

成層圏望遠鏡(FUJIN-2)による金星紫外吸収物質の同定

田口 真・森 詩音(立教大学理学部)

田中響子(立教大学大学院理学研究科)

荘司泰弘(金沢大学理工研究域)

中野壽彦(大分工業高等専門学校機械工学科)

高橋幸弘・佐藤光輝・濱本 昂(北海道大学大学院理学研究院)

今井正堯(京都産業大学理学部)

本稿の前半部分はFUJIN-2実験の目的、科学的意義、観測方法について記しているが、それらは1年前と変わってないため2020年度の集録原稿[Taguchi et al., 2020]の引用である。

高度40~70 kmにわたって存在する分厚い硫酸(H_2SO_4)の雲が全球を覆う金星では、高度64 kmよりも上空で太陽放射の50%が散乱・吸収される [Tomasko et al., 1980]。その結果、金星での太陽放射加熱は地表面ではなく高高度の雲層内で起こる。また金星には、高度70 km付近で100 m/sの速さで惑星全体を西向きに循環する高速風(スーパーローテーション: SR)が卓越する大気循環が存在する。SRが形成・維持されるメカニズムを解き明かすために開発された金星探査機「あかつき」は2015年12月より金星周回軌道で観測を継続している。「あかつき」によって得られた画像を詳しく解析した結果、SRの維持に雲層内での太陽放射加熱によって発生する熱潮汐波と呼ばれる大気波動が重要な役割を果たしていることがわかってきた[Horinouchi et al., 2020]。

SRの発生メカニズムを探る別のアプローチとして、数値モデルによってSRを再現する試みがこれまで数多くなされてきた[cf., Takagi et al., 2018; Yamamoto et al., 2019]。大気の太陽放射加熱は、惑星の大気大循環を決定する重要な要素の一つである。既存の金星大気モデルでは過去の太陽放射の直接観測の値を基に太陽放射加熱率分布を決めている。しかし、全球中で数点のみの精度の低いデータから求められた太陽放射加熱率分布は信頼性が低い。それが精密なモデル構築や観測とモデルの比較を困難にしている。

近紫外・可視領域(波長280~500 nm)の太陽放射によって雲層中で8 K/dayに相当する加熱が推定されている[Crisp, 1986]。この波長帯のうち、320 nmより短波長側の吸収は SO_2 によると判明している。320 nmより長波長側の吸収の原因物質としては、硫黄を含んだ物質など複数の候補(S_3 , S_4 , S_8 , S_2O , FeCl_3 など)が提唱されてきた[e.g., Esposito et al., 1997]。Perez-Hoyos et al. [2018]は、水星探査機Messenger搭載分光器による観測から波長300~500 nmにおける吸収帯を再現するには波長365 nm付近に強い吸収をもつ S_2O かOSSOが最も有力な候補であることを示した。

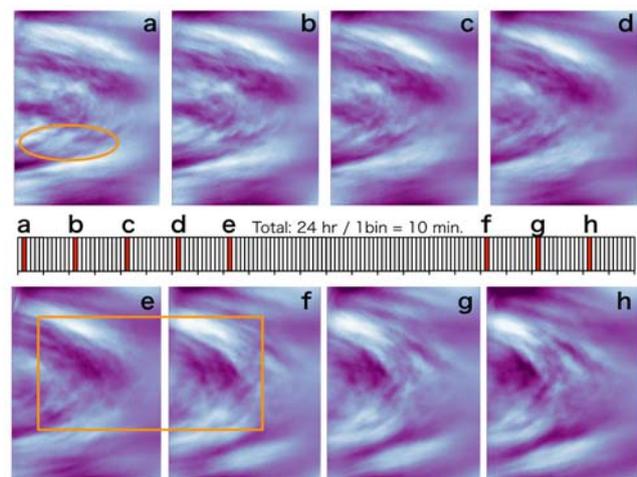


図1. 「あかつき」搭載紫外イメージャ UVI によって約2時間間隔で取得された撮像データ。紫外吸収の時空間変動が確認できる。

しかし、過去の探査機や地上望遠鏡による観測の波長分解能（4 nm 程度）では吸収帯の特徴を捉えられず、吸収物質を特定できなかつた。加えて、図 1 に示すように、吸収帯の中心波長 365 nm 付近の反射率は高い時空間変動を示すことが知られている。空間変動は様々なスケールで起こるが、大きいスケールでは数十度の緯度・経度に渡る惑星規模スケールの変動が見られる。一方、変動の時間スケールについては数日から年スケールの変動が知られている。

雲層より上層の吸収物質のコラム密度に応じた吸収と上層の雲粒子による散乱が観測スペクトルに影響を与えている。金星の雲頂付近は雲粒子密度の鉛直勾配が大きい領域で、吸収物質の分布が同じでも雲粒子の高度分布が数 km 変化するだけで大気加熱率が大きく変化する。赤道域に見られる低アルベド（暗い）領域では、惑星規模の大気波動によって吸収物質を多く含む下層大気が鉛直上向きに輸送されていると考えられる。雲頂へと湧出した吸収物質は、風によって流されながらその高度での雲化学や光化学過程を経ていく。そのため低アルベド領域で取得されたスペクトルは徐々に変化していくと予想される。一方、中高緯度に見られる高アルベド地域は、周囲より吸収物質が少なくまた雲粒子による散乱が強いと考えられている。過去のスペクトル観測では領域によって異なる雲化学過程にある大気の違いが不十分であったため、観測スペクトルは大きな変動幅を持っている。未知の吸収物質を特定するには、この時空間変動も考慮した解釈が必要である。

我々は吸収物質の有力候補である S_2O と OSSO の吸収スペクトル形状の違いに着眼し、両者の分光観測を提案している。OSSO は波長 290~400 nm の領域で cis-型と trans-型で中心波長の異なる広がった吸収が重なった二山の吸収構造を示す。一方、 S_2O には 339, 346, 353, 360, 368 nm に最大で 8%の深さをもつ鋭い吸収線が存在する。このため、金星の波長 290~500 nm の領域を従来よりも一桁高い 0.4 nm 程度の波長分解能で観測できれば、 S_2O と OSSO が示す特徴的な吸収線を定量的に評価し、それらの存在量を推定することが可能である。それらの存在量を S, SO, SO_2 などの既知の物質の分布と合わせて化学平衡状態を計算し、硫黄化合物全体の存在量を計算できる。また、それらの物質の生成と消滅の時間スケールから明暗模様の形成を説明することも可能である。

しかし、地上望遠鏡では地球大気の成層圏中に存在するオゾンによる吸収のため 330 nm よりも短い波長帯の観測は困難で、両者の定量的な同定はできない。また、探査機による観測を実現するには、長い時間と大きなコストが要求される。これらの制約が吸収物質の同定を長く未解決の問題としてきた。

そこで、FUJIN WG は金星大気の未知の吸収物質を同定する手段として気球によって成層圏にまで上昇させた光学望遠鏡（風神、FUJIN-2）による観測を提案している。広い観測波長領域と高い空間分解能で機動的観測や長時間連続観測を実現する FUJIN-2 は、惑星科学を進展させる第 3 の観測プラットフォームである。本研究では FUJIN-2 を用いた金星の分光及び撮像観測によって、吸収物質の同定と太陽放射加熱率分布の解明を目的とする。

金星大気中の太陽放射加熱率分布は物質分布に依存して大きな時空間変動を示すため、Crisp [1986]による 8 K/day の大気加熱率を単に気象力学の数値モデルに入力しただけでは、金星大気を理解したことにはならない。現状は、320 nm より長波長側の吸収を担う物質が未知であるため、雲層内の太陽放射加熱率分布の時空間変動を観測から推定することができていない。そこで、FUJIN-2 の高分散分光観測によって、雲頂における吸収物質を同定する。雲頂における物質組成が決まれば、それを制約条件として光化学モデルに与えて雲層内の物質の鉛直分布を決定できる。物質の分

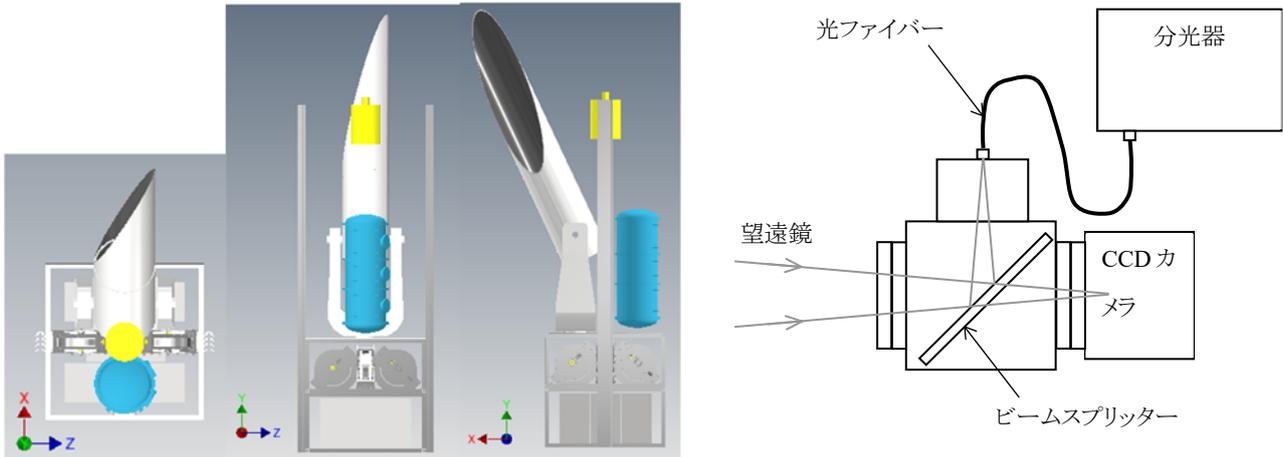


図2. 気球搭載望遠鏡システム FUJIN-2 ゴンドラ素案（左）と検出器部光路。

布を用いて、太陽放射加熱率分布を推定する。

この成果は金星化学-力学大気モデルの構築に不可欠な太陽放射加熱の情報を与える。「あかつき」搭載カメラによる観測から雲頂での風速場や、地形性重力波や熱潮汐波などの波動現象の時空間変動がもたらされている。それらに加えて太陽放射加熱率をモデルへ与えることで、モデルが現実の大気をより正確に再現するように修正することが可能となる。精密化されたモデルによる計算結果を詳しく解析することで、最終的な目的である金星大気システムの包括的な理解につながる。

現在、我々が開発している FUJIN-2 (図2) は気球によって高度約 32 km に浮遊しながら姿勢センサー及び 4 台のコントロールモーメントジャイロにより絶対空間に対してゴンドラの姿勢を安定化し、望遠鏡の架台を動かして目標天体を望遠鏡視野に導入する。目標天体追尾のエラーは鏡筒内に設置した第 3 鏡の傾きをリアルタイムに制御して補正する。成層圏に滞留する FUJIN-2 は対流圏や下部成層圏に多く存在する物質による吸収の影響を受けない。その結果、波長 290 nm から 15 μm に至る全波長帯域での観測が可能になる。また、高度 32 km では大気密度が地上の 1/100 以下になるため、シーイングが格段に向上する。例えば、地上でのシーイングが 1" のとき、高度 32 km でのシーイングは 0.06" となるので、成層圏からは小口径望遠鏡でも地上大型望遠鏡を凌ぐ空間分解能を達成できる。これらのメリットを利用した成層圏からの紫外分光観測は衛星望遠鏡や探査機と同等の性能を、それらよりもはるかに短時間に低コストで実現可能である。

一方で、気球搭載望遠鏡では地上望遠鏡や衛星望遠鏡と比較して大きな外乱が入力され、高度の天体指向・追尾技術が要求される。また、望遠鏡が大型化するほど、総重量に対する望遠鏡重量の比率が高まる傾向があるので、望遠鏡動作の反動によるゴンドラ姿勢の乱れを制御する技術が必要になる。これらの技術に関しては我々は過去に受けた科研費の課題として基礎開発を進めてきた。

S₂O の吸収線が存在する波長領域 (365 nm 付近) は、領域によって吸収量に大きな差があり、これは金星を撮像した際に明暗模様となって観測される。吸収物質は雲頂下部に広く分布していると示唆されて[Bertaux et al., 1996]、この明暗模様は大気中の対流や波動現象による吸収物質の鉛直輸送や、物質の光解離の時間スケールで形成されると考えられる。未同定物質の紫

表 1. スペクトル観測の要求性能

項目	要求
波長分解能	0.4 nm
波長範囲	290~450 nm
観測時間	4 時間
空間解像度	3"

外線吸収スペクトルを得るには、明暗模様中での観測領域の位置を高空間分解能の撮像データを同時に取得して確認する必要がある。そのため、FUJIN-2 光学系は光路を分岐して分光と撮像を同時

に行えるようにしている。吸収物質を同定し、化学過程と輸送過程を明らかにするために必要なスペクトル観測の要求性能を表1に示す。

FUJIN-2 実験は JAXA が実施している豪州実験に採択されている。2022 年 4 月の金星観測好機に実験を行う計画であったが、COVID-19 の影響で 2023 年 4 月に延期された。幸いなことに 2021 年度から 5 年計画の科研費が採択されたので、それで実験経費を賄う。

この 1 年間の開発状況を報告する。豪州実験における保安要求より、ゴンドラのクリティカル部分の構造解析を実施している。2020 年度にはアルミフレームのブラケット締結部の低温時剛性評価を行った。2021 年度はゴンドラと気球吊り紐を締結するデカップリング機構の設計と解析を行っている。図3がデカップリング機構の設計案で、これを元に解析結果を反映して強度不足の部分を設計変更し再解析を行っている。

ゴンドラ姿勢制御及び光学系に関しては試験用エンジニアリングモデルゴンドラにフライト用望遠鏡を搭載して地上試験を行っている。図4はその様子の写真である。現状では望遠鏡を地上に置いた状態でスターセンサーを用いて光源を追尾することができる段階まで確認できている。

フライト時にカメラ取得画像及びスペクトルを地上に降ろして目標天体が想定通り写っているか確認する必要がある。JAXA が用意する通信では画像を高速に降ろすことができないため、イリジウム通信を利用することを考えている。利用予定のイリジウムサービスが 2022 年から運用開始されるため、通信の試験はその後を予定している。

2022 年 3 月までにゴンドラの姿勢制御と目標天体追尾の性能を確認し、平行してフライト用ゴンドラを製作する。フライト前にフライトモデルを用いて国内で金星の地上試験観測を実施する。2022 年 10 月、11 月に啗合試験と最終試験を行う。2023 年 3 月から豪州・アリススプリングスで気球実験を準備し、4 月に放球する。高度 32 km での観測時間は 4 時間以上を確保し、波長 365 nm で撮像された金星ディスクの明暗分布から、アルベドの違う領域に分けてスペクトル観測を行う。この時期、金星視直径は 14"~17"なので、空間解像度が 3"あれば領域毎にスペクトルを取得できる。波長 320 nm 以下の吸収を担う SO₂ 及び波長 320 nm 以上の吸収物質候補の S₂O と OSSO を含む主要な分子種の吸収スペクトルを組み込んだ放射モデルによって計算されたスペクトルを気球実験で得られたスペクトルにフィッティングすることで、吸収物質の分子種を同定し同時に雲頂高度での吸収物質密度を導出する。

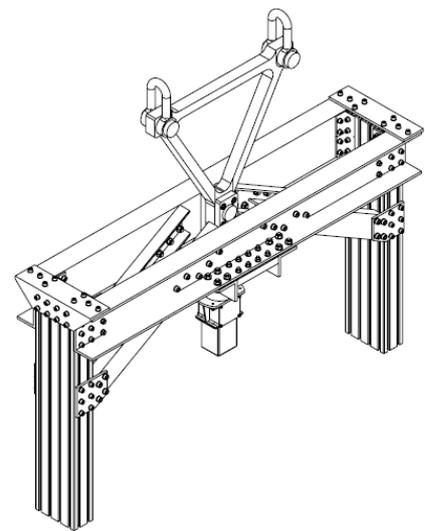


図3. ゴンドラデカップリング機構設計案。



図4. 2021 年 5 月の望遠鏡地上試験の様子。