

太陽系外地球型水惑星の気候状態に対する自転軸傾斜角と炭素循環の影響 Effects of obliquity and carbon cycle on the multistable solutions of climate of water-rich extraterrestrial planets

渡邊 吉康^{1*}, 田近 英一², 門屋 辰太郎¹
Yoshiyasu Watanabe^{1*}, Eiichi Tajika², Shintaro Kadoya¹

¹ 東大・理・地惑, ² 東大・新領域・複雑理工

¹Earth and Planet. Sci., Univ. of Tokyo, ²Complexity Sci. & Eng., Univ. of Tokyo

系外惑星の発見数はこの数年で飛躍的に伸び、その軌道要素（軌道離心率、軌道長半径）は多種多様であることが分かってきた。惑星の自転軸傾斜角は、一般に様々な値を取りうるばかりか、大きく時間変動することが知られている。自転軸傾斜角の大きさは、惑星が受け取る日射量の緯度分布及び季節変化を変えることで、惑星の気候に大きな影響を及ぼす。一方、地球の気候が長期的に安定な理由は炭素循環のはたらきであると考えられており、系外惑星においても大気中の二酸化炭素分圧の調節機構の存在が重要であると考えられる。そこで本研究では、水惑星の気候システムが自転軸傾斜角の大きさと炭素循環のはたらきによってどのような状態を取り得るのかを理解する目的で、炭素循環と惑星放射の二酸化炭素分圧依存性を考慮した南北一次元エネルギー平衡モデル（EBM）を用いて、多重安定平衡解の構造変化にも着目しながら、系統的な検討を行った。その結果、以下のことが分かった。

(1) 炭素循環を考慮しない場合：自転軸傾斜角が小さい条件では、氷が全く存在しない“無凍結解”，季節的に氷に覆われる“季節的部分凍結解”，一年を通して惑星表面の一部が氷に覆われる（“永久”部分凍結解），年間を通して全球が氷に覆われる“全球凍結解”などの安定解が存在する。しかし、自転軸傾斜角の増大とともに季節的部分凍結解及び部分凍結解の存在条件の範囲は縮小し、自転軸傾斜角が54度付近で消失する。自転軸傾斜角が大きい条件（>54度）で安定な気候状態は、無凍結解か全球凍結解のどちらかとなる。これは、自転軸傾斜角増大に伴う南北温度勾配の減少のため、雪氷地域への南北熱輸送が減少するためである。

(2) 炭素循環を考慮した場合：水惑星の気候は大気中の二酸化炭素濃度が一定条件の場合と比べて、軌道長半径がより広い範囲において温暖な環境を維持できる。これは、大気中の二酸化炭素分圧が炭素循環によって調節される結果である。一方、二酸化炭素分圧の平衡レベルは、同じ軌道長半径の条件では、自転軸傾斜角によらずほぼ一定となることが分かった。これは、自転軸傾斜角の増大にともなって極域の温度が上昇する効果が赤道域における温度低下の効果を相殺し、二酸化炭素を消費する全球的な地表面の風化率がほぼ一定になるためである。

(3) 水惑星の自転軸傾斜角が小さい場合（たとえば現在の地球の場合 = 23.4°）：二酸化炭素脱ガス率は現在の地球の約0.6倍以上なければ温暖な環境を維持できない。これに対し、自転軸傾斜角の大きな惑星の場合（たとえば自転軸傾斜角が90°），二酸化炭素脱ガス率が現在の地球の約0.3倍で温暖な環境を維持できる。これは、年平均日射量の南北差が小さくなることにより全球で等温状態に近くなり、氷が発達しにくくなることによるものである。

キーワード: 系外地球型惑星, 惑星気候, 自転軸傾斜角, 炭素循環, 脱ガス, EBM

Keywords: extraterrestrial planet, planetary climate, obliquity, carbonate-silicate geochemical cycle, degassing, EBM