

極周回成層圏望遠鏡 FUJIN による金星大気観測

田口 真(立教大学理学部)

荘司泰弘(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)

白藤祐稀子(立教大学大学院理学研究科)

FUJIN WG は JAXA 小規模計画の枠組みの中で実験資金を獲得するために、科学目的の明確化を議論してきた。本稿では極周回成層圏望遠鏡 FUJIN の科学目的に焦点を絞って記述する。FUJIN システムの技術的概要については、過去の本シンポジウム集録を参照されたい。

高度 45~70 km にわたって存在する分厚い硫酸(H_2SO_4)の雲で全球を覆われた金星は、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ある(図 1)。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]。また金星には、高度 70 km 付近で自転速度の 60 倍に達する 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)が卓越する特殊な大気大循環が存在する。しかし、現状、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い。金星は地球との比較によって惑星気象の普遍性を理解する上で最も身近で重要な天体であると言える。

数値モデルによって金星の SR を再現する試みは、その現象を理論的に説明するために必要不可欠なアプローチとして、これまでに数多くの研究がなされてきた。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が、雲層内での太陽放射加熱率の正確な分布は分かっていない。それが、現実的な太陽放射加熱を反映させた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。その最大の理由は、波長 320~500 nm の近紫外領域に幅広い吸収帯が存在することにある。観測からは 280~500 nm の波長領域で 8 K/day の加熱があると言われている [Crisp, 1986]。この紫外線吸収帯のうち、320 nm より短波長側は波長 283 nm を中心とする SO_2 による吸収で良く説明される。

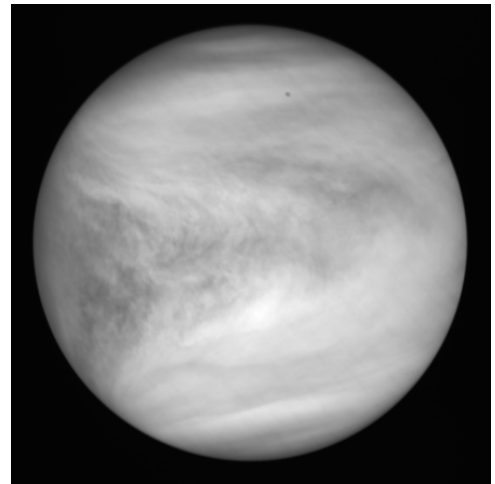


図 1. 金星探査機「あかつき」搭載紫外イメージャ(UVI)が波長 365 nm で捉えた金星。

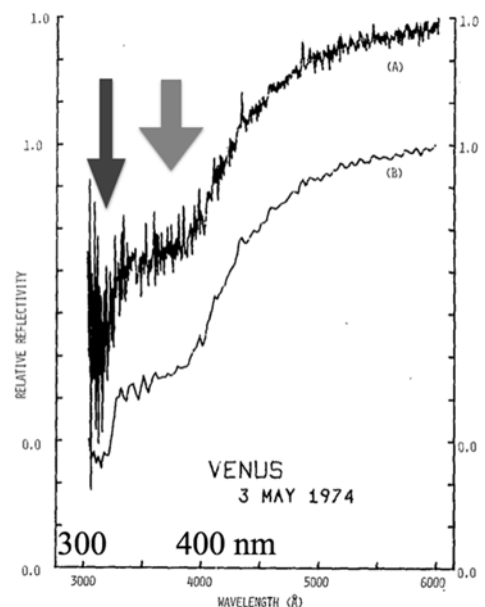


図 2. Pioneer Venus によって観測された 300~600 nm の金星スペクトル。320 nm より長波長側に SO_2 では説明できない吸収帯が存在する。

一方で、320 nm より長波長側の吸収の原因物質としては、S (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]。しかし、過去の観測スペクトル (図 2) 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に基づいて物質を推定することは困難であった。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おり、未知物質の吸収スペクトルを理解するには、この時空間変動も合わせた解釈が必要である。

最近、Perez-Hoyos et al. [2018]は、400~500 nm における吸収帯の端を再現するには S_2O か OSSO が最も有力な候補であることを示した (図 3)。両吸収物質は、反射率変動の大きい波長 365 nm 付近に強い吸収をもつため、これらの物質の存在量の空間分布が惑星規模の紫外模様を形成する可能性が高い。したがって、未知物質を同定するには、 S_2O と OSSO の存在の有無を観測的に調べ、吸収への寄与を定量的に理解することが必須である。

本研究では 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、高波長分解能分光観測を提案する。図 3 に見られるように OSSO は 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 339.0, 346.0, 353.0, 360.0, 368.0 nm に < 8% の深さをもった鋭い吸収線が存在する。このため、金星の紫外領域を 0.4 nm 程度の波長分解能で観測できれば、 S_2O が示す特徴的な吸収線の有無を定量的に評価し、 S_2O 存在量を推定することが可能である。 S_2O の存在量を決定できれば、OSSO を含めた硫黄化合物合計の吸収量を推定することで、現在最も有力な 2 つの候補物質の紫外線吸収への寄与を初めて見積もることができる。また、S, SO などの既知の物質との化学平衡状態を計算し、 S_2O 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、地上望遠鏡を利用して対象波長領域を観測することは、地球大気による吸収・散乱が強いため不可能である。また、新たな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。これらの制約が簡単に解明できると見られたこの課題を長く未解決の問題としてきた。

そこで、本研究を遂行する手段として極周回成層圏望遠鏡 (風神、FUJIN-2) を提案する。FUJIN-2 は広い観測波長領域、高い空間分解能を実現し、機動的観測や長時間連続観測によって、最先端の惑星科学を切り拓くことができる新たな観測プラットフォームである。

FUJIN-2 実験は金星の分光及び撮像観測によって、金星大気中の紫外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。図 4 に金星大気力学及び化学過程における研究課題と本研究で目指す目標を図示する。

Crisp [1986]による 8 K/day の大気加熱を単に気象力学の数値モデルに入力しただけでは、空間分布と時間変動を示す実際の金星気象を理解できない。SR など未解明の気象現象を理解するためには、化学と力学双方を陽に解く数値モデルを構築し、より現実的な金星気象を再現して観測量と比較検証する必要がある。しかし、現状は、320 nm より長波長側の吸収を説明する物質が未知であるため、雲層内の化学サイクルを閉じることができていない。

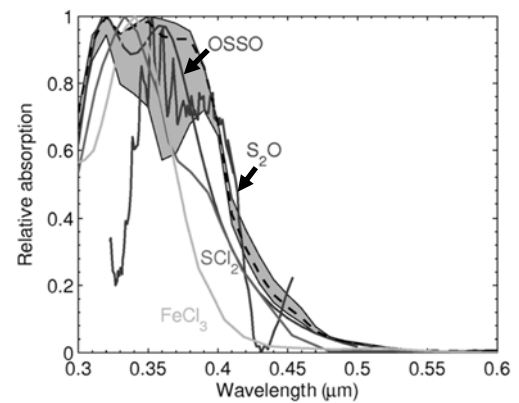


図 3. Messenger による観測スペクトル (破線) とモデル内の有力候補物質の吸収スペクトル。黒い実線内に挟まれた灰色の領域は、観測スペクトルが持つ広がりを示し、365 nm 付近に最大コントラストを持つ明暗模様に対応して、吸収量に広い幅を持っていると考えられる。

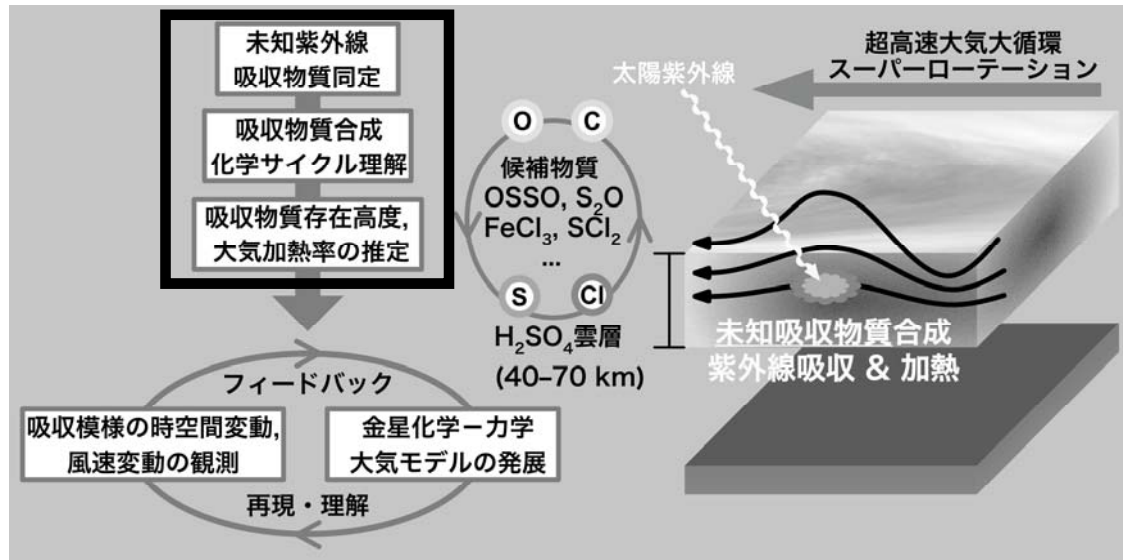


図4. 金星大気力学及び化学過程の理解における FUJIN-2 実験の位置づけ（太枠内）。

そこで、FUJIN-2 の高分解能スペクトル観測によって、雲頂における未知の紫外吸収物質を同定し、その密度分布及び変動を明らかにする。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ることで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、金星大気中の平均的な加熱領域と加熱率を推定する。これが FUJIN-2 実験の目的（図4で太枠内に示す部分）である。

この成果は金星化学-力学大気モデルの構築に不可欠な情報を与える。金星探査機「あかつき」による紫外吸収模様のモニタリングから風速場や Kelvin 波や Rossby 波などの波動現象の時空間変動が得られている。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、金星大気システムの包括的な理解につながる。

金星紫外吸収物質を同定する手段としては紫外分光観測が最も有効である。しかし、先に述べた理由により、多くの研究者が上記研究シナリオを考えついたとしても実現できず諦めていた。FUJIN-2 の独創性は、気球で到達できる成層圏から金星の紫外分光観測を実現する点にある。気球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安価に実現可能である。