

# 論文の内容の要旨

論文題目 Studies of atmospheric waves on Venus using continuous cloud images

(連続雲画像解析による金星の大気波動の研究)

氏名 奈良 佑亮

金星は地球と似た大きさ、質量を持つ惑星だが大気環境は大きく異なっている。金星の高度 70 km 付近ではスーパーローテーションと呼ばれる最大で  $100 \text{ m s}^{-1}$  を超える西向きの風が常に全球的に吹いており、いまだその形成メカニズムは解明されていない。大気を持つ地球型惑星では金星のように自転に対して速い循環と地球のように遅い循環する大気に大別することができ、それぞれの大気の性質を明らかにし、惑星という枠組みの中における地球の位置づけを知ることで、地球の理解をさらに深めることができる。

大気中を伝播する波動は運動量輸送を伴い、大気の加速減速に寄与するため、スーパーローテーションの形成メカニズムの候補として挙げられており、大気波動の性質を明らかにすることは大気循環の理解につながる。本論文では金星における大気波動の役割を明らかにするため、大気波動と平均風による紫外画像における惑星規模模様の形成過程、大気波動による中層大気と上層大気の結合、新規雲追跡手法による惑星規模波動の全球的な運動量輸送に関する研究を行った。

金星は全球を厚さ 20 km 以上の雲に覆われており、太陽光の約 8 割がこの雲によって反射される。雲頂高度にあたる高度約 70 km で紫外から可視波長域にかけて広く強い吸収があり、金星の高度約 70km

における太陽散乱光を捉える紫外画像には空間的に不均一な吸収があることが知られていて、3割程度のコントラストがある。このため太陽光による大気加熱の分布に大きな影響を与えていると考えられる。

この紫外画像のコントラストには特徴的な空間構造があり、アルファベットの Y を横倒しにしたような惑星規模の模様が変動性を持って頻繁に現れることが知られているが、そういった雲の模様の形成過程は未解明である。第二章では欧州の金星探査機ヴィーナズエクスプレスに搭載されていた撮像装置 VMC の紫外画像を用いて、金星の紫外画像で観察される惑星規模の模様とその高度における風速場を比較し、模様の形成メカニズムを考察した。2007年7月から8月の惑星規模の模様が顕著に観察される時期に紫外画像の輝度変化と風速変動を周期解析することで、赤道域に約4日、中緯度に約5日の周期性が検出され、それぞれケルビン波、ロスビー波と呼ばれる惑星規模の大気波動に起因することが分かった。解析結果から以下のような、惑星規模波動による惑星規模の模様の形成過程に関する仮説を立てた。紫外線を吸収する物質は雲頂より下層に多く存在すると考えられており、赤道域で上方への物質輸送を担うケルビン波によって雲頂付近へ輸送される。そして、極向きの平均風と水平面内を振動するロスビー波の極向きの流れによって暗い物質が極向きに輸送され、高緯度において、高緯度ほど角速度の大きくなる西向きの風により暗い物質が東西に引き延ばされ、筋模様を形成するというものである。数値計算により、現実的な平均風と大気波動が存在する状況で吸収物質を模擬した受動的な物体を移流させることで、模様の形成仮説の検証を行ったところ、形成された模様とその時間発展が観測される模様に類似することが確かめられた。

第三章では、大気波動による雲層高度と上層大気の結合に関する研究を2017年6月に金星探査機あかつきと宇宙望遠鏡ひさきが同時に金星の朝側を観測した時のデータセットを用いて行った。用いたデー

夕はあかつきに搭載されている撮像装置 UVI の紫外画像と、ひさきに搭載されている極端紫外線分光撮像装置 EXCEED の分光データで、あかつきの紫外画像から推定した高度約 70 km の風速場とひさきが捉えた高度約 130 km 以上の酸素原子のコラム密度を反映する酸素原子の発光強度の比較をした。その結果、両者に共通する 3.6 日周期の変動が検出され、高度 70 km の変動は惑星規模の大気波動のケルビン波であることが変動の空間構造や平均風との比較で示唆された。大気波動と熱圏の変動の関連を調べるため、1 次元の線形波動の鉛直伝播を数値計算によって解いたところ、ケルビン波は放射減衰により熱圏まで鉛直伝播できないことが示された。また、このモデルにより、水平波長が 1000 km 程度の小さいスケールの重力波は朝側で熱圏まで伝播でき、夕側では熱圏まで伝播するまでに減衰してしまうことが分かった。朝夕の非対称性は熱圏における背景風速が朝側と夕側で異なっていることに起因する。高度 70 km のケルビン波による風速や温度場の振動が小さいスケールの重力波の伝搬性を変調させることにより、熱圏への伝播が周期的に起こり発光強度の変動を引き起こしていると考えられる。次に、熱圏の大気波動によって引き起こされる乱流や大規模な循環に対する大気発光強度の応答を調べ、以上の仮説を検証するため 1 次元の光化学モデルを構築した。酸素原子の主要な生成消滅過程である二酸化炭素の光解離による生成、酸素原子の再結合による消滅を考慮し、酸素原子密度の時間発展を解いた。その結果、大気波動の碎波により周期的に変動する拡散係数の振幅が約  $300 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  の時、観測された熱圏の発光強度の変動を説明できることが示された。

第四章では、金星の紫外画像の高緯度に頻繁に観察されるような筋模様が卓越する領域において信頼性のある雲追跡手法を開発した。画像内に筋模様が存在すると、筋模様の向きに沿った変位がわからないため、従来は雲追跡が困難であった。画像内の筋模様は筋に沿った明るさの変化が小さいため、筋模様

に沿った向きに画像を微分することで明るさの変化の小さい筋模様を低減させることでこの問題を解決した。この手法をあかつきの紫外画像に適用し風速場の推定を行い、得られた風速場の時系列データに周期解析を適用することで、2017年7月に赤道域の東西風、中緯度の南北風に4.9日の周期性が検出された。検出された4.9日周期の変動の空間構造を再現したところ、金星に存在すると考えられている惑星規模波動であるロスビー波と整合し、赤道向きにスーパーローテーションを加速させる向きの運動量輸送を伴うことが分かった。提案手法により初めて金星におけるロスビー波の全体像が捉えられ、スーパーローテーションの加速に寄与していることが分かった。