

## 論文の内容の要旨

論文題目

Development of ultra-small instruments for planetary UV radiations

(惑星紫外放射の測定に向けた超小型観測器の開発)

氏 名 桑原 正輝

惑星の大気やプラズマは太陽光共鳴や電子衝突により励起され、物質に固有な波長の光を発する。これらの光の多くは極端紫外光 (EUV) 領域にあり、地球大気の吸収を受けるため、人工衛星や探査機による宇宙空間からの観測が必要となる。1977年にはマリナー10号の観測により水星と金星の大気に含まれるヘリウムや窒素、アルゴンが定量された。その後しばらく EUV 領域での遠隔観測は大気・プラズマの定量の手段として広く用いられてきた。1990年代になると EUV 撮像の技術が向上し、1998年には日本の火星探査機のぞみに搭載されたプラズマ撮像器が地球周辺のヘリウムイオンが放つ光の撮像に成功した。これはプラズマを可視化するという画期的な手法であった。このように EUV 観測は大気やプラズマの定量、可視化に有効な手段として用いられてきた。

惑星大気の研究において、上記のように人工衛星や探査機を用いた宇宙空間からの観測が必要であるが、従来の大型探査計画では開発期間が長いことが問題であった。この状況を打破するために、超小型惑星探査という新分野の確立が計画されている。超小型探査機は大型計画に比べ開発期間が圧倒的に短く、低予算であるため打ち上げ頻度を高くすることが可能となる。そのため超小型探査計画は開発や運用の結果得られる教訓や経験を次の計画（大型計画を

含む) にフィードバックできるという利点を持ち、今後の日本の惑星探査の発展に欠かせないものである。しかし、超小型探査で理学目標を達成するためには、超小型でありながら高効率の観測器を開発する必要がある。

本論文では、上記計画の実現のため、超小型探査機に搭載可能な惑星大気・プラズマを対象とした理学観測器の開発を行った。

第 2 章では、2019 年に打ち上げが予定されている超小型深宇宙探査機に搭載される超小型 EUV 撮像器の開発について述べる。この探査機は、NASA が開発している次世代ロケットの初号機の相乗り衛星として打ち上げられる。探査機のサイズが 6U (10×20×30cm) と非常に小型であり、それ故観測器に与えられる包絡域も極めて狭小 (7×10×10cm) なものとなる。超小型探査機に EUV 撮像器を搭載する際に特に問題となるのが、主鏡の小型化に伴う集光能力の低下である。また、EUV 領域の光を透過する窓材はないため光学系は反射型である必要がある。そのため、小型化のためには光軸上に検出器を配置しなければならず、開口面積の縮小も避けられない。本章では、従来 of 大型探査機に用いられてきた実績のある光学系の設計を基に、超小型探査機に搭載可能な EUV 撮像装置の光学系の最適化を図った。特に、上記問題を解決するため、集光能力を担う多層膜反射鏡の高効率化に重点を置いて研究を行った。

撮像器の観測波長を 30.4nm に設定し、地球-月のラグランジュ点 (L2) から地球周辺に広がるヘリウムイオンの可視化を行う。従来 of 大型探査計画では、30.4nm の光の撮像のために Mo と Si の組み合わせから成る多層膜コーティングが用いられており、その反射率は 18%程度であった。本研究では、様々な材質の複素屈折率から、より高い反射率を達成できる多層膜の組み合わせを調べ、Mg と SiC の組み合わせが最適であると結論した。その後、Mg/SiC 多層膜反射鏡のサンプルの製作、性能評価を行い、従来 of Mo/Si 多層膜反射鏡に比べ高い反射率 (37%) を有していることを確認した。

一方で Mg は大気中の炭酸ガスや亜硫酸ガス、湿気と反応し表面に酸化物、硫化物、水酸化物の皮膜を生ずることが知られている。Mg の大気曝露を防

ぐため、本論文では最表面が SiC の Mg/SiC 多層膜反射鏡を用いている。多層膜反射鏡の反射率の安定性を確認するため、真空中、窒素雰囲気下、大気中、大気中（シリカゲル同封）の 4 通りの保管環境を用意し、30.4nm の光に対する反射率の経時変化を調べた。その結果、どの保管環境でも反射率が低下することなく、安定であることを明らかにした。

以上の結果をもとに、搭載品に施すコーティングに Mg/SiC の多層膜を選択した。Mg/SiC 多層膜反射鏡を用いて集光効率を向上させることで、従来よりも体積にして 10 分の 1 程度の小型な観測器で地球周辺のヘリウムイオンが放つ光を時間分解能 1 時間で撮像可能であり、理学目標を十分達成できることを確認した。本結果は、サイズ・重量の制約が厳しい超小型探査計画において EUV 観測装置を開発する際に有用な知見となる。

第 3 章では、超小型探査機への搭載に向けた水素吸収セルの開発について詳述する。惑星外気圏の水素原子は、太陽光を共鳴散乱することで、121.567nm の波長の光を発生し、惑星コロナを形成する。吸収セルを用いたこの散乱光の観測から、水素原子の密度と温度の空間分布を単一の観測器で取得できる。これらのパラメータは、惑星形成から現在までに散逸した水の量を推定するための重要な情報となる。

水素吸収セルは、内部に設置されたタングステン製フィラメントを点灯し、セル内に封入された水素分子ガスを解離することで水素原子を生成する。生成された水素原子は入射した水素ライマン  $\alpha$  線を吸収するため、フィラメントの点灯時と非点灯時の計数を比較することで、入射光量を推定できる。フィラメントの温度が高ければ生成される水素原子の数が増え、水素ライマン  $\alpha$  線の吸収量が増える。反対に、フィラメントの温度が低ければ、吸収量が減る。消費電力に対する水素ライマン  $\alpha$  線の透過率を取得し、それを地上校正試験の結果と比較することで、観測対象の水素大気の温度も推定できる。日本では 1998 年に打ち上げられた火星探査機のぞみの搭載観測器に吸収セルが用いられた。その後、約 20 年に渡り吸収セルの開発は停滞していたが、超小型探査が勃興し

てきた昨今、この技術は見直されるべきである。装置の構造の単純さ故、小型・軽量化に適しているからである。

本章では、のぞみ探査機に搭載された吸収セルフォトメータの技術をもとに、小型水素吸収セルを開発し、吸収性能の評価を行った。性能評価にはフランスの放射光施設 SOLEIL にあるビームラインを利用した。本論文では特にフィラメント上での水素分子の解離吸着・水素原子の熱脱離という物理過程に着目し、水素原子の生成効率を向上する目的で、のぞみに搭載された吸収セルに使用されたフィラメントに比べ、短くかつ細いフィラメントを吸収セルに用いた。性能評価の内容としては、複数のフィラメントを内部に設置でき、かつ外部からガスを充填し圧力を制御可能な吸収セルを製作し、(1)フィラメントの長さ・直径、(2)消費電力、(3)封入ガス圧力および(4)セルの光路長を変化させた際の水素ライマンアルファ線に対する吸収プロファイルを測定し、それに理論曲線をフィッティングすることで吸収性能（解離ガスの光学的厚み・FWHM）の評価を行った。本実験で調査したパラメタの内、最適な組み合わせは、フィラメント直径 24.4mm、消費電力 1-3W、ガス封入圧力 100-300Pa であり、この値に設定することで従来の吸収セルより約 4 倍高い光学的厚みを達成できることを明らかにした。さらに、上記の値を用いて惑星大気観測のシミュレーションを行った結果、100K 以上の精度で大気温度を測定可能なことを明らかにした。

本学位論文では、超小型探査機に搭載可能な理学観測器の開発を行った。前半では多層膜反射鏡の高効率化に重点を置き、超小型探査機に搭載可能な EUV 撮像器の開発を行った。後半では単独で複数の情報を取得可能な吸収セル法において各パラメタの最適化により、従来よりも高効率な装置を開発した。