

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 11 日現在

機関番号：34304

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25400470

研究課題名(和文)熱潮汐波と子午面循環に着目した金星大気スーパーローテーションの成因解明

研究課題名(英文)Study on the Venus atmospheric superrotation with a focus on the thermal tide and mean meridional circulation mechanisms

研究代表者

高木 征弘 (TAKAGI, Masahiro)

京都産業大学・理学部・准教授

研究者番号：00323494

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：金星大気スーパーローテーションの熱潮汐波メカニズムと子午面循環メカニズムの両方に着目した研究を行った結果、雲層高度のスーパーローテーションには両者がともに作動していることを明らかにした。また、これによる金星上層大気の現実的な大気構造の再現に成功し、雲層中で活発な傾圧不安定波が励起されていること、従来「ロスビー波」と呼ばれてきた波はこの傾圧不安定波で説明できること、極域のコールドカラーの成因には熱潮汐波の誘導する子午面循環が重要であることなどの結果を得た。

研究成果の概要(英文)：We conducted a study on the Venus atmospheric superrotation with a focus on the thermal tide and mean meridional circulation (Gierasch) mechanisms. The results show that both these two mechanisms are essential to the atmospheric superrotation at the cloud levels. We have also succeeded in reproducing the realistic atmospheric structures in the Venus upper atmosphere. It has been found that (1) the active baroclinic instability waves are excited at the lower cloud levels with lower static stability, and the so-called Rossby waves are explained by the baroclinic instability waves; (2) the cold collar, which is a cold latitudinal band surrounding the warm polar vortex at the cloud top levels, are successfully reproduced in the GCM results, and the mean meridional circulation induced by the thermal tide is quite important for the generation of the cold collar.

研究分野：惑星気象学

キーワード：金星大気スーパーローテーション 熱潮汐波 子午面循環 惑星大気

1. 研究開始当初の背景

金星大気スーパーローテーションの成因として、子午面循環に基づく Gierasch メカニズム (Gierasch, 1975; Matsuda, 1980) と、熱潮汐波に基づく熱潮汐波メカニズム (Fels and Lindzen, 1974; Plumb, 1975) が有力であったが、両者のどちらが正しいか決着がついていなかった。簡略化した GCM を用いた研究結果によれば、現実的な分布と強度をもった加熱強制では Gierasch メカニズムが作動しないらしい (Yamamoto et al., 2003, 2004; Lee et al., 2005, 2007; Hollingsworth et al., 2007; Parish et al., 2011)。一方、熱潮汐波メカニズムでは現実的な加熱によってスーパーローテーションが生成される可能性が示されたが、平均子午面循環の効果が考慮されていなかった (Takagi and Matsuda, 2007)。

2. 研究の目的

対立的に考えられてきた子午面循環と熱潮汐波によるメカニズムは、ある程度共存可能であり、ともにスーパーローテーションの形成に寄与する可能性がある。したがって、子午面循環を正確に再現し、熱潮汐波と子午面循環・平均東西流の相互作用を明らかにすることが必要である。熱潮汐波と子午面循環 (Gierasch メカニズム) の両方を含む数値シミュレーションによってスーパーローテーションを再現し、そのメカニズムを解明するが本研究の主要な目的である。

3. 研究の方法

これまで開発してきた GCM を改良し、大気スーパーローテーションの二大仮説である熱潮汐波メカニズムと Gierasch メカニズム (子午面循環) の効果と、平均東西流・熱潮汐波・子午面循環の相互作用を詳細に検討する。具体的には、(1) 熱潮汐波メカニズムの再検証、(2) 熱潮汐波メカニズムと子午面循環の相互作用の検討、(3) 精密な放射輸送モデルの導入によるスーパーローテーションの再現・金星下層大気の大循環の解明という研究内容を、数値モデルを用いて実施する。

4. 研究成果

熱潮汐波メカニズムの再検証を行った結果、従来の熱潮汐波メカニズムで作られる大気スーパーローテーションは顕著な赤道ジェットを伴い、観測される東西風の南北構造を説明できないことを明らかにした。また、太陽加熱強度に対する熱潮汐波メカニズムの依存性を調べたところ、標準的な太陽加熱の 2-3 倍の強度では熱潮汐波メカニズムが非常によく作動し、シャープな赤道ジェットを伴う大気スーパーローテーションが維持された。一方、太陽加熱を弱くすると熱潮汐波メカニズムは維持されなかった。

熱潮汐波メカニズムと子午面循環メカニズムを両方考慮した数値実験を行うことにより、

観測される東西風分布とよく一致する大気スーパーローテーションの再現に成功した。最近の観測 (Machado et al., 2012, 2014; Kouyama et al., 2014) によると、雲層上端高度での東西風は低緯度でほぼ一定の風速をもつ。このような風速分布が維持されるには、熱潮汐波メカニズムと子午面循環メカニズムが (少なくとも雲層高度で) ともに作動している必要があることを明らかにした。

また、金星中緯度の雲層中に活発な傾圧不安定波が発生している可能性を明らかにした。金星の下部雲層には大気安定度の低い領域があり、この領域を中心に傾圧不安定が発生する。傾圧不安定波の卓越東西波数は 1 で、上方には雲層上端高度まで広がっている。波の水平構造や位相速度を検討した結果、従来「中緯度ロスビー波」と呼ばれていた波は、実は傾圧不安定波である可能性が高いことを示した。

金星上層には暖かい極渦の周囲を取り巻く低温領域が存在していることが古くから知られており (Taylor et al., 1980), コールドカラー (周極低温域) と呼ばれていた。熱潮汐波メカニズムと子午面循環メカニズムを考慮した数値実験では、高緯度の大气構造も現実と非常によく一致しており、このコールドカラーも再現することができた。初期解析の結果、コールドカラーには熱潮汐波が誘導する上層の平均子午面循環が重要であることが示唆された。また、極渦中にはポーラーダイポールと呼ばれる擾乱も再現されており、その時空間構造は観測とよく一致していた。この擾乱は極域の傾圧不安定によって励起される中立ロスビーモードであることが示された。

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 4 件)

1. H. Ando, N. Sugimoto, M. Takagi, H. Kashimura, T. Imamura, Y. Matsuda (2016), The puzzling Venusian polar atmospheric structure reproduced by a general circulation model, *Nat. Commun.*, 7:10398, doi:10.1038/ncomms10398. (査読有)
2. Sugimoto, N., M. Takagi, and Y. Matsuda (2014), Waves in a Venus general circulation model, *Geophys. Res. Lett.*, 41, 7461-7467, doi:10.1002/2014GL061807. (査読有)
3. Sugimoto, N., M. Takagi, and Y. Matsuda (2014), Baroclinic instability in the Venus atmosphere simulated by GCM, *J. Geophys. Res. Planets*, 119, 1950-1968, doi:10.1002/2014JE004624. (査読有)
4. Imamura, T., T. Higuchi, Y. Maejima, M. Takagi, N. Sugimoto, K. Ikeda, and

H. Ando (2014), Inverse insolation dependence of Venus' cloud-level convection, *Icarus*, 228, 181-188, doi:10.1016/j.icarus.2013.10.012. (査読有)

[学会発表] (計 27 件)

1. Sugimoto, N., H. Kashimura, M. Takagi, AFES project team, High-resolution numerical simulation of Venus atmosphere by AFES (Atmospheric general circulation model For the Earth Simulator), DPS 48/EPSC 11, Pasadena, CA, USA, 16-21 October 2016
2. Ando, H., N. Sugimoto, M. Takagi, Venusian Polar Vortex reproduced by a general circulation model, DPS 48/EPSC 11, Pasadena, CA, USA, 16-21 October 2016
3. Takagi, M., N. Sugimoto, H. Ando, Y. Matsuda, Structure and dynamical effects of the thermal tide in the Venus atmosphere, DPS 48/EPSC 11, Pasadena, CA, USA, 16-21 October 2016
4. Ando, H., N. Sugimoto, M. Takagi, H. Kashimura, Y. Matsuda, S. Tellmann, M. Pätzold, and B. Häusler, On the Venusian Polar Vortex: Numerical Experiments and Radio Occultation Measurements, AOGS 13th Annual Meeting, Beijing, China, 31 July-5 August 2016 (Invited)
5. 高木征弘・杉本憲彦・安藤紘基・松田佳久, 金星大気の熱潮汐波, 日本気象学会 2016 年度春季大会, 東京都渋谷区国立オリンピック記念青少年総合センター, 2016 年 5 月 18-21 日
6. H. Ando, N. Sugimoto, M. Takagi, T. Imamura, H. Kashimura, Y. Matsuda, S. Tellmann, M. Pätzold, B. Häusler, On Venusian polar vortex: numerical experiments and radio occultation measurements, International Venus Conference 2016, Oxford, UK, 4-8 April 2016
7. M. Takagi, N. Sugimoto, H. Ando, Y. Matsuda, Thermal tide in the Venus atmosphere, International Venus Conference 2016, Oxford, UK, 4-8 April 2016
8. 高木征弘・杉本憲彦・安藤紘基・松田佳久, 金星大気の熱潮汐波, 第 29 回大気圏シンポジウム, 神奈川県相模原市 (JAXA 宇宙研究所), 2016 年 3 月 7-8 日
9. 高木征弘・杉本憲彦・安藤紘基・松田佳久, 金星大気の熱潮汐波と大循環, 地球流体力学研究集会「地球流体における波動と対流現象の力学」, 九州大学応用力学研究所, 福岡県春日市, 2016 年 3 月 1-2 日
10. 安藤紘基・杉本憲彦・高木征弘・櫻村博基・今村剛・松田佳久, 金星極域の大気構造に関する研究, 惑星大気研究連絡会, 京都府京都市 (京都産業大学むすびわざ館), 2015 年 10 月 31 日
11. 杉本憲彦・櫻村博基・高木征弘・松田佳久・安藤紘基・今村剛・志水達也・大淵濟・榎本剛・高橋芳幸・林祥介, 金星上層大気中の波, 惑星大気研究連絡会, 京都府京都市 (京都産業大学むすびわざ館), 2015 年 10 月 31 日
12. 高木征弘・杉本憲彦・安藤紘基・松田佳久, Thermal tide and other kind of waves as observed in AFES for Venus, 惑星大気研究連絡会, 京都府京都市 (京都産業大学むすびわざ館), 2015 年 10 月 31 日
13. 杉本憲彦・高木征弘・松田佳久, 金星上層大気中の波, 日本気象学会 2015 年度秋季大会, 京都府京都市 (京都テルサ), 2015 年 10 月 29-30 日
14. 高木征弘・志水達也・杉本憲彦・松田佳久, 金星大気スーパーローテーションのメカニズム, 日本気象学会 2015 年度秋季大会, 京都府京都市 (京都テルサ), 2015 年 10 月 29-30 日
15. H. Ando, N. Sugimoto, M. Takagi, H. Kashimura, T. Imamura, Y. Matsuda, Atmospheric structure in the Venusian polar region: first report on reproduction by General Circulation Model, EPSC 2015, Nantes, France, 27 September - 2 October 2015
16. N. Sugimoto, H. Kashimura, M. Takagi, Y. Matsuda, H. Ando, T. Imamura, W. Ohfuchi, T. Enomoto, Y.O. Takahashi, and Y.-Y. Hayashi, Simulation of Venusian atmosphere by AFES (Atmospheric general circulation model For the Earth Simulator), EPSC 2015, Nantes, France, 27 September - 2 October 2015
17. 志水達也・杉本憲彦・高木征弘, 金星上層大気に見られる不安定波の特徴, 日本気象学会 2015 年度春季大会, 茨城県つくば市 (つくば国際会議場), 2015 年 5 月 21-24 日
18. M. Takagi, N. Sugimoto, Y. Matsuda, Wave activities in the Venus atmospheres simulated in a GCM 二国間交流事業共同セミナー「日仏連携による惑星大気モデル研究」, 兵庫県神戸市 (神戸大学), 2015 年 5 月 11-15 日
19. H. Ando, N. Sugimoto, M. Takagi, H. Kashimura, T. Imamura, Y. Matsuda, Atmospheric structure of Venusian upper polar region reproduced by a general circulation model, 二国間交流

- 事業共同セミナー「日仏連携による惑星
大気モデル研究」, 兵庫県神戸市 (神戸
大学), 2015年5月11-15日
20. 高木征弘・杉本憲彦・松田佳久, 金星大
気スーパーローテーションの構造と維持
メカニズム, 日本気象学会 2014年度秋
季大会, 福岡県福岡市 (福岡国際会議
場), 2014年10月21-23日
 21. N. Sugimoto, M. Takagi, Y. Matsuda,
Baroclinic instability in the Venus
atmosphere simulated by general
circulation model, EPSC 2014,
Cascais, Portugal, 7-12 September
2014
 22. M. Takagi, N. Sugimoto, Y. Matsuda,
General circulation in the Venus lower
atmosphere, 40th COSPAR Scientific
Assembly, Moscow, Russia, 2-10
August 2014
 23. N. Sugimoto, M. Takagi, Y. Matsuda,
AFES (Atmospheric general
circulation model For the Earth
Simulator) simulation for Venus, 40th
COSPAR Scientific Assembly, Moscow,
Russia, 2-10 August 2014
 24. H. Ando, H. Kashimura, N. Sugimoto,
M. Takagi, T. Imamura, Venusian
Polar Vortex reproduced in an
Atmospheric General Circulation
Model, 40th COSPAR Scientific
Assembly, Moscow, Russia, 2-10
August 2014
 25. H. Kashimura, N. Sugimoto, M.
Takagi, W. Ohfuchi, T. Enomoto, Y.
Takahashi, Y.-Y. Hayashi, Energy
Spectra of Atmospheric Motions
Simulated by a High-resolution
General Circulation Model of Venus,
AOGS 2014, Royton Sapporo Hotel,
Sapporo, Japan, 28 July - 1 August
2014
 26. M. Takagi, and Y. Matsuda, Structures
and generation mechanisms of the
Venus atmospheric superrotation,
International Venus Workshop,
Catania, Italy, 10-14 June 2013
 27. N. Sugimoto, M. Takagi, and Y.
Matsuda, Baroclinic modes in the
Venus atmosphere simulated by AFES
(Atmospheric GCM for the Earth
Simulator), International Venus
Workshop, Catania, Italy, 10-14 June
2013

6. 研究組織

(1)研究代表者

高木 征弘 (TAKAGI, Masahiro)

京都産業大学・理学部・准教授

研究者番号 : 00323494