

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年5月25日現在

機関番号：12604

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2008～2011

課題番号：20340126

研究課題名（和文）金星大気モデリングによるスーパーローテーションの解明

研究課題名（英文）Modeling study for the Venus atmospheric superrotation

研究代表者

松田 佳久（MATSUDA YOSHIHISA）

東京学芸大学・教育学部・教授

研究者番号：60134772

研究成果の概要（和文）：この科研費（基盤研究（B））による研究は、金星大気モデリングによるスーパーローテーションの解明を目指したものである。そのために、金星大気において赤外の放射過程を正確に表現する放射モデルの開発を試み、それに成功した。この放射モデルにより、現在の金星の鉛直温度分布を再現することができた。この放射モデル組み込んだ大気大循環モデルを時間積分することにより、スーパーローテーション生成の条件の解明を試みた。また、簡略な放射モデルでのスーパーローテーション再現実験も行い、興味深い生成の条件を明らかにした。

研究成果の概要（英文）：The aim of this study supported by Grant-in-Aids for Scientific Research(B) is to elucidate the superrotation of Venus by modelling processes of Venus atmosphere. For this purpose, we have successfully developed a radiation model which can correctly represent radiative transfer in the infrared region of Venus atmosphere. The vertical temperature distribution of Venus present atmosphere can be reproduced by this radiation model. By integrating atmospheric general circulation model with this radiation model, the condition of generation of the superrotation is examined. Further, the reproduction experiment of the superrotation is also made by the model with a simplified radiation model; an critical condition of the generation of the superrotation is elucidated.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	5,500,000	1,650,000	7,150,000
2009年度	3,300,000	990,000	4,290,000
2010年度	2,500,000	750,000	3,250,000
2011年度	2,300,000	690,000	2,990,000
年度			
総計	13,600,000	4,080,000	17,680,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学、気象・海洋物理・陸水学

キーワード：惑星大気

1. 研究開始当初の背景

(1) 日本の金星探査機が2010年に打ち上げられ、金星において気象衛星が実現され、大気循環について貴重なデータがもたらされることが期待されている。本研究はそれと同

期している。観測データと比較し得る信頼できるシミュレーション結果を生成することを目的とする。両者を組み合わせることにより、観測データのみでは得られない知見を引き出すことが期待される。

(2) 国の内外において、GCM による金星の大気大循環の研究が意欲的に試みられている。特に、本研究の代表者（松田）と分担者（高木）によりスーパー・ローテーションの原因は熱潮汐波によるという有力な仮説が提案されている（Takagi and Matsuda, 2006a, b, 2007）。しかし、子午面循環の作用によるという GCM の結果もあり（山本ら）、決着がつかず、議論は白熱化している。従って、我々の仮説の検証、即ち、複数の仮説のうちどれが正しいのかの決着が必要である、と考えるに至った。そのためには、信頼できる GCM による理論の検証が有効であるが、従来の金星 GCM は特に放射過程が極めて不正確であり、正確な放射過程に基づく GCM の構築の必要性を痛感した。

2. 研究の目的

金星は自転が非常に遅い（自転周期 243 日）のに対して、大気は雲層（45-70km）上部で、その自転速度の 60 倍で回転している。これがスーパー・ローテーションであるが、この原因が未だに解明されていない。本研究では複数の専門を異にする研究者の協力により大気大循環を中心とする金星大気の高精度な大循環モデル（GCM）を構築し、それを使った数値シミュレーションにより、数十年にわたり謎であったスーパー・ローテーションの原因の解明を行う。

3. 研究の方法

(1) 簡略な放射モデルを採用した力学モデルによるシミュレーションを行い、熱潮汐波メカニズムの検証を行う。

(2) 最新の分子分光データを用いて金星大気に適用可能な精密な放射伝達モデルを構築する。

(3) 金星雲層の雲物理過程を精密に表現するモデルを構築する。

(4) 惑星大気に適用可能なサブグリッドスケールの乱流のグリッドスケールへの影響をパラメタライズするための研究を行う。

(5) (1)-(4)を統合することにより、金星大気スーパーローテーションの成因を解明する。下層大気の大循環や、鉛直対流の有無、金星下層大気の高精度な形成機構などについて解明を目指す。

4. 研究成果

(1) 放射過程の精密化を図るため、最新の分光データに基づく新しい赤外放射輸送モデルを開発した。これまでの金星大気用の放射モデルには、金星下層大気のような高温高圧

下における吸収線型の仮定に問題があり、結果として得られる放射（平衡）温度分布の信頼性が低かった。新たに開発した放射モデルでは、吸収線型の決定からアドホックな仮定を排除し、吸収係数の評価をラインバイライン法を用いて正確に行うことによって、金星下層大気の大気温度分布に関して信頼性の高い結果を得ることができるようになった。

(2) 作成した金星大気に適用可能な新しい放射モデルを用いて、金星の温室効果を定量的に検討し、放射平衡温度分布、鉛直対流の有無や分布・強度、雲層の温室効果に与える影響などを詳しく調べた。その結果、二酸化炭素の吸収線形が温室効果に与える影響をはじめ定量的に示すことに成功し、吸収線形としては Fukabori et al. (1986) または Meadows and Crisp (1996) によって提案されたものが適当であることを示した。

(3) 平均子午面循環モデルと灰色大気近似を用いた放射モデルを結合し、2次元の大気循環の数値実験を行った。その結果、吸収係数の大きさが圧力に依存しない場合は浅い子午面循環、圧力の1次に比例する場合は深い子午面循環が得られた。前者は安定成層流体中の水平対流の理論（Kimura, 1975）によって子午面循環の深さがうまく説明できることがわかった。後者ではほぼ全層で鉛直対流が生じた。これは、吸収係数が下層ほど大きくなるので、放射平衡が断熱勾配を超えやすいためと考えられる。得られた南北温度差、流速の大きさはゴリツインの次元則に基づく松田（2005）の見積もりとほぼ整合的であるが、従来のニュートン冷却を用いた GCM の結果（例えば Yamamoto and Takahashi, 2004）ではこれらの値よりもかなり大きくなっている。現実の金星下層大気では、南北温度差が温度風バランスによって支えられている可能性があり、その場合は今回の結果よりも南北温度差は大きく、子午面循環の流速は小さくなると考えられる。この結果は、現実の金星大気の子午面循環が従来の数値実験による推定よりかなり小さいこと、熱潮汐波メカニズムが子午面循環によって妨げられず、現実の金星大気中でうまく作動する可能性があることを示している。

(4) 金星大気用に開発した精密な放射輸送モデルを Takagi and Matsuda (2007) の大気大循環モデルに組み込み、金星大気大循環の数値実験を行った。その結果、太陽加熱の日変化を無視した場合、太陽加熱によって励起される平均子午面循環は 0-15 km 付近の高度と雲層付近の高度の鉛直方向に 2 セルの構造を取ることが示された。Gierasch メカニズムに着目したこれまでの研究（Yamamoto

and Takahashi 2003 など) では、地面から雲層上端付近まで達する巨大な平均子午面循環が大気スーパーローテーション生成の鍵になっていたが、精密な放射輸送モデルを用いた本研究の結果は、そのような巨大な子午面循環が金星大気中には実在しないことを示唆している。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 13 件)

- ① Matsui et al., Latitudinal distribution of HDO abundance above Venus' clouds by ground-based 2.3 um spectroscopy, *Icarus*, 査読有, 217, 2012, 610-614
- ② Ogohara et al., A newly developed cloud tracking system for the Venus Climate Orbiter Akatsuki and preliminary results using Venus Express data, *Theoretical and Applied Mechanics Japan*, 査読有, 60, 2012, 195-204
- ③ Ogohara et al., Automated cloud tracking system for the Akatsuki Venus Climate Orbiter data, *Icarus*, 査読有, 217, 2012, 2661-2668
- ④ Hoshino et al., Characteristics of planetary-scale waves simulated by a new Venusian mesosphere and thermosphere general circulation model, *Icarus*, 査読有, 217, 2012, 818-830
- ⑤ Fukuhara et al., LIR: Longwave Infrared Camera onboard the Venus orbiter Akatsuki, *Earth Planets Space*, 査読有, 63, 2011, 1009-1018
- ⑥ Iwagami et al., Science requirements and description of the 1 um camera onboard the Akatsuki Venus Orbiter, *Earth Planets Space*, 査読有, 63, 2011, 487-492
- ⑦ Nakamura et al., Overview of Venus orbiter, Akatsuki, *Earth Planets Space*, 査読有, 63, 2011, 443-457
- ⑧ Imamura et al., RS: Radio Science investigation of the Venus atmosphere and ionosphere with Venus orbiter, Akatsuki, *Earth Planets Space*, 査読有, 63, 2011, 493-501
- ⑨ Takagi et al., Influence of CO2 line

profiles on radiative and radiative-convective equilibrium states of the Venus atmosphere, *J. of Geophys. Res.*, 査読有, 115, 2010, E06014

⑩ Imamura, T., and Y. Ito, Quasi-periodic dust events in the summertime south polar region of Mars, *Icarus*, 査読有, 211, 2010, 498-503

⑪ Iwagami et al., Hemispherical distribution of CO above the Venus' clouds by ground-based 2.3 um spectroscopy, *Icarus*, 査読有, 207, 2010, 558-563

⑫ Satoh et al., Cloud structure in Venus middle-to-lower atmosphere as inferred from VEX/VIRTIS 1.74 um data, *J. Geophys. Res.*, 査読有, 114, 2009, E00B37

⑬ 松田佳久、高木征弘、金星大気の温室効果の特徴 - 地球の温室効果と比較して、日本気象学会機関誌「天気」、査読有、55 巻、2008、887-899

[学会発表] (計 8 件)

- ① Imamura, T., Stationary equatorial modes in Venus's lower atmosphere, EPSC-DPS Joint Meeting 2011, 6 October 2011, Nantes, France
- ② Sugimoto et al., Atmospheric general circulation on Venus simulated by AFES (Atmospheric GCM For the Earth Simulator), EPSC-DPS Joint Meeting 2011, 6 October, Nantes, France
- ③ Takagi and Matsuda, Mean meridional circulation in the Venus atmosphere, EPSC-DPS Joint Meeting 2011, 6 October, Nantes, France
- ④ Ogohara et al., Development of a Cloud Tracking System for Akatsuki, and it's Application to Venus Express VMC Data, The 28th International Symposium on Space Technology and Science, 5 June 2011, Okinawa, Japan
- ⑤ Hosouchi et al., Venus' atmospheric waves observed by ground-based dayside infrared spectroscopy, EGU 2011, 3 April 2011, Vienna, Austria
- ⑥ M. Takagi and Y. Matsuda, Mean meridional circulation in the Venus lower atmosphere simulated by a GCM with a

radiative transfer model, International Venus Conference, 20 June 2010, Aussois, France

⑦ Takagi et al., Development of a radiative transfer model for the Venus atmosphere, AOGS 2009, 11 August 2009, Singapore

⑧ M. Takagi and Y. Matsuda, Dynamics of the Venus atmospheric superrotation, 37th COSPAR, 13 July 2008, Montreal, Canada

6. 研究組織

(1) 研究代表者

松田 佳久 (MATSUDA YOSHIHISA)
東京学芸大学・教育学部・教授
研究者番号：60134772

(2) 研究分担者

高木 征弘 (TAKAGI MASAHIRO)
東京大学・大学院理学系研究科・助教
研究者番号：00323494

今村 剛 (IMAMURA TSUYOSHI)
独立行政法人宇宙航空研究開発機構・宇宙
科学研究本部・准教授
研究者番号：40311170

橋本 成司 (HASHIMOTO GEORGE)
岡山大学・自然科学研究科・准教授
研究者番号：10372658

(3) 連携研究者

(無し)