

機関番号：17102

研究種目：若手研究 (B)

研究期間：2008～2010

課題番号：20740273

研究課題名 (和文) 厚いエアロゾル雲に覆われた惑星大気大循環の研究

研究課題名 (英文) Atmospheric general circulations of cloud-covered planets

研究代表者

山本 勝 (YAMAMOTO MASARU)

九州大学・応用力学研究所・准教授

研究者番号：10314551

研究成果の概要 (和文)：系外惑星が次々と発見される中、広い物理パラメーター域で適用できる惑星大気大循環理論が必要とされている。本研究では、厚い雲に覆われた惑星中層大気大循環の天文パラメーター依存性を明らかにした。自転傾斜角が大きくなるにつれてスーパーローテーションが弱くなる。60度を超えるとサブローテーションとなり、その大気回転は $-\Omega$ (Ω ：自転角速度)に制限される。また、雲層より下層の加熱率が惑星中層大気大循環に与える影響も明らかにした。下層の微弱な加熱は中層大気に多大な影響を与える。

研究成果の概要 (英文)：An unified theory of planetary atmospheric circulation, which can be applied for wide ranges of physical parameters, is required to study atmospheric dynamics of extrasolar terrestrial planets. The present work elucidates sensitivities of cloud-covered middle-atmospheric general circulation to astronomical parameters. As tilt of the planetary rotation axis is increased, superrotational flow (prograde atmospheric rotation) becomes weaker. For more than 60°, subrotational flow (retrograde atmospheric rotation) is formed. In slowly rotating planets, the retrograde rotation rate is limited to $-\Omega$ (where Ω is the planetary rotation rate). In addition, the present work elucidates sensitivity of the superrotation to diabatic heating rate below the cloud layer. Small changes in the weak lower-atmospheric heating lead to drastic changes of the middle-atmospheric superrotation.

交付決定額

(金額単位：円)

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|--------|-----------|---------|-----------|
| 2008年度 | 900,000 | 270,000 | 1,170,000 |
| 2009年度 | 1,600,000 | 480,000 | 2,080,000 |
| 2010年度 | 700,000 | 210,000 | 910,000 |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 総計 | 3,200,000 | 960,000 | 4,160,000 |

研究分野：大気力学

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, 大気大循環, 大気波動, 地球流体力学

1. 研究開始当初の背景

系外惑星が次々と発見される中、広い天文パラメーター域で適用できる大気大循環理論が必要とされている。地球では、隕石の衝突や核の冬などで厚いエアロゾルやダスト

に覆われる状況が起こると、極端な気候変動が引き起される。また、金星やタイタンのような天体では上層で全球を覆うエアロゾル雲(硫酸エアロゾルやソリン)が中層大気大循環を駆動している。このように、多くの惑星

でエアロゾル雲に覆われている状況が見られる。

1980年代以降、Williamsのグループに代表される地球型大気大循環の研究は多いが、厚いエアロゾル雲に覆われた金星型大気大循環の研究はほとんど無かった。我々の研究(Yamamoto and Takahashi 2003 J. Atmos. Sci.)は、これまで謎であった金星スーパーローテーションが大気大循環モデルで再現可能であることを示し、それ以降、国内外の研究グループも最近ようやく成果を出し始めた。しかしながら、金星大気大循環における加熱率の問題や潮汐波の寄与など未解決な問題も多く、金星大気大循環の大気パラメータおよび天文パラメータ依存性を詳しく調べることは、スーパーローテーション形成維持の条件を絞り込む上でも非常に重要である。これゆえ、雲層や雲下の加熱に対する大気大循環の応答を十分に調べる必要があった。このように、研究開始時点では、地球、金星、タイタンおよび系外惑星の大気大循環(特に、厚い雲に覆われた惑星中層大気大循環)を統一的に理解する理論は構築されていなかった。

2. 研究の目的

厚い雲に覆われた惑星大気大循環の理論を体系化するために、多様な大気パラメータおよび天文パラメータに対する大気大循環の構造を明らかにすることが主目的である。特に、厚い雲に覆われた天体(金星やタイタン)で観測されるスーパーローテーションの形成維持機構を絞り込むことが重要な目的で、それに関わる物理過程を明らかにする。

現実の金星に近い条件で未定パラメータを変える実験を重点的にを行い、金星大気大循環モデルを現実に近いこともモデル開発に関わる重要な目的がある。

3. 研究の方法

大型計算機や高速化・並列化手法の発展で大気大循環モデルを用いた大規模計算が可能になったとはいえ、高度0~90 kmの範囲を十分な分解能で10万日近く計算するには多大な計算コストがかかるので、ニュートン冷却で放射過程を簡略化した金星型大気大循環モデルを用いてパラメータ実験を行う。

大気大循環モデルの自転速度、自転傾斜角、公転周期を様々な値に変更して、これらの天文パラメータに対する「厚い雲に覆われた惑星大気大循環構造」を明らかにする。

金星では厚い雲の下の物理過程も重要である。これゆえ、大気大循環モデルの天文パラメータを金星の値にして、雲層より下層大気の加熱率を変えることにより、金星のス

ーパーローテーションの条件を絞り込む。

金星大気大循環モデルでは表現できない小さなスケールの運動が大規模循環に与える影響も無視できない。大気大循環モデルのサブグリッドスケール(格子間隔よりも小さい)物理過程のパラメタリゼーションに必要な大気力学を明らかにするために、マイクロスケール気象シミュレーションを行い、渦による熱および物質輸送過程を調べる。

4. 研究成果

スーパーローテーションとサブローテーション

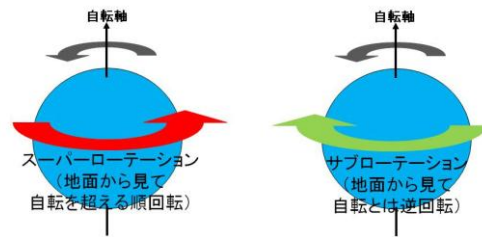


図1 スーパーローテーションとサブローテーションの概念図

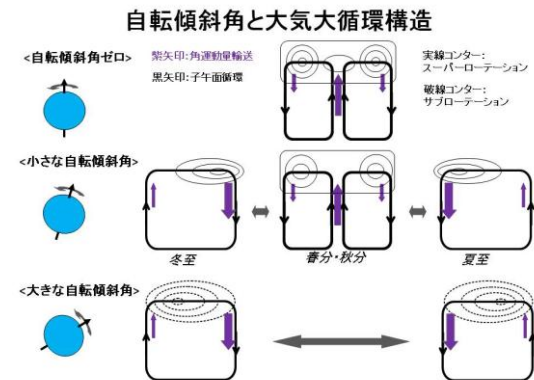


図2 自転傾斜角と厚い雲に覆われた惑星大気大循環の模式図(Yamamoto & Takahashi 2008に加筆)

大気大循環モデルを用いて、厚い雲に覆われた金星型惑星の大気大循環や波動擾乱の自転傾斜角依存性を調べた。自転周期を243日(金星条件)、16日(タイタン条件)、1日(地球条件)の3つに設定した条件下で自転傾斜角を変えた実験を行った。自転傾斜角が大きくなるにつれてスーパーローテーションが弱くなり、60度に近い値になると、サブローテーションが見られる(本稿のスーパーローテーションとサブローテーションの定義は図1)。ゆっくり回転する惑星のサブローテーションは、 $-\Omega$ (Ω : 自転角速度)に制限される。これは、大気回転が $-\Omega$ の状況では、子午面循環による鉛直角運動量フラッ

クスが0になり、角運動量の鉛直輸送が止まってしまうことによって説明される。このように、上記の研究では、厚い雲に覆われた惑星の「スーパーローテーション状態」を発見し、その制限値およびその理由を明らかにした。スーパーローテーションやサブローテーションを理解する上で、自転速度や南北加熱差に加えて、自転傾斜角も非常に重要であることがわかった。これらの成果は、Yamamoto and Takahashi (2008, *Astron. Astrophys.*)にまとめられた。上記のプロセスは図2に要約される。

雲層より下層の加熱率が惑星中層大気大循環に与える影響も明らかにした。特に、下層大気の微弱な加熱率が、スーパーローテーション強度や多重平衡状態に与える影響について詳しく調べた (Yamamoto and Takahashi 2009, *J. Geophys. Res.*)。下層の加熱率を太陽直下で 0.005K/day にした実験では、80 m/s の初期値を用いたとき、雲層では弱いながらスーパーローテーションが形成されるが、下層では観測されているようなスーパーローテーションは形成されない。このような現実に近い加熱の場合、子午面循環の存在下では、潮汐波による下層大気スーパーローテーションメカニズムは機能しない。下層の加熱率を太陽直下で 0.05 K/day にした場合、初期値依存性 (多重平衡) が見られ、80 m/s の初期値を用いると中層大気でスーパーローテーションは再現されるが、観測されているような下層大気スーパーローテーションは形成されない。また、下層の加熱率を大きくすると (太陽直下で 0.5K/day 以上)、多重平衡は見られなくなり、下層で大きなスーパーローテーションが形成される。金星の場合は、多重平衡解か？単一平衡解か？を決定する要因として「下層の加熱」が重要である。このように、雲層より下層の微弱な加熱率が中層大気に多大な影響を与えることが明らかになった。

地形の有無が惑星中層大気大循環に与える影響についても、金星大気大循環モデルを用いて調べた (Yamamoto and Takahashi 2009, *Earth Planets Space*)。最下層の流れが弱い今回の実験では、地形に起因するスーパーローテーション強度の違いは小さい。他方、最下層付近の鉛直解像度が粗い Herrnstein and Dowling (2006) の研究では、雲頂のスーパーローテーションが弱いわりに地表風が大きいために、地形の影響が出やすいようである。加熱率とニュートン冷却の高度依存性による加熱差で山頂から低地へ流れるパターンが見られるが、風自体は弱い。これは、最下層の流れが大きく、地形に起因する渦が見られる Herrnstein and Dowling (2006) と大きく異なる。本研究と Herrnstein and Dowling (2006) の違いは、地表付近の解像度

や物理過程のパラメタリゼーションの違いによると考えられる。

地表付近の大気力学は雲層域の大気大循環と密接に関わっていることから、金星地表付近の数値実験を行った (Yamamoto 2011, *Icarus*)。これは、渦拡散係数の見積もりにおいて、本課題で使用する大気大循環モデルの高度化に寄与する。対流調節実験では、上層 (> 2 km) は安定成層に、下層 (< 2 km) は初期温位勾配を 0.0~−5.0 K/km に設定した。初期温位勾配が大きいほど、熱輸送、物質輸送、運動量輸送の鉛直フラックスは増大し、個々の対流セルの大きさは小さくなる。開始から1時間ほど後に対流調節が起り、急激に「温位やトレーサーの混合」や「混合層の上部と下部で反対向きの流れ」が生じる。その後、領域平均の温位や流れはサブグリッド拡散で徐々に変わっていく。どのケースでも、対流調節時に大きな渦拡散係数が見られる。この値は鉛直1次元放射対流平衡で見積もられた渦拡散係数と矛盾しない。対流混合層実験では、地面からの熱フラックス Q を変えた計算を行い、混合層の発達やそれに伴う渦拡散係数を調べた。 Q が小さいと、対流混合層は維持されず、初期に対流が起きた後、徐々に弱まり無くなる。他方、 Q が大きいと時間とともに対流混合層が成長する。減衰から成長へ移り変わる敷居値 Q では、混合層が定常的に維持される。 Q が大きいケースでは、大きな渦拡散係数が混合層内で見られる。

本研究の一部である金星大気大循環モデルは、International Space Science Institute (スイス、ベルン)の金星気候ワーキンググループで金星大気大循環モデルの相互比較プロジェクトに参加した。また、フランスで開催された金星の国際会議では、大気大循環モデルを金星探査データの物理的解釈に応用した成果を招待講演で発表した (下記の [学会発表] ①)。

5. 主な発表論文等 [雑誌論文] (計4件)

- ① Masaru Yamamoto, Microscale simulations of Venus' convective adjustment and mixing near the surface: thermal and material transport, *Icarus*, 査読有, 211 巻, 2011, 993-1006.
- ② Masaru Yamamoto & Masaaki Takahashi, Influences of Venus' topography on fully developed superrotation and near-surface flow, *Earth Planets Space*, 査読有, 61 巻, 2009, e45-e48.
- ③ Masaru Yamamoto & Masaaki Takahashi, Dynamical effects of solar heating below the cloud layer in a Venus-like atmosphere, *Journal of Geophysical Research*, 査読有, 114 巻, 2009, E12004.

- ④ Masaru Yamamoto & Masaaki Takahashi, Prograde and retrograde atmospheric rotation of cloud-covered terrestrial planets: Significance of astronomical parameters in the middle atmosphere, *Astronomy and Astrophysics*, 査読有, 490 巻, 2008, L11-L14.

[学会発表] (計 3 件)

- ① Masaru Yamamoto, Application of GCM to the Venus middle atmosphere dynamics, International Venus Conference Aussois, 2010 年 6 月 22 日, Aussois, France.
- ② Masaru Yamamoto, Modeling of 4-6 day waves using a Venus middle atmosphere GCM, Asia Oceania Geosciences Society 6th Annual Meeting, 2009 年 8 月 14 日, Singapore, Singapore.
- ③ Masaru Yamamoto, Venus atmospheric modelling: sensitivity of superrotation to diabatic heating below the cloud layer, European Planetary Science Congress 2008, 2008 年 9 月 25 日, Muenster, Germany.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山本 勝 (YAMAMOTO MASARU)

九州大学・応用力学研究所・准教授

研究者番号：1 0 3 1 4 5 5 1