

令和元年6月3日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H04060

研究課題名(和文) 電波掩蔽観測と数値実験による惑星大気重力波の研究

研究課題名(英文) Study of gravity waves in planetary atmospheres using radio occultation experiments and numerical modeling

研究代表者

今村 剛 (Imamura, Takeshi)

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・教授

研究者番号：40311170

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 11,200,000円

研究成果の概要(和文)：高度分解能を1桁向上する電波ホログラフィ法により金星の電波掩蔽観測データを解析し、鉛直スケール数百mの波動や弱安定層が普遍的に存在すること、高緯度の対流層上端にしばしば急峻な逆転層が見られることなどを見出した。また高い鉛直解像度と鉛直方向に広い計算領域を兼ね備えた金星中層大気の数値シミュレーションを実施し、対流運動とそれが励起する重力波の伝播を再現した。重力波の砕波はシア不安定と対流不安定によって生じることが示唆され、さらに重力波の砕波の起こる高度と重力波の振幅を電波掩蔽観測の観測結果と比較して理解することができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

地球をはじめ惑星大気に普遍的に存在して大気構造や気候形成に影響を与える内部重力波について、金星と地球の比較により研究を進めた。電波掩蔽観測の新たな手法により従来とらえられなかった微細構造を明らかにすることにより、金星においても地球と同様な詳細な解析が可能となった。また数値シミュレーションにより観測結果を再現して背後のメカニズムの理解を深めることができた。

研究成果の概要(英文)：Radio occultation observation data of Venus was analyzed by radio holography method to improve the vertical resolution, and universal existence of waves and neutral layers with vertical scales of several hundred meters were revealed. Sharp inversion layers were also found to exist at the top of high latitude convection layers. We also carried out numerical simulations of the convective layer with high vertical resolution and a wide computational domain, and reproduced the convective motion and the gravity waves excited by convection. Breaking of gravity waves is suggested to be caused by shear instability and convective instability. Furthermore, we could understand the height of breaking of gravity waves and the amplitude of gravity waves in comparison with the observational results of radio wave occultation observation.

研究分野：惑星大気科学

キーワード：大気重力波 電波掩蔽 金星

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

大気重力波は、地球では運動量を鉛直輸送し、帯状風分布を変え、子午面循環を駆動して大気の構造形成に関わっている。砕波乱流は運動量やエネルギー、大気物質を拡散輸送し、大気構造を変化させる。このような重要性にも関わらず、空間スケールが小さいために観測手段が限られること、大気循環モデルではグリッドスケール程度以下であり再現が困難であることから、地球以外の惑星における重力波の特性はほとんどわかっていない。

我々は、同じく地球型惑星である金星に注目する。金星は大気量や自転速度が大きく異なるため、励起や減衰の過程に違いが生じる可能性がある。たとえば金星では大気密度が大きいため、励起源となる気象擾乱の時間スケールがより長く、重力波の卓越周期がより長いかもしれない。また大気密度の違いから、CO<sub>2</sub>の赤外放射がより効果的であるかもしれない。地球の比較により、重力波の特性や役割が惑星ごとの条件によってどう変わるのかを理解できると期待される。

重力波が背景大気と相互作用する主たるプロセスとして、水平位相速度と背景風速が等しくなる臨界高度の近くで波が停滞して鉛直波長が短くなり、シア不安定や対流不安定を引き起こして砕波することが挙げられる。ここでは鉛直波長が1 km程度以下の波が重要となるが、このスケールを惑星大気の広範囲で観測する手段はこれまで存在せず、金星でも観測の空白域である。

重力波の励起過程も謎に包まれている。地形に風が吹き付けることによる励起（山岳波）は比較的理論的に扱いやすいため数値モデルによる研究例があるが、金星において重力波の振幅はあまり表面地形と相関しておらず、対流など他の励起源の存在が強く示唆されている。地球以外の惑星においては対流の物理そのものが初期的な研究段階にあるために、そこからどのような重力波が放出されるのかは理論的にも調べられていない。

惑星大気中の重力波の励起、伝搬、散逸過程を理解するために、高空間分解能のリモートセンシングと、観測結果と直接比べることでできる現実的な数値実験によるブレイクスルーが求められている。

### 2. 研究の目的

電波掩蔽観測では、探査機が地上局から見て惑星の背後を通過する際、探査機と地上局を結ぶ電波が惑星大気を通過し屈折することを利用する。受信周波数変動から大気の屈折率の高度分布を求め、そこから温度の高度分布を求める。従来の電波掩蔽においては各時刻の受信周波数から電波経路を復元する幾何光学解法が用いられてきたが、電波の広がり（Fresnel スケール）のため鉛直分解能が1 km程度に制限されることや、複数の経路の電波が重なりあう多重波伝搬が起こると正しく解を得られない、といった問題があった。そこで我々は、波形データ全体を同時にスペクトル解析する電波ホログラフィの一種である Full Spectrum Inversion (FSI) を惑星大気に応用し、問題を解決する。

重力波の励起源として、重要性が認識されているながら研究が遅れている対流励起の数値計算を行い、重力波の励起から伝搬・散逸過程までを1つのモデルの枠組の中で掌握する。このことにより電波掩蔽観測によってとらえられた重力波と乱流層を解釈し、地球の重力波の研究も参照して惑星間の比較を行い、惑星ごとの条件の違いが重力波の特性にどう影響するのかを理解する。

### 3. 研究の方法

電波ホログラフィにより、高度分解能 100m 程度で温度プロファイルを得ることを達成し、従来とらえられなかった短波長重力波や砕波で作られる薄い乱流層（中立層）を検出するとともに、多重波伝搬のために正しく計測できなかった対流層上端の温度極小の構造をとらえる。短鉛直波長の重力波の分布、乱流層の分布、励起源の有力候補である対流層の構造を明らかにする。Venus Express と日本の金星探査機「あかつき」が取得する電波掩蔽データをこの手法で解析する。

金星の対流と重力波の伝播を調べるために、高い鉛直解像度と鉛直方向に広い計算領域（高度 35~130 km）を兼ね備えた数値シミュレーションを行う。2次元の実験から3次元の実験への段階的に進め、硫酸雲の雲物理を取り入れた対流モデルに到達する。従来の3次元シミュレーション（Lefevre et al., 2017）における計算領域（36 x 36 x 30 km）と鉛直解像度（dz = 145 m）よりも大きく改善することにより、重力波に伴う熱と運動量の輸送を議論することが可能となる。

### 4. 研究成果

従来の電波掩蔽観測では捉えられなかった微細温度構造を抽出するために、電波ホログラフィ法により Venus Express と「あかつき」の電波掩蔽観測データを解析した。多重波伝搬が生じる領域でも温度分布を導出することに成功するとともに、鉛直スケール数百 m の短波長重力

波や薄い中立層が多数存在することを見出した。中立層では乱流による混合が起こっていると考えられる。このような層構造は臨界層の近くで短鉛直波長の大气重力波が砕波しつつあることを示唆する。また、鉛直分解能を向上した温度プロファイルから鉛直波数スペクトルを求め、これまでとらえられていなかった微小スケールまで飽和重力波のスペクトルに概ね従うこと、中高緯度の重力波の振幅が大きいことを見出した。

新たな電波掩蔽解析からは、中高緯度の雲頂付近にシャープな温度極小が見られ、温度極小の直下が断熱温度勾配になっていることもわかった。この領域では対流が生じているはずである。このことは、雲頂付近における放射冷却だけではなく、対流プルームが高高度まで到達し温度極小の構造を作っていることを示唆している。対流層とその上の安定層が薄い遷移領域を挟んで隣り合っている状況は、対流プルームが安定層をたたき重力波を生成するのに好条件である。鉛直波数スペクトルにおいて中高緯度の重力波の振幅が大きいことと整合する。

また、「あかつき」の電波掩蔽データのシンチレーション解析により、過去の理論的研究から提案されている「大气重力波が引き起こす気温擾乱が電波シンチレーションを引き起こしている」という仮説を検証し、観測された電波シンチレーションの強度の高度分布はこの仮説と整合的であることがわかった。重力波が単色波であると仮定して重力波のパラメータを導出することにも成功した。

観測データ解析と平行して、高い鉛直解像度と鉛直方向に広い計算領域（高度 35~130 km）を兼ね備えた金星中層大気の数値シミュレーションを実施した。重力波に伴う熱と運動量の輸送を議論するために従来より高解像度化した。まず水平鉛直 2 次元の対流シミュレーションにより、対流運動と重力波の伝播が同時に得られた。また、対流圏上部における重力波の砕波を再現できた。重力波の砕波はシア不安定と対流不安定によって生じることが示唆され、さらに重力波の砕波の起こる高度と重力波の振幅は、「あかつき」の電波掩蔽測定の実験結果から得られたものと整合的であった。次に 3 次元の対流計算を実施した。このとき対流層では鉛直方向の速度は約 2 m/s であり、この値は金星気球ミッションにより観測された鉛直速度と整合的である。対流層より上部では、対流によって引き起こされる重力波と重力波に伴う温位擾乱が見られ、温位偏差と鉛直速度の振幅は高さと共に増加する。一方で、現在の高度分解能 62.5 m では重力波の砕波は再現できなかった。さらなる高分解能シミュレーションの実行と重力波の解析が今後の課題である。

さらに、このような対流層内における硫酸雲の生成消滅過程を計算可能とするために、Imamura and Hashimoto (1998) に基づいた雲微物理スキームを開発し、数値モデルへ導入した。観測されている値と整合的な雲量が再現され、対流によって雲が維持されることが確かめられた。しかし再現された雲は観測に比べ水平方向の一様性が高く、現実の金星大気においてはより大きなスケールの大气擾乱による不均一生成過程が存在することが示唆された。今後はこの雲モデルに放射エネルギー輸送を組み入れることにより放射と力学の結合を正しく再現し、より定量的に確からしい重力波励起シミュレーションとそのことによる重力波の特性の理解が可能となることを期待できる。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 7 件)

- ① Hiroki Kashimura, Norihiko Sugimoto, Masahiro Takagi, Yoshihisa Matsuda, Wataru Ohfuchi, Takeshi Enomoto, Kensuke Nakajima, Masaki Ishiwatari, Takao M. Sato, George L. Hashimoto, Takehiko Satoh, Yoshiyuki O. Takahashi & Yoshi-Yuki Hayashi, Planetary-scale streak structure reproduced in high-resolution simulations of the Venus atmosphere with a low-stability layer, *Nature Communications* 10, 23 (2019) 査読有, <https://www.nature.com/articles/s41467-018-07919-y>
- ② Ando, H., Takagi, M., Fukuhara, T., Imamura, T., Sugimoto, N., Sagawa, H., Noguchi, K., Tellmann, S., Pätzold, M., Häusler, B., Murata, Y., Takeuchi, H., Yamazaki, A., Toda, T., Tomiki, A., Choudhary, R., Kumar, K., Ramkumar, G., & Antonitaet, M., Local time dependence of the thermal structure in the Venusian equatorial upper atmosphere: Comparison of Akatsuki radio occultation measurements and GCM results, *J. Geophys. Res.* 123, 2270-2280 (2018) 査読有, <https://doi.org/10.1029/2018JE005640>
- ③ Imamura, T., Miyamoto, M., Ando, H., Häusler, B., Pätzold, M., Tellmann, S., Tsuda, T., Aoyama, Y., Murata, Y., Takeuchi, H., Yamazaki, A., Toda, T., Tomiki, A., Fine vertical structures at the cloud heights of Venus revealed by radio holographic analysis of Venus Express and Akatsuki radio occultation data, *J. Geophys. Res.* 123, 2151-2161 (2018) 査読有, <https://doi.org/10.1029/2018JE005627>
- ④ Kouyama, T., Imamura, T., Taguchi, M., Fukuhara, T., Sato, T. M., Yamazaki, A., Futaguchi, M., Murakami, S., Hashimoto, G. L., Ueno, M., Iwagami, N., Takagi, S., Takagi, M., Ogohara, K., Kashimura, H., Horinouch, T., Sato, N., Yamada, M., Yamamoto, Y., Ohtsuki, S., Sugiyama, K., Ando, H., Takamura, M., Yamada, T., Satoh, T., Nakamura, M., Topographical and local time dependence of large stationary gravity waves observed at the cloud top of Venus. *Geophys. Res. Lett.*, 44, 12, 098-12, 105. (2017)

査読有, Doi:10.1002/2017GL075792

- ⑤ Sánchez-Lavega, A., S. Lebonnois, T. Imamura, P. Read, D. Luz, The Atmospheric Dynamics of Venus, Space Sci. Rev. 212, 1541-1616, 査読有, 2017. DOI 10.1007/s11214-017-0389-x
- ⑥ Takeshi Imamura, Hiroki Ando, Silvia Tellmann, Martin Pätzold, Bernd Häusler, Atsushi Yamazaki, Takao M. Sato, Katsuyuki Noguchi, Yoshifumi Futaana, Janusz Oschlisniok, Sanjay Limaye, R. K. Choudhary, Yasuhiro Murata, Hiroshi Takeuchi, Chikako Hirose, Tsutomu Ichikawa, Tomoaki Toda, Atsushi Tomiki, Takumi Abe, Zen-ichi Yamamoto, Hirotomo Noda, Takahiro Iwata, Shin-ya Murakami, Takehiko Satoh, Tetsuya Fukuhara, Kazunori Ogohara, Ko-ichiro Sugiyama, Hiroki Kashimura, Shoko Ohtsuki, Seiko Takagi, Yukio Yamamoto, Naru Hirata, George L. Hashimoto, Manabu Yamada, Makoto Suzuki, Nobuaki Ishii, Tomoko Hayashiyama, Yeon Joo Lee and Masato Nakamura, Initial performance of the radio occultation experiment in the Venus orbiter mission Akatsuki, Earth Planet Space 69:137, 2017. 査読有, doi.org/10.1186/s40623-017-0722-3
- ⑦ Ando, H., T. Imamura, N. Sugimoto, M. Takagi, H. Kashimura, S. Tellmann, M. Pätzold, B. Häusler, and Y. Matsuda, Vertical structure of the axi-asymmetric temperature disturbance in the Venusian polar atmosphere: comparison between radio occultation measurements and GCM results, J. Geophys. Res. 122, 2017. 査読有, doi:10.1002/2016JE005213

[学会発表] (計 8 件)

- ① Takagi, M., N. Sugimoto, H. Kashimura, H. Ando, and Y. Matsuda, Mean meridional circulation in the Venus upper atmosphere, Symposium on Planetary Science 2019, 2019 年
- ② Sagawa, H., Sandor, B., Clancy, R. T., Imamura, T., Ando, H., Ground-based sub-mm observations of Venus upper atmosphere using JCMT in coordination with Akatsuki Radio Science experiment, Japan Geoscience Union Meeting 2018, 2018 年 (招待講演)
- ③ Takeshi Imamura, Hiroki Ando, Katsuyuki Noguchi, Silvia Tellmann, Martin Patzold, Bernd Hausler, R. K. Choudhary, Structure in Venus' sub-cloud atmosphere revealed by Akatsuki radio occultation experiments, JpGU 2018(国際学会), 2018 年
- ④ Ando, H., M. Takagi, N. Sugimoto, H. Sagawa, Y. Matsuda, Theoretical study of the Venus cloud by a general circulation model, AGU 2018(国際学会), 2018 年
- ⑤ Sugiyama, K., Odaka, M., Nakajima, K., Ishiwatari, M., Imamura, T., Hayashi, Y.-Y., A Three-dimensional Numerical Simulation of Venus' Cloud-level Convection, JpGU 2018(国際学会), 2018 年
- ⑥ Takeshi Imamura, Super-rotation from Venus observations, Understanding the Diversity of Planetary Atmospheres (ISSI Workshop), 2018 年 (招待講演)
- ⑦ Takeshi Imamura, Hiroki Ando, Katsuyuki Noguchi, Silvia Tellmann, Martin Patzold, Bernd Hausler, R. K. Choudhary, Initial results of the radio occultation experiment in the Venus orbiter mission Akatsuki, EPSC 2017(国際学会), 2017 年
- ⑧ Takeshi IMAMURA, Mayu MIYAMOTO, Hiroki ANDO, Bernd HAUSLER, Martin PATZOLD, Silvia TELLMANN, Toshitaka TSUDA, Yuichi AOYAMA, Radio holographic analysis of Venus radio occultation data, AOGS 2017(国際学会), 2017 年

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等 なし

## 6. 研究組織

### (1) 研究分担者

研究分担者氏名 : 安藤 紘基

ローマ字氏名 : ANDO, Hiroki

所属研究機関名 : 京都産業大学

部局名 : 理学部

職名：研究員

研究者番号（8桁）：00706335

研究分担者氏名：中島 健介

ローマ字氏名：NAKAJIMA, Kensuke

所属研究機関名：九州大学

部局名：理学研究院

職名：助教

研究者番号（8桁）：10192668

研究分担者氏名：林 祥介

ローマ字氏名：HAYASHI, Shosuke

所属研究機関名：神戸大学

部局名：理学研究科

職名：教授

研究者番号（8桁）：20180979

研究分担者氏名：野口 克行

ローマ字氏名：NOGUCHI, Katsuyuki

所属研究機関名：奈良女子大学

部局名：自然科学系

職名：助教

研究者番号（8桁）：20397839

研究分担者氏名：杉山 耕一郎

ローマ字氏名：SUGIYAMA, Kohichiro

所属研究機関名：松江工業高等専門学校

部局名：その他部局等

職名：准教授

研究者番号（8桁）：60463733

(2) 研究協力者

研究協力者氏名：

ローマ字氏名：

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。