

論文審査の結果の要旨

氏名 中山 陽史

近年の観測技術の飛躍的向上により、太陽系外惑星分野のターゲットが木星型惑星から地球型惑星へ急速に移行している。それにより、太陽系外惑星の表層環境（いわゆるハビタビリティ）について実証的研究を行うことのできる時代が近づいている。本論文は、太陽系外地球型惑星の気候に関する理論研究の成果をまとめたものである。とくに惑星表面の海水量と地表温度の関係について、独自に開発した気候モデルとそれに基づく数値計算によって詳細に調べるとともに、理論予測の妥当性を将来の宇宙望遠鏡観測で検証するための方法論の開発も行った。

本論文は4章から構成される。

第1章では、地球型惑星の億年スケールでの気候の安定性とハビタブルゾーンの概念、気候と海水量に関する現状の理解、太陽系外惑星の大気に関する観測的研究の現状および将来の観測プロジェクトなど、最近の研究動向が説明され、最後に本論文の目的および構成が示されている。

第2章では、地球型惑星表面における海水量と地表温度の関係に関する研究成果がまとめられている。ここではとくに、海洋深部で形成される高圧氷の役割に着目している。まず、先行研究の問題点の整理を行い、本章の研究目的が述べられている。続いて、海洋の鉛直構造モデル・海底環境モデル・炭素循環モデル・大気構造モデルの定式化および数値計算法が記載されている。そして、それらを結合したモデル計算によって、地表温度を海水量および二酸化炭素脱ガス率の関数として求め、ある臨界海水量条件を境に、大気中の二酸化炭素分圧が高い高温気候状態と二酸化炭素分圧が低い極低温気候状態の2つの気候モードに分かれることが示されている。そして、数値計算結果の解析的な解釈およびモデルの適用範囲に関する議論がなされた上で、太陽系外における地球類似惑星の存在度に関する理論的な示唆が与えられている。最後に、本章の結論が述べられている。

第3章では、第2章で得られた惑星気候に関する理論予測の観測的検証可能性を検討した成果がまとめられている。まず、大気二酸化炭素量が異なる地球および金星について、高層大気の広がりには違いが生じること、また次世代の紫外線観測宇宙望遠鏡でその違いを見分けられるとする先行研究を紹介している。

続いて、光化学反応および放射を詳細に考慮した高層大気モデルの定式化および計算法について記載されている。そしてそれを用いて、二酸化炭素量および紫外線照射量の異なる場合について、高層大気の構造を計算し、惑星が恒星前面を通過（トランジット）する際に惑星大気が隠す恒星表面の割合を計算している。最後に、モデルの妥当性を議論した上で、次世代の紫外線宇宙望遠鏡によるトランジット観測によって、低温気候状態と高温気候状態を見分けることができる可能性の評価を行っている。最後に、本章の結論が述べられている。

第4章では、本論文全体の結論が述べられている。

本委員会は、令和元年12月23日に学位論文の内容および関連事項について口頭試験を行なった。その結果、先行研究では、大陸が完全に水没するような深い海洋を持つ惑星は、大陸地殻のみならず高圧氷の形成によって海洋地殻においても化学風化作用が機能しないため、必ず高温気候が実現されるとされていたのに対し、プレートテクトニクスなどの地球科学的知見を導入することによって、臨界海水量を超えると高圧氷は溶解すること、固液平衡による熱力学的自由度の喪失により海底風化が暴走して寒冷気候が実現することなど、従来とは全く異なる結論を導きだしたこと、さらにそうした理論予測の観測的な検証可能性の検討を行なった点などを高く評価した。とくに、地球惑星システム学的視点で惑星全体を捉えることによって、海底で起きているプロセスと高層大気の状態を理論的につなげるとともに、詳細なモデル計算によって次世代宇宙望遠鏡での検出可能性を示した点で、地球惑星システム科学に大きく貢献する成果であると判断され、審査委員全員一致で合格と判定した。

なお、本論文の前半に相当する地球型惑星の気候と海水量に関する研究は生駒大洋氏・小玉貴則氏・阿部豊氏との共同研究であり、後半の高層大気モデルに基づく観測的検証可能性に関する研究は生駒大洋氏・亀田真吾氏との共同研究であるが、論文提出者が主体となって発案および数値計算、結果の解析をおこなったもので、論文提出者の寄与が十分であると判断される。

上記の点を鑑みて、本論文は地球惑星科学、とくに地球惑星システム科学の発展に寄与するものと判断し、博士（理学）の学位を授与できると認める。