

地球型惑星気候の多様性の理解

課題責任者

小玉 貴則 東京科学大学 未来社会創成研究院 地球生命研究所

著者

小玉 貴則 ^{*1}, 小長谷 貴志 ^{*2}, 門屋 辰太郎 ^{*1}, 阿部 彩子 ^{*3}, 高須賀 大輔 ^{*4}, 川崎 高雄 ^{*5}, 宮腰 剛広 ^{*6}, 谷口 啓悟 ^{*1}, 東田 拓斗 ^{*1}, 河合 祐太 ^{*7}, シェリフ 多田野 サム ^{*8}, 樋口 太郎 ^{*1}, 鎌田 有紘 ^{*1}, 黒田 剛史 ^{*4}

^{*1} 東京科学大学 未来社会創成研究院 地球生命研究所, ^{*2} 海洋研究開発機構 地球環境部門 環境変動予測研究センター, ^{*3} 東京大学 大気海洋研究所, ^{*4} 東北大学大学院 理学研究科, ^{*5} 海洋研究開発機構 地球環境部門 北極環境変動総合研究センター, ^{*6} 海洋研究開発機構 付加価値情報創成部門 数理学・先端技術研究開発センター, ^{*7} 理化学研究所 計算科学研究センター, ^{*8} 琉球大学 理学部物質地球科学科.

キーワード：地球型惑星，大気海洋結合モデル MIROC，系外惑星科学，ハビタブル惑星，気候多様性

1. 系外地球型惑星

地球は生命の宿る環境を保持する我々の知る唯一の惑星であり、『地球がなぜ地球たる惑星になったか?』という問いに答えることは、自然科学における最重要課題である。観測技術の向上に伴い、現在 6000 天体を超える系外惑星が検出され、その中には、その質量と半径の関係から、地球型惑星と考えることのできる惑星が検出されており、特に、ハビタブルゾーン内に位置している地球型惑星は、ハビタブル候補天体として盛んに議論されている。それら異なる地球のような惑星に対して、比較惑星学の発展として、多角的に地球を比較/展開できる今、地球型惑星の気候状態の形成メカニズムを明らかにする絶好の時代に突入したと言える。本研究課題では、系外惑星系における地球型惑星の気候状態を理論的に検討し、地球の古気候を含む極端気候の形成メカニズムを明らかにすることを目標とした。そして、それらと地球の気候状態を比較したときに、地球型惑星における気候状態の中での地球気候の位置付けを明らかにすることを目的としている。本課題では、以下の 2 つの研究課題を中心に多角的に“地球型惑星気候”について迫った：(1) 系外地球型惑星の気候、(2) 全球凍結時における気候。

2. 地球型惑星としての地球と気候システム

現在、気象学/気候学、古気候学では地球の気候はシステム的に駆動し決定されていると理解されている。その中にはサブシステムとして、大気、海洋、大陸、氷床、雲などが含まれており、究極的には受け取った恒星からの放射エネルギーをシステム内で分配し、惑星放射として熱を宇宙空間に排出している熱機関として捉えることができる。計算機能力の向上に伴い、惑星気候のシステム的な挙動を捉えた気候数値実験が可能になり、サブシステムのそれぞれ役割の理解が進んでいる。この気候システムは、その外的な境界条件に伴い、各サブシステムの役割や寄与を変えながら表層環境を決定していることが近年理解されてきた(例えば、[4]や[5])。しかしながら、系外地球型惑星が検出されている現在でも、未だ地球型惑星の保持する気候システムにおける多様性を十分に理解で

きていとは言えない。そのため、惑星気候決定メカニズムにおいて重要な役割を果たす自転角速度と公転周期に注目することで、それらに対する気候の応答を系統的に調べた。加えて、地球気候システムにおける大気、海洋、大陸の役割と寄与を明らかにするために、大陸分布と気候状態に関しても系統的な気候実験を行った。

3. 潮汐固定された地球型惑星気候

現状の系外惑星観測では、観測の困難さから、太陽のような恒星周りではなく、太陽より低質量な恒星周りの地球型惑星に焦点が当てられ、気候検討が行われている。しかしながら、多くの気候検討が大気大循環モデル (AGCM) を用いた検討にとどまっており、十分に気候システムを捉えているとは言えない。そこで、本課題では、大気海洋結合モデル MIROC を用いて、系外地球型惑星の気候検討を行った。

低質量星周りでは、地球の受け取る日射量をとる軌道を考慮した場合、惑星の公転軌道は中心星近傍に位置する。その場合、中心星からの潮汐力の効果により、惑星は潮汐固定状態にあると考えられる。言い換えれば、公転周期の短い地球型惑星はその自転が公転と同期し、自転角速度が公転角速度となるという状況である。そのような惑星の最も重要な特徴は、恒久的な昼面と夜面を保持することである。多くの先行研究では、昼面で受け取った恒星からのエネルギーを大気循環により夜面へ輸送することで、表層環境を決定すると理解されていた。

昼面から夜面へのエネルギー輸送に関して、惑星が液体の海を保持している場合、大気循環だけでなく海洋によるエネルギー輸送が表層環境決定において重要となる。よって、本課題では、世界で初めて、低質量星周りの深い海洋を保持する潮汐固定地球型惑星を模擬した長期気候数値実験を行い、大気大循環モデルでの結果と比較した(図 1)。海洋循環とエネルギー輸送により、昼面から夜面への表面温度分布と海水分布が大気大循環モデルと比べ大きく変化し、全く異なる表層環境になることが示された[2-3]。これら結果は、海洋を保持する惑星の特徴として将来の系外惑星観測ミッションに対して大きな示唆を与えると考えられる。加えて、海洋中に含まれる塩分によ

りどの程度海洋によるエネルギー輸送が変化するかを明らかにするために、さまざまな塩分濃度の海洋における潮汐固定惑星気候数値実験を行った。今後、さらなる気候解析を行うことで、潮汐固定地球型惑星気候と熱塩循環の関係を明らかにすることを計画している。

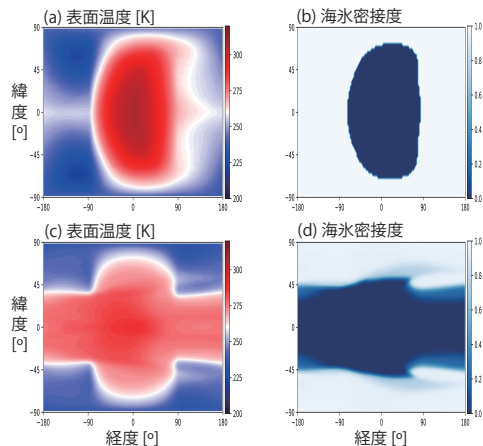


図1：MIROC4mで計算された潮汐固定惑星における表面温度と海氷密度。上段が大気循環のみを考慮した場合、下段が大気海洋循環を考慮した場合。

4. 全球凍結状態での地球型惑星気候

地球史における重要な問題として、全球凍結イベントが挙げられる。その際には、惑星表面が氷で覆われていたと考えられている。地球史だけでなく、全球凍結の状態は、恒星から遠く、日射量の低い軌道で生じると考えられ、全球凍結時の気候遷移を理解することは地球型惑星気候の多様性を理解することに直結する。

本研究課題では、大気海洋結合モデルMIROCを用いて、現代地球条件における全球凍結状態への遷移過程において海洋循環がどのように変化するか？さらに全球凍結気候下で定常状態に至るまでの気候推移を明らかにした。

太陽定数を現在値の94%に急激に低下させると、現代地球の気候は約1300年後に全球凍結状態へと移行し、海氷厚の急激な増加が始まった(図2)。全球凍結イベントの発生過程では、中緯度域における広範な海氷形成と海氷融解により、表層海水の大きな淡水化と塩分成層が生じた。全球凍結状態の発生後、全球的な海氷被覆によって大気-海洋間のフラックスが減少し、深層海洋循環は著しく弱化した。しかし、海洋の温度場および塩分場がほぼ定常状態に近づくにつれて、子午面循環は全球凍結気候下の定常状態において回復した。本結果は、Climate of the Pastへ投稿し、受理・出版された[1]。

謝辞(10ポイント太字)

本研究課題は、情報・システム研究機構”戦略的研究プロジェクト(No. 2024-SRP-03)”、大学共同利用機関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(No. AB608)、科研費/挑戦的研究(萌芽)(23K17709)、公益財団法人伊藤科学振興会の助成を受けて実施した。

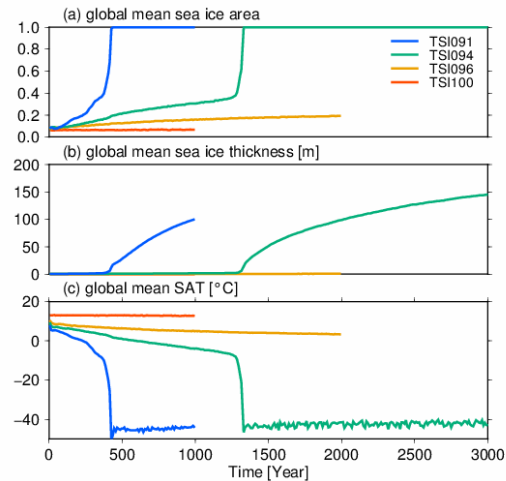


図2：MIROC4mで計算された100%-91%の日射量下での全球凍結突入実験。(a)全球平均した海氷面積割合、(b)全球平均した海氷厚、(c)全球平均した表面気温。(1)の図1より)

文献

- [1] T. Obase, T. Kodama, T. Kawasaki, S. Sherriff-Tadano, D. Takasuka, A. Abe-Ouchi, and M. Fujii, “Climate and ocean circulation changes toward a modern snowball Earth”, *Climate of the Past*, 22, 845-859, 2026, doi: 10.5194/cp-22-845-2026.
- [2] K. Taniguchi, T. Kodama, T. Higuchi, T. Obase, and H. Genda, “Effect of salinity on ocean planet climate”, *ExoClimes VI*, Montreal, Canada, (2025).
- [3] K. Taniguchi, T. Kodama, T. Higuchi, T. Obase, and H. Genda, “Effects of salinity on tidally-locked aqua planets’ climate with a coupled atmosphere and ocean GCM”, *EPSC-DPS Joint Meeting*, Helsinki, Finland, (2025)
- [4] A. Abe-Ouchi, F. Saito, K. Kawamura, *et al.* Insolation-driven 100,000-year glacial cycles and hysteresis of ice-sheet volume. *Nature* **500**, 190–193, 2013. doi:10.1038/nature12374, (2013).
- [5] T. Kodama, H. Genda, J. Leconte, & A. Abe-Ouchi, “The onset of a globally ice-covered state for a land planet”, *Journal of Geophysical Research: Planets*, 126, doi:10.29/2021JE006975, (2021).