

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 5月 15日現在

機関番号：14501

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21340139

研究課題名（和文） 水惑星国際比較実験にもとづく降水構造のモデル表現に関する研究

研究課題名（英文） Research on the representation of precipitation structure in general circulation models based on the results of the Aqua-Planet Experiment Project

研究代表者

林 祥介 (HAYASHI YOSHI-YUKI)

神戸大学・理学研究科・教授

研究者番号：20180979

研究成果の概要（和文）：世界各国の14の気候予測・数値天気予報グループが参加して行われた「水惑星国際比較実験」(APE)で収集された理想化境界条件での大循環モデル実験の結果を包括的に解析し、熱帯降水活動のモデル毎の公汎な多様性をスペクトル構造と空間構造の両面で明らかにした。また、階層的降水構造のスペクトル構造、および、赤道上に局在する海洋暖水域に対する大気応答の多様性に関して、新たな理論的知見が得られた。

研究成果の概要（英文）： Comprehensive analyses are made on the output from the general circulation model experiments under idealized lower boundary conditions in the Aqua-Planet Experiment Project (APE), which was participated by 14 modeling groups aiming at climate studies or numerical weather prediction in the world. The results demonstrate a great variety among the structure of tropical precipitation disturbances simulated in the participating models, both in wavenumber space and in real space. In addition, new theoretical insights are obtained, one of which concerns the spectral property of the hierarchical rainfall structure and another concerns the variety of large-scale atmospheric response to a localized sea surface temperature anomaly placed on the equator.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	4,200,000	1,260,000	5,460,000
2010年度	2,200,000	660,000	2,860,000
2011年度	2,600,000	780,000	3,380,000
年度			
年度			
総計	9,000,000	2,700,000	11,700,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学，気象・海洋物理・陸水学

キーワード：水惑星・大気大循環・熱帯大気・積雲パラメタリゼーション・積雲と大規模運動の相互作用・赤道波・大気自由振動・定常ロスビー波

1. 研究開始当初の背景

地球の熱帯大気には、0(1km)の空間スケールと0(1時間)の寿命を持つ個々の積雲か

ら、クラウドクラスタ，スーパークラウドクラスタを経て，地球を一周する規模と数十日の周期をもつ季節内変動に至るまでの，階層的に組織化された雲降水構造が存在する。し

かし、現状の大気大循環モデルではこの階層構造はうまく表現できていない。そもそも大気大循環モデルの解像度は0(100km)であり、積雲を直接表現できない。そのため、積雲の効果を取り込むためのパラメタリゼーションが様々に工夫され導入されているとはいえ、解像度の限界に近いクラウドクラスタやスーパークラウドクラスタがモデル内でうまく表現されないこと自体は当然と言える。しかし、モデルによって表現が異なる理由は謎である。さらに、空間分解能に比して充分大規模であるはずの季節内変動の表現もモデルによって異なっていることが知られており、これは積雲パラメタリゼーションの相違が大規模循環全体に影響を与えるためであると想像されている。しかし、その具体的な構造も掌握されているとはいえない。

近年、積雲のスケールに近い解像度を持ち、積雲パラメタリゼーションを排除した「雲解像全球モデル」が実現したが (Satoh et al, 2005, Nasuno et al, 2006), その解像度は最も精細な計算でも3.5kmと、雲の内部構造を適切に表現するにはまだ粗すぎるので、多面的検証が必要である。また実行には極めて大きな計算機資源が必要であり、「地球シミュレータ」クラス計算機を以てしても数十日のシミュレーションしか行えない。したがって今後も、長期間の気候予測を始めとした長時間積分を要する様々な問題において、積雲を解像しない大気大循環モデルの役割はまだまだ大きいと予想され、積雲パラメタリゼーションを用いたモデルでの熱帯雲降水活動の様相を把握する必要がある。

この問題の考察の基礎となる理論的枠組みとして、雲と大規模大気運動の相互作用についての古典的な理論モデルである「条件付き不安定」、「wave-CISK」がある。これらは積雲活動と大規模上昇流との間に比例関係を仮定するものであり、複雑な数値モデルや現実大気への適合性については長く疑問が持たれてきた。しかし、現実に観測される雲活動の時空間変動(例えば Takayabu(1993), Wheeler and Kiladis (1999))には雲と大規模運動に比例関係を仮定した場合の赤道波の分散関係との対応が明確に見られる。また積雲を解像する高解像度の数値モデル実験の結果(例えば中島, 2006)にも、結合強度に水平スケール依存性があるとはいえ、雲と大規模運動には比例関係が見いだされる。これらの結果は、単純な概念モデルが現実と意外に高い整合性をもっていることを示唆しており、大循環モデルの振る舞いを「条件付き不安定」と「wave-CISK」の枠組みから再考察することには価値があると思われる。

このような認識のもと、2004年から国際共同研究「水惑星実験相互比較プロジェクト」(Aqua Planet Experiment, 略称 APE) が申請

者らのグループも含めて世界7ヶ国の14の気候予測・数値天気予報グループが参加して開始された。その目的は、「水惑星」すなわち地球の全表面が海に覆われているとする幾つかの設定の下で、大気大循環モデルのパフォーマンスを比較検討することである。海陸分布や山岳等、大気の外部からの強制を排除することにより、各モデルに内在する特性の違いが欠点も含めて赤裸々に表現され、大気大循環モデルの過酷なテストとなることが期待された。本研究の開始当初、数値実験が終了して計算結果のアーカイブが進められつつある段階にあった。

2. 研究の目的

本研究では、APE において実行された多数の大気大循環モデルによる水惑星実験の結果を解析し、各モデルが表現する熱帯降水構造の特徴を抽出し、その多様性を比較検討する。APE の実験設定には、海水面を東西一様としたシリーズと、これに赤道上の暖水域をおいたシリーズとがある。前者では、外的強制が一切無い条件での各モデル中で自発的に生じる擾乱についての情報が得られ、後者では、単純化した形状の海水温度偏差に対する各モデルの応答についての情報が得られる。我々はその両者を研究対象とした。

APE では各国の地球環境予測や数値天気予報の第一線で活躍する複雑かつ多様なモデルが用いられていると同時に、アーカイブされる変数の種類が限られているため、結果の相互比較の理解に困難が予想された。そこで、APE の解析と並行して、比較的シンプルな設定の大循環数値モデルによる幾つかの補助的な数値実験を行い、APEの結果、および、これと理論的枠組みとの間の関係を考察する。

以上を通して、モデル中の降水構造の表現を支配する力学を理解することを目指すとともに、種々のパラメタリゼーションや解像度の気大循環モデルのそれぞれにおけるクラウドクラスタやスーパークラスタ、季節内変動などの熱帯降水活動の各階層の表現のされ方の相違の原因を明確に説明できるようになり、さらには、特定のモデルにおけるパラメタのチューニングの可能な範囲や方法についての指針を得ることを目指した。

3. 研究の方法

(1) APE の結果の解析

APE で行なわれた数値実験の結果(現在は <http://www.met.reading.ac.uk/~mike/APE>, <http://www.gfd-dennou.org/library/ape/index.html.ja> に置かれている)を解析した。
①海水温が東西一様な実験で自発的に生成する降水構造の解析: 先ず要求されている

データセットが提出された17のモデルについて、標準実験での赤道近傍の降水および関連する変数の時空間変動構造の調査（時間経度断面図の作成、東西波数-周波数スペクトル解析）を行い、総合的比較を行った。次に、より詳細なデータが提出されている7つのモデルについて、時空間スペクトルフィルタにより赤道ケルビン波成分、西進慣性重力波成分、移流成分の分離抽出を行ったうえでコンジットを作成し、成分ごとにモデル相互の比較を行った。

②赤道上の海水温アノマリに対する応答の解析：東西に局在した暖水域が与えられた実験、および、東西に波数1の正弦的分布の海水温非一様性が与えられた実験について、データが提出された15のモデルの解析を行った。具体的には、赤道近傍の降水および関連する変数、および、中高緯度の気圧分布について時間平均応答を抽出し、モデル間の相互比較を行った。

(2) 補助的数値実験の実行と解析

①モデルの解像度に対するパラメタ実験：APEでは様々な積雲パラメタリゼーションと解像度のモデルが混在しており、結果の解釈は容易でない。そこで、同一のモデルで解像度を広い範囲で変えて数値実験を行い、その赤道近傍の降水構造についてAPEについてと同様の解析を行った。

②積雲加熱の鉛直分布に対するパラメタ実験：「wave-CISK」理論から積雲加熱の鉛直分布に対して熱帯降水の時空間構造が強い感度を示すことが予想される。この感度が大循環モデル中でどのように表現されるかを調査するための数値実験を行った。

③赤道上の局在した暖水域に対する応答の理解のための補助実験：APEで行われた暖水域応答実験の結果は、標準的な熱帯熱源応答理論 (Matsuno, 1966; Gill, 1980) と異なった様相を呈していた。これは、APEで標準実験として指定された海水温南北分布における特異な性質である可能性がある。そこで、標準実験以外についても局在暖水域応答を調べるパラメタ実験を行い解析した。

4. 研究成果

(1) APEの東西一様海水温実験で自発的に生成する降水構造

APEの統一された設定にもかかわらず、各モデルでの赤道近傍の降水の経度時間分布には幅広い多様性が見られた。それでも、スペクトル解析の結果にはある程度の類似性がみられ、ケルビン波、西進慣性重力波、および東風に流される成分（移流成分）を認識することができる。すなわち、モデル間の降水構造の特徴の相違は、これら3成分の

強度（総計と配分）の相違として記述可能である。これら3成分の各々をスペクトル空間で濾過後、回帰分析によりそれぞれの成分の空間構造を抽出した。モデル中のケルビン波と西進慣性重力波の水平構造はモデル間で類似しており、対応する浅水赤道波モードの構造に似ているが、位相速度が平均風速と近くなる高度では相違が目立つ。また移流成分の水平構造はモデル間で非常に異なっている。一方、鉛直構造は3成分すべてについてモデル毎の相違が大きい。雲による加熱の鉛直水平分布は極めて多様性に富んでおり、これは擾乱の鉛直構造の多様性が物理過程、特に積雲パラメタリゼーションの実装の差異に起因している可能性が高いことを示唆する。以上の結果は、J. Meteor. Soc. Japan, APE Special issueに投稿し、現在改訂中である。

なお、幾つかのモデルでは、赤道反対称な偏差をもち、ゆっくり西に進む降水構造を認識することができた。また気圧・風の変動の解析から、多くのモデルで大気潮汐、大気自由振動（2日周期、5日周期をはじめとするロスビー波、および1.3日周期のケルビン波）が明瞭に見いだされた。そのうちケルビン波の特性はモデルの鉛直解像度や上部境界条件に強く依存することがわかった。さらに熱帯降水活動の大気潮汐による振幅変調が降水の時空間スペクトルの短周期成分の構造を支配していることがわかった。これらは水惑星実験の東西一様な設定によって純粋な形態で出現したものであり、今後、詳細な研究によってその実体と出現機構の解明が期待される。

(2) APEのうち赤道上の暖水域に対する降水と循環構造の多様性

赤道上に局在した暖水域が置かれると、全てのモデルにおいて暖水域上で降水が増加する。しかし、降水の増量はモデルごとに3倍程度の幅で異なる。熱帯全体で南北平均した応答の大小は暖水域を与える以前の東西一様な海水温分布における降水の大小と相当程度対応することがわかったが、それ以外の特徴の成因は理解できていない。降水アノマリに反応して形成される循環の鉛直構造も、モデルごとに非常に異なる。これは恐らく、主に対流パラメタリゼーションの差異に起因するものである。一方、循環の応答の水平構造にはモデル間に共通した特徴が見いだされる。ただし、その構造は標準的なMatsuno-Gillの赤道応答理論から期待される構造と非常に異なっており、西側のロスビー応答と東側のケルビン応答の代わりに、暖水域の東側に生成する定常ロスビー波によって特徴付けられる。中高緯度の応答もまたモデルごとに大きく異なるが、熱帯の降水応答の強さの違いによって、

ある程度は説明できる。

赤道上の東西波数 1 の海水温度 (SST) アノマリに対して生じる赤道上の降水の応答は同じく東西波数 1 の構造を持つが、降水偏差最大の経度は SST の分布に対して西に約 30 度ずれている。赤道近傍における降水応答の強さはモデルごとにかかなり異なっているが、標準実験における赤道への降水の集中の度合いによって、ある程度説明できる。熱帯の緯度帯で南北平均した応答は海面からの蒸発量のアノマリと強く相関する。局在した SST の場合と同様、降水応答に同様に生じる循環の鉛直構造はモデルごとに大きく異なる。一方、水平構造にはある程度の共通性が見いだされ、亜熱帯と中緯度では波数 1 のロスビー波によって特徴付けられる。ほとんどのモデルで、低緯度ではかなりの西風加速が現れる。この西風加速の強さは降水応答の強さとは相関しない。以上の結果は、J. Meteor. Soc. Japan, APE Special issue に投稿し、現在改訂中である。

(3) 局在する暖水域に対する熱帯大気応答理論の拡張するための数値実験と解析

APE において現れた局在暖水域への応答構造は、(2) に述べたように、Matsuno (1966) や Gill (1980) の理論的予言に反している。その理由を探るべく、暖水域導入実験を、標準の基準海水温南北分布だけでなく、追加として 3 種類の基準海水温南北分布について行い結果を解析した。その結果、上の特徴は、中緯度で海水温の南北傾度の大きい APE 標準実験の特異な性質であることが判明した。応答生成メカニズムは Sardeshmukh と Hoskins (1988) が議論したロスビー波源の枠組みによって理解することができることもわかった。この結果は、熱帯の海水温度異常の構造として、基本となる海水温分布の構造に依存して、典型的な Matsuno Gill 構造以外のものが広く現れる可能性を示したものであり、論文投稿準備中である。

(4) モデルの解像度に対するパラメタ実験

水平解像度の違いが赤道上の降水活動の様相に与える影響を調べる一連の数値実験を行った。過去に我々が行った類似の研究 (Yamada et al, 2005) では積雲パラメタリゼーション (Emanuel スキーム) を用いていたので、これと対比するために積雲パラメタリゼーションを排除した。その結果、赤道降水活動の特性は、やはり解像度に依存した。即ち、最も低解像度の実験 (切断波数 39) では水平スケール 1,000km 程度の降水擾乱が現れ東と西の両方に伝播する一方、最も高解像度の実験 (切断波数 159) では、東西スケール 3,000km 程度で東に進む降水構造の内部に東西スケール 300km 程度で西に進む降水構

造が内包される、現実と似た階層的構造が現れた。モデル中の変数の時空間スペクトル解析から、降水の変動構造の変化に対応して、下層の水蒸気量の時空間スペクトルに顕著な変化が見いだされた。具体的には、高解像度になるに従い、変動のパワーが特に西進成分の広い帯域で減少し、同時に低波数の東進成分が強くなっていた。また、APE の解析と同様に時空間スペクトルフィルターにより擾乱を分離した解析より、雪の生成融解に伴う短い鉛直波長の加熱構造の重要性が示唆された。

なお、階層的降水構造が生じる場合の降水の時空間スペクトルには、赤道ケルビン波とロスビー波の分散曲線を高周波側に周波数 $0.33d^{-1}$ 平行移動した特徴的な構造が見いだされる。実空間において二つのシグナルをかけ算すると、波数空間でそれぞれの波数の加減算した成分が現れることを念頭に置くと、この平行移動成分は、まさに大規模な東進 (および西進) 構造による短周期 (小スケール) 構造のモジュレーションを表現している。これと似たスペクトル構造は、APE の幾つかのモデルの結果にも見いだせる。この様な簡明なスペクトル成分の存在は、東西一様な水惑星設定によって初めて明確になったものであり、本研究の重要な成果である。以上の結果は、投稿論文として準備中である。

(5) 積雲加熱の鉛直分布に関する数値実験

大循環モデル中で積雲加熱と放射冷却が近似的にバランスする (放射対流平衡) ことを利用すると、大気内部に与える冷却の鉛直構造を変更することを通して間接的に積雲加熱をコントロールすることが可能である。この方法で、赤道域降水構造の発現に対する積雲加熱分布の影響を、簡略な大気大循環モデルを用いて調べた。積雲パラメタリゼーションとして、雲と大規模運動の対応の滑らかさの点で対照的と思われる二つのスキーム (Kuo, 1974 および Manabe et al, 1965) の二つについて比較した。Kuo スキームを用いた場合には、積雲加熱が対流圏上部で最大値を持つ実験では赤道上で格子点スケールの降水構造の東進が顕著になり、擾乱の鉛直構造には位相の傾きが見られた。これは wave-CISK が予言する擾乱の振る舞いである。これに対し、積雲加熱率が対流圏下層で最大値を持つ実験では、降水構造の西進が顕著になり、位相の傾きは見られず、通常の大気不安定が移流された構造となっていた。一方、積雲パラメタリゼーションに Manabe スキームを用いた場合、Kuo スキームの場合に現れたような明瞭な変化は生じなかった。この相違の理由の一部は、Manabe スキームで放射対流

平衡成立の程度が悪く、期待したような大きな凝結加熱分布の変化が小さいことと関係する可能性があるが、同時に、先に言及した加熱と大規模運動の対応のよし悪しとも関係している可能性がある。この結果は雑誌論文⑤として出版されている。

(6) 国際水惑星実験相互比較プロジェクト APE のデータサーバの整備

APEの全データを収容するとともに、標準的解析のクイックルック画像を網羅的に格納するデータサーバの整備を行った。これは本研究の遂行に寄与したのみならず、今後のAPE 関連研究において、全世界の研究者の便宜に資するものである。

(7) APEの成果を議論するミニワークショップの開催

2012年3月初めにAPEプロジェクトの主催者の一人である米国大気科学研究センターの Williamson 博士を招聘して関連研究の成果を議論するとともに、APEの目的の一つである大気大循環数値モデルのチューニングの方法論の枠組みについて展望した。

(8) まとめと今後の展望

世界の諸研究・現業機関で用いられている高度な大気大循環モデルについて、振る舞いの多様性を包括的に提示することが出来たのは本研究の大きな成果であるが、その原因の解明は、目標としていた程度には進まなかった。しかし、APE で収集されたデータは、本研究の終了時点から振り返れば、質量ともに限定的であると言わざるを得ず、やむを得ないところである。一方で、熱帯海水温偏差に対する大気応答に未知のパターンのあることなど、新しい問題を発見することが出来たことは、本課題の重要な成果である。ただし、その解明にはAPE とは別に適切なデザインの数値実験を行う必要があり、今後の課題である。

本課題で到達できなかったモデルの振る舞いの多様性の原因の解明には、APE を拡張したプロジェクトが必要である。そこでは、数値計算の結果を APE よりも詳細かつ包括的に収集するだけでなく、参加する数値モデルの詳細な記述(計算プログラムを含む)の収集が不可欠である。この「APE2」とも言うべき新プロジェクトは、APE の数値実験の実施から既に7年を経て諸機関のモデルも世代交代していることから実施が望まれる。本研究の成果は、そのような APE2 のデザインの不可欠な基礎を提供するものである。

5. 主な発表論文等

(研究代表者, 研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計6件)

- ① Blackburn, M., D.L. Williamson, K. Nakajima, W. Ohfuchi, Y.O. Takahashi, Y.-Y. Hayashi, H. Nakamura, M. Ishiwatari, ほか20名, The Aqua-Planet Experiment (APE): CONTROL SST Simulation, J. Meteorol. Soc. Japan, 査読有, Special Issue on the Aqua-Planet Experiment, (2012), in press.
- ② Blackburn, M., D.L. Williamson, K. Nakajima, W. Ohfuchi, Y.O. Takahashi, Y.-Y. Hayashi, H. Nakamura, M. Ishiwatari, ほか20名, The Aqua-Planet Experiment (APE): Response to changed meridional SST profile, J. Meteorol. Soc. Japan, 査読有, Special Issue on the Aqua-Planet Experiment, (2012), in press.
- ③ K. Rajendran, A. Kitoh, J. Srinivasan, M. Blackburn, D.L. Williamson, and, W. Ohfuchi, Effect of SST variation on ITCZ in APE simulations, J. Meteorol. Soc. Japan, 査読有, Special Issue on the Aqua-Planet Experiment, 2012, in press.
- ④ Williamson, D. L., M. Blackburn, B. J. Hoskins, K. Nakajima, W. Ohfuchi, Y.O. Takahashi, Y.-Y. Hayashi, H. Nakamura, M. Ishiwatari, ほか20名, The APE ATLAS, NCAR Technical Note, 査読有, NCAR/TN-484+STR, (2012), 500 ページ
- ⑤ Nakajima, K., Y. Yamada, M. Ishiwatari, and Y.-Y. Hayashi, Dependence of equatorial precipitation activity on the vertical profile of radiative cooling in an aqua-planet experiment, NAGARE Multimedia, 査読有, <http://www2.nagare.or.jp/mm/2012/nakajima/index.htm>, 2012.
- ⑥ Ishiwatari, M., E. Toyoda, Y. Morikawa, S. Takehiro, Y. Sasaki, S. Nishizawa, M. Odaka, N. Otake, Y.O. Takahashi, K. Nakajima, T. Horinouchi, M. Shiotani, Y.-Y. Hayashi, and Gtool development group, "Gtool5": a Fortran90 library of input/output interfaces for self-descriptive multi-dimensional data, Geosci. Model Dev., 査読有, 5, (2012), 449-455.

[学会発表] (計7件)

- ① Y.-Y. Hayashi, M. Blackburn, D.L. Williamson, K. Nakajima, Y. Yamada, Y. O. Takahashi, M. Ishiwatari, W. Ohfuchi, The variabilities of spontaneously generated tropical precipitation patterns found in APE Results, 8th

- Annual Meeting of Asia Oceania Geosciences Society, 2011/8/12, Taipei International Convention Center, Taipei, TAIWAN
- ② Y.-Y. Hayashi, K. Nakajima, Y. Yamada, Y. O. Takahashi, M. Ishiwatari, W. Ohfuchi, Organization of equatorial precipitation activity in an aqua-planet model, JIFT workshop on Hierarchical Self Organization of Turbulence and flows in Plasmas, Oceans and Atmospheres, 2010/03/29, University of California, San Diego, USA
- ③ Ohfuchi, W., Y. Yamada, T. Sampe, Y. O., Takahashi, M. K. Yoshioka, K. Nakajima, M. Ishiwatari, and Y.-Y. Hayashi, Description of sensitivity of the zonal jets and Hadley circulations in aqua planet experiment projects, 2nd OFES International Workshop and ESC; IPRC Joint Workshop on Computationally Intensive Modeling of the Climate System, 2009/12/10, International Pacific Research Center, Hawaii, USA.
- ④ Nakajima, K., Y.-Y. Hayashi, Y. Yamada, Y. O. Takahashi, M. Ishiwatari, W. Ohfuchi, The varieties of spontaneously generated tropical precipitation patterns found in APE Results. IAMAS/IAPSO/IACS Joint Assembly, 2009/07/28, Palais des congress de Montreal, CANADA.
- ⑤ Ohfuchi, W., Y. Yamada, T. Sampe, Y. O. Takahashi, M. K. Yoshioka, K. Nakajima, M. Ishiwatari, and Y.-Y. Hayashi, Sensitivity of intensities of subtropical jet and Hadley circulation on resolution of atmospheric general circulation models, IAMAS/IAPSO/IACS Joint Assembly, 2009/07/27, Palais des congress de Montreal, CANADA.
- ⑥ Nakajima, K., Y. Yamada, Y. O. Takahashi, M. Ishiwatari, K. Takaya, W. Ohfuchi, Y.-Y. Hayashi, The varieties of Tropical Precipitation Patterns forced by a Localized Sea Surface Temperature Anomaly on the Equator: Some expectations and APE results. IAMAS/IAPSO/IACS Joint Assembly, 2009/07/27, Palais des congress de Montreal, CANADA.
- ⑦ Blackburn, M., B. J. Hoskins, D. L. Williamson, Y.-Y. Hayashi, K. Nakajima, and 14 APE modeling groups, The Aqua-Planet Experiment: Comparison of Atmospheric GCM simulations on a

water-covered earth. IAMAS/IAPSO/IACS Joint Assembly, 2009/07/24, Palais des congress de Montreal, CANADA.

[その他]
ホームページ等

<http://www.gfd-dennou.org/library/ape/index.html>. ja

6. 研究組織

(1) 研究代表者

林 祥介 (HAYASHI YOSHI-YUKI)
神戸大学・大学院理学研究科・教授
研究者番号：20180979

(2) 研究分担者

中島 健介 (NAKAJIMA KENSUKE)
九州大学・大学院理学研究院・助教
研究者番号：10192668

大淵 済 (OHFUCHI WATARU)
独立行政法人海洋研究開発機構・地球シミュレータセンター・グループリーダー
研究者番号：30359228

(3) 連携研究者

高谷 康太郎 (TAKAYA KOUTAROU)
独立行政法人海洋研究開発機構・研究員
研究者番号：60392966

(4) 研究協力者

石渡 正樹 (ISHIWATARI MASAKI)
北海道大学・准教授
研究者番号：90271692

高橋 芳幸 (TAKAHASHI YOSHIYUKI)
神戸大学・大学院理学研究科・助教
研究者番号：00372657

(海外研究協力者)

David L. Williamson
米国大気研究センター・上級研究員
Michael Blackburn
英国レディング大学・大気科学センター・上級研究員