

一番星へ行こう!日本の金星探査機の挑戦 その50 ～金星探査検討RG設立:「あかつき」に続く日本の 金星探査～

今井 正堯¹, 神山 徹², 安藤 紘基³, 佐川 英夫⁴, 佐藤 隆雄⁵,
原田 裕己⁶, 山崎 敦⁷, 佐藤 毅彦⁸, 今村 剛⁹

(要旨) 金星探査機「あかつき」は2015年12月の軌道投入より現在まで、既に10金星年以上の長きにわたり貴重な科学データをもたらしてくれました。この膨大なデータは惑星気象学を中心に数多くの研究者の手によって解析が進み、たくさんの科学成果が生まれています。一方で、世界的には2030年前後に金星を目指す探査計画が複数採択され、我々日本の金星研究者内では「あかつき」に続く次期金星探査案を早急に具体化するべきだという気運が高まっています。こうした背景から本年、将来の金星探査検討リサーチグループが設立されました。本稿では、これまでのリサーチグループ内での議論から、ポスト「あかつき」探査において、金星にどのような科学的意義が存在するのか、実際にどういった形の探査提案があり得るかを交えつつ、その検討の一端を紹介します。

1. 将来の金星探査計画にあたり

地球とほぼ同じ大きさでありながら地球と全く異なる環境を有する金星では、大気放射・力学・化学・散逸と大気-地殻相互作用が地球とは異なる気候システムを作り上げています。金星探査機「あかつき」では、固体部分の自転速度を60倍も上回る速度で大気が循環する「スーパーローテーション」など、主に大気力学にフォーカスを当てた研究が進められてきました。一方で金星には他にも、二酸化炭素大気、光化学的安定性、硫黄サイクル、エアロゾル物理、

アルベドを支配する未同定の紫外吸収物質、揮発性物質の宇宙空間への散逸、大気と固体惑星の物質交換など、金星大気存在そのものに関わる、解き明かすべき多くの課題が残されているのが現状です。近年、全球をエアロゾルで覆われているような、または「スーパーローテーション」しているような系外惑星が発見され、こうした系外惑星のアナログとしても金星が注目されています。我々が目指す金星の科学は、金星という特定の天体の成り立ちの解明のみならず、普遍的な惑星気候システムの理解にもつながるものであるべきです。

1960-80年代の米ソの金星探査競争から四半世紀以上を経て2000年代後半にリポートした金星探査は、現在Venus Expressと「あかつき」によって積み上げられた成果をまとめ、次の展開を図るフェーズにあります。2021年になって米国と欧州で合わせて3つの金星ミッション (VERITAS, DAVINCI, EnVision) が採択されました。さらにインドやロシアによる金星探査計画も推進されており、2030年代に世界が金星を目指す時代が来ようとしています。日

1. 京都産業大学 理学部 日本学術振興会 特別研究員 (PD)
2. 産業技術総合研究所 デジタルアーキテクチャ研究センター 主任研究員
3. 京都産業大学 理学部 助教
4. 京都産業大学 理学部 教授
5. 北海道情報大学 経営情報学部 講師
6. 京都大学 理学研究科 助教
7. 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所 助教
8. 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所 教授
9. 東京大学大学院 新領域創成科学研究科 教授
mstk-a.imai@frontier.hokudai.ac.jp

本においても近年の探査の成果を踏まえた金星科学の新展開と、新たな探査の種となる工学技術開発、そしてそれらを踏まえた複数の探査ミッション計画立案に向けた議論が活発になっています。

これらの状況をふまえ、地球型惑星の多様性と普遍性の理解を掲げつつ、金星科学の個別テーマについて議論の深化を図るため、本年将来の金星探査検討リサーチグループ(金星探査RG)が設立されました。金星探査RGでは、新たな発想の探査を可能とする工学技術の検討を進めることにより、科学的成果と探査工学の発展を最大化するロードマップを描くことも活動の目的としています。続く各節では、これまで金星探査RGで議論されている探査提案を紹介します。本稿によって幅広い分野の研究者の方々の興味を喚起し、より活発な議論のきっかけとなることを期待します。

2. 衛星間電波掩蔽観測

地球の気象でよく知られているように、大気中の波や擾乱は、熱や運動量を輸送し惑星規模の循環の形成を司ります。それ故に、惑星の大気循環の理解には波や擾乱の性質を解明することが必要不可欠です。しかし、地球以外の惑星では波や擾乱の実態は殆ど理解されていないのが現状です。金星では例えば、鉛直伝播する大気波動は超高速の東風「スーパーローテーション」の形成・駆動メカニズムとして重要視されていますが、発見から半世紀経った現在もこれら波や擾乱の効果について、定量的な評価はおろかその全体像の定性的な理解も確立していません。Venus Expressと「あかつき」による金星周回軌道からのリモートセンシングや地上望遠鏡による光学観測によって、波や擾乱の雲頂高度~70

kmにおける水平構造についての知見は徐々に増えています。一方で、分厚い濃硫酸の雲で全球を覆われた金星は、それらの鉛直構造に関する知見が極めて乏しい状況が続いています。この問題を打開できる一つの有力な観測手段が、気温の高度分布を高精度(温度測定誤差 ~0.1 K)・高分解能(鉛直分解能 ~1 km)で測定できる電波掩蔽法です。

電波掩蔽法とは、探査機が惑星の背後に隠れる時または出てくる時に地上局に向けて電波を射出し、その電波の受信周波数が探査機の軌道運動と大気の屈折によって変化する性質を利用して、気温の高度分布を導出する観測手法です(図1)。金星における電波掩蔽観測では、高度40~90 kmにおける気圧・気温分布を導出できます [1]。これまでの金星ミッションでも電波掩蔽観測が実施されてきましたが、地上局を受信局とする限り、探査機の軌道や惑星の位置関係によって観測できる領域や機会が制限されていました。そこでこの弱点を克服できる手段として「衛星間」電波掩蔽観測を検討しています。

現状、ミッションの概念設計はほぼ完了し、金星衛星間電波掩蔽観測 (Crosslink Radio Occultation for Venus Atmosphere using micro-satellites, CROVA) というミッション名のもと、100 kg級の親機と6Uサイズ (12 kg)の子機2機による構成を軸に詳細検討を進めています。親機には地球上の地上局と通信するための通信システムのほか子機と通信するための通信システムが搭載され、一方の子機には子機同士もしくは親機とのみ通信可能な通信機が搭載されます。この衛星間通信システムを用いて、衛星間電波掩蔽観測を行う構想です。

通信周波数の変動を用いて観測を行う電波掩蔽観測においては、安定なクロック源を持つことが重要となります。親機は「あかつき」等で用いられてきた

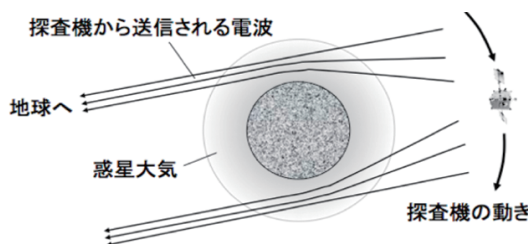


図1: 電波掩蔽法の概念図。

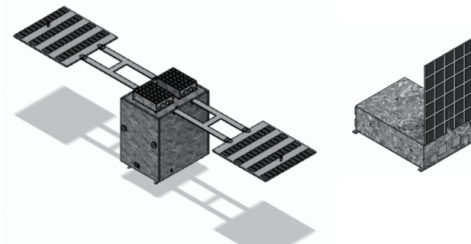


図2: CROVAの親機(左)と子機(右)の外観図。

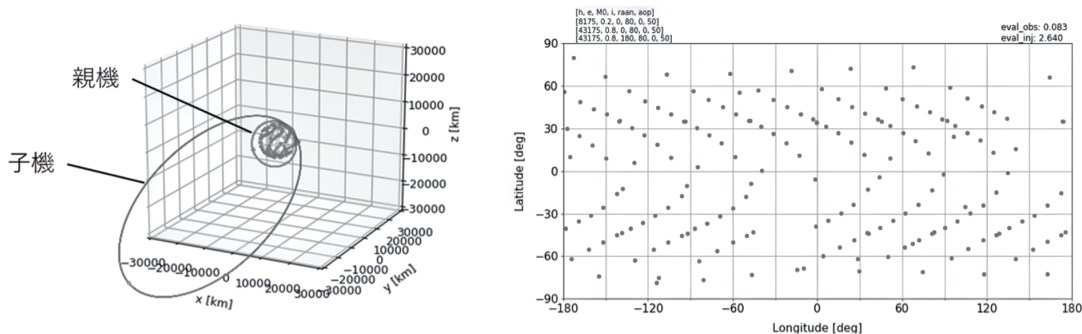


図3: (左)観測軌道と(右)4地球日で得られる観測点の経度-緯度分布。

超高安定発振器 (Ultra Stable Oscillator, USO) を搭載させる予定です。6Uサイズである子機には「あかつき」同等のUSOを搭載することはできないため、超小型サイズのUSOを新規に設計・開発することが工学面での重要課題のひとつであり、技術的な検討が進んでいます。また、衛星間電波掩蔽の機会と観測のカバー領域を最適化すべく軌道設計についても解析が進んでいます。CROVAの衛星群はドッキングされた状態で打上げられ、子機は親機が金星周回軌道に入ってから分離され、それぞれが金星周回軌道に投入されます。その際、親機と子機の相対速度が大きい軌道に投入することで幅広い地点で観測が可能となります。現時点までの検討で得られた観測軌道を図2に示します。親機を近金点高度300 km、遠金点高度4000 km、子機を近金点高度300 km、遠金点高度74000 km と定め、どちらも軌道傾斜角は 80° の同一平面上で金星を周回します。子機2機は 180° 離れた位置まで位相制御され、周回周期は親機と子機それぞれ2時間と27時間になっています。図3は、上記の条件下で金星のスーパーローテーションの周回周期である4地球日の間に得られる観測点の経度-緯度分布を示していて、全部で179個(親-子:165個, 子-子:14個)データ点が従来の電波掩蔽観測と違い短期間に全球的に分布していることが分かります。

CROVAミッションの実現が金星大気科学にもたらすと期待される最大の特徴は以下の3項目です。

1) 雲層より下の大気の3次元構造

前述のように、電波掩蔽観測は高度40–90 km

をカバーできます。金星の雲層はおよそ高度50–70 kmに全球的に存在するため、カメラや分光器などの光学観測では雲頂や雲底付近の高度しか観測できず、特に雲層の下の観測的知見が殆どありません。CROVAでは雲層の下を集中的に観測できることから、発見的な研究が進む可能性が大いにあります。

2) 波や擾乱の空間・時間変化の全球モニタリング

近年、数値モデルを使った研究の進展が目覚ましく、大気運動に対する種々の波や擾乱の寄与が示されていますが、一方でその妥当性を評価できる観測データが存在しません。CROVAで取得した全球的な気温・気圧データから、様々な時間・空間スケールの波や擾乱を捉えることができれば、これまでの理論的研究に新たな視点での検証が加えられます。

3) 硫酸蒸気混合比の全球分布

電波掩蔽観測では、受信強度の時間変化から大気中の微量物質の混合比を測定することができ、金星の場合は硫酸蒸気の混合比分布が分かります。金星の雲は濃硫酸の液滴であるため、これらの全球分布は金星雲物理の理解に役立ちます。近年、金星の雲分布と大気波動の関連が数値モデルによって示唆され、2)と合わせて雲と大気運動の関連性を紐解くことが可能になります。

3. 大気化学探査

惑星大気を研究する上で大気の運動(力学)とともに重要な視点となるのが、大気の組成や化学的(酸化的・還元的)性質、そして大気内で生じている

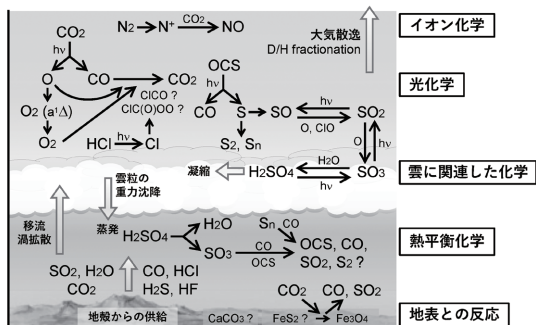


図4: 金星大気化学の概念図. レビュー論文 [3]などを参考で作成. (観測未検証の反応も含む)

様々な化学反応についての理解です。大気組成や化学的な性質は、その惑星大気がどのように形成され、大気や地表環境がどのように変遷してきたかを理解する鍵になります。大気中に僅か (ppm～ppbといった混合比) しか含まれない微量成分も、大気中の放射バランスに関係し気温構造の決定に強く影響します。また、大気中の化学反応には、太陽からの紫外線や銀河宇宙線といった外的要因に駆動される化学反応や、その惑星大気内部の微量成分同士の反応 (触媒反応を含む)、エアロゾルや雲粒の生成に至る化学反応や粒子表面上での不均一反応など、様々な種類が存在し、大気化学の理解を通してその惑星大気が置かれている環境をより詳しく理解することが可能です。近年では太陽系内の惑星の大気化学の知見を系外惑星の理解に応用することも試みられています [2]。

金星大気では各高度において異なる種類の大気化学が存在していると考えられています [3] (図4)。大きく区分すると、下層の高温大気中での熱平衡化学、雲層の硫酸液滴の生成に関係する化学反応、雲層よりも上空での太陽紫外線に駆動される光化学、そして超高層電離大気におけるイオン化学といった具合に、主要な化学反応の種類が大気の高さによって異なります。また、化学反応に寄与する分子種に注目すると、二酸化炭素(CO_2)や一酸化炭素を中心とした CO_x 反応サイクル、二酸化硫黄(SO_2)を中心とする SO_x 反応サイクル、 SO_2 などから分離した硫黄が同素体を作るポリサルファー(S_x)反応サイクル、塩素酸化物 ClO_x 反応サイクル等々が挙げられます。

このような“大まかな特徴”は掴めつつある金星大気化学ですが、その詳細は未だ多くの謎を残してい

ます。中でも長年の議論的的となっているのが、(1) 金星 CO_2 大気の安定性問題と、(2) 金星大気全体における硫黄の挙動です。(1)は、 CO_2 が紫外線によって一酸化炭素と酸素に光解離するのに対して、一酸化炭素と酸素を直接再結合させて CO_2 を還元させる反応はスピン禁制反応となっているために、その反応効率が著しく低いという問題です。この問題点は1970年代に火星大気と同様にMcElroyら[4]によって提起されました。この古典的な問題は、触媒を介した別の CO_2 還元反応の存在を仮定することで回避できますが、実際に金星大気中でどういった触媒反応が効いているのかは、 ClO_x がその候補として提案されている[3]ものの、未だ観測的制約が有りません。

(2)は、金星大気を特徴づける硫酸液滴の雲層の生成消滅過程や、雲層に存在する未知の紫外線吸収物質の謎 [5] とも深く関係する問題です。金星大気中における硫黄は、 SO_2 、 OCS 、 H_2SO_4 、 SO といった分子の形で存在します。これらの物質の中で、 SO_2 は雲層上部における存在量が1980年代のPioneer Venusの時代から2000年代のVenus Expressの時代にかけて長期的に観測されていますが、その混合比が数百ppbからほぼゼロの間で大きく変動していることが知られています[6]。この理由として火山活動による大気中の硫黄総量の変動などが提唱されていますが、未だ結論は得られていません。また、 SO_2 は雲層の下では130 ppmという混合比で存在するのに対して、雲頂ではppbのレベルまで減少します。この雲層を挟んだ上下間での SO_2 の急激な減衰は、最新の大気化学モデル[7]でも未だ再現できていません。このことは、金星雲層における SO_x や S_x の化学反応に関する我々の知識が不完全であることを示唆しています。雲層内部の S_x は未知の紫外線吸収物質の候補の一つにも挙げられており、大気化学と雲の紫外アルベド変動の両者にとって重要な研究対象となります。

これまでの金星大気の化学的な研究は、主に周回探査機に搭載された分光観測器や地上からの望遠鏡観測によって実施されてきました[8]。これらはいずれも金星からの放射(紫外線や赤外線、電波)を分光観測し、そのスペクトル内に金星大気中の分子の吸収線を探るというリモートセンシングです。こ

の手法の一番の難点は、CROVAについて述べた際にも触れましたが、金星の分厚い雲層の内部や雲層よりも下方の大気を観測することが出来ないという点です。近赤外波長域の一部の波長帯では金星の夜面で雲層よりも下の下層大気や地表面からの熱放射を観測することが出来ますが(「あかつき」のIR1・IR2カメラでも観測波長として採用されています)、この波長帯で観測できる大気分子の種類には限りがあります[9]。雲層内部や雲層よりも下方の金星大気化学探査をどのようにして実現するか?というのは、容易なことではないのですが将来的に取り組むべき金星研究の本質的な課題だと考えられます。

なお、今後実現する欧米の金星探査のうちVERITASとEnVisionはどちらかと言えば金星地表面および固体惑星の探査に焦点が当てられており、大気微量成分の観測については飛躍的な進展は期待薄のように思われます。DAVINCIのプローブ探査は金星大気中に降下しながら大気組成を質量分析器で計測していくため、下層大気中に含まれる火山由来の微量成分や分光観測では測れない希ガスの定量などで大きな成果が期待されています。ただし降下プローブの宿命として、一地点、一時期のスナップショットが得られるだけである点は変わりません。今後、日本の将来の金星大気化学探査を立案するにあたっては、これらの海外ミッションとのシナジーも重要な観点となることは言うまでもありません。

4. 大気散逸探査

金星大気の散逸率の定量的な測定とその物理メカニズムの同定は、地球型惑星の持続的な大気保有条件を明らかにするという、太陽系のハビタビリティの理解と直結する重要課題です。Donahueらは、Pioneer Venusにより金星で観測された高いD/H比を、同位体分別を伴う長期的な水素散逸の結果であると解釈し[10]、金星全面にならしたときに深さ4.2-14 mに相当する量の水が過去に失われたと提案しました[11]。しかしながら、近年のVenus Express観測からは、このような大規模な水の損失は説明できないと示唆されています。現在働いているイオン散逸メカニズムを過去の激しい太陽風状態を考慮して外挿した酸素イオンの総散逸量は、高々

深さ0.02-0.6 m程度に相当する水の損失しか説明できないのです[12]。

一方で、金星大気からのイオン散逸率の定量的な測定に成功したVenus Expressのイオン計測器[13](図5)をもってしても、その時間分解能(3分程度)では散逸の物理メカニズムまでを同定することが難しく、また、計測エネルギーの限界から脱出エネルギーを超えた全エネルギーのイオン散逸率の推定値には大きな不確実性があることなど、まだまだ課題が残されています。金星イオン散逸観測の次のステップとして、熱的エネルギーから脱出エネルギーを超えるまでのイオン加速の現場を実測し、さらに複数のイオン散逸プロセスを切り分けて、太陽放射・太陽風の変動に対するイオン散逸の応答を理解することが重要となります。

また、地球型惑星からの大気散逸は、次のような観点から比較することが重要です。(1) 太陽からのエネルギー入力観点: 太陽系ハビタブルゾーンの内縁に位置する金星と、外縁に位置する火星の比較;(2) 大気散逸における磁場の役割の観点: 固有双極子磁場を保持する地球、内部ダイナモ起源の双極子磁場は現存しないが比較的強い地殻残留磁化の残る火星、および固有磁場のない金星の比較;(3) イオン散逸を制約するボトルネックの観点: 脱出エネルギー律速の金星・地球と、大気供給量律速の火星の比較[14]などです。近年探査が進んでいる火星と比べて、金星の調査は遅れており、大気散逸の比較惑星学的な研究を進める上で将来必ず解決すべき課題となります。火星では、中性大気・電離大気・荷電粒子・電磁場の計測器パッケージを搭載したMAVENミッションにより、大気散逸・超高層大気総合観測が行われ、多くの成果が得られています。さらに、MMXでは散逸イオンの同位体計測が実施され、NASA SIMPLExプログラムに採択されたESCAPADE計画では、火星圏で初の二機編隊プラズマ観測が実施される予定です。対して金星では、Venus Express以降、大気散逸過程の調査を掲げた観測計画はほとんど見当たりません。これでは、火星条件という一つの側面からのみ太陽系のハビタビリティを理解して満足することになってしまいます。一部の領域・条件のみの調査から得られる限定的な理解から脱却し、太陽系のハビタブルゾーンの全体

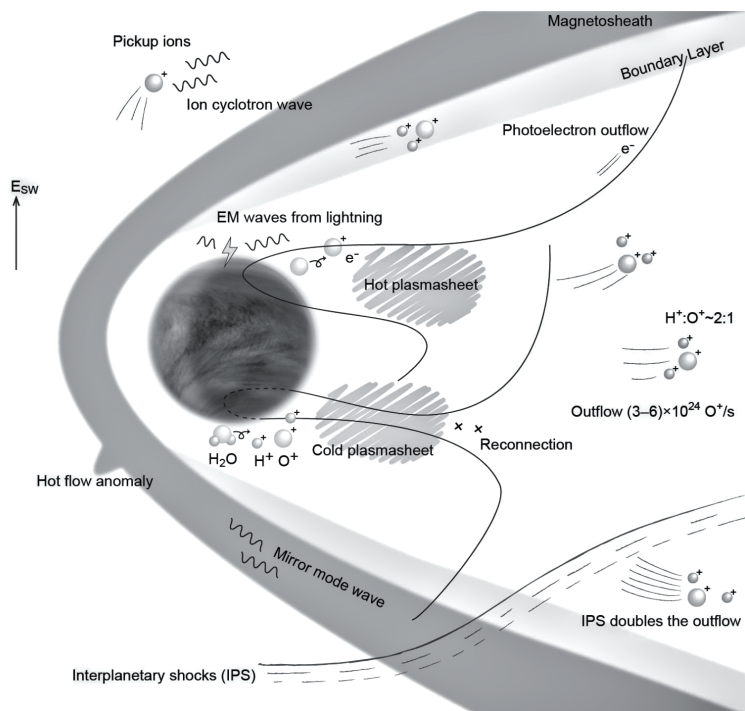


図5: Venus Express の観測により判明した金星周辺のプラズマ環境 [13].

理解, ひいては多様な系外惑星へ適用可能な生命生存可能条件の普遍的理解を進めるためには, 外側の惑星環境探査と同時期に, 内側の惑星環境—金星圏—を調査することが不可欠なのです.

5. おわりに

「あかつき」の金星探査によって, 日本国内には今後の惑星大気科学・惑星気象学を推進する確かな研究土壌が育まれてきました. 今後も日本がこの分野で世界を牽引するべく, 関係者一同さらなる努力を続けていく所存です.

既に新たに設立された金星探査RGの枠組みを通して, 積極的な議論が進んでいます. 本稿では紹介しきれなかった議論の中には, 中層大気から大気散逸領域をつなぐ熱圏の探査にむけたマイクロプローブ探査, 金星ラグランジュ点からの金星昼面/夜面の望遠モニタリング観測, 「あかつき」で捉えられた雷発光と思しき突発的発光現象 [15] の追跡観測, など多様な提案がなされており, またより魅力的な探

査の条件のひとつに複数の科学目標の達成がありますが, こういった視点から個々の提案同士を絡めて一つのミッション提案に昇華できないかという議論も進んでいます. 具体的な例としては, CROVAによる電波掩蔽観測を大気散逸の観測に活用する話があります. 電波掩蔽観測では, 電子密度に関する副産物があり, もし磁力計をはじめとしたプラズマ計測機器を探査機に搭載して金星の電磁環境を調べることができれば, 金星の上層・下層結合にまでミッションの幅を広げられるでしょう.

2030年前後に予定されているNASAやESAによる金星ミッションは, それぞれが非常によく検討された大きな科学的インパクトが予想される計画となっています. 「あかつき」に続く次期金星探査では, これらとの親和性を考慮しつつ, 今後も日本が世界から一日置かれる存在であり続けるために, 理学・工学的なオリジナリティを見定めつつ具体的な探査提案を目指していきたいと思ひます.

参考文献

- [1] 安藤紘基 ほか, 2017, 遊星人 26, 56.
- [2] Mills, F. P. et al., 2021, Space Sci. Rev. 217, 43.
- [3] Mills, F. P. et al., 2007, Exploring Venus as a Terrestrial Planet, Geophys. Monograph S. 176, 73.
- [4] McElroy, M. B. et al., 1973, J. Atmos. Sci. 30, 1437.
- [5] 今井正堯, 田口真, 2021, 遊星人 30, 173.
- [6] Marcq, E. et al., 2012, Nat. Geo. 6, 25.
- [7] Bierson, C. J. and Zhang, X., 2020, J. Geophys. Res: Planets 125, e2019JE006159.
- [8] Marcq, E. et al., 2018, Space Sci. Rev. 214, 10.
- [9] Arney, G. et al., 2014, J. Geophys. Res: Planets 119, 1860.
- [10] Donahue, T. M. et al., 1982, Science 216, 630.
- [11] Donahue, T. M. and Hartle, R. E., 1992, Geophys. Res. Lett. 12, 2449.
- [12] Persson, M. et al., 2020, Journal of Geophys. Res: Planets 125, e2019JE006336.
- [13] Futaana, Y. et al., 2017, Space Sci. Rev. 212, 1453.
- [14] Ramstad, R. and Barabash, S., 2021, Space Sci. Rev. 217, 36.
- [15] 高橋幸弘 ほか, 2021, 遊星人 30, 72.