

地形および放射が金星大気大循環に与える影響は十分に理解されていない。これらの効果を、Ikeda(2011)が開発した T21L52 Venus AGCM を用いて、太陽座標と地理座標から見た金星大気大循環構造を調査した。

太陽光加熱率が高い上層（雲層より上）では、 $8 \text{ m s}^{-1}$ を超える強い帯状平均極向き流が見られる。雲頂付近では、太陽放射の加熱と赤外放射の冷却が局所的にバランスしており、放射の南北不均衡が駆動する帯状平均の子午面流は弱い。ジェット赤道側では約  $1 \text{ m s}^{-1}$  の極向き流が吹き、ジェットコア付近では潮汐波と傾圧波の極向き熱輸送による間接循環が形成される。帯状平均東西風に関しては、雲頂高度付近で、約  $120 \text{ m s}^{-1}$  の中緯度東西風ジェットと約  $90 \text{ m s}^{-1}$  の赤道東西風が形成される。太陽直下付近の水平風分布は、あかつきの観測をよく再現している。

太陽座標では、南北流とそれに関連した水平フラックスは、昼面のみの東西平均と昼夜両面の帯状平均との差が大きく、昼面のみの UV 観測から帯状平均構造を推定するには注意を要する。特に、ハドレー循環を議論する場合、昼面だけの東西平均の観測値ではなく、潮汐波を組み込んだモデルで検証する必要がある。

地形を導入することで、地表面付近のサブローテーションや高度 10–20 km の弱い安定層が形成される。また、Aphrodite Terra 上空の雲頂でみられる東西風減速 (Bertaux et al. 2016) を再現した。このモデルにおいて、Aphrodite Terra 上空の雲頂東西風減速は、山岳波の東西風の負偏差に対応することが示唆される。

## 2. 自転が遅い惑星およびサイズが小さい惑星の赤道 Kelvin-like 波動：金星とタイタンへの適用

サイズが小さく自転が遅い惑星では、Longuet-Higgins (1968) が導出した球面赤道ケルビン波の南北風成分が重要であることを示し、その波による赤道向き熱輸送について議論した (Yamamoto 2019, Icarus, 322, 103-113)。球面の赤道ケルビン波に対応する波動は、定義や分散関係がベータ平面の赤道ケルビン波と全く同じではないので、本稿では「赤道 Kelvin-like 波」と表記し、球面の赤道 Kelvin-like 波の位相構造と水平温度輸送の Lamb パラメーター依存性を議論した。土星の衛星のタイタン

ではLambパラメーターが小さく、赤道 Kelvin-like 波の南北風成分が無視できない。この南北風成分は、タイタン GCM (Mitchell et al. 2011)の赤道 Kelvin-like 波の水平構造でも見られる。鉛直伝播する赤道 Kelvin-like 波では、南北流成分と温度成分の位相が合うため、熱は赤道向きに輸送される。しかしながら、この解析で見積もられた赤道向き熱輸送は、金星中層大気 GCM(Yamamoto and Takahashi 2018)の赤道向き熱フラックス値よりも小さい。金星中層大気 GCM では、赤道 Kelvin-like 波の振幅が高緯度で十分に減衰する前に中緯度ジェット付近で臨界緯度に達し、中高緯度のロスビー波と結合することで赤道向き熱および運動量輸送が強化されることが示唆される。

#### 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、惑星半径や自転を変えた大気大循環構造およびスーパーローテーションメカニズムの相似性について整理したので、次年度以降、学会および学会誌で発表したい。

現実的な金星大気大循環モデルの開発では、Yamamoto et al. (2019)を高解像度化し、あかつき等の惑星探査で得られた観測結果を力学的に解釈する必要がある。特に、微細構造や極渦が、放射伝達コードと金星の地形を組み込んだ現実的な金星 GCM で検証・再現できるか？を調査をすすめなければならない。

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

## 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（図 1）。前年度までに、1) 地形データ etopo2 において日本海溝付近に含まれている未定義値を修正し、5500m よりも深い地形はすべて 5500m と仮定しなおすこと、2) 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発生する

不安定擾乱を、赤道域だけ部分的に粘性係数を大きくして抑制すること、でモデルの改良を進めてきた。また、3) 海洋循環モデルの計算を近年まで延長するため、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に変更した（図 2）。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問題が確認された。a) 東シナ海へ流入する地点と側方境界との水平距離が 200 km 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、b) 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 km）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 km 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こと、が解析結果から判明した。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 格子に変更すると黒潮が東シナ海に流入しやすくなることを確認している。

今年度は、水平粘性係数をこれまでの水平格子間隔依存 harmonic 型粘性係数を使用していたが、Smagorinsky 型に変更に変更した結果、東シナ海に黒潮が流入するようになり、東シナ海における黒潮流路は現実的に近くなった（図 3）。しかしながら、本州南岸の黒潮流路および黒潮続流の位置が極端に南偏している問題はそのままであった。北東側側面境界において境界に沿う方向の流れが形成され、側方境界値の反映が正確にされていない恐れがあったため、緯度－経度方向に格子を配置したモデルに変更し（図 4）、数値計算を実施したが、本州南岸の黒潮流路および黒潮続流の位置が極端に南偏する問題は同様に発生した。現在は、側面境界条件の緩和時間に関するパラメータ等を調整するとともに、モデル内における力学バランスの解析を進め、原因の究明にあたっている。

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昨年度得た。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、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ていた。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、資源（生物量）変動も表現することができるようになった。これらのモデルを用いた将来予測を実施した結果、将来のサンマが小型化する一方、来遊尾数そのものは増加する傾向にあることが示された。

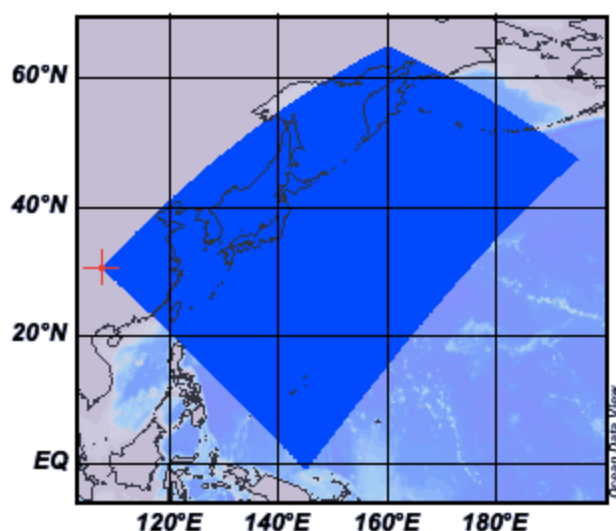


図 1. 領域モデル ROMS 北西太平洋版のモデル領域（青色）

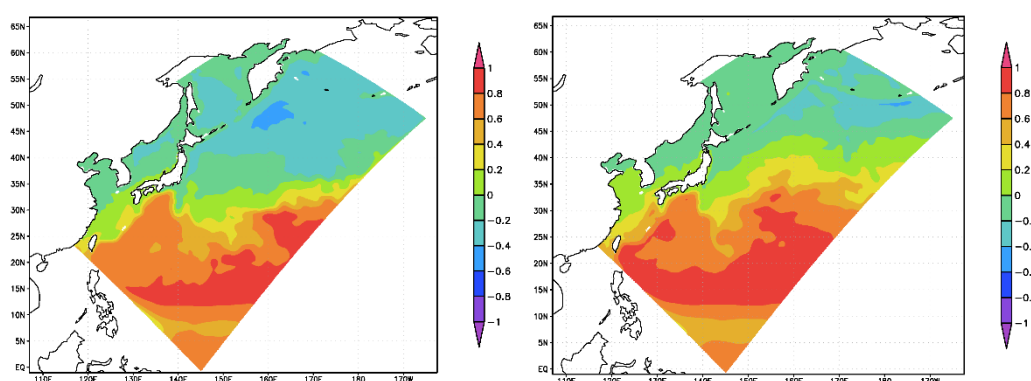


図 2. 側方境界条件の比較。左：SODA2.1.6 を使用、右：SODA3.3.1 を使用。両者とも水平格子間隔依存 harmonic 型粘性・拡散 ( $\text{visc2}=25.0, \text{tnu2}=5.0$ ) を使用、大気外力は COREv2、気候値。

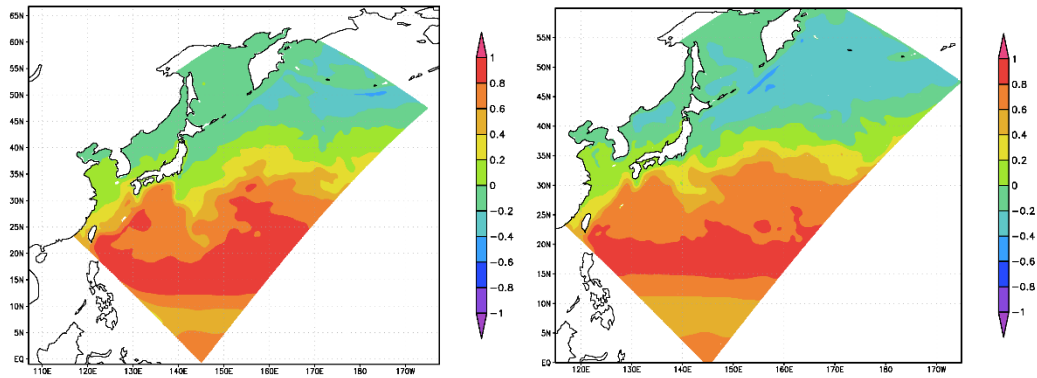


図 3. 水平粘性の違いによる比較。左：水平格子間隔依存 harmonic 型粘性（ $\text{visc2}=25.0$ ）、右：水平格子間隔依存 harmonic 型粘性（ $\text{visc2}=2.5$ ）+ Smagorinsky 型粘性。両者とも側方境界条件に SODA3.3.1 を使用、大気外力は COREv2、水平格子間隔依存 harmonic 型拡散（ $\text{tnu2}=5.0$ ）を使用、気候値。

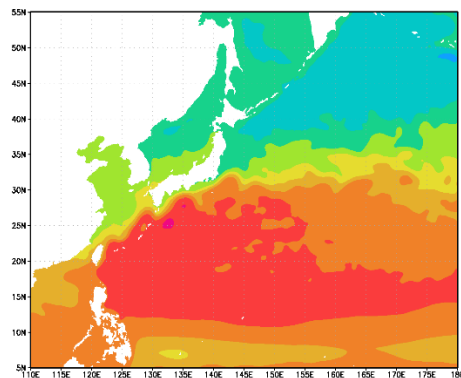


図 4. 緯度—経度座標を用いたモデル計算結果。側方境界条件に SODA3.3.1 を使用、大気外力は COREv2、水平格子間隔依存 harmonic 型粘性（ $\text{visc2}=0.0$ ）+ Smagorinsky 型粘性、水平格子間隔依存 harmonic 型拡散（ $\text{tnu2}=5.0$ ）を使用、気候値（積分期間は 4 年弱のみ）。

### 今後の問題点

粘性係数の与え方の変更で黒潮の東シナ海での流路は現実的になりつつあるが、本州南岸の黒潮流路および黒潮続流の位置が極端に南偏している。モデル内での力学バランスを確認し、対策を講じて、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 Computational Physics*, 227, 3595-3624.
- Hasumi H., CCSR Ocean Component Model (COCO) version 4.0. CCSR Report No. 25, 103 pp., 2006.
- Ito S., M. J. Kishi, Y. Kurita, Y. Oozeki, Y. Yamanaka, B. A. Megrey and F. E. Werner (2004) Initial design for a fish bioenergetics model of Pacific saury coupled to a lower trophic ecosystem model, *Fish. Oceanogr.*, 13, Suppl. 1, 111-124.
- Kishi M. J., M. Kashiwai, D. M. Ware, B. A. Megrey, D. L. Eslinger, F. E. Werner, M. N. Aita, T. Azumaya, M. Fujii, S. Hashimoto, D. Huang, H. Iizumi, Y. Ishida, S. Kang, G. A. Kantakov, H. Kim, K. Komatsu, V. V. Navrotsky, S. L. Smith, K. Tadokoro, A. Tsuda, O. Yamamura, Y. Yamanaka, K. Yokouchi, N. Yoshie, J. Zhang, Y. I. Zuenko, V. I. Zvalinsky (2007) NEMURO –a lower trophic level model for the North Pacific marine ecosystem. *Ecol. Model.*, 202, 12-25.
- Rose, K. A., J. Fiechter, E. N. Curchitser, K. Hedstrom, M. Bernal, S. Creekmore, A. Haynie, S. Ito, S. Lluch-Cota, B. A. Megrey, C. A. Edwards, D. Checkley, T. Koslow, S. McClatchie, F. Werner, A. MacCall, and V. Agostini (2015) Demonstration of a fully-coupled end-to-end model for small pelagic fish using sardine and anchovy in the California Current. *Prog. in Oceanogr.*, 138, 348-380.

## 一般共同研究

研究課題：気候モデル・全球雲解像モデルを用いた熱帯大気研究

## 共同研究者

三浦裕亮（課題代表）<sup>1</sup>

末松 環<sup>1</sup>

王 家瑞<sup>1</sup>

松岸 修平<sup>1</sup>

神野 拓哉<sup>1</sup>

灘本 真実<sup>1</sup>

山崎 一哉<sup>1</sup>

神山 翼<sup>1</sup>

1: 東京大学 大学院理学系研究科 地球惑星科学専攻

## 研究目的

熱帯大気研究において気候モデル MIROC や全球雲解像モデル NICAM は大変有用な研究ツールであり、次世代の研究基盤として非常に重要である。しかしながら、MIROC が採用している球面調和関数を用いたスペクトル法は計算効率に課題があり、NICAM が採用している予報変数の A-grid 配置は慣性重力波の分散関係の表現に課題がある。本研究では、MIROC や NICAM の力学コアの高度化を意図し、これまで平面 6 角形格子でテストを行ってきた予報変数の B-grid 配置を正 20 面体格子に適用し、球面上の浅水モデルの標準テストを実施した。

## 研究内容

B-grid 配置を用いることで、Ringler and Randall (2002) の ZM-grid 配置を実用化する際に障害となった計算モードの問題を回避できることが、平面 6 角形格子を用いたテストで確かめられている (Miura 2007)。B-grid 配置における離散方程式を B1-grid と B2-grid の同期によって導出するこ

とで、計算モードの原因は従来言われていたような速度定義点と質量定義点の点数の違いではなく、運動方程式の非線形項が過剰な自由度の存在理由となっている事であることが分かる。非線形項が原因となる過剰な自由度の問題は、B-grid 配置を用いることで正 20 面体格子でも解決されると期待される。

しかしながら、B-grid 配置の正 20 面体格子への実装には平面 6 角形の時ほど単純ではなく、いくつかの改善が必要となった。1 つ目の課題は、離散化した気圧傾度力項の精度不足であった。平面 6 角形格子において Z-grid 配置と同様の解像度を得るために用いていた 1 次精度の気圧傾度力項では、回転球面上では地衡風平衡の精度が足りず、赤道側から両極側への継続的な質量流出が起こってしまう。そこで、6 角形/5 角形内において質量分布関数の 3 次精度再構築を行い、それを用いた 4 次精度の線積分を利用することで、速度点における 2 次精度の気圧傾度力項を構築し、質量流出の問題を解決した。2 つ目の課題は、低緯度域における B1-grid 配置と B2-grid 配置の速度場の不整合であった。元々の B-grid 配置では、B1-grid の速度場と B2-grid の速度場が質量場を通じて十分に強く同期されることを前提としていたが、コリオリ力が小さい低緯度においては質量場を通じた同期は十分に強くなく、それぞれの速度場が独自の力学に従い時間発展をすることでノイズが発生していた (ZM-grid 配置のような偽のモードを形成する訳ではない)。そこで、B1-grid と B2-grid の速度場を同期させるべく、最小スケールに対する拡散項の形で記述できる同期項を付加し、滑らかな速度場が計算されるようにした。

これら 2 つの主要課題の他、速度点の B1-grid と B2-grid への色分け、5 角形格子の取り扱い、拡散項の離散化法、などの課題を解決し、正 20 面体上に浅水モデルを構築した。浅水モデルのプログラムは、NICAM と同様の水平領域分割を採用して並列化しており、B-grid 配置や移流項・気圧傾度力項の高度化のために、速度定義点や 6 角形/3 角形セルの境界面を対象としたより複雑なデータ通信を含む。

## 研究成果

Williamson et al. (1992)の提案する 7 つのテストケースのうち標準的なテストケース 2、5、6、および、より大きな変形を伴う Galewski et al. (2004)のテストを実施し、C-grid 配置 (Thuburn et al. 2009 など) と同等かそれ以上の結果を得た。図 1 に Galewski et al. (2004)のテスト結果の一例を示す。

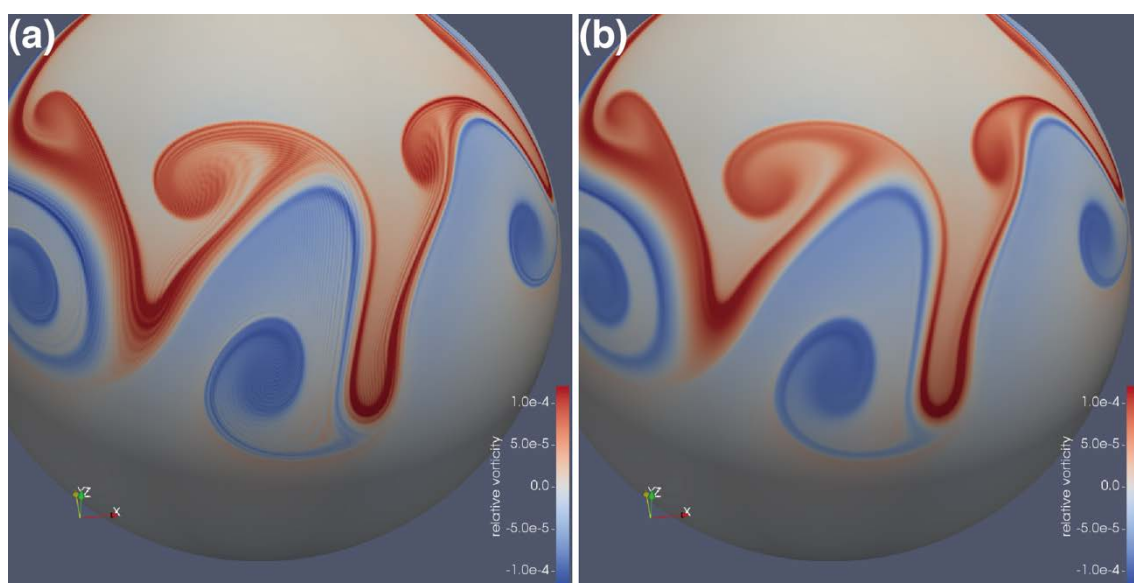


図 1 : 水平格子 H512 (NICAM glevel-9 相当。格子間隔約 15km) を用いた順圧不安定ジェットテストの結果。拡散項に (a)  $\nabla^8 \vec{v}$  と (b)  $\nabla^4 \vec{v}$  を付加した場合。

### 今後の問題点

本研究の詳細を記述した論文は Monthly Weather Review に受理されており、近々出版される予定である。数値解析の研究としては、有限要素法による積極的な自由度の活用に発展性があるが、この研究をもって 2 次元におけるテストは一旦終了とし、大気科学のための実用的なモデル構築へと進みたい。B-grid 配置は、若干の計算コスト増を除けば、計算と物理の両面 (計算安定性と計算精度、および、慣性重力波の分散関係) で NICAM が採用する A-grid 配置を上回る性質を持っており、3 次元大気モデルの構築により次世代の力学コアとなり得るかをテストしたい。

2019 年 3 月 31 日

研究課題名 (一般共同研究): 地表面状態の変化による大気水循環への影響

共同研究者名 (所属を含む): 首都大学東京 都市環境学部 高橋洋

研究目的 : 平成 29 年度に引き続き、気候変動により大気水循環(降水量、水蒸気輸送)がどのように変化するかについて、地表面状態の変化に着目し調査する。

研究内容: 平成 29 年度に引き続き、大規模なアンサンブル実験データセット(d4pdf)などを利用し、AGCM において、SST 強制により、どの程度の降水量の年々変動を説明できるのかについて、引き続き調査する。さらに、SST 強制が土壌水分の年々変動などと、どのように関連しているのかについても評価する。特に我々の住むアジアモンスーン地域に着目し、大気水循環の変動における重要な物理プロセスについて、地域性を含めて調べる。

研究成果: AGCM による解析は引き続き、論文投稿を目指している。関連する研究として、地表面状態の変化による降水特性の変化として以下の論文を出版した。

Takahashi, H. G., and J. Polcher, 2019: Weakening of rainfall intensity on wet soils over the wet Asian monsoon region using a high-resolution regional climate model. *Progress in Earth and Planetary Science*, 6, 26, doi:10.1186/s40645-019-0272-3

ABSTRACT: This study estimated the sensitivity of rainfall characteristics (rainfall amount, rainfall frequency, rainfall intensity, and rainfall extremes based on 30-min intervals) to land-surface conditions over Southeast Asia, which has a wet land surface during the rainy season. To obtain the regional difference in sensitivity and simulate basic cloud-precipitation systems, we used a high-resolution regional climate model. To extract the systematic signals of sensitivity and exclude random errors, a series of six sensitivity experiments, which were driven by a reanalysis dataset and the observed sea surface temperature (SST), were conducted over the Indochina Peninsula. In our experiments, soil moisture was prescribed at 0.20, 0.25, 0.30, 0.35, 0.40, and 0.45 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup> over the whole domain and during the whole calculation period. More experiments would allow us to divide the responses into systematic signals and random noise. The slope of a meteorological variable as a function of the six prescribed soil moisture values was defined as the sensitivity. It was found that the sensitivity of rainfall frequency to soil moisture was positive overall, whereas the sensitivity of rainfall intensity was negative overall, although evapotranspiration (sensible heat flux) increased

(decreased) in a manner similar to the increase in soil moisture over the whole domain. The sensitivity of rainfall amount to an increase in soil moisture was dependent on the location. This implies that the response of rainfall characteristics to soil moisture is not simple, suggesting that changes in rainfall characteristics are not solely determined by evapotranspiration. In addition, the sensitivity of rainfall characteristics displayed remarkable regional characteristics. The characteristics described above were noticeable over the inland flat plains. We also discussed the mechanism in the response of rainfall characteristics to soil moisture. The coupling of an increase in water vapor in the planetary boundary layer and a decrease of sensible heat flux can explain the response. The increase in water vapor in the planetary boundary layer was associated with a reduction of the development of deep convections and an increase of boundary layer clouds.

今後の問題点: 引き続き、論文の出版を目指す。

## 一般共同研究課題名(特定共同研究)

陸面モデルの積雪スキームの高度化及びデータ解析

## 共同研究者名

阿部 彩子 (東京大学・大気海洋研究所)

渡邊 達博(WDB 株式会社)

## 研究目的

気候モデル MIROC (Watanabe et al., 2010; Watanabe et al., 2011) では、陸面モデルに MATSIRO が使われている (Takata et al., 2003). その積雪モデルでは、積雪アルベドに影響を与える太陽光吸収性エアロゾル (LAA) である混合したダストとブラックカーボン (e.g., Warren and Wiscombe, 1980; Flanner et al., 2009; Qian et al., 2015; Yasunari et al., 2015) を考慮した積雪不純物モデルが Yang et al. (1997) のアルベドモデルをベースにしたものが、以前より使われている (Watanabe et al., 2010; Watanabe et al., 2011; Qian et al., 2015). しかしながら、他の気候モデルなどで考慮されている LAA であるオーガニックカーボン (Qian et al., 2015; Yasunari et al., 2015) などは考慮されておらず、不完全な状態となっている. そこで、これまでの共同研究で、積雪不純物の追加 (オーガニックカーボン) やこれらの積雪不純物を考慮したアルベド計算を行えるように高度化を目指して必要なスキームの追加や改良を行いながら MATSIRO 開発作業を行ってきた.

今年度は、昨年度から作業をしているそのアルベドモデル高度化の際に必要な、時間変化をする積雪密度モデル導入を完了させ、次のステップへ進めることを目的とする. また、現在、別の科研費プロジェクトで、オフライン用 MATSIRO に作物成長モデル (MATCRO ; Masutomi et al., 2016a, 2016b) を結合する作業を行っているが、そちらのバージョンにも上記開発中の積雪モデルのアップデートを随時反映させ、近い将来、作物成長モデルと改良された積雪モデルが合わせて考慮されるように作業を進める.

## 研究内容

従来の固定積雪密度 ( $300 \text{ kg m}^{-3}$ ) を使用している MATSIRO の積雪密度 (Takata et al., 2003) に対して、本共同研究でオフライン用 MATSIRO に導入をしているのは、気象研究所の積雪変質モデル SMAP (Niwano et al., 2012) でも使用されている雪の粘性 (Bader and Weilenmann, 1992; Morris et al., 1997) と圧密を考慮した積雪密度スキームである。昨年度からこの導入作業を行なっているが、作業に関して大きな問題に直面していた。それは、従来の MATSIRO は積雪層が雪の量によって可変する (最大 3 層) スキームとなっているが、上記積雪密度モデルを導入する際に、積雪層数が頻繁に変わることによってバグを起こしやすい不安定なものとなっており、特定のグリッドで、積雪密度がずっと計算されないという問題 (バグ) が起こっていた。この問題をまず解決すべく積雪モデルの積雪層を可変式から固定 3 層に変更して計算することにした。

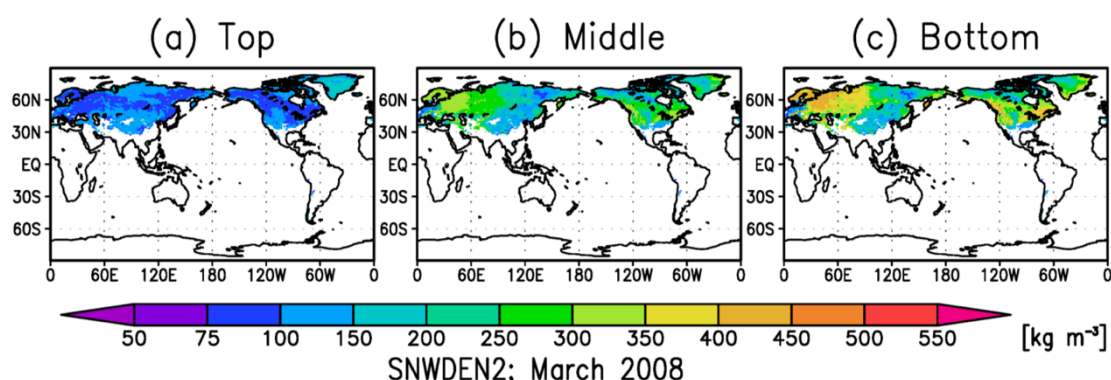


図 1. 時間によって変化する積雪密度スキームを導入して計算した2008年3月の月平均値の積雪密度: (a) トップ層 (第1層); (b) 第2層; (c) 最下層 (第3層)。

## 研究成果

可変式の積雪層数から固定 3 層の積雪層に変更させたことで、これまで積雪密度が計算されないグリッドのバグがあったが、それが解決されて MATSIRO の積雪計算が行われるべきグリッドにおいて、積雪密度の時間変化が計算されるようになった (図 1)。特徴としては、融雪期の例 (3 月; 図 1) を見ると、積雪層下層の方において密度が大きくなるような特徴となっている。トップ層は、融雪期にしては、少し軽い密度となっている。これは現在、積雪層トップでは、山崎(1998)で使用されている風速によっ

て変動する新雪密度の式（無風時で  $67 \text{ kg m}^{-3}$ ）を採用しているため、この影響が考えられる。

また、積雪内部の熱計算に関わるスキームに従来の固定積雪密度を使用した場合と新しい時間可変式積雪密度に変更した場合の計算を一冬行い、札幌に近いグリッドの時系列データを見てみると、融雪期に日々の積雪水量の減少率がやや増加し、これまでモデル開発者の間で言われていた融雪期に積雪が多い問題が改善する方向へ進んだと考えられる（図 2）。ただし、実際の札幌の融雪期の観測による全層積雪密度（Niwano et al., 2012）と比べて値が過小であるため、今後の改善が必要と考えられる。

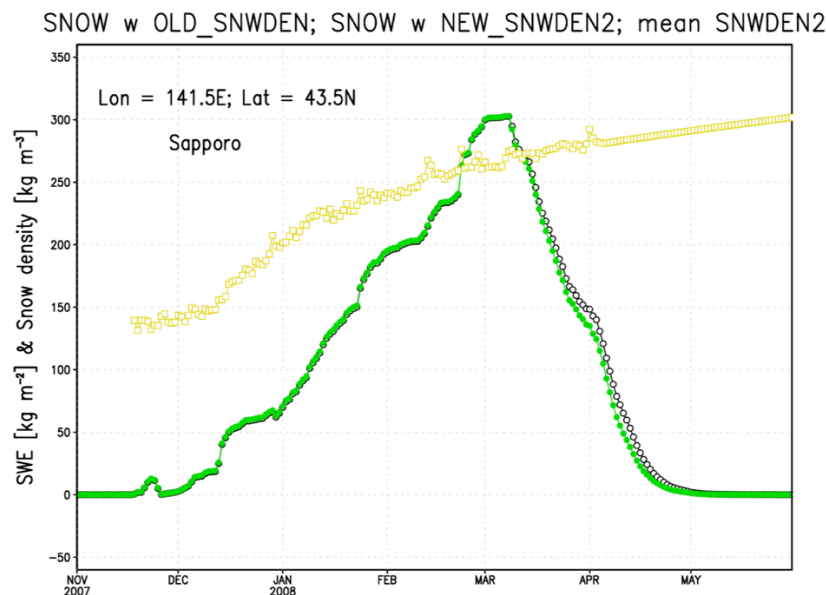


図2. 札幌に近いグリッドの一冬の平均積雪密度（黄色の□）と積雪水量（積雪内部の熱に関する部分に従来の固定積雪密度を使った場合：黒の○；同様のスキームに新しい時間可変の積雪密度スキームを使った場合：緑の●）の推移。

#### 今後の問題点

融雪期にトップ層の積雪密度が小さめの傾向となっているので、より妥当な積雪密度を得るために特に新雪密度にどのような式を与えるか検討が必要である。今回改善された積雪密度スキームに更にアルベドスキームの改善などを加えて、より現実的な積雪モデルにしていく必要がある。また今後、この積雪密度改良版を既に別に進めている作物成長モデル MATCRO が入っているオフライン MATSIRO にマージする予定である。

## 謝辞

モデル開発を進めるに当たり、大石龍太特任研究員（東京大学・大気海洋研究所）と高田久美子特別研究員（国立環境研究所）にコーディングに関して大変有意義な助言をいただいた。また、加藤知道准教授（北海道大学・農学研究院）にモデルテストや開発のためのサーバー環境を提供していただいた。

## 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.
- Flanner, M., C. Zender, P. Hess, N. Mahowald, T. Painter, V. Ramanathan, and P. Rasch, 2009: Springtime warming and reduced snow cover from carbonaceous particles. *Atmos. Chem. Phys.*, 9(7), 2481–2497, doi:10.5194/acp-9-2481-2009.
- 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.
- 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.

- 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 and Planetary Change*, 38(1-2), 209-222, doi:10.1016/S0921-8181(03)00030-4.
- Warren, S. G., and W. J. Wiscombe, 1980: A model for the spectral albedo of snow. II: Snow containing atmospheric aerosols. *J. Atmos. Sci.*, 37(12), 2734-2745.
- 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.
- 山崎剛, 1998: 厳冬期に適用可能な積雪多層熱収支モデル, 雪氷, 60(2), 131-141.
- 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, 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.

## 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所 教授

増田良帆 北海道大学地球環境科学研究所 博士研究員

## 研究目的

海洋物理モデルの基礎方程式であるナビエ-ストークス方程式が不変であるのに対し、海洋生態系モデルの基礎方程式のベースとなるロジスティック方程式は近似式であり、変える余地がある。よって生態系モデルでは、生物の生理過程をより良く表せる新たな基礎方程式が提唱されるという、物理モデルでは決して起こらないパターンの進化が生じる。一連の理論的研究 Pahlow and Oschlies (2013)、Pahlow et al. (2013)、Smith et al. (2015)で新たに提唱された基礎方程式を採用した次世代 3D 海洋生態系モデルを我々のグループはこれ迄に開発してきた。このモデル FlexPFT-3D (Flexible phytoplankton functional type 3D version)は、従来モデルに比べて再現性が高く、計算量は少ない。更なる発展の余地が大きいモデルであり、今後数年かけて物質循環モデル、数百種の植物プランクトンを表現出来る多様性モデル、多段階食物連鎖を表現出来る海洋生態系モデルを開発していく。本年度は主に物質循環モデルの開発を行ったので、その成果について報告する。

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

### 1. 物質循環モデルの構築

昨年度迄に開発したのは植物プランクトン 12 サイズクラスを表現するサイズ多様性モデルであった。今年度は当初、これをベースとして数百種の植物プランクトンを表現出来る多様性モデルを開発する予定であったが、FlexPFT-3D が物質循環モデルとして高いポテンシャルを持つことが明らかになった為、植物プランクトン 1 サイズクラスのみを表現するモデルの開発に計画を変更した。

FlexPFT-3D の計算量の少なさについては、昨年度報告書にある程度記述されているので、表 1、図 1 に簡潔にまとめる。FlexPFT では植物プランクトンの環境変化に対する応答(順化)が瞬時に行われるという仮定が置かれており、植物プランクトンのカーボン、窒素、クロロフィル比(以下 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。これは従来型のモデルに対する大きなメリットである(表 1)。生態系モ

デルの計算ではモデル本体の計算量はそれほど大きくなく、移流・拡散を計算する必要のある予報変数の数が計算量をほぼ規定する(図 1)。FlexPFT-3D の植物プランクトン 1 サイズクラスバージョンでは、移流・拡散を計算する予報変数の数は 7(Phy, Zoo,  $\text{NO}_3$ ,  $\text{NH}_4$ , DON, FeD, FeP)である。この数は NPZD+鉄モデルと大差ない。移流・拡散計算が必要な予報変数の数は NEMURO が 11、MEM が 14 であり、世界の PFT モデルでは 20 を越えるものが多い。FlexPFT-3D の移流・拡散計算の量は NEMURO の 64%(7/11)、MEM の 50%(7/14)である。

|                    | 順化なし<br>(chl:C固定)       | Geider<br>(1998)              | Smith et al.<br>(2015) |
|--------------------|-------------------------|-------------------------------|------------------------|
| モデル                | NPZD<br>NEMURO, MEM     | 主なPFT model<br>(BEC, REcoM2)  | FlexPFT-3D             |
| クロロフィル             | モデル内で計算せず、chl:Cを一定として算出 | モデル内で計算                       | モデル内で計算                |
| 植物プランクトン関連の移流・拡散計算 | Nのみ                     | N, C, chl<br>(多くのモデルで、N:Cは固定) | Nのみ                    |

表 1: モデルによるクロロフィル計算、移流・拡散計算の違い

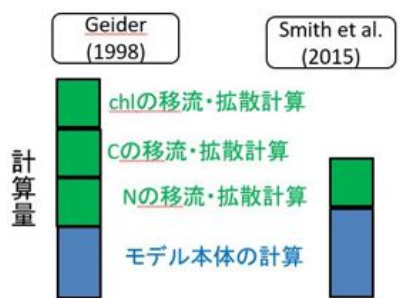


図 1: 予報変数の数と計算量の関係を示す概念図

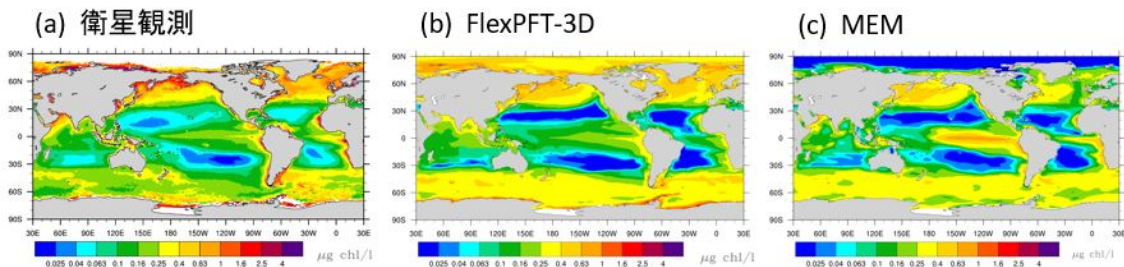


図 2: 年平均海表面クロロフィル分布

FlexPFT-3D、植物プランクトン 1 サイズクラスバージョンで計算された年平均海表面クロロフィル分布を衛星観測・MEM(従来の我々のグループの生態系モデル)と比較した結果を図 2 に示す。基本的に FlexPFT-3D は衛星観測の分布を非常に良く再現している。昨年度の報告書で示した 12 サイズクラスバージョンの結果に比べても再現精度が良くなっているが、これは主に鉄循環過程を改良した影響である。この改良によって、1 サイズクラスバージョンだけでなく、12 サイズクラスバージョンの再現精度も大きく向上した(図なし)。従来の MEM に比べると幾つかの海域で再現性が大きく向上している。MEM では北大西洋高緯度域のクロロフィル濃度が過少であったが、FlexPFT-3D では観測に近い濃度が得られている。太平洋の赤道湧昇域の周辺では、MEM だけでなく世界の主要な海洋生態系モデルに於いて、クロロフィル濃度の高い海域が現

実より広範囲に分布する傾向があった。この原因について、モデルの解像度が低いと、赤道湧昇が現実海洋より広い範囲で生じるためであると説明されてきた。しかし、FlexPFT-3D と MEM で用いている物理モデルと解像度は全く同じであるのにも関わらず、FlexPFT-3D では太平洋赤道域のクロロフィルが非常に良く再現されている。つまり、従来型の海洋生態系モデルで太平洋赤道域クロロフィル分布の再現性が低い理由について、これまでは物理モデルのせいにされていたが、むしろ生態系モデルの方に問題があった可能性を我々の結果は示している。亜熱帯域では FlexPFT-3D のクロロフィル濃度は観測に比べて少ないが、これは以下の二つが未導入であるのが原因と考えている。一つは植物プランクトンにとってアンモニアが硝酸塩より利用しやすいという効果がまだ導入されていない点である。この効果を導入すると一次生産及びクロロフィル濃度が上がるはずだが、理論モデルはまだ出来ていない。アンモニアは将来の理論モデルの発展を見越して導入されており、現在のバージョンでは無くても結果は変わらない。もう一つ未導入なのは窒素固定を行う植物プランクトンであるが、生態がそこまで良く解っていないこともあり、FlexPFT-3D への早急な導入はしないつもりである。

以上をまとめると、従来モデルに比べて少ない計算量というメリットを最大限に生かす FlexPFT-3D 物質循環研究用バージョンを製作した。このバージョンは、特に高解像度モデルや大気海洋結合モデルのような計算量が多い物理モデルとの組み合わせに適している。

## 2. 亜表層クロロフィル極大の再現に成功した原因の解明

前年度に、従来の我々グループのモデル (NEMURO、MEM) では不可能だった亜表層クロロフィル極大の再現に成功したが、本年度では再現できた理由を調べた。クロロフィル・炭素比は亜熱帯表層では  $0.01\text{ g chl/molC}$  以下だったが、深度  $120\text{ m}$  では  $0.1\text{ g chl/molC}$  となり、表層の 10 倍となっていた。つまり、クロロフィル極大層は細胞内のクロロフィル量が表層より著しく高くなることで形成されており、クロロフィル極大層で一次生産が高い訳では無いことが判った。従来の MEM 等ではクロロフィル・炭素比が固定されており、細胞内クロロフィル量の深度による増加が無いので、亜表層クロロフィル極大の再現が出来ないと言える。

## 研究成果

Yoshio Masuda、Yasuhiro Yamanaka、Takafumi Hirata、Hideyuki Nakano: A phytoplankton model with dynamic stoichiometry based on a new instant acclimation scheme: good reproduction of the subsurface chlorophyll maximum and primary production、JpGU Meeting 2018、千葉、2018 年 5 月 23 日。

## 今後の問題点

今後の課題としては、今回開発したモデルへの炭素循環過程の導入が挙げられる。この実装に要する作業量はあまり多くないが、現在は開発者が一人しかいないので手が回っていない状況である。

## 参考文献:

- Pahlow, M., A. Oshlies, 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.

## 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 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で形態が明瞭にとらえられるが、客観解析においては再現性がよくなく、それにともなう力学場はうまくとらえることができない。全球雲解像モデル NICAM の出力において類似の現象が検出されているので、これまで行われた実験結果のアーカイブを解析すれば、多数の現象発生を取り出すことができることが期待できる。モデル出力の風や気圧などの力学場を雲活動と合わせ解析することができれば、現実大気観測ではできなかった、現象発生のメカニズムを探究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

NICAM の実験出力を用いて、熱帯収束帯(ITCZ)内でみられる大規模雲域の南北分割現象についての解析をおこなう。分割現象を主観的な方法で見だし、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、実際の大气で起きている現象の機構を説明するヒントを見いだす。昨年度は短期間の MJO 再現実験の結果の解析を行ったが、本年度はさらに長期間(2004 年 6 月からの 1 年間)の積分結果について解析を行った。

## 4. 研究成果

現実大気でみられるような、積乱雲活動が衰弱したあとに 2 本の帯にきれいに分離していくような事例はみつからなかったが、活発な積乱雲活動が続いている ITCZ 内の長い雲帯からほぼ平行な東西 1000km スケールの巻雲が分離していく様子が数例観察されたため、その事例について巻雲帯のライフサイクルを調べた。以下に典型的な 1 事例についての所見を示す。

シミュレーション時間 2005 年 5 月 14 日 18Z 頃から ITCZ より北側に巻雲が生成して、15 日 06Z 頃にかけて約 300km 離れた 8-9N 付近に明瞭な雲帯を形成した(図 1)。この帯は ITCZ 内の帯(4N)と違って中下層に雲水をもたないことから巻雲だと判断される。興味深いのは、この巻雲を移流させたと思われる南風は高度 13km 以下

にしか認められない(図 2)にもかかわらず、分離した巻雲のうち最も雲氷の多い高度は南風のない高度 14-15km 付近だということである。鉛直流の精密分布図では、高度 14km 付近は ITCZ の北側で上昇流の卓越がみられ、とくに雲氷の多い場所のはっきりした上昇流域との一致を見る。12km 付近を移流してきた巻雲付近で何かの原因によって上昇流が起き、さらに上方に新たな雲氷を形成したように見える。このような上昇流の卓越は現実大気での大規模雲帯分割時の特徴である北側の雲帯の長い寿命を説明する端緒になる可能性がある。

さらに、分割現象のトリガーについても調べた。より東方でよく発生するやはり帯状の雲帯からの変形である ITCZ ブレイクダウンも順圧傾圧不安定による説明がなされているので、この分割現象も不安定による生成ではないかと考えた。形態からして慣性不安定に近い現象であると考え、その必要条件を調べたところ、ITCZ のすぐ北側で分割前日の 14 日から絶対渦度が負になっていた(図 3)。赤道に近いと地衡風が成り立たない状況なので、これだけで慣性不安定だとはいえないが、この仮説のもとにさらに解析を行っていく計画である。

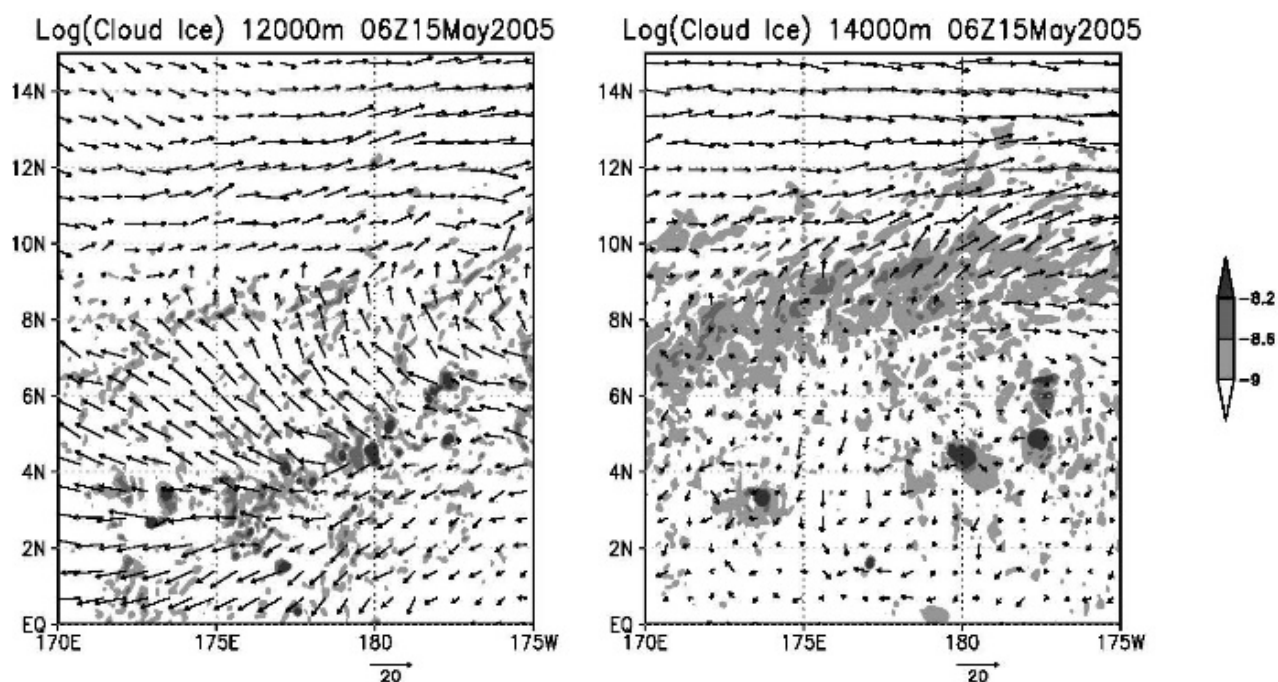


図 1: シミュレーション時間 06Z15May2005 における雲氷量(着色、対数表示)および水平風ベクトル. (左) 高度 12km, (右) 高度 14km. 12km 高度では積乱雲を中心とする雲帯(4N 付近)からの水平発散風が明瞭. 分離した巻雲帯は 14km で 8-9N 付近で明瞭.

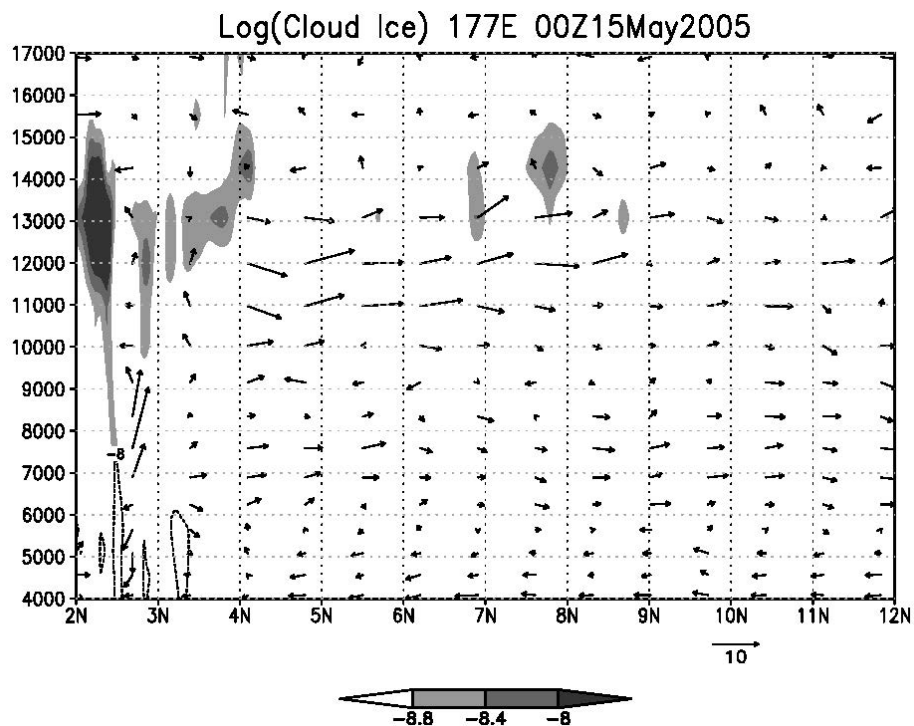


図 2: シミュレーション時間 00Z15May での雲氷量(着色、対数表示)、南北風および鉛直風(m/s, 鉛直風は 20 倍表示)、および雲氷量(等値線)、経度 177E での断面

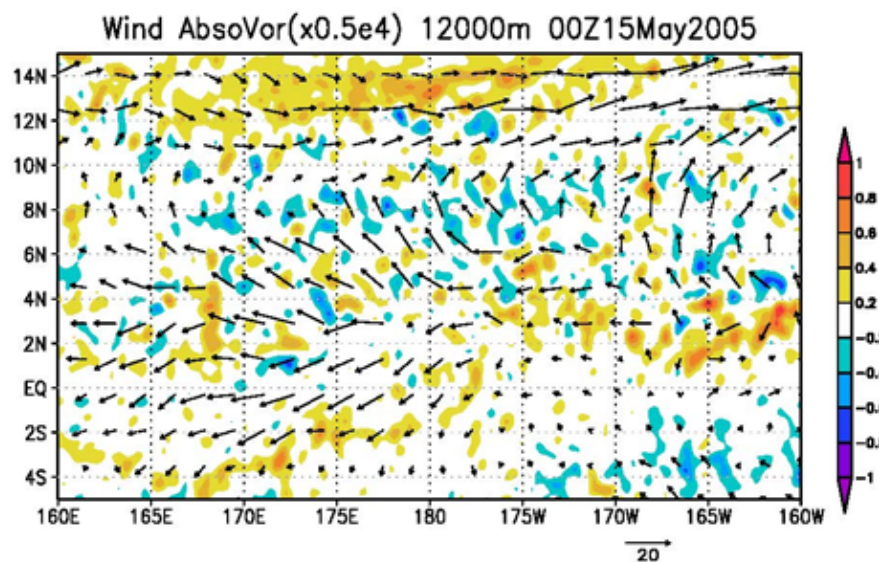


図 3: 雲帯が北上中の時間における絶対渦度の分布. 4N-10N にかけてまとまった負値領域がみられる. この領域は慣性不安定の必要条件を満たしている可能性が高い.

## 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

1990 年代以降, 中央アジアから東アジアにかけての中緯度ユーラシア域では冬季気温の低下傾向が顕著である (Cohen *et al.* 2014). 地球温暖化と一見矛盾するような地域的寒冷化に対し, 数多くの要因分析研究がなされてきた. 直接の要因はシベリア高気圧とそれに伴う寒気移流の強化であるが, それが大気の内変動であるとする説と, 北極海氷減少に対する大気の応答であるとする説があり, 論争となっている (Shepherd 2016). 主張が研究によって異なる背景には, 大気大循環モデルの海氷変動に対する応答がモデルや実験設定によって大きく異なるという問題がある.

## 研究内容

本研究は, 複数の大気大循環モデルによる大規模アンサンブル Atmospheric Model Intercomparison Project (AMIP) 実験と観測データとの間の特異値分解 (SVD) 解析により観測とモデルの間の共変動を抽出し, これに基づき観測された寒冷化傾向に対するバレンツ・カラ海氷減少の影響の定量化を行った.

AM3, CAM4, CAM5.1, ECHAM5.4, CEOS-5, GFSv2 の 6 つの大気大循環モデルによる AMIP 実験を米国海洋大気庁 (NOAA) 気候評価ファシリティ (FACTS) から取得し, これを MIROC4-AGCM による同様の実験と併せたマルチモデルアンサンブル (MME) を用いた. 1980 年から 2014 年までの冬季 (12-2 月) 平均を解析対象とした. まず各モデルから 12 アンサンブルメンバー (計 84 メンバー) に対してそれぞれ線形変化傾向を除去した後,  $[20^{\circ}\text{-}90^{\circ}\text{N}, 0^{\circ}\text{-}180^{\circ}\text{E}]$  の範囲でその地表面気温と ERA-Interim (Dee *et al.* 2011) の地表面気温との間で SVD 解析を行った. 解析は 84 メンバー全てを連結し, 対応して ERA-Interim データを 84 回繰り返すことで, モデル実験と観測データに共通して含まれる, 境界条件の変動に伴う変動成分を抽出した (図 1). 図 2 の解析では, 各モデルの全アンサンブルメンバ

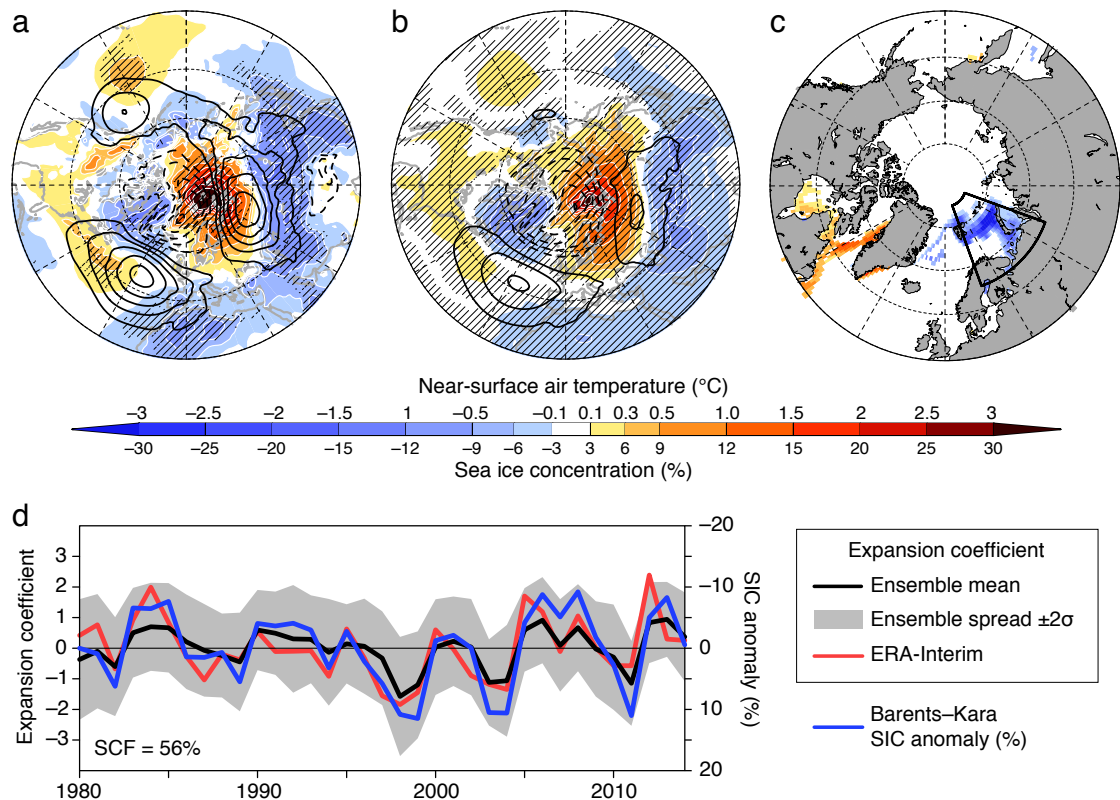


図 1. SVD1 に伴う (a) ERA-Interim, (b) AMIP MME における地表面気温 (陰影) 及び海面気圧 (等値線; 0.5hPa 毎) 偏差. 斜線は地表面気温偏差が 95%信頼限界を満たすことを表す. (c) AMIP MME 平均に回帰した海水被覆率偏差. (d) SVD1 に対応する展開係数時系列, 及び c に黒線で示したバレンツ・カラ海域平均海水被覆率偏差.

一を SVD パターンに射影し展開係数を評価した. また後述するように, MIROC4-AGCM を用いた感度実験と比較し, 海水変動に対する応答を議論した. なお, 本研究の詳細は Mori *et al.* (2019) で論じられている.

## 研究成果

SVD 解析によって抽出された観測-モデル第 1 共変動モード (以下 SVD1; 図 1) は, 図 1 の符号において東半球で北極域・ユーラシア大陸北部で高温偏差, ユーラシア大陸中緯度で低温偏差を伴う南北ダイポール構造 (Warm Arctic-Cold Eurasia; 以下 WACE) で特徴付けられる. これに伴いバレンツ・カラ海域では海水面積の顕著な減少が見られる. 実際, ERA-Interim 及び MME 平均 SVD1 時系列とバレンツ・カラ海水面積の相関はそれぞれ  $-0.79$ ,  $-0.95$  に達する. さらに MIROC4-AGCM を用いて, 株境界条件に与える海水被覆率及び海面水温を北極域のみで変動させ, それ以外で

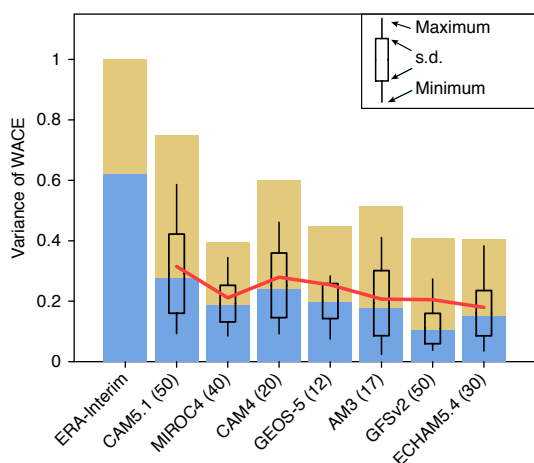


図 2. SVD1 が説明する地表面気温分散. 各棒は ERA-Interim による説明分散で規格化. 各モデルのアンサンブル平均分散を赤線で表す. また青棒と箱ひげは, この分散のうちバレンツ・カラ海氷面積との相関係数の 2 乗で説明される部分とその誤差範囲を表す. モデル名に続く括弧内の数字はアンサンブルサイズ.

れる成分は AMIP 実験のアンサンブル平均 (図 2 の赤線) により推定されるが, これは全 WACE 分散のうちバレンツ-カラ海氷面積との線形関係で説明される部分, 即ち相関係数の 2 乗を乗じたものとよく対応する (図 2 の青棒). この関係を用いて, 観測データにおける海氷駆動成分を, バレンツ・カラ海氷面積との相関係数から推定することができる (図 2 の青棒). これによれば, 全てのモデルにおいて, 海氷変動に伴う WACE 分散は観測に基づく推定よりもずっと小さい. このことは, モデルが系統的に海氷影響を過小評価している可能性を示唆する.

### 今後の問題点

本研究は大気大循環モデルにより北極海氷変動に対する応答を抽出したが, 上記の過小評価の要因として, 大気-海洋-海氷相互作用が含まれていないことがまず考えられる. 結合モデルを用いてその可能性を検討することが今後の重要な課題である.

### 参考文献

Cohen, J. *et al.* Recent Arctic amplification and extreme mid-latitude weather. *Nat. Geosci.*

は気候値に固定する実験, 及び反対に北極域では気候値に固定しその外で変動させる実験を行ったところ, WACE パターン変動の大部分は北極域の境界条件の変動で説明されることから, AMIP アンサンブル平均に見られる同パターンは北極海氷変動への応答であることが示唆された.

ただし, WACE の全変動が境界条件の変動に対する応答で説明されるわけではない. WACE は境界条件を気候値に固定した実験においても存在するが, 境界条件変動, 特に北極海氷変動によってその確率が変調される. この境界条件によって駆動さ

- 7, 627–637 (2014).
- Dee, D. P. *et al.* The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* **137**, 553–597 (2011).
- Mori, M., Kosaka, Y., Watanabe, M., Nakamura, H. and Kimoto, M. A reconciled estimate of Arctic sea-ice loss on recent Eurasian cooling. *Nat. Clim. Change* **9**, 123–129 (2019).
- Sakamoto, T. T. *et al.* MIROC4h: a new high-resolution atmosphere-ocean coupled general circulation model. *J. Meteor. Soc. Japan.* **90**, 325–359 (2012).
- Shepherd, T. G. Effects of a warming Arctic. *Science* **353**, 989–990 (2016).

## 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* の粒子散乱テーブルの大粒子への拡張を行った。また、気体吸収過程の基となる気体吸収テーブルの作成法についてパッケージの整備を始め、同時にマニュアルも作成中である。

### 3. 研究成果

降雪粒子や降雨粒子の放射影響を導入するため、これまでも検討を続けており、降雨粒子としてサイズパラメーターが 25000 までの球形散乱を適用できるように変更を加えてあるが、今年度は雲氷粒子として六角柱、降雪粒子として *aggregate* の形状を仮定し、Yang et al. [2013]の散乱データベースを *MstrnX* へ適用できるよう変更を加えた。従来も六角柱粒子は適用可能であったが、元になっているデータは旧版 (Yang et al., 2000,2005)であったため、同時に更新した。この更新により、等価体積半径が  $500\ \mu\text{m}$

までの粒子の散乱が可能となった。

また、今年度は、気体吸収過程の基となる気体吸収テーブルの作成法についてパッケージの整備を行った。パッケージは大きく分けて3つに分かれている。吸収データベース HITRAN と連続吸収プログラム MT\_CKD から導出した吸収係数を *MstrnX* の伝達過程に当てはめて LBL 計算を行う *MstrnX\_LBL* パッケージ、同じく吸収係数をバンド領域で並び替えて *k*-分布を作成する *k*-分布作成パッケージ、LBL 計算の結果に合うように *k*-分布の積分点と重みを決定する最適化パッケージである。今回の整備は気体吸収テーブルの次の更新を見据えたものであり、昨年度確認した波数、気圧や温度の解像度依存性に基づいた様々な更新点が含まれている。*MstrnX\_LBL* パッケージで読み込む気体の吸収係数は、主要7気体（水蒸気、二酸化炭素、オゾン、一酸化二窒素、一酸化炭素、メタン、酸素）についてそれぞれの吸収線が存在する波数領域でテーブル化されている。波数分解能は波数  $4000\text{cm}^{-1}$  以下(波長  $2.5\mu\text{m}$  以上)では  $0.001\text{cm}^{-1}$ 、それ以上の波数では  $0.01\text{cm}^{-1}$  ごとに設定されている。気圧は27点( $0.01-1000$  の対数線形分割と  $1100\text{hPa}$ )、気温10点( $150-330\text{K}$ 、 $20\text{K}$  ごと)について格納されている。これらのパッケージについてはボルドー大学の小玉博士に協力を依頼し、説明書を作成中である。

さらに、2018年6月に Reading 大学で行われた Tri-MIP-Athlon Workshop に参加した。これは AerChemMIP(Aerosols and Chemistry MIP)、RFMIP (Radiative Forcing MIP)、PDRMIP (Precipitation Driver MIP)の3つの相互比較プロジェクトが合同で行うワークショップで、関連する分野の発表や議論を相補的に行った。直接の RFMIP に関する議論は行われなかったが、各国の全球気候モデルの計算結果や放射伝達モデルの開発状況などが示された。関口も *MstrnX* の二酸化炭素4倍増対応版に関するポスター発表を行い、意見交換を行った。この4倍増対応版は20世紀の温度上昇の再現性が悪く、CMIP6では採用されないことになったが、以前行われた放射コード相互比較(Pincus et al., 2015)のプロファイルを用いて比較を行った

ところ、現行の 29 バンド 111 点の気体吸収テーブルよりも 4 倍増時の放射強制力の見積もりが大幅に改善されている（図 1）。

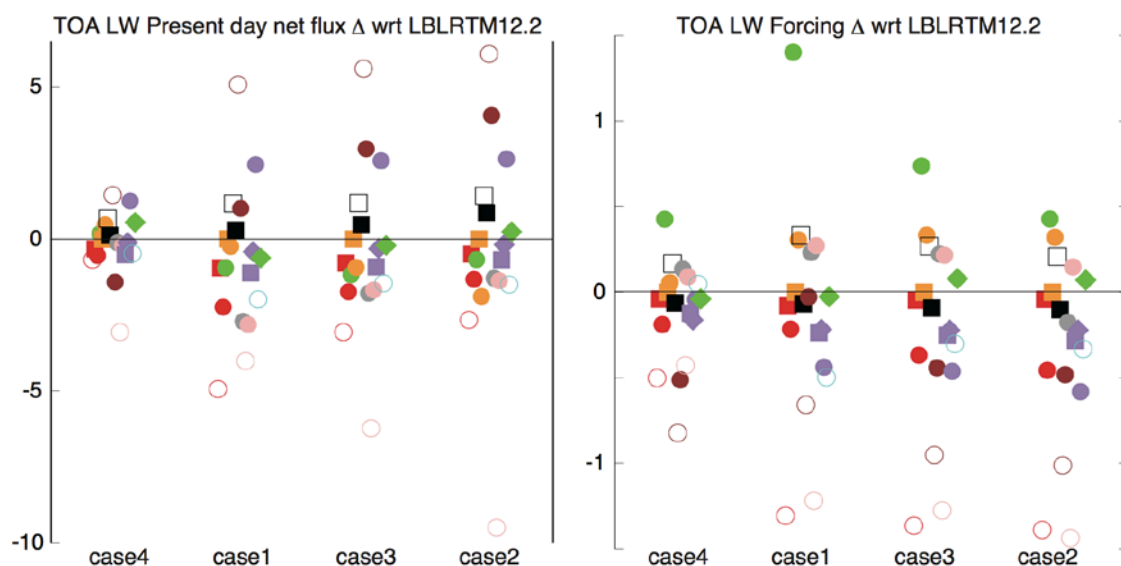


図 1：大気上端における正味の長波放射フラックス（左図）と二酸化炭素 4 倍増時の放射強制力（右図）の各モデルの結果と LBLRTM ver.12.2 の結果との差。緑の丸が MstrnX の 29 バンド 111 点の気体吸収テーブルを用いた結果、緑のひし形が二酸化炭素 4 倍増対応テーブル(29 バンド 147 点)を用いた結果。

#### 4. 今後の課題

今年度は大粒子による散乱過程の整備と気体吸収テーブルの再更新を見据えたプログラムのパッケージ化を行った。また、RFMIP の会合に参加し、各国の放射伝達モデルの開発担当者と意見を交換した。来年度は RFMIP-IRF の計算を行い、気体吸収テーブルの更新について検討を続ける予定である。

## 「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」

<sup>1</sup>松村義正 <sup>2</sup>大橋良彦 <sup>1</sup>桂将太 <sup>1</sup>羽角博康

<sup>1</sup> 東京大学大気海洋研究所, <sup>2</sup> 東京海洋大学

### 研究目的

本研究は特に沿岸域を対象に、高解像度非静力学モデル kinaco と相対的に荒い解像度の OGCM をシームレスに接続することで、多様な時空間スケールを扱うことのできる包括的な海洋モデリングプラットフォームの構築を目指している。本年度も昨年に引き続きモデル力学コアの高度化を実施するとともに、1) 三陸沿岸域での非静力学海洋ダウンスケールモデルの構築 2) 北西部グリーンランドフィヨルドの高解像度モデルによる氷河融解水動態に関する研究を実施した。

### 研究内容

#### 非静力学モデルコアの改良

我々が開発している海洋非静力学モデル kinaco は、そもそもの開発目的として OGCM では解像されない微小スケールプロセスの直接数値実験を実現することを念頭においており、このため OGCM では必須となる鉛直乱流混合パラメタリゼーションや比較的荒い解像度の気象要素データによるバルク式の海面境界条件等を実装していなかった。しかし OGCM と非静力学モデルをシームレスに接続するためには、非静力学モデルコアを用いて OGCM と同等の解像度で現実的なシミュレーションが実現できなければならない。そこで kinaco に鉛直乱流混合パラメタリゼーションとして Umlauf and Burchard (2003) が提唱した Generic Length Scale (GLS) モデルを実装した。これは  $k-\epsilon$  モデルなどのいわゆる 2 方程式モデルを一般化したものであり、乱流運動エネルギーと一般化乱流長さスケールの二つを予報することでサブグリッドスケールの鉛直粘性・鉛直拡散係数を診断する。GLS モデルはすでに多くの OGCM や領域海洋モデルに導入・運用されており、また特に適切に一般化長さスケールの次元を選択することで境界近傍において乱流長さスケールを制限する壁関数が不要となるという特徴があるため、本課題がターゲットとする沿岸域においても良好なパフォーマンスが期待できる。

現実的海面境界条件としては、モデル間の接続や相互運用を考慮して、大気海洋研究所・海洋研究開発機構で開発運用されている COCO にて用いられるバルク式 (Kara et al., 2000) を踏襲した。具体的な気象要素データとしては気象庁気象研究所が公開している JRA55-DO や、日本近海においては気象庁が公開している数値予報メソモデル (MSM, 5km 解像度)・局所モデル (LFM, 2km 解像度) の利用を想定している。また独自の改良として、蒸発/降水並びに河川水流入がある

場合に、水温・塩分及び各種トレーサーがどのように供給/除去されるかをそれぞれ個別に外部ファイル等から入力可能とした。これにより例えば河川水の水温や溶存物質の時間変動を容易に導入できる。

また、海洋低次生態系モデルとして NEMURO/MEM (Shigemitsu et al., 2012) を移植した。その他、粒子追跡パッケージを東大情報基盤センター Oakleaf-PACS へ移植（当該計算機の不正な仕様による粒子出力の欠損の回避）や Python 言語による後処理/作図ツールの整備を行った。

### 東北三陸沖を対象とする高解像度非静力学海洋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、三陸沿岸域における高解像度ダウンスケールモデルを構築し、アワビ幼生を模した粒子追跡実験を遂行している。三陸沿岸域におけるアワビの主な産卵時期である 9 月に焦点を当て、大槌湾で産まれたアワビ幼生は湾内のどの場所で着底し成長するのか、また、他の周辺の湾からのアワビ幼生の流出入はないのかを明らかにすることを目的としている。kinaco は通常の静力学モデルでは再現できないより小さなスケールの鉛直運動を再現でき、特に三陸沖の大陸斜面域での内部潮汐による乱流混合過程を陽に再現可能である。また、オンラインで粒子追跡を行うことができ、湾内より詳細なアワビ幼生の拡散過程を調べることが出来る。

まず境界条件として与える境界流速データの作成、および、予備的解析として三陸沿岸域の各湾内の水の流出入過程と湾間の水交換過程の有無を明らかにすることを目的として、三陸沿岸域を対象とした領域モデルを構築した。解像度は 12 秒×12 秒で、地形は JTOPO のデータを内挿して作成した。大気境界条件は、気象庁メソモデル(MSM)の海上風、海面気圧、海上気温、海上比湿、降水のほか、JRA55-do の短波放射、長波放射データを使用した。境界流速および水温・塩分は海洋研究開発機構により提供を受けた海洋再解析データ FORA を使用した。これには潮汐が含まれているため、潮汐による湾間の水塊流出入過程を再現することが期待できる。対象期間は 2013 年 9 月 1 日~9 月 30 日とした（スピニングを 1 カ月実施し 9 月 1 日 0 時時点の初期値を作成）。本実験では FORA から内挿された側面境界流入出の時間変動によりモデル内に潮汐が導入され、釜石沖の潮位計観測を良く再現していた（図 1a）。また、大規模な流動場は FORA データから乖離することなく、フロント構造やストリーマなど FORA では見られない微細構造を表現した（図 1b）。本実験の初期時刻において、各湾内および沿岸域の海面に粒子を設置し、粒子追跡を行った。多くの粒子は西岸境界流によって南へと運ばれるが、一度沖に出た粒子も潮汐・渦によって沿岸域へと戻り、出発点よりも南の湾内へと流入している様子が確認できた（図 1c）。この結果は三陸沿岸域において、潮汐ならびにサブメソスケール以下の渦運動に起因する湾間の水交換過程の存在を示唆する。今後は、今回再現できた流速場を新たに境界条件とし、粒子にアワビの卵・幼生としての特性を付加することで、当初の目的である大槌湾内のアワビ幼生の分散過程を調査する。また、本実験の他の期間も対象にして行うことで、本研究により明らかになった湾間の水交換過程をより詳細に解析する。

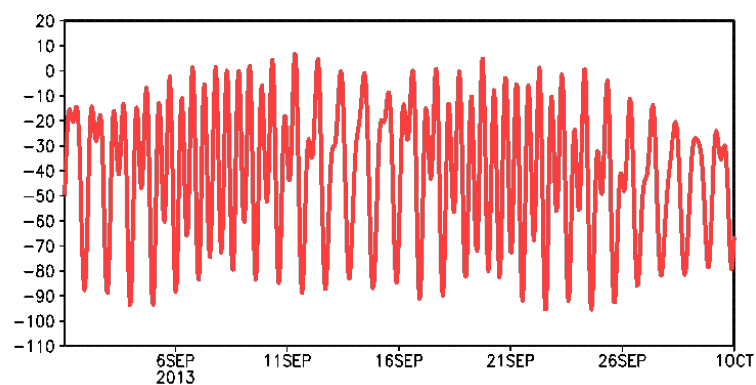


図 1a：本実験における釜石沖の海面高度(cm)

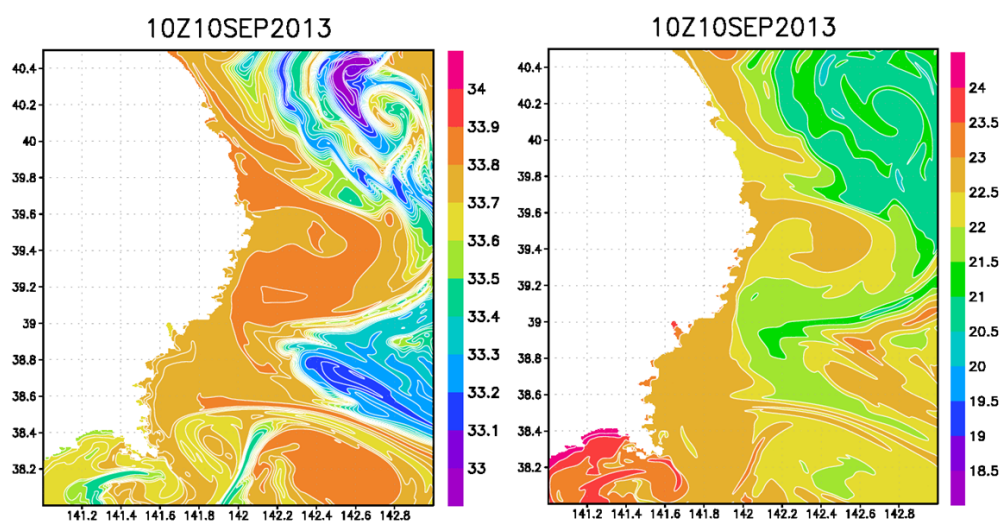


図 1b：2013 年 9 月 10 日 10 時における海面塩分（左）と海面水温（右）

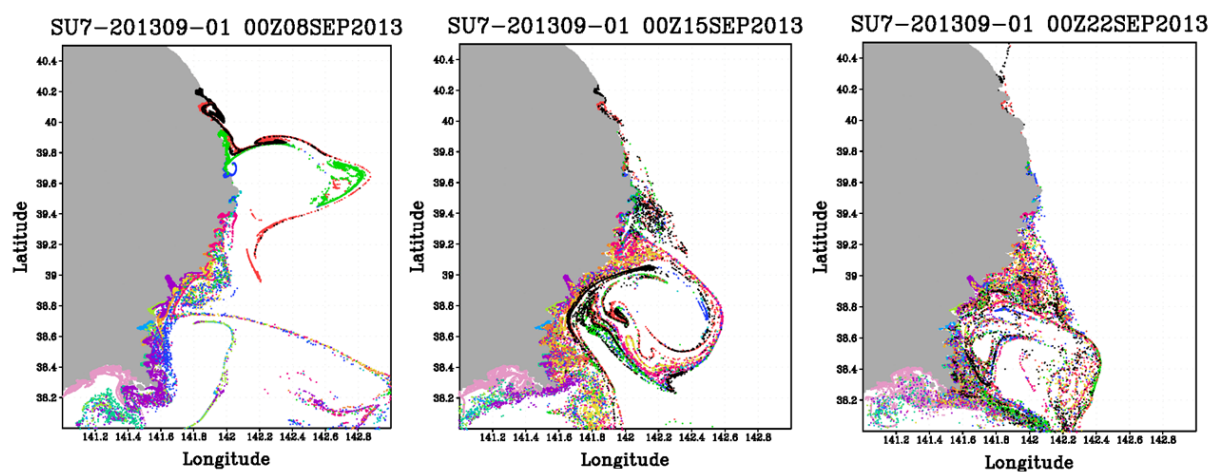


図 1c：2013 年 9 月 8 日 0 時（左）、15 日 0 時（中）、22 日 0 時（右）における粒子の位置。色は出発点(湾) に対応する

## グリーンランド北西部フィヨルドの融解水動態に関する数値的研究

近年、グリーンランド氷床の質量損失に伴って、海洋への融解水の流出量が増加している。特に海洋に流れ出す氷河からの融解水流出は、海水・懸濁物質・栄養塩などを鉛直・水平的に輸送するため、沿岸海洋の循環・物質輸送・生物生産に重要な影響を及ぼす可能性が指摘されている。現場観測が実施されているグリーンランド北西部 Bowdoin フィヨルド近傍を対象として、フィヨルドへの氷河融解水流出過程を数値モデル実験から明らかにすることを目的としている。本年度はグリーンランド北西部の複数の氷河が海洋に流れ込むフィヨルド群 (Bowdoin フィヨルドを含む海域:  $65.5^{\circ}\text{--}70^{\circ}\text{W}$ ,  $77.1^{\circ}\text{--}77.8^{\circ}\text{N}$ ) を対象に、現実地形で非静力学海洋モデルを使用し数値モデル実験を実施した。各領域において異なる氷河融解水トレーサーを導入し、それぞれの融解水の循環への寄与を調べた。さらに、各氷河からの融解水量は標高分布および流域面積に基づいて重み付けし設定した。基本的には、各氷河から流出した融解水はコリオリ力の影響を受けて湾内を循環していた(図 1)。コリオリ力の影響に加え、北側に位置する氷河からの融解水の拡がりや南西に位置する氷河融解水の北東側への拡がりを妨げる様子が見られた。さらに、Bowdoin 氷河融解水の拡がりについては衛星で検出された高濁度水分布とも概ね一致していた (図 2)。今後は氷河融解水量の経年変動に着目して、衛星で検出される高濁度水との対応を含めた氷河融解水の挙動を詳細に解析していく予定である。

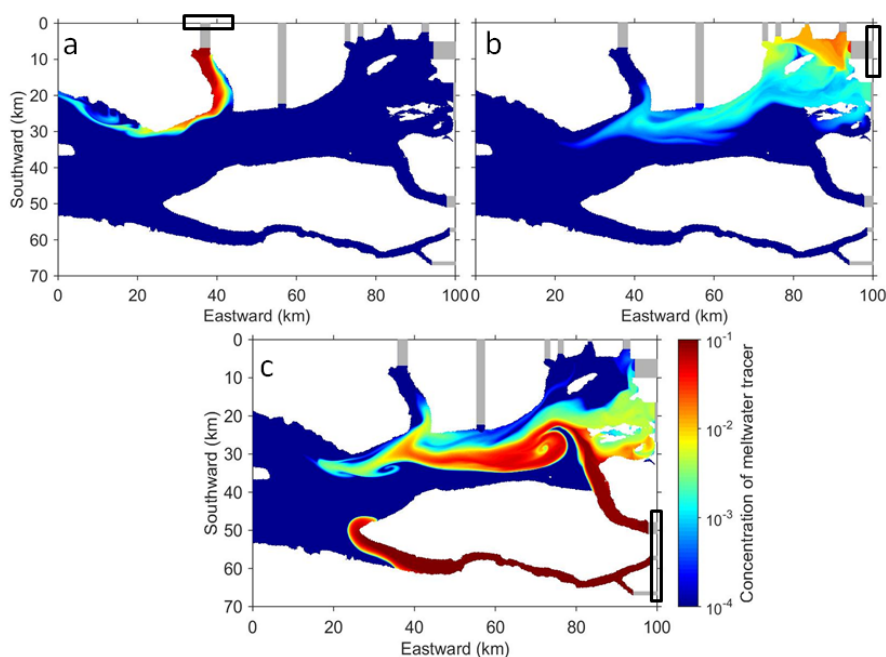


図 2. 海表面における各氷河融解水トレーサーの濃度分布.それぞれ黒枠領域に位置する氷河融解水トレーサーの分布を示す.(a)積分開始 6 日後の Bowdoin 氷河融解水,(b)8 日後の Tracy 氷河融解水,(c)8 日後の領域南東端に位置する 3 つの氷河からの融解水。