

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 12 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23340137

研究課題名(和文) 気候変化予測の不確実性低減に向けて：気候モデルと衛星データの融合的アプローチ

研究課題名(英文) Unified approach of climate modeling and satellite data analysis toward reducing uncertainty of climate change projection

研究代表者

渡部 雅浩 (Watanabe, Masahiro)

東京大学・大気海洋研究所・准教授

研究者番号：70344497

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 15,500,000円、(間接経費) 4,650,000円

研究成果の概要(和文)： 将来の全球気温上昇の予測は、IPCCによる最新の評価報告書でも不確実性を伴う。これは、予測を行う気候モデルが扱う物理過程(特に雲の素過程)に含まれる潜在的な誤差に負うところが大きい。そこで、気候モデルの物理過程を様々に変えたアンサンブルシミュレーションを実施し、近年の衛星計測による雲の詳細なデータでモデルの検証を行った。

物理アンサンブル生成は、世界的にも新規性の高いもので、気候変化時の雲フィードバックに関する解析結果は高い評価を受けることができた。また、衛星データを用いたモデル素過程及び気候学的な雲の評価から、今後の気候モデル改良に有益な知見となる、モデル間で共通する潜在誤差が見えてきた。

研究成果の概要(英文)： Future projection of global mean temperature rise has contained uncertainty, even in the latest IPCC Assessment Report. This uncertainty is partly attributed to potential errors in parameterization processes (of clouds in particular) in global climate models (GCMs). Therefore, this study attempted to clarify sources of uncertainty in cloud feedbacks to climate warming by generating a large ensemble in which model parameters as well as parameterization schemes have been perturbed. Also, satellite data for cloud properties were actively used to assess climate model simulations.

Physics ensemble based on the MIROC GCM is a novel set of numerical experiments to explore the cloud feedback processes, and was successfully recognised in international climate science community. Comparisons of mean cloud and cloud macrophysical properties between GCM and satellite data could provide clues for improving GCM for the subsequent climate change projection.

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：気候 気候モデル 衛星データ 物理アンサンブル 雲フィードバック 気候変化

1. 研究開始当初の背景

(1) 温暖化研究の現状

気候変動に関する政府間パネル (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) は、1988年の発足以来4度の報告書を公開している(2011年4月時点)。自然科学的な研究成果をまとめる第一作業部会報告において、過去および将来の気候変化に関する科学的知見は過去20年ほどで確実に増大している。2007年公開の第4次評価報告書 (AR4) では、詳細な地域気候の将来変化、地球炭素循環の変化、台風や熱波などの極端な気象現象の将来変化など、議論の対象とする現象が大きく拡大した。

温暖化研究の進展に貢献している主要分野として、全地球衛星計測と気候モデリングが挙げられる。人工衛星による計測は、気温や可降水量といった気象要素については既に20年以上のデータがあり、そこから対流圏の湿潤化・温暖化や成層圏の寒冷化といった、既に生じている気候変化を示すことができるようになった。また、全球気候モデル (General Circulation Model, GCM) による長期シミュレーションは将来の気候変化を定量的に推定する唯一の手段であり、モデルそのものの精度向上や物理過程の精緻化が進んでいる。とは言え、数メートルから1万キロメートルにわたるさまざまな空間スケールの現象を内包する気候システムの挙動を再現するには、現在のGCMはまだ十分な時空間解像度をもたず、そのことがモデル間の結果の違いや不確実性を生じる。AR4のモデル結果を用いて将来の全球平均地表面温度の予測における不確定要因を調べた研究によると、予測の不確実性自体は初期値に依存するシステム内部の変動により最初の20年ほどは高く、また排出シナリオの不確実性により今世紀後半にも高くなることが示されている。特筆すべきなのは、今世紀中盤までは排出シナリオの不確実性よりもGCMの不完全さに起因する不確実性の方が大きいことである。

(2) 気候モデルの現状

GCMでは、陽に表現できない格子以下の微過程をパラメタ化 (パラメタリゼーション) と呼ばれる手法を用いて表現する。特に、大気中の雲・降水・放射・乱流といった微過程の表現は、気候計算において本質的に重要である。モデル不確実性の多くは、このパラメタリゼーションが一意ではなくGCM間で異なることに起因している。これまで、モデルの不確実性はAR4の多数のモデル実験、単一のモデルで不確定なパラメータを系統的に変化させた多数の実験、のどちらかの集合 (アンサンブル) を用いて推定されてきた。

は比較的容易であるが、個々のGCMは構造的に違いが大きいため、不確実性を生じる要因の究明や不確実性の低減には限界がある。パラメータ・アンサンブルとも呼ばれるは

より望まれる方法だが、技術的に困難であるために英国他わずかなグループでしか実績がない。また、ベースとするGCMのパラメタリゼーションが粗雑だと有益な知見が得られない。

気候変化予測において最も不確実と考えられているのが、雲の変化である。例えば、温暖化時の海洋性下層雲の変化は、大気中CO₂濃度倍増時の全球気温の上昇率 (「気候感度」と呼ばれる) を決める重要な要因であるが、AR4時点では符号も含めて予測結果は大きくばらついていて、また、深い積雲対流に伴う非断熱加熱や海面風は熱帯大気海洋系において本質的な役割を果たしており、積雲対流のパラメタリゼーションはエルニーニョ南方振動 (ENSO) の再現性に大きなインパクトをもつ。その全球的な影響ゆえに、将来のENSOの変化が注目されているが、これもGCM間で結果がまちまちである。これらの不確実性を低減するには、観測データからGCMに対して何らかの拘束をかける必要があるが、モデルと観測の平均状態や年々変動の類似性などが多くの場合拘束条件として用いられており、不確実性の源である雲・降水の素過程を観測データから検証してモデルアンサンブルから確率的な気候変化予測を推定するという試みはほとんど行われていない。これは、素過程を検証できるようなデータがごく最近までなかったという事情にもよる。

(3) 本課題提案の動機

本課題代表者は、気候モデリングの専門家として、日本に2つあるGCMの一つであるMIROCと呼ばれる気候モデルの開発を共同研究者とともに進めてきた。過去数年間の成果として、大気モデルのパラメタリゼーションをほぼ入れ替えた次期気候モデルであるMIROC5の開発を終了することができた。MIROC5では熱帯降水分布やENSOなどの自然変動の再現性が大きく向上しており、既に文科省の21世紀気候変動予測革新プログラム (革新プログラム) において、第5次評価報告書 (AR5) のプロトコルに従った温暖化予測計算に用いられている。

一方、ここ数年で次々に打ち上げられた人工衛星により、全球的な雲・降水の3次元計測が始まっており、MIROC5開発時にも本課題分担研究者から雲物理量の初期プロダクトの提供を受けて、パラメタリゼーションの調整を行った経緯がある。こうした状況は、温暖化予測における不確定要因の探求と低減に向けて、GCMと衛星計測を効果的に併用することが可能になってきたことを意味する。

2. 研究の目的

本課題は、MIROC5のパラメータ・アンサンブルと3次元衛星計測による雲・降水の詳細なデータを融合させる新たなアプローチを用いた、気候変化予測における不確実性の要因探究および低減に資する科学的知見を得る

ことを目的とする。これにより、地球環境変動の評価および予測の高度化を図るとともに、国際連携による気候変動・環境研究を推進する。3年の研究期間内に、AR5に貢献する成果を得るとともに、その後の温暖化研究に繋がる新たな展開を目指す。

本研究は、AR5のために開発された最新の気候モデルを、最新のアルゴリズムで導出される新しい衛星計測のデータと組み合わせて、気候変化予測の不確実性低減を試みる点に特色がある。これは、既存の温暖化研究プログラムの狭間であって実現されていない課題である。前述の革新プログラムでは、AR5で新たに提案されたプロトコルを優先的に実施しなければならず、素過程に注目した不確実性の問題を扱うゆとりがない。一方、AR4の計算結果を比較解析するプロジェクトも動いているが、既に終了したモデル計算結果を解析しているため、GCMを用いたさまざまな数値実験を行うことができない。従って、本課題で提案するような、

- ・ GCM のパラメータ・アンサンブルにおける素過程の表現を衛星計測から検証し、
- ・ 微細な雲・降水過程の精度と気候変化を結び付けることで気候予測の不確実性低減に資する成果を得る

という研究はこれまでになかったものである。また、モデルと衛星計測のここ2~3年の発展があってようやくこのような融合的研究が提案できるようになってきたという意味でも新奇性のある課題である。

3. 研究の方法

本課題では、核となる研究を3つのフェイズに分ける。すなわち、1.多数のパラメータを系統的に変えたGCMのパラメータ・アンサンブル、2.アンサンブルにおける環境場と雲物理過程の関係を衛星データから検証し、素過程の点からモデルパラメータに対する拘束を同定、3.拘束されたパラメータで100年以上の現在気候実験および大気中CO₂濃度倍増実験を実行し、ENSOの特性変化や雲のフィードバックなどを調べる、というモデル-衛星-モデルの相互作用的作業である。フェイズ2では、モデル出力を衛星プロダクトに翻訳するための衛星シミュレータを活用し、雲光学特性などの従来検証できなかった量を3次元衛星データと比較解析する。期間後半には海外協力研究者とモデル相互比較を行い、国際連携を重視しながらAR5へ貢献する成果を公表する。

研究は以下のように構成される。

1. MIROC5のパラメータ・アンサンブル実験を実施
2. 自然変動における素過程表現をモデルと衛星データで比較解析
3. 衛星から拘束されるパラメータの組で現在気候とCO₂倍増時の長期計算を実施、

気候変化時の不確定要素についてのより確かな予測結果を導出

フェイズ1は次のように行う。まず、現在気候に相当するMIROC5参照実験のまわりでできる限り多くのパラメータに摂動を与えて短期(数年程度)の時間積分を行う。このパラメータ・アンサンブルE1を用いて、多自由度のパラメータ空間内にモデルのふるまいを射影する。パラメタリゼーションの本質は、微物理過程のフィードバックを格子スケールの環境場で関数化することであるから、それらの関係(非線形複雑系ゆえに式から理解することは困難)を可視化し、そこに衛星データから同様の関係を見積もって重ねることで、微物理表現に基づくパラメータの拘束が可能になる。これがフェイズ2の作業である。このとき、GCMの出力を直接衛星データと比較するため、分担者の開発してきた衛星シミュレータと呼ばれるアルゴリズムをMIROC5へ適用し、雲水/氷混合比・雲光学特性・非断熱加熱率といった従来検証できなかった量を比較解析する。また、本課題で用いる衛星データの期間は短い、ENSOなどの自然変動のパターンを参照して相互比較を行うことも有用である。これらの解析の結果、パラメータに対する拘束条件を見いだせば、より少ないパラメータのセットで100年以上の時間積分を現在および温暖化時の気候について行い、アンサンブルE2を作成する。ここから得られることが期待される気候変化の特徴(ENSOの特性変化や下層雲の応答など)は、素過程表現が衛星観測で拘束されているという意味で従来よりも高い信頼性をもつと考えられる。そのことを、アンサンブルE2の解析および2011年頃に公開予定の第5期結合モデル相互比較実験(CMIP5)のモデルアンサンブルを併用して、さまざまな形で示してゆくことを計画している。

4. 研究成果

(1) MIROC5による物理アンサンブル実験の実施

モデルの物理過程の誤差・不確実性が予測不確実性の大きな要因であるため、IPCC AR5に向けて開発されたコミュニティ気候モデルMIROC5による数値実験を実施した。具体的には、モデルパラメータに系統的な摂動を与えた多数のモデル実験(物理アンサンブル)を行い、その結果を解析した。特に雲のCO₂濃度変化に対する応答に起因するフィードバック過程が、モデルの自然変動の再現性に依存することを明らかにし、成果を発表するとともに論文として投稿した(論文リストの4)。

IPCC AR4の時点でのMIROCと、最新のMIROC5における気候変化実験の詳細な比較から、海面水温の上昇に対する雲のフィードバックに複数の時間スケールが混在している

こと、そのうち数年以内の速い変化が気候感度の不確実性に最も寄与することが分かった（成果リストの1）。また、異なる MIROC 間で物理過程のスキームを差し替えた物理差し替えアンサンブルを生成し、雲スキーム単独ではなく、それと他の過程（積雲および乱流混合）の結合によってモデルの異なるふるまいが生じていることが分かった。これらの結果は既に国際学会の招待講演などで発表され、論文としても投稿済みである（論文リストの2.）。このスキーム差し替え実験と、上記のパラメータ摂動実験をさらに組み合わせた大規模なアンサンブルを作成し、雲フィードバックの不確実性を調べるための貴重なデータを得た（成果リストの8）。

(2) 衛星シミュレータの GCM への導入

衛星プロダクトによるモデル検証方法の詳細を検討し、研究分担者の岡本・増永がそれぞれ開発している衛星シミュレータを MIROC5 に適用した。具体的には、MIROC5 大気モデルを観測データで初期値化して、衛星データの利用可能な期間について多数の疑似気象予報実験を実施した。3次元の雲や気象場、放射加熱などの瞬間値を保存し、衛星プロダクトと衛星シミュレータの出力との間で頻度解析、コンポジット解析などを用いて比較を行った後、モデルにおける雲-放射フィードバックを評価し、CO₂濃度倍増時あるいは海面水温上昇時（ともに温暖化時の大気への強制源となる）の雲放射強制の変化について議論した。この結果は、3本の投稿論文としてまとめられた（成果リストの5-7）。

MIROC5 および国外機関の複数のモデルによる各種の理想温暖化実験が別プロジェクトで実施された。そこでそのデータを用いて、気候モデル内で温暖化時の雲放射強制やフィードバックがばらつく要因について解析を行った（成果リストの5、10-11）。

上記の成果は、2012年8月に開催されたアジア太平洋地球物理学連合会議をはじめ、いくつかの国際会議における招待講演として報告された。

(3) CMIP5 気候モデルアンサンブルと A-train 衛星データの解析

本課題遂行中に、IPCC AR5 のベースとなる第5次結合モデル相互比較プロジェクト (CMIP5) の複数のモデルデータが利用可能になってきた。本課題で主に使用する MIROC5 のシミュレーションも CMIP5 に含まれている。そこで、CMIP5 の20以上のモデル結果を用いて、気候変化の不確実性にとって重要な北極域の温暖化増幅のメカニズム解析（成果リストの11）および、(1)で述べた MIROC5 の物理アンサンブルとの比較解析（成果リストの12）を行った。CMIP5 データの解析を行った研究論文はここ数年で山のように出版されているが、我々は自前のモデル実験を併せて実施している点でユニークな論文を執筆す

ることができた。

同様に、MIROC5 を含む CMIP5 の高頻度の出力や初期値化した予報型シミュレーションの結果を活用して、モデルにおける雲の微物理的な特徴を、CloudSAT や CALIPSO などの人工衛星群である 'A-Train' のデータと比較解析を行い、モデルの雲過程検証を実施した。この実作業は、A-Train を運用している米国ジェット推進研究所 (JPL) の研究チームとの共同作業として、現在までに3本の論文を執筆している（成果リストの3、9、13）。

また、MIROC5 を含む CMIP5 の気候変化シミュレーションから、将来のエルニーニョ強度の変化は不確実性が大きい一方で、赤道周辺の降水量変動はより振幅を増すことが見出された。これは、現在の気候における各モデルの平均降水量とよい関係があり、人工衛星から得られる降水量データを用いて制約することが可能である（成果リストの14）。

(4) 国際連携ほか

本課題は、AR5 編集作業と並行して実施しており、成果を国際的な科学コミュニティで活用するためスピーディに論文執筆を行うとともに、精力的に国際学会で公表してきた。課題期間3年で公表された論文（査読中を含む）は14篇あり、その半数が課題参画者を筆頭著者として執筆されたものである。

気候予測におけるモデルの不確実性の問題は、国際的にも未解決の課題として大きく取り上げられている。本課題の成果をもって、国際的な気候変化研究との連携を進めることができた。一例として、世界気候研究計画 (World Climate Research Program, WCRP) のもとで新たに提案された雲、循環、気候感度に関する Grand Challenge の共同コーディネーターに選ばれ、2014年3月にドイツで国際ワークショップを開催した。これは、今後の温暖化研究の新たな展開を模索する上で重要な会合であり、本課題の成果もそこで紹介された。

(5) 総括

本課題の2つの柱である、GCM を用いたアンサンブル数値実験による気候感度不確実性の研究及び、衛星データを活用した雲の素過程検証のうち、前者は予想以上の成果を挙げることができた。特に、(1)で述べたさまざまな物理アンサンブル生成をベースとした雲フィードバックの研究結果は、国際的にも認知され、高い評価を受けることができた。また、衛星データ（特に近年充実してきた雲物理量を測定する A-train 衛星群）を用いたモデル素過程及び気候学的な雲の評価については、米国 JPL のチームと共同で進めることで、数本の論文に繋がる成果を得た。一方で、当初の研究目標に含まれていた、衛星データでモデルアンサンブルを制約する作業については、モデルと衛星データの空間表現能力の違いや気候モデルの開発タイムラインとの不整合な

ど、いくつかの要因により実施することは叶わなかった。しかし、本課題の成果から、GCMのどの部分に潜在誤差があるかが見えてきたことで、今後のモデル開発に有益な知見を得ることはできたと考える。

IPCC AR5 では、気候感度の推定幅は AR4 以前とほとんど変わらず、気候変化の不確実性は実質的に低減されていないことが報告されている。本課題でも、気候感度の最尤値を推定することは目的とはしていない。一方で、気候感度のばらつきがどのような要因で生じるかについては、気候システムの素過程理解、大規模フィードバックの理解を通じて着実に知見が増えている。本課題の成果もそれに連なるものである。(4)で述べた WCRP では、雲・循環・気候感度の問題は今後 5~10 年で解決すべき最重要なものとして位置づけている。今後のさらなる研究の発展が必要とされる。

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)

* 全て査読あり

1. Watanabe, M., H. Shiogama, M. Yoshimori, T. Yokohata, T. Ogura, H. Okamoto, S. Emori, and M. Kimoto, Fast and slow timescales in the tropical low-cloud response to increasing CO₂ in two climate models. *Clim. Dyn.*, 39, 1627-1641, doi:10.1007/s00382-011-1178-y (2012).
2. Watanabe, M., H. Shiogama, and Coauthors, Using a multi-physics ensemble for exploring diversity in cloud shortwave feedback in GCMs. *J. Climate*, 25, 5416-5431, doi: 10.1175/JCLI-D-11-00564.1 (2012).
3. Jiang, H., M. Watanabe, and Coauthors, Evaluation of cloud and water vapor simulations in IPCC AR5 climate models using NASA "A-Train" satellite observations. *J. Geophys. Res.*, 117, doi:10.1029/2011JD017237 (2012).
4. Shiogama, H., M. Watanabe, and Coauthors, Physics parameter uncertainty and observational constraints of climate feedback: An ensemble coupled atmosphere-ocean GCM without flux corrections. *Clim. Dyn.*, 39, 3041-3056, doi:10.1007/s00382-012-1441-x (2013).
5. Kamae, Y., and M. Watanabe, On the robustness of tropospheric adjustment in CMIP5 models. *Geophys. Res. Lett.*, 39, L23808, doi:10.1029/2012GL054275 (2013).
6. Demoto, S., M. Watanabe, and Y. Kamae, Mechanism of tropical low-cloud response to surface warming using weather and climate simulations. *Geophys. Res. Lett.*, 40, 2427-2432, doi:10.1002/grl.50474.2013 (2013).
7. Kamae, Y., and M. Watanabe, Tropospheric adjustment to increasing CO₂: its timescale and the role of land-sea contrast. *Clim. Dyn.*, 41, 3007-3024, doi:10.1007/s00382-012-1555-1 (2013).
8. Shiogama, H., M. Watanabe, T. Ogura, T. Yokohata, and M. Kimoto, Multi-parameter multi-physics ensemble (MPMPE): A new approach for exploring the uncertainty of climate sensitivity. *Atmos. Sci. Lett.*, doi:10.1002/asl2.472 (2013).
9. Su, H., J. H. Jiang, M. Watanabe, and Coauthors, Diagnosis of CMIP5 cloud simulations in relation to large-scale parameters using NASA 'A-Train' satellite observations and other datasets. *J. Geophys. Res.*, 118, 2762-2780, doi: 10.1029/2012JD018575 (2013).
10. Ogura, T., M. Webb, M. Watanabe, and Coauthors, Importance of instantaneous radiative forcing to tropospheric adjustment. *Clim. Dyn.*, doi:10.1007/s00382-013-1955-x, in press (2014).
11. Yoshimori, M., M. Watanabe, A. Abe-Ouchi, H. Shiogama, and T. Ogura, Relative contribution of feedback processes to Arctic amplification of temperature change in MIROC GCM. *Clim. Dyn.*, 42, 1613-1630, doi:10.1007/s00382-013-1875-9 (2014).
12. Yokohata, T., J. D. Annan, M. Collins, C. S. Jackson, H. Shiogama, M. Watanabe, and Coauthors, Reliability and importance of structural diversity of climate model ensembles. *Clim. Dyn.*, 42, 2745-2763, doi:10.1007/s00382-013-1733-9 (2014).
13. Ao, C.-O., J. Jiang, M. Watanabe, and Coauthors, Evaluation of CMIP5 upper troposphere geopotential height with GPS radio occultation observations. *J. Geophys. Res.*, in revisions (2014).
14. Watanabe, M., Y. Kamae, and M. Kimoto, Robust increase of the tropical Pacific rainfall and its variability in a warmed climate. *Geophys. Res. Lett.*, doi:10.1002/2014GL059692, in press (2014).

〔雑誌論文〕(計 14 件)

* 招待講演のみ

1. Watanabe, M., Comprehensive climate modeling linking structural and parametric uncertainties. Trieste, Italy, 2011年7月18~7月22日
2. Yokohata, T., and M. Waanabe, Understanding and validation of cloud

- response to CO2 increase using state-of-the-art climate model ensembles. AGU Fall meeting, San Francisco, USA, 2011年12月6日
3. Watanabe, M., Constraints to the tropical low-cloud response to increasing CO2 in climate models. Joint Yonsei CTL-AORI-Hanyang-KORDI workshop on climate change and variability, Gangwondo, Korea, 2011年2月20~2月22日
 4. Watanabe, M., Modeling activity of the MIROC group for climate feedback and sensitivity studies. WCRP Open Science Conference, Denver, USA, 2011年10月27日
 5. Watanabe, M., Evaluating and understanding climate feedback and sensitivity in different types of model ensembles. 2012 LASG summer symposium, Xi'ning, China, 2012年7月3日~7月5日
 6. Watanabe, M., Processes controlling equilibrium climate sensitivity in model ensembles. AOGS-AGU (WPGM) joint assembly, Singapore, 2012年8月13日~8月17日
 7. 渡部雅浩、気候のモデリング：決定論的？確率論的？日本気象学会 2012年度秋季大会、北海道大学、札幌、2012年10月3日~10月5日
 8. Watanabe, M., Equatorial mean precipitation and ENSO in CMIP5 models: Its diversity and causes of errors. 日本地球惑星科学連合大会、幕張メッセ、千葉、2013年5月24日
 9. Watanabe, M., Land-sea thermal contrast and summer atmospheric circulation over East Asia in a warmed climate. 12th East Asian Climate conference, Busan, Korea, 2013年7月1日~7月3日
 10. Watanabe, M., Review for CMIP5 high-resolution time slice experiments. Next generation climate change experiments needed to advance knowledge and for assessment of CMIP6. Aspen, USA, 2013年8月4日~8月9日
 11. 渡部雅浩、エルニーニョと地球温暖化、日本海洋学会 2013年秋季大会シンポジウム、北海道大学、札幌、2013年9月17日
 12. Watanabe, M., Decadal prediction and predictability: Lessons from CMIP5. RIMS International conference on theoretical aspects of variability and predictability in weather and climate systems, 京都大学、京都、2013年10月22日~10月25日
 13. Watanabe, M., Toward reliable projection of the regional climate variability in a warming climate. Toward predictive dynamics of regional climate change, La Jolla, USA,

2014年2月20日~2月22日

14. Watanabe, M., How can we identify, attribute, and effectively use climate model biases? WCRP Grand Challenge workshop on cloud, circulation and climate sensitivity. Schloss Rindberg, Germany, 2014年3月24日~3月28日

〔学会発表〕(計 14件)

1. 渡部雅浩, 木本昌秀 (編著)、エルニーニョ・南方振動(ENSO)研究の現在、日本気象学会、230pp、2013.
2. 国立環境研究所地球環境研究センター(分担執筆)、地球温暖化の事典、丸善、435pp、2014.

〔図書〕(計 2件)

〔産業財産権〕

○出願状況(計 0件)

○取得状況(計 0件)

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1)研究代表者

渡部雅浩 (WATANABE, Masahiro)
 東京大学・大気海洋研究所・准教授
 研究者番号： 70344497

(2)研究分担者

増永浩彦 (MASUNAGA, Hirohiko)
 名古屋大学・地球水循環研究センター・准教授
 研究者番号： 00444422

岡本 創 (OKAMOTO, Hajime)
 九州大学・応用力学研究所・教授
 研究者番号： 10333783

塩竈秀夫 (SHIOGAMA, Hideo)
 国立環境研究所・地球環境研究センター・主任研究員
 研究者番号： 30391113

(3)連携研究者

小倉知夫 (OGURA, Tomoo)
 国立環境研究所・地球環境研究センター・主任研究員
 研究者番号： 10370264

横畠徳太 (YOKOHATA, Tokuta)
 国立環境研究所・地球環境研究センター・研究員
 研究者番号： 20391170