

一番星へ行こう!日本の金星探査機の挑戦 その48 ~金星の未知紫外線吸収物質を気球搭載光学望遠鏡FUJINで狙う~

今井 正亮¹, 田口 真²

(要旨) 金星探査機「あかつき」によって金星大気力学の研究が進んだ一方で、大気・雲化学過程や雲層内での太陽放射加熱による鉛直温度構造は完全には解明されていません。これらを解く鍵となるのは、雲頂高度で特徴的な模様を作る原因ともなっている未知の紫外線吸収物質です。現在我々は、地球の成層圏から広い波長域と高い空間分解能の観測を可能とする新たなプラットフォームとして大気球望遠鏡FUJINの開発を進めています。「あかつき」と来たる10年で予定されているNASA・ESAによる大型金星探査を繋ぎ、未知紫外線吸収物質の同定を目指した取り組みとして、FUJINによる金星の紫外分光観測の計画を紹介します。

1. UVIが見た金星の紫外模様

2015年12月の再軌道投入に成功以来、金星探査機「あかつき」に搭載された紫外線カメラ (UVI) は 283 nm と 365 nm という2つの観測バンドを用いて、金星の雲頂高度 ~70 kmに見られるダイナミックな模様を観測し続けています。この紫外波長域で見られる特徴的な模様は、濃硫酸の雲による太陽光散乱と紫外線吸収物質の分布によって形作られていて、横倒しのアルファベットYと似ていることから“Y字模様”と呼ばれることもあります。赤道面に近い周回軌道をもつ「あかつき」は、遠金点が昼面側に存在する時期には約2時間毎の頻度で8日間にわたって連続して観測することができ、図1に示すように紫外模様の時空間発展が克明に記録されています。拙著ながら[1]では、Rossby波やKelvin波といった惑星波の消長によってこの紫外線模様が劇的に変容する様子を調べました。また、UVI画像は雲追跡の

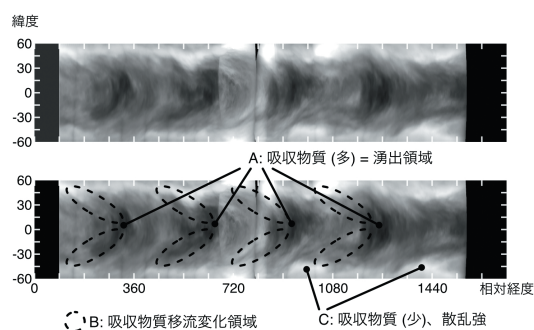


図1: UVIの365 nm画像の合成図。雲頂高度における惑星波などを反映し紫外吸収物質の空間分布が惑星スケールの模様を形成している。

手法によって雲頂高度での風速場を知るためにも必要不可欠なデータであり、金星大気力学の理解に活用されています。特に金星最大の謎とも呼べるスーパーローテーション (高度70 km付近で 100 m s^{-1} と自転速度の60倍に達する高速東西風) については、2020年6月号の遊星人でも紹介されている通り、熱潮汐波による赤道向きの南北運動量輸送が中低緯度での高速風維持に重要な役割を担っていることが示されました [2]。

1. 京都産業大学 理学部 日本学術振興会 特別研究員 (PD)

2. 立教大学 理学部 教授

mstk-a.imai@frontier.hokudai.ac.jp

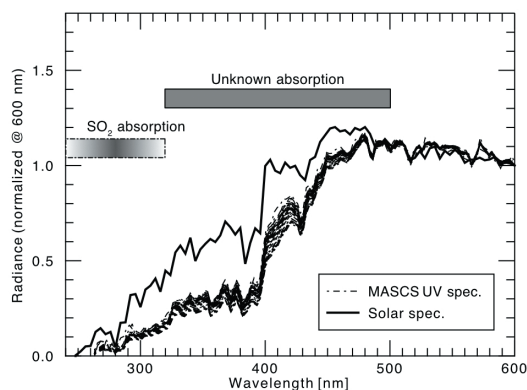


図2: Messenger搭載 MASCSによって金星フライバイ時に取得された紫外線スペクトル (点線) と太陽スペクトル (太線)。SO₂ と未知吸収物質による2つの吸収帯が存在する。

2. 紫外線吸収物質を探れ

以上のように「あかつき」の探査によって金星の大気力学研究に大きな発展があった一方で、金星の気象学を推し進めるには大気化学や雲に関する理解が必要不可欠になってきています。そして我々が重要視しているのが、スーパーローテーションと同じく40年以上の長きにわたって謎とされてきた未知の近紫外線物質(群)の同定です。金星の雲は濃硫酸でできていることが知られていますが、その正味の光化学反応は以下ように表せます。



SO₂ は紫外域にいくつかの吸収帯をもちますが、そのうちの1つが280 nm付近に存在しており、UVI は283 nmのフィルターを通して、このSO₂による紫外線吸収を観測しています。他方、365 nmの観測バンドは未知吸収物質による吸収帯に相当し、SO₂分布と一定の相関があることから、雲形成の化学に関わる物質である可能性があります。

図2はMessengerに搭載されたMASCSという分光器によって金星フライバイ時の約8分間に得られた紫外線スペクトルを示しています。SO₂ 吸収帯外である320–500 nmにかけて幅の広い吸収が存在していることが分かるかと思いますが、この吸収帯を説明する物質が未解明なのです。

現在までにこの未知吸収物質の候補として挙げられている多くは S_x, Cl₂, S₂O, SCl₂, S₂O₂ など S (硫黄) を含んでいます [3]。これらの物質は、光化学モ

デルなどによる検証から金星大気中に存在することはもっともらしいものの、観測されている紫外線吸収を説明するにはモデル推定量が2桁足りないといわれています。また、非硫化物としてFeCl₃が硫酸に溶解することで吸収スペクトルをよく再現するという研究もありますがいずれにしても定量的な検証が進んでいない現状です。

金星の未知吸収物質の同定には大きく2つの意義があります。ひとつ目は金星の雲形成に関わる化学サイクルの理解です。金星を代表する硫化物 SO₂, SO, OCSなどは大気全体を見ると非常に微量ですが、その光反応速度はCO₂の二倍以上速く、金星の分厚い雲層の形成と光化学の中心を担っています。例えば雲層下部から大気上端までをモデリングした [4]では、44の分子種を含む153の化学・光化学反応がシミュレートされていますが、その約半数が硫黄を含む物質です。未知吸収物質が既存の化学モデルの中に含まれているのか、含まれているとして吸収物質の存在量を定量的に説明できるのか、こうした疑問に答え金星大気の化学サイクルを理解するには未知吸収物質の同定が避けては通れません。ふたつ目の意義は、金星大気の放射加熱の理解です。全球を高度 45–70 kmにわたって分厚い雲で覆われた金星は、太陽放射による加熱が地表面ではなく高高度の雲層内で起こる惑星で、高度64 kmまでで太陽放射の50%が散乱・吸収されています。大気の太陽放射加熱は、惑星の大気大循環を決定する最も重要な要素ですし、当然スーパーローテーションの形成されるメカニズムを議論する上でも基本情報となります。しかしながら、320–500 nmの波長域に存在する吸収の存在が、現実的な金星大気の太陽放射加熱推定の障害になっています。先行研究 [5]によると、280–500 nmの波長域の吸収だけで 8 K day⁻¹ の加熱があると言われており、320 nmより長波長側の未知吸収物質の影響は無視できません。近年では、ESAのVenus Express と「あかつき」をつなぐ足掛け12年間の観測によって、金星の紫外域のアルベドが10年スケールで最大40%程度変動し、スーパーローテーションの風速が20 ms⁻¹も変化する可能性が指摘されるなど未知吸収の重要性が再認識されるようになっていきます [6]。このように、未知吸収物質が同定されることによって初めて、金星の

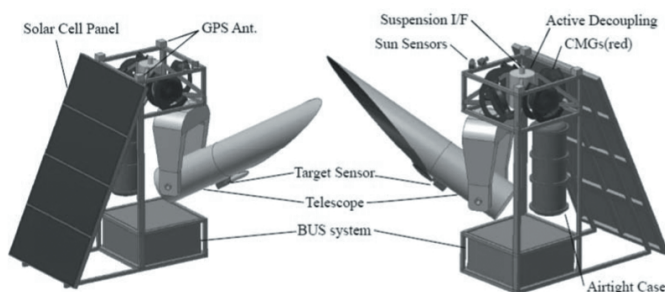


図3: 気球搭載望遠鏡システム FUJIN-2 コンセプト図.

化学サイクルと物質の鉛直分布の詳細理解が進み、大気の加熱分布や時間変動によってスーパーローテーションをはじめとする金星気象がどのように応答し維持されているかの全貌解明につながると考えています。

3. 未知物質を調べるには

では、これまでなぜ金星の紫外線吸収物質は未解明のままなのでしょう？ この問いに対して、著者は明確な答えを持っているわけではありませんが、推測するに以下の2つの大きな問題があると感じています。

1) 紫外吸収スペクトル観測の不足

最近の研究に、紫外分光データと化学・放射モデルを合わせた詳細解析によって、320–500 nm における吸収スペクトルに最もフィットする (χ^2 の小さい) 物質として S_2O か S_2O_2 (cis-, trans-OSSO) の2つが最有力あることを示唆するものがあります [7]。この研究で使用された紫外分光データは、図2で示したMASCSの波長分解能 ~ 4 nmのものでしたが、複数ある候補物質をスペクトルの特徴のみから絞り込むには限界があります。例えば、 S_2O の室内実験で測定されたスペクトルには、339.0, 346.0 353.0, 360.0, そして368.0 nmに $< 8\%$ の深さをもったスパイク状の吸収構造がありますが、こうした特徴を捉えるには波長分解能が不十分でした。Messenger以外にも地上望遠鏡やPioneer Venusによる近紫外分光観測が実施されていますが、分解能はMASCS同様4 nm程度でした。また、Venus Express搭載

分光装置VIRTISのUVチャンネルは 1.9 nm分解の観測を実施しましたが、IRチャンネルからのコンタミネーションが発生しているため正確な吸収スペクトル評価が困難になっています。以上のように、紫外吸収スペクトルの評価に有力なスペクトルデータは限られているのが現状です。

2) 紫外吸収のもつ大きな時空間変動性

冒頭に紹介した通り、金星の近紫外領域のアルベドは高い時空間変動を示しています。実際、図2で示したMASCSのスペクトルは、金星フライバイ時に経度方向に異なる領域をスキャンした結果ですが、大きいところでは20%も吸収量が変化しています。金星の近紫外分光観測例が限られていることもあり、結果として紫外スペクトルに時空間変動を踏まえた解釈が困難になっていると感じます。一般に SO_2 や未知吸収物質は雲頂から5–10 km下層の60 km付近に多く存在しているおり、図1下段で示すように赤道域で ~ 4 日周期をもつKelvin波などの鉛直流によって雲頂部で濃淡が作られると考えられています。雲頂付近へ到達した吸収物質は、その後移流の効果や光化学による分解によって徐々に薄くなるはずですが、金星の近紫外スペクトルを評価する際には、観測領域の力学的情報や近傍領域とのスペクトル比較が重要ですが、このような解析を実施するには時間・空間分解能を改善した新たな紫外分光観測が不可欠と言えます。

4. FUJIN-2による金星紫外観測

惑星気象研究には長期間の継続観測データに基

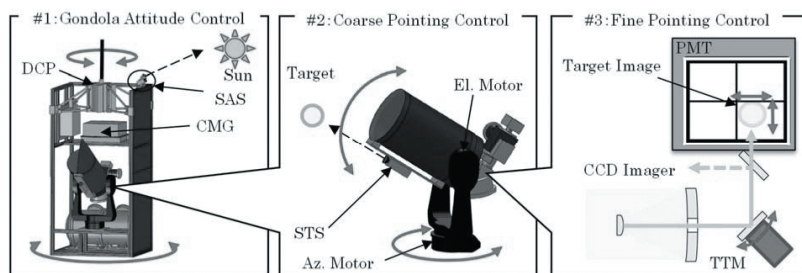


図4:FUJIN-2の3段階ポインティング制御概念図.

づいた議論が不可欠です。我々は地上望遠鏡と探査機に次ぐ新たな観測プラットフォームとして、より安価で継続的かつ高頻度の観測運用が可能な気球搭載望遠鏡システム (FUJIN-2) を開発しています (図3)。気球搭載望遠鏡は、地球大気による吸収と大気揺らぎの影響を最小化することで、広い波長域と高い空間分解能の観測を可能とする最も低コストで実現性の高い手段です。上述した金星大気科学上の未知紫外線吸収物質同定の重要性を念頭に、我々はこのFUJIN-2を用いた金星の紫外分光・撮像観測を計画しています。FUJIN-2では未知の吸収物質を同定するために、口径400 mm、合成F12の反射望遠鏡を搭載し、波長分解能0.4 nm、波長範囲290–450 nm、空間解像度9"の分光観測と、中心波長365 nm、波長幅、10 nm、空間解像度0.5"の撮像観測を実施する予定です。波長分解能については、 S_2O スペクトルに存在するスパイク状の特徴を捉えられるよう設定しています。地上望遠鏡観測では、マウナケア山頂であっても340 nm付近から短波長側の大気透過率は急激に悪化しますが、FUJIN-2が観測する高度32 kmでは、300 nmでも透過率40%以上の条件で観測が可能で、未知吸収物質と SO_2 吸収帯の一部を同時に分光することができます。分光観測の空間解像度は光量を確保しつつ低緯度と中高緯度を分離するための最低限の要求で9"の設定となっていますが、より詳細な模様と背景の大気波動などを捉えるために0.5"程度の空間解像度を達成し、~1000 kmのメソスケール現象を分解できる撮像観測を同時に行います。この0.5"は400 mm望遠鏡の回折限界と等しく、地上優良観測サイトのシーイングの半分程度でもあります。

気球搭載望遠鏡による観測を成立させる最大のポイントは、如何に高度32 kmの高度で Gondola と望遠鏡を制御し、観測装置内で天体像を1点に結像させるかです。FUJIN-2では、Gondolaの姿勢制御、望遠鏡経緯台による天体捕捉・追尾、二軸可動鏡 (TTM) によるリアルタイム追尾エラー補正の三段階のポインティング制御で目標天体を追尾します (図4) [8]。特に重要な三段階目では、望遠鏡で集光された光の一部をハーフミラーによって位置検出用の光電子増倍管 (PMT) に導き、PMTで検出された天体像位置の中心からの偏差をフィードバックしてTTMをリアルタイムで制御します。

FUJIN-2は、現在2023年4月にオーストラリアのアリススプリングスでの放球実験に向けた最終調整の段階にあります。この実験では、成層圏でのGondolaと望遠鏡制御を完遂し、約半日のフライト中に最低4時間の金星観測を実現して回折限界での撮像と紫外分光スペクトルの取得を目標にしています。新型コロナウイルスの影響で1年の実験延期となってしまいましたが、与えられた1年の猶予を最大限生かして実験成功に向けた試験を継続しています (図5)。

5. おわりに

今年になって、NASAとESAから相次いで2030年付近に打ち上げ予定となる大型金星探査計画 (DAVINCI+, VERITAS, EnVision) を発表され、今後10年で金星研究が国際的に盛り上がるが予想されています。日本としては、「あかつき」の金星探査により根付きつつある惑星の長期継続観測の研究土壌を生かし、今後も惑星大気科学・惑星気象



図5: 北海道大学附属天文台でのFUJIN-2搭載望遠鏡試験風景。

研究を牽引するべく更なる努力が求められることになるでしょう。未知紫外線吸収物質に関連した観測として、EnVisionは最大遠金点が約500 kmと非常に低高度からVenSpec-Uという紫外分光撮像装置によって SO_2 と未知吸収物質のスペクトルを高い時間空間分解能で観測することが計画されています。またDAVINCI+の金星投下プローブには質量分析計(VMS)が搭載予定であるため、その場観測によって紫外スペクトルで推定された紫外線吸収物質の特定に非常に重要な計測が控えていることになります。FUJIN-2による金星紫外観測が成功し、またもし同時期に「あかつき」が観測を継続できていれば、次世代の大型ミッションに先んじて紫外線吸収物質の同定に繋がる重要な結果を得ることができ、金星大気研究における日本の存在感をアピールできるでしょう。

さらに、我々はFUJINをシリーズ化し、広い観測波長域と高い空間分解能を達成する惑星観測プラットフォームとして確立したいと考えています。極域成層圏に浮遊させた気球搭載望遠鏡は、原理的には惑星をまる24時間以上連続的に観測可能で、風の条件が適する放球日を選べば、成層圏の極周回風に乗ってほぼ等緯度を地球一周させて放球地点

まで戻すことも可能です。将来的にスーパーブレッシャー気球の技術が確立すれば、推進力を備えたゴンドラを極渦中心まで移動させて滞留させることで、数ヶ月から1年の期間にわたって惑星を定点観測するような運用も夢ではありません。費用面についても、望遠鏡衛星や惑星探査機と比較して、気球搭載望遠鏡は2桁程度低いコストで開発・運用が可能です。我々は気球搭載望遠鏡という新たな手段を用いて大型ミッションと相補的かつ機動的な観測の実現を目指していきたいと思います。

参考文献

- [1] Imai, M. et al., 2019, J. Geophys. Res. Planets 124, 2635.
- [2] Horinouchi, T. et al., 2020, Science 368, 405.
- [3] Krasnopolsky, V. A., 2019, Spectroscopy and Photochemistry of Planetary Atmospheres and Ionospheres: Mars, Venus, Titan, Triton and Pluto (Cambridge: Cambridge University Press).
- [4] Krasnopolsky, V. A., 2012, Icarus 218, 230.
- [5] Crisp, D., 1986, Icarus 67, 484.
- [6] Lee, Y. J. et al., 2019, AJ 158, 126.
- [7] Pérez-Hoyos, S. et al., 2018, J. Geophys. Res. Planets 123, 145.
- [8] Nakano, T. et al., 2019, Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Aerospace Technology Japan 17, 51.