

論文内容の要旨

論文題目 Development of Radiative Transfer Model for Venus Atmosphere and Simulation of Superrotation Using a General Circulation Model

(金星大気放射伝達モデルの開発と
大循環モデルを用いたスーパーローテーションの数値実験)

池田 恒平

金星大気のスーパーローテーションは、地表面付近から中層大気までの領域で大気全体が自転速度を超える速さで回転する高速の東西循環である。探査機の観測によると、東西風速は地表面付近から単調に増加して雲頂高度（高度 70 km 付近）で 100 m/s に達し、これは赤道での自転速度の約 60 倍にも相当する。スーパーローテーションの維持機構はまだ未解明であるが、これまでの研究から重要であると考えられる力学過程がいくつか提案されている。「平均子午面循環と波による南北運動量輸送（Gierasch 機構）」や、「雲層で励起される熱潮汐波」、「下層から伝播する波動（重力波や赤道ケルビン波）」に着目する説があるが、観測データは限られており、こうした力学過程については、ほとんどわかっていない。一方で、大気大循環モデル(AGCM)は、スーパーローテーションの維持機構を理解するのに有効な研究手法と考えられる。しかし、これまでの物理過程を簡略化した金星 AGCM による研究によると、現実的な条件下ではスーパーローテーションの再現は困難であることが指摘されている。スーパーローテーションの成因として、Gierasch 機構を挙げる研究もあるが、これらの金星 AGCM では放射伝達過程がニュートン冷却近似で簡略化されており、現実の金星大気において妥当かは不明である。そのような現状のため近年では、金星 AGCM を用いてスーパーローテーションに重要な力学過程を理解するためには、適切な放射伝達モデルを導入することが必要であると考えられるようになってきている。そこで本研究では、まず新しく独自に、赤外から紫外域まで全ての波長を取り扱える金星大気力学モデル用の放射伝達モデルの開発を行った。そして、それを金星 AGCM に導入して、スーパーローテーショ

ンの数値実験を行った。

高温高圧の CO₂ 大気に対応するために、金星大気放射伝達モデルの気体吸収過程では、吸収線データと吸収線形の取り扱いについて留意する必要がある。本研究では CO₂ の吸収線データには、高温下(1000 K)でのデータベースである CDSD-1000 を用いた。その他の気体(H₂O, SO₂, OCS, CO)については、HITRAN2004 の吸収線データを使用した。CO₂ の吸収線形の性質については、これまでの金星大気の放射伝達計算では十分に考慮されてこず、Voigt 線形で 25 cm⁻¹ でカットオフする方法が用いられてきた。しかし、この方法では CO₂ による吸収を過小評価してしまうことが指摘されている。高温高圧の金星下層大気における CO₂ の吸収特性は現在のところ十分わかっていないが、放射対流平衡実験から吸収線形による温度構造への影響を調べるという研究が行われている (Takagi et al., 2010)。本研究では、Fukabori et al. (1986) の sub-Lorentz 線形を使用した。その他の微量気体については、Voigt 線形を用いた。また全ての気体について、far wing でのカットオフは行わずに吸収係数を評価した。CO₂ の連続吸収として、分子同士の衝突に伴う圧力励起帯 (Pressure-Induced Absorption) による吸収を導入している。この吸収は吸収係数が圧力の 2 乗に比例するため、高圧の下層大気において重要となる。

金星は濃硫酸液滴を主成分とする厚い雲によって全球を覆われている。このエアロゾル粒子の粒径分布は、3 モードの対数正規分布であることが知られている。各モードの光学特性は、75 % H₂SO₄ の複素屈折率を使用して、Mie 散乱理論に基づき求めた。プローブによる太陽光フラックスの観測によると、雲層の中で太陽光の吸収が主に生じているのは上層雲、すなわち高度 57 km 以上においてである。しかし、硫酸エアロゾル及び気体ではこの吸収は説明がつかず、Unknown UV absorber と呼ばれる、なんらかの吸収物質の存在が指摘されている。本研究では先行研究と同様に、波長 0.32–0.78 μm において、モード 1 による吸収を仮定して、その吸収の強さ(吸収効率因子の値)は、観測による反射率のスペクトルに合うように決定した。気体及び大気微粒子による吸収・散乱過程を取り扱う放射伝達計算の基礎方程式は、Nakajima et al. (2000) に従う。気体吸収については相関 k-分布法を使用し、全波長を 28 バンドに分けている。

まず、新しく開発した金星大気放射伝達モデルを用いて、1次元放射対流平衡実験により、全球平均的な温度の鉛直構造を調べた。全ての微量気体成分と雲を含めた標準実験と、微量気体の影響を調べるために、それぞれを除いた場合について計算を行った。微量気体の中では、まず H₂O の寄与は大きく、ついで SO₂ の影響も特に下層大気において大きかった。H₂O と SO₂ をそれぞれ取り除いた場合の地表面温度の変化は、116 K 及び 36 K であった。SO₂ の温室効果は数 K 程度と見積もった先行研究も存在するが、CO₂ の吸収線形として sub-Lorentz 線形を使用した場合には、金星大気温度構造の維持に SO₂ も不可欠であることが示唆された。OCS と CO の影響は 1 K 以下と小さかった。標準実験における成層度は、地表面付近から高度約 40 km において対流が生じ、中立成層となっていた。また、雲層内の高度 50 km 付近も中立になっており、これは高温な下層大気からの熱放射を下層雲が吸

収するために生じていると考えられる。

本研究で使用する大気大循環モデルは、CCSR/NIES/FRGCM AGCM 5.7b である。水平分解能は T21、鉛直方向には、高度 95 km までを 52 層に分けた。放射伝達過程として、新しく構築した金星大気放射伝達モデルを組み込んだ。雲層における太陽光加熱率の鉛直分布は、特に熱潮汐波に対して大きな影響を与えると予想されるが、高度 64 km 以上では観測がなされていないため、この領域においては放射モデルによる推測が行われてきた。上層雲中の Unknown UV absorber の分布の違いにより、太陽光加熱率は大きく異なった分布になることが指摘されている(Crisp, 1986)。しかし、これまでの力学モデルでは、この点について言及されたことが無く、太陽光加熱率の鉛直分布の違いが力学に及ぼす影響はわかっていない。そこで本研究では、太陽光加熱率の違いによる影響を調べるため、2つのケースに実験を行った。すなわち、吸収物質が高度 57 – 65 km までに存在するとした場合(Low UV) と高度 57 – 70 km に存在するとした場合(High UV)である。

Low UV の場合は、帯状平均した東西風速は高度 67 km で最大となり、赤道上で、約 50 m/s に達するスーパーローテーションが生じる。また、中緯度には 50 m/s を超えるジェットが存在する。赤道から 30° での運動量のバランスを見積もって調べたところ、太陽光の吸収が大きくなる場所で熱潮汐波による加速が効いていることがわかった。熱潮汐波が加速している高度は、高度 60 – 70 km と高度 50 – 54 km の2つ分かれていた。上層雲と中層雲の境目(高度 57 km)では、減速となっており、これは雲が薄くなっている高度と対応していた。High UV の場合は、上層雲での熱潮汐波の加速の強さは約 30 %弱くなっていた。それと対応して、赤道での最大風速は、約 30m/s で Low UV と比べて、20 m/s 程度遅かった。このように、吸収物質の異なる分布に伴う太陽光加熱率の違いから、熱潮汐波による加速の違いが生まれ、スーパーローテーションに影響することがわかった。

高度 45 km 以下での平均東西風は、観測と比べて非常に弱いままである。雲層のより下の高度では、平均子午面循環の強度は弱く、角運動量の上方輸送が効率よく行われていないものと考えられる。下層大気での平均子午面循環の時間スケールは、約 60 地球年で Gierasch 機構に必要な条件を満たしていなかった。そこで本研究では、下層大気のスーパーローテーションを維持するためには、重力波による運動量輸送が必要であると仮定して、その影響を調べる数値実験を行った。複数の位相速度をもった重力波の運動量を下端から強制し、鉛直拡散と放射による減衰をパラメタリゼーションとして評価した。その結果、正の位相速度を持った重力波が臨界高度で吸収され、平均東西風を加速することにより、下層のスーパーローテーションが維持できることが示された。また、負の位相速度の重力波は雲層よりも上層まで伝播し、上層での減速に重要な役割を持つことが示唆された。

本研究ではまず、金星大気大循環の理解に重要な課題と考えられてきた金星大気力学モデル用の放射伝達モデルの開発を行った。この放射モデルを使用した 1 次元放射対流平衡実験により、各微量気体成分の影響について調べた。先行研究と異なる吸収線形(Fukabori et al., 1986) を使用した本研究の放射モデルでは、SO₂ は金星大気の温度構造の維持に重要な効

果を持つことが示唆された。また、この放射モデルを金星大気大循環モデルに導入し、スーパーローテーションの数値実験を行った。雲層上端付近では、熱潮汐波に伴う加速により数十メートルの平均東西風が維持されることが示された。また、熱潮汐波による加速の強さは未知の紫外域吸収物質の分布の違いによって影響を受けることが示唆された。下層大気での平均子午面循環の時間スケールから Gierasch 機構によるスーパーローテーションの維持は困難であることが示唆された。Gierasch 機構とは別のメカニズムとして、重力波による運動量輸送が重要であると仮定し、その効果を調べるための数値実験を行った。重力波による運動量輸送はパラメタリゼーションとして導入して、それぞれの位相速度の重力波がもつ影響を評価し、下層大気においては観測に近い平均東西風が再現された。