

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 30 年 5 月 23 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2017

課題番号：25400219

研究課題名(和文)地球型系外惑星における暴走温室状態の発生条件

研究課題名(英文)Occurrence conditions of the runaway greenhouse state for terrestrial exoplanets

研究代表者

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：地球型の系外惑星における気候の多様性について理解することを目的として、大気大循環モデルを用いて惑星半径・自転角速度・太陽定数・日射分布を変更したパラメータ実験を行なった。これにより、地球型系外惑星における気候状態の太陽定数依存性、暴走温室状態の発生条件を調べた。その結果、同期回転惑星であっても日変化・年変化が存在する地球的な日射分布を持つ惑星であっても、大気赤外放射量の上限值が存在し、全球平均日射吸収量がこの上限値を越えると暴走温室状態が発生することなどの結果が得られた。

研究成果の概要(英文)：For the purpose of understanding the variety of climate of terrestrial exoplanets, parameter experiments using a general circulation model were performed with various values of planetary radius, rotation rate, solar constant, solar flux distribution. With these experiments, dependence of climate state of terrestrial exoplanets on solar constant, and the occurrence condition of the runaway greenhouse state were investigated. One of the results was that, both for synchronously rotating planets and planets with Earth-like solar flux distribution including diurnal and annual change, the upper limit of outgoing longwave radiation existed and that the runaway greenhouse state emerged with global mean absorbed solar flux exceeding the upper limit of outgoing longwave radiation.

研究分野：惑星大気科学

キーワード：系外惑星 気候 同期回転惑星 太陽定数 暴走温室状態 大気大循環モデル 射出限界 惑星半径

### 1. 研究開始当初の背景

系外惑星探査により、スーパーアースと呼ばれる、地球程度の質量を持つ惑星が多数発見されている。その一部は、惑星表面に液体の水を有し生命が存在できる環境を持つかもしれないと議論されている。惑星表面に液体の水が存在し得るかどうかを判定するには、暴走温室状態の発生条件を掌握しておく必要がある。暴走温室状態とは水蒸気を含む大気が射出することのできる赤外放射量(射出限界)を越えた入射フラックスが与えられた状態である(Nakajima et al., 1992)。暴走温室状態が発生すると気温と大気水蒸気量は増加を続け、海洋は消失する。暴走温室状態が発生する入射放射フラックスの臨界値(以下、これを暴走臨界値と呼ぶ)は、アルベドの値により規定される。アルベドは雲分布に強く影響され、更に雲分布は循環場によって決定される。逆に、雲分布は大気における熱源分布を規定するので、循環場に影響を与える。これより、大気運動と雲分布を同時に計算する大気大循環モデル(GCM)を用いて暴走臨界値がどのように決定されるかを調べる数値計算が必要である。これまでの暴走温室状態の発生条件に関するGCM計算は、灰色放射・雲無しの設定を用いて申請者によってなされてきた(Ishiwatari et al., 2002; 納多他, 2012など)。しかし、これらの研究は簡単なモデルを用いており、雲による放射吸収の効果は考慮していなかった。系外惑星の生命存在可能性の議論を進めるためには、雲と循環場の相互作用を考慮した、気候状態の太陽定数依存性および暴走臨界値の調査が必須となる。

### 2. 研究の目的

本研究課題では、系外惑星における生命存在可能性の考察を念頭におき、気候状態の太陽定数依存性および暴走温室状態の発生条件を明らかにすることを目的とする。そのために、雲の放射吸収を考慮し、雲分布と大気循環を同時に解く大気大循環モデルを用いたパラメータ実験を行い、様々な惑星半径・自転角速度・日射分布における気候状態の太陽定数依存性、暴走温室状態が発生する太陽定数の臨界値を求める。

### 3. 研究の方法

本研究課題では、3次元大気大循環モデルと1次元放射対流平衡モデルの2種のモデルを使用した。

大気大循環モデルとして用いたものは、惑星大気大循環モデルDCPAM(高橋他, 2013)である。放射過程においては、水蒸気、CO<sub>2</sub>、雲による短波および長波の吸収を考慮した。積雲対流について、Relaxed Arakawa-Schbertスキームを用いた。雲水に関しては、積雲対流スキームの結果から計算される生成項、モデルに与える消滅時

間に基づく消滅項、移流を考慮した時間発展方程式を解くことによりその時間発展を計算した。DCPAMを用いて、太陽定数(入射放射フラックス)・日射分布・惑星半径・自転角速度としてそれぞれ2~6通りのものを使ったパラメータスイープ実験を行う。これにより、気候状態の太陽定数依存性および暴走温室状態が発生する太陽定数の臨界値を決定する。

更に、その臨界値の決定メカニズムを考察するために、鉛直1次元放射対流平衡モデルを用いた射出限界の決定計算を行う。1次元モデルは、DCPAMの物理過程モジュールを用いて鉛直1次元平衡解を求めるものである。地表面温度を与え、大気構造を決定する。

### 4. 研究成果

研究内容およびその成果は以下のようまとめられる。

#### (1) 同期回転惑星気候に対する非灰色放射と雲の効果に関する調査

昼半球と夜半球が固定された日射分布を用いて同期回転惑星を想定した2系統:地球の大気成分を想定した非灰色放射・雲ありの場合および灰色放射スキーム・雲無しの場合のGCM実験を行なった。太陽定数として地球の値(1366 W/m<sup>2</sup>)を、自転角速度として0から地球の値まで変化させた4通りを与えた。その結果、非灰色放射・雲ありの場合では、灰色放射スキーム・雲無しの場合に比べて、大気上端上向き放射(OLR)の値は概して小さくなった。外向き長波放射(OLR)の水平分布のパターンは、全ての自転角速度において、大まかには灰色放射スキーム・雲無しの場合と同様のものになった。ただし、恒星直下点付近では、雲が発生するため、その周囲に比べてOLRの値が減少している。OLRのパターンでは、雲の有無による差異は、恒星直下点付近にしか現れないことがわかった。

#### (2) 射出限界に関する調査

鉛直1次元放射対流平衡モデルを用いて地球の大気成分をもつ大気の射出限界に関する数値実験を行なった。1次元モデルを用いて、表面温度を250Kから500Kまで変化させて1次元放射対流平衡解を求めた。この結果から、大気上端における外向き赤外放射量(OLR)の上限値は330 W/m<sup>2</sup>となった。この結果より、地球の大気成分をもつ大気の射出限界はおおよそ330 W/m<sup>2</sup>であることが示唆された。

#### (3) 気候の太陽定数依存性: 暴走臨界値の決定

上記、(1)、(2)で得られた知見に基づき、雲が存在し地球大気成分をもつ大気における暴走温室状態発生条件を求める太陽定数変更実験を実施した。実験設定を表1に示す。日射分布として、昼半球と夜半球が固定された同期回転惑星を模した分布(同期回転

日射分布)と日変化・季節変化が起こる地球的な分布(非同期回転日射分布)の2種類を用いた。自転角速度として、0から地球の値まで変化させた4通りを用いた。

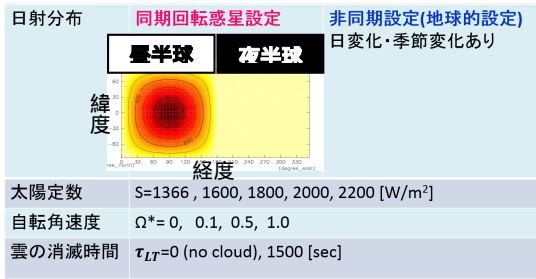


表1: 実験設定。\*は地球の値で規格化した自転角速度

数値実験の結果、同期回転日射分布を用いた場合には、非同期回転日射分布を用いた場合に比べて、暴走温室状態が発生する太陽定数が大きいことがわかった。2種の日射分布で得られるアルベドを比較すると、同期回転日射分布を用いた場合の方が大きくなっていった。同期回転日射の場合の方が、アルベドが大きくなるのは恒星直下点付近において雲水量が大きくなることによる。暴走温室状態が発生する太陽定数の値は日射分布・自転角速度・雲の有無によって異なるが、太陽定数を増加させると全球平均外向き長波放射量はいずれの場合でも300 W/m<sup>2</sup>程度になる(図1)。これより、大気赤外放射量の上限值が存在し、全球平均日射吸収量がこれを越えると暴走温室状態が発生することが示唆された。

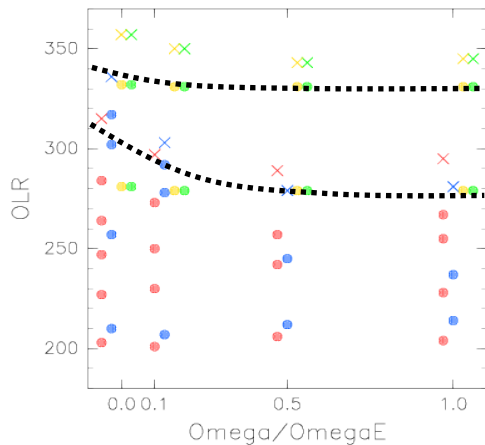


図1: 4種のGCM実験で得られたOLRと自転角速度の関係。横軸は地球の値で規格化した自転角速度、縦軸はOLR。赤マークは雲有り同期回転惑星設定、青マークは雲有り地球の設定、黄色マークは雲無し同期回転惑星設定、緑マークは雲無し地球の設定の結果をあらわす。○は統計的平衡状態が得られた場合、×は暴走温室状態が発生した場合を示す。点線は暴走温室状態が発生する閾値を大まかに示すものであり、上線は雲無しの場合、下線は雲無しの場合の閾値を示す。

#### (4) 気候の惑星半径依存性

DCPAMを用いて日変化・季節変化が起こる地球的な日射分布をもつ惑星と同期回転惑星の気候の惑星半径依存性を調査する数値実験を行なった。

地球的な日射分布を持つ惑星に関しては、惑星半径として、20000km, 6400km, 2000kmの3通りのものを用いた実験を行なった。太陽定数を地球の値(1366W/m<sup>2</sup>)に固定して地形がある場合と地形が無い場合についての計算を行なった。その結果、惑星半径の増加に応じハドレー循環強度は大きく増加するのに対して、南北熱輸送量は惑星半径が増大してもそれほど増加しないことがわかった。この結果は地形の有無によらず同様なものであることも確認された。このようなことが起こる理由を考察するため、惑星半径に対する循環構造および南北熱輸送における顕熱輸送と潜熱輸送の内訳の変化を調査した。これにより、南北熱輸送量のハドレー循環の緯度幅、傾圧不安定擾乱の水平スケールなど複数の循環構造に応じて複雑に決まっていることが示唆された。

同期回転惑星に関しては、惑星半径として3200kmから64000kmまで変更した実験をおこなった。その結果、惑星半径の増加に従い、表面温度の夜半球平均値は単調減少することがわかった。昼夜間熱輸送量は惑星半径の増加に応じて単調減少しており、夜半球表面温度の減少と整合的なものとなっていた。

#### 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2件)

1. 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*, 282, 1-18. 査読有。
2. Kuramoto, K., Umemoto, T., Ishiwatari, M., 2013: Effective hydrodynamic hydrogen escape from an early Earth atmosphere inferred from high-accuracy numerical simulation. *Earth and Planetary Science Letters*, 375, 312-318. 査読有。

[学会発表](計13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, 2017: 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。

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: 2017: 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認. 惑星科学会 2017 年度秋季大会.
3. 松田幸樹, 石渡正樹, 高橋芳幸, 林祥介, 2017: 地球気候の太陽定数依存性: 海陸分布を考慮した大気大循環モデル実験. 惑星科学会 2017 年度秋季大会.
4. 石渡正樹, 納多哲史, 中島健介, 高橋芳幸, 竹広真一, 林祥介, 2016: 暴走温室状態の発生条件に関する大気大循環モデル実験. 日本地球惑星科学連合 2016 年大会.
5. 石渡正樹, 納多哲史, 中島健介, 高橋芳幸, 竹広真一, 林祥介, 2016: 地球型系外惑星の気候の数値的探索. 日本地球惑星科学連合 2016 年大会.
6. Ishiwatari, M., Noda, S., Nakajima, K., Takahashi, Y. O., Takehiro, S., Hayashi, Y.-Y., 2016: A numerical experiment on occurrence condition of the runaway greenhouse state with an atmospheric general circulation model. Asia Oceania Geosciences Society 13th Annual Meeting.
7. Ishiwatari, M., Takahashi, Y. O., Nakajima, K., Takehiro, S., Kuramoto, K., Abe, Y., Hayashi, Y.-Y. 2016: GCM experiments on the occurrence condition of the runaway greenhouse state on Earth-like exoplanets. International Workshop on "Exoplanets and Disks: Their Formation and Diversity III."
8. 石渡正樹, 納多哲史, 中島健介, 高橋芳幸, 竹広真一, 林祥介, 2016: 暴走温室状態の発生条件に関する大気大循環モデル実験. 2016 年日本天文学会春季大会.
9. 石渡正樹, 増田和孝: 2015: 同期回転惑星大気循環の惑星半径依存性に関する数値実験. 日本地球惑星科学連合 2015 年大会.
10. 石渡正樹, 阿部豊, 倉本圭, 高橋芳幸, 中島健介, 林祥介, 2014: 同期回転惑星大気の数値実験: 昼夜間熱輸送に関する検討. 惑星科学会秋季講演会.
11. 石渡正樹, 阿部豊, 倉本圭, 高橋芳幸, 中島健介, 林祥介, 2014: 同期回転惑星の大気循環における雲の効果に関する数値実験. 日本気象学会秋季大会.
12. 石渡正樹, 阿部豊, 倉本圭, 高橋芳幸, 2013: 同期回転惑星大気の数値実験: 非灰色放射スキームと雲スキームを用いた場合. 日本惑星科学会 2013 年度秋季講演会.
13. 石渡正樹, 阿部豊, 倉本圭, 高橋芳幸: 雲の存在を考慮した同期回転惑星大気

の数値実験. 日本気象学会 2013 年度春季大会.

〔その他〕

本研究で用いられた数値モデル群の公開, 計算結果のアーカイブ, 発表資源の公開は地球流体電脳倶楽部 <http://dennou-k.gfd-dennou.org/> のホームページ上で行っている.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

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

(2) 研究分担者

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