

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 3 年 5 月 10 日現在

機関番号：34304

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H02961

研究課題名(和文) 光化学結合GCMと地上観測による金星上層大気の運動と物質循環の解明

研究課題名(英文) Dynamics and material circulation in the Venus upper atmosphere

研究代表者

高木 征弘 (TAKAGI, Masahiro)

京都産業大学・理学部・教授

研究者番号：00323494

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,600,000円

研究成果の概要(和文)：観測と比較可能な物質輸送モデルとして、濃硫酸エアロゾルからなる雲物理モデルを開発し、金星大気GCMに組み込んで数値シミュレーションを実施した。その結果、観測と統合的な雲分布の再現に成功し、雲分布の形成に対する大気大循環および惑星規模波動の役割を調べた。その結果、従来考えられていた平均子午面循環の効果よりも、極域における短周期擾乱に伴う下層からの水蒸気供給が重要であることを明らかにした。また、低緯度の雲底付近に見られる東西波数1の構造は、同高度に存在するケルビン波動的な惑星規模波動に伴う温度偏差によって作られ、従来考えられていた鉛直流の効果は小さいことを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

金星は暴走温室効果によって高温高圧の気候状態が実現されていると考えられ、その気候システムを明らかにすることは地球の気候およびその変動を理解する上で非常に重要である。金星は厚い濃硫酸エアロゾルでできた雲によって完全にカバーされており、金星気候を理解するためには雲を含む物質循環と大気大循環の相互作用を明らかにすることが必要である。本研究では金星雲物理モデルを作成し、観測結果と統合的な雲分布の再現にはじめて成功した。本研究の結果は金星気候システムの理解の基礎となるだけでなく、近年多く発見されている系外惑星の表層環境の理解、さらには宇宙における生命の居住可能環境の理解にも資するものと期待される。

研究成果の概要(英文)：As a simple material transport model whose products can be compared with observations, we developed a new cloud model for our Venus GCM (AFES-Venus) and conducted several numerical simulations in order to investigate how the cloud is formed and affected by the atmospheric general circulation and planetary waves. The results show that the reproduced cloud distributions, which are in good agreement with ground-based and Venus orbiter observations, are strongly affected by the vertical transport of H₂O gas from the lower atmosphere induced by active disturbances in high-latitudes. The zonal wavenumber-1 structure found in the equatorial region at the lower cloud levels are formed by temperature anomaly associated with the Kelvin-like wave with zonal wavenumber-1. Contrary to conventional expectations, the vertical wind has minor effect on the zonal wavenumber-1 structure.

研究分野：惑星気象学

キーワード：金星大気 雲物理 大気化学

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

金星は高度 45–70 km に存在し全球を覆う濃硫酸の雲によって完全に覆われている。金星に入射する太陽光の約 78%はこの雲層により反射され、残りの太陽光エネルギーの 60–70%が上部雲層 (55–70km) で吸収される。このため、金星大気大循環の構造を明らかにするためには、雲分布の形成メカニズムを明らかにする必要がある。この雲層の形成には、光化学反応が活発な金星上層大気から下層大気への大気微量物質 (CO や SO, SO₂, H₂O, H₂SO₄ など) の輸送が重要であるが、これまで有効な観測手段がなく、その輸送メカニズムに関する情報はほとんど得られていない。

一方、雲層より上での大気運動については地上観測と理論的研究によって「夜昼間対流と大気スーパーローテーションの共存」という描像が得られている (Lellouch et al., 1994; Bougher et al., 1998; Moullet et al., 2012; Hoshino et al., 2012 など)。従来の観測では、O₂ 大気光の中心は真夜中よりもやや朝側に偏ることが多く、熱圏の東西平均流 (大気スーパーローテーション) による移流効果と解釈されている (ただし、この平均東西流が雲層のスーパーローテーションから連続するものかどうかは不明である)。Hoshino et al. (2013) は雲層中の対流によって励起される重力波の効果をパラメタライズすることにより、観測と整合的な風速分布 (夜昼間対流と大気スーパーローテーションの共存状態) の再現に成功した (図 2 参照)。この結果は、下層から伝播する波 (惑星波や重力波) の重要性を示しているが、モデル中で仮定された波による運動量輸送のスペクトル分布や強度は ad-hoc に決定されたものであり、観測的・理論的な根拠がない。世界的にみても、これまで金星中間圏と熱圏の力学的結合を適切に考慮した研究は行われていない。また、Venus Express に搭載された分光計 (VIRTIS) の観測によると、O₂ 大気光の平均的な分布はほぼ真夜中を中心としており、熱圏における大気スーパーローテーションの存在に否定的な結果が報告されている (Piccioni et al., 2009)。従来の描像の妥当性を含め、金星上層における大気運動の理解は不十分である。

2. 研究の目的

金星大気中における雲および大気微量物質の分布の形成メカニズムを明らかにすることは、これまでほとんど理解の進んでいない金星上層大気の大気運動と物質輸送を解明する鍵になりうる。本研究では金星大気大循環モデル (AFES-Venus) に雲物理過程および光化学反応モデルを組み込み、観測データと数値シミュレーションを比較検討することにより、金星上層大気における大気運動と物質循環を明らかにする。

3. 研究の方法

(1) 金星雲物理モデル・光化学モデルの開発と GCM への組み込み

太陽光による硫酸蒸気の生成と、下層大気からの水蒸気供給、濃硫酸液滴に対する硫酸蒸気と水蒸気の飽和蒸気圧を考慮した金星雲物理モデルを作成し、GCM に組み込む。同時に、二酸化炭素の光解離で生じる CO の輸送モデルを作成し、GCM に組み込み、金星上層大気における雲と CO 分布など、観測と直接比較可能な数値モデルを作成する。

(2) 超高解像度金星 GCM データに基づく重力波パラメタリゼーション

我々の研究グループが行った金星大気の高解像度シミュレーションのデータ (解像度 T639L120 および T319L240 : 水平 20-40 km・鉛直 0.5-1 km) を解析し、雲層付近から上方伝播する重力波が熱圏の大気循環に与える影響を明らかにする。さらに、この知見に基づく金星上層大気用の新たな重力波パラメタリゼーションを開発する。

(3) O₂ 大気光, CO, 熱圏風速を対象とした地上観測の実施

O₂ 大気光の分布には時空間変動が大きいことが知られており、変動プロセスの理解には熱圏風速の同時観測が重要である。本研究ではハワイのすばる望遠鏡, NASA IRTF, チリの ALMA など、各地の大型地上望遠鏡を組織することにより、O₂ 大気光と CO 分布、熱圏風速の同時観測を実施し、数値シミュレーションと直接比較可能なデータセットを取得する。

(4) 金星上層大気における大気運動と物質循環の解明

観測結果と比較しながら光化学結合 GCM の改良を図るとともに、観測結果の解釈を進展させる。中間圏と熱圏の力学的結合 (波の励起と伝播、波と平均流との相互作用、残差子午面循環など) に注目し、数値シミュレーションの結果を解析することにより、金星上層大気の大気運動を解明する。

4. 研究成果

- (1) 硫酸ガスの光化学生成と大気循環による水蒸気の下層大気からの供給を考慮した金星硫酸雲物理モデルを開発し、大気大循環モデル (AFES-Venus) に実装した。雲のない状態を初期状態として、T42L60 の解像度 (水平方向には球面調和関数の 42 モードで関数展開、鉛直方向には 60 層で差分化) で 15 地球年ほど数値積分した結果、(a) Imamura and Hashimoto (1998) で指摘された低緯度下部雲層への雲の濃集はほとんどみられなかったが、(b) 極域下部雲層に顕著な濃集がみられた (Ando et al., 2020)。(a)の違いは Imamura and

Hashimoto (1998)が仮定した強い子午面循環に原因があると考えられる。すなわち、彼らのモデルでは低緯度では子午面循環に伴う強い上昇流によって雲粒の落下が妨げられ、下部雲層で雲が濃集する。(b)は極域の相対的に安定度が小さい領域で鉛直流を伴う短周期擾乱が活発となり、硫酸蒸気や水蒸気を下層から輸送しやすいためである。こうした特徴は過去の赤外観測とよく一致している (Carlson et al., 1991; Crisp et al., 1991)。水蒸気や硫酸蒸気は緯度とともに混合比が増大する傾向が見られた。こうした特徴も最近の赤外観測の結果 (Cottini et al., 2015) と整合的である。硫酸蒸気の混合比分布は最近の電波掩蔽観測の結果と極域でよく一致するものの、赤道では一致しない。低緯度の雲底高度における大気鉛直運動が正しく再現されていない可能性がある。

- (2) 数値シミュレーションで得られた雲密度の経度-緯度分布には、低緯度で東西波数 1 の構造が顕著であった (Ando et al., in revision)。これは雲底付近 (高度 50 km) の雲構造を反映している。実際、高度 50 km における雲密度の水平分布を調べると、東西波数 1 の構造が顕著である。この特徴は過去の地上観測 (Crisp et al., 1991) をよく再現しており、その原因はケルビン波的な惑星規模の大気波動の影響である。雲底高度における波活動を調べたところ、東西波数 1 のケルビン波的な惑星規模波動が卓越していることが明らかになった。このケルビン波的な波動に伴って数ケルビンの温度偏差が作られる。それに伴って、濃硫酸液滴に対する硫酸ガスと水蒸気の飽和蒸気圧が変化し、高温偏差部分で雲の蒸発、低温偏差部分で雲の凝結が起こる。これによって雲底付近の雲密度が大きく変動する。Peralta et al. (2020) は雲物理を含まない金星大気 GCM のシミュレーション結果から、雲底付近の雲の変化には波に伴う鉛直流が重要であると推測したが、本研究の結果からは鉛直流の寄与は小さく、雲の時空間変動は主に波に伴う温度偏差によってもたらされることが示された。また、高度 60 km では東西波数 1 と 2 が混在しており、熱潮汐波が寄与している可能性も示唆された。
- (3) 超高解像度シミュレーションのデータを解析し、金星大気上層では自発的放射によって非地形性重力波が非常に強く励起されることを見いだした (Sugimoto et al., Nature Geoscience, to be accepted)。低緯度では熱潮汐波が「地形」のような効果を持ち、重力波の分布に顕著なローカルタイム依存性が存在することを明らかにした。中高緯度では傾圧不安定波と思われる擾乱活動から重力波が生成される。さらに、金星探査機あかつきの伝播掩蔽データを解析したところ、数値シミュレーションと整合的な重力波活動のローカルタイム依存性が見いだされた (Noguchi et al., in prep)。
- (4) 2017 年 6 月に、あかつきの RS 観測と全く同じ観測日時に地上サブミリ波望遠鏡 (ハワイ・マウナケア山頂に設置された James Clerk Maxwell 望遠鏡) を利用した金星上層大気の観測キャンペーンを実施した。サブミリ波の波長域には金星大気を構成する大気微量成分の吸収線が多数観測できる。解析の初期結果では、あかつき RS による気温分布とその観測場所をサブミリ波望遠鏡で観測したデータから求めた気温分布との間でよい整合性が確認された (Sagawa et al., in prep)。
- (5) 金星大気中の子午面循環について解析をおこなった結果、地面付近では赤道から極に達する直接循環が卓越しているが、雲底より上の高度では従来予想されていた単純な子午面循環ではなく、複雑な構造が現れていることが示された (松田・高木, 2020; Takagi et al., in prep)。特に高度 60 km 付近では、地球対流圏のハドレー循環やフェレル循環などからなる 3 細胞構造のように直立したセルではなく、斜めに傾いたセル構造が顕著である。この傾きはほぼ等温位線に沿っている。低緯度に直接循環、中高緯度に間接循環が卓越している。低緯度のハドレー循環は高度 55-70 km では赤道から 30-40 までしか広がっていない。中高緯度に見られる間接循環は、傾圧不安定波によって作られたフェレル循環と思われる。中高緯度の間接循環は高度 50 km 付近を低緯度から延びる直接循環によって、2つの領域に分けられている。この直接循環はほぼ等温位線に沿っていることが多く、中緯度における等温位面と等角運動量面の傾きから、対称不安定の結果と解釈できる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計25件（うち査読付論文 22件 / うち国際共著 12件 / うちオープンアクセス 19件）

1. 著者名 Ando Hiroki, Takagi Masahiro, Fukuhara Tetsuya, Imamura Takeshi, Sugimoto Norihiko, Sagawa Hideo, Noguchi Katsuyuki, Tellmann Silvia, Patzold Martin, Hausler Bernd, Murata Yasuhiro, Takeuchi Hiroshi, Yamazaki Atsushi, Toda Tomoaki, Tomiki Atsushi, Choudhary Rajkumar, Kumar Kishore, Ramkumar Geetha, Antonita Maria	4. 巻 123
2. 論文標題 Local Time Dependence of the Thermal Structure in the Venusian Equatorial Upper Atmosphere: Comparison of Akatsuki Radio Occultation Measurements and GCM Results	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Planets	6. 最初と最後の頁 2270 ~ 2280
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2018JE005640	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 榎村博基, 杉本憲彦, 高木征弘, 安藤紘基, 今村剛, 松田佳久, 榎本剛, 大淵清, はしもとじょーじ, 石渡正樹, 中島健介, 高橋芳幸, 林祥介	4. 巻 27
2. 論文標題 一番星へ行こう! 日本の金星探査機の挑戦 その36 ~ AFES-Venusによる数値計算とデータ同化 ~	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 日本惑星科学会誌「遊・星・人」	6. 最初と最後の頁 314-319
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Kashimura Hiroki, Sugimoto Norihiko, Takagi Masahiro, Matsuda Yoshihisa, Ohfuchi Wataru, Enomoto Takeshi, Nakajima Kensuke, Ishiwatari Masaki, Sato Takao M., Hashimoto George L., Satoh Takehiko, Takahashi Yoshiyuki O., Hayashi Yoshi-Yuki	4. 巻 10
2. 論文標題 Planetary-scale streak structure reproduced in high-resolution simulations of the Venus atmosphere with a low-stability layer	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 23-33
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41467-018-07919-y	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Sugimoto Norihiko, Takagi Masahiro, Matsuda Yoshihisa	4. 巻 46
2. 論文標題 Fully Developed Superrotation Driven by the Mean Meridional Circulation in a Venus GCM	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Geophysical Research Letters	6. 最初と最後の頁 1776 ~ 1784
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2018GL080917	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Encrenaz T., Greathouse T. K., Marcq E., Sagawa H., Widemann T., Bezard B., Fouchet T., Lefevre F., Lebonnois S., Atreya S. K., Lee Y. J., Giles R., Watanabe S.	4. 巻 623
2. 論文標題 HDO and SO2 thermal mapping on Venus	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Astronomy & Astrophysics	6. 最初と最後の頁 A70 ~ A70
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/0004-6361/201833511	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 SUGIMOTO Norihiko, ABE Mirai, KIKUCHI Yukako, HOSONO Asako, ANDO Hiroki, TAKAGI Masahiro, GARATE LOPEZ Itziar, LEBONNOIS Sebastien, AO Chi	4. 巻 75
2. 論文標題 Observing system simulation experiment for radio occultation measurements of the Venus atmosphere among small satellites	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. A2 (Applied Mechanics (AM))	6. 最初と最後の頁 I_477 ~ I_486
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejam.75.2_I_477	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Kitahara Takehiko, Imamura Takeshi, Sato Takao M., Yamazaki Atsushi, Lee Yeon Joo, Yamada Manabu, Watanabe Shigeto, Taguchi Makoto, Fukuhara Tetsuya, Kouyama Toru, Murakami Shin ya, Hashimoto George L., Ogohara Kazunori, Kashimura Hiroki, Horinouchi Takeshi, Takagi Masahiro	4. 巻 124
2. 論文標題 Stationary Features at the Cloud Top of Venus Observed by Ultraviolet Imager Onboard Akatsuki	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Planets	6. 最初と最後の頁 1266-1281
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2018JE005842	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Sugimoto Norihiko, Kouyama Toru, Takagi Masahiro	4. 巻 46
2. 論文標題 Impact of Data Assimilation on Thermal Tides in the Case of Venus Express Wind Observation	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Geophysical Research Letters	6. 最初と最後の頁 4573 ~ 4580
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2019GL082700	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Lee, Y.J., K.-L. Jessup, S. Perez-Hoyos, D.V. Titov, S. Lebonnois, J. Peralta, T. Horinouchi, T. Imamura, S. Limaye, E. Marcq, M. Takagi, A. Yamazaki, M. Yamada, S. Watanabe, S. Murakami, K. Ogohara, W.M. McClintock, G. Holsclaw, and A. Roman	4. 巻 158
2. 論文標題 Long-term Variations of Venus's 365 nm Albedo Observed by Venus Express, Akatsuki, MESSENGER, and the Hubble Space Telescope	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astronomical Journal	6. 最初と最後の頁 126 ~ 126
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-3881/ab3120	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Ando Hiroki, Imamura Takeshi, Tellmann Silvia, Patzold Martin, Hausler Bernd, Sugimoto Norihiko, Takagi Masahiro, Sagawa Hideo, Limaye Sanjay, Matsuda Yoshihisa, Choudhary Raj Kumar, Antonita Maria	4. 巻 10
2. 論文標題 Thermal structure of the Venusian atmosphere from the sub-cloud region to the mesosphere as observed by radio occultation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-020-59278-8	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Kinoshita Takenari, Takaya Koutarou, Iwasaki Toshiki	4. 巻 15
2. 論文標題 On the Three Dimensional Mass-Weighted Isentropic Time Mean Equation for Rossby Waves	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 SOLA	6. 最初と最後の頁 193 ~ 197
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2151/sola.2019-035	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Sato T.M., Satoh T., Sagawa H., Manago N., Lee Y.J., Murakami S., Ogohara K., Hashimoto G.L., Kasaba Y., Yamazaki A., Yamada M., Watanabe S., Imamura T., Nakamura M.	4. 巻 345
2. 論文標題 Dayside cloud top structure of Venus retrieved from Akatsuki IR2 observations	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Icarus	6. 最初と最後の頁 113682 ~ 113682
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.icarus.2020.113682	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Nara Y., Imamura T., Murakami S., Kouyama T., Ogohara K., Yamada M., Takagi M., Kashimura H., Sato N.	4. 巻 124
2. 論文標題 Formation of the Y Feature at the Venusian Cloud Top by Planetary Scale Waves and the Mean Circulation: Analysis of Venus Express VMC Images	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Planets	6. 最初と最後の頁 1143-1156
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2018JE005779	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 佐川英夫	4. 巻 110
2. 論文標題 アルマ望遠鏡による太陽系研究	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 天文月報	6. 最初と最後の頁 317-324
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Ando Hiroki, Imamura Takeshi, Sugimoto Norihiko, Takagi Masahiro, Kashimura Hiroki, Tellmann Silvia, Paetzold Martin, Haeusler Bernd, Matsuda Yoshihisa	4. 巻 122
2. 論文標題 Vertical structure of the axi-asymmetric temperature disturbance in the Venusian polar atmosphere: Comparison between radio occultation measurements and GCM results	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Planets	6. 最初と最後の頁 1687 ~ 1703
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/2016JE005213	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Sugimoto Norihiko, Yamazaki Akira, Kouyama Toru, Kashimura Hiroki, Enomoto Takeshi, Takagi Masahiro	4. 巻 7
2. 論文標題 Development of an ensemble Kalman filter data assimilation system for the Venusian atmosphere	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-017-09461-1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Horinouchi Takeshi, Murakami Shin-ya, Satoh Takehiko, Peralta Javier, Ogohara Kazunori, Kouyama Toru, Imamura Takeshi, Kashimura Hiroki, Limaye Sanjay S., McGouldrick Kevin, Nakamura Masato, Sato Takao M., Sugiyama Ko-ichiro, Takagi Masahiro, Watanabe Shigeto, Yamada Manabu, Yamazaki Atsushi, Young Eliot F.	4. 巻 10
2. 論文標題 Equatorial jet in the lower to middle cloud layer of Venus revealed by Akatsuki	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Nature Geoscience	6. 最初と最後の頁 646 ~ 651
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/NGEO3016	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 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.	4. 巻 44
2. 論文標題 Topographical and Local Time Dependence of Large Stationary Gravity Waves Observed at the Cloud Top of Venus	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Geophysical Research Letters	6. 最初と最後の頁 12,098 ~ 12,105
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/2017GL075792	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Ogohara, K., M. Takagi, et al.	4. 巻 69
2. 論文標題 Overview of Akatsuki data products: definition of data levels, method and accuracy of geometric correction	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Earth, Planets and Space	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1186/s40623-017-0749-5	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Takagi Masahiro, Sugimoto Norihiko, Ando Hiroki, Matsuda Yoshihisa	4. 巻 123
2. 論文標題 Three-Dimensional Structures of Thermal Tides Simulated by a Venus GCM	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Planets	6. 最初と最後の頁 335 ~ 352
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/2017JE005449	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 村上真也, 山本幸生, はしもとじょーじ, 山田学, 山崎敦, 佐藤隆雄, 小郷原一智, 高木征弘, Kevin McGouldrick, 平田成	4. 巻 26
2. 論文標題 一番星へ行こう! 日本の金星探査機の挑戦 その32 --データアーカイブ--	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 日本惑星科学会誌「遊・星・人」	6. 最初と最後の頁 92-96
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また, その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Horinouchi Takeshi, Kouyama Toru, Lee Yeon Joo, Murakami Shin-ya, Ogohara Kazunori, Takagi Masahiro, Imamura Takeshi, Nakajima Kensuke, Peralta Javier, Yamazaki Atsushi, Yamada Manabu, Watanabe Shigeto	4. 巻 70
2. 論文標題 Mean winds at the cloud top of Venus obtained from two-wavelength UV imaging by Akatsuki	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Earth, Planets and Space	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1186/s40623-017-0775-3	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また, その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 松田 佳久, 高木 征弘	4. 巻 68
2. 論文標題 金星気象学の回顧と展望	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 天気	6. 最初と最後の頁 67~83
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.24761/tenki.68.2_67	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また, その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Ando Hiroki, Takagi Masahiro, Sugimoto Norihiko, Sagawa Hideo, Matsuda Yoshihisa	4. 巻 125
2. 論文標題 Venusian Cloud Distribution Simulated by a General Circulation Model	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Planets	6. 最初と最後の頁 1-20
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2019JE006208	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Horinouchi Takeshi, Hayashi Yoshi-Yuki, Watanabe Shigeto, Yamada Manabu, Yamazaki Atsushi, Kouyama Toru, Taguchi Makoto, Fukuhara Tetsuya, Takagi Masahiro, Ogohara Kazunori, Murakami Shin-ya, Peralta Javier, Limaye Sanjay S., Imamura Takeshi, Nakamura Masato, Sato Takao M., Satoh Takehiko	4. 巻 368
2. 論文標題 How waves and turbulence maintain the super-rotation of Venus' atmosphere	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Science	6. 最初と最後の頁 405 ~ 409
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1126/science.aaz4439	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計27件 (うち招待講演 8件 / うち国際学会 15件)

1. 発表者名 Ando, H., M. Takagi, N. Sugimoto, H. Sagawa, Y. Matsuda
2. 発表標題 Theoretical study of the Venus cloud by a general circulation model
3. 学会等名 AGU Fall Meeting 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Takagi, M., N. Sugimoto, H. Kashimura, H. Ando, and Y. Matsuda
2. 発表標題 Mean meridional circulation in the Venus upper atmosphere
3. 学会等名 Symposium on Planetary Science 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Lee Y.J., K.-L. Jessup, S. Perez-Hoyos, D.V. Titov, S. Lebonnois, J. Peralta, T. Horinouchi, T. Imamura, S. Limaye, E. Marcq, M. Takagi, A. Yamazaki, M. Yamada, S. Watanabe, S. Murakami, K. Ogohara, W.M. McClintock, G. Holsclaw, A. Roman
2. 発表標題 Intense Decadal Variation of Venus' UV Albedo and its Impacts on the Atmosphere
3. 学会等名 International Venus Conference 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1 . 発表者名 Takagi, M., N. Sugimoto, H. Ando, H. Kashimura, Y. Matsuda
2 . 発表標題 Numerical modeling of the Venus atmosphere
3 . 学会等名 International Venus Conference 2019 (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Ando, H., M. Takagi, N. Sugimoto, H. Sagawa, and Y. Matsuda
2 . 発表標題 Venusian cloud distribution simulated by a general circulation model
3 . 学会等名 EPSC-DPS Joint Meeting 2019 (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Sagawa, H., G. Gilli, M. Takagi, and H. Ando
2 . 発表標題 Doppler wind measurements of Venus upper atmosphere: Comparisons with updated GCM experiments
3 . 学会等名 EPSC-DPS Joint Meeting 2019 (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Takagi, M., N. Sugimoto, H. Kashimura, H. Ando, and Y. Matsuda
2 . 発表標題 Mean meridional circulation in the Venus atmosphere
3 . 学会等名 EPSC-DPS Joint Meeting 2019 (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1. 発表者名 高木征弘, 杉本憲彦, 安藤紘基, 松田佳久
2. 発表標題 金星 GCM にみられる惑星規模の短周期擾乱
3. 学会等名 日本気象学会2017年度春季大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 佐川英夫, 前澤裕之, 西合一矢, 高木征弘
2. 発表標題 サブミリ波帯でのCO吸収線ドップラシフトを利用した金星中間圏大気循環の研究
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 高谷康太郎
2. 発表標題 Formulation and application of phase-independent energy conversions for quasi-geostrophic eddies
3. 学会等名 JpGU/AGU joint meeting (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Takagi, M., N. Sugimoto, H. Ando, Y. Matsuda
2. 発表標題 Short-period planetary-scale waves found in a Venus GCM
3. 学会等名 European Planetary Science Congress 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Sagawa, H., M. Takagi, H. Maezawa, K. Saigo
2. 発表標題 Venus upper atmospheric dynamics inferred from the Doppler-shift observations of submm CO line: Comparison with GCM experiments
3. 学会等名 European Planetary Science Congress 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 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, and Y.-Y. Hayashi
2. 発表標題 Planetary-scale streak structures produced in a high-resolution simulation of Venus atmosphere
3. 学会等名 European Planetary Science Congress 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 高木征弘, 杉本憲彦, 安藤紘基, 櫻村博基, 松田佳久, 榎本剛, 中島健介, 石渡正樹, 小高正嗣, はしもとじょーじ, 大淵濟, 高橋芳幸, 林祥介
2. 発表標題 AFES-Venus による金星大気モデリング
3. 学会等名 日本気象学会2017年度秋季大会 (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 杉本憲彦, 山崎哲, 神山徹, 櫻村博基, 榎本剛, 高木征弘
2. 発表標題 金星AFES (AFES-Venus) アンサンブルデータ同化システムの開発
3. 学会等名 日本気象学会2017年度秋季大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 櫻村博基, 杉本憲彦, 高木征弘, 松田佳久, 大淵済, 榎本剛, 中島健介, 石渡正樹, 佐藤隆雄, はしもとじょーじ, 佐藤毅彦, 高橋芳幸, 林祥介
2. 発表標題 高解像度金星大気シミュレーションで再現された惑星規模のストリーク構造
3. 学会等名 日本気象学会2017年度秋季大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 安藤紘基, 高木征弘, 福原哲哉, 今村剛, 杉本憲彦, 佐川英夫
2. 発表標題 金星赤道域における大気熱構造の地方時依存性について
3. 学会等名 第142回地球電磁気・地球惑星圏学会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 高谷康太郎
2. 発表標題 位相依存性のないエネルギー変換の定式化の提案(2)
3. 学会等名 「波と平均流との相互作用」研究会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Ando, H., T. Fukuhara, M. Takagi, T. Imamura, N. Sugimoto, H. Sagawa
2. 発表標題 Local time dependence of the thermal structure in the Venusian equatorial region revealed by Akatsuki radio occultation measurements
3. 学会等名 AGU Fall Meeting 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 杉本憲彦
2. 発表標題 データ同化の現状と将来展望
3. 学会等名 第19回惑星圏研究会（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 高木征弘
2. 発表標題 比較惑星気象学の現状と将来展望
3. 学会等名 第19回惑星圏研究会（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Sugimoto, N., M. Takagi, AFES-Venus and VALEDAS team
2. 発表標題 Introduction of the Venus GCM (AFES-Venus) and its data assimilation system (VALEDAS)
3. 学会等名 Seminar at the Airborne Science Program（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 杉本憲彦
2. 発表標題 金星GCMへのデータ同化の広がりと今後の展望
3. 学会等名 第8回データ同化ワークショップ（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 尾沼日奈子・野口克行・杉本憲彦・高木征弘・安藤紘基・今村剛
2. 発表標題 金星の上層大気で観測された気温擾乱とAFESモデルによる比較
3. 学会等名 地球電磁気・地球惑星圏学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 高木征弘・佐川英夫・安藤紘基・松田佳久
2. 発表標題 金星の紫外アルベドとスーパーローテーションの長期変動
3. 学会等名 日本気象学会2020年度春季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Takagi, M., N. Sugimoto, H. Ando, H. Kashimura, and Y. Matsuda
2. 発表標題 Mean meridional circulation in the Venus atmosphere
3. 学会等名 Symposium on Planetary Sciences 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 安藤紘基, 高木征弘, 杉本憲彦, 佐川英夫, 松田佳久
2. 発表標題 大気大循環モデルを用いた金星雲分布の再現
3. 学会等名 日本気象学会2019年度秋季大会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 青木 淳一、秋山 豊子、大平 哲、金谷 信宏、小林 宏充、杉本 憲彦、六車 明	4. 発行年 2017年
2. 出版社 慶應義塾大学出版会	5. 総ページ数 164
3. 書名 法学・経済学・自然科学から考える環境問題	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	安藤 紘基 (ANDO Hiroki) (00706335)	京都産業大学・理学部・助教 (34304)	
研究分担者	杉本 憲彦 (SUGIMOTO Norihiko) (10402538)	慶應義塾大学・法学部(日吉)・教授 (32612)	
研究分担者	佐川 英夫 (SAGAWA Hideo) (40526034)	京都産業大学・理学部・教授 (34304)	
研究分担者	高谷 康太郎 (TAKAYA Koutarou) (60392966)	京都産業大学・理学部・教授 (34304)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計3件

国際研究集会 Workshop for Venus modelling and observation in collaboration between AFES-Venus and LMD/GCM teams	開催年 2018年～2018年
国際研究集会 Workshop for Venus modelling and observation in collaboration between AFES-Venus and LMD/GCM teams	開催年 2019年～2019年

国際研究集会 Workshop for Venus modelling and observation in collaboration between AFES-Venus and Lisbon teams	開催年 2019年～2019年
---	--------------------

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------