

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 11 日現在

機関番号：82626

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2016

課題番号：15K17767

研究課題名（和文）金星成層圏での風速変動メカニズムの解明

研究課題名（英文）Mechanism of zonal wind variation in Venus stratosphere

研究代表者

神山 徹 (Kouyama, Toru)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・人工知能研究センター・研究員

研究者番号：40645876

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 1,900,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では金星大気中に存在する惑星規模大気波動の発生、伝搬、そしてスーパーローテーションと呼ばれる金星特有の高速東西風への影響に着目をして、データ解析と理論両面から研究を実施した。我が国の金星探査機「あかつき」の熱赤外観測データ、および地上大型望遠鏡を用いた金星の熱放射観測により、地形に固定された巨大な波動現象が雲頂高度に現れること、それが何度も発生していることを初めて明らかにした。加えて従来から知られていたケルビン波、ロスビー波においても、東西風速の時間変化に合わせて伝搬のしやすさを変え、異なる時期に異なる加速・減速を金星大気に与えることを理論・観測両面から新たに示した。

研究成果の概要（英文）：In this study, enhancement and propagation of planetary scale waves, which can accelerate and decelerate the super-rotation (fast zonal wind flow) in the Venus atmosphere, were investigated based on observation and simulation approaches. Based on observations of thermal emission from the Venus cloud top by a ground-based telescope and Akatsuki, which is a Japanese Venus climate orbiter, large stationary gravity waves were newly discovered and have been continuously observed. The stationary waves have been considered to propagate from the lower atmosphere. Since waves can propagate momentum transportation, this discovery provides newly perspective of connection between lower atmosphere and upper atmosphere through the momentum exchange by the waves. In addition, it was found that Kelvin and Rossby waves shows different vertical propagating ways depending on variation of the background zonal wind speed, that indicates they provide different momentum transportation in Venus atmosphere.

研究分野：惑星気象学

キーワード：金星 惑星大気 スーパーローテーション 大気波動 あかつき

1. 研究開始当初の背景

金星に特有な気象現象の最大の謎として「スーパーローテーション」と呼ばれる、自転をはるかに上回るスピードで大気が惑星を一周する現象が知られている。金星の自転速度は非常に遅い(1.6m/s)にもかかわらず、雲の頂上高度 70km では最大 100m s^{-1} もの西向き暴風が存在している。この現象が維持されるためには地面との摩擦に勝るほどの運動量が大气に供給され続けなければならないが、発見から 40 年が経った今もその生成・維持メカニズムは未解決のままとなっている。

近年の研究の進展として、欧州宇宙機関による金星探査衛星が取得したデータの解析により、スーパーローテーションにわずかに 250 地球日ほどで 20m s^{-1} 以上の顕著な加速、減速が準周期的に生じていること、また数年という時間をかけて 30m s^{-1} 以上の加速が確認された[Kouyama et al., 2013, Khatuntsev et al., 2013]。これは単純に風速を維持する以外にも、何らかのメカニズムに準じた活発な運動量交換が金星大気中に存在することを示唆する結果であるが、その描像については現在全く分かっていない。

一方で金星大気には、太陽光加熱を要因とする大気加速がスーパーローテーションを維持しうる、という特有の状況がある。雲高度での太陽光加熱により励起された「熱潮汐波」が地面まで伝達し、地面を蹴る形で大気を加速する。この波動の特徴はスーパーローテーションに比べ位相速度が非常に遅い($\sim 3\text{m s}^{-1}$)ことで、様々な位相速度の波動が金星大気の運動量収支に寄与していることを示しているが、特に位相速度が遅い波動については熱潮汐波以外の調査がなく全く未知であった。

このような背景に対して、2015 年に我が国の金星探査機「あかつき」の軌道投入が成功し、多くの観測画像を地球に届けている。本研究期間はこれまでにないデータセットの利用が可能となった期間であり、あわせて地上観測を行うことで衛星と相補的な形で波動現象に着目したデータ解析が可能となった。

2. 研究の目的

(1) 成層圏で風速の調整機構として知られている「大気波動の伝搬」が金星においても同様に効率的に働きえるのか調査し、風速変動メカニズムの要因といえるのか明らかにする。

地球や木星においては「大気中を伝搬する波動」と「背景に流れる大気」との間で行われる運動量交換が成層圏での風速の周期的な変動をもたらすことが知られている。金星においても波動が大気の加速・減速の主要因であるとすれば、波動と背景風との相互作用が汎惑星的に存在する運動量交換の主要様

式と言える。これまでの研究において大気を加速する惑星規模の大気波動「Kelvin 波」が風速の遅い時期に卓越しやすく、逆に大気を減速する「Rossby 波」が風速の速い時期に卓越しやすいことを理論的に示され、また観測データとの比較から実際に Kelvin 波・Rossby 波が現れていた時期がこの予想と整合していることが示唆されている[Kouyama et al., 2015]。本研究ではこのアイデアを拡張し、観測に基づきモデル化した現実的な金星成層圏大気中に Kelvin 波と Rossby 波による加速・減速効果を導入することで、伝搬する波動の風速変動への寄与を見積もり、スーパーローテーション維持機構としての役割を評価する。

(2) スーパーローテーションと大きく異なる位相速度を持つ波動の存在調査と、それらが果たす役割の解明

スーパーローテーションを維持する有力な候補の一つに、熱潮汐波メカニズムがある。熱潮汐波は太陽光が金星の分厚い雲を加熱することで励起される波であり、スーパーローテーションを維持し得るほどの大気加速をもたらす[Takagi & Matsuda, 2007]。この波動の特徴はスーパーローテーションとは逆向きに遅い東西方向の位相速度を持つことがあげられる。

同様の遅い位相速度を持ちうる波動として、地形起源の波動があげられる。波動そのものを捉えることはできなかったものの、Venus Express の観測成果から雲頂上高度(70km)に東西風速の中に地形に相関を持つ速い・遅いといった構造が存在することが示唆され[Bertaux et al., 2016]、新しい観測データによってその伝搬が見える可能性がある。

これまでの観測では主に紫外波長を使った雲の明暗模様から波動構造の調査が行われてきた。本研究では金星からの熱放射に着目し、これまで雲頂上高度では検討もされてこなかった低位相速度の波動の存在、またその波動構造について調査を行い、金星大気加速に与えるインパクトを評価する。

3. 研究の方法

(1) 金星成層圏高度数値モデルの作成・発展

大気加速度の定量評価を行うためには、数値的な考察が不可欠である。これまでの研究では Covey & Schubert (1982) の手法を採用した波動の伝搬計算から、金星で観測されているパラメータを導入した Kelvin 波・Rossby 波がそれぞれ 100 地球日程度で 10m s^{-1} 以上の風速変動を生じえることが示されている[Kouyama et al., 2015]。ただし上記は最も単純な風速条件、緯度に依らず大気が惑星を一周する時間が同じという「剛体回転状態」を仮定した上での予測にとどまった。実際の

金星では緯度によって大気回転周期は異なる。そこで本研究では任意の風速場を与えられる Imamura (2006) の手法およびモデルを採用し、実際に観測された風速分布を導入可能な形に最適化を行う。これにより現実的な風速分布における Kelvin 波・Rossby 波がもたらす擾乱への金星大気の線形応答を導き、加減速量の定量的な見積りを可能とする。

(2)金星熱放射に着目した地上観測・衛星取得データの解析による遅い位相速度の波動構造調査

雲頂上高度の熱放射を捉えられる熱赤外観測波長をもつ金星探査機「あかつき」の観測データと地上望遠鏡による波長 5.1 μm を用いた観測により、位相速度の遅い波動に着目したデータ解析を実施する。

熱潮汐波は温度構造に波数 1、あるいは波数 2 の顕著な構造を作り出すことが知られている。一方地面に励起源を持つ波動は、金星地表の山岳地帯などの特徴的な地形の上空に固定された形で現れる可能性がある。

雲頂上高度で見られる Kelvin 波や Rossby 波は地面に対してスーパーローテーションとほぼ同じ位相速度で西向きに伝搬するため、スーパーローテーション速度を基準にしたデータ整理が行われてきた。本解析においては金星地面と連動する地理座標に着目をする、あるいは太陽とともに移動するローカルタイム座標系を用いてその中で定在する構造の存在の有無、また存在するのであればその発生頻度や発生領域に偏りがあるかを調査し、その発生メカニズムに迫る。

4. 研究成果

(1)-1 金星成層圏高度数値モデルの作成・発展による金星成層圏大気中を伝搬する波動様式の理解

高度 60km から高度 90km の金星成層圏大気を模擬した金星大気モデルを用意し、これまでの金星観測においてみられた中緯度帯に東西風速ジェットを持つような風速構造をもつ背景風速場の中を、Kelvin 波、Rossby 波がどのように伝搬するかを調査した。大気モデルは Imamura (2006) によって準備されたものを拡張し、Venus Express で見られた風速変動を模擬する、雲頂上高度で東西風速が速い場合 (100 m s^{-1}) と遅い場合 (80 m s^{-1}) を用意した。

Kelvin 波は の場面において高高度までその振幅を維持するもの、では励起高度である高度 60km で顕著な減衰をすることが見られた(図 1 左)。このことは逆に の場面では加速が下層に集中することを意味し、複数の高度間での速度差を緩和させるような働きがある。一方 Rossby 波は受ける減衰の程度に差があるもの、 の場面両方で高高度まで伝搬することが確認され(図 1 右)、

中緯度ジェットが Rossby 波の減衰を緩和していることが確認された。これは時期によって Rossby 波が卓越したりしなかったりする要因が、伝搬特性の変化だけでなく発生そのものが時間変化していることを示唆していることを示した。

これらの成果は学会発表 (国際学会) にて発表を行っている。

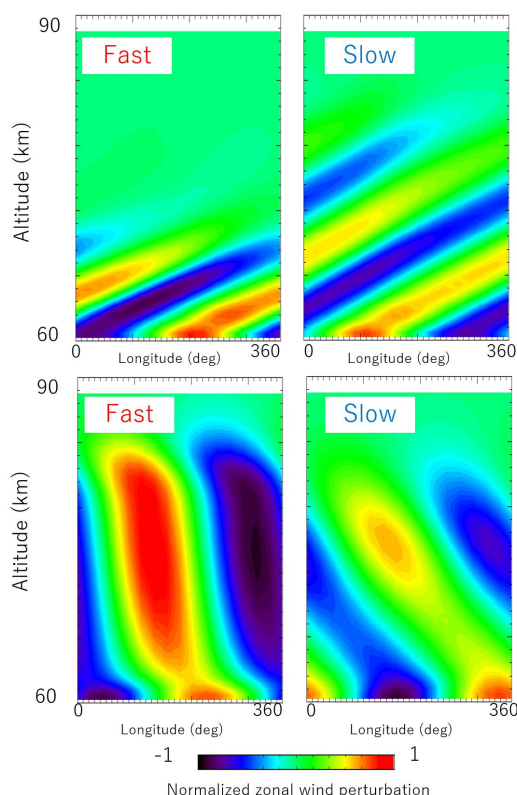


図 1. 金星大気高度 60-90km における (上)Kelvin 波、(下)Rossby 波の鉛直伝搬の様子。Fast は東西風速が速い設定での実験を示し、Slow は遅い設定での実験であることを示す。

(1)-2 紫外波長で見られる明暗模様との関連性の解明

(1)-1 で示した Kelvin 波や Rossby 波の伝搬の表れとして、紫外波長で見える明暗変化が周期的に変化することが知られている。そこで本研究では Venus Express/Venus Monitoring Camera (VMC) によるデータ解析の中で、過去の研究において風速変動がみられる時期に VMC が捉えた紫外吸収模様変化の周期解析を行った。その結果風速変動と全く同じ周期に雲の明暗変化が見られることを見出し、惑星規模での明暗変化が波動の伝搬に依存していることを示した(図 2)。またこの成果は大型望遠鏡で見られた紫外模様の変動周期の時期による違いに説明を与え、金星大気中での惑星規模大気波動の時間変化について新たな知見を与えた。

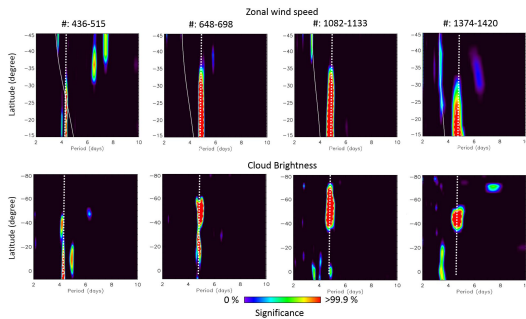


図 2. 4 つの異なる時期における(上)東西風速変動の周期解析結果と(下)雲の明暗変化の周期解析結果。縦軸は緯度(南緯)、横軸は周期(日数)を表し、赤い色ほど強い周期シグナルが得られたことを示す。

これらの成果は雑誌論文、学会発表、にて発表を行っている。

(2)-1 金星雲頂高度における巨大定在構造の発見とその特性理解

金星探査機が 2015 年の軌道再投入直後に行った熱赤外観測により、これまでに見られなかったことのない巨大な弓状構造が発見された。本研究では位相速度に着目して解析を行い、5 日間の連続して実施された熱赤外線観測から、発見された弓状構造が観測期間中消えることなく、またスーパーローテーションに流されることなく固定されて存在していることを見出した(図 3)。

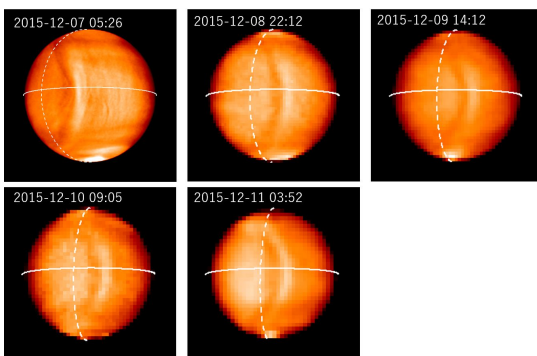


図 3. 金星探査機「あかつき」による熱赤外線観測結果(2015 年 12 月 7 日~11 日)。実線は赤道、点線は昼夜境界位置を示す。明るい領域ほど温度が高い。弓状構造がスーパーローテーション(1 日に 90° ほど経度方向に動く)に流されず 5 日間存在し続けていることがわかる。

弓状構造の位相速度は 0.6 m s^{-1} とほぼ地面に対して動かず、太陽とともに動く熱潮汐波とも異なることが確認されている。このような地形固定性の現象が確認されたのはこの観測が初めてである。この発見ののち、同様の地形固定性の波動があかつきによる熱赤外線観測と地上望遠鏡による熱放射観測により多数発見されるようになり、本研究成果

は地面と雲頂上高度が波動により密接に連携しているという新しい金星大気観を形作るに至っている。

これらの成果は雑誌論文、学会発表、にて報告を行った。

(2)-2 衛星データ解析技術の応用による衛星観測データの品質向上技術の開発

(2)-1 で行った衛星データ解析では、基準となる地点のない宇宙空間において衛星の位置・姿勢から対象のジオメトリ情報を正確に導出する技術が求められる。このような技術は金星観測に利用できるのみならず、汎惑星的に利用することが可能である。

本研究では衛星搭載のセンサの性能に制限の強い小型衛星のデータ解析において、金星観測で培った画像処理技術の適応を行う研究成果の横展開を行った。その結果、特に衛星姿勢決定に 1° という無視できない大きさの誤差を持っていた小型衛星「UNIFORM-1」に対して、衛星取得の画像に写る地形を手掛かりに、金星観測時に利用された天体運動計算を組み合わせ衛星姿勢復元を行う技法を開発し、衛星姿勢を 0.01° の精度で決定できる新しい手法の開発に成功した。この精度は宇宙空間で最も姿勢決定精度が良い、星の位置を手掛かりに姿勢推定を行う「スターセンサ」と同等の精度である。この手法により地図投影に失敗していた画像も精度よく地図に張り付けることが可能となった(図 4)。

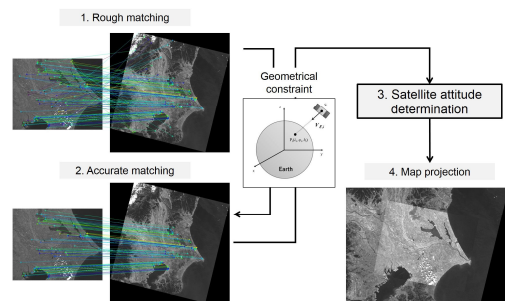


図 4. 本研究で開発した、画像処理を用いた衛星姿勢推定と地図投影精度向上の処理フロー

本手法は衛星に通常搭載されるカメラによって実施することができ、新たなセンサの搭載等のコスト発生がない。高い精度、かつ低コストを両立する手法として、搭載可能なセンサに制限の強い小型衛星に対して新しい姿勢推定の手法を提案するに至った。これは惑星探査という最先端の現場で培われた技術のその他の分野への成果還元のひとつとなっている。

この成果は雑誌論文にて発表を行っている。

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 4 件)

福原哲哉、二口将彦、はしもとじょーじ、堀之内武、今村剛、岩上直幹、神山徹、村上真也、中村正人、小郷原一智、佐藤光輝、佐藤隆雄、鈴木睦、田口真、高木聖子、上野宗孝、渡部重十、山田学、山崎敦、Large stationary gravity wave in the atmosphere of Venus、Nature Geoscience、査読有、10 巻、2017、85-88
DOI: 10.1038/ngeo2873

神山徹、兼村厚範、加藤創史、Nevrez Imamoglu、福原哲哉、中村良介、Satellite attitude determination and map projection based on robust image matching、Remote sensing、査読有、9 巻、2017、90
DOI: 10.3390/rs9010090

今井正堯、高橋幸弘、渡部誠、神山徹、渡部重十、合田周平、合田雄也、Ground-based observations of the cyclic nature and temporal variability of planetary-scale UV features at the Venus cloud top level、Icarus、査読有、278 巻、2017、204-214
DOI: 10.1016/j.icarus.2016.06.011

神山徹、今村剛、佐藤毅彦、今井正堯、中村正人、金星雲の明暗変化と風速変動の関連性、第 29 回大気圏シンポジウム・講演集、査読無、2016

〔学会発表〕(計 6 件)

神山徹、田口真、福原哲哉、佐藤隆雄、二口将彦、はしもとじょーじ、LIR によって観測された金星雲頂高度における温度構造とその時間変化、第 140 回地球電磁気・地球惑星圏学会 総会及び講演会、2016 年 11 月 19 日~23 日、九州大学、福岡

田口真、福原哲哉、今村剛、神山徹、中村正人、佐藤隆雄、上野宗孝、鈴木睦、岩上直幹、佐藤光輝、はしもとじょーじ、高木聖子、A bow-shaped thermal structure traveling upstream of the zonal wind flow of Venus atmosphere、DPS meeting(国際学会)、2016 年 10 月 16 日~21 日、Pasadena Convention Center、Pasadena、US

神山徹、今村剛、Vertical propagation of planetary scale waves in variable background zonal winds、International Venus Conference 2016(国際学会)、2016 年 4 月 4 日~8 日、Merton College、Oxford、UK

神山徹、今村剛、佐藤毅彦、今井正堯、中村正人、金星雲の明暗変化と風速変動の関連性、第 29 回大気圏シンポジウム、2016 年 3 月 7 日~8 日、宇宙科学研究所、神奈川

神山徹、佐藤隆雄、佐川英雄、金星雲層高度における温度擾乱の時間・空間的な変動、第 138 回地球電磁気・地球惑星圏学会 総会及び講演会、2015 年 10 月 31 日~11 月 3 日、東京大学、東京
今井正堯、高橋幸宏、渡部重十、渡辺誠、神山徹、Variability of the propagation periods of the Y-feature on Venus in one Venus year、第 138 回地球電磁気・地球惑星圏学会 総会及び講演会、2015 年 10 月 31 日~11 月 3 日、東京大学、東京

6. 研究組織

(1) 研究代表者

神山 徹 (Toru Kouyama)

国立研究開発法人・産業技術総合研究所・
人工知能研究センター・研究員

研究者番号：40645876