

## 論文審査の結果の要旨

氏名 黒崎健二

本論文は、4章からなる。第1章は、イントロダクションであり、太陽系内外の巨大氷惑星の起源と進化について述べている。巨大氷惑星とは、 $\text{H}_2\text{O}$  や  $\text{NH}_3$  といった氷成分に富む地球質量の数倍から 20 倍程度の惑星であり、太陽系では天王星や海王星がこれに相当する。太陽系外には、軌道進化によって恒星に近い位置に移動した短周期巨大氷惑星も複数発見されており、氷成分の蒸発による厚い大気の形成や大気散逸が起きる可能性も指摘されている。第1章前半では、太陽系内の巨大氷惑星である天王星と海王星の相違点として、天王星からの惑星放射が極端に低いという惑星科学上の大問題について述べられている。第1章後半では、太陽系外の短周期巨大氷惑星における、氷成分の長期的安定性に関する問題点をまとめている。本論文で注目する両者の解決に迫る鍵となる共通要素は、これまで無視されていた巨大氷惑星の大気構造や化学組成の長期的進化である。本論文は、これを考慮することで、上記2つの問題に対してこれを解決する独創的な議論を展開している。

第2章では、天王星からの惑星放射が極端に低いという問題の解明を行っている。これまでの研究では、過去の天王星の大気組成を現在の組成と同じと仮定し、惑星形成論の示唆する高温の初期状態からの冷却を計算すると、現在のような低温（低放射）状態にならないことが指摘されており、ボイジャー探査機が初めて天王星を訪れた 1980 年代以来の未解決の大問題となっていた。これに対して本論文では、大気にかつて大量に氷成分が存在していたことで冷却が飛躍的に加速されるというアイデアを示した。本論文では、形成時に氷成分が大量に大気に含まれていた場合、進化段階でこれら成分の凝縮に伴う効果的な放射が生じ、内部の冷却を飛躍的に進めることができることを数値モデルによって示した。特に、様々な初期大気組成に対して、現在の状態に至る進化パスを網羅的に計算することで、初期大気組成は現在と大きく異なり、氷成分が水素に対して 30%以上含まれていたこと、また天王星の材料物質には  $\text{NH}_3$  は含まれるが  $\text{CO}$  などは乏しかったことなどを明らかにした。また、氷成分が大量に大気に含まれる理由として、天王星の自転軸を傾けた原始惑星の巨大衝突の影響を指摘した。この章では、長年の問題であった天王星の低放射問題を、惑星形成論と整合的な形で解決する可能性を初めて示したものであり、極めて独自性が高く、博士論文全体の中でも特に重要な研究であるという評価がなされた。

第3章は、恒星近傍に存在する系外巨大氷惑星からの大気の散逸を計算することで、

恒星の寿命程度の時間で  $\text{H}_2\text{O}$  が完全に損失してしまう臨界条件を求めている。恒星近傍に移動した系外惑星系では、恒星からの強い紫外線によって大気が大規模散逸する可能性がある。これまでは、ホットジュピターと呼ばれる恒星近傍ガス惑星からの水素大気の損失は議論されてきたが、巨大氷惑星からの  $\text{H}_2\text{O}$  の散逸は系統的に議論されていない。本論文では、惑星質量、惑星半径、軌道長半径といった観測可能パラメタを系統的に変えて大気散逸を数値的に計算することで、恒星の寿命程度の時間内で  $\text{H}_2\text{O}$  が完全散逸するパラメタ空間（臨界惑星質量と臨界惑星半径）を求めた。特に、天文観測から、惑星の質量あるいは半径のいずれかが判明した場合でも、この臨界惑星質量あるいは臨界惑星半径を下回れば、 $\text{H}_2\text{O}$  は安定して存在することはできないことを示した。このような短周期巨大氷惑星の  $\text{H}_2\text{O}$  存在限界の全体像を整理した研究はなく、理論的枠組みが明快に示されている点が評価された。

最後に第4章は、論文全体について、得られた知見をまとめている。特に、本論文で得られた結果は、今後の観測の理論的指針となるものであり、実証的研究への示唆を与えている点が高く評価された。

なお、本論文の第2章は、生駒大洋博士との共同研究であり、第3章は、生駒大洋博士、堀安範博士との共同研究である。しかし、論文提出者が主体となって発案、数値モデルの構築、考察を行ったもので、論文提出者の寄与が十分であると判断する。

したがって、博士（理学）の学位を授与できると認める。