

# 論文審査の結果の要旨

氏名 川島由依

本論文は、序章、Part I、Part II、そして結論からなる。

序章では、トランジット法による太陽系外惑星の観測的進展、特に大気透過スペクトルに基づく「惑星の特徴づけ」と、大気中に存在する炭化水素ヘイズの重要性について述べられている。現在まで約 3000 の系外惑星が発見されており、従来の観測法で得られる惑星質量や半径といった情報だけでなく、近年では多波長でトランジット観測を行うことで、惑星大気分光観測が行われつつある。言い換えれば、質点でしか表現されていなかった系外惑星の「特徴づけ」が可能な時代を迎えているとされている。そのような中、観測される透過スペクトルには、その惑星の大気組成、気候やダイナミクス、さらには起源や進化に関する情報も含まれていることが期待されるため、このような観測から、いかに上記のような物理化学情報を抽出できるかといったことが世界的な課題となっている。

そのような中、スーパーアースと呼ばれる地球の数倍質量を持つ系外惑星に関して、そのいくつかは赤外域において非常に平坦で、可視域においてレイリー散乱による傾きを伴う大気透過スペクトルを持つことがわかってきた。このような特徴を説明する大気物質として注目を集めているのが、炭化水素ヘイズと呼ばれる大気中のもやである。炭化水素ヘイズを構成する微粒子は、メタンなどを含む還元的大気を持つ惑星において光化学反応で生成する高分子有機物であり、これらが大気中に多数存在することで上記の透過スペクトルを実現し得る。実際、過去の研究では、炭化水素ヘイズの微物理モデルを用いて、その生成高度や生成率を任意に与えることで観測されるスペクトルを再現しようとする試みが行われている。ところが、炭化水素ヘイズの生成高度や生成率は、本来、惑星の大気組成や中心星からの紫外線強度によって決定されるものである。しかしながら、これらヘイズの微粒子を生成する化学反応と、生成後の微粒子の成長を扱う微物理モデルを整合的に連結させたモデルはなく、これがボトルネックとなり、透過スペクトルを基に、何が系外惑星大気の特徴を決めているのかといった支配要因の解明にまで踏み込めていなかった。

Part I では、上記の問題点を克服するための数値モデルの構築について述べられている。モデルは光化学モデル、微物理モデル、そして透過スペクトルモデルからなり、それらが一貫した形で連結している。透過スペクトルモデルは論文提出者が修士課程において開発したものであるが、他の二つは博士課程において一から新たに開発したものであり、これらが連結したものは世界的にも独自性が高い。Part I 後半では、大気組成や中心星の紫外線強度、大気の渦拡散係数の異なる様々な惑星に対して、それらが

持つ透過スペクトルがどのように変化するかが説明されている。特に、赤外域に平坦で、可視域に傾きを持つ透過スペクトルが実現されるための条件や各パラメタの影響が丁寧に考察されている。具体的には、透過スペクトルは恒星からの紫外光強度と大気中のメタン濃度に大きく依存し、紫外光強度が強い場合、あるいはメタン濃度の高い場合には、赤外域が平坦でかつ可視域に傾きを持つ透過スペクトルが実現されることが明らかになった。これだけでなく、微物理モデルに含まれる諸過程の中から支配的な過程を抽出することで、今後さらに増える観測データを迅速に解析するためのモデルの簡略化、計算コスト削減への重要な示唆を与えている。

**Part II** では、構築したモデルを現実の天体群に応用して、観測結果の解釈を展開している。ここで扱った天体とは系外惑星 **GJ 1214b**、**GJ 3470b**、**GJ 436b**、および太陽系の土星の衛星タイタンである。特に、**GJ 1214b** では通常の恒星フラックスを超える極めて強い紫外光に駆動された、活発な炭化水素ヘイズの生成が必要であることがわかった。一方、**GJ 3470b** は、透過スペクトルを説明するためには、ヘイズの生成率が低いことが好ましく、そのためには大気中のメタン濃度が低いといった可能性が考えられる。**GJ 436b** は、中程度から高いヘイズ生成率だった場合、モデルと観測が整合的である。このように、一見似たような、比較的近い質量やサイズを持つ系外惑星でも、大気組成や恒星からの紫外線強度に対応して、多様な大気状態を取りうることが明らかになった。

最後に結論は、論文全体について得られた知見をまとめている。特に、近い将来には宇宙望遠鏡や地上大型望遠鏡を含む、多数の大規模観測計画があり、本研究で構築したモデルやその知見が世界的にどのような立ち位置を占めるのか、将来展望と共に述べられている。

なお、本論文は全体を通じて、指導教員である生駒大洋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。