

# Conceptual study of satellite-to-satellite radio occultation mission to Venus

(衛星間電波掩蔽による金星大気探査)

Takeshi Imamura, Hiroki Ando, Takahiro Iwata, and Atsushi Yamazaki<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Solar System Sciences, Institute of Space and Astronautical Science (ISAS)  
3-1-1 Yoshinodai, Sagami-hara-shi, chuo-ku, Kanagawa-ken, 252-5210 Japan

## ABSTRACT

A concept of a Venus orbiter mission is being studied. The mission will focus on the chemistry and aerosol physics in the middle atmosphere, which play key roles in the climate system of Venus. The principal instrument will be a submillimeter sounder to measure abundances of trace gases including radicals that drive catalytic cycles. Satellite-to-satellite radio occultation using a subsatellite is considered to obtain 3-D dynamics data, which is essential to understand the atmospheric circulation and cloud structure. Studies of atmospheric escape and its relation with the chemistry and dynamics of the atmosphere are also considered.

## 1. はじめに

金星大気力学の解明を目指す「あかつき」の次のステップとして、大気化学や大気散逸といった物質科学的な側面に焦点を当てた金星周回ミッションの検討を有志で始めている。M-V 相当の打ち上げ手段と組み合わせることにより惑星周回軌道に大重量のミッション機器を運びうる DESTINY の特質を生かせば、子衛星を分離して衛星間の電波掩蔽を行うことや、大型の分光装置を用いることが可能となり、これまでにないユニークな周回探査が視野に入る。以下ではその基本コンセプトを述べる。

## 2. 金星大気化学の問題

金星は地球と似た大きさの地球型惑星であるが、その表層環境は、厚い CO<sub>2</sub> 大気とそれがもたらす温室効果による 460℃ という灼熱環境、海は無く乾燥した大気、惑星全体を覆う硫酸雲、時速 400 km に及ぶ高速大気循環「スーパーローテーション」など、地球と大きく違っている。金星と地球がどのようにして異なる姿を持つに至ったのかは、地球のような液体の水を有する惑星が作られる仕組みを理解するうえで重要な問題である。

金星大気化学の問題意識としては、(1)硫酸エアロゾルの生成機構とそのアルベドの気候影響、(2)大気散逸と地殻からの物質供給による大気組成の変遷、が挙げられる。これらのいずれにおいても成層圏光化学が重要な役割を担う。金星には、海が無いことの一つの帰結として、地球の光化学において微量ながら重要な役割を担う硫黄と塩素が大気中に桁外れに多く存在する。そのために、様々なラジカルが駆動する触媒サイクルが、エアロゾルの生成、太陽光吸収物質の生成、CO<sub>2</sub> 大気の（光分解に対する）安定性、上層大気の水蒸気量、水素の散逸につながる水素分子の生成などを通じて気候を支配していると想像されている。しかし具体的な反応系は、様々に提示されているものの混沌としており、観測との比較においても困難を伴っている。たとえば CO<sub>2</sub> が分解したのち生成するはずの酸素分子が観測で検出されない一方で、光化学モデルは観測による上限値よりもはるかに多い量を予想している。酸素分子の量は、エアロゾル生成の要である SO<sub>2</sub> の酸化過程をはじめ、大気化学を支配する重要パラメータである。

金星の気候はエアロゾル層のアルベドに強く支配されているが、そのアルベドを決める硫酸生成率、太陽光吸収物質の組成、凝結核の組成は分かっていない。太陽光吸収物質や凝結核としては硫黄の重合

体や塩素化合物のほか様々な物質が候補に挙げられている。エアロゾルの主成分である硫酸に加えて、このような微量物質が金星成層圏でどの程度生成しうるのは、反応系と物質循環過程に依存する。光化学の研究から解答を与えるべき、金星気候研究における重要課題である。

エアロゾル（雲）層の表面に紫外波長で見られる複雑な濃淡模様は、光化学に支配された上層大気と、熱化学に支配された下層大気が、この高度領域でダイナミックに混合していることを意味するだろう。3 次元的な大気循環による物質輸送が金星の大気化学において本質的であることを示唆する一例である。従来の金星大気化学は専ら、輸送過程を上下拡散に置き換えた鉛直 1 次元モデルに依ってきたが、その枠組を刷新するだけの物質循環の知見を我々は持っていない。

金星からどのようにして水が失われたか、また現在に至るまで火成活動や彗星の衝突などによって供給され続けているかもしれない水がどのように失われつつあるかは、地球型惑星の進化過程に関わる重要問題である。金星大気中の水素は下層大気の熱化学や成層圏の光化学によって、ある割合が水蒸気から水素分子や塩酸などに変換されたうえで上層大気まで循環し、水素原子や水素分子として熱圏に到達して、電離を経て宇宙空間に散逸すると想像されている。しかしその化学的・物理的経路は曖昧である。

地球大気化学をたんに金星に応用するだけでは十分でない理由の一つに、地球大気において微量ながら重要な役割を担う硫黄と塩素が金星大気には桁外れに多く存在し、それらが地球以上に多様な触媒サイクルを引き起こしている（と予想される）ということが挙げられる。これは金星に海が無いことの一つの帰結である。金星は言わば大気化学の実験室であり、地球大気化学が惑星全般に対してどれほどの汎用性を持つのか、その試金石とも言える。このような観点は、太陽系惑星はもちろん、エアロゾルに覆われているらしい系外惑星の発見が相次いでいる昨今、系外惑星の理解のためにも重要である。

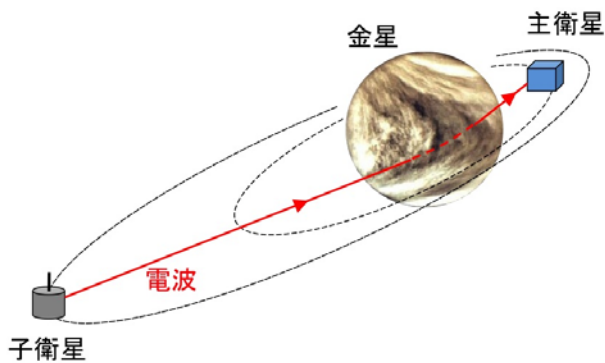


Fig.1 Schematic of satellite-to-satellite radio occultation

### 3. 観測シナリオ

前述のように金星大気化学の理解が滞っている大きな理由は、酸素分子をはじめ、化学サイクルにおいて重要な役割を果たす可能性のあるラジカル類 ( $\text{ClO}$ ,  $\text{HO}_2$ , ...) やその前駆体 ( $\text{HCl}$ ,  $\text{ClONO}_2$ , ...) がほとんど観測されていないことである。ESA の Venus Express は大気組成の計測に力を入れていたが、期待されていた高分散の赤外分光計が故障して動かなかったために、大気化学への寄与は限定的である。「あかつき」は流体力学に特化したミッションであり化学情報は乏しい。

新たなミッションとしては、金星周回衛星からのサブミリ波サウンダと赤外分光によるリモ観測を主たる手段として、鍵となる大気種の検出と、それらの 3 次元分布の時間変動をとらえられれば画期的である。このような 4 次元の組成データを、力学場データと統合して、化学輸送モデルにより 3 次元物質循環の定量的な理解を得る。

同時に、力学場の把握のために、子衛星を分離して親子衛星間の衛星間電波掩蔽により多地点で高鉛直分解能・高精度の温度データを得ることを検討している (Fig. 1)。これまでの電波掩蔽では、探査機と地上局を結ぶ電波を用いるために観測できる地点や日時が限定的で、惑星大気探査において補助情報にしかなりえなかった。今回の電波掩蔽では、エアロゾルが蒸発して生じる硫酸蒸気の 3 次元分布も観測し、これも物質循環とエアロゾル物理の重要情報となる。

衛星間電波掩蔽は、これまでほとんど分からなかったエアロゾル層内部の力学を 3 次元精密診断することを可能にする。温度分布から力学的安定を可視化するとともに、空気塊の移流を可視化する。また、

大気波動の効果により広範囲で生成消滅する薄い乱流層を大気安定度データから検出し、拡散輸送の時空間構造を把握する。このような観測から、子午面循環・夜昼間循環・波動による輸送の中で空気塊が変質し、大気組成やエアロゾル層の 3 次元構造を形成する様子を、把握することができるだろう。

なお、サブミリ波サウンダによる金星大気化学観測としては、米国 Discovery へ VESPER というミッションが提案されていたことがある。成層圏光化学においてサブミリ波サウンダが強力なツールであることは ISS 搭載ミッションである SMILES の成果によっても示されている。サブミリ波サウンダは温度や風速を電波掩蔽よりも高い高度で得ることができるため、上層大気までの輸送過程を押さえるうえで電波掩蔽と相補的でもある。

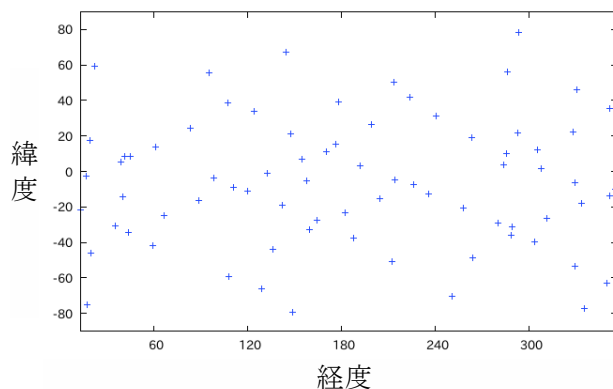
熱圏高度までの光化学と輸送を理解することは、大気散逸の根元の部分を把握することにもつながる。そこで、プラズマの直接観測や XUV 撮像による大気散逸の観測と協調し、サイエンスの深化と関連コミュニティの拡大を図ることも検討中である。たとえば子衛星にプラズマパッケージ、親衛星に XUV 機器を搭載することが考えられる。衛星間電波掩蔽により、電離圏電子密度の 3 次元構造の時間変化というこれまでにないデータセットが得られることも、このミッションにおける大気散逸の研究をユニークなものにする。下層大気の変動や太陽活動度の変化にともなって上層大気の構造がどう変化し、それが流出大気にどう影響するのかを調べることで、散逸大気の組成と量を支配する物理/化学過程を解明する。

### 4. ミッション形態

本計画では子衛星を分離して 2 機の衛星間の電波掩蔽観測を行うことが特徴的である。2 機の衛星の近金点高度・遠金点高度・軌道傾斜角の組み合わせの一例を Table 1 に記す。そして、これらのパラメータを用いて、金星大気と共に動く系で見た時の観測点の緯度・経度分布を Fig. 2 に示す。これを見ると、金星大気が金星を一周する時間 (約 4 地球日) で、赤道を中心に 70 箇所以上で広範囲にわたり観測できることが分かる。カバーする緯度範囲は軌道傾斜角によって変化し、この最適値は今後の検討課題である。

Table 1 An example of orbital parameters

	近金点	遠金点	軌道傾斜角
主衛星	400 km	2500 km	80°
子衛星	400 km	17500 km	80°



衛星間電波掩蔽に関わる搭載機器とその重量・サイズの概要を Table 2 にまとめた。子衛星および分離機構には SELENE の子衛星（おきな・おうな）のヘリテージを活用する。ただしこれらはあくまで叩き台であり、今後の検討で大きく変わりうることに注意する必要がある。

Fig.2 An example of the distribution of observation points in four days in the reference frame rotating with the background flow

Table 2 An example of the specifications of instruments for radio occultation

	機器名	目的	質量	サイズ
子衛星	超高安定発振器(USO)	鉛直温度分布の測定	1.5kg	主構体 990x990x650[mm] + 外部搭載機 (XLGA、 分離機構、他)
	X 帯ローゲインアンテナ	主衛星との 4-way 通信、掩蔽送信	0.5kg	
	X 帯中継器(XTRP-2)	子衛星の 4-way ドップラー	3.0kg	
	分離機構	子衛星へのスピン印加と 主衛星からの分離	1.4kg	
	子衛星 合計(衛星システムを含む)		50kg	
主衛星	超高安定発振器(USO)	鉛直温度分布の測定	1.5kg	180x160x160[mm]
	X 帯ハイゲインアンテナ	子衛星との 4-way 通信、掩蔽送信	2.5kg	920x920x50[mm]
	X 帯中継器 (XTRP-1*&XTRP-3*)	主衛星の 2-way レンジ計測、 子衛星の 4-way ドップラー	1*: 4.3kg 3*: 3.1kg	1*: 270x180x130[mm] 3*: 270x210x110[mm]
	位相計測器	子衛星からの送信搬送波の 周波数計測	1kg	150x150x50[mm]
	分離機構	子衛星へのスピン印加と 主衛星からの分離	4.3kg	約 600 φ x100[mm]
	主衛星 上記ペイロード 合計		16.7kg	