

令和元年6月19日現在

機関番号：82645

研究種目：基盤研究(B) (海外学術調査)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H05738

研究課題名(和文)ハワイ高高度施設と「あかつき」のコラボ：金星の後光から探る大気駆動メカニズム

研究課題名(英文) Collaboration between Akatsuki and high-altitude observatories: Venus glory and atmospheric dynamics in clouds

研究代表者

佐藤 毅彦 (Sato, Takehiko)

国立研究開発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：10297632

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 10,960,000円

研究成果の概要(和文)：金星「後光」を一つのシグナルとし、厚さ20 kmもの雲層中で何が起きているかを解き明かそうと本研究を実施し、(1)後光観測により金星雲の粒径を特定、(2)雲頂高度の時間空間変化を定量化、(3)中下層を探る夜面データを精査した。雲層内の循環やそこに存在するさまざまな大気波動現象の寄与が見えつつある。「あかつき」LIRが発見した重力波の一部はわれわれのデータにも見えており、雲層内で引き起こされる循環と地面から伝わる波、その他の複合的寄与の研究へとつながる。数値モデル計算との連携が「観測された現象の物理的意味を解釈」するのに有用であることを示し、次の研究発展への手がかりを得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

金星は「地球の双子星」であるとともに、実は「系外惑星(第2の地球)」を理解する上で重要な対象と考えられている。その金星について大気の性質の基本を理解し、さまざまな現象を理論的に説明できるようになることは、宇宙における惑星環境の普遍的な理解へとつながるものである。母星からのエネルギーを昼面で受け止め、それを大気内循環の駆動源とする、そうした基本構造の理解を目指した研究を実施したものであり、ここから得られたもの(や、得られつつあるもの)は、金星科学にとどまらずより広範な応用範囲と影響範囲をもつものである。

研究成果の概要(英文)：We have carried out a research project to understand what is going on with the Venus' enormous cloud system (vertical extent ~20 km) by investigating its "glory" as a remarkable signature. Obtained results include: (1) size of Venus cloud particles has been quantified by observing glories; (2) spatio-temporal variations of cloud-top altitude are characterized; and (3) the middle-to-lower cloud layer were intensively investigated by analyzing Akatsuki/IR2 night-side data. It is becoming clearer how atmosphere circulates and how various atmospheric waves contributes in the clouds. The stationary gravity-wave features, discovered by LIR, are also (partially if not all) visible in our data set. These will lead us to better understandings how gravity waves, circulation in clouds, and others altogether contribute to generate/maintain the peculiar meteorology of Venus. We also demonstrated the usefulness of applying numerical simulation to infer the underlying physics of observed phenomena.

研究分野：惑星大気科学

キーワード：金星大気 後光 光散乱 エアロソル あかつき 高高度施設

1. 研究開始当初の背景

金星全球を 20 km もの厚さで覆う雲層。太陽光の大部分はそこで吸収され、金星大気運動の主たる駆動力を発生すると考えられているが、メカニズムの詳細は不明なままだ(図 1)。この未解明問題へ挑むべく、日本の金星探査機「あかつき」は 2015 年 12 月に金星周回軌道に入り、紫外～赤外をカバーする 5 台の撮像カメラで観測を開始する(Nakamura et al., 2016、学⑭⑯)。

「あかつき」は 2011 年 3 月、金星の少し太陽寄りを通り、満月のような金星(位相角 0°)の測光観測を実施している(Satoh et al., 2015)。このとき IR1 カメラ光度曲線では、位相角 18° 付近の増光が認められた(図 2)。「後光」ととらえたのである。後光は Venus Express 探査機によっても観測され、粒子の特徴を最も鋭敏に見分ける情報源である(Petrova et al., 2015; Rossi et al., 2015)。

2. 研究の目的

Hansen & Hovenier (1974) が金星主雲を「半径 1.05 μm の濃硫酸液滴」と特定したとき、0°～40°位相角における直線偏光度の強い波打ち(後光)が決め手となった。われわれはこの位相角範囲を観測し、「あかつき」による金星大気の三次元描像と合わせて、雲層内大気循環に対する理解を大きく進められる。「あかつき」IR2 観測により中～下層に数 μm 以上の大粒子の増加(減少)が見られたとき、もしそれに連動する変動が上層にも見られるならば、(a)雲層内を貫くような大気循環による物質輸送(図 1)が示唆されるし、それが一切見られなければ、(b)雲層の中でいくつかの循環セルが重なり上下の独立性が高いことを示すかも知れない。このような傍証を積み重ね、大気運動とエアロゾルの増減、エアロゾルが太陽光を吸収し大気運動を駆動するメカニズムを明らかにしてゆく。

3. 研究の方法

「あかつき」の長楕円周回軌道からは、金星の「昼面が多く見える」あるいは「夜面が多く見える」時期が定期的に入れ替わる。本計画は、その特性を利用する。期間①には、地球は金星の昼側(Gd)、「あかつき」も昼側(Ad)に位置し、昼面観測モード(UVI 283, 365 nm および IR1 900 nm)である。期間⑤の後半から⑥の中盤は、夜面観測モード(Gn, An: IR2 カメラ 1.735, 2.26 μm)、期間⑧は最も理想的な、地上が昼面モード(Gd)、「あかつき」が夜面モード(An)である。これらを踏まえた期間毎の計画を以下に述べる。

- 期間①: Gd + Ad なので上層エアロゾルのみ調べられる。また、地球から見て金星が太陽の向こう側に位置する「外合」には、観測できない期間も発生する。
- 期間②～③: 「あかつき」は An に入る。IR2 夜面データを取得し、エアロゾルの性質とダイナミクス(風速変動やさまざまな擾乱)との関係を研究する。
- 期間④～⑤:
 - ◇ 「あかつき」は昼側なので、中～下層の情報は得られない。
 - ◇ これまで用いてきた偏光撮像装置 HOPS はウォラストン・プリズムを用い偏光の 2 成分(±Q または ±U)を同時に記録できる。これをダブル・ウォラストン形式に改修することで偏光の 4 成分(±Q および ±U)を同時に記録できるようにする＝観測効率を高める。
- 期間⑥: この期間、地上も「あかつき」も金星の夜面を多く見ることができ(Gn + An)。しかし「あかつき」IR2 カメラには「視野中心から 26°以内に太陽が入らないこと」という制限があり、図 5 の右側でくさび状に示された範囲内からの金星夜面観測は制限される。
- 期間⑦: 期間④と同じような観測条件であり、地上からは近赤外線分光偏光観測、上層エアロゾルの情報取得を行う。
- 期間⑧: この期間は Gd + An なので、最も理想的に上層エアロゾル特性(地上から)と中～下層エアロゾル特性(「あかつき」から)を得て組み合わせられる。

4. 研究成果

IR1, IR2 は制御装置の不調により、2016 年 12 月以降データ取得できていない。本研究計画の設定した期間①～③をカバーするものの、④には部分的にデータが存在するのみとなった。UVI, LIR 等はその後も問題なく動作し、順調にデータ取得を続けている(文献⑥⑦)。

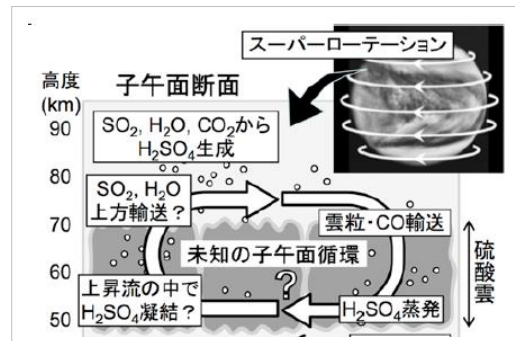


図 1: 想像される金星雲層内の大気循環。観測的には実証されていない。

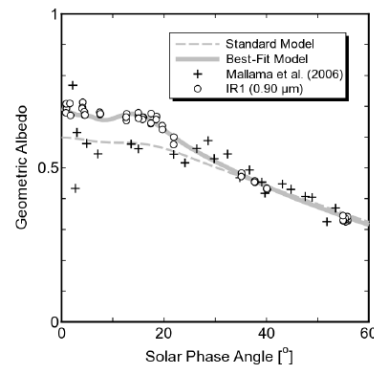


図 2: 「あかつき」IR1 による金星の光度曲線。位相角 18° 付近の盛り上がり「後光」(Satoh et al., 2015)。

(1) 期間①Ad

2016年4~5月、金星を小位相角で観測し(学⑬)、後光データを解析した。IR2固有の「点広がり関数」を近似する数学関数を構築し(論⑥)、デコンボリューションによりディスク測光の精度を高めた。改善した金星昼面データから雲頂高度の時空間変化を解析(学⑤⑧⑩、および文献⑧を投稿中)。得られた雲頂高度の描像は、過去のさまざまな結果と整合性が高い(図3)。地方時や経度に対する依存性はほぼ見られず、金星大気の代表的かつ安定した構造と解釈できる。ESA/Venus Expressでも同様の雲頂高度測定が行われたが、南極側に延びた長楕円極軌道からであったため、南北対称性は見えなかった。したがってわれわれの結果は意義あるものである。

UVIデータから「後光」成分を検出しエアロソル特性も得た(論⑤)。得られた金星上層雲の平均粒径は $r_{\text{eff}} = 1.26 \mu\text{m}$, $\tau_{\text{eff}} = 0.076$ であり、Hansen & Hovenier (1974) 以来の先行研究と整合的であった。図4にUVIの2波長における観測位相曲線とベストフィット・モデル曲線を示す。金星大気における放射伝達の計算を波長方向へ高い分解能で行う計算機コードを整理し、汎用性の高いものとした(学⑥)。

(2) 期間②~③An

2016年7月~8月のデータから「赤道ジェット」を発見した(論④)。図5右側パネルに10度Sから30度N付近まで、特に速い風が観測される。これを「赤道ジェット」と名付けた。太陽やガス惑星の赤道加速は別として、金星においてここまで明瞭な現象は過去に知られていない。突発的に発生するものと考えられるが、その発生メカニズムには雲層内循環(図1)を理解するヒントが含まれているはずである。昼面での太陽加熱起因の熱潮汐が雲層の中下部へと伝わっている可能性も示唆した(論②)。

(3) 一露光型偏光撮像装置

地上から高精度偏光観測を行うため、ウェッジド・ダブルウォラストン(WeDoWo)偏光子を持った「一露光型偏光撮像装置」を組み上げた。これを望遠鏡に装着し、遠景を撮像しての性能評価を試みた(図6)。WeDoWo偏光子は四つの偏光像を同時に生じるが、それを記録するCCD全画素を走査する時間は有限で、同時性が失われる問題がある。CCDカメラ側は長い目の露光時間を開始し、途中に置いたメカニカルシャッターを切る方法を採用し、問題を解決(軽減)した(学⑨)。

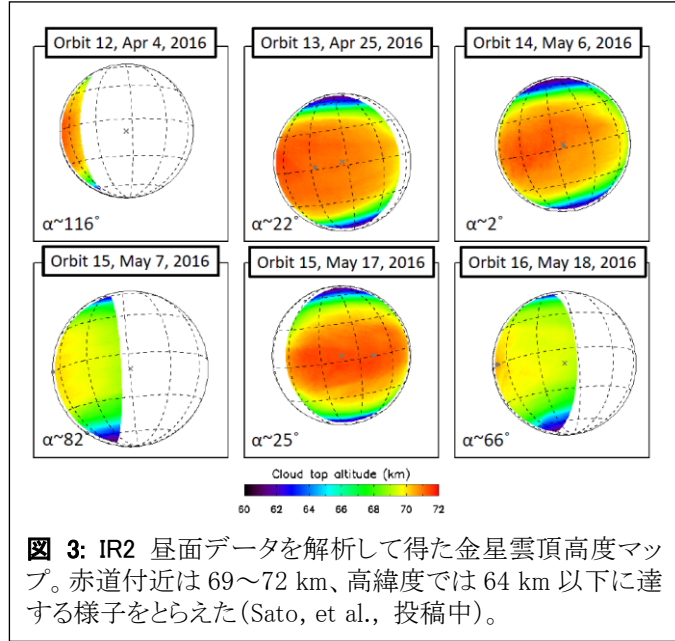


図3: IR2 昼面データを解析して得た金星雲頂高度マップ。赤道付近は69~72 km、高緯度では64 km以下に達する様子をとらえた(Sato, et al., 投稿中)。

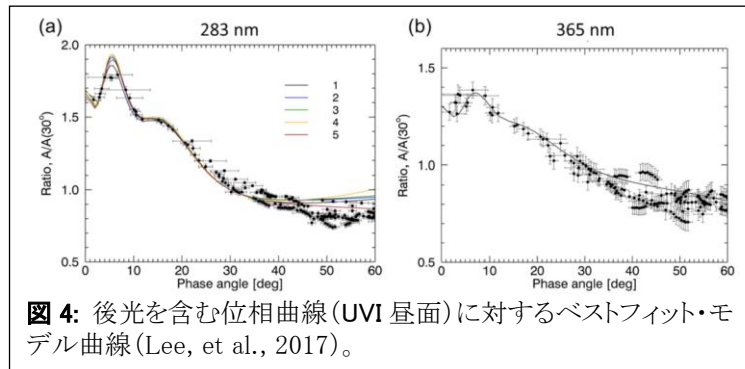


図4: 後光を含む位相曲線(UVI 昼面)に対するベストフィット・モデル曲線(Lee, et al., 2017)。

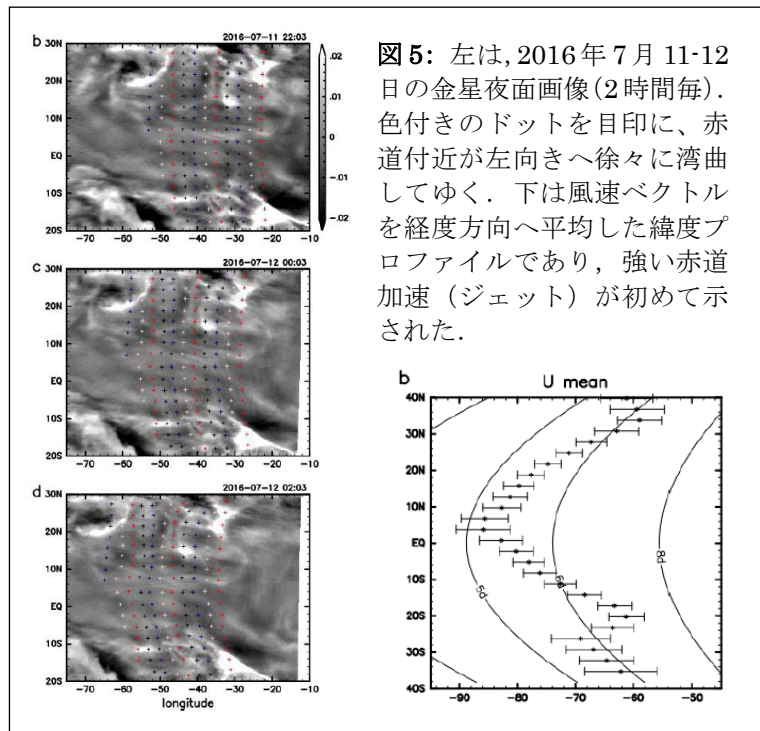


図5: 左は、2016年7月11-12日の金星夜面画像(2時間毎)。色付きのドットを目印に、赤道付近が左向きへ徐々に湾曲してゆく。下は風速ベクトルを経度方向へ平均した緯度プロファイルであり、強い赤道加速(ジェット)が初めて示された。

(4) IR2 夜面データの品質改善
 IR2 夜面データ品質を大幅に改善した（投稿準備中）。飽和した昼面部分にシミュレーション画像をはめ込む。次にデコンボリューションを行い「広がっていた光をもとの画素へ再集積」させ、クリーンな夜面を復元する原理である（RD 法）。夜面模様も本来の空間分解能を取り戻し、鮮鋭なデータが得られた（図 7）。
 復元した夜面連続画像を解析し、多数の大气渦や大气波動現象を見つけることができた（学①③）。フィルタリングによるこのような雲形態の抽出（論②③、学④）に比べ、RD 法は測光の正しさを保存する点で優れている。

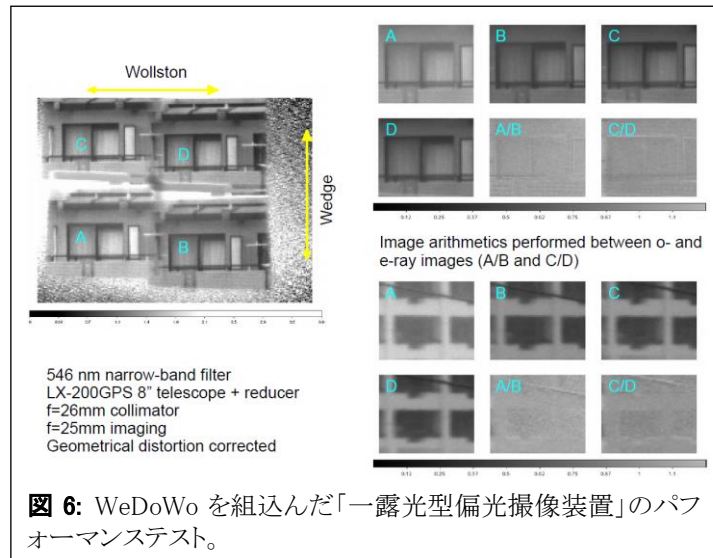


図 6: WeDoWo を組込んだ「一露光型偏光撮像装置」のパフォーマンステスト。

(5) 観測と数値計算のコラボによる大气循環の理解

IR2 夜面データの解釈について、一つの顕著な結果が得られた（論①）。図 8 は、地球シミュレータ上で金星大气運動を再現するため開発された AFES-Venus による結果を示す。IR2 が金星夜面に発見した巨大な筋状構造（パネル a の黄色い囲み）が「下降流の集中する領域（パネル b で白い部分）」として、特徴がよく再現されている。ストリークが南北対称に現れる理由は、赤道ケルビン波が南北のロスビー波を結びつけ実現していることも示された。

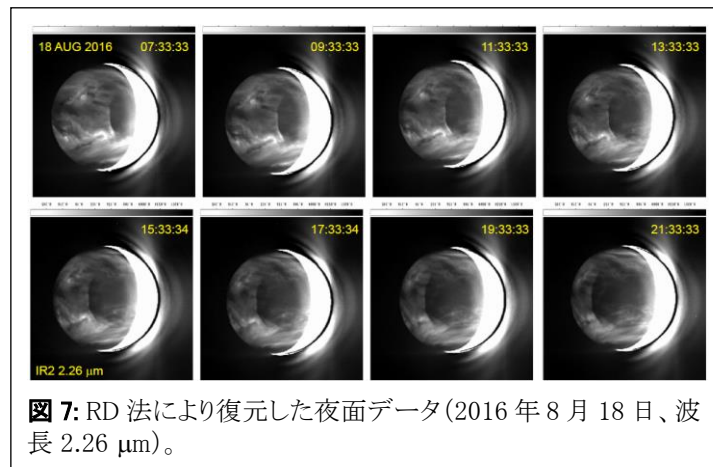


図 7: RD 法により復元した夜面データ(2016年8月18日、波長 2.26 μm)。

(6) まとめに

金星「後光」を一つのシグナルとし、厚さ 20 km に及ぶ雲層の中で何が起きているかを解き明かすため本研究を実施。後光の観測により金星雲の粒径を特定（論⑦）し、雲頂高度の時間空間変化を調べた（文献⑧を投稿中）。中下層での現象も調査し（論②④⑥）、雲層内の循環やさまざまな大气波動現象の寄与が見えつつある。山岳地形に励起された重力波が大气上層にまで伝わる姿（文献⑥）は IR2 昼面データにも見られ、その現象を解析し（学⑭、投稿準備中）ている。

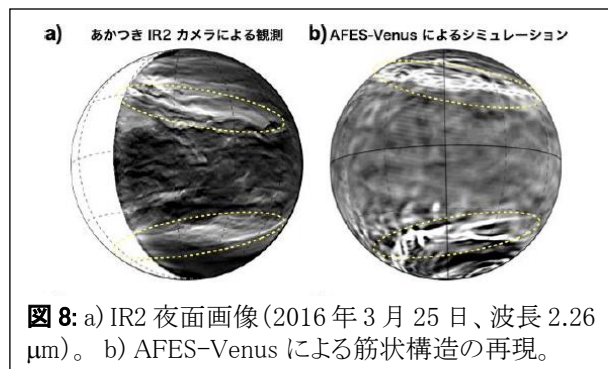


図 8: a) IR2 夜面画像(2016年3月25日、波長 2.26 μm)。 b) AFES-Venus による筋状構造の再現。

地上観測データ（学④⑩⑮、その他に研究チーム内で共有するもの）を、探査機からの情報とうまく組み合わせたいところであったが、データの処理と解析に時間がとられ手が回らなかった。研究組織構成、非常時プランニングなど、将来研究を計画する上での教訓としたい。モデル計算との連携は本質的であり、観測データ中に見られる現象の物理解釈が行えるレベルとなっている（論①）。本研究では IR2 の「点広がり関数」を定式化し、それを用いて昼面・夜面ともに測光精度を著しく改善させた（学①③⑦、投稿準備中）。これを解析して得られる諸量を数値モデルへの入力とすることで、金星大气運動の一日にわたる変化が観測と整合的に決定され、「分厚い雲」の成す役割を明らかにできると期待される。本研究は、金星科学の発展へ大きく貢献できたものと考えている。

<引用文献>

- ① Nakamura, M., et al., AKATSUKI returns to Venus, EPS, 68:75, 2016.
- ② Satoh, T., et al., Venus' clouds as inferred from the phase curves acquired by IR1 and IR2 on board Akatsuki, Icarus, 248, 213-220, 2015.
- ③ Petrova, E.V. et al., The VMC/VEx photometry at small phase angles: Glory and the physical properties of particles in the upper cloud layer of Venus. PSS 113-114,

120 – 134, 2015.

- ④ Rossi, L., et al., Preliminary study of Venus cloud layers with polarimetric data from SPICAV/Vex, PSS 113-114, 159–168, 2015.
- ⑤ Hansen, J. E., Hovenier, J. W., Interpretation of the polarization of Venus. *Journal of Atmospheric Sciences* 31, 1137-1160, 1974.
- ⑥ Fukuhara, T., et al., Large stationary gravity wave in the atmosphere of Venus, *Nature Geoscience*, 10, 85-88, doi:10.1038/ngeo2873, 2017.
- ⑦ Yamazaki, A., et al., Ultraviolet imager on Venus orbiter Akatsuki and its initial results, *EPS*, 70, 23, 2018.
- ⑧ Sato, T. M., Satoh, T., et al., Dayside cloud top structure of Venus retrieved from Akatsuki IR2 observations, submitted to *Icarus*, 2019. (査読中のためこちらに含める)

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 7 件)

- ① Kashimura, H., N. Sugimoto, M. Takagi, Y. Matsuda, W. Ohfuchi, T. Enomoto, K. Nakajima, M. Ishiwatari, T. M. Sato, G. L. Hashimoto, T. Satoh, Y. O. Takahashi, Y.-Y. Hayashi, Planetary-scale streak structure reproduced in high-resolution simulations of the Venus atmosphere with a low-stability layer, *Nature Communications*, 査読有, 10, Article number: 23, 2019. doi:10.1038/s41467-018-07919-y
- ② Peralta, J., K. Muto, R. Hueso, T. Horinouchi, A. Sánchez-Lavega, S. Murakami, P. Machado, E. F. Young, Y.-J. Lee, T. Kouyama, H. Sagawa, K. McGouldrick, T. Satoh, T. Imamura, S. S. Limaye, T. M. Sato, K. Ogohara, M. Nakamura, D. Luz, Nightside Winds at the Lower Clouds of Venus with Akatsuki/IR2: Longitudinal, Local Time, and Decadal Variations from Comparison with Previous Measurements, *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 査読有, 239, 29, 2018. doi:10.3847/1538-4365/aae844
- ③ Peralta, J., R. Hueso, A. Sánchez-Lavega, Y. J. Lee, A. García Muñoz, T. Kouyama, H. Sagawa, T. M. Sato, G. Piccioni, S. Tellmann, T. Imamura, T. Satoh, Stationary waves and slowly moving features in the night upper clouds of Venus, *Nature Astronomy* 査読有, 1, 0187, 2017. doi:10.1038/s41550-017-0187
- ④ Horinouchi, T., S. Murakami, T. Satoh, J. Peralta, K. Ogohara, T. Kouyama, T. Imamura, H. Kashimura, S. S. Limaye, K. McGouldrick, M. Nakamura, T. M. Sato, K. Sugiyama, M. Takagi, S. Watanabe, M. Yamada, A. Yamazaki, E. F. Young, Equatorial jet in the lower to middle cloud layer of Venus revealed by Akatsuki, *Nature Geoscience*, 査読有, 10, 646-651, 2017. doi:10.1038/ngeo3016
- ⑤ Lee, Y. J., A. Yamazaki, T. Imamura, M. Yamada, S. Watanabe, T. M. Sato, K. Ogohara, G. L. Hashimoto, S. Murakami, Scattering Properties of the Venusian Clouds Observed by the UV Imager on board Akatsuki, *The Astronomical Journal*, 査読有, 154, 44 (16pp), 2017. doi:10.3847/1538-3881/aa78a5
- ⑥ Satoh, T., T. M. Sato, M. Nakamura, Y. Kasaba, M. Ueno, M. Suzuki, G. L. Hashimoto, T. Horinouchi, T. Imamura, A. Yamazaki, T. Enomoto, Y. Sakurai, K. Takami, K. Sawai, T. Nakakushi, T. Abe, N. Ishii, C. Hirose, N. Hirata, M. Yamada, S. Murakami, Y. Yamamoto, T. Fukuhara, K. Ogohara, H. Ando, K. Sugiyama, H. Kashimura, S. Ohtsuki, Performance of Akatsuki/IR2 in Venus orbit: the first year, *Earth, Planets and Space*, 査読有, 69, 154, 2017. doi:10.1186/s40623-017-0736-x
- ⑦ Satoh, T., M. Nakamura, M. Ueno, K. Uemizu, M. Suzuki, T. Imamura, Y. Kasaba, S. Yoshida, M. Kimata, Development and in-flight calibration of IR2: 2- μ m camera onboard Japan's Venus orbiter, Akatsuki, *Earth, Planets and Space*, 査読有, 68:74, 2016. doi:10.1186/s40623-016-0451-z

[学会発表] (計 17 件)

- ① Satoh, T., Nakakushi, T., Sato, T. M., Hashimoto, G. L., Variation of cloud opacity on night-side disk of Venus, AOGS, June 5, 2018.
- ② Satoh, T., Sato, T. M., Fine vertical structure of Venus upper haze as revealed in Akatsuki/IR2 limb images. 日本地球惑星科学連合 2018 年大会.
- ③ Satoh, T., Nakakushi, T., Sato, T. M., Hashimoto, G. L., Variation of cloud opacity on night-side disk of Venus. 日本地球惑星科学連合 2018 年大会.
- ④ Peralta, J., and 17 co-authors (incl. Sato, T. M., Satoh, T.), Night-side winds at the middle-to-low clouds of Venus with Akatsuki/IR2 and ground-based observations. 日本地球惑星科学連合 2018 年大会.
- ⑤ Sato, T. M., Satoh, T., and 4 co-authors, Cloud top structure revealed by Akatsuki IR2 dayside images. 日本地球惑星科学連合 2018 年大会.
- ⑥ Hashimoto, G. L., Sekiguchi, M., Sato, T. M., Hashimoto, M., Takagi, S., Manago, N., Nakajima, T., Nakajima, T., Satoh, T., Introduction of RSTAR model for Akatsuki

- data analysis. 日本地球惑星科学連合 2018 年大会.
- ⑦ Satoh, T., et al., Limb darkening in Venus night-side disk as viewed from Akatsuki IR2, Annual meeting of DPS/AAS, October 20, 2017.
 - ⑧ Satoh, T., et al., Cloud-top altimetry of Venus with Akatsuki IR2, AOGS, 2017.
 - ⑨ Satoh, T., et al., A single-exposure imaging polarimeter in support of Akatsuki Venus Mission, AOGS, August 11, 2017.
 - ⑩ Lee, Y. J., and 11 co-authors (incl. Sato, T. M., and Satoh, T.), Venus night-side infrared spectroscopic study around the 2.3-um CO2 atmospheric window using IRTF/SpEx data in Jan-Feb 2017. 日本地球惑星科学連合 2017 年大会.
 - ⑪ Satoh, T., Sato, T. M., Lee, Y. J., Hashimoto, G. L., Takami, K., Kasaba, T., Cloud-top altimetry of Venus with Akatsuki IR2. 日本地球惑星科学連合 2017 年大会.
 - ⑫ Sato, T. M., Murakami, S., Horinouchi, T., Satoh, T., Peralta, J., Imamura, T., Stationary features at the Venus cloud top seen in Akatsuki/IR2 2.02-um dayside images. 日本地球惑星科学連合 2017 年大会.
 - ⑬ 佐藤 毅彦、他 9 名. あかつき IR2 による金星昼面観測. 地球電磁気・地球惑星圏学会 2016 秋季講演会.
 - ⑭ 佐藤 毅彦、他 19 名. 金星周回軌道における「あかつき」初期科学成果. 地球電磁気・地球惑星圏学会 2016 秋季講演会.
 - ⑮ 高見 康介、他 12 名 (佐藤 毅彦は 11 番目). 中間赤外ヘテロダイン分光観測による金星中間圏の風速・温度鉛直分布導出. 地球電磁気・地球惑星圏学会 2016 秋季講演会.
 - ⑯ Satoh, T. The latest views of Venus as observed by the Japanese Orbiter "Akatsuki". Joint meeting of the 48th DPS and 11th EPSC, 2016.
 - ⑰ Satoh, T., Suzuki, M., Kasaba, Y., Ueno, M., Hashimoto, G. L., Sato, T. M., and T. Enomoto. Initial Results of IR2 Camera on Board Akatsuki. AOGS2016.

[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

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名： 鍵谷 将人
ローマ字氏名： KAGITANI, Masato
所属研究機関名： 東北大学大学院
部局名： 理学研究科
職名： 助教
研究者番号 (8 桁)： 30436076

研究分担者氏名： 佐藤 隆雄
ローマ字氏名： SATO, M., Takao
所属研究機関名： 北海道情報大学
部局名： 経営情報学部・システム情報学科
職名： 助教
研究者番号 (8 桁)： 50633509

(2) 研究協力者

研究協力者氏名： 仲谷 善一
ローマ字氏名： NAKATANI, Yoshikazu

研究協力者氏名： 米田 瑞樹
ローマ字氏名： YONEDA, Mizuki

研究協力者氏名： 秋田谷 洋
ローマ字氏名： AKITAYA, Hiroshi

※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。