

論文審査の結果の要旨

氏名 横田 勝一郎

本論文は月周回探査機「セレーネ」に搭載されるイオンエネルギー・質量分析器の開発をまとめたものである。月は固有磁場や大気を持たないので、その表面は太陽風に晒されている。太陽風は月面に吸収され、反太陽側にはウェイクが形成されていると単純に考えられていたが、最近の月周回探査機の磁場と電子観測によって衝撃波の存在が観測され、局所的な月残留磁場によるミニ磁気圏の存在が示唆されている。一方、最近の地上観測から、ナトリウムを主成分とする希薄大気が存在が明らかになり、その成因のひとつに太陽風のスパッタリングによる月面からのガス放出が考えられている。その一部にはイオンが存在し、また、中性ガスの光電離によってもイオンが生成され、太陽風にピックアップされる。月周回探査機の軌道はイオン生成場所から離れているが、観測されたイオンのエネルギーと到来方向から粒子軌道をバックトレースすることによりその生成場所を探ることが可能である。これら月起源のイオンは表面の元素組成を反映しており、地上の実験室における 2 次イオン質量分析法 (Secondary Ion Mass Spectrometry : SIMS) と同様な情報を提供する。このように、月周辺におけるイオン観測は太陽風と月の相互作用や月面組成の研究において非常に重要な情報をもたらすと期待されるが、これまで皆無に等しい。

上記の科学目的の達成にはイオンの 3 次元エネルギー分析と質量分析を同時に行う必要があり、且つ、月起源の重イオン同定のために高い質量分解能が要求される。また、セレーネは 3 軸姿勢制御の探査機であり、3 次元分布関数の計測のために磁気圏プラズマ観測で多用されている衛星スピンによる角度掃引ができないので、自らで角度掃引する機能を持つ必要がある。さらに、太陽風と希薄な月起源のイオンを同時に計測するために非常に広いダイナミックレンジも要求される。これら全ての機能を持つイオン観測装置は世界的にも初めてであり、しかも、探査機搭載という限られたリソースに適合させる必要がある。

全体は 5 章から構成されており、第 1 章では、月周辺のプラズマ環境を概観するとともに、過去の衛星搭載イオンエネルギー・質量分析器をレビューし、新規開発の必要性を述べている。

第 2 章では、開発に成功したイオンエネルギー・質量分析器の要求性能と全体構成、設計原理、実際に設計・製作された分析器の較正実験結果をまとめている。本観測装置のセンサーは、入射角掃引電極、感度制御電極、球形静電エネルギー分析器、飛行時間型速度分析器、検出器から構成されている。この複雑な構成のセンサーの設計では、テスト粒子シミュレーションを用いた手法により各要素の最適な電極形状が決定され、要求性能を十分に満足することが示されている。具体的には、 2π ステラジアン の立体角をカバーするとともに $\text{約 } 5^\circ \times 5^\circ$ に分解可能であること、2 桁にわたる感度制御が可能であること、等である。また、高い質量分解能を得るため、超薄膜カーボンと線形的に変化する電場構造 (Linear Electric Field : LEF) を用いた飛行時間計測法を採用している。その特徴は、反射型 LEF におけるイオン飛行時間が入射エネルギー・角度によらずイオンの質量/電荷量の比のみで決まることであり、通

常のドリフト時間計測法に比べて格段に高い質量分解能を得ることができる。これらの性能は実際に製作されたセンサーにイオンビームを照射することにより実験的にも確認された。なお、飛行時間計測部に使用されている超薄膜カーボンは、イオン通過の際に放出される 2 次電子を飛行時間計測のスタート信号として得るために使用されている。超薄膜 (約 50 Å) とはいえ、月起源の重イオンの透過度を高めるためには 15keV まで加速する必要があり、反射電位と併せて ±15kV という高圧が電極に引加される。そのため、放電や偽スタート信号の原因となる電子の電界放出の防止が必須であり、特別の対策が施された。

第 3 章は検出器の新規開発をまとめたものである。検出器はマイクロチャネルプレート (MCP) とアノードで構成されており、新規開発のポイントはアノードにある。本観測装置では、飛行時間計測部のスタート信号である電子の放出位置を入射角の情報としても使用しているため、位置検出とスタート信号検出の両面を成立させる必要がある。このような場合、従来はディスクリットアノードが使用されているが、アノード毎にプリアンプと信号処理回路が必要になる。一方、位置検出だけであれば、抵抗体アノードの使用により 2 つのプリアンプと信号処理回路で高い位置分解能が得られるが、時間計測の分解能仕様 (1ns) を満足させることができない。そこで、本検出器では、MCP と抵抗体アノードの間にスタート信号検出用のメッシュアノードを設けた。十分な強度のスタート信号の検出を可能とし、且つ、容量性結合の影響などによる位置検出誤差を低減するためのメッシュの位置や透過度、電位配分が問題であったが、実験的に最適の位置を求めて、所定の性能を持つアノードの開発に成功している。

第 4 章では、本論文で開発されたイオンエネルギー・質量分析器が遠隔 SIMS として月面の元素組成の研究にどの程度の貢献が可能かを評価している。冒頭にも述べたように、月起源のイオン観測の例は皆無に等しいので、太陽風のスパッタリングによる月岩石からの 2 次イオン放出率と希薄大気的光電離によるイオン生成率を推算し、生成されたイオンの太陽風中の磁場・電場における軌道運動を計算するテスト粒子シミュレーションによりピックアップイオンのフラックスを算定した。その結果、本観測装置は月面研究のために十分な空間分解能で月起源イオンの計測が可能であることが示されている。

第 5 章では、新規開発されたイオンエネルギー質量分析器の開発を総括し、月周辺のプラズマ環境および月面研究への貢献に対する将来展望を述べている。

以上、本論文は、きわめて新規性の高いイオンエネルギー質量分析器の開発をまとめたものであり、開発された観測措置は月周回探査機「セレーネ」に搭載される。本論文の成果は将来の月・惑星探査において大きな貢献が期待されるものであり、博士 (理学) を与えるに十分な内容であると認められる。なお、本論文の内容は、斎藤義文氏、浅村和史氏、向井利典氏との共同研究であるが、論文提出者が主体となって行ったものであり、論文提出者の寄与が十分であると判断される。

したがって、博士 (理学) を授与できると認める。