

惑星探査用リフレクトロン飛行時間式質量分析器の開発

齋藤義文，今井優介，横田勝一郎（宇宙研），笠原慧（東大）

1. 本研究の目的

将来の惑星探査ミッションに向けて、惑星探査用中性粒子質量分析器の開発を行う。本惑星探査用中性粒子質量分析器は、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と、レーザービームによるイオン源の両方を開発する予定であり、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で、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。本研究で開発する惑星探査用リフレクトロン飛行時間式質量分析器は、実験室における同種の質量分析器は存在するものの、衛星搭載用観測装置としては日本での開発実績が無く、本研究によって開発に成功すれば、将来の惑星探査用質量分析器として広く応用することが期待できる。

2. 成果

<概要>

平成26年度にはリフレクトロン飛行時間式質量分析器テストモデルの製作を開始し、平成27年度は、平成26年度に製作したリフレクトロン飛行時間式質量分析器テストモデルの特性取得試験を実施した。平成28年度は平成27年度の特性取得試験で判明した問題点を解決するため、テストモデルの改良を行うための部品の設計、製作を実施した。本研究最終年度の平成29年度には、平成28年度に製作した部品を組み込むと共に、パルス高圧電源を立ち上がり・立ち下がりともにスピードの早いpush-pull型に変えて特性取得試験を実施した。更に、平成27年度に試験を実施した加速部1段、反射部2段のリフレクトロンを加速部2段、反射部1段に組み替えての特性取得試験も実施し、これらの結果を修士論文にまとめて東京大学大学院理学研究科に提出した。

2.1. リフレクトロンの原理と試験モデル

図2.1に平成27年度に試作、試験を行った、1段加速2段リフレクタ型の原理図を示す。平成27年度は、この測定原理を持つ、全長200mm、直径100mm程度の小型のTOF-MS(Time-Of-Flight Mass Spectrometer:飛行時間型質量分析器)を開発した。イオン源でイオン化された中性粒子は、図2.1の左端のAcceleration Regionに入射する。Acceleration Region には、パルス高圧を印加することで、入射したイオンを図2.1の右方向に加速する。加速されたイオンは、Drift Tubeと示された部分を飛行し、図2.1右側のReflector部分で反射され、再び Drift Tubeを飛行した後、Detectorで検出される。パルス高圧を印加したタイミングと、Detectorでイオンを検出したタイミングの時間差を測定することで、イオンの飛行時間からイオンの質量を求めることができる。装置の具体的な寸法は計算機シミュレーションによって設計したが、寸法と電極に印加する電圧を最適化した他、Drift Tubeの電位を負の高圧にすることでパルス高圧を高い繰り返し周波数で印加する方式を採用した。

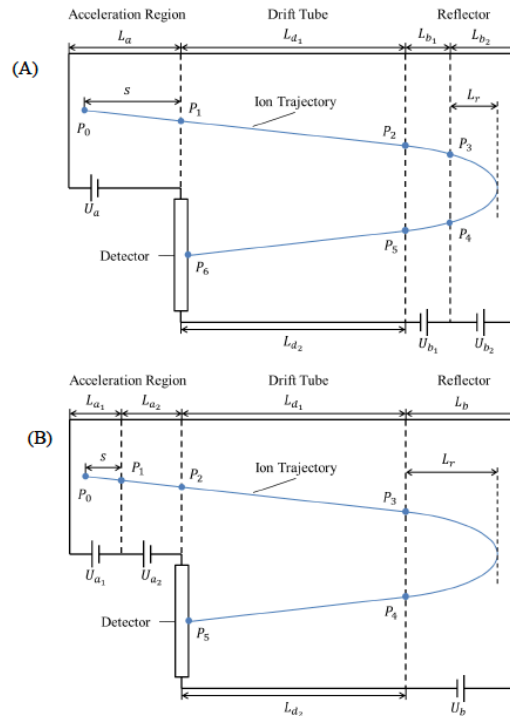


図 2.1 1段加速2段リフレクタ型と2段加速1段リフレクタ型の装置の原理図。(A)は1段加速2段リフレクタ型、(B)は2段加速1段リフレクタ型を表す。

2.2. 改良型1段加速2段リフレクタリフレクトロン試験モデルの特性取得試験結果

平成27年度に明らかとなった、リフレクトロン試験モデルについて、1) 不要なイオンの入射を防ぐためのシールドを用意する、2) シールドを兼ねたイオン加速部分のカバーやイオン反射部のカバーのサイズが小さく、取り付けが出来ない状態にあるのを取り付け可能となるように改良する、などの対策を施すとともに、押出し電極に印加するパルス高圧を立ち上がり、立ち下がりともスピードの早い、push-pull型に変えて、特性取得試験を行った。図2.2にこれらのシールド、カバーの写真を示す。

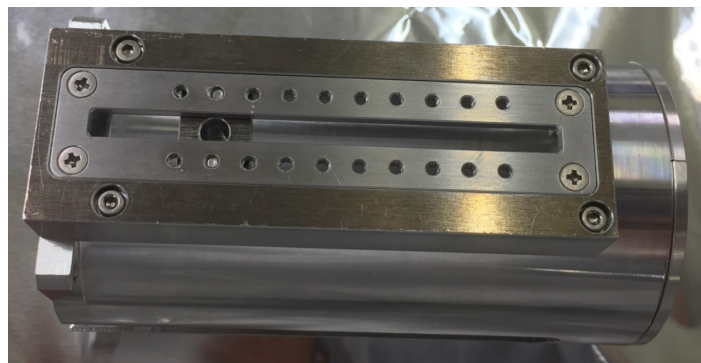


図 2.2 リフレクトロン試作モデルの改良のために製作したシールド・カバー

図2.3 にはAcceleration Regionの加速電位を958 V, Drift Tubeの電位を -2400

V、リフレクターの電位を 915 Vにし、N₂ガスを導入した場合の質量スペクトルを示す。

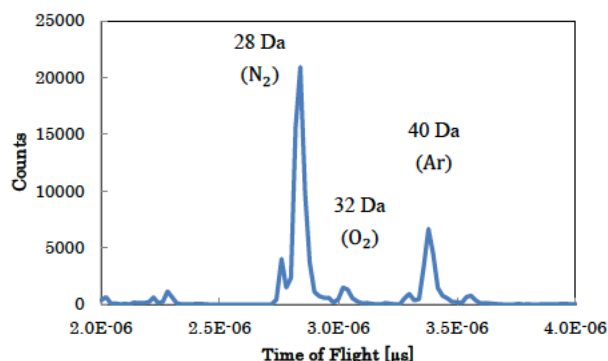


図 2.3 改良型リフレクトロン試作モデルで取得した質量スペクトルの例

表2.1に、残留ガスと、N₂ガスを導入した場合の、N₂の質量分解能を示す。

表2.1 残留ガスと、N₂ガスを導入した場合の、N₂の質量分解能

| Drift Tube の電圧 [V] | 残留ガス | N ₂ ガス |
|--------------------|------|-------------------|
| -2400 | 69.7 | 60.7 |
| -2000 | 48.9 | 52.8 |
| -1600 | 45.6 | 44.1 |
| -1200 | 49.1 | 46.1 |

改良前に実施した特性取得試験で得られた質量分解能はDrift Tubeの電圧にも依存するが、40程度であったが、改良を施すことで、質量分解能が70程度まで改善した。

2.3. 2段加速1段リフレクタリフレクトロン試験モデルの特性取得試験結果

図2.4にAcceleration Regionの加速電位を645 V, Drift Tubeの電位を -2950 V、リフレクターの電位を 832 Vにし、N₂ガスを導入した場合の質量スペクトルを示す。また、表2.1に、残留ガスと、N₂ガスを導入した場合の、N₂の質量分解能を示す。1段加速2段リフレクタで得られた質量分解能よりもさらに高い質量分解能である80程度まで改善した。

表2-3に、1段加速2段リフレクタ型及び2段加速1段リフレクタ型のシミュレーション結果を示す。シミュレーション結果では、1段加速2段リフレクタ型の方が2段加速1段リフレクタ型よりも少し質量分解能が高くなっている。

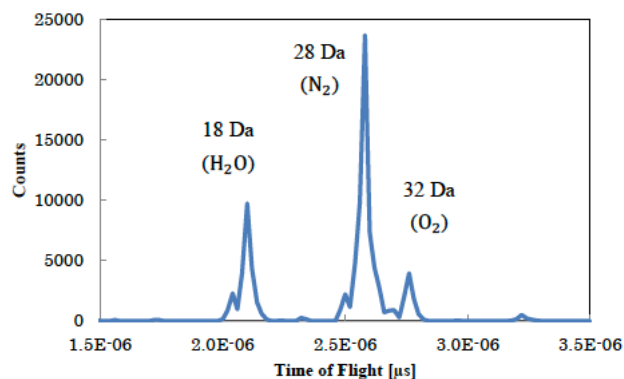


図 2.4 2段加速1段リフレクタリフレクトロン試作モデルで取得した質量スペクトルの例

表2.2 残留ガスと、N₂ガスを導入した場合の、N₂の質量分解能

| Drift Tube の電圧 [V] | 残留ガス | N ₂ ガス |
|--------------------|------|-------------------|
| -2950 | 82.3 | 81.7 |
| -2213 | 71.7 | 80.8 |
| -1475 | 47.0 | 42.2 |

表2.3 1段加速2段リフレクタ型及び2段加速1段リフレクタ型のシミュレーション結果

| | 質量分解能 | 検出率 |
|--------------|-------|------|
| 1段加速2段リフレクタ型 | 120 | 45 % |
| 2段加速1段リフレクタ型 | 100 | 43 % |

3. 結論

リフレクトロン型質量分析器の試験モデルの加速領域の電場の漏れを防ぎ、試験モデルにイオンを導入するビーム径を制限するために加速領域に1mm径の筒とカバーを装着し、また、押し出し電極に印加するパルス高圧をpush-pull型の高圧トランジスタスイッチに代えることにより、パルス高圧の立ち上がり、立ち下がり時間を減少させることで、2段加速1段リフレクタ型リフレクトロン試験モデルの質量分解能が従来の40程度から、80程度にまで改善した。また、1段加速2段リフレクタ型及び2段加速1段リフレクタ型の質量分析器試験モデルの質量分解能を比較した結果、シミュレーションでは、1段加速2段リフレクタ型リフレクトロンの方が少し質量分解能が高い結果となったが、実測してみると、2段加速1段リフレクタ型の方が質量分解能が高くなることが明らかとなった。これは、1段加速2段リフレクタ型リフレクトロンの場合には、イオンの反射部で、反射点に近いイオンの速度が低下している場所にグリッドがあり、グリッド近傍の電場が少し歪むことで、イオンの軌道が大きな影響を受けたため、2段加速1段リフレクタ型リフレクトロンの方が質量分解能が高くなったと考えられる。