

論文審査の結果の要旨

氏名 門屋辰太郎

本論文は、5章からなる。第1章は、イントロダクションであり、地球型惑星の長期的気候進化について述べられている。地球は、形成後から今日まで40億年以上にわたり、2～3回の全球凍結を除いて、温暖湿潤な気候を維持してきたことが知られる。他方、太陽は恒星進化に伴いその光度を上昇させており、地球には何らかの気候安定化システムが備わっているものと考えられている。そのような気候安定化システムの中で最も広く受け入れられているのが、陸上の化学風化と海洋での炭酸塩の形成によって、大気二酸化炭素濃度が自己調整されるという“ウォーカー・フィードバック”である。近年では、このようなシステムが系外地球型惑星にも備わっているものと仮定され、地表に液体の水を保持できる恒星からの距離を指す、ハビタブルゾーンという概念も提案されている。しかしながら、ウォーカー・フィードバックが駆動するための根源的な要素は、惑星内部からの二酸化炭素の脱ガスであり、上記のハビタブルゾーンも多くの場合、現在の地球と同程度の脱ガス率を仮定して気候状態を議論するものであった。そもそも脱ガス率を規定するのは惑星内部の熱進化であり、当然ながら現在の地球の脱ガス率が、異なる年齢を持つ系外地球型惑星においても適応される保証はない。ところが、このような惑星の熱進化と脱ガス率の時間進化を考慮し、太陽系外まで含めて、地球型惑星がどのような気候状態を取るか、また長期的にどのような気候進化をするかを包括的に研究した例はなく、重要な問題が盲点のごとく見過ごされてきた。

第1章前半では、気候安定化システムとしてのウォーカー・フィードバックの説明と共に、系外惑星まで含めた包括的視野で地球型惑星の気候安定性を調べる必要性が述べられている。特に、上記の問題点を鋭く指摘し、脱ガス率や惑星の熱進化と気候進化を総合的に考える必要性を述べている。第1章後半では、本論文の戦略と目的について述べられている。まず、脱ガス率を大きく変化させたときの地球型惑星の気候の多様性について分類をし、その上で質量や海水量という意味で地球と類似の惑星（以後、地球類似惑星と呼ぶ）の熱進化を考えて長期的な気候進化を議論する。本論文は、これを考慮することで、上記の問題を解決する独創的な議論を展開している。

第2章では、本研究で用いた数値モデルの説明がなされている。本研究では脱ガス率や恒星からの距離を大きく変えて数値計算を行うため、計算コストを抑えた南北一次元エネルギーバランスモデルを用いている。このモデルには、表層システム内での炭素循環が組み込まれ、ウォーカー・フィードバックを扱うことができる。時間進化については、惑星内部の放射性元素による発熱と脱ガス率の時間変化を考慮し、恒星の光度変化も組み込んでいる。モデル自体は比較的オーソドックスなものであるが、その分、

地球類似惑星がある気候状態を取るに至る因果関係を理解しやすいものである。

第3章では、惑星内部の熱進化を考慮したときの気候の多様性や進化に関する計算結果が述べられている。第3章前半では、脱ガス率の変化に対して、従来考えられていたハビタブルゾーン内部で、地球類似惑星が取る気候の状態図と分類がなされている。特に、脱ガス率が現在の地球と同程度かそれ以下の場合、恒星からの距離に大きく依存せず、地球類似惑星は“スノーボール・サイクル”という気候状態を取ることがわかった。スノーボール・サイクルとは、数百～数千万年の全球凍結期間と数十～数百万年の間欠的温暖期を交互に繰り返す気候モードであり、従来のハビタブルゾーン内部において、このような極端な気候状態を取りうるということは全く新しい発見である。

第3章後半では、地球類似惑星の熱進化とそれに伴う脱ガス率の進化を考慮した、気候進化の結果がまとめられている。特に、現在の太陽—地球間の距離の1.2倍以遠の軌道を回る地球類似惑星では、形成後数億年間は高い脱ガス率のため温暖湿潤気候を取るが、30～50億年で脱ガス率の低下に伴ってスノーボール・サイクルに突入してしまうことがわかった。他方、現在の地球軌道では、惑星は脱ガス率が低下するもののスノーボール・サイクルに突入する前に、太陽光度の上昇によって温暖湿潤気候を維持することがわかった。つまり、ハビタブルゾーン内部に地球類似惑星が形成すれば、現在の地球のように長期的に温暖湿潤な気候を保てるというわけではなく、現在の地球軌道付近という狭い領域に惑星が誕生する必要があることを示している。このような結果は、現在広く受け入れられているハビタブルゾーンという概念自体に、本質的な修正を強いるものであり、それを示した理論的枠組みが明快に示されている点が評価された。

第4章では、気候状態の遷移に関する物理的考察や、用いたモデルの不確定性、地球史への応用、異なるタイプの恒星の周りでのハビタブルゾーンに関する議論が展開されている。特に、地球は原生代後期（7～6億年前）に全球凍結を2度経験しているが、この時期はちょうど脱ガス率の低下によって、地球史を通じて最もスノーボール・サイクルに陥りやすかった時期に相当している。脱ガス率の変動性を考えれば、この時期に地球がスノーボール・サイクルに陥っていた可能性は十分考えられる。このように地球史における2度の全球凍結を、系外地球型惑星を含めた広い視点で理解し、その必然性を議論したことは極めて斬新であり、その独創性が高く評価された。

最後に第5章は、論文全体について得られた知見をまとめている。

なお、本論文は全体を通じて、田近英一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。