

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 23 日現在

機関番号：82645

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2010～2013

課題番号：22244060

研究課題名(和文) 2機の金星探査機による相補的観測データを用いた金星大気物質循環の解明

研究課題名(英文) Study of the atmospheric circulation of Venus using observational data taken by Venus orbiters

研究代表者

中村 正人 (NAKAMURA, MASATO)

独立行政法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・教授

研究者番号：20227937

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 26,500,000円、(間接経費) 7,950,000円

研究成果の概要(和文)：欧州の金星探査機Venus Expressにより得られた観測データを金星探査機「あかつき」のデータ解析システムで分析するとともに、大気大循環・放射輸送・雲物理・大気化学の数値シミュレーションを行い、大規模風系の維持と大気物質の循環のメカニズムを探った。これらの成果をもとに、残された問題点を洗い出し、2015年に改めて周回軌道投入を目指す「あかつき」の観測計画の最適化を進めた。

研究成果の概要(英文)：The mechanism of the atmospheric circulation and the transport processes of atmospheric constituents were studied by analyzing observational data taken by Venus Express and ground-based observations. The data were processed using the data analysis softwares developed for the Japanese Venus orbiter Akatsuki, which will be inserted into a Venus orbit in 2015. The analysis revealed various aspects of the atmosphere, such as three-dimensional structures of planetary-scale waves, dissipation of gravity waves at high altitudes, complicated vertical distributions of the upper haze layer, latitudinal and local-time dependence of the cloud height, and long-term variations of the cloud albedo. Numerical simulations, and the observed features were compared with those model results to understand the mechanism. These studies clarified remaining issues to be solved, such as the role of meso-scale processes, chemical processes governing the cloud albedo, and the mechanism of climate variation.

研究分野：数物系科学

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：金星大気 大気力学 大気科学 雲物理 Venus Express あかつき

### 1. 研究開始当初の背景

似通った姿で誕生したと考えられる金星と地球は、どのように異なる気候システムを持ち、どのようにして異なる進化の道筋をたどったのか。これを知ることにより、地球型惑星が多様な姿に分化するメカニズムを解くカギがある。金星は入射太陽光のほとんどを跳ね返す濃硫酸の雲に覆われ、その下には主に二酸化炭素からなる濃い大気があり、その温室効果のために地表温度は 460 K に達する。金星は 243 地球日もかけてゆっくりと自転しているが、大気はその 60 倍もの速さで東から西へと循環する。気候を支配する雲の分布や化学物質の循環がどのような物理過程によって生じているのかは、気象プロセスや化学組成の情報不足しているためによくわかっていない。

このような問題意識のもとに我々は、金星の大気力学とそれがもたらす物質循環の解明を目指した。それを可能にするのは、人類が初めて手にする 2 機の金星周回機による観測データである。1 機目は金星周回軌道上で運用中の欧州のビーナスエクスプレスであり、もう 1 機目は 2010 年末に金星に到着する予定だった日本の「あかつき」(PLANET-C)である。ビーナスエクスプレスが主として分光観測により様々な微量ガスの定量を行うのに対し、「あかつき」は赤外から紫外までの多波長の撮像により複数の高度面で雲塊を追跡し、3 次元の風速場を明らかにする。「あかつき」は 2010 年に金星周回軌道への投入に失敗したため、2 機が同時に取得したデータを組み合わせることはできなくなったが、ビーナスエクスプレスのデータを用いた研究を進めて問題点を洗い出し、2015 年に改めて周回軌道投入を目指す「あかつき」の観測計画にフィードバックしていくことが、重要である。

### 2. 研究の目的

地球とは異なる気候進化をたどった惑星、金星の大気中の物質循環を解明するために、金星周回機による観測データを解析し、理論モデルを構築する。化学組成の情報と大気力学の情報を数値モデルをもとに統合解析して、雲より上の光化学領域と雲より下の熱化学領域を結ぶ惑星規模の物質循環の素過程を明らかにする。また、メソスケールの対流雲の力学を明らかにするとともに惑星規模の大気力学を探る。これらの研究により、金星大気の大気構造、風系、雲の分布、アルベドなどがどのようなメカニズムで調節されているのかを理解する。

### 3. 研究の方法

ビーナスエクスプレスによる膨大な衛星観測データを統合処理して新たな発見に導くために、衛星プロジェクトとは別に解析・理論の専門家を中心とする新たな研究チームを組織し、ツールの作成、データ解析、理論モデルの構築までを行う。観測された雲量や微量

ガス濃度や風速ベクトルのデータを緯度経度グリッドで解析するために、「あかつき」の高次プロダクトを NetCDF フォーマットで扱うためのツールに手を加えて利用する。

数値モデル研究については、系統的なパラメータスタディを行うとともに観測可能な量に結果がどう反映されるかを調べ、観測データとの比較によって理解を進める。放射輸送モデルは大月やはしもとがこれまでに構築してきたものを活用する。雲物理モデルについては、今村が開発したものをベースに、McGouldrick & Toon (2007) の放射-対流フィードバックのスキームを導入する。金星大気の高速循環のメカニズムについては研究者コミュニティで統一見解がないため、大気循環モデルは複数のシナリオに基づくものを用意する。研究分担者である高木らの熱潮汐波によるモデル、山本らの子午面循環によるモデルを採用する。

ハワイ山上の IRTF や「すばる」といった国内外での大型望遠鏡により、衛星でカバーされない領域や波長のデータを取得し、これも合わせて解析する。ビーナスエクスプレスではカバーしきれない金星全面での大気組成の観測や上層大気の大気光の観測を行う。

これらの成果をもとに、残された課題を明確化し、金星到着が遅れている「あかつき」の観測計画の最適化のためにフィードバックする。

### 4. 研究成果

(1) Venus Express 搭載 VMC による紫外線画像を用いて、金星の雲の測光関数(反射率の太陽天頂角・射出角・位相角に対する依存性)を求めた。測光関数は大気の光学観測により物理的な情報を抽出する際に必須のものであり、「あかつき」の観測データの処理に活用される予定である。VMC による画像を用いて、雲の移動を追跡することにより風速ベクトルを推定するための自動化された雲追跡システムも開発した。また、Venus Express 搭載 S01R による分光観測データを用いて、エアロゾルの光学的厚さの緯度分布と時間変動を明らかにし、この結果から雲の生成・維持過程の理解を進めた。

(2) 大型望遠鏡により近赤外での分光観測を行い、二酸化炭素による吸収バンドを分析することにより雲頂高度の時空間変動を初めて明らかにした。ここから雲の模様の回転周期や、赤道ケルビン波と思われる惑星スケールの波動の水平構造を求め、平均流と波動の相互作用について議論した。

(3) 金星大気大循環の数値シミュレーションに必要な精密な放射輸送モデルを開発した。これを採用した高解像度大気大循環モデルを用いて、金星雲層付近の力学的不安定を考察した。金星上層大気(中間圏・熱圏)の大気大循環モデルも構築し、下層から上方伝播す

る惑星規模波動の影響を明らかにした。

(4)巡航中の「あかつき」の4つの搭載カメラを用いて、1300万km程度の遠距離から金星の測光観測を実施した。紫外から赤外までの5波長で測光データを得て、反射率の太陽位相角依存性や周期的な時間変化をとらえ、雲層の物理化学的性質や時空間変動の情報を得た。IR1カメラによる波長0.90 $\mu\text{m}$ とのデータとIR2カメラによる波長2.02 $\mu\text{m}$ のデータを用いて、両者に整合するような金星雲モデルを構築し、雲粒子分布への制約を与えた。この雲モデルでは雲層上部に多くの大粒子が存在し、従来の知見を修正するものとなっている。

(5)金星探査機で観測された気象現象を再現し物理的な解釈を加えるために、金星の中層大気大循環モデルとマイクロスケール気象モデルを用いて数値実験を行った。金星の中層大気大循環モデルでは、超回転や様々な雲模様を再現した。マイクロスケール気象モデルでは、地表付近の対流構造やその輸送過程を明らかにした。

(6)2012年の金星日面通過時に太陽観測衛星「ひので」から金星大気を観測し、太陽風中の多価イオンが金星の超高層大気中の中性粒子と電荷交換反応することにより発光するX線を捉えることを目指して、発光光量を見積もって観測方法を策定した。

(7)欧州の金星探査機 Venus Express により得られた時間的に連続した惑星画像を用いて、雲の移動から風速分布を求める方法の改良を行った。とくに、雲の移動量をサブピクセル精度で求める際に問題となる peak-locking error の低減手法の初期検討を行った。こうして高度化したアルゴリズムで Venus Express による紫外画像から得られた高次プロダクトをアーカイブするとともに、「あかつき」データを半自動的にデータ処理するパイプラインを構築した。

(8)Venus Express の紫外画像に見られるアルベドのパターンと散乱位相角依存性の解析により、雲層内の太陽光吸収物質の高度分布が数年スケールで顕著に変動していること、それが二酸化硫黄の変動と相関していることを見いだした。

(8)Venus Express 電波掩蔽データの解析手法を改良して高精度の温度分布を導出し、大気重力波の伝搬・砕波の全球的な特性を解明した。また、従来不可能であった低高度までの温度分布を得ることに成功して、下層大気温度の全球分布を明らかにした。

(9)雲層内の対流のエネルギー収支を数値流体モデルで調べた。下層大気からの熱放射が

雲底を加熱して対流を駆動する金星では、日射が強い低緯度や日中で対流が抑制されるとい、通常の惑星上の対流と異なる性質を明らかにした。

(10)大気大循環モデルにより高速風と潮汐波が存在する状況下の極渦を調査し、水平収束や渦度により雲形態や極渦鉛直構造がどう決まるかを明らかにした。また、雲層下部のマイクロスケール擾乱により形成される2種の大気安定度鉛直構造(波動型と局所増大型)を3次元領域モデル実験で示した。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計15件)

山田学, 小郷原一智, 神山徹, はしもとじょーじ, 高木征弘, 山崎敦, 山本幸生, 今村剛, 一番星へ行こう!日本の金星探査機の挑戦その11~科学データ地上処理系~, 日本惑星科学会誌「遊・星・人」, 査読無し, 19, 2010, 157-160

Yamamoto, M., Microscale simulations of Venus' convective adjustment and mixing near the surface: thermal and material transport processes, Icarus, 査読有り, 211, 2010, 993-1006

Takagi, M., K. Suzuki, H. Sagawa, P. Baron, J. Mendrok, Y. Kasai, and Y. Matsuda, Influence of CO<sub>2</sub> line profiles on radiative and radiative-convective equilibrium states of the Venus lower atmosphere, J. Geophys. Res., 査読有り, 115, 2010, E06014

Takagi, S. and N. Iwagami, Contrast sources for the infrared images taken by the Venus mission AKATSUKI, Earth Planets Space, 査読有り, 63, 2011, 435-442

N. Hoshino, H. Fujiwara, M. Takagi, Y. Takahashi, Y. Kasaba, Characteristics of planetary-scale waves simulated by a new Venusian mesosphere and thermosphere general circulation model, Icarus, 査読有り, 217, 2011, 818-830

Ogohara, K., T. Kouyama, H. Yamamoto, N. Sato, M. Takagi, T. Imamura, Automated cloud tracking system for the Akatsuki Venus Climate Orbiter data, Icarus, 査読有り, 217, 2012, 661-668

Yamamoto, M. and M. Takahashi, Venusian middle-atmospheric dynamics in the presence of a strong planetary-scale 5.5-day wave, Icarus, 査読有り, 217, 2011, 702-713

Matsui, H., N. Iwagami, M. Hosouchi, S. Ohtsuki, and G. L. Hashimoto, Latitudinal distribution of HDO abundance above Venus' clouds by ground-based 2.3  $\mu\text{m}$  spectroscopy, Icarus, 査読有り, 217, 2011, 610-614

Ogohara, K., T. Kouyama, H. Yamamoto,

N. Sato, M. Takagi, and T. Imamura, A newly developed cloud tracking system for the Venus Climate Orbiter Akatsuki and preliminary results using Venus Express data, *Theoretical and Applied Mechanics Japan*, 査読有り, 60, 2012, 195-204

Kouyama, T., T. Imamura, M. Nakamura, T. Satoh and Y. Futaana, Horizontal structure of planetary-scale waves at the cloud top of Venus deduced from Galileo SSL images with an improved cloud-tracking technique, *Planet Space Sci.*, 査読有り, 60, 2012, 207-216

Taguchi, M. T., Fukuhara, M., Futaguchi, M. Sato, T. Imamura, K. Mitsuyama, M. Nakamura, M. Ueno, M. Suzuki, N. Iwagami, and G. L. Hashimoto, Characteristic features in Venus' nightside cloud-top temperature obtained by Akatsuki/LIR, *Icarus*, 査読有り, 219, 502-509, 10.1016/j.icarus.2012.01.024, 2012.

Tellmann, S., B. Häusler, D. P. Hinson, G. L. Tyler, T. P. Andert, M. K. Bird, T. Imamura, M. Paetzold, and S. Remus, Small-scale temperature fluctuations seen by the VeRa Radio Science Experiment on Venus Express, *Icarus*, 査読有り, 221, 471-480, 2012.

Kouyama, T., T. Imamura, M. Nakamura, T. Satoh, and Y. Futaana, Long-term variation in the cloud-tracked zonal velocities at the cloud top of Venus deduced from Venus Express VMC images, *J. Geophys. Res.*, 査読有り, 118, 37-46, DOI:10.1029/2011JE004013, 2013

Imamura, T., T. Higuchi, Y. Maejima, M. Takagi, N. Sugimoto, K. Ikeda, and H. Ando, Inverse insolation dependence of Venus' cloud-level convection, *Icarus*, 査読有り, 228, 181-188, 2014.

Nakamura, M., Y. Kawakatsu, C. Hirose, T. Imamura, N. Ishii, T. Abe, A. Yamazaki, M. Yamada, K. Ogohara, K. Uemizu, T. Fukuhara, S. Ohtsuki, T. Satoh, M. Suzuki, M. Ueno, J. Nakatsuka, N. Iwagami, M. Taguchi, S. Watanabe, Y. Takahashi, G. L. Hashimoto, H. Yamamoto, Return to Venus of the Japanese Venus Climate Orbiter AKATSUKI, *Acta Astronautica*, 査読有り, 93, 2014, 384-389

[学会発表](計14件)

Yamamoto, M. and M. Takahashi, Application of GCM to the Venus middle atmosphere dynamics, *International Venus Conference*, 2010.06.22, Aussois, France

Yamamoto, M., M. Takagi, K. Ikeda, M. Takahashi, Y. Matsuda, Development of

Venus GCM toward the AKATSUKI mission, 2010 VEXAG International Workshop, 2010.09.01, Madison, USA

Masahiro Takagi, Venus Climate Orbiter Akatsuki mission: Data processing for Venus meteorology, *Royal Astronomical Society Meeting "5 Years of Venus Express, and a look to the Future"*, 12 November 2010, London, United Kingdom

Masahiro Takagi and Yoshihisa Matsuda, Modeling of the Venus atmospheric circulation with a new radiation transfer model, *EPSC 2010*, 19-24 September 2010, Rome, Italy

Masahiro Takagi and Yoshihisa Matsuda, Mean meridional circulation in the Venus lower atmosphere simulated by a GCM with a radiative transfer model, *International Venus Conference*, 20-26 June 2010, Aussois, France

Yamamoto, M., Microscale simulations of convective adjustment and mixing: Application to the Venus atmosphere, *European Geosciences Union General Assembly 2011*, 2011.04.05, Vienna, Austria

M. Hosouchi, N. Iwagami, S. Ohtsuki, and M. Takagi, Wave signature in the Venus cloud layer at 60 km observed by ground-based dayside infrared spectroscopy, *EPSC-DPS Joint Meeting 2011*, 2011/10/6, Nantes, France

Ogohara, K., T. Kouyama, H. Yamamoto, N. Sato, M. Takagi, and T. Imamura, Development of a Cloud Tracking System for Akatsuki, and its Application to Venus Express VMC Data, *The 28th International Symposium on Space Technology and Science*, 5-12 June 2011, Okinawa, Japan

H. Ando, T. Imamura, S. Tellmann, M. Paetzold and B. Häusler, Vertical wavenumber spectra of gravity waves in terrestrial planetary atmospheres, 10th AOGS, 2013年6月, ブリスベン/オーストラリア

H. Ando, T. Imamura, Vertical structure of Venusian polar vortex investigated by radio occultation, technique in Venus Express, *Venus Conference*, 2013年6月, カターニア/イタリア

OGOHARA Kazunori, KASHIMURA Hiroki, KO UYAMA Toru, SATO Naoki, TAKAGI Masahiro, IMAMURA Takeshi, HORINOCHI Takeshi, Limb fitting and cloud tracking for the study of the Venus atmosphere, *International Venus Workshop*, 78, Catania, Italy, 2013/06/10.

Hashimoto, G.L., M. Yamada, and T. Satoh, Temporal variation of UV reflectivity of Venus: VEX/VMC data analysis, *International Venus Workshop*, 13 June 2013, Ca

tania, Italy

M. Yamamoto & M. Takahashi, Simulation of Venus' polar vortex in the presence of diurnal thermal tide, International Venus Conference, 2013年6月10日, Catania, Italy

T. Imamura, T. Higuchi, Y. Maejima, M. Takagi, N. Sugimoto, K. Ikeda, H. Ando, Inverse insolation dependence of Venus' s cloud-level convection, International Venus Workshop, 13 June 2013, Catania, Italy

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

中村 正人 (NAKAMURA, Masato)

宇宙航空研究開発機構・教授

研究者番号：20227937

### (2)研究分担者

松田 佳久 (MATSUDA, Yoshihisa)

東京学芸大学・教育学部・教授

研究者番号：60134772

高木 征弘 (TAKAGI, Masahiro)

京都産業大学・理学部・准教授

研究者番号：00323494

今村 剛 (IMAMURA, Takeshi)

宇宙航空研究開発機構・准教授

研究者番号：40311170

はしもとじょーじ (Hashimoto, George)

岡山大学・自然科学研究科・准教授

研究者番号：10372658

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

大月 祥子 (OHTSUKI, Shoko)

専修大学・商学部・准教授

研究者番号：90523291

小郷原 一智 (OGOHARA, Kazunori)

滋賀県立大学・工学部・助教

研究者番号：50644853

林 祥介 (HAYASHI, Shosuke)

神戸大学・理学部・教授

研究者番号：20180979