

令和 6 年 6 月 18 日現在

機関番号：34304

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2023

課題番号：20K04046

研究課題名(和文) アルマ望遠鏡データを利用した惑星上層大気力学の観測的研究

研究課題名(英文) Observational study of planetary atmosphere with ALMA

研究代表者

佐川 英夫 (Sagawa, Hideo)

京都産業大学・理学部・教授

研究者番号：40526034

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、金星および火星の上層大気力学に関する観測的制約を得ることを目的とした。両惑星の上層大気中に存在する一酸化炭素(CO)のサブミリ波帯吸収線スペクトルを観測し、大気中の風速によるスペクトルのドップラーシフトを検出した。観測で得られた金星上層大気の上層大気ドップラー風速分布を大気大循環モデルの数値実験結果と比較したところ、過去の研究で示唆されていたよりも空間スケールの大きな大気重力波を含むモデルの方が観測と整合する結果となった。火星に関しては、アルマ望遠鏡を用いて、全球ダストストーム期間中の風速場の貴重な観測的知見を取得した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまで観測的知見が乏しかった金星・火星の上層大気力学に関して、新たな知見が得られた。また、アルマ望遠鏡の惑星観測データの解析ノウハウを定量的に評価したことで、今後の類似研究の参考となる知見が得られた。惑星をアルマ望遠鏡で観測した際、空間周波数の短い成分がフィルタリングされることは元々知られていたが、それが、惑星上で様々な空間スケールで分布している大気微量成分を観測した際にどのような影響を及ぼすのかを議論した。さらに、本研究期間の最中に判明した、アルマ望遠鏡の較正処理における問題点に関しても、輝度の不確かさだけでなくスペクトルの形状をも変化させるということを実験で明らかにした。

研究成果の概要(英文)：The objective of this study was to obtain observational constraints on atmospheric circulation in the upper atmospheres of Venus and Mars. Submillimeter-wave band absorption line spectra of carbon monoxide (CO) in the upper atmospheres of both planets were observed, and Doppler shifts in the spectra due to the line-of-sight velocity of atmospheric winds were derived.

The Doppler wind velocity profiles of the upper atmosphere of Venus obtained with (sub) millimeter-wave interferometer were compared with the numerical results of the atmospheric general circulation model GCM. The observed Doppler-wind maps were more consistent with a model that allows the presence of gravity waves with larger spatial scales than suggested in previous studies. For Mars, valuable observational information on winds during a global dust storm was obtained with ALMA.

研究分野：惑星科学、惑星大気のリモートセンシング、惑星大気中の放射伝達

キーワード：惑星上層大気 大気循環 ドップラーシフト アルマ望遠鏡 リモートセンシング

1. 研究開始当初の背景

惑星大気循環の観測は主に大気微量成分や雲・エアロゾル (以下、トレーサーと呼ぶ) が移流される様子を観測することで行なわれてきた。近年では金星探査機「あかつき」が金星大気のスーパースペクトル (高速の東西風) の詳細観測を行っているが、それらは金星を覆う雲層の様子の時間変化から測定されている。この観測的アプローチの欠点は、トレーサーが「無い」場所での大気循環の様子が観測できないことである。前述の金星を例に取れば、「あかつき」による観測で確かに金星の雲層 (高度 60・70 km 付近) の大気循環の様子は観測できるが、それ以外の高度領域の観測的情報が得られない。そのため、大気スーパースペクトルの構造が雲層より上方にどのように伸びているのかが未解明なままである。この欠点を解決するには雲層以外の高度領域の風速観測を可能にする新たなトレーサーが必要となり、その一つが本課題で取り扱う「大気放射のドップラーシフトを利用した直接的な風速測定」である。

惑星大気の大気放射スペクトルには大気微量成分の様々な吸収線が観測される。高い波長分散能力 ($\lambda/\Delta\lambda \sim 10^6$) を持つヘテロダイン測器で惑星大気放射を観測すると、大気の運動に起因する観測視線方向の速度が、大気微量成分の吸収線のドップラーシフトとなって観測される (これは系外惑星探査の視線速度法と同様の原理である)。この手法の大きな強みとして、風速を観測視線方向に限定されるものの、直接的に観測できることと、異なる光学的厚みを持つ分子スペクトル (同じ分子種でも吸収線の遷移が異なれば異なる光学的厚みを持つ) を観測することで、様々な高度に観測感度を有したドップラーシフトを測定できるという点が挙げられる (Clancy et al. 2012a など)。但し、風速の観測視線方向の成分しか測定できないため、この手法による観測結果を水平面内の風速場として解釈するには何らかの大気循環構造 (水平面内の風向き) の仮定が必要となる。実際、これまでもドップラーシフトを利用した金星上層大気の大気循環の風速観測がいくつか行なわれているが (Moulet et al. 2012; Clancy et al. 2012b など)、それらの研究では「全球で一様な東西風」や「全球で一様な夜昼間循環」といった、極めて単純な大気循環モデルの仮定のもとで議論が行われており、現実の金星上層大気の大気循環を適切に表現するだけの精緻さは達成されていない。そのことも理由となり、これらの先行研究では観測例ごとに異なる結果が得られているが、その物理的な背景に関する理解も一向に進んでいなかった (時間変化が激しいという考察で議論が停滞していた)。

2. 研究の目的

前述のように、惑星大気放射のドップラーシフト観測データの解釈には未解明な点が多く残されている。その原因の一つが、観測視線方向の速度成分を水平面内の風速場に変換する際の不確実性である。事実、Moulet et al. (2012) では、金星ディスク上で観測されたドップラーシフトの空間分布を説明するために、夜昼間循環モデルの強度を昼面と夜面の緯度帯毎にそれぞれアドホックにチューニングせざるを得なかった。こうしたチューニングに物理的な根拠を求めることは難しい。そこで、本研究課題ではデータ解析手法を根本から見直すことで、ドップラーシフトの観測データから金星上層大気の大気循環に関する有用な観測的知見を得ることを目的とする。また、同様のデータ解析手法を金星ダストストーム中の火星大気の大気循環の観測データにも適用し、火星上層大気の大気循環が浮遊ダストの増大によってどのように変化したかを明らかにすることを当初の研究目的とした。そして、研究を進めていく中で、本研究で利用するアルマ望遠鏡の観測データにデータ較正の問題が存在することが明らかとなり (詳細は 4 章で後述)、その問題点に対する詳細調査を行うことも本研究の目的として設定した。

本研究が目指す最終的なゴールは、金星および火星ではどのような大気循環が発達し、何が原因でその循環構造が時間・空間的に変化するのかが観測的に明らかにすることである。金星の大気スーパースペクトルや火星における南北半球を跨ぐような子午面循環などについての理論的研究は古くから存在し、最近では大気大循環モデルを用いた数値実験も盛んに行なわれている。そうした研究情勢において現在欠けているのは、より精度の高い観測的知見である。本研究ではドップラーシフトの観測から大気循環に関する精緻な観測的知見を引き出すという課題に取り組むものである。

3. 研究の方法

本研究では観測されるドップラーシフトを水平面内の風速場に変換するということを止め、その逆の発想で解析を行なう。つまり、大気大循環モデル (以下 GCM) で得られる三次元的な大気モデルを入力値として、各観測のジオメトリーなどを適切に考慮した放射伝達計算を行い、疑似観測データを作成する。その疑似観測データから実観測データの解析同様にドップラーシフト分布を求め、視線方向速度のまま実観測結果と GCM を比較するというアプローチである。これにより、

- 観測データの解釈に幾何学的な水平面内風速場の仮定を必要としない、
- GCM で計算される気温場や大気組成 (微量成分分布) と整合的な条件下での風速場の議論ができる (大気放射の解析時に問題となる荷重関数の不確実性が生じない)、

などの特徴を持った、新たな且つ精度の高いデータ解析を実現する。解析を行う観測データは、過去に干渉計を用いて取得された金星・火星上層大気の観測データや、JCMT サブミリ波単一鏡やアルマ望遠鏡を用いて新規取得する観測データである。

4. 研究成果

(1) まず、既存の金星上層大気のドップラー風速観測データに関する研究成果を述べる。本研究では、過去の観測時のジオメトリーを模擬した、GCM から予想されるドップラー風速マップを作成した。GCM はリスボン大学の Gabriella Gilli 博士らが開発を進める金星上層大気 GCM (Gilli et al. 2021) の数値実験結果を利用した。図 1 は、最左カラムが金星上層大気に存在する一酸化炭素 (CO) の吸収線のドップラーシフトの観測 (過去の干渉計による観測) から求めた、高度 100 km 付近のドップラー風速分布図である。赤系色が観測者 (地球) から遠ざかる向き、青系色が近づく向きの風速である。観測高度を 100 km 「付近」と述べたのは、この種の観測は特定の単一高度のみの大気物理量を反映しているのではなく、ある高度の上下に $\pm 5-10$ km 程度の鉛直幅を持った高度域の情報を反映しているためである。これは、荷重関数が鉛直方向に広がっていることに起因するが、このことはしばしば見過ごされがちである。1 列目は Moullet et al. (2012) でも解析されたデータを表示しており、2 列目以降は別の観測日時のデータを示した (Sagawa et al. in prep より抜粋)。地球から見た金星上での昼夜の位置関係がそれぞれ異なるため、大気循環の local time 依存性が可視化されている。

図 1 の左から 2 番目からのカラムには GCM から予想されるドップラー風速マップを示している。この風速マップは、GCM で計算された金星大気気温・気圧・風速・CO 濃度 3 次元分布を用いて放射伝達方程式を解くことで、GCM 内で作られている大気循環がドップラーシフトとして反映された金星 CO スペクトルマップを計算し、そこから観測データの解析と同一の手法でドップラー風速の分布を導出したものである。GCM 内で発生させる大気重力波のモデルパラメーターの違いで、T2、T6、Kobs の 3 通りの数値実験結果を採用している。これらの重力波

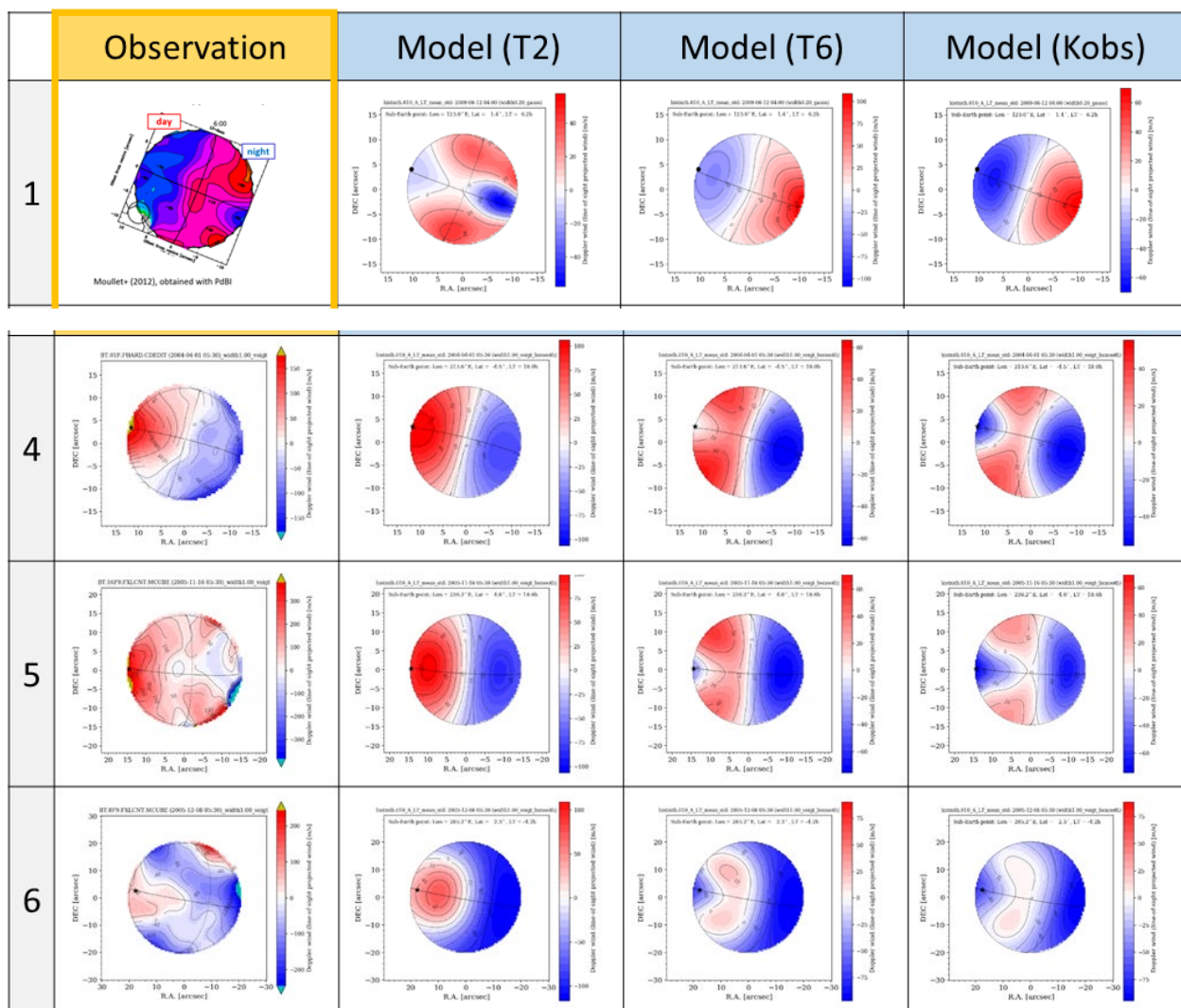


図 1: 金星上層大気のドップラー風速分布図。観測から得られた結果 (最左カラム) と GCM から得られた結果 (左から 2 番目以降のカラム)。詳細は本文を参照。複数の観測データのうちの一部を示した。

パラメーターの主な違いは水平波長であり、 $T_2 = 300 - 6,000 \text{ km}$ 、 $T_6 = 50 - 1,000 \text{ km}$ 、 $Kobs = 50 - 600 \text{ km}$ となっている。GCM で計算される気温分布が過去の観測と比較的に整合するとされるのは、 $Kobs$ のケースである。しかし、ドップラー風速の分布図を比較すると、 $Kobs$ を用いて生成した GCM ドップラー風速分布よりも、 T_2 を用いて生成した GCM ドップラー風速分布の方が観測データと相対的に良い一致を見せている。但し、水平波長が $6,000 \text{ km}$ (=金星半径相当) にも及ぶ大気重力波というのはその妥当性に疑問が生じる。そこで、このドップラー風速を求めた際の観測データから、ドップラー風速以外の大気物理量 (例えば気温分布) を推定し、それを GCM の結果と比較するなどの追加調査を進めている。それらの結果は、現在、投稿論文として取り纏め当中である。

(2) つぎに、アルマ望遠鏡を用いて新規観測した火星観測データの解析について述べる。折しも、2018 年に火星全球をダストが覆う全球ダストストームが発生しており、その期間中の火星大気のコップラー風速マップを取得することに成功した。このデータ解析を行う中で、アルマ望遠鏡で火星などの明るい広がった天体を観測した際のデータ較正に重大な問題点が含まれることが判明した。これは、アルマ望遠鏡がデータを取得する際に、二つのアンテナで受信した観測天体からの信号の相互相関ビジビリティを自己相関ビジビリティで規格化する仕様になっていることが遠因となっている。詳細はアルマ観測所からのレポート (ALMA Knowledgebase) の記述に譲るが、このレポートでは観測データのフラックス絶対値に対するキャリブレーションの不確かさについては述べられているものの、ドップラー風速の導出に重要となるスペクトルの「形状」にどの程度の定量的な影響があるのかは自明ではない。そこで、本研究では、GCM データに基づいて生成した疑似観測データに、アルマ望遠鏡と同等の観測処理を施すことで、火星 CO スペクトルの形状がどのように影響を受けるかを検証した。図 2 がその検証結果の一例である。左のスペクトルはアルマ望遠鏡を用いて実際に取得された火星大気のコ CO スペクトルである。このスペクトルには、上述のデータ較正の問題点が含まれている。中央のスペクトルは、GCM で計算される現実的な火星大気のコ CO 分布の情報をもとに、観測日時での火星の観測ジオメトリーを考慮し、アルマ望遠鏡で観測される CO スペクトルを模擬したものである。この模擬には、アルマ望遠鏡が相互相関ビジビリティを自己相関ビジビリティで規格化していることの模擬として、火星ディスク全球で平均したスペクトルで規格化する操作を含めている。吸収線の中心部分が、一旦 emission のような構造を作り、そこから急峻な吸収線構造を作っている様子などが、実際のアルマ望遠鏡の観測データと模擬データとで一致している。図 2 の右のスペクトルは、本来、火星大気のコ CO スペクトルはどのようなものかを示している。これらのスペクトルから、アルマ望遠鏡で得られる火星 CO スペクトルの形状は、本来の火星 CO スペクトルの形状を正しく表現できていないことが分かる (干渉計特有の空間周波数のフィルタリングの影響もここには含まれる)。

このデータ較正の問題点に関して、アルマ観測所の専門スタッフらと議論を重ねた結果、アルマデータを較正処理する際に **renormalization** と呼ばれる特別な追加処理を適用することで、ある程度のところまで補正できることが明らかとなった。そこで、アルマ望遠鏡の全火星データの較正処理を再度実施し、より信頼度の高い火星 CO スペクトルの生成およびそこからのコップラー風速マップの導出に成功した。火星ダストストーム中の風速場を直接的に観測した例は本研究が初であり、現在、それらの結果を投稿論文としてまとめている。

(3) 前述の金星・火星のサブミリ波帯 CO スペクトルの研究からの発展として、他天体 (タイタン) のアルマ望遠鏡データの解析や赤外線波長域での金星・火星大気微量成分の観測的研究に、本研究で得られた知見を共同研究者として参加している。

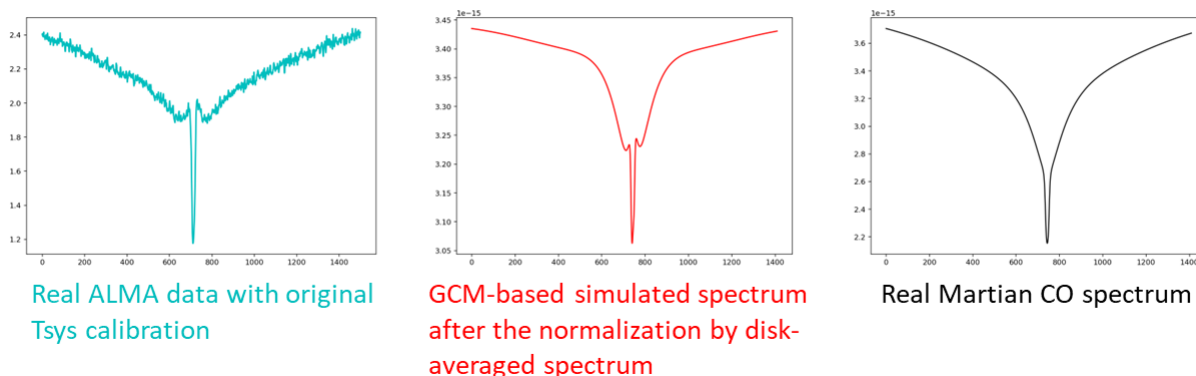


図 2：火星上層大気中の CO によるサブミリ波帯スペクトル

< 本報告書での引用文献 >

- ◆ Clancy, R. T., et al. (2012a), "Thermal structure and CO distribution for the Venus mesosphere/lower thermosphere: 2001-2009 inferior conjunction sub-millimeter CO absorption line observations", *Icarus*, 217, 779-793.
- ◆ Clancy, R. et al. (2012b), "Circulation of the Venus upper mesosphere/lower thermosphere: Doppler wind measurements from 2001-2009 inferior conjunction, sub-millimeter CO absorption line observations", *Icarus*, 217, 794-812.
- ◆ Gilli, G., et al. (2021), "Venus upper atmosphere revealed by a GCM: II. Model validation with temperature and density measurements", *Icarus*, 366, 114432.
- ◆ Moullet, A., et al. (2012), "Wind mapping in Venus' upper mesosphere with the IRAM-Plateau de Bure interferometer", *Astronomy & Astrophysics*, 546, A102.
- ◆ ALMA knowledge base: "What errors could originate from the correlator spectral normalization and Tsys calibration?",
<https://help.almascience.org/kb/articles/what-errors-could-originate-from-the-correlator-spectral-normalization-and-tsys-calibration> .

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計13件（うち査読付論文 12件 / うち国際共著 8件 / うちオープンアクセス 11件）

1. 著者名 Sato Takao M., Sagawa Hideo	4. 巻 390
2. 論文標題 A new constraint on HCl abundance at the cloud top of Venus	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Icarus	6. 最初と最後の頁 115307 ~ 115307
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.icarus.2022.115307	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 Miyamoto Akiho, Nakagawa Hiromu, Kuroda Takeshi, Takami Kosuke, Murata Isao, Medvedev Alexander S., Yoshida Nao, Aoki Shohei, Sagawa Hideo, Kasaba Yasumasa, Terada Naoki	4. 巻 48
2. 論文標題 Intense Zonal Wind in the Martian Mesosphere During the 2018 Planet Encircling Dust Event Observed by Ground Based Infrared Heterodyne Spectroscopy	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Geophysical Research Letters	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) 10.1029/2021GL092413	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 Iino Takahiro, Taniguchi Kotomi, Sagawa Hideo, Tsukagoshi Takashi	4. 巻 2
2. 論文標題 13C Isotopic Ratios of HC3N on Titan Measured with ALMA	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Planetary Science Journal	6. 最初と最後の頁 166 ~ 166
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/PSJ/ac134c	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 Rengel M., Shulyak D., Hartogh P., Sagawa H., Moreno R., Jarchow C., Breitschwerdt D.	4. 巻 658
2. 論文標題 Ground-based HCN submillimetre measurements in Titan's atmosphere: an intercomparison with Herschel observations	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Astronomy & Astrophysics	6. 最初と最後の頁 A88 ~ A88
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/0004-6361/202141422	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 Encrenaz T., Greathouse T. K., Marcq E., Sagawa H., Widemann T., Bezdard B., Fouchet T., Lefevre F., Lebonnois S., Atreya S. K., Lee Y. J., Giles R., Watanabe S., Shao W., Zhang X., Bierson C. J.	4. 巻 639
2. 論文標題 HDO and SO2 thermal mapping on Venus	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Astronomy & Astrophysics	6. 最初と最後の頁 A69-A69
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/0004-6361/202037741	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 該当する

1. 著者名 Iino T., Sagawa H., Tsukagoshi T., Nozawa S.	4. 巻 903
2. 論文標題 A Belt-like Distribution of Gaseous Hydrogen Cyanide on Neptune's Equatorial Stratosphere Detected by ALMA	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 L1-L1
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/2041-8213/abbb9a	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 -

〔学会発表〕 計5件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 5件)

1. 発表者名 Hideo Sagawa, Shohei Aoki, Eric Villard, Kazi Rygl
2. 発表標題 Doppler-wind measurements using ALMA
3. 学会等名 International conference on new insights into Mars achieved by remote-sensing observation, numerical simulation, and laboratory experiment of trace gases (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Hideo Sagawa
2. 発表標題 Revisiting Venus Doppler-wind maps obtained by ALMA
3. 学会等名 JpGU 2021 Assembly, Recent advances of Venus science and coming decades (AGU, EGU joint session), Online, June, 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hideo Sagawa, Takao M. Sato, Hajime Kita
2. 発表標題 Searching minor species on Venus atmosphere using the high-dispersion spectra taken by IRTF/iSHELL
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Hideo Sagawa, Takahiro Iino
2. 発表標題 Recent advances in the solar system science brought by ALMA observations
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Hideo Sagawa
2. 発表標題 Revealing the dynamics of Venus' upper atmosphere with submillimeter observations
3. 学会等名 ALMA at 10 years: Past, Present, and Future (国際学会)
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔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
--	---------------------------	-----------------------	----

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0件

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			
イタリア	国立天体物理学研究所 (INAF)			
ベルギー	王立宇宙航空研究所 (BIRA)			
米国	NASA Goddard Space Flight Center (GSFC)	Space Science Institute	Massachusetts Institute of Technology	
ドイツ	欧州南天天文台 (ESO)	マックスプランク研究所太陽系科学部門		
ポルトガル	リスボン大学			