

令和 4 年 5 月 20 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2017～2021

課題番号：17H02960

研究課題名(和文) 浮遊微粒子で覆われた惑星大気大循環と物質循環の力学

研究課題名(英文) Dynamics of atmospheric general circulation and material transport on planets globally covered with suspended particles

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 8,600,000円

研究成果の概要(和文)：浮遊微粒子で覆われた惑星大気大循環と物質循環の力学を理解するために、大気大循環モデルの理想化実験に基づき、惑星大気の大循環やスーパーローテーションの相似構造と形成・維持過程を明らかにした。惑星の自転や大きさが、これらの力学過程に与える影響を、無次元パラメータを用いて整理した。また、上記の理論研究に加えて、金星放射伝達と地形を組み込んだ現実的な金星大気大循環モデルを用いて、大気大循環構造や長周期擾乱(熱潮汐波や定在波)構造を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年、系外惑星が多く発見されている中、様々な自転や大きさをもつ惑星の大気大循環を包括的に理解する上で、様々な天文パラメータやモデルパラメータを変えて行った理想化実験の成果は、惑星大気大循環理論の構築に寄与する。また、これらの理想化実験の成果を個々の惑星に応用することは、個々の惑星大気モデリングを高度化する上で非常に有用である。その中でも、放射伝達と地形を組み込んだ現実的な金星大気大循環モデルの成果は、「あかつき」をはじめとした金星探査の観測結果を力学的に解釈する上で重要である。

研究成果の概要(英文)：To understand dynamics of atmospheric general circulation and material transport on planets globally covered with suspended particles, based on idealized atmospheric general circulation model experiments, we elucidated the similarity structures and formation/maintenance processes of the atmospheric general circulation and super-rotation. The effects of planetary rotation and size on these dynamical processes are summarized using dimensionless parameters. In addition to the theoretical studies, using a realistic Venus atmospheric general circulation model with radiative transfer and topography incorporated, we elucidated the structures of the atmospheric circulation and the long-period waves (thermal tides and stationary waves).

研究分野：大気力学

キーワード：地球流体力学 惑星大気

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

浮遊微粒子が惑星全体を覆う現象は、様々な惑星(金星、タイタン、火星ダストストーム、核の冬など)で共通に見られるが、「浮遊微粒子で覆われた惑星大気大循環と物質循環の力学」の包括的な理論構築は十分に行われていない。

現実的な放射伝達を考慮した大気大循環モデルを金星研究に活用している研究グループは、フランス LMD と英国のオックスフォードと日本の東大大気海洋研のモデルと少ない。個々の惑星大気大循環モデルの高度化も、地球の大気大循環モデルと比較して十分ではない状況である。

2. 研究の目的

本研究では、以下の3つを研究の主目的とする。

(1) 大気大循環モデルの理想化(物理過程の簡略化)実験において、惑星大気の帯状流と微粒子の物理を支配する無次元パラメーターを導入し、浮遊微粒子で覆われた惑星大気の大循環の相似構造を解明する。

(2) 物理過程や数値拡散のパラメタリゼーションが、惑星大気の大循環の相似構造に与えるインパクトを明らかにする。

(3) 上記の理論研究の成果を、現実の惑星大気(特に金星大気)モデルリングの高度化や理論的解釈に応用する。

3. 研究の方法

本研究では、東大大気海洋研や国立環境研で開発された大気大循環モデルを用いた。研究目的(1)と(2)では、放射過程をニュートン冷却で簡略化した大気大循環モデルを用いて、様々なロスビー数に関する大気大循環と波動の構造を解析した。研究目的(3)では Ikeda(2011)が開発した金星大気大循環モデルに地形を組み込んだモデルを用いて、より現実的な金星大気構造を解析・議論した。

4. 研究成果

(1) ロスビー数を変える実験を解析する前に、金星を模した雲層加熱により駆動する惑星大気大循環の水平解像度依存性と多重平衡について調査した。高緯度ジェットで形成される極域間接循環は、雲層の Gierasch-Rossow-Williams のメカニズムを弱める方向に働くため、雲層のスーパーローテーションを弱体化させる。間接循環が解像できない低解像実験では、下層大気への角運動量輸送効率が下がり、初期に与えたスーパーローテーションの角運動量が雲層に残りやすい。それゆえ、初期にスーパーローテーションを与えた実験では、初期値を静止状態にした実験よりも、雲層で高速なスーパーローテーションが形成される。このように、低解像度実験では、多重平衡解が出現しやすい結果が得られた(Yamamoto & Takahasni 2018, JGR)。

(2) 赤道ケルビン波を下端から強制した金星中層大気大循環モデル実験を行い、「東西風最大値 UMAX, 子午面風最大値 VMAX, 南北温度差最大値 dTMAX の時系列データの3変数空間の振る舞い」と「数年スケールの帯状流年々変動」についてまとめた。UMAX と VMAX と dTMAX の時系列データの散布点は、解析的手法から得られる推定曲線の周辺にプロットされる。また、赤道ケルビンの強制が弱いと、その散布分布は線状になるが、強制が強いと、その散布分布は小さい点状になる。前者の分布は、高緯度ジェットの盛衰に伴う年々変動を反映して線上構造になる。この数値実験の解析により、極域ロスビー波と高緯度ジェットの盛衰に伴うスーパーローテーションの年々変動プロセスを新たに提案した(Yamamoto & Takahasni 2018, Icarus)。

(3) これまで十分に議論されていなかった「自転が遅い天体や小さい天体における赤道波動の理論的考察」を行った。これらの天体では、球面の赤道ケルビン波の南北風成分が重要であることを示し、その波による輸送過程について議論した(Yamamoto 2019, Icarus)。球面の赤道ケルビン波に対応する波動は、定義や分散関係がベータ平面の赤道ケルビン波と全く同じではないが、本報告では「赤道ケルビン波」と表記する。この研究では、球面の赤道ケルビン波の位相構造と水平温度輸送の Lamb パラメーター依存性を議論した。土星の衛星のタイタンでは Lamb パラメーターが小さく、赤道ケルビン波の南北風成分が無視できない。この南北風成分は、タイタン大気大循環モデルの赤道ケルビン波の水平構造でも見られる。また、鉛直伝播する赤道ケルビン波では、南北流成分と温度成分の位相が合うため、熱は赤道向きに輸送される。しかしながら、この解析で見積もられた赤道向き熱輸送は、金星中層大気大循環モデル(Yamamoto and Takahashi 2018, Icarus)の赤道向き熱フラックス値よりも小さい。金星中層大気大循環モデルでは、赤道ケルビン波の振幅が高緯度で十分に減衰せずに中緯度ジェット付近で臨界緯度に達し、中高緯度のロスビー波と結合することで赤道向き熱および運動量輸送が強化されることが示唆される。

(4) 雲で覆われた惑星大気の大循環構造に関して、自転と惑星半径を変えた簡略化大気大循環モデル実験を行い、高ロスビー数の大気大循環構造および熱・運動量輸送過程やその変動の相似性を調査した。傾圧および順圧エネルギー変換率を算出し、どの擾乱が Gierasch メカニズムに寄与するのか? を明らかにした。高ロスビー数では、間欠的に傾圧波が帯状流を弱め、その後、順圧波が帯状流を強める傾向が見られる。低ロスビー数の大気大循環では、強いジェットが形成さ

れる極域で傾圧不安定が起こるが、全球で平均すると超回転への寄与は小さく、全球的には順圧波が顕著であった(Tsunoda et al. 2021, JGR)。また、高口スピー数の地球型惑星の大循環構造の水平粘性依存性についても明らかにした(Lu & Yamamoto 2020, PSS)。

(5) 地形および放射が金星大気大循環に与える影響は十分に理解されていない。これらの影響を、Ikeda(2011)が開発した金星大気大循環モデルを用いて、太陽固定座標と地理座標から見た金星大気大循環構造を明らかにした。雲層より上層の大気では、太陽光加熱率が高く、8 m/s を超える強い帯状平均極向き流が見られる。雲頂付近では、太陽放射の加熱と赤外放射の冷却が局所的にバランスしており、放射の南北不均衡が駆動する帯状平均の子午面流は弱い。ジェット赤道側では約 1 m/s の極向き流が吹き、ジェットコア付近では潮汐波と傾圧波の極向き熱輸送による間接循環が形成される。帯状平均東西風に関しては、雲頂高度付近で、約 120 m/s の中緯度東西風ジェットと約 90 m/s の赤道東西風が形成される。シミュレートされた太陽直下付近の水平風分布は、金星探査機あかつきの観測結果をよく再現している。太陽固定座標では、南北流とそれに関連した水平フラックスは、昼面のみ東西平均と昼夜両面の帯状平均との差が大きく、昼面のみ UV 観測から帯状平均構造を推定するには注意を要する。特に、UV 観測でハドレー循環を議論する場合、昼面だけの東西平均の観測値ではなく、潮汐波を組み込んだモデルで検証する必要があることを例証した。さらに、金星大気大循環における地形の効果を明らかにした。地形を導入することで高度 10-20 km の弱い安定層が形成される。また、Aphrodite Terra 上空の雲頂で観測された東西風減速は、山岳波の東西風の負偏差に対応することが示唆された。(Yamamoto et al. 2019, Icarus)。

(6) 金星放射伝達(Ikeda 2011)と地形を組み込んだ大気大循環モデルで、大気大循環および長周期波動の地理依存性と地方時依存性を明らかにした(Yamamoto et al. 2021, Icarus)。放射伝達によって強制される熱潮汐波や細かい地形で強制される定在波の三次元構造と熱・運動量フラックスを解析し、Venus Express やあかつきの観測と比較した。現実的な金星大気大循環モデルでは、雲頂のスーパーローテーションは、熱潮汐波の赤道向き水平運動量フラックスと鉛直運動量フラックスの両者によって駆動する。波動の分散および運動量フラックスの地形依存性と地方時依存性は、静的安定度が高く太陽光加熱が強い雲頂で、顕著にみられる。雲頂の低緯度では夜から明け方で相対的に分散が高く、赤道鉛直流の分散は高地の上で相対的に高い値をもつ。また、擾乱の熱および運動量フラックスの地方時依存性が強く、雲頂の雲追跡から帯状平均フラックスを見積もるには注意が必要である。

(7) 紫外線吸収物質高度分布に対する金星大気大循環の依存性も調査した。その吸収物質を高度 57 - 65 km (LowUV 分布)から高度 57 - 70 km (High-UV 分布)に変えると、雲頂付近の UV 加熱域が鉛直に広がり、その加熱率極大値が小さくなる。これゆえ、High-UV 実験では、雲層上端の東西風と子午面循環が LowUV 実験よりも弱くなり、潮汐波の振幅および運動量フラックスも小さくなる。このように紫外線吸収物質の影響を議論する上で重要な知見を得ることができた(山本勝, 池田恒平, 高橋正明, 日本気象学会 2019 年度秋季大会)。

< 引用文献 >

- Kohei Ikeda, Development of radiative transfer model for Venus atmosphere and simulation of superrotation using a general circulation model, Ph.D. dissertation, The University of Tokyo, Japan, 2011
- Masaru Yamamoto, Masaaki Takahashi, Effects of polar indirect circulation on superrotation and multiple equilibrium in long-term AGCM experiments with an idealized Venus-like forcing: sensitivity to horizontal resolution and initial condition, *Journal of Geophysical Research - Planets*, 123, 708-728, 2018
- Masaru Yamamoto, Masaaki Takahashi, Dynamical relationship between wind speed magnitude and meridional temperature contrast: Application to an interannual oscillation in Venusian middle atmosphere GCM, *Icarus*, 303, 131-148, 2018
- Masaru Yamamoto, Kohei Ikeda, Masaaki Takahashi, Takeshi Horinouchi, Solar-locked and geographical atmospheric structures inferred from a Venus general circulation model with radiative transfer, *Icarus*, 321, 232-250, 2019
- Masaru Yamamoto, Equatorial Kelvin-like waves on slowly rotating and/or small-sized spheres: Application to Venus and Titan, *Icarus*, 322, 103-113, 2019
- Liyuan Lu, Masaru Yamamoto, Planetary-size dependence of zonal jets: Effects of horizontal diffusion in an idealized Earth-like general circulation model, *Planetary and Space Science*, 190, 104976, 2020
- Yuma Tsunoda, Masaru Yamamoto, Masaaki Takahashi, Rossby number dependence of Venus/Titan-type superrotation and its related intermittency, *Journal of Geophysical Research: Planets*, 126, e2020JE006637, 2021
- Masaru Yamamoto, Kohei Ikeda, Masaaki Takahashi, Atmospheric response to high-resolution topographical and radiative forcings in a general circulation model of Venus: Time-mean structures of waves and variances, *Icarus*, 355, 114154, 2021

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 7件）

1. 著者名 Liyuan Lu, Masaru Yamamoto	4. 巻 190
2. 論文標題 Planetary-size dependence of zonal jets: Effects of horizontal diffusion in an idealized Earth-like general circulation model	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Planetary and Space Science	6. 最初と最後の頁 104976
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.pss.2020.104976	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Masaru Yamamoto, Kohei Ikeda, Masaaki Takahashi	4. 巻 355
2. 論文標題 Atmospheric response to high-resolution topographical and radiative forcings in a general circulation model of Venus: Time-mean structures of waves and variances	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Icarus	6. 最初と最後の頁 114154
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.icarus.2020.114154	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Yuma Tsunoda, Masaru Yamamoto, Masaaki Takahashi	4. 巻 126
2. 論文標題 Rossby number dependence of Venus/Titan type superrotation and its related intermittency	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Planets	6. 最初と最後の頁 e2020JE006637
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2020JE006637	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Masaru Yamamoto	4. 巻 322
2. 論文標題 Equatorial Kelvin-like waves on slowly rotating and/or small-sized spheres: Application to Venus and Titan	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Icarus	6. 最初と最後の頁 103-113
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.icarus.2019.01.008	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Masaru Yamamoto, Kohei Ikeda, Masaaki Takahashi, Takeshi Horinouchi	4. 巻 321
2. 論文標題 Solar-locked and geographical atmospheric structures inferred from a Venus general circulation model with radiative transfer	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Icarus	6. 最初と最後の頁 232-250
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.icarus.2018.11.015	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 M. Yamamoto and M. Takahashi	4. 巻 印刷中
2. 論文標題 Effects of polar indirect circulation on superrotation and multiple equilibrium in long-term AGCM experiments with an idealized Venus-like forcing: sensitivity to horizontal resolution and initial condition	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research - Planets	6. 最初と最後の頁 印刷中
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/2017JE005385	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 M. Yamamoto and M. Takahashi	4. 巻 303
2. 論文標題 Dynamical relationship between wind speed magnitude and meridional temperature contrast: Application to an interannual oscillation in Venusian middle atmosphere GCM	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Icarus	6. 最初と最後の頁 131-148
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.icarus.2017.10.012	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計12件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件)

1. 発表者名 山本勝, 池田恒平, 高橋正明
2. 発表標題 季節変化および紫外線加熱が金星大気大循環に及ぼす影響について
3. 学会等名 日本気象学会2019年度秋季大会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------