

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(立教大学理学部)

莊司泰弘(大阪大学大学院工学研究科)

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(北海道大学大学院理学研究院)

今井正堯(産業技術総合研究所)

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。これまで我々は SR が形成・維持されるメカニズムを地球版気象学の延長で説明できていなかった。金星大気の謎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エントリープローブによる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]。最近、Perez-Hoyos et al. [2018] は、水星探査機 Messenger 搭載分光器による観測データから波長 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。

しかし、過去の探査機による観測の波長分解能は 4 nm 程度であり、明瞭な構造のない幅広い吸収帯という乏しい情報のため吸収物質を特定できなかった。加えて、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。空間変動は様々な空間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その時々で条件を変えて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の密度が鉛直方向に大きく変化する領域で、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、この時空間変動も合わせ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 を観測的に捉えるために、両物質の吸収スペクトル形状の違いに着眼し、高分散分光観測を提案する。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）による観測を提案する。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、惑星科学の進展を目指す第 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。金星探査機「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 1）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

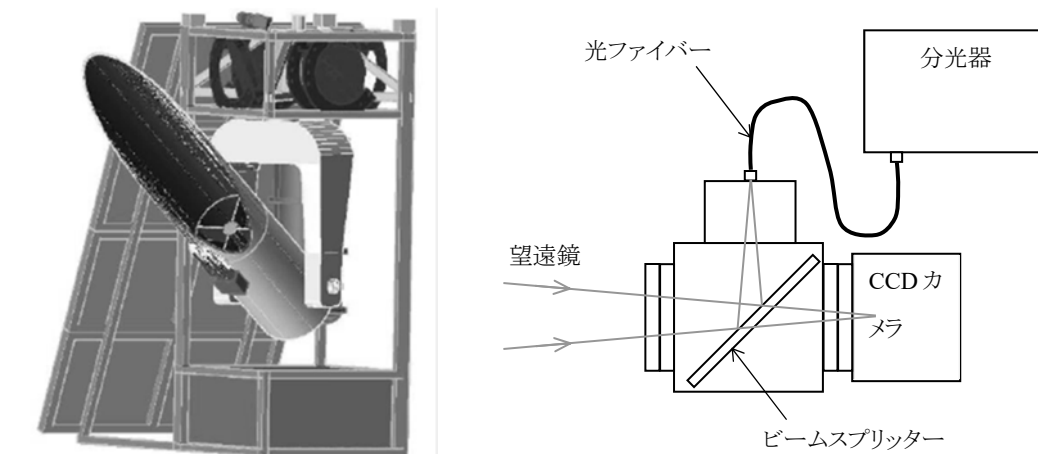


図 1. 気球搭載望遠鏡システム FUJIN-2 ギンドラ（左）と検出器部光路（右）。

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。NASA はこれらに着目して彗星等の突発天体を機動的に観測する気球搭載望遠鏡を開発しているが、気球望搭載遠鏡を惑星観測に応用しようとしているグループは世界中で我々のみである。

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ギ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。

S_2O 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性能を表 1 に示す。

これまで FUJIN WG は北極域での FUJIN-2 による観測を提案していた。JAXA が実施しているオーストラリア実験において FUJIN-2 実験を行う可能性も検討していたが、金星観測好機とオーストラリア実験期間が合わなかったため本格的な検討は見送っていた。しかし、2021 年に実施予定だった JAXA オーストラリア気球実験が COVID-19 の影響で 2022 年に延期された。

2022 年春季のオーストラリア実験期間は金星観測好機にあたる。そこで、FUJIN-2 による金星の紫

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"

外分光・撮像観測を実施するため、2022 年春季の JAXA オーストラリア気球実験公募に応募している。

2021 年 8 月までに FUJIN-2 フライトモデルの製作を完了し、2022 年 1 月まで調整及び地上試験を実施する。ゴンドラ製作のための主要な部品はすでに入手済みである。2022 年 3 月からオーストラリア・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 17"~22"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。不測の理由で 2022 年春季に JAXA 気球実験が実施されなかった場合は、2023 年春季が次の金星観測好機になる。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。

得られた雲頂での吸収物質密度と過去の観測から知られている SO₂ と雲粒子の鉛直分布を制約条件として、アルベドが異なる領域毎に雲層中での化学サイクルを組み込んだ光化学モデルで物質分布を計算する。得られた吸収物質分布と雲粒子分布から太陽放射加熱率の高度分布を導出する。これまでエントリープローブによる点でしか測定されていなかった太陽放射加熱を、本研究によって雲層中での太陽放射加熱率分布を面的に与えられるようになる。それらは全球大気モデルを用いた計算機シミュレーションによって金星大気ダイナミクスを研究しているグループに提供され、モデルと現実の大気との差を縮め、計算結果の高精度化が期待される。