

大気海洋結合モデルで紐解く、系外地球型惑星の気候

課題責任者

小玉 貴則 東京科学大学 地球生命研究所

小玉 貴則^{*1}, 小長谷 貴志^{*2}, 谷口 啓悟^{*1}, 天田 航^{*1}

^{*1} 東京科学大学 地球生命研究所, ^{*2} 海洋研究開発機構 地球環境部門 環境変動予測センター

キーワード: 太陽系外惑星, ハビタビリティ, 潮汐固定惑星, 気候モデル

1. 背景と目的

観測技術の向上により、現在までに 5000 天体を超える太陽系外惑星(以下、系外惑星)が検出され、その中にはハビタブルゾーン(液体の水を惑星表面に維持することのできる中心星からの範囲、HZ)に位置している地球型惑星と考えられる天体も確認されている。系外惑星観測の制限から現状では太陽のような G 型星ではなく、より低質量で低温な M 型星を公転する惑星が議論の対象になっている。M 型星の HZ はその中心星の暗さから中心星近傍に位置しており、惑星は中心星からの潮汐力により潮汐固定状態(自転周期と公転周期が同期している状態)にあると考えられている。その状態では、惑星は恒久的な昼面と夜面を持ち、日射分布の非一様性が地球と大きく異なる。

低質量星周りの潮汐固定惑星のハビタビリティ(惑星表面での液体の水の安定性)は、系外惑星科学分野における重要課題の 1 つである。しかしながら、その注目度に反して、系外惑星を対象とする気候モデル(特に、大気海洋結合モデル)の開発が進んでおらず、潮汐固定地球型惑星の気候の特徴やハビタブル環境の条件などの理解は未だ乏しいのが現状の大きな課題となっている。数少ない先行研究における大気海洋結合モデルを用いた系外潮汐固定地球型惑星における気候数値実験では、地球に比べ浅い海(およそ 1000[m])かつ長期積分を行っていない(Del Genio et al. 2019, Yang et al. 2020)。そのため、海洋におけるエネルギー輸送の全貌が定量的に明らかになっておらず、その全球気候への役割や影響は未だ未解明である。そこで、本課題にて、系外潮汐固定地球型惑星に適用可能な大気海洋結合モデルを構築し、低質量星周りの潮汐固定地球型惑星の大気循環と海洋循環の定常状態における気候場を理解する。

2. 数値モデルと計算設定

本課題では大気海洋結合モデル(AOGCM)を使用し、全球が海洋で覆われた潮汐固定系外惑星の気候数値実験を行った。シミュレーションを行うにあたって、MIROC 4m をベースに改良するという形で、系外惑星 AOGCM を新たに開発した。MIROC4m は大気大循環モデル(AGCM, CCSRNIES)と海洋大循環モデル(COCO)をオンライン結合した全球気候モデル(Hasumi and Emori 2004)であり、IPCC 第 4 次報告書や多くの気候将来予測・古気候研究に実績がある(Obase et al., 2021; Greve et al., 2023)。加えて、海洋 GCM パートを除去しスラブオーシャンを導入

することで、大気のみ系外惑星 AGCM も開発した。AOGCM、AGCM それぞれの動作確認およびテスト計算を行い、特に AGCM に関しては Fauchez et al. 2020 の系外惑星 GCM 相互比較プロジェクトを参照しながら計算結果を比較した。

テスト計算後に行なった本計算では、TRAPPIST-1e を対象とし、地球海洋質量の海洋で覆われていると仮定して、AGCM 計算 1 ケース、塩分を変えた AOGCM 計算 2 ケース(真水 0 psu と地球海洋 35.4 psu)の計 3 ケースを検証した。TRAPPIST-1e の惑星半径と重力加速度は Agol et al. 2021 で制約された値(5868 km, 8.01 m/s²)を使用し、自転周期および公転周期は 6.1 日と設定した。海洋に関しては、AGCM 計算では深さ 50 m のスラブオーシャンを、AOGCM 計算では惑星半径を考慮して深さ 3200 m の海洋を設定した。日射量は 879 W/m²、スペクトルは TRAPPIST-1 の値を用いた。なお、太陽に比べて長い波長にスペクトルのピークがあるため、氷のアルベドが低くなる。氷のアルベドは Fauchez et al. 2020 と同様に 0.25 とした。

上記の惑星の条件で、300 K の等温静止大気の初期状態から AGCM で約 50 年、AOGCM でそれぞれ約 2000 年分時間積分を行った。

3. 結果

潮汐固定惑星では、昼面の半球でのみ日射を受けるため、恒星直下点から同心円上の地表面温度分布および無海水領域が形成される。このような氷の分布を持つ惑星を eye-ball planet と呼び、本課題で行なった AGCM 計算でも先行研究と同様の氷や地表面温度分布が得られた(図 1)。

一方、海洋循環を含めた AOGCM 計算では、赤道域の東西流により、夜面まで無海水領域が伸びており、特に地球と同等の塩分を加えたケースでは、赤道を一周する帯状の分布となっている。AOGCM 計算同士における海水分布の違いの一つは、塩分に伴う凝固点降下と考えられるが、氷の生成や流速、海洋深層循環の違いなどにも起因すると考えられる。これらの物理メカニズムについては現在検証中である。

また、潮汐固定惑星の AOGCM 計算を行なった先行研究(Del Genio et al. 2019, Yang et al. 2020)では、赤道域を西から東へ一周する東向きの東西流が卓越している一方、本課題で行なった計算では東から西への西向きの東西流が卓越する結果となった。ただし、先行研究では海洋の深さは 1000 m 前後、積分時間は数百年としており、深層循環は考慮されていない。海洋深さや積分時間など

の条件が異なるため、今後はそれらに着目し先行研究と比較しながら、東西流の形成メカニズムおよびその違いも今後検証していく予定である。

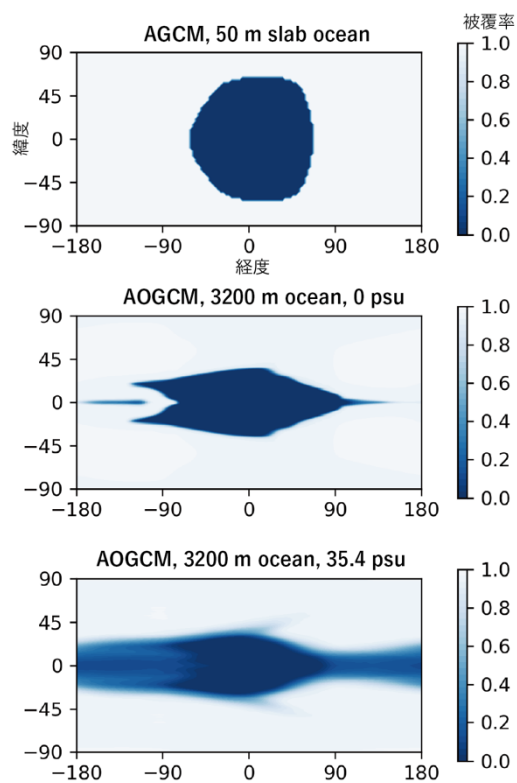


図1：各ケースにおける海水被覆率の全球分布。上からそれぞれ、スラブオーシャンを用いた AGCM 計算、塩分 0 psu の AOGCM 計算、35.4 psu の AOGCM 計算の結果を示している。

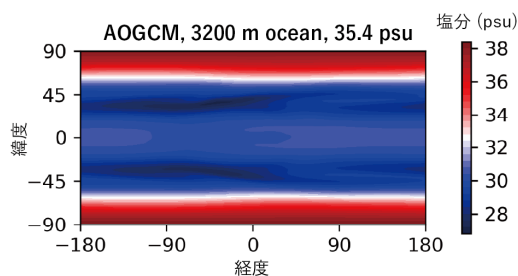


図2：35.4 psu の AOGCM 計算における海洋表層部の塩分分布。

4. 今後の計画

系外惑星気候に関して、深層循環を考慮し数千年スケールの時間積分を行なった AOGCM 計算は今回が初である。しかし、海洋惑星の海洋循環や全球エネルギー輸送を理解するにあたって、特に海洋深さ(海洋質量)や塩分の影響を検証する必要がある。海洋深さに関しては、先行研究と同様の浅い海洋や、10 km 以上といった地球海洋質量よりも多い海洋で、さらなる計算および解析を行う。塩分に関しては、密度差が生じる過程や領域を詳細に解析する。

潮汐固定惑星の場合、昼面の強い日射によって恒星直下点付近で大気が収束し、強い上昇流が発生している。強い降水や蒸発が発生し、それによって塩分勾配や密度差が生じている。これに加え、極域の海水生成領域で塩分が高くなり、海水末端の融解する領域では塩分が低くなっている(図1)。これらの物理過程を踏まえ、海洋惑星における塩分の分布と海洋循環の関連性について今後調べてゆく。

また、本課題の AOGCM 計算では1年ごとに各変数を出し、定常状態後100年を平均した状態を主に解析していた。今後は1ヶ月や1日といった短いタイムスケールでも再度出力し、定常状態での大局的な場だけではなく、短い時間スケールで発生している変動にも着目して、大気・海洋循環やエネルギー輸送を定量的に検証する。

謝辞

本研究の実施にあたり、文部科学省科研費「最先端の階層的気候モデリングに基づく全球凍結イベントの推移条件解明への挑戦」、大学共同利用機関法人自然科学研究機構アストロバイオロジーセンターのプロジェクト研究(気候モデリングで明らかにする系外ハビタブル惑星の姿)、情報・システム研究機構「戦略的研究プロジェクト(太陽系外地球型惑星の気候とハビタビリティ)」の助成を受けています。本研究は、東京大学大気海洋研究所気候システムに関する共同研究(JURCAOSCFG24-06/MIROC と NICAM を用いた潮汐固定惑星の気候)の支援を得て行われた。

文献

- [1] Del Genio et al. (2019), Habitable Climate Scenarios for Proxima Centauri b with a Dynamic Ocean, *Astrobiology*.
- [2] Yang et al. (2020), Transition from eyeball to snowball driven by sea-ice drift on tidally locked terrestrial planets, *Nature Astronomy*.
- [3] Hasumi and Emori (2004), K-1 Coupled Model (MIROC) Description. K-1 Technical Report 1, Center for Climate System Research, University of Tokyo.
- [4] Obase et al. (2021), Abrupt climate changes in the last two deglaciations simulated with different Northern ice sheet discharge and insolation, *Scientific Reports*.
- [5] Greve et al. (2023), Future projections for the Antarctic ice sheet until the year 2300 with a climate-index method, *Journal of Glaciology*.
- [6] Fauchez et al. (2020), TRAPPIST-1 Habitable Atmosphere Intercomparison (THAI): motivations and protocol version 1.0, *Geoscience Model Development*.
- [7] Agol et al. (2021), Refining the Transit-timing and Photometric Analysis of TRAPPIST-1: Masses, Radii, Densities, Dynamics, and Ephemerides, *The Planetary Science Journal*.