

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

大石峻裕, 齋藤義文, 笠原慧, 横田勝一郎 (宇宙研)

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。テストモデルを真空槽中の回転台に設置し、真空槽中の残留中性ガスの質量分析測定を行ったほか、窒素、アルゴンなどのガスを導入して質量分析性能を測定した。この測定により、製作したテストモデルの基本的な動作は正常であることが確認出来た。ただし、測定方法に一部問題があったため質量分解能については、設計した高質量分解能はまだ実現できていない。また、テストモデルの構造についても、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、3) 電子衝撃によるイオン源を専用に設計して性能を上げる、などの対策が今後必要であることが明らかとなった。

2.1. リフレクトロン

図2.1に今回試作、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。今回は、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。

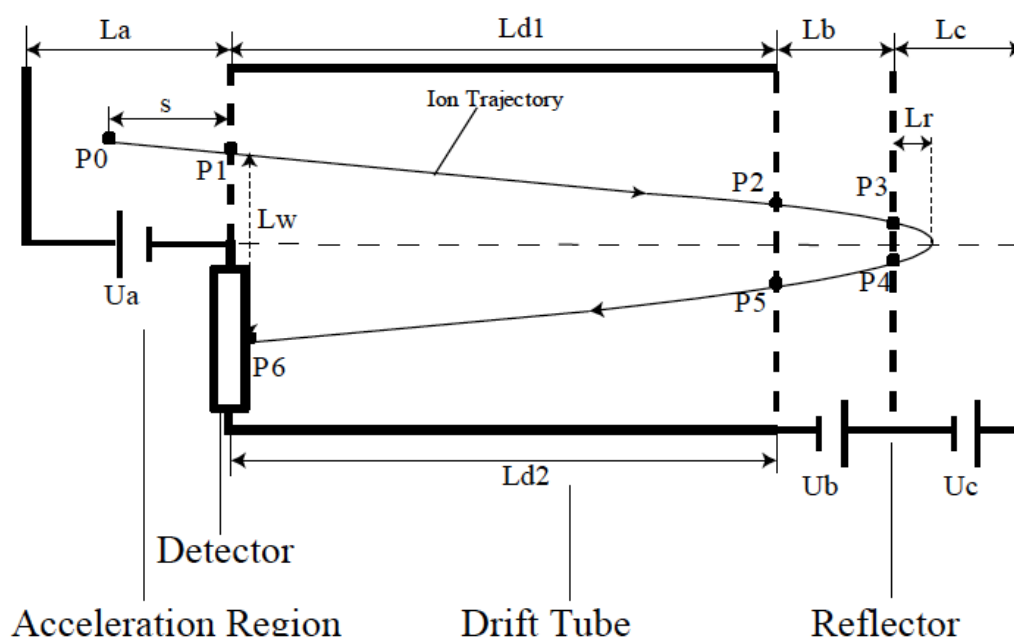


図 2.1 1 段加速 2 段リフレクタ型の装置の構成図。左からイオンの加速領域、自由飛行区間、反射領域を示す。

設計したリフレクトロンの動作と性能を確認するためにリフレクトロンの試験モデルを製作した。製作した試験モデルの写真を図2.2に示す。

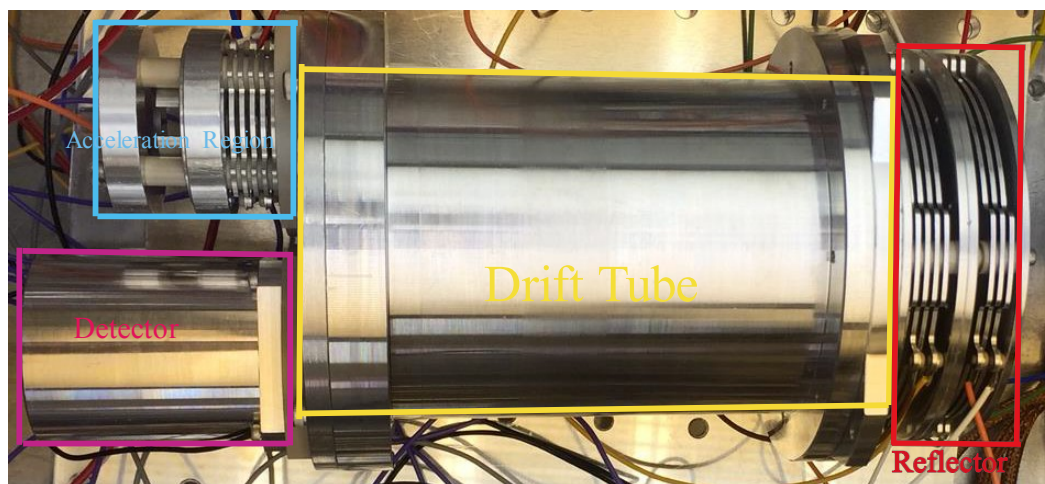


図 2.2 リフレクトロン試験モデルの外観。イオンの入射位置手前の電極を接地し、押し出し電極の印加電圧を抑える設計にしている。

2.2. 試験モデルの性能試験

製作したリフレクトロン試験モデルの動作と性能を確認するため、試験モデルを真空チャンバー内に設置し、残留ガスのマススペクトルを取得した。試験モデルでは、リングング(パルス高圧信号の反射)をできるだけ抑えるため、チャンバーの外に用意したパルス高圧電源と真空フィードスルーを高圧同軸ケーブルで接続して、真空チャンバー内部も高圧同軸ケーブルを用いて、押し出し電極に配線した。検出器の信号線や他の高圧線については、チャンバー外は同軸ケーブルを用い、チャンバー内部は単線のケーブルを用いた。この残留ガス計測で用いた配線とTOF計測の概念図を図2.3に示す。

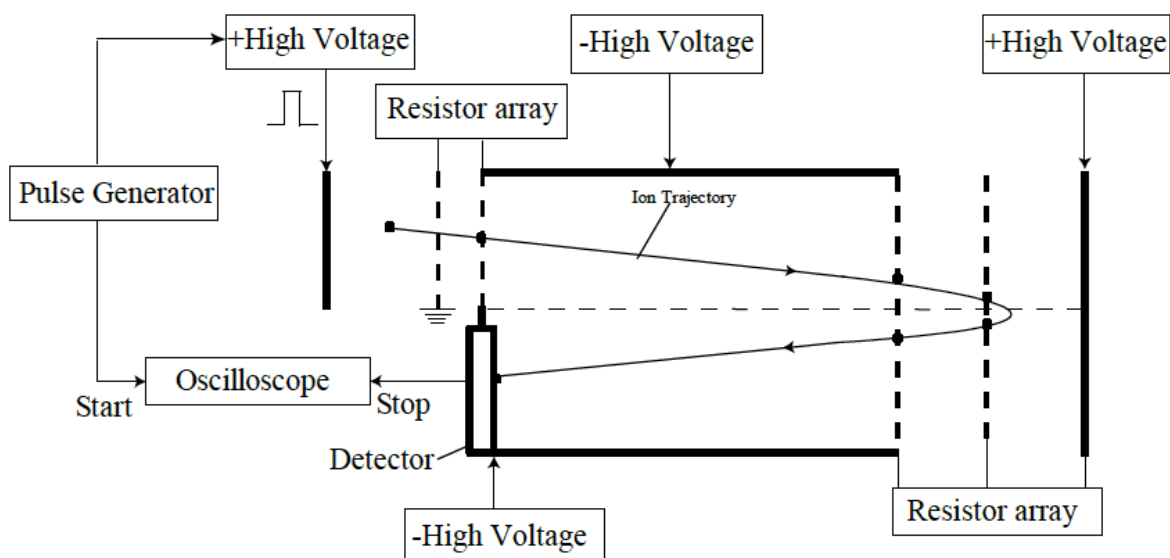


図 2.3 試験モデルの配線と TOF 計測の概念図。パルス発生器のコントロール信号をスタート信号とする。押し出されたイオンは抵抗分割された電極により加速され、自由飛行区間を飛行し、リフレクタで反射され検出器に到達する。この信号をオシロスコープでストップ時刻として計測する。

図2.4には、試験モデルで得られた真空チャンバー中の残留ガスのTOFマススペクトルと、真空チャンバーにArガスを導入した時の1.8us - 4.0us間のTOFマススペクトルを示す。この性能試験で得られたマススペクトルの形状はシミュレーションで求めたものより、時間方向に幅を持つことが判った。これは、一つには押し出し電極に印加するパルス高圧の立ち上がり時間が長いことによると考えられる。このスペクトル幅の広がり、パルス高圧のモジュールと押し出し電極とを短距離で接続し、かつインピーダンスマッチングを正しくとることで、改善されることが考えられる。また、もう一つの理由は、検出器のストップ信号の記録方法に起因する。ストップ信号はオシロスコープのヒストグラム機能を用いて記録したため、信号に含まれるリングング波形もストップ信号として記録してしまう。その結果、本来であればストップ信号の最初の立ち下がりだけを検出するべきであるが、これに加えて、最初の信号に続くリングング波形の立ち下がりも検出してしまい、長い飛行時間の信号も記録してしまっていた。これについては、ストップ信号の最初の立ち下がりだけを検出できるような計測方法を用いることで解決することができる。

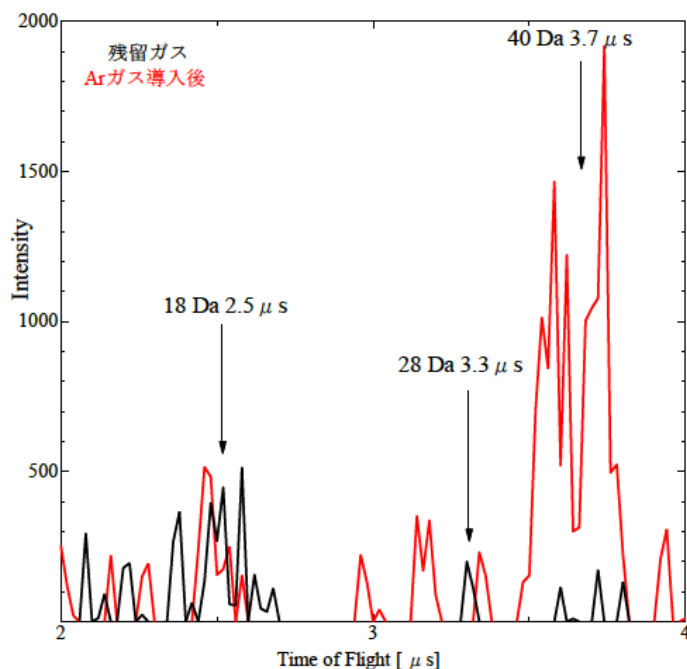


図 2.4 リフレクトロンを最適解に設定して得られた真空チャンバーの残留ガスのマススペクトル(黒線)と Ar ガス導入後のマススペクトル(赤線)。計測時間はそれぞれ 10 分間である。2.5 μ s 付近のピークは H_2O (18 Da)、3.3 μ s 付近のピークは N_2 と CO (28 Da)、3.7 μ s 付近のピークは Ar (40 Da)(いずれも 1 価イオン)を表す。

3. 結論

平成 26 年度、平成 27 年度に惑星探査用リフレクトロン飛行時間式質量分析器の試験モデルを製作し、平成 27 年度にはテストモデルの特性取得試験を実施した。この試験により、製作したテストモデルの設計と、基本的な動作は正常であることが確認出来た。しかしながら、Time Of Flight のストップ信号の測定方法に一部問題があったことや、押し出し電極に印加するパルス高圧の立ち上がり時間が長かったことなどから、質量分解能については、設計した高質量分解能がまだ実現できていないことも明らかとなった。平成 28 年度も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は継続し、テストモデルの構造については、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、3) 電子衝撃によるイオン源を専用に設計して性能を上げる、などの対策を施すとともに、ストップ信号の測定方法の改良、押し出し電極に印加するパルス高圧の立ち上がり波形の改良などを進めて設計通りの高質量分解能の実現を目指す。