

平成 30 年 6 月 13 日現在

機関番号：82645

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2017

課題番号：16K17816

研究課題名(和文)金星の雲層構造と紫外模様起源

研究課題名(英文)Venus cloud structure and origin of UV contrast

研究代表者

佐藤 隆雄 (Sato, Takao)

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・宇宙航空プロジェクト研究員

研究者番号：50633509

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、金星探査機「あかつき」に搭載されている2ミクロンカメラの2.02ミクロン画像から、金星の雲頂高度を放射伝達計算を基に推定する手法を確立し、雲頂高度の緯度分布等を定量的に評価した。また同一データから「スーパーローテーションによって流されない定在構造」の特徴(発生位置や太陽地方時依存性)について調査した。さらに「あかつき」と「すばる」望遠鏡の連携観測を実施し、「あかつき」によって発見された定在構造の存在を地上望遠鏡観測により裏付けることに成功した。

研究成果の概要(英文)：The cloud top altitude of Venus was deduced from images taken by the 2.02-micron channel of 2-micron Camera onboard Japanese Venus orbiter, Akatsuki with the aid of radiative transfer calculation. The latitudinal variation of the cloud top altitude was evaluated quantitatively. The stationary features first discovered by Longwave Infrared Camera onboard Akatsuki were also characterized (e.g., occurrence region and local solar time dependence) with the 2.02-micron images. The coordinated observations of Venus cloud top with Akatsuki and Subaru Telescope were carried out and the existence of stationary feature was confirmed by Subaru Telescope.

研究分野：惑星大気物理学

キーワード：金星 大気 雲 リモートセンシング あかつき 地上望遠鏡観測

1. 研究開始当初の背景

地球の双子星である金星は、高度 50-70 km に広がる厚い硫酸の雲に覆われている。この雲は入射太陽光の約 8 割を宇宙空間に反射するが、雲層上部に存在する未同定化学物質とともに大気中に侵入した太陽光の約半分を吸収する。このように、雲層は大気加熱源として惑星全体の熱入力を支配しており、太陽光の大部分が地面で吸収される地球とは決定的に異なる点である。従って、雲層構造の空間分布とその時間変動の理解は、金星の気候システムを理解する上で重要な基礎情報となる。

欧州探査機 Venus Express (以下 VEX) の約 8 年に及ぶ観測は、我々の知見を飛躍的に向上させた。例えば、近赤外 (1-5 μm) 分光観測から雲頂高度は大局的には極に向かうにつれ低くなることが分かってきた [e. g., Ignatiev et al., 2009; Haus et al., 2014], 紫外 (110-320 nm) 分光観測から雲形成に寄与する SO_2 は時空間変動に富んでいることが示唆されている [e. g., Marcq et al., 2012]. しかし、VEX は極軌道を採用したため、「スーパーローテーション」等の特異な大気現象が卓越する赤道域データが決定的に不足したままである。

2. 研究の目的

本研究は、金星の気候システムを理解する上で重要な基礎情報でありながら理解の障壁となっている雲層構造の空間分布と雲層上部に存在する未同定化学物質が生み出す紫外模様の起源を観測的に解明することを目的とした。

3. 研究の方法

金星探査機「あかつき」は紫外から中間赤外までの多波長撮像を赤道周回軌道から行うことで、複数高度の大気運動や雲分布を可視化する気象衛星であり、VEX の観測を補いつつ新しい観測情報を継続して提供できる現在唯一の手段である。主に「あかつき」に搭載されている 2 ミクロンカメラ (以下 IR2) の 2.02 μm フィルターを用いた撮像データや「あかつき」と地上望遠鏡による連携観測データの解析により、以下の研究成果を得た。

4. 研究成果

(1) 「あかつき」搭載 2 ミクロンカメラ (IR2) の昼面画像を用いた金星雲頂構造の推定

- ① 大気主成分である CO_2 は場所に依らず一様な高度分布をしていると考えられており、 CO_2 吸収帯における反射太陽光の明暗は反射体である雲層までの光路長の違い、すなわち雲頂高度の違いを反映している。

IR2 の 2.02 μm フィルターはこの観測原理を利用しており、観測された放射輝度を最もよく再現する雲頂高度を放射伝達計算と反転解析から導出する手法を確立した (図 1)。

- ② IR2 の 2.02 μm 画像 (2016 年 4 月 4 日-5 月 25 日) に上記手法を適用し以下の事柄を明らかにした。雲頂は、低中緯度では比較的一様で高度 70km に位置するが、緯度 45 度付近を境に下降し両極域では 63km 付近に存在するという結果を得た (図 2)。また低中緯度に広がる紫外模様と類似した微細構造の明暗は雲頂高低差で約 100m 程度しかないことを突き止めた。

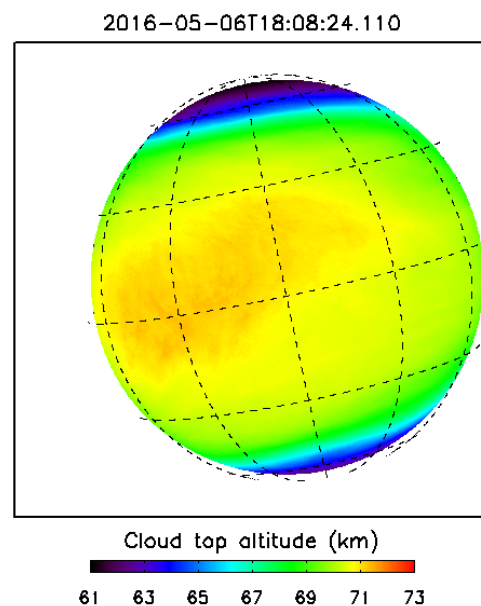


図 1. IR2 の 2.02 μm 画像 (2016 年 5 月 6 日取得) から導出した金星の雲頂高度分布。

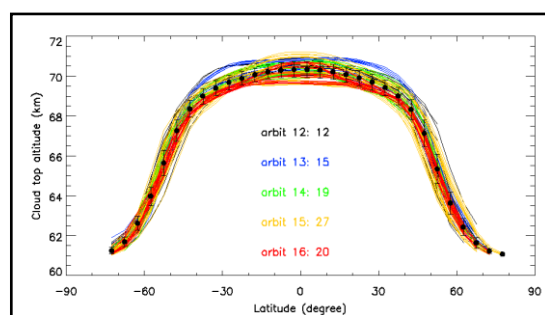


図 2. IR2 の 2.02 μm 画像 (2016 年 4 月 4 日-5 月 25 日, 合計 93 枚) から導出した金星の雲頂高度の緯度分布 (色の違いは軌道番号の違いを示している)。

(2) 「あかつき」搭載 2 ミクロンカメラ (IR2) の昼面画像を用いた金星雲頂における定在構造の特徴

2015 年 12 月 7 日に金星周回軌道に投入された「あかつき」は、中間赤外カメラ (LIR)

を用いて「スーパーローテーションによって流されない惑星規模の定在構造」が存在することを世界で初めて発見した。これは、地形起源の大気重力波によって出現することが分かってきた [Fukuhara et al., 2017; Kouyama et al., 2018]。

本研究では、IR2 の全観測期間 (2015 年 12 月 11 日-2016 年 12 月 9 日) にわたる $2.02\ \mu\text{m}$ 画像を用いて、雲頂における定在構造の有無を調査し、54 例検出することができた。これらの定在構造は、様々な高地の上空で発生しており (図 3), LIR が発見した定在構造同様地形起源であることが分かった。また定在構造の出現時間帯 (太陽地方時依存性) を調べたところ、明確に定在していると分かる構造は午後に集中しているものの午前でも見てとることができた ($2.02\ \mu\text{m}$ フィルターは反射太陽光を観測しているので夜の時間帯については言及できない)。

一方で、より低高度の情報を有する IR2 の $1.73, 2.26, 2.32\ \mu\text{m}$ 画像には定在構造を確認することができなかった。これらの波長は「雲の厚みの濃淡」を可視化するため、定在構造によって生じる雲の厚みの差が小さいために観測できないのか、または定在構造を引き起こす大気重力波の特性を反映していると考えられる。

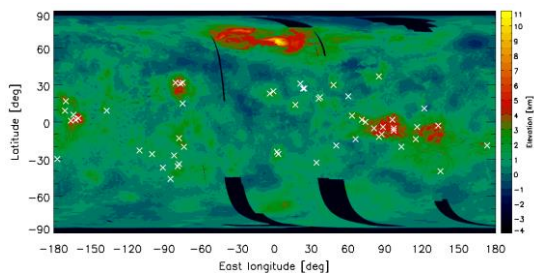


図 3. IR2 の $2.02\ \mu\text{m}$ 画像 (2015 年 12 月 11 日-2016 年 12 月 9 日) から検出した定在構造の発生位置と金星の地形図。

(3) 「あかつき」と「すばる」望遠鏡による連携観測

2017 年 1 月 11-14 日に「あかつき」の LIR, 紫外カメラ (UVI) とハワイ島マウナケア山頂にある「すばる」望遠鏡の中間赤外分光撮像装置 (COMICS) による連携観測を実施した。観測時は金星が東方最大離角に位置しており、金星で最も高い火山であるマアト山が夕側境界 (18.8h) となる時期を地球から観測した。このような好条件もあり、COMICS の撮像データ ($8.67\ \mu\text{m}$ と $11.34\ \mu\text{m}$ の 2 波長) には 4 日間を通して地形起源と思われる定在構造が存在しており (図 4), LIR による発見を地上望遠鏡観測により裏付けることができた。

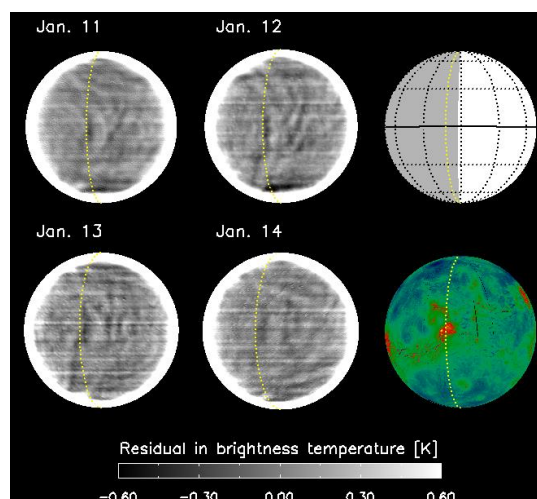


図 4. 「すばる」望遠鏡の COMICS によって取得した中間赤外画像 (2017 年 1 月 11-14 日) と観測時の金星の昼夜マップ (右上), 地形マップ (右下)。

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 5 件)

- ① 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., Horinouchi, T., Sato, N., Yamada, M., Yamamoto, Y., Ohtsuki, S., Sugiyama, K., Ando, H., Takamura, M., Yamada, T., Satoh, T., Nakamura, M., 2017. Topographical and local-time dependence of large stationary gravity waves observed at the cloud top of Venus. *Geophysical Research Letters* 44, <https://doi.org/10.1002/2017GL075792> .. 査読有.
- ② Satoh, T., Sato, T.M., Nakamura, M., Kasaba, Y., Ueno, M., Suzuki, M., Hashimoto, G.L., Horinouchi, T., Imamura, T., Yamazaki, A., Enomoto, T., Sakurai, Y., Takami, K., Sawai, K., Nakakushi, T., Abe, T., Ishii, N., Hirose, C., Hirata, N., Yamada, M.,

- Murakami, S., Yamamoto, Y., Fukuhara, T., Ogohara, K., Ando, H., Sugiyama, K., Kashimura, H., Ohtsuki, S., 2017. Performance of Akatsuki/IR2 in Venus orbit: the first year. *Earth, Planets and Space* 69:154, doi:10.1186/s40623-017-0736-x., 査読有.
- ③ Peralta, J., Hueso, R., Sánchez-Lavega, A., Lee, Y.J., García-Muñoz, A., Kouyama, T., Sagawa, H., Sato, T.M., Piccioni, G., Tellmann, S., Imamura, T., Satoh, T., 2017. Stationary waves and slowly moving features in the night upper clouds of Venus. *Nature Astronomy* 1, 0187, doi:10.1038/s41550-017-0187., 査読有.
- ④ Fukuhara, T., Futaguchi, M., Hashimoto, G.L., Horinouchi, T., Imamura, T., Iwagami, N., Kouyama, T., Murakami, S., Nakamura, M., Ogohara, K., Sato, M., Sato, T.M., Suzuki, M., Taguchi, M., Takagi, S., Ueno, M., Watanabe, S., Yamada, M., Yamazaki, A., 2017. Large stationary gravity wave in the atmosphere of Venus. *Nature Geoscience* 10, 85-88, doi:10.1038/ngeo2873., 査読有.
- ⑤ Nakamura, M. et al. (Sato, T.M., 52 名中 38 番目), 2016. AKATSUKI returns to Venus. *Earth, Planets and Space* 68:75, doi:10.1186/s40623-016-0457-6., 査読有.
- [学会発表] (計 9 件)
- ① 佐藤隆雄, 佐藤毅彦, Lee Yeon Joo, 小郷原一智, 村上真也, 笠羽康正, あかつき IR2 昼面画像を用いた金星雲頂構造の推定手法, 第19回惑星圏研究会, P10, 東北大学, 仙台, 2018年2月.
- ② Takao M. Sato, Takehiko Satoh, George L. Hashimoto, Yeon Joo Lee, Hideo Sagawa, Yasumasa Kasaba, Radiative transfer modeling for analyses with Akatsuki/IR2 images, 49th DPS meeting, 417.08, Provo, USA, October 2017.
- ③ Takao M. Sato, Hideo Sagawa, Toru Kouyama, Makoto Taguchi, Yeon Joo Lee, Javier Peralta, Masahiro Takagi, George L. Hashimoto, Takehiko Satoh, Yasumasa Kasaba, Shohei Aoki, Tetsuya Fukuhara, Atsushi Yamazaki, Takeshi Imamura, Masato Nakamura, Venus cloud top structure seen by the coordinated Subaru and Akatsuki observations, European Planetary Science Congress 2017, TP8-P36, Riga, Latvia, September 2017.
- ④ Takao M. Sato, Hideo Sagawa, Toru Kouyama, Makoto Taguchi, Yeon Joo Lee, Javier Peralta, Masahiro Takagi, George Hashimoto, Takehiko Satoh, Yasumasa Kasaba, Shohei Aoki, Tetsuya Fukuhara, Atsushi Yamazaki, Takeshi Imamura, Masato Nakamura, Coordinated observation of Venus cloud top with Subaru and Akatsuki, JpGU-AGU Joint Meeting 2017, PPS06-17, Chiba, Japan, d May 2017.
- ⑤ Takao M. Sato, Shin-ya Murakami, Takeshi Horinouchi, Takehiko Satoh, Javier Peralta, Takeshi Imamura, Stationary features at the Venus cloud top seen in Akatsuki/IR2 2.02- μ m dayside images, JpGU-AGU Joint Meeting 2017, PPS06-08, Chiba, Japan, May 2017.
- ⑥ 佐藤隆雄, 金星探査機「あかつき」と地上望遠鏡によるシナジー, 地球型惑星圏環境に関する研究集会, 立教大学, 東京,

2016年12月. 招待講演.

- ⑦ 佐藤隆雄, 佐藤毅彦, 中村正人, 上野宗孝, 鈴木睦, はしもとじょーじ, 榎本孝之, 高見康介, 中川広務, 笠羽康正, あかつき IR2 による金星夜面強化観測, 第140回地球電磁気・地球惑星圏学会, R009-P12, 九州大学, 福岡, 2016年11月.
- ⑧ 佐藤隆雄, 佐藤毅彦, 佐川英夫, 山崎敦, 神山徹, 今村剛, Subaru/COMICS の中間赤外分光データで調べる金星雲頂構造, 日本地球惑星科学連合 2016年大会, PCG21-06, 幕張メッセ, 千葉, 2016年5月.
- ⑨ Takao M. Sato, Takehiko Satoh, Hideo Sagawa, Atsushi Yamazaki, Toru Kouyama, Takeshi Imamura, Mid-infrared spectroscopy of Venus obtained by Subaru/COMICS, International Venus Conference 2016, Oxford, UK, April 2016.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

佐藤 隆雄 (SATO, Takao)

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・宇宙航空プロジェクト研究員

研究者番号: 50633509