

博士学位論文

内容の要旨及び審査結果の要旨

第51号

2023年3月

京都産業大学

は し が き

本号は、学位規則（昭和28年4月1日文部省令第9号）第8条の規定による公表を目的とし、令和5年3月19日に本学において博士の学位を授与した者の論文内容の要旨及び論文審査結果の要旨を収録したものである。

学位番号に付した甲は学位規則第4条第1項によるもの（いわゆる課程博士）であり、乙は同条第2項によるもの（いわゆる論文博士）である。

目 次

課程博士

1.	<small>キュウマ</small> 久間 <small>アンナ</small> 杏那	[博士 (物理学)]	1
2.	<small>ミタライ</small> 御手洗 <small>ショウ</small> 彰	[博士 (先端情報学)]	4
3.	<small>ヤマダ</small> 山田 <small>トモヒト</small> 等仁	[博士 (生命科学)]	9
4.	<small>タネムラ</small> 種村 <small>ヒロキ</small> 裕幸	[博士 (生命科学)]	12

氏名（本籍）	久間 杏那（愛知）
学位の種類	博士（物理学）
学位記番号	甲理 第17号
学位授与年月日	令和5年3月19日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
論文題目	金星熱潮汐波の大気安定度依存性とスーパーローテーションに対する力学的効果
論文審査委員	主 査 高木 征弘 教授
	副 査 佐川 英夫 教授
	〃 高谷 康太郎 教授

論文内容の要旨

本申請論文の主要部分は、国際的な査読付き学術雑誌 “Journal of Geophysical Research: Planets” 127 巻に掲載された “A sensitivity study of the thermal tides in the Venusian atmosphere: Structures and dynamical effects on the superrotation” である。

金星大気中には、太陽光吸収による大気加熱で励起される、熱潮汐波と呼ばれる惑星規模波動が存在している。金星大気中の熱潮汐波は主に強制重力波によって構成され、その鉛直伝播に伴って角運動量が上下に輸送されるため、大気スーパーローテーションと呼ばれる全球的な高速東西流の生成・維持に重要な役割を果たしていると考えられてきた。近年では大気大循環モデル (Atmospheric General Circulation Model; GCM) を用いて熱潮汐波の空間構造を明らかにする研究が試みられている。しかしながら、GCM によって得られた熱潮汐波の空間構造には、金星探査機あかつきなどの観測結果と整合しないという問題が指摘されており、大気スーパーローテーションへの力学的な影響を解明する上で大きな問題になっていた。最近では、あかつきの紫外光観測で推定された雲頂高度での水平風分布から、熱潮汐波による赤道向き角運動量輸送が大気スーパーローテーションの維持に寄与している可能性が指摘され、熱潮汐波の正確な再現が重要な課題となっている。本論文において、学位申請者は従来の金星 GCM を改良することにより、観測結

果と整合的な熱潮汐波の空間構造を再現することに成功した。さらに、その結果を用いて熱潮汐波による角運動量輸送と熱輸送を評価することにより、角運動量の南北・鉛直方向の輸送と熱輸送の空間分布を解明し、それらが雲層高度の大気スーパーローテーションの維持に寄与する効果を定量的に明らかにした。

序論および第1章では、これまでの先行研究を概観し、本論文の主要な結果の概要が述べられている。

第2章では、数値モデル（金星 GCM）の概要とともに、モデルの改良点が説明されている。本研究で用いた金星 GCM では赤外線によるエネルギー輸送がニュートン冷却によって簡略化されているが、モデル中で再現される大気安定度の分布および温度場の緩和先として仮定される参照温度場が観測結果と整合的ではないことを指摘し、最新の観測結果（Tellmann et al., 2009; Ando et al., 2020）に基づく改良案を提示している。本論文では、観測結果をもとに仮定した大気安定度の3通りの鉛直プロファイルを用いて数値積分を実行し、得られる大気安定度分布と熱潮汐波の構造の違いを検討するという方針が採られている。

第3章では、数値モデルを長期間積分することによって得られた大気大循環（東西風、子午面循環、温度および大気安定度の緯度・高度分布）を詳しく検討し、結果の妥当性を吟味している。さらに、基本場中に再現された熱潮汐波の3次元構造を抽出し、あかつき観測などと詳細に比較している。その結果、本研究で改良された参照温度場を用いると、観測と整合的な大気安定度分布と熱潮汐波の構造が再現されることを示し、その要因として半日潮の鉛直構造の重要性を明らかにしている。さらに、熱潮汐波による角運動量輸送、熱輸送、Eliassen-Palm (EP) flux を評価することにより、あかつき観測によって雲頂高度で得られた赤道向き角運動量輸送が、数値モデルによって定量的にも正しく再現できることを示し、スーパーローテーションが低緯度域の広い高度範囲で効果的に加速されることを明らかにしている。同時に、熱潮汐波による南北角運動量輸送が緯度・高度に強く依存し、必ずしも赤道向きではないことや、まだ観測されていない鉛直角運動量輸送や熱輸送の効果も重要であることを明らかにしている。これらの結果は、雲層全域にわたる広い高度範囲の観測が必要であることを示している。

第4章では、第3章で得られた結果がさらに詳しく考察され、子午面循環や極域の上層大気で観測されている周極低温域（コールドカラー）に対する影響などが議論されている。

第5章は全体のまとめである。

本論文の付録は、金星山岳波（地形によって励起される定常重力波）の鉛直伝播とスーパーローテーションに対する力学的効果に関する研究である。最近、金星探査機 Venus Express やあかつきの観測によって金星大気中に大規模な山岳波が発見され、雲頂付近のスーパーローテーションを減速する可能性が指摘された。学位申請者は地球大気用の非静力学モデル CReSS を金星用に修正し、山岳波の数値シミュレーションを行った。その結果、金星山岳波の鉛直伝播に対する地面付近の東西風および大気安定度・惑星境界層の厚さに対する依存性を明らかにし、従来考えられていた雲頂付近のスーパーローテーションの減速効果がほとんど存在しないことや、山岳波の

東西波数分布の高度依存性を明らかにしている。この付録部分については、現在、国際的な査読付き学術雑誌 “Icarus” に “Influence of the horizontal wind and static stability near the surface on the topographic waves in the Venusian atmosphere” として投稿中である。

論文審査結果の要旨

本論文は、金星大気中の熱潮汐波の空間構造および大気大循環に対する力学的効果に関する研究である。熱潮汐波の空間構造に関しては多くの先行研究 (Pechmann and Ingersoll 1984; Takagi et al. 2018 など) があるが、金星探査機あかつきの観測結果との大幅な不整合が指摘されており (Kouyama et al. 2019)、熱潮汐波自体の理解だけでなく、それが大気大循環 (特に金星大気スーパーローテーション) に与える力学的効果を明らかにする上でも大きな問題になっていた。本論文では、従来の金星大気大循環モデル (GCM) を改良することにより、観測と整合的な熱潮汐波の空間構造の再現に成功し、熱潮汐波に対する大気安定度分布の重要性を明らかにしている。さらに、熱潮汐波に伴う角運動量輸送や熱輸送、および Eliassen-Palm (EP) flux を評価することにより、熱潮汐波がスーパーローテーションに与える影響を明らかにすると同時に、従来考慮されていなかった熱輸送の重要性を指摘している。これらの結果は今後の金星探査計画を考える上でも重要な結果である。

本論文は、金星大気中の熱潮汐波とその力学的効果に関する注目すべき独創的な結果であり、国際的に評価の高い専門雑誌に掲載されている。また、学位申請者は、本論文の結果について国内外の学会や研究集会で発表を行っている。学位申請者は、本論文の結果を発展させ、金星熱潮汐波と山岳波に関する研究を進めており、さらなる発展が期待される。

令和5年2月9日(木)に開催した博士学位論文公聴会および審査会において、学位申請者は、研究の背景、目的、および結果について詳しく解説し、審査委員の質問に対して的確に回答した。これらの結果から総合的に判断して、本調査委員会は、本論文が博士学位論文に値するものと判定する。