

平成 30 年 6 月 11 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26400469

研究課題名(和文)水惑星大気大循環の再考察：新たな国際比較実験「APE2」の提案に向けて

研究課題名(英文) Re-consideration on the atmospheric circulation on an aquaplanet: toward the proposal of a new model intercomparison, APE2

研究代表者

中島 健介 (NAKAJIMA, Kensuke)

九州大学・理学研究院・助教

研究者番号：10192668

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：地球の全表面が海で覆われた「水惑星」設定で大気大循環モデルによる数値実験を行い、結果を解析した。主な結果の第一は、熱帯降水活動の大規模構造として赤道上を東に進む波動に加えて、南北にうねりつつ西に進む構造が存在することであり、第二は、熱帯の暖水域が強制する全地球的風系である「ウォーカー循環」の構造が海洋の平均的南北温度差によって、現在の地球で生じている構造と全くことなるものになる可能性が確認されたことである。ただしこれらの結果は、数値モデルの解像度や物理過程に依存して表現が異なることが強く示唆されるので、新たな国際モデル比較実験を策定したい。

研究成果の概要(英文)：Numerical experiments using atmospheric general circulation models are conducted with "Aquaplanet" lower boundary conditions where whole of the earth's surface is covered with ocean. Main findings are as follows. First, a westward propagating large scale organization of precipitation with north-south "zigzag" structure is newly identified, in addition to the well known eastward propagating structure. Second, the structure of 'Walker circulation', a global stationary circulation feature forced by the anomaly of sea surface temperature, is highly sensitive to the average north-south surface temperature difference of the ocean. Sensitivity of both results to the model specification including physical parameterizations and spatial resolution promotes a new international aquaplanet general circulation model intercomparison project, APE2.

研究分野：地球惑星流体力学

キーワード：大気大循環 水惑星モデル比較実験 大気力学 太陽系外惑星 気候力学 ウォーカー循環 ロスビー波 大気大循環モデル

## 1. 研究開始当初の背景

地球の熱帯大気には、 $O(1\text{km})$  の空間スケールと  $O(1 \text{ 時間})$  の寿命を持つ個々の積雲から、クラウドクラスター、スーパークラウドクラスターを経て、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雲降水階層構造の表現は一般にうまくいっておらず、しかもモデル毎に大きく異なる。このことは、分解能の限界付近にある構造のみならず分解能に比して充分大規模であるはずの季節内変動に関しても顕著であり、しかも原因が特定されていないという深刻な状況にあった。そこで本研究代表者らを含め世界 7 ヶ国の 17 の数値天気予報気候予測モデル開発グループが参加して、国際水惑星相互比較プロジェクト APE が 2004 年から行われた (文献①、プロジェクトホームページ参照)。その目的は「水惑星」すなわち地球の全表面を海が覆うという統一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、大気的外部からの強制が無い分、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発現することになり、モデルの過酷なテストとなることが期待された。APE の成果は、数値データのアーカイブ、包括的な図版集「APE-Atlas」(文献②)、そして、*Journal of the Meteorological Society of Japan* の特別号 (文献③、本研究代表者が編集委員として参画)として刊行した。APE では、期待された通りに現在の数値予報、気候予測のモデル間の顕著な相違を浮き彫りにした一方で、予想外の結果も得られた。即ち第一に、標準設定として定義したケースにおいては中緯度の傾圧擾乱が赤道域の降水擾乱に強い影響を及ぼしており、第二に、局在した赤道海水温異常を与えたケースに見られた大気応答は定説である「Matsuno-Gill 構造」と顕著に異なっており、第三に、惑星規模の赤道海水温異常を与えたケースに見られた大気応答は現実大気にみられる Walker 循環と顕著に異なっていた。

これらの予想外の様相は、「標準」として指定された東西一様な海水温分布の南北傾度が非常に大きかったことに起因すると想像されており、現実気候に近似した設定でのモデル相互比較を目指した APE の目的を損ねる結果となった。同時にこの結果は、熱帯と中緯度の移動性擾乱の関係および熱帯の海水温異常に対する応答の構造が基本場海水温南北分布に対してどう依存するかという、極めて重要な問題を改めて提起している。この問題は、数十億年前の全地球凍結状態や太陽系外の地球型惑星など、現在地球と大幅に異なる条件にも大気大循環モデルが使用され、従って、モデル相互比較も今までより格段に幅広い条件を念頭におく必要が生じるとされる近い未来を想定すれば、総合的な検討が急務であると考えられた。

## 2. 研究の目的

研究前半の目的として、国際水惑星相互比較実験 APE の結果について未解明の問題、すなわち赤道域海水温異常に対する応答の詳細、南北構造の異なる東西一様海水温分布を設定した 4 種類の実験における熱帯域降水擾乱の時空間構造と軸対称循環の特性の変化の詳細について解析を行い、その力学の概要の把握を設定した。前半の成果を想定した後半の目標としては、APE の設定より幅広い独自の設定での理想化された大気大循環モデル実験を、物理過程と解像度について幾つかの異なる設定において行い、結果の相互比較と考察を行い、海水温分布が大気大循環の構造に与える影響の概要を把握することを設定した。そして最終的に、古気候・系外惑星をも視野に入れた次世代の国際水惑星実験相互比較プロジェクト「APE2」を提案することを目指した。

## 3. 研究の方法

国際水惑星相互比較実験 APE の結果の考察においては、プロジェクトホームページに保存されている数値データを分析する。解析においてはスペクトル解析と相関解析、および Takaya and Nakamura (2001, JAS) の wave activity flux を用いた。その結果を受けた新たな数値実験においては、惑星大気への適用を意識した大循環モデル DCPAM (<https://www.gfd-dennou.org/arch/dcpam/>)、および、AFES (AGCM for the Earth Simulator; Ohfuchi et al 2004, J. Earth Simulator) を用いた。数値実験にあたっては、国立環境研究所地球環境研究センターのスーパーコンピュータ、および、海洋研究開発機構地球シミュレータセンターの計算資源を使用した。

## 4. 研究成果

(1) APE 赤道域海水温異常実験の解析: 国際水惑星大気大循環モデル比較実験 APE で実施された多数のモデルによる数値実験のうち、赤道に局在した高水温域を導入した実験 (3KEQ) および東西は数の海水温異常を導入した実験 (3KW1) の結果に見られる定常応答について、モデル間の相違および形成機構を調べる解析を行なった。その結果、渦度強制の高度分布と赤道域加熱異常の鉛直構造が対応することが明らかになった。しかし定常ロスビー波としての全球大気に伝播する応答の構造については、異なる高度や場所から射出された波の干渉などの事情で、必ずしも明確な理解が得られず、今後の課題として残された。

(2) 赤道域降水構造のモデル解像度依存性の解析: 国際水惑星大気大循環モデル比較実験 APE では力学的枠組み、積雲パラメタリゼーションなどの物理過程、数値的解像度が異なるモデル比較が行われた一方、そこに見出さ

れた多様性の原因追求は困難であった。そこで、APE と同じ境界条件において解像度以外は統一したモデルで独自に行った数値実験の結果を、特に赤道域の降水の時空間構造に焦点をあてて解析した。その結果、解像度依存性として、従来から認識されていた赤道直上での階層的東進・西進構造に加えて、赤道を挟んで南北幅 10 度程度の「深熱帯域」に新たに顕著な構造と解像度依存性が見出された。図 1 に解像度が異なるモデルでの赤道直上の

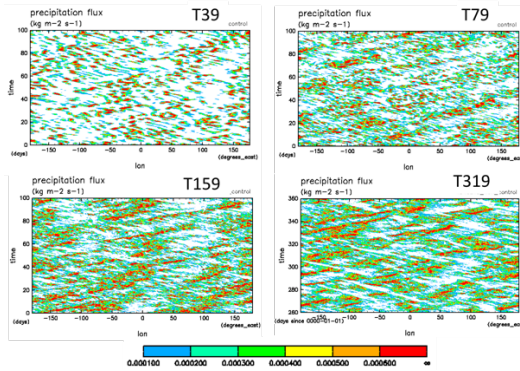


図 1 赤道降水の時空間構造の解像度依存性

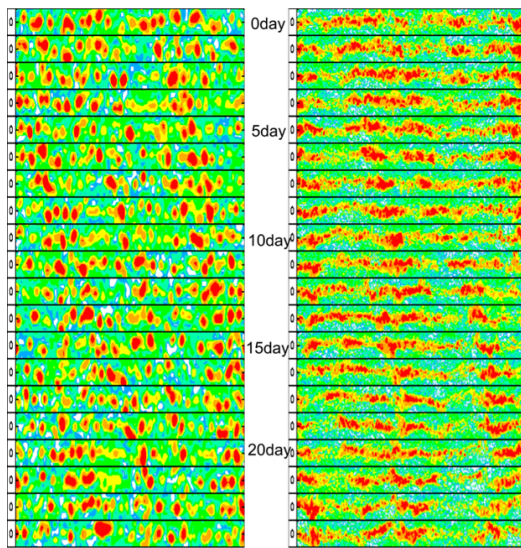


図 2 南緯 10 度から北緯 10 度の範囲の降水時間変動  
左は T39, 右は T159 のモデル解像度での結果

降水量の東西時間断面図を示す。ここには数十日に渡って東進する大規模な降水構造の中に寿命の短い小規模な西進降水構造が組織化される様相が見出され、この階層的組織化は高解像度のモデルで顕著にみられることがわかる。これは基本的に従来からの知見が検証された結果であったが、さらに赤道直上から南北 10 度程度まで範囲を広げて分析を行ったところ、図 2 に示すように、高解像度モデルにおける降水構造には、波長数千キロで南北にうねる構造が存在し、これはゆっくりと西進することが見出された。この西進構造は低い解像度のモデルでは非常に弱くしか見出されて

いない。このことは、降水構造の表現の可否が、必ずしもモデル解像度と擾乱のスケールの大小関係では決まらない、という点で、従来から問題であるマッデンジュリアン振動の表現と同様の性格を示している。この西進大規模擾乱の正体、および、モデル解像度への依存性を生じる機構は今後の課題として残されている。

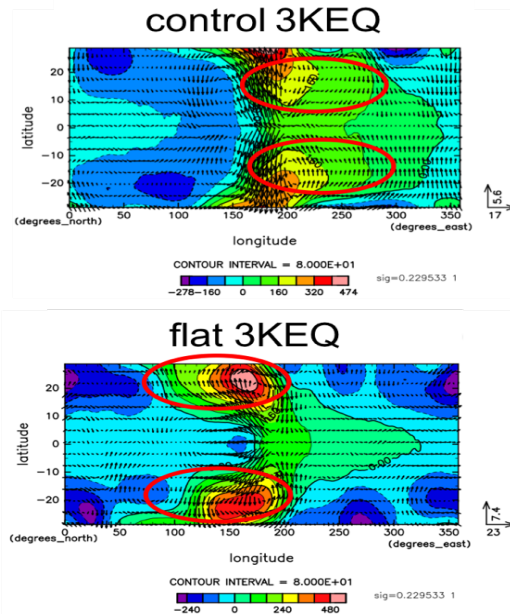


図 3 局在熱帯暖水域に対する上部対流圏の応答  
基本場海水温の南北勾配が大きい場合(上)と小さい場合(下)。ロスビー波応答を赤丸で示す。

(3) 「ウォーカー循環」の再吟味：赤道域に東西方向に局在した暖水域を導入する実験を、国際水惑星大気大循環モデル比較実験 APE で指定された基本場海水温南北分布に加えて、2 つの分布を指定して行った。その結果、大規模応答の構造が基本場海水温南北勾配に強く依存することがわかった。すなわち、図 3 に示すように、南北温度勾配が小さい場合に現れる構造は熱帯大気の「常識」とされる「Matsuno-Gill 応答」として認識できるが、温南北温度構造が大きい場合の構造は、全くかけ離れた特徴を持つことが判明し、APE の暖水域実験の特異性に関する事前の予想を確認することができた。

次に、この依存性についてロスビー波の強制と伝播についての力学的枠組みを適用して考察した。その結果、海水温の南北構造は二つの要素を通じて大規模応答の構造を支配していることが見出された。即ち、第一に海水温南北構造は熱帯域対流圏上部における東西風の南北構造を支配する。これは、基本場渦位の南北勾配を通じて、降水異常がロスビー波を強制する緯度と強度に影響を与える。第二に、海水温南北構造は熱帯・中緯度の広い範囲での東西風の向きと強さを支配する。これは、前述の強制力によって励起されたロスビ

一波が定常波として伝播する際の全球的構造を決定的に支配する。これらの総合的な結果として、暖水域上の加熱が強制する大気循環の構造が、基本場海水温の南北勾配にどう影響されるかは、図4の様にとまとめられる。即ち、基本場海水温の南北勾配が小さい場合にはロスビー波は暖水域の西方に伝播し、赤道には明快な東西鉛直循環が形成される。これは、古くから地球大気で知られている「ウォーカー循環」のプロトタイプである。一方、基本場海水温の南北勾配が大きい場合にはロスビー波は暖水域の東方に伝播し、熱帯域の循環は暖水域東方で南北に大きく分流する本質的に三次元的な構造を持つようになり、赤道上の流れは対流圏上部では断絶する。

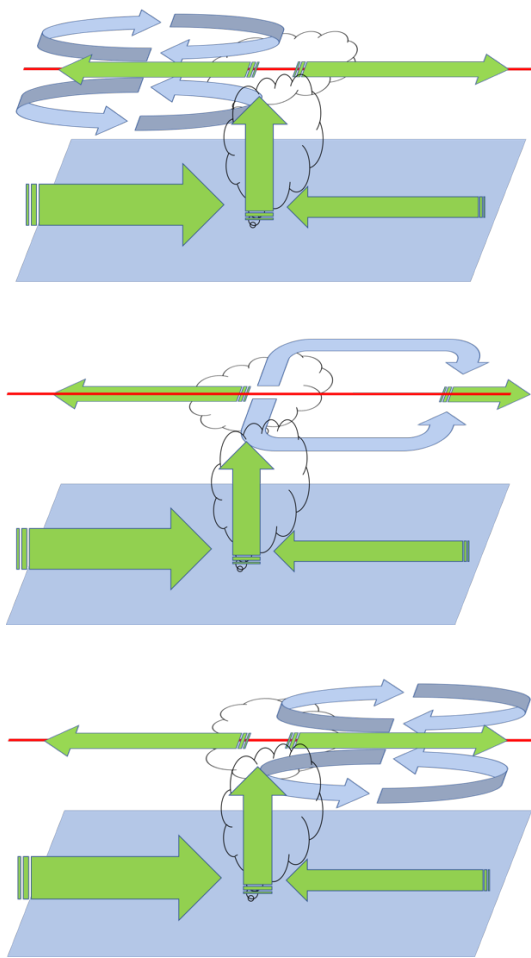


図4 暖水域上の加熱が強制する大気循環の構造  
基本場海水温の南北勾配が小さい場合(上)、  
南北勾配が大きい場合(中)及びその力学的構造(下)

この結果は、地球惑星大気の力学と気候学に広い潜在的示唆を与える。即ち、第一に、地球史を長い時間軸で捉えるとき、地軸の傾きの変動や日射強度、大陸配置の変動などにより海水温の南北分布構造は顕著な変動があったと考えられる。本研究の結果を援用すれば、熱帯域の大陸配置や海水温東西構造が強制する熱帯大気の降水加熱に対応して形成されるグローバルな大気循環構造は、必ずしも現在の地球の「ウォーカー循環」ではなく APE の

結果に見られたような、変則的な構造になる可能性があり、古気候の復元などにおいて注意を要することになる。第二に、この20年間で大量に発見されている太陽系外惑星を含めて極めて多様であると想定される惑星大気循環の考察においても本研究の結果は有用であり、たとえば公転と自転が一致する「同期回転惑星」の大気循環の構造にも、本研究で現れたと同様の構造が出現している。その意味では現在の地球の「ウォーカー循環」は、普遍的な大気循環構造ではないのである。このように、さらに広い視野において熱源応答構造の力学を網羅的に考察することは今後の課題として残されている。

(4) 大気循環の長周期変動：APEの結果について、大気ブロッキングに対応する長周期の時間変動観点から解析を行った。結果の要点として、同一の東西様な海水温を与えた場合でもブロッキング的構造の出現頻度はモデル毎に顕著な相違があること、また熱帯海水温に惑星規模の東西非一様がある場合ブロッキング的構造の出現頻度が高くなり、しかも顕著な経度依存性が現れるが、頻度の南北対称性や振幅など出現特性にはモデル依存性があること、さらに局在した熱帯海水温異常の有無に対してはブロッキング的構造出現頻度の応答は弱いことがわかった。

(5) 波動の三次元的伝播の理論的考察：大気における定常ロスビー波を解析するためのツールの考察を進めた。大気温度の南北勾配(西風の鉛直勾配)が大きい領域では Takaya and Nakamura (2001) の wave activity flux の鉛直成分が見かけ上大きくなり、ロスビー波励起起源の解釈が難しい。この困難について考察した結果、渦度の代わりにポテンシャル渦度に注目して、問題を整理できる可能性が浮上した。

(6) APE2 に向けて：以上の結果を総合すると、今後、現在地球的な状況だけでなく、太陽系外惑星や古気候の考察にも有用となる次世代の国際水惑星実験相互比較にあたっては、基本場海水温分布をより幅広く想定し、海水温異常の調査も網羅的に行うべきことは明白である。また熱源の与え方に関しては、大気海洋氷結合モデルによる全球海惑星実験の結果を予備的に考察すると海洋熱輸送を陽に想定する方式の有効性も示唆される。一方、計算データの収集にあたっては、ブロッキングなど長期間に及ぶ変動構造にも強いモデル依存性があることから、こうした特性の比較のためにも長期間の数値積分データの取得が必要であり、近年、発展が著しいデータ同化への応用も想定するならば、多数のアンサンブル実験を行なった結果を網羅的に収集する実験も視野に入れるべきである。以上の結果を総合して今後、現在地球的な状況だけでなく、系外惑星や古気候の考察、さらには長いリード

タイムの数値天気予報やデータ同化にも有用となる、次世代の国際水惑星実験相互比較プロジェクト「APE2」の仕様を策定する予定である。

<引用文献>

- ① Blackburn, M., and B.J., Hoskins, 2013: “Context and aims of the Aqua-Planet Experiment”, Journal of the Meteorological Society of Japan, Vol. 91A, 1-15.
- ② Williamson, D.L., K. Nakajima, W. Ohfuchi, M. Ishiwatari ほか 25 名, “The APE ATLAS”, NCAR/TN-484+STR.
- ③ Hayashi, Y.-Y., M. Blackburn, D. L. Williamson, B. J., Hoskins, and, K. Nakajima, 2013: Preface to the Special Issue on the Aqua-Planet Experiment (APE) and related researches, Journal of the Meteorological Society of Japan, Vol. 91A.

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 4 件)

- ① Sugimoto, N., A. Yamazaki, T. Kouyama, H. Kashimura, T. Enomoto, and, M. Takagi, 2017: “Development of an ensemble Kalman filter data assimilation system for the Venusian atmosphere”, Scientific Reports, 査読有, article number:9321(2017), DOI:10.1038/s41598-017-09461-1.
- ② Noda S., Ishiwatari M., Nakajima K., Takahashi Y.O., Takehiro S., Onishi M., Hashimoto G.L., Kuramoto K., Hayashi Y.-Y., 2017: “The circulation pattern and day-night heat transport in the atmosphere of a synchronously rotating aquaplanet: Dependence on planetary rotation rate”, ICARUS, 査読有, Vol. 282, pp. 1-18, DOI:10.1016/j.icarus.2016.09.004.
- ③ Morioka, Y., K. Takaya, S. K. Behera, and Y. Masumoto, 2015: “Local SST impacts on the summertime Mascarene High variability”, J. Climate, 査読有, Vol. 28, 678-694, DOI:10.1175/JCLI-D-14-00133.1.

- ④ Kida, S., H. Mitsudera, S. Aoki, X. Guo, S. Ito, F. Kobashi, N. Komori, A. Kubokawa, T. Miyama, R. Morie, H. Nakamura, T. Nakamura, H. Nakano, H. Nishigaki, M. Nonaka, H. Sasaki, Y.N. Sasaki, T. Suga, S. Sugimoto, B. Taguchi, K. Takaya, T. Tozuka, H. Tsujino, N. Usui, 2017: “Oceanic fronts and jets around Japan: a review”, Journal of Oceanography, 査読有, Vol. 71, 469-497, DOI:10.1007/s10872-015-0283-7.

[学会発表] (計 16 件)

- ① 河合佑太, 高橋芳幸, 石渡正樹, 西澤誠也, 竹広真一, 中島健介, 富田浩文, 林祥介, 大気海洋海水結合モデルを用いた全球海惑星気候の太陽定数依存性に関する研究, 日本惑星科学会 2017 年秋季講演会, 2017 年
- ② 河合佑太, 高橋芳幸, 石渡正樹, 西澤誠也, 竹広真一, 中島健介, 富田浩文, 林祥介, 全球海惑星の気候レジーム ~海洋大循環の効果~, 日本気象学会 2017 年度秋季大会, 2017 年
- ③ 杉本憲彦, 山崎哲, 神山徹, 櫻村博基, 榎本剛, 高木征弘, 金星 AFES アサンブルデータ同化システムの開発, 日本気象学会 2017 年度秋季大会, 2017 年
- ④ 高谷康太郎, 位相依存性のないエネルギー変換の定式化の提案(2), 「波と平均流との相互作用」研究会, 2017 年
- ⑤ 高谷康太郎 “Formulation and application of phase-independent energy conversions for quasi-geostrophic eddies”, 日本地球惑星科学連合 2017 年大会, 2017 年
- ⑥ 河合佑太, 高橋芳幸, 石渡正樹, 西澤誠也, 竹広真一, 中島健介, 富田浩文, 林祥介, 大気海洋海水結合モデルを用いた水惑星の気候に対する海洋大循環の影響の数値的研究, 日本地球惑星科学連合 2017 年大会, 2017 年
- ⑦ 中島健介, 神田雅浩, 高谷康太郎, 石渡正樹, 高橋芳幸, 林祥介, “ウォーカー循環” 再考: 水惑星熱源応答実験からの示唆, 日本気象学会 2017 年度春季大会, 2017 年
- ⑧ K. Nakajima, Y. Yamada, M. Kanda, K. Takaya, M. Ishiwatari, W. Ohfuchi, Y.O. Takahashi, and Y.-Y. Hayashi,

“Aqua-planet experiment (APE) review”, 「水惑星・陸惑星」研究会, 2017年

- ⑨ K. Nakajima, M. Kanda, K. Takaya, M. Ishiwatari, W. Ohfuchi, Y.O. Takahashi, and Y.-Y. Hayashi, “Reexamination of the concept of Walker Circulation -- implication from the variety of large-scale tropical atmospheric response to equatorial SST anomaly in Aquaplanet Experiment”, American Geophysical Union Fall Meeting, 2016年
- ⑩ K. Nakajima, M. Kanda, K. Takaya, M. Ishiwatari, W. Ohfuchi, Y.O. Takahashi, and Y.-Y. Hayashi, “Reexamination of the concept of Walker Circulation -- implication from the variety of large-scale tropical atmospheric response to equatorial SST anomaly in Aquaplanet Experiment”, Tropical Meteorology Meeting 2016, 2016年
- ⑪ 神田雅浩, 中島健介, 理想化された大気大循環モデルの赤道海水温異常への応答, 水惑星大気大循環の再考察: 新たな国際比較実験「APE2」の提案 に向けて」研究集会, 2016年
- ⑫ 高谷康太郎, 様々な「波の活動度 flux」のまとめ, 水惑星大気大循環の再考察: 新たな国際比較実験「APE2」の提案 に向けて」研究集会, 2016年
- ⑬ 神田雅浩, 中島健介, 理想化された大気大循環モデルの赤道海水温異常への応答, 第17回地球流体力学研究集会「地球流体における波動と対流現象の力学」, 2016年
- ⑭ K. Nakajima, Y. Yamada, Y.O. Takahashi, M. Ishiwatari, W. Ohfuchi, Y.-Y. Hayashi, “Resolution dependence of equatorial precipitation activities represented in a general circulation model with no cumulus parameterization”, 2015 American Geophysical Union Fall Meeting, 2015年
- ⑮ 石渡正樹, 阿部豊, 倉本圭, 高橋芳幸, 中島健介, 林祥介, 非灰色放射および雲スキームを用いた同期回転惑星大気の数値実験: 昼夜間熱輸送量に関する考察, 日本気象学会 2014年度秋季講演会, 2014年

- ⑯ 中島健介, 山田由貴子, 高橋芳幸, 石渡正樹, 大淵濟, 林祥介, 赤道降水擾乱のモデル表現の解像度依存性, 東京大学大気海洋研究所共同利用研究集会「地球流体における流れの多様性と普遍性の力学」, 2014年

〔その他〕

水惑星実験プロジェクト国内ホームページ  
<https://www.gfd-dennou.org/arch/ape/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

中島 健介 (NAKAJIMA, Kensuke)  
九州大学・理学研究院・助教  
研究者番号: 10192668

### (2) 研究分担者

石渡 正樹 (ISHIWATARI, Masaki)  
北海道大学・理学研究院・准教授  
研究者番号: 90271692

大淵 濟 (OHFUCHI, Wataru)  
海洋研究開発機構・アプリケーションラボ・主任技術研究員  
研究者番号: 30359228  
(平成28年2月まで)

高谷 康太郎 (TAKAYA, Kotaro)  
京都産業大学・理学部・准教授  
研究者番号: 60392966

山崎 哲 (YAMAZAKI, Akira)  
海洋研究開発機構・アプリケーションラボ・研究員  
研究者番号: 20633887  
(平成28年2月から)