

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, 福山代智, 横田勝一郎 (宇宙研), 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3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、固体物質をヒーターで加熱して気化する部分あるいはレーザービームで気化する部分もあわせて開発する。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が可能となり、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年計画で実施しているが、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、ヒーター加熱あるいは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>

2019年度初めには、2018年度に製作した多反射リフレクトロン型質量分析器テストモデルの特性取得試験を実施しようとしたが、イオンの加速部と第2反射部の間にある電極のシールドが十分で無く正常に動作しないことがわかったためまずその部分の改良を行った。その後、テストモデルの特性取得試験を行い、3回反射モードで質量分解能120以上の性能を確認することができた。これらの結果は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. 多反射リフレクトロン型質量分析器の原理

図2.1に、1段加速2段リフレクトロン型TOF質量分析器の原理図を示す。測定対象の中性粒子はイオン源でイオン化され、図2.1の左端のAcceleration Regionに入射される。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。

本研究では、この従来型の1段加速2段リフレクトロン型TOF質量分析器拡張して多反射型リフレクトロンの開発を行っている。図2.2に多反射型リフレクトロンの電極構造図を示す。図2.1の方式との違いは、図2.2の左中央に第2反射部 (reflector-2) を配置したことである。加速部から押し出されたイオンは、ドリフトスペースを自由飛行し、その後第1反射部→第2反射部→第1反射部の順に反射され、最後に検出器 (CEM: Channel Electron Multiplier) で検出される。つまり、図2.1に示した行き帰りの一往復でなく、二往復させてからイオン検出する。この方法では装置のサイズを

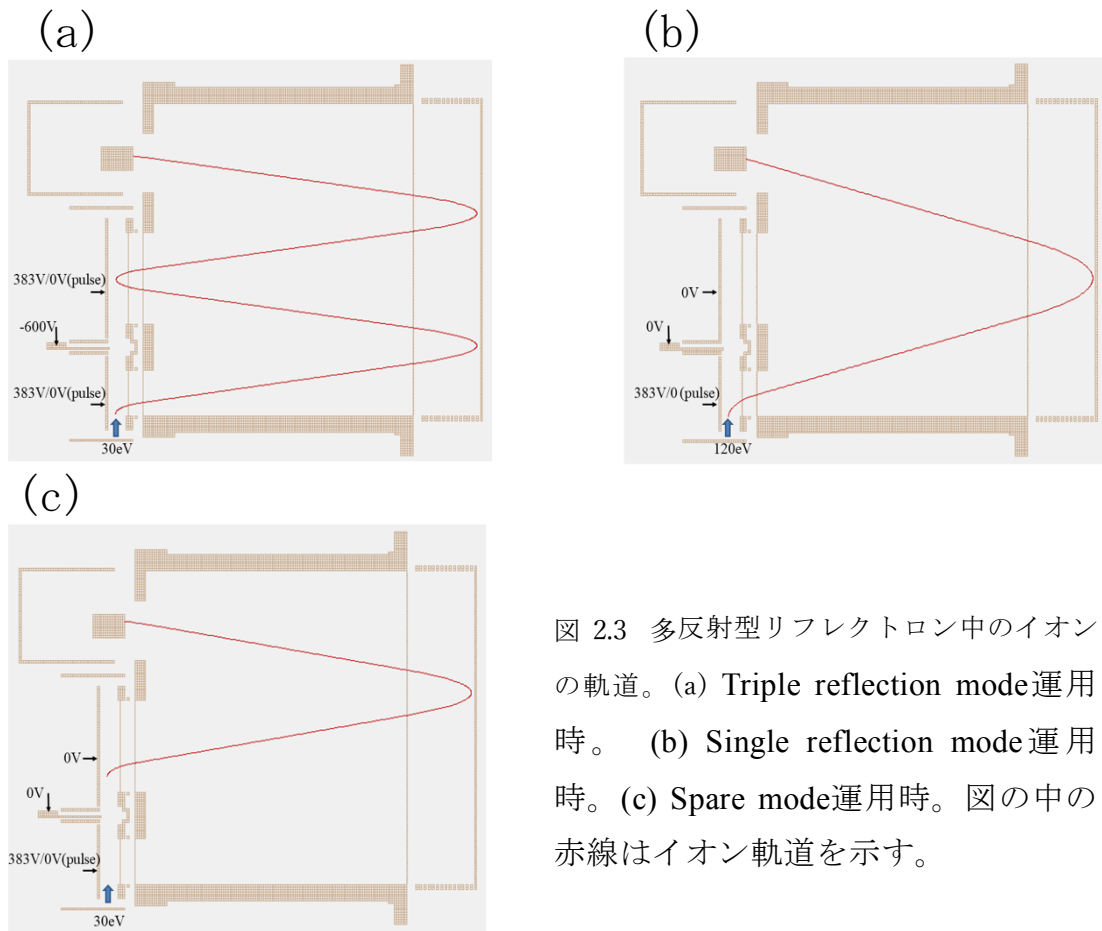


図 2.3 多反射型リフレクトロン中のイオンの軌道。(a) Triple reflection mode運用時。(b) Single reflection mode運用時。(c) Spare mode運用時。図の中の赤線はイオン軌道を示す。

多反射型リフレクトロンでは3つの測定モードを搭載することで、冗長性を持っている。加速部と第2反射部にそれぞれパルス高圧を印加することで、パルス高圧の内1つが故障した場合でも、1回反射で測定を行うことができる。例えば、加速部のパルス高圧が故障した場合にはSpare mode、第2反射部のパルス高圧が故障した場合はSingle reflection modeで測定できる。搭載可能なパルス高圧は国内では初めての開発品でありこれまでフライトで使用されてきた高圧電源に比べフライト実績が無く故障する可能性も高いため、質量分析器がパルス高圧電源の故障に対する冗長性を備えていることは重要である。

2.2. 多反射リフレクトロン型質量分析器の特性取得試験結果

Triple reflection modeの測定結果を図2.4に示す。本モードはカウントレートが非常に小さく、 10^{-5} Pa程度のチャンパー内残留ガスの測定が行えなかった。カウントを増やすため、窒素ガスをチャンパー内に導入して圧力を上げ測定を行った。本測定のカウントレートは0.06counts/sであった。

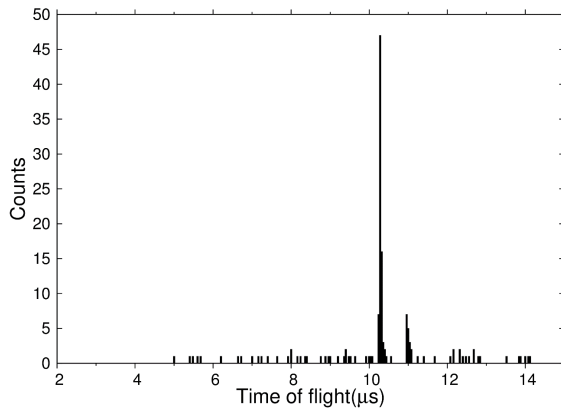


図 2.4 Triple reflection modeの測定結果。チャンパーに窒素ガスを導入しながら測定。測定時間40分、チャンパー圧力 1.3×10^{-3} Pa、ビン幅40ns。

Single reflection modeの測定結果を図2.5に示す。本モードは多くのカウントが検出されたため、真空チャンパーに気体を導入せず、残留ガスを測定した。本測定のカウントレートは0.6counts/sであった。

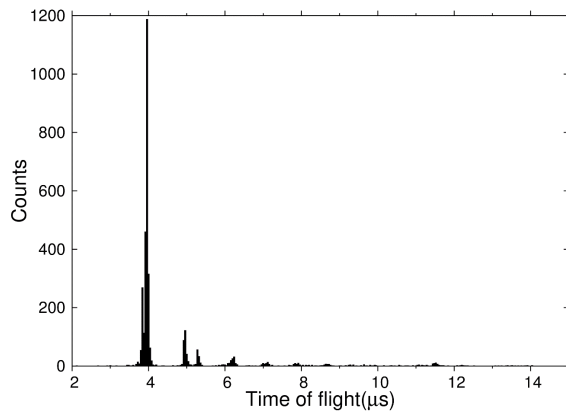


図 2.5 Single reflection modeの測定結果。測定時間90分、チャンパー圧力 4.4×10^{-5} Pa、ビン幅40ns。

Spare modeの測定結果を図2.6に示す。本モードはTriple reflection modeと同様カウントレートが非常に小さく、チャンパー内残留ガスの測定が行えなかった。カウントを増やすため、二酸化炭素ガスと窒素ガスをチャンパー内に導入して圧力を上げ測定を行った。本測定のカウントレートは1counts/sであった。

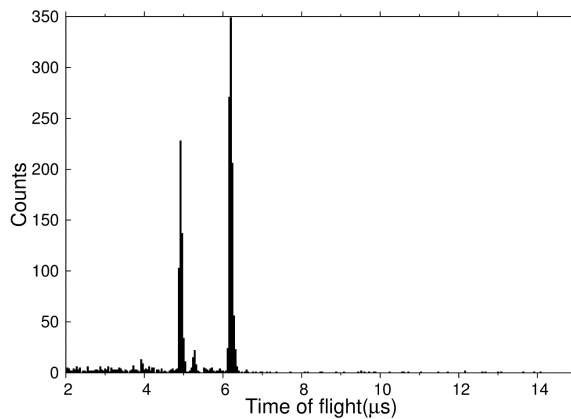


図 2.6 Spare modeの測定結果。測定時間30分、チャンパー圧力 1.0×10^{-3} Pa、ビン幅40ns。

図2.4 -図2.6に示した、各モードの質量分解能を表2.1に示す。

表 2.1 性能試験の結果得られた各モードの質量分解能

	質量(amu)	飛行時間(μs)	半値全幅(ns)	質量分解能
Triple	28	10.24	40	>120
Single	18	3.96	40	>50
Spare	28	4.92	80	>25

半値全幅で質量分解能を評価すると表2.1に示す質量分解能を達成することができたが、実際にはマスペクトルのピークの裾野の高質量側への広がりのために、存在量の差によっては隣の質量数の粒子同士の分離が困難になる可能性がある。月極域探査用の質量分析器を例にして、水と水酸基の分離に関して、どの程度の存在量の差まで $m = 17, 18$ amuを分離できるかを評価した。Triple reflection modeはカウントレートが低く、真空チャンバーに気体を導入して計測を行わざるを得なかったため、チャンパー壁面等の吸着水を検出することができなかった。そこで、 $m = 17, 18$ amuのピークの形状を図2.4のTriple reflection modeの28 amuのピークと同一であると仮定し、それぞれの存在量を定数倍することで、どの程度の存在量の差まで $m = 17, 18$ amuを分離できるかを調べた。図2.7に $m = 17$ のイオンの存在量に対する $m = 18$ のイオンの存在量の比が100倍の時のマスペクトルを示す。

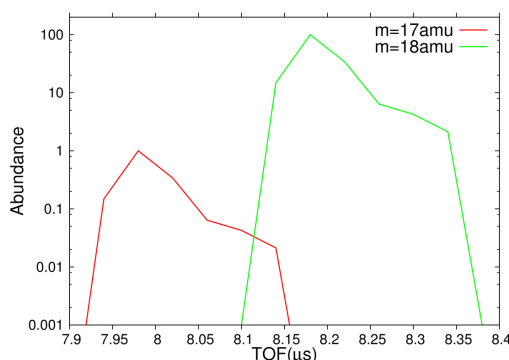


図 2.7 $m = 17, m = 18$ のピーク形状を図2.4の28 amuのピークと同一であると仮定した場合のマスペクトル。存在量に対する $m = 18$ のイオンの存在量の比が100倍の場合。縦軸の存在量は $m = 17$ のピークの存在量を1とした場合の値である。

図2.7より100倍程度の存在量の差まで完全に分離できることが分かる。ただし実際には、測定時間を長くとりカウントを増やすと、ピーク形状の仮定に用いた図2.4の28 amuのピークではカウントが見られなかった飛行時間に、裾野が見えるようになる可能性があるため、今後もう少しカウントを積算して調べてみる予定である。

3. 結論

2018年度に製作した多反射リフレクトロン型質量分析器テストモデルの特性取得試験を実施し、3回反射モードで質量分解能120以上の性能を確認することができた。しかしながら、マスペクトルのピークの裾野の高質量側への広がりのために、存在量の差によっては隣の質量数の粒子同士の分離が困難になる可能性がある。今後は、このマスペクトルのピークの裾野の高質量側への広がりの原因を明らかにして質量分析器の性能を上げるとともに、固体物質をヒーターで加熱して気化する部分あるいはレーザービームで気化する部分の開発を進めることで、ヒーター加熱あるいは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できる見込みである。