HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	木星対流圏の放射エネルギー収支に関する数値的研究［論文内容及び審査の要旨］
Author(s)	髙橋, 康人
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(理学)
Dissertation Number	甲第13131号
Issue Date	2018-03-22
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/69999
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/
Type	doctoral thesis
File Information	Yasuto_Takahashi_review.pdf, 審査の要旨

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

学 位 論 文 審 査 の 要 旨

博士の専攻分野の名称　博士（理　学）　氏　名　　髙　橋　康　人

審査担当者	主査	教　授　倉　本　　圭
	副査	教　授　高　橋　幸　弘
	副査	准教授　石　渡　正　樹
	副査	准教授　はしもとじょーじ（岡山大学大学院自然科学研究科）

学 位 論 文 題 名

木星対流圏の放射エネルギー収支に関する数値的研究

博士学位論文審査等の結果について（報告）

本論文は、光学活性物質の分布と光学特性の最新の知見を組み込んだ鉛直一次元放射対流平衡構造の数値モデリングと、全球熱放射およびアルベドスペクトルの観測値との比較解析により、対流圏を含む木星大気の放射エネルギー収支構造について解明したものである。惑星大気の循環や対流などの緒活動の駆動源は、元をたどれば、太陽放射による加熱と惑星放射による冷却、すなわち放射エネルギー収支に帰着する。惑星表層の放射エネルギー収支の描像は、地球においては地表や雲の役割を含めて確立している。しかし巨大ガス惑星の代表といえる木星に対しては、対流圏の平均的な物質分布に関する直接観測データに乏しいことに加え、相変化を伴う雲対流の結果として決まる放射活性物質の分布の理解が進んでいなかったことも相まって、大気内の放射エネルギー収支の構造はほとんど不明であった。しかし近年、雲形成と降水・降雪による雲消失の物理過程を組み込み、木星大気の雲対流を模擬する流体数値シミュレーションが進展を見せ、木星対流圏における現実的な物質分布が提案されるようになってきた。著者はこの知見を大気モデルに取り入れることで、木星大気中の放射伝達とエネルギー収支構造を明らかにできると着想した。

著者は、木星において温度分布、物質分布、放射場について唯一その場観測がなされたガリレオプローブ投下実験をモデル計算により再現することにより、構築した放射伝達モデルの有用性の検証を行った。その結果、観測値の不確定性や種々の未制約要素を考慮したうえで、放射計が得た熱放射および日射フラックスデータの基本的な振る舞いはほぼ再現できることが確認された。ただしガリレオプローブの落下点は、木星表面の数%しかない晴天域であり、この地点の大気構造は木星を代表するものではない。

著者は、全球平均的な大気構造を推定するために、放射対流平衡計算から求まる熱放射スペクトルとアルベドスペクトルをそれぞれの全球観測データに近づけるよう、雲粒や着色物質の分布や粒径など不確定要素について最適化を行った。最適化モデルは、深部対流圏温位が 166 K の放射対流平衡温度分布、熱化学平衡に従った気体分布、波長 1 μ m の光学的厚さがそれぞれ 10、1.8、0.26 の NH_3、NH_4SH、H_2O 雲層、高度分布が NH_3 雲のそれに相似な波長 1μm において 6×10^{-2} の光学的厚さを持つ着色物質層、そして光学的に非常に薄い成層圏ヘイズ層を持つ。着色物質は、木星の可視反射スペクトルの赤化傾向を説明するために必要となる。

求まった最適化モデルにおける放射エネルギー収支の構造を分析すると、まず雲形成高度領域において、宇宙空間への熱放射と日射の吸収散乱の大部分が担われ、正味の放射冷却が集中的に生じている。この高度領域においては、着色物質が混在する NH_3 雲層が太陽放射の散乱・吸収に

寄与する一方、木星の熱放射の吸収・射出源としての雲粒の寄与は限定的である。これは木星雲層モデルとして、広く受け入れられてきた平衡凝結雲モデルとは相いれない。平衡凝結雲モデルを放射伝達計算に導入すると、深部からの熱放射がほぼ完全に遮られ、波長 20μm 付近に極大を持つ木星の熱放射スペクトルの強度は観測値よりも大幅に低下する。これは断熱的に上昇する気体塊を想定し、除去過程を無視して各高度で生じる凝結物がその場にとどまることを仮定した平衡凝結雲モデルが、雲密度を著しく過大評価していることを示す。観測スペクトルと整合的な雲密度は、平衡凝結雲モデルの値の約千分の 1 であり、これは雲対流シミュレーションの結果と調和する。また、熱放射の射出の大部分は、上部対流層のアンモニアおよび水素ガスによってほとんど担われていることを示した。

著者はさらに、地表の存在しない木星大気の放射エネルギー収支構造を大局的に捉えるために、上部成層圏、下部成層圏、上部対流圏、下部対流圏からなる 4 層大気モデルを新たに提起した。気温極小高度、雲頂高度（対流圏上端）、H_2O 雲層下端高度を境界に区分される各層は、それぞれ特徴的な太陽放射と惑星放射の収支を有する。上部対流圏は雲形成高度領域そのものであり、正味の放射冷却が生じていることで特徴づけられる。正味の冷却は、大気を冷やすことで大気層を不安定にし、下部対流圏から凝結性物質と顕熱と潜熱を汲み上げる対流を発生させる。すなわち、上部対流圏が木星大気の対流活動のエンジンと位置付けられる描像を提示した。

著者はまた、雲対流層の正味放射冷却率の推算をもとに、急速に発達する対流雲の形成による凝結で解放された潜熱が、放射冷却によって失われるのに要する時間で決まる雲形成の間欠周期を、深部 H_2O 混合比の関数として明らかにした。そして現実に観測された木星大気の雲活動の間欠周期との比較から、木星深部の H_2O 混合比が、太陽組成大気の約 10 倍以上とする予想を示した。

本研究は、木星において外界とのエネルギー授受を中心的に担う重要な領域でありながら、未解明だった雲頂高度以深の放射伝達構造を初めて詳らかにし、木星大気の放射エネルギー収支の支配因子と大気対流の駆動源としての放射冷却の役割を明確に示した。一連の結果は、今後の木星大気ならびに巨大ガス惑星大気の熱構造や大気活動、ひいては大気の正味冷却を通じた巨大ガス惑星の熱史の理解の基礎を与えるものである。以上により、著者は、北海道大学博士（理学）の学位を授与される資格があるものと認める。