

次世代金星探査の検討

今村剛（東京大学）、金星探査 RG

今後の金星探査を検討すべく、2021 年度末に ISAS 宇宙理学委員会に以下のような狙いを持つリサーチグループ（RG）が設置された。

1. 科学目標の方向性

地球とほぼ同じ大きさでありながら地球と全く異なる環境を有する金星では、大気の化学・放射・力学・散逸と大気-地殻相互作用が地球とは異なる気候システムを作り上げていると考えられる。金星探査機「あかつき」は大気の超回転など大気力学の問題に取り組んでいるが、他にも、二酸化炭素大気の光化学的安定性、硫黄サイクル、エアロゾル物理、アルベドを支配する未同定の紫外吸収物質、揮発性物質の宇宙空間への散逸、大気と固体惑星の物質交換など、解き明かすべき多くの課題が残されている。近年、エアロゾルにおおわれていると考えられる系外惑星や大気が超回転していると考えられる系外惑星が発見され、そのような系外惑星のリファレンスとしても金星は注目されている。我々が目指すべき金星の科学は、金星という特定の天体の成り立ちの解明のみならず、普遍的な惑星気候システムの理解でもある。

21 世紀に入ってリポートした金星探査は、Venus Express の成果が出揃い、「あかつき」が成果を積み上げるフェーズに入り、次の展開を図る時期に来ている。2021 年に欧州と米国で合わせて 3 つの金星ミッションが採択され、さらにインドとロシアの金星ミッションも推進されており、金星軌道投入が有利となる 2030 年代初頭に向けて金星の科学が世界的に盛り上がりつつある。日本においても、近年の探査の成果を踏まえた金星の科学の新展開と、新たな探査の種となる工学技術、そしてそれらを踏まえた複数の探査ミッション案が議論されている。

これらの状況をふまえて、本 RG では、地球型惑星の多様性と普遍性の理解を掲げつつ、金星の科学の個別テーマの議論を深化させる。同時に、新たな発想の探査を可能とする工学技術の検討を進め、科学的成果と探査工学の発展を最大化する金星探査ロードマップを作成する。

2. RG の達成目標と活動内容

科学テーマのそれぞれを精査し、優先度の高い科学目標を絞り込む。並行して、新たな探査を可能とする工学技術の検討を進め、科学テーマとのマッチングを議論する。その結果をもとに、JAXA の公募型小型や戦略的中型、小規模計画など様々な打ち上げ機会を想定した複数のオプションからなる金星探査のロードマップを、理学と工学の共同作業で構築する。早期に立ち上げるべきミッションを特定し、規模、打ち上げ手

段、システム要件、時期などの検討を進め、ワーキンググループ設立を申請する。ここまでを 2022 年度から 2024 年度までの 3 年間に行う。

ミッション検討においては、RG 準備チームでこれまで議論してきた以下の構想や問題整理が雛形となる。これらを組み合わせたミッション案や新たなアイデアについても検討する。

大気化学探査

金星大気化学の理解の鍵は、熱化学が支配する下層大気と光化学が支配する上層大気、およびその境界にあたる雲層という各高度領域における大気微量成分の時間・空間変化を把握することである。そのために、紫外～赤外、サブミリ波帯といった異なる波長域における分光観測を、周回機からの直下視観測と周縁観測の組み合わせで実施することが有効である。限られた搭載リソースで目的を達成するために観測装置の小型軽量化や優先順位付けを検討するとともに、分光観測と相補的な気球や飛行機、ドローンなどによる直接探査も検討する。

衛星間電波掩蔽

超回転という金星特有の大気循環やそこで生じる気象の理解のためには、雲層より低い高度まで含めて波動の伝播や大気構造の変化を 3 次元的にとらえる必要があるが、雲層の撮像を主体とする「あかつき」で得られる情報は限定的である。そこで、広い高度範囲にわたって高い高度分解能で 3 次元情報を得るために、主周回機から子機を放出して衛星間で高頻度の電波掩蔽観測を行う。これまでに、2 機の子機を用いる前提で理学と工学にわたる概念設計を行い、観測に適した軌道設計も実施してきた。得られる大気科学情報をデータ同化により最大化する方法についても検討している。搭載する高安定発振器の小型化や軌道決定の精密化が重要課題である。

超高層大気・大気散逸観測

地球型惑星の環境形成の理解のために金星と火星における大気散逸の理解が重要であるが、探査が進む火星に較べて金星の調査は遅れている。太陽系のハビタブルゾーンの全体理解、ひいては多様な系外惑星へ適用可能な生命生存可能条件の普遍的理解を進めるために、金星の調査が必須である。科学課題としては、磁気異常のある火星とない金星の差異、下層大気と散逸大気の結合、太陽極端現象時の時空間発展、プラズマクラウドの形成過程などが挙げられる。これらの課題について、測定すべき物理量とその精度を明確化する。複数機による多点観測、サブミリ波サウンドャによる微量気体の高度分布、超高層大気のエアロキャプチャリターンによる同位体分析なども検討する。

ラグランジュ点ミッション

金星の常時定点観測を実現するプラットフォームとして、金星のラグランジュポイント L1, L2 周りのリサージュ軌道にそれぞれ小型の探査機を投入する（下図）。2機は当初は一体となり地球と金星の遷移軌道に投入されたのち、金星近傍で減速制御し、順次 L1, L2 リサージュ軌道へ遷移し、それぞれ金星の昼面と夜面を観測する。2機はそれぞれ科学機器、通信システム、データ収集システム、電源システム、熱制御システム、姿勢制御システムを搭載するが、全体の軽量化のために軌道変換用の推進系は一方にのみ搭載する。個々のコンポーネントにはあかつき、はやぶさ 2、Destiny+ の開発成果を活用し、軌道変換用の推進系には新たなチャレンジとして低毒性の MAPA 推進系を適用する。以上を概算した探査機の総質量は現状の公募型小型の能力を超過するため、打上機やキックステージを含めたシステム全体の検討を要する。

金星探査機の形態・仕様

想定される探査機の形態に対する仕様・規模およびキー技術等について整理した。探査機の形態は Orbital（軌道上探査機）、Aerial（上空探査機）、Lander（着陸機）に分類され、形態毎に貢献する分野がマッピングされる。各形態に対し、地球低軌道からの必要増速量は大差ないものの、地表面に近づくにつれて探査機に必要な機能は増え、それを実現する機器の質量も増すため総質量が増加する。概算では、同質量のミッション機器を搭載したとしても、軌道上探査機に対し、上空探査機では約 2 倍、着陸機では 4~6 倍の質量が必要になる。技術課題として、軌道上探査機についてはこれまでの探査技術の応用で対応できると考えられるが、上空探査機および着陸機については大気突入時の熱防護技術、大気中でのマヌーバ技術、耐環境技術など、新たな技術開発への挑戦が必要となる。

3. 海外協力

2030 年前後に実施される予定の金星探査として、NASA の VERITAS と DAVINCI、ESA の EnVision、インドの Shukrayaan がある。ロシアの Venera-D もこの頃の実施を目指している。これらと相補的なミッションを立ち上げ、同時期に実施することにより成果を最大化することを目指す。これらの海外ミッションとは、あかつきミッションを通じて構築した国際協力体制をてこに既に密な情報交換をしているが、協調観測や Interdisciplinary Scientists の交換などのために引き続き連携する。また、Shukrayaan には RG メンバーが co-I として参加しており、Venera-D には日本から観測機器を提供する可能性がある。このような海外ミッションへの参加による国際協力も本 RG で議論する。これら海外ミッションにおいて小型探査機を同時に金星に向けて打ち上げてもらう可能性についても検討していく。