

惑星気象研究センター活動報告

高 木 征 弘*

高 谷 康太郎*

佐 川 英 夫*

安 藤 紘 基*

鈴 木 杏 那†

要 旨

金星や火星・木星など、太陽系惑星のほとんど惑星には大気が存在し、そこでは地球の気象学では説明できない多彩な大気現象が生じている。地球や惑星の大気現象とその表層環境を統一的に理解すること、それによって地球に対する理解を深め、地球環境の普遍性と特殊性を明らかにすることが、比較惑星気象学の目標である。その第一歩として、総合学術研究所・惑星気象研究センターでは、理論モデルと観測データを最大限に活用した惑星大気の研究手法を確立することにより、金星気象システムの全体像を解明することを目指している。本報告では、令和元年度における本センターの研究成果について概説する。

キーワード：惑星気象学，惑星大気科学，金星大気スーパーローテーション，金星気象衛星あかつき，データ同化

1 惑星気象研究センターの概要

太陽系のほとんどの惑星と一部の衛星には大気が存在し、そこでは地球の常識からは想像もつかないさまざまな大気現象が生じている。大気全体が自転の60倍もの速さで高速回転している金星の大気スーパーローテーションや、惑星規模の風の分布と密接に結びついた木星や土星の縞模様はその代表例である。2015年12月には日本の金星探査機「あかつき」が金星周回軌道からの詳細観測を開始し、国内外で惑星気象に対する関心が高まっている。近年では、太陽系以外の恒星系にも多くの惑星（系外惑星）が発見され、宇宙生命の存在に対する興味から、系外惑星の表層環境やハビタブルゾーン（生

* 京都産業大学理学部宇宙物理・気象学科

† 京都産業大学大学院理学研究科

命の存在可能領域)の解明も大きな課題となりつつある。

しかしながら、従来の気象学では地球以外の惑星における大気現象の多くを説明できず、系外惑星の大気・表層環境やハビタビリティを予言することができない。気象学の対象を地球から太陽系の惑星や衛星、さらには系外惑星にまで広げ、諸惑星の気象とその表層環境を統一的に理解すること、それによって地球に対する理解を深め、地球環境の普遍性と特殊性を明らかにすることが、強く求められている。

惑星気象研究センターは、理論モデルと観測データを最大限に活用した惑星大気の研究手法を確立し、惑星気象全体の理解に向けた、汎惑星気象学の確立を目指すことを目的として、総合学術研究所に設置された研究センターである。本研究センターが現在主な研究対象としている金星は、自転が周期 243 日と遅く、温室効果気体(二酸化炭素)を主成分とする非常に厚い大気(地表面気圧は約 92 気圧)をもっており、地球とは対照的な環境を備えている。また、宇宙生命の発見が期待される地球型系外惑星のモデルとしても重要である。金星は、自転速度や大気量・太陽放射量の違いなどが大気循環に与える影響を考察し、比較惑星気象学を推進するための最良のモデルである。

そこで本研究センターでは、宇宙航空研究開発機構(JAXA)を始めとする国内外の研究機関と協力しながら、金星の気象システムを構成する力学過程、雲物理・光化学過程、放射輸送過程の包括的な理論・数値モデルを構築し、さらに最新のデータ同化手法を用いて金星探査機「あかつき」や Venus Express の観測データと統合することにより、金星気象システムの全体像を解明することを目指している。

本研究センターでは、惑星気象研究を通じ、学内における研究の活性化や学外との研究協力を推進することも重要であると考えている。

2 今年度の研究成果

(1) 金星雲物理・物質循環モデルの開発

金星は硫酸エアロゾルを主体とする分厚い雲によって全球的に覆われている。また、金星の雲は太陽放射の散乱・吸収や高温の下層大気からの熱放射の吸収などを通じて、金星全体の熱構造を決める要因にもなる。これまで金星の雲物理過程に関する観測的研究が数多くなされてきた。しかし、Venus Express やあかつきなどの金星探査機に搭載された光学機器では、基本的に雲頂や雲底といったある特定の高度情報しか得ることができない。この問題点を克服する一つの手段として、大気大循環モデルなどを用いた数値的研究がある。本研究では、大気大循環モデル AFES-Venus に現実的な雲物理過程および物質循環モデルを導入し、金星の雲分布を再現することを目的とする。

令和元年度は、昨年度までに開発した雲物理モデルを AFES-Venus に組み込み、長期間の数値シミュレーションを実施した。得られたデータを詳細に解析することにより、以下のような結果が得られた。雲の濃度の指標として mass loading (単位体積あたりに含まれる雲の質量, ML と略記する)を用いると、AFES-Venus で得られた ML は極域で最大、中緯度で極小となった。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)。また、水蒸気や硫酸蒸気の緯度-高度分布についても調べたところ、それぞれ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。極域で ML が最大となるのは、極域の低安定度層で発達する短周期擾乱に伴う鉛直流により、硫酸蒸気や水蒸気が下層から輸送されることが原因であることもわかった。これらの成果は国際研究雑誌に掲載された (Ando et al., 2020)。また、低緯度の ML の東西分布には周期 5.5 日程度の顕著な時間変化があり、波数 1 の構造が目立つ。この特徴は過去の地上観測 (Crisp et al., 1991) でも示されており、その原因がケルビン波などの大気波動の影響であることが示唆された。この成果についても現在論文にまとめており、近々国際研究雑誌に投稿予定である (Ando et al., in prep.)。

現在、雲物理モデルの改良と並行して、観測と直接比較可能な大気微量成分の導入に向けて研究を進めており、特に CO に着目している。CO は寿命が長く、トレーサーとしても活用できるため、観測と数値モデルで得られた CO の時空間分布を比較検討することにより、大気大循環の構造に関する信頼性の高い情報が得られるものと期待される。

(2) あかつき観測データを用いた金星大気構造に関する研究

金星には分厚い濃硫酸の雲が全球的に存在するため、地上望遠鏡や人工衛星に搭載されたカメラ・分光計を用いた光学観測では、雲層の中やその下の領域を観測することが難しい。そうした領域を観測する有力な手法の一つが電波掩蔽法である。電波掩蔽法では、探査機が地上局から見て惑星の背後に隠れる時または背後から出てくる時に電波を射出し、探査機の軌道運動と大気の屈折による電波の受信周波数の変化および幾何光学を組み合わせることにより、気温の高度分布を高精度 (温度測定誤差約 0.1K)・高分解能 (高度分解能約 1 km) で取得することができる。

本研究では、Venus Express とあかつきの電波掩蔽観測データを解析し、高度 40–85km における気温分布と大気安定度分布を全球的に取得した。その結果、緯度 70° より低緯度側では、安定度分布が過去の直接観測と整合的であることがわかった。しかし緯度 70° より極域側では、雲層の下 (高度 42km あたり) まで安定度の低い領域が続いていることが分かった。このような安定度の緯度分布は地球と正反対の性質を持ち、金星大気の観測史上初めて見出されたものである。このような安定度の低い領域が極域の深くまで存在することは、そこで活発な大気の鉛直運動が生じていることを示唆し、極域の分厚い雲の生成・維持に寄与している可能性がある。また、本研究によって全球のかつ統計的に得られた気温と安定度のデータは、大気大循環モデルをはじめとする数値モデルにとってのよいリファレンスとして、今後大いに活用されることが期待される。なお、本研究成果は 2020 年 2 月 26 日に本学よりプレスリリースされ、読売オンラインや AFP 通信など様々なメディアに取り上げられた。

(3) 金星大気のための放射伝達モデルの開発

金星には大気スーパーローテーション以外にも、地表面気温が 730K にも達するという著しい現象

がある。この地表面および下層大気の高温は、金星大気の主成分である膨大な量の二酸化炭素がもたらす温室効果によって説明されるが (Pollack and Young, 1975; Matsuda and Matsuno, 1978; Pollack et al., 1980), 現在では分光観測や大気大循環モデルのために、最新の二酸化炭素や大気微量成分の吸収線データに基づく精密な放射伝達モデルが必要とされており、我々は最新の吸収線データベースに基づいた放射伝達モデルの開発に取り組んでいる。

昨年度までに開発した放射伝達モデルを用いて、1次元放射対流平行実験を行ったところ、地面温度が現実よりも200Kほど過小評価されることが判明した。これはCO₂の吸収線型としてVoigt型を用い、中心波数から125cm⁻¹でline cut-offしているため、大気的全光学的厚さが過小評価されているためと考えられた。そこで、今年度はCO₂の吸収線型としてLee et al. (2016)で提案された波長帯ごとに最適な線型を採用し、さらにline cut-offを200cm⁻¹に緩めることによりモデルの改良を行った。そうした上で、吸収線について気温34点(100–800K, 20Kごと)、気圧36点(0.01–100atm, 対数線形)のテーブルを作成し、各層での気圧・気温で線形内挿することにより、その層での吸収係数を求めた。金星の雲は濃硫酸の液滴からなると仮定し、複素屈折率は75% H₂SO₄の実験値を、雲粒子数濃度の鉛直分布と粒径分布はHaus et al. (2015)を用いた。ラインバイラインモデルと本研究で開発したブロードバンドモデルのOLR(外向き赤外放射量)を比較したところ、相対誤差1%以下であることが確認できた。次に、1次元放射対流平行実験を行ったところ、下層温度にかなりの改善がみられた。しかしながら、金星標準大気(VIRA, 緯度30°)と比較すると30K程度の過小評価である。今後は赤外吸収過程の追加検討を行い、GCMに組み込むことのできる放射伝達モデルを完成させる予定である。

(4) 金星大気用データ同化システムの開発

データ同化とは、風速や温度・湿度といった観測データを数値シミュレーションに取り込むことにより、シミュレーションの結果の信頼性を向上させる手法である。地球の気象学では、台風の進路や集中豪雨の予測精度向上、再解析データの作成など、幅広い領域で活発な研究・応用が行われている。惑星分野でも、観測データの豊富な火星について、データ同化による火星気象システムの再解析データがフランス気象力学研究所(LMD)によって作成・配布されている。一方、金星についてはこれまで観測データが少なく、GCMもデータ同化に耐えうる水準ではなかったため、データ同化の実践はまだ先の問題と考えられていた。しかしながら、我々の開発した金星GCM(AFES-Venus)が世界に先駆けて観測結果の現実的な再現に成功したことから(Kashimura et al., *Nature Comm.*, 2019), AFES-Venusを基盤とするデータ同化システムにより、金星大気循環の全体像を再現し、その理解を格段に進めることができると期待されている。令和元年度は、東京大学工学部およびJPL/NASAと共同で、惑星大気における衛星間電波掩蔽観測の実現可能性の検討と、その有効性を検証するための観測シミュレーションを実施した。従来の電波掩蔽観測は探査機-地球間で観測を行うため、観測頻度が低く、観測点の空間的な広がりにも強い制約があった。地球との通信を行うための主衛星と、

衛星間で電波掩蔽観測を実施するための複数の子衛星から構成される衛星群を、惑星の周回軌道に投入することができれば、時間的・空間的に密な電波掩蔽観測が実施可能である。本研究では、イプシロンロケットによって実現可能な観測計画として、主衛星1機と子衛星2機を想定し、いくつかの周回軌道案について観測シミュレーションを行った。その結果、適切な軌道を選択した場合には、3機の探査機を用いた衛星間電波掩蔽観測によって、空間的に十分広がりのある観測を高頻度を実施できることが確認された。また、この観測で得られる温度データは、データ同化プロセスを通じて、大気大循環モデルの温度場をよく修正することも示された。今後は子衛星の数を増やした場合などについても検討を行い、将来の探査計画立案に向けた準備を進める予定である。

(5) 金星大気大循環の数値的研究

令和元年度は昨年度に引き続き、我々が開発している金星大気大循環モデル AFESVenus を用いて、金星大気大循環に関する数値的研究をおこなった。主なテーマは、(1) 熱潮汐波に関する研究、(2) 上層大気における重力波の研究、(3) 子午面循環に関する研究である。

(1) あかつき中間赤外カメラによる観測 (Kouyama et al., 2019) との比較の結果、GCM で再現された熱潮汐波 (Takagi et al., 2018) の位相分布が、雲層上端高度の低緯度域で半波長ほど東西方向にずれていることが明らかになった。この不一致の原因を調べるため、大気安定度 $\Gamma = \frac{dT}{dz} + \frac{g}{c_p}$ の鉛直分布を変化させて数値実験を行った。その結果、雲頂低緯度の熱潮汐波の位相は主に半日潮によって決定され、その位相分布は高度 60–70km 付近の大気安定度に強く影響されることがわかった。最近の電波掩蔽観測の結果 (Tellmann et al., 2009; Ando et al., 2018) を参照し、より現実に近い安定度分布を用いると、あかつき観測と整合的な位相分布が得られることも示された。

(2) あかつき電波掩蔽観測データの解析により、高度 80km 付近に重力波によるものと思われる温度擾乱が検出された。従来、高度 60–70km 付近の重力波は 55–60 km に存在する雲対流層によって励起され、放射冷却等の影響により 70km 付近で減衰するものと考えられてきた。したがって、この解析結果は高度 80km 付近で新たに重力波を励起するメカニズムが存在する可能性を示唆している。高解像度大気大循環モデルによるシミュレーションのデータを検討した結果、次のようなことがわかった。高度 80km 付近では熱潮汐波の振幅が増大し、大気安定度の低い領域が作られる。また、この高度では大気スーパーローテーションが強く減速されるため、鉛直シアが大きくなる。この2つの効果によって、Richardson 数が 0.25 を下回る領域が作られ、局所的なシア不安定によって重力波が励起される可能性がある。現在、Richardson 数に対する短周期擾乱の効果についても検討を進めているところである。

(3) (1) でおこなった数値実験の結果を解析したところ、高度 60–70km の大気安定度は平均子午面循環にも強く影響していることが明らかになった。昨年度までの研究により、雲層高度の中緯度には対称不安定によって励起される顕著な直接循環が存在する可能性が指摘されたが、この直接循環は安定度が十分高い場合には消失する。その結果、低緯度にハドレー循環、中高緯度にフェレル循環

という地球的な子午面循環の構造が実現する可能性がある。ただ、雲層付近の大気安定度は時空間変動が大きいため、対称不安定が卓越する状態と、地球的な子午面循環が卓越する状態が、時間変化しながら実現している可能性もある。あかつき IR 2 カメラの夜面観測などの観測結果と比較しながら、研究を進める予定である。

(6) 地上望遠鏡による金星大気の観測

金星大気には地球大気では見られないような大気化学プロセスが存在し、それらは高度により複数の種類に区分される。具体的には、雲層より上層の大気における光化学、雲層では硫酸液滴の生成消滅に絡んだエアロゾル化学反応、そして下層の高温大気において熱力学平衡に支配される化学反応である。また、化学反応に参加する分子種によっても括ることができ、硫黄酸化物 (SO_x) 反応サイクル、炭素酸化物 (CO_x) 反応サイクル、塩化物 (Cl_x) 反応サイクルなどが重要視されている。これらの化学反応の詳細経路は未だ理解が不十分な点も多く、例えば、金星大気の主成分である二酸化炭素 (CO_2) がなぜ化学的に安定に存在するのかという基本的なことすらはっきりとしていない。 CO_2 は、紫外線によって CO と O に容易に光解離するが、 CO と O との直接的な再結合はスピン禁制の反応であり、反応効率が非常に遅い。一方、金星大気中には CO_2 が 95% 以上の混合比で安定的に存在しており、何らかの高効率な CO_2 復元反応が存在しているはずであるが、まだ特定されていない（おそらく、 ClO_x 系の分子による触媒反応が鍵となる）。

こうした大気化学の詳細を理解するためには、大気微量成分の高精度な定量が重要となる。そこで、我々は地上望遠鏡の高分散分光器を用いて金星大気の分光観測を行った。用いた観測装置は NASA の赤外望遠鏡 IRTF（マウナケア山頂）に取り付けられているエシエル型分光器 iSHELL である。2018 年 8 月と 2019 年 1 月・2 月に金星の昼面および夜面を分光観測した。観測は金星ディスク上をマッピングしており、「あかつき」では導出することが難しい大気微量成分の空間分布を導出することを狙ったものである。

現在、データ解析を継続中ではあるが、以下に観測データの概要を簡単に述べる。昼面（雲層付近を観測）の観測スペクトルには、 CO_2 の吸収線に加えて、 HDO および HCl の吸収線が観測された。 CO_2 の吸収線からは、雲頂高度の推定が可能である。また、 HCl に関しては、過去の Venus Express 探査機による観測 (Mahieux et al., 2015) と他の地上観測 (Krasnopolsky, 2010) とで導出された存在量におよそ 10 倍もの不一致が存在している。今回の IRTF での観測により、この不一致問題に新たな制約を加えることができると期待される。夜面のデータは、昼面からの迷光の混入が激しく、今後データ解析を丁寧に行なう必要があるが、下層大気の CO や HDO のスペクトルが検出されている。下層大気の CO は大気循環のトレーサーとしても利用できるため、今後、GCM の結果などとも比較することが期待される。

(7) 非静力学モデルによる金星山岳波

金星探査機「あかつき」に搭載された LIR カメラでとらえられた惑星規模の弓状模様は、地形と東西風によって励起された山岳波が鉛直伝播し、雲頂高度の雲によって可視化されたものであると考えられている (Fukuhara et al., 2017)。この弓状模様は夕方の領域で観測されやすいというローカルタイム依存性をもつ (Kouyama et al., 2017)。複数のモデルによって、鉛直伝播した金星山岳波による弓状模様が再現されてきており (Navarro et al., 2018; Lefevre et al., 2019; Yamada et al., 2019)、山岳波出現のローカルタイム依存性はローカルタイムにともなう大気安定度の変化で説明できる可能性が示唆されている (Lefevre et al., 2019)。しかし、Young et al. (1987) によると、1 m/s 程度の地表面の東西風速の変化が、山岳波の鉛直伝播に影響することが示唆されている。これらのことから、山岳波の鉛直伝播過程を理解するためには、大気安定度と東西風の変化がそれぞれどの程度、山岳波の伝播に影響を及ぼすのか明らかにすることが必要である。

今年度は、昨年度までに開発した金星大気用の非静力学モデル CReSS を用いて、理想的な地形と現実地形に対する山岳波の計算を行った。理想的な地形を用いた計算によると、Young et al. (1987) で示されたように、地表面付近の東西風速が変化すると、山岳波が鉛直伝播できるかどうかに影響することがわかった (Suzuki et al., JpGU Meeting2019)。また、あかつきで観測された弓状模様のような、東西波長が 2000 km 程度の山岳波も高度 54 km まで伝播する可能性も示唆された (Suzuki et al., AOGS 16th Annual Meeting)。この結果はあかつきによる観測とは整合的であるが、Young et al. (1987) とは矛盾する結果であり、山岳波の減衰過程についてさらなる検討が必要である。

また、実地形を用いた予備的な計算では、Lefevre et al. (2019) で示唆されているような、下層の大気安定度が大きくなると山岳波が伝播しやすくなる様子に加えて、東西風速が大きくなることによっても、山岳波が伝播しやすくなる様子が確認できている。下層の安定度と東西風速の組み合わせによっては、あかつきの観測で得られたような雲頂高度の弓状模様の温度振幅 1-2 K が得られており、弓状模様出現のローカルタイム依存性との整合性を検討中である。今後は高度 55-60 km に存在する雲層下部の中立層の安定度を変化させての計算や、Aphrodite Terra 以外の領域についても計算を行い、観測や先行研究と比較しながら山岳波の伝播過程について調べる予定である。これらの結果は令和 2 年度中に国際研究雑誌への投稿論文としてまとめていく予定である。

(8) 新しいエネルギー変換および波エネルギーフラックスの定式化

地球や金星などの地球型惑星の大気循環を解明するためには、大気波動と基本流との相互作用、いわゆる波と基本流との相互作用の理解が重要である。この研究には長い歴史があり、その成果はいわゆる変形オイラー平均 (Transformed Eulerian Mean; TEM) 方程式系としてまとめられている。この方程式系により、波束伝播とその基本流への影響、そして大気循環のラグランジュ的運動のそれぞれの 3 次元的構造を統一的に記述出来るが、その定式化はほとんどの場合、等圧面座標系を用いてなされており、ラグランジュ的運動の記述が近似的である問題があった。大気のラグランジュ運動をよ

り正確に記述するためには、断熱条件下における大気が（等圧面ではなく）等温位面上で運動することから、等温位面座標系で定式化する必要があるが、この視点での先行研究では、東西平均した南北-鉛直2次元の枠組みの定式化がほとんどであり、3次元での定式化はされていなかった。

そこで本研究では、この双方の限界を解消するための理論開発に取り組み、ロスビー波を対象にして、等温位面座標系における3次元 TEM 方程式系の導出に成功した。これにより、ロスビー波東伝播とその基本流への影響、そして大気循環のラグランジュ的運動のそれぞれの3次元構造をより正確に記述する事が可能となる。この成果により、例えばハドレー循環の3次元構造や、それとロスビー波活動との関係などを定量的に評価する事が可能となり、大気循環のより正確な理解に大きく貢献する事が期待できる。また、金星大気では雲層高度に特異な温位分布が存在しており、本研究の成果はそこでの傾圧不安定波等の波活動の理解にも資することが期待される。この定式化は移動性擾乱に対するものであり、今後は停滞性ロスビー波にも適用出来る理論開発が期待される。また、より広範な大気現象への適用を見据え、重力波も含むより包括的な理論開発も今後の課題である。

3 今年度の活動報告

(1) 研究論文

1. Imai, M., T. Kouyama, Y. Takahashi, A. Yamazaki, S. Watanabe, M. Yamada, T. Imamura, T. Satoh, M. Nakamura, S. Murakami, K. Ogohara, and T. Horinouchi (2019), Planetary-scale variations in winds and UV brightness at the Venusian cloud top: Periodicity and temporal evolution, *J. Geophys. Res.: Planets*, 124, doi:10.1029/2019JE006065
2. Sugimoto, N., M. Abe, Y. Kikuchi, A. Hosono, H. Ando, M. Takagi, I. Garate-Lopez, S. Lebonnois, and C. Ao (2019), Observing system simulation experiment for radio occultation measurements of the Venus atmosphere among small satellites, *J. Japan Society of Civil Engineers Ser. A2 (Applied Mechanics)*, 75 (2), (*J. Applied Mechanics*, 22), 477-486, doi:10.2208/jscejam.75.2_I_477
3. Kitahara, T., T. Imamura, T.M. Sato, A. Yamazaki, Y.J. Lee, M. Yamada, S. Watanabe, M. Taguchi, T. Fukuhara, T. Kouyama, S. Murakami, G.L. Hashimoto, K. Ogohara, H. Kashimura, T. Horinouchi, and M. Takagi (2019), Stationary features at the cloud top of Venus observed by Ultraviolet Imager onboard Akatsuki, *J. Geophys. Res.: Planets*, 124, <https://doi.org/10.1029/2018JE005842>
4. Sugimoto, N., T. Kouyama, and M. Takagi (2019), Impact of data assimilation on thermal tides in the case of Venus Express wind observation, *Geophys. Res. Lett.*, 46, 4573-4580, doi:10.1029/2019GL082700
5. Kouyama, T., M. Taguchi, T. Fukuhara, T. Imamura, T. Horinouchi, T.M. Sato, S. Murakami, G.L. Hashimoto, Y.J. Lee, M. Futaguchi, T. Yamada, M. Akiba, T. Satoh, and M. Nakamura (2019),

- Global structure of thermal tides in the upper cloud layer of Venus revealed by LIR on board Akatsuki, *Geophys. Res. Lett.*, 46, 9457-9465, <https://doi.org/10.1029/2019GL083820>
6. Kouyama, T., S. Kato, M. Kikuchi, F. Sakuma, A. Miura, T. Tachikawa, S. Tsuchida, K. Obata, and R. Nakamura (2019), Lunar Calibration for ASTER VNIR and TIR with Observations of the Moon in 2003 and 2017. *Remote Sens.* 11, 2712.
 7. 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 (2019), Long-term Variations of Venus's 365 nm Albedo Observed by Venus Express, Akatsuki, MESSENGER, and the Hubble Space Telescope, *The Astronomical Journal*, 158, <https://doi.org/10.3847/1538-3881/ab3120>
 8. Gonçalves, R., P. Machado, T. Widemann, J. Peralta, S. Watanabe, A. Yamazaki, T. Satoh, M. Takagi, K. Ogohara, Y.J. Lee, A. Harutyunyan, and J. Silva (2020), Venus' cloud top wind study: coordinated Akatsuki/UVI with cloud tracking and TNG/HARPS-N with Doppler velocimetry observations, *Icarus*, 335, <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2019.113418>
 9. 佐川英夫, 青木翔平, 前澤裕之, 中川広務, 笠羽康正 (2019), 全球ダストストーム中の火星地表放射の観測, *遊・星・人*, 28, 277-284.
 10. Kinoshita, T., K. Takaya, T. Iwasaki (2019), On the three-dimensional mass-weighted isentropic time mean equation for Rossby waves, *SOLA*, 15, 193-197, [doi:10.2151/sola.2019-035](https://doi.org/10.2151/sola.2019-035)
 11. Ando, H., T. Imamura, S. Tellmann, M. Pätzold, B. Häusler, N. Sugimoto, M. Takagi, H. Sagawa, S. Limaye, Y. Matsuda, R. K. Choudhary, and M. Antonita (2020), Thermal structure of the Venusian atmosphere from the sub-cloud region to the mesosphere as observed by radio occultation, *Scientific Reports*, 10:3448, <https://doi.org/10.1038/s41598-020-59278-8>
 12. Sato, T. M., T. Satoh, H. Sagawa, N. Manago, Y.J. Lee, S. Murakami, K. Ogohara, G.L. Hashimoto, Y. Kasaba, A. Yamazaki, M. Yamada, S. Watanabe, T. Imamura, M. Nakamura (2020), Dayside cloud top structure of Venus retrieved from Akatsuki IR2 observations, *Icarus*, 345, id:113682, <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2020.113682>
 13. Iino, T., H. Sagawa, T. Tsukagoshi (2020), 14N/15N Isotopic Ratio in CH₃CN of Titan's Atmosphere Measured with ALMA, *Astrophysical Journal*, 890, id:95, <https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab66b0>
 14. Baron, P., S. Ochiai, E. Dupuy, R. Larsson, H. Liu, N. Manago, D. Murtagh, S. Oyama, H. Sagawa, A. Saito, T. Sakazaki, M. Shiotani, M. Suzuki (2020), Potential for the measurement of mesosphere and lower thermosphere (MLT) wind, temperature, density and geomagnetic field with Superconducting Submillimeter-Wave Limb-Emission Sounder 2 (SMILES-2), *Atmos. Meas. Tech.*, 13, 219-237, <https://doi.org/10.5194/amt-13-219-2020>

(2) 国際ワークショップの開催

2020年3月6日から17日にかけて、フランス・パリにある気象力学研究所 (Laboratoire de météorologie dynamique (LMD-IPSL, CNRS-Ecole Polytechnique-ENS-Sorbonne université) およびポルトガル・リスボンのリスボン天文台 (Observatório Astronómico de Lisboa) において、惑星大気に関する国際ワークショップ“Workshop for Venus modelling and observations 2020”を開催した。このワークショップには日本、フランス、ポルトガルのほか、スペイン、イタリア、アメリカの惑星大気研究者が参加し、最新の数値的・観測的研究に関する情報交換を行うとともに、将来の共同研究計画について議論した。

(3) 学会発表

1. Abe, M., N. Sugimoto, Y. Kikuchi, A. Hosono, H. Ando, M. Takagi, I. Garate-Lopez, S. Lebonnois, and C. Ao, Data assimilation of the Venus atmosphere assuming radio occultation measurement by small satellites, JpGU 2019, Makuhari, Chiba, Japan, 26-30 May 2019.
2. Kouyama, T., T. Taguchi, T. Fukuhara, T. Imamura, M. Futaguchi, T. Yamada, M. Akiba, Y.J. Lee, T.M. Sato, S. Murakami, G.L. Hashimoto, T. Satoh, and M. Nakamura, Thermal-tides structure at the cloud level of Venus derived from Akatsuki/LIR observations, JpGU Meeting 2019, Makuhari, Chiba, Japan, 26-30 May 2019.
3. Sugimoto, N., M. Takagi, Y. Matsuda, Atmospheric super rotation developed in a GCM (AFES-Venus), JpGU 2019, Makuhari, Chiba, Japan, 26-30 May 2019.
4. Suzuki, A., M. Takagi, Y. Maejima, H. Ando, N. Sugimoto, and Y. Matsuda, Orographic Gravity Waves in the Venus Atmospheric, JpGU 2019, Makuhari, Chiba, Japan, 26-30 May 2019.
5. Imai, M., T. Kouyama, Y. Takahashi, T. Horinouchi, T. Imamura, A. Yamazaki, S. Watanabe, M. Yamada, M. Nakamura, and T. Satoh, Active and inactive behaviors of the planetary-scale waves on Venus cloud top, Japan Geoscience Union Meeting 2018, Chiba, Japan, 27 May 2019. (Invited)
6. Ando, H., M. Takagi, N. Sugimoto, H. Sagawa, and Y. Matsuda, Venusian cloud physics investigated by a general circulation model, International Venus Conference 2019, Niseko, Hokkaido, Japan, 31 May-3 June 2019.
7. Goncalves, R., P. Machado, T. Widemann, J. Peralta, S. Watanabe, A. Yamakazi, T. Satoh, M. Takagi, K. Ogohara, Y.-J. Lee, H. Avet, and J. Silva, Akatsuki (cloud-tracking) and TNG/HARPS-N (Doppler velocimetry) coordinated wind measurements of cloud top Venus' atmosphere, International Venus Conference 2019, Niseko, Hokkaido, Japan, 31 May-3 June 2019.
8. Hosono, A., N. Sugimoto, M. Abe, Y. Kikuchi, H. Ando, M. Takagi, I. Garate-Lopez, S. Lebonnois, and C. Ao, The study on the reproducibility of cold collar assuming radio occultation

- measurement by small satellites, International Venus Conference 2019, Niseko, Hokkaido, Japan, 31 May–3 June 2019.
9. 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, International Venus Conference 2019, Niseko, Hokkaido, Japan, 31 May–3 June 2019.
 10. Kouyama, T., T. Horinouchi, T. Imamura, Y.J. Lee, M. Takagi, K. Ogohara, H. Kashimura, S. Murakami, N. Satoh, and M. Imai, Venusian yearly-scale variation of super rotation seen in Akatsuki observations, International Venus Conference 2019, Niseko, Hokkaido, Japan, 31 May–3 June 2019.
 11. 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, Intense Decadal Variation of Venus' UV Albedo and its Impact on the Atmosphere, International Venus Conference 2019, Niseko, Hokkaido, Japan, 31 May–3 June 2019. (Invited)
 12. Sagawa, H., M. Takagi, H. Ando, and G. Gilli, Doppler-wind observations of Venus mesosphere: Comparison with new GCM experiments, International Venus Conference 2019, Niseko, Hokkaido, Japan, 31 May–3 June 2019.
 13. Sugimoto, N., A. Yamazaki, T. Kouyama, H. Kashimura, T. Enomoto, and M. Takagi, The Venus AFES LETKF Data Assimilation System (VALEDAS), International Venus Conference 2019, Niseko, Hokkaido, Japan, 31 May–3 June 2019.
 14. Takagi, M., N. Sugimoto, H. Ando, H. Kashimura, and Y. Matsuda, AFES-project team, Numerical modeling of the Venus atmosphere, International Venus Conference 2019, Niseko, Hokkaido, Japan, 31 May–3 June 2019. (Invited)
 15. Imai, M., T. Kouyama, Y. Takahashi, S. Watanabe, T. Horinouchi, T. Imamura, A. Yamazaki, M. Yamada, M. Nakamura, and T. Satoh, Continuous monitoring of planetary-scale waves at the Venus cloud top, International Venus Conference 2019, Niseko, Japan, 1 June 2019.
 16. Sugimoto, N., M. Abe, A. Hosono, Y. Kikuchi, H. Ando, M. Takagi, I. Garate-Lopez, S. Lebonnois, C. Ao, Radio occultation observing system simulation experiment of the Venus atmosphere, 27th IUGG General Assembly, Montreal, Canada, 8–18 July 2019.
 17. Suzuki, A., M. Takagi, Y. Maejima, H. Ando, N. Sugimoto, and Y. Matsuda, Effects of Orographic Gravity Waves on the Venus Atmospheric Super-rotation, AOGS 16th Annual Meeting, Singapore, 28 Jul–2 Aug 2019.

18. Ando, H., M. Takagi, N. Sugimoto, H. Sagawa, and Y. Matsuda, Venusian cloud distribution simulated by a general circulation model, AOGS 16th Annual Meeting, Singapore, 28 July–2 August 2019.
19. Kouyama T., S. Tsuchida, F. Sakuma, T. Tachikawa, H. Yamamoto, K. Obata, S. Kato, M. Kikuchi, R. Nakamura, Sensitivity variation of ASTER derived from Moon and deep space observations in 2003 and 2017, 2019 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Yokohama, Japan, 28 July–2 August 2019.
20. 高谷康太郎, 熱帯と中高緯度の力学の「結合」, 梅雨前線研究ワークショップ, 茨城県つくば市, 2019年8月30日
21. Ando, H., M. Takagi, N. Sugimoto, H. Sagawa, and Y. Matsuda, Venusian cloud distribution simulated by a general circulation model, EPSC-DPS Joint Meeting 2019, Geneva, Switzerland, 15–20 September 2019.
22. Imai, M., T. Kouyama, Y. Takahashi, A. Yamazaki, S. Watanabe, M. Yamada, T. Imamura, T. Satoh, M. Nakamura, S. Murakami, K. Ogohara, and T. Horinouchi, Temporal evolution of the planetary-scale UV feature at the Venusian cloud top observed by Akatsuki/UVI, EPSC-DPS Joint Meeting 2019, Geneva, Switzerland, 15–20 September 2019.
23. Sagawa, H., G. Gilli, M. Takagi, H. Ando, Doppler wind measurements of Venus upper atmosphere: Comparisons with updated GCM experiments, EPSC-DPS Joint Meeting 2019, Geneva, Switzerland, 15–20 September 2019.
24. Takagi, M., N. Sugimoto, H. Kashimura, H. Ando, and Y. Matsuda, Mean meridional circulation in the Venus atmosphere, EPSC-DPS Joint Meeting 2019, Geneva, Switzerland, 15–20 September 2019.
25. Sugimoto, N., T. Kouyama, and M. Takagi, Impact of data assimilation on thermal tides in the case of Venus Express wind observation, EPSC-DPS Joint Meeting 2019, Geneva, Switzerland, 15–20 September 2019.
26. Horinouchi, T., T. Imamura, T. Kouyama, Y. J. Lee, S. S. Limaye, S. Murakami, K. Ogohara, J. Peralta, T. Satoh, M. Takagi, S. Watanabe, M. Yamada, A. Yamazaki, Cloud-top winds obtained from Akatsuki: three-year statistics of mean winds and momentum transport, EPSC-DPS Joint Meeting 2019, Geneva, Switzerland, 15–20 September 2019.
27. Sugimoto, N., M. Abe, Y. Kikuchi, A. Hosono, H. Ando, M. Takagi, I. Garate-Lopez, S. Lebonnois, and C. Ao, Observing system simulation experiment for radio occultation by small satellites of the Venus atmosphere, EPSC-DPS Joint Meeting 2019, Geneva, Switzerland, 15–20 September 2019.
28. Abe, M., N. Sugimoto, Y. Kikuchi, A. Hosono, H. Ando, M. Takagi, I. Garate-Lopez, S. Lebonnois,

- and C.O. Ao, The feasibility study on radio occultation measurements of the Venus atmosphere among small satellites, AGU Fall Meeting 2019, San Francisco, CA, USA, 9–13 December 2019.
29. 今井正克, 神山徹, 堀之内武, 渡部重十, 山崎敦, 山田学, 村上真也, Comparative analysis of the Rossby wave at the Venusian cloud top observed by Venus Express/VMC and Akatsuki/UVI, 第 146 回地球電磁気・地球惑星圏学会秋季講演会, 熊本県熊本市, 2019 年 10 月 23–26 日.
30. 神山徹, 今井正克, 今村剛, 堀之内武, 田口真, 福原哲哉, 佐藤隆雄, 村上真也, はしもとじょーじ, Lee Yeon Joo, 二口将彦, 山田学, 秋場聖浩, 佐藤毅彦, 中村正人, LIR で同定された金星における惑星規模大気波動の構造, 第 146 回地球電磁気・地球惑星圏学会秋季講演会, 熊本県熊本市, 2019 年 10 月 23–26 日.
31. 安藤紘基, 高木征弘, 杉本憲彦, 佐川英夫, 松田佳久, 大気大循環モデルを用いた金星雲分布の再現, 日本気象学会 2019 年度秋季大会, 福岡県福岡市, 2019 年 10 月 28–31 日
32. 杉本憲彦, 神山徹, 高木征弘, 金星探査機 Venus Express の風速データを用いた熱潮汐波への同化インパクトの研究, 日本気象学会 2019 年度秋季大会, 福岡県福岡市 2019 年 10 月 28–31 日
33. 高谷康太郎, テレコネクションパターンの力学—基本場西風の東西非一様性の重要性—, 科学研究費補助金新学術領域研究 (研究領域提案型) 「変わりゆく気候系における中緯度大気海洋相互作用 hotspot」 A02-7 班研究集会, 東京都, 2019 年 12 月 20 日
34. Takagi, M., N. Sugimoto, H. Ando, H. Kashimura, and Y. Matsuda, Mean meridional circulation in the Venus atmosphere, Symposium on Planetary Sciences 2020, Sendai, Miyagi, Japan, 17–19 February 2020.

Center for Planetary Atmospheric Science: Research Activity Annual Report 2017

Masahiro TAKAGI

Koutarou TAKAYA

Hideo SAGAWA

Hiroki ANDO

Anna SUZUKI

Abstract

Center for Planetary Atmospheric Science has been established as one of the research centers in Institute of Comprehensive Academic Research in 2017 to understand atmospheric dynamics and surface environments of planets in our and exo solar systems. As a first step, we study the whole system of the Venus atmospheric by combining theoretical and numerical models and satellite- and ground-based observations. Here we report the activities and progress of our research in FY2019.

Keywords: Planetary meteorology, Planetary atmospheric science, Venus atmospheric superrotation, Venus Climate Orbiter Akatsuki, Data assimilation