

令和 5 年 6 月 5 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19H01947

研究課題名（和文）地球型系外惑星の気候多様性の解明および気候状態に基づく惑星緒量の推定

研究課題名（英文）Explorations of climate diversity of terrestrial exo-planets and estimations of parameters based on climate states

研究代表者

石渡 正樹 (Ishiwatari, Masaki)

北海道大学・理学研究院・教授

研究者番号：90271692

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 10,280,000円

研究成果の概要（和文）：系外惑星観測で得られる光度データから自転傾斜角などの惑星パラメータを推定する方法の検討を目指し、系外惑星を想定した多様な設定を用いて、大気大循環モデルによるパラメータ実験を実施した。計算結果を模擬観測することにより、宇宙望遠鏡で地球を観測した場合に自転傾斜角の推定が行える可能性が示された。その成果は Nakagawa et al. (2020) として出版された。また、灰色大気を持つ惑星の気候レジーム図も作成された。その成果の一部は Ishiwatari et al. (2021) として出版され、気候多様性に関する考察の理論的基盤が構築された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、大気大循環モデルで得られた数値実験結果を用いて、地球型系外惑星の観測から自転傾斜角等の惑星パラメータを推定する方法の検討、及びそのための基礎データとなる灰色大気を持つ惑星の気候多様性を記述する気候レジーム図の作成を行った。その結果、地球と同じ海陸分布を持つ系外惑星が存在したすればその自転傾斜角は宇宙望遠鏡の観測により推定可能であること、現在地球の太陽定数の値では惑星気候は全球凍結状態・部分凍結状態・暴走温室状態の多重性を持つことがわかった。これらの成果は、地球型系外惑星の気候の多様性とパラメータ推定可能性の検討を進める上で欠くことのできない基盤となるものである。

研究成果の概要（英文）：In order to investigate a method for estimating planetary parameters such as obliquity from photometric data of exoplanet observations, we have performed a parameter experiment with an atmospheric general circulation model using a various settings for exoplanets. With a moc observation of calculated results, it is shown that the obliquity of the Earth can be estimated when the Earth would be observed using a space telescope. The results were published as Nakagawa et al. (2020). Climate regime diagrams for planets with a gray atmospheres were also produced. Some of the results were published as Ishiwatari et al. (2021), and the theoretical basis for the consideration of climate diversity was established.

研究分野：惑星科学

キーワード：地球型系外惑星 大気大循環モデル 気候レジーム図 惑星表層環境推定

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

研究開始当初は、約4000個の系外惑星の観測を通じて、それらの多様性と普遍性が明らかとなってきた。特に、G型星やM型星の多くが地球型惑星を持つことがわかり、既にその中の20個程度はハビタブル惑星である可能性が指摘されており、それらの表層環境、惑星自転速度、自転傾斜角などのより詳細なパラメータを推定する方法論が提案されていた(例えば、Fujii and Kawahara, 2012; Kawahara et al., 2016 など)。その方法論と惑星科学分野で発展してきた大気大循環モデル (AGCM) シミュレーションを組み合わせた定量的研究を実施すれば、ハビタブル惑星の諸性質を明らかにするとともにバイオシグニチャーを同定して宇宙生物学のブレイクスルーさえももたらすものと期待された。実際、本研究代表者の石渡は分担者の須藤靖とともに、地球のデータを用いて自転傾斜角のみを変更した一連の大気大循環モデルシミュレーションを行い、将来の直接撮像スペース望遠鏡で、その「地球」の自転傾斜角と自転角速度が推定可能であることを示すことができていた。この研究の自然な延長として、より一般的な表層環境、軌道パラメータをもつ地球型惑星の場合、それらの気候状態、特に雲分布はどうなり、それらは天文学的観測にどのようなデータを与えるのか?に答えることが次の課題となっていた。

2. 研究の目的

前節の背景のもと、当初の研究目的は、大気大循環モデルを用いて海陸分布・自転角速度・自転傾斜角などを変更した包括的なパラメータ実験を実施し、その結果を模擬観測に提供し系外惑星観測をおこなった場合にどのような光度データをもたらすのかを明らかにし、更にこれらを通じて、将来の直接撮像スペース望遠鏡で系外惑星の観測を行った際に、惑星の海陸分布・自転角速度・自転傾斜角を推定する方法について検討をおこなうことに設定されていた。

しかし、パラメータ実験を開始した後に、気候多様性の考察の基盤となる灰色大気気候レジーム図に問題があることが発覚した。これは本研究課題の拠り所となる理論基盤としてとらえていたものであったため、その修正作業を最優先でおこない、その後に多様な惑星の気候レジーム図を作成する、あるいは作成するために必要となる数値実験を極力推進するべく目的の再設定をおこなった。

3. 研究の方法

大気大循環モデルを用いたパラメータ実験を実施する。パラメータ実験の実施には、主に研究代表者の石渡と分担者の高橋が中心となって開発をおこなってきた惑星大気大循環モデル DCPAM(<http://www.gfd-dennou.org/library/dcpam>) を用いる。地表面設定として、海洋モデルを使用する場合もしくは全球にバケツモデル(Manabe et al, 1965)を用いる場合を考える。太陽定数や自転傾斜角を変更するパラメータ実験を実施する。日射分布に関しては、昼半球と夜半球が固定された同期回転惑星日射分布と日変化・年変化が存在する地球の日射分布(非同期回転惑星日射分布)の2種を用いる。

数値実験の実行には独立行政法人国立環境研究所のスーパーコンピュータと北海道大学に既設の並列計算用パソコンを併用した。計算結果のアーカイブおよびデータ解析には本申請課題で

整備したRAID装置を使用した。

4. 研究成果

初年度は研究環境の整備をおこなった。備品としてRAID装置を購入し、パラメータ実験のデータ領域を確保した。これをもとにモデル整備の一環として放射モデル開発も行ない、過去火星における過酸化水素による温暖化効果に関する考察も行なった。この成果は Ito et al. (2020) として出版された。その後は大気大循環モデルを用いた以下の(A) ~ (D)の研究を実施した。

(A) 大気大循環モデル結果の模擬観測による惑星パラメータ推定の可能性に関する研究

地球の海陸分布を与え自転傾斜角を変更した大気大循環モデル実験を実施し、得られた結果の模擬観測を行った。その結果、地球と同じ海陸分布を持ち 10 パーセクの距離にある惑星の北半球を口径 4m の宇宙望遠鏡で 1 年間の連続観測で地球の北半球部分を観測した場合には自転傾斜角の推定が可能であることが示された。その成果は Nakagawa et al. (2020)として出版された。

(B) 灰色大気の気候レジーム図に関する研究

以前に我々が実施した水惑星太陽定数変更実験 (Ishiwatari et al., 2007) で使用したモデルに深刻なバグが発見された。その内容は、対流調節スキームにおいて調節を開始する条件式の符号が間違っており、安定成層した状態で対流調節がなされてしまうものであった。モデル改良および再実験をおこない気候レジーム図の修正版 (図 1) を作成した。この図は、地球の太陽定数の値では部分凍結状態に加え全球凍結状態と暴走温室状態も気候状態としてあり得ることを示唆するものとなっている。これらの成果は Ishiwatari et al. (2021) として出版された。これにより、熱容量無し・海洋循環無しの場合の気候レジーム図がアップデートされ気候の多様性に関する考察基盤が整備された。

この結果を受け、当初の研究目的を修正し、多様な惑星における気候レジーム図を作成することに重点を移し、系外惑星の気候の多様性および観測可能性の考察をおこなうための理論的基盤を構築することを目指すことにした。

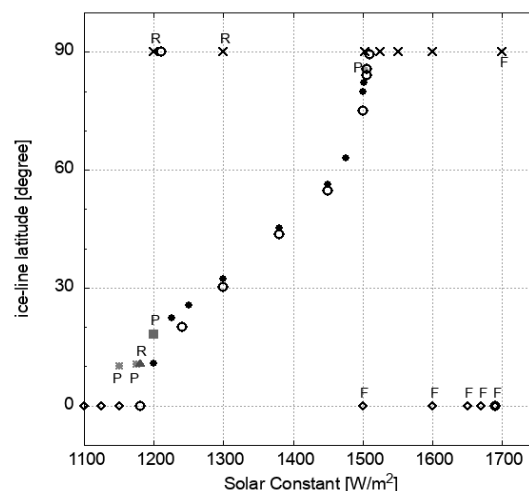


図 1. 太陽定数と氷境界緯度の関係。小さい白丸は部分凍結平衡状態、菱形は全球凍結状態、バツ印は暴走温室状態を示す。F は $S=1000 \text{ Wm}^{-2}$ で得られた全球凍結状態を初期状態とした場合、R は $S=1600 \text{ Wm}^{-2}$ で得られた暴走温室状態を初期状態とした場合、P のついた四角形は $S=1225 \text{ Wm}^{-2}$ で得られた部分凍結状態を初期状態とした場合、P のついた星形は $S=1200 \text{ Wm}^{-2}$ で得られた部分凍結状態から徐々に S を減少させた場合を表す。ラベルのついていない記号で表されるものは 280K の等温静止状態を初期場とした場合を示す。ここでは 2 種のアルベド表現を用いた結果を示している。大きな白丸は表面温度による表面アルベド変化を平滑化して表現した結果を、小さな白丸は不連続な表面アルベド変化を許容する表現を用いた結果を示す。

(C)海惑星の気候レジーム図に関する研究

前項(B)の研究を拡張し、海洋循環を考慮した海惑星気候の太陽定数依存性の調査を実施した。灰色大気吸収係数を変更したパラメータ実験を行い、吸収係数が大きい場合には赤道域のみ海氷が存在しない気候レジームが現れることがわかった。これらの結果をもとに海惑星の気候レジーム図を完成させることができた。この成果は惑星表層環境推定の理論的基礎を成すものとなる。研究期間内の論文出版には至らなかったが、論文が完成次第投稿する予定である。

(D) 多様な惑星の気候レジーム図の作成に向けた研究

上記以外にも、直接気候レジーム図の作成までには至らなかったが、気候の多様性に関する重要な問題だと判断し、以下の3つの研究も実施した。

(D-1) 同期回転惑星の気候に関する数値的研究

同期回転惑星とは、自転周期と公転周期が等しくなり、固定された夜半球と昼半球をもつ惑星である。同期回転惑星においては夜半球に輸送された水蒸気が氷床として固定されることにより氷表面の標高が増加することが考えられる。降水分布及び温度分布から形成される氷床の標高を診断し、その高度を地形として与えた数値実験を行ったところ、昼半球の表面温度は 10 K ほど低下するという結果が得られた。夜半球における氷床の存在は気候場を質的に変化させる程大きくはないことがわかった。

(D-2) 陸惑星の気候レジーム図の作成に向けた数値実験

表層の水量が非常に少ない陸惑星設定において太陽定数増加実験を実施した。全球の表面にはバケツモデル(Manabe et al, 1965)を適用する。その結果、太陽定数を 2600Wm^{-2} まで増加させても極域に土壤水分が残存する状態が得られるが、太陽定数を 3200Wm^{-2} とすると完全蒸発が発生することがわかった。この太陽定数の値は、過去の研究 (Abe et al., 2011) で得られていた土壤水分の完全蒸発が発生する閾値 2200Wm^{-2} を大きく上回るものとなっている。この結果は、物理素過程のモデル実装によって完全蒸発状態発生閾値が変わり得ることを示唆するものである。

(D-3) 非灰色大気における暴走温室状態に関する数値的研究

非灰色大気を持つ水惑星の大気大循環モデル実験を実施し、太陽定数が 1600Wm^{-2} 程度で暴走温室状態が発生することを示唆する結果が得られた。この太陽定数臨界値は灰色の場合と似た値になっているがそれが射出限界と対応したものとなっているかどうかを確認することが次の課題となる。

以上の成果に関する議論を行なう国際ワークショップを初年度に、ミニワークショップを3年目に実施した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Ishiwatari M., Nakajima K., Takehiro S., Hayashi Y. Y., Kawai Y., Takahashi Y. O.	4. 巻 126
2. 論文標題 Revision of “Dependence of Climate States of Gray Atmosphere on Solar Constant: From the Runaway Greenhouse to the Snowball States” by Ishiwatari et al. (2007)	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Atmospheres	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1029/2019JD031761	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Nakagawa Yuta, Kodama Takanori, Ishiwatari Masaki, Kawahara Hajime, Suto Yasushi, Takahashi Yoshiyuki O., Hashimoto George L., Kuramoto Kiyoshi, Nakajima Kensuke, Takehiro Shin-ichi, Hayashi Yoshi-Yuki	4. 巻 898
2. 論文標題 Obliquity of an Earth-like Planet from Frequency Modulation of Its Direct-imaged Lightcurve: Mock Analysis from General Circulation Model Simulation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 95 ~ 95
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3847/1538-4357/ab9eb8	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Ito, Y., G. L. Hashimoto, Y. O. Takahashi, M. Ishiwatari, K. Kuramoto	4. 巻 893
2. 論文標題 H2O2 induced greenhouse warming on oxidized early Mars	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 168(8pp)
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 河合 佑太, 高橋 芳幸, 石渡 正樹, 中島 健介, 竹広 真一, 櫻村博基, 富田 浩文, 林 祥介
2. 発表標題 大気吸収係数が海惑星の気候レジーム図に与える影響
3. 学会等名 気象学会2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 石渡正樹, 地球流体電脳倶楽部
2. 発表標題 系外惑星大気を想定した理想的設定を用いた大気大循環モデル実験: いろんなことを射出限界が決める
3. 学会等名 CPS & ABC ワークショップ
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 吉田哲治, 石渡正樹
2. 発表標題 陸惑星における完全蒸発状態の発生に関する大気大循環モデル実験
3. 学会等名 日本惑星 科学会秋季講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ishiwatari, M. T. Yoshida, K. Nakajima, Y. O. Takahashi, S. Takehiro, Y.-Y. Hayashi
2. 発表標題 Numerical Experiments on Climate of Land Planets Using an Atmospheric General Circulation Model
3. 学会等名 Planet2/RESCEU Symposium 2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ishiwatari, M., T. Yoshida, K. Nakajima, Y. O. Takahashi, S. Takehiro, Y.-Y. Hayashi
2. 発表標題 Numerical Experiments on Climate of Terrestrial Exoplanets: Aquaplanet and Land Planets.
3. 学会等名 The AGU Fall Meeting 2019
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 Masaki Ishiwatari, Kensuke Nakajima, Shin-ichi Takehiro, Yuta Kawai, Yoshiyuki O. Takahashi, George L. Hashimoto, Youhei Sasaki and Yoshi-Yuki Hayashi	4. 発行年 2021年
2. 出版社 Center for Global Environmental Research, National Institute for Environmental Studies, Japan	5. 総ページ数 79
3. 書名 Numerical studies on the variety of climates of exoplanets using idealistic configurations	

〔産業財産権〕

〔その他〕

地球流体電脳倶楽部 http://dennou-k.gfd-dennou.org/
--

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	高橋 芳幸 (Takahashi Yoshiyuki) (00372657)	神戸大学・理学研究科・准教授 (14501)	
研究分担者	中島 健介 (Kensuke Nakajima) (10192668)	九州大学・理学研究院・助教 (17102)	
研究分担者	小倉 知夫 (Tomoo Ogura) (10370264)	国立研究開発法人国立環境研究所・地球システム領域・主幹 研究員 (82101)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	はしもと じょーじ (George Hashimoto) (10372658)	岡山大学・自然科学学域・教授 (15301)	
研究分担者	竹広 真一 (Shin-ichi Takehiro) (30274426)	京都大学・数理解析研究所・准教授 (14301)	
研究分担者	須藤 靖 (Yasushi Suto) (90183053)	東京大学・大学院理学系研究科（理学部）・教授 (12601)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計1件

国際研究集会 ABC Project/CPS Workshop on Climates of Terrestrial Planets in Various Solar Systems	開催年 2020年～2020年
--	--------------------

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関