

惑星探査用多反射リフレクトロン型質量分析器の開発

齋藤義文，山本直輝（宇宙研），横田勝一郎（阪大），笠原慧（東大）

1. 本研究の目的

将来の月・惑星探査ミッションに向けて、中性粒子質量分析器の開発を行う。多反射リフレクトロン型質量分析器は、平成29年度まで3年計画で開発を進めてきた「リフレクトロン飛行時間式質量分析器」の開発成果をもとに、同程度のサイズでより高い質量分解能を実現するため、測定するイオンの装置内での反射回数が「リフレクトロン飛行時間式質量分析器」では1回であったところを複数回に増やした設計の質量分析器を開発することが目的である。中性粒子をイオン化するイオン源部分と、イオン化した粒子を加速し、電場を用いて複数回反射させた上で、イオンの飛行時間を検出して質量を計測するリフレクトロン部分で構成される。イオン源部分としては、電子衝撃によるイオン源を用いるが、それに加えて、固体物質をレーザービームで気化する部分もあわせて開発する予定である。本質量分析器を開発することで、将来の惑星探査ミッションにおいて、同位体元素の測定を行う事も可能となり、惑星表層物質の起源や変遷を明らかにすることを目指している。本研究は3年計画で実施する予定であったが、2020年度はCOVID-19の感染拡大に伴うBCP発動などの影響で試験の実施を一時中断せざるを得ない時期もあったため、本研究の研究期間を1年延長することにした。本研究の最終目標は、真空チェンバー内で実際に動作する、質量分解能200程度の多反射リフレクトロン型質量分析器のテストモデルを試作して、本共同利用設備で試験することで、レーザービームによる固体物質の気化から、質量分析までの動作を検証することである。

2. 成果

<概要>

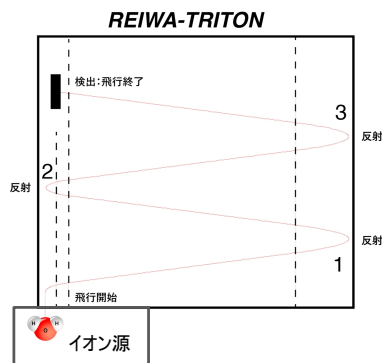
本研究で開発を実施している多反射リフレクトロン型質量分析器は、月極域に存在する水の分布や量を明らかにし、資源利用可能性の調査を行うことを目的とした月極域探査（LUPEX）のローバーに搭載される水資源分析計（REIWA: Resource Investigation Water Analyzer）を構成する質量分析器、3回反射型リフレクトロン（TRITON: Triple-reflection Reflectron）として採用されることになった。

2020年度は、当初の計画通り、固体試料加熱チェンバーの試作機・衛星搭載イオン源の試作品と組み合わせた性能試験を実施した。固体試料加熱チェンバーの試作機を用いてホウ砂や酢酸マグネシウム4水和物などを100度程度まで加熱して放出された水分子を多反射リフレクトロン型質量分析器テストモデルで測定することができた他、衛星搭載イオン源の試作品と組み合わせた性能試験を実施することで、装置の感度を計測することができた。更に、これらの実験を行う過程で、テストモデルの最適化が一部不十分であることが判明したため、最適化が可能なように部品を改良した他、検出器としてチャンネルトロンとMCPの性能比較を行う試験を実施中である。

2.1. 3回反射リフレクトロン型質量分析器

図2.1.1に3回反射型リフレクトロン TRITONの概念図、図2.1.2に3回反射型リフレクトロン TRITONの原理図を示す。

Triple-reflection Reflectron



- TRITON (Triple-reflection Reflectron) は月極域探査機LUPEXのローバに搭載される水資源分析計 REIWA (Resource Investigation Water Analyzer) の中の分析装置の一つで、REIWAの熱重量測定部で生成された中性ガスの質量分析を行う装置。
- 水分子の相対量を近接した質量を持つ分子・原子と分離して計測する他、月表層の揮発性物質を主な測定対象にして質量数200までの分子・原子の測定を行う。

図2.1.1 3回反射型リフレクトロンの概念図

設計した3回反射型リフレクトロン

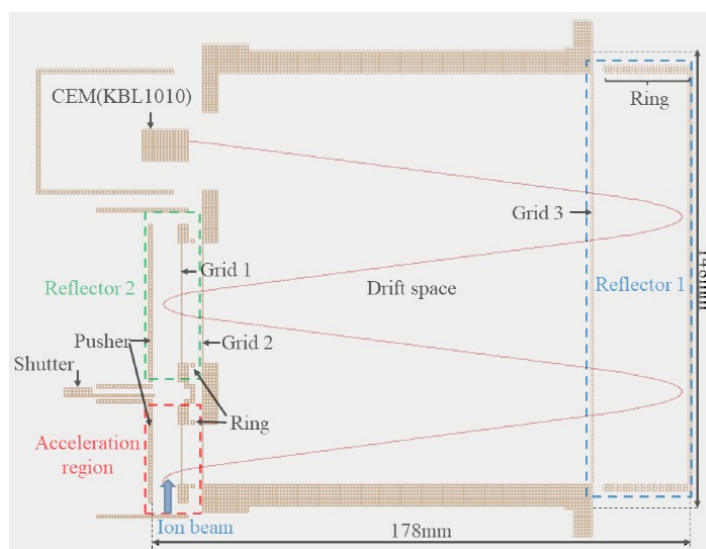


図 2.1.2 3回反射リフレクトロンの原理図

TRITONは、中性粒子をイオン化するイオン源、イオン化した粒子を加速する加速部、イオンが自由飛行するドリフト部、イオンを電場で反射させるリフレクトロン部とイオンを検出する検出器で構成されるTOF質量分析器であり、加速開始から検出器に至るまでのイオンの飛行時間（TOF：Time Of Flight）を計測することで質量を測定することができる。リソースが限られるローバに搭載するため、小型軽量と中

程度の質量分解能 ($m/\Delta m \sim 120$) を両立すべく、TRITONは従来型のリフレクトロンを拡張した3回反射型リフレクトロンを採用している。従来型のリフレクトロンは加速されたイオンを分析器内で一往復飛行させたのち検出するが、3回反射型リフレクトロンではイオンを二往復飛行させてから検出する。これにより、装置のサイズを大きく変えることなく、イオンの飛行距離を増加(倍増)させて質量分解能を上げることができる。

2.2. 3回反射リフレクトロンで測定した質量スペクトル

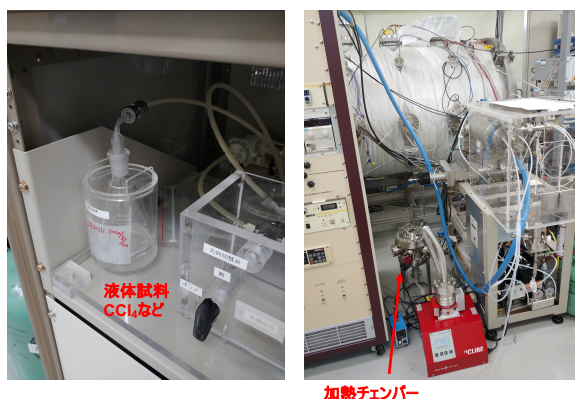


図 2.2.1 (左) 液体試料の導入部 (右) 固体試料の加熱チェンバー

図2.2.1に共同利用設備である磁気シールド付き真空チェンバーに取り付けた液体試料の導入部と、固体試料を100度程度まで加熱できる加熱チェンバーの試作機を取り付けた様子の写真を示す。これらの設備を使用し、液体試料である四塩化炭素を導入して質量スペクトルを計測した結果を、図2.2.2に示す。

四塩化炭素 CCl_4 を導入して質量スペクトルを計測した結果 (Single Mode)

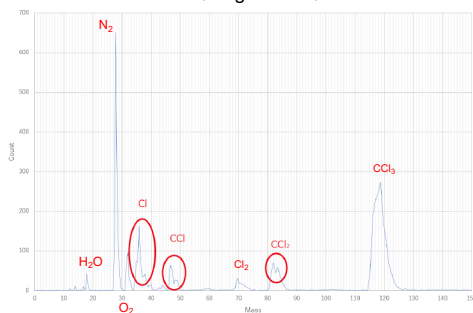


図2 Mass spectrum of CCl_4 . 2 peaks are observed in red circles.

図 2.2.2 四塩化炭素を導入して取得した質量スペクトル

図2.2.2に示す質量スペクトルは、single reflection modeで取得した質量スペクトルであるが、四塩化炭素を導入すると、電子衝撃イオン源で分子が分解し、 CCl_3 , CCl_2 , CCl , Cl_2 , Cl などのピークが検出されているのがわかる。これらに加えて、残留ガス成分である、 N_2 , O_2 , H_2O などのピークも検出されている。

図2.2.3.には結晶水を含む固体試料であるホウ砂 $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ を100度程度まで加熱した際に放出された吸着水または結晶水の質量スペクトルを示す。この質量スペクトルはtriple reflection modeで取得したもので、 H_2O のピークに加えて、電子衝撃イオン源でイオン化した際に分解して生成されたOHのピークも検出されている。

ホウ砂 $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ を加熱して放出される水の質量スペクトル (Triple mode)

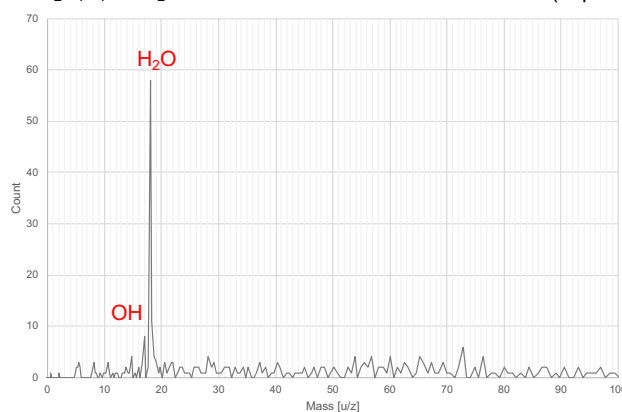


図 2.2.3 ホウ砂 $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ を100度程度まで加熱した際に放出された吸着水または結晶水の質量スペクトル

3. 今後の予定

2020年度はCOVID-19の感染拡大に伴うBCP発動などの影響で試験の実施を一時中断せざるを得ない時期もあった。当初2020年度に予定していた固体物質をレーザービームで気化する部分を「リフレクトロン飛行時間式質量分析器」に取り付けて行う試験については、本研究の研究期間を1年延長して、2021年度に実施することにした。2021年度にCOVID-19の影響がなくなれば、あと1年で本研究を完了できる見込みである。