

平成23年 3月29日現在

研究種目：基盤研究(B)
 研究期間：2007年度～2009年度
 課題番号：19340144
 研究課題名（和文） 電離圏イオン観測用高時間分解能イオン質量分析器の開発
 研究課題名（英文） Development of high time resolution ion mass spectrometer for ionospheric ions
 研究代表者
 早川 基 (HAYAKAWA HAJIME)
 独立行政法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究本部・教授
 研究者番号：90167594

研究成果の概要（和文）：

極域電離圏におけるイオン流出現象のメカニズムを解明するためには、電離圏下部で熱的なエネルギーを持つ各イオン種がそれぞれどのような過程で非熱的なエネルギーを獲得するかを明らかにすることが重要である。本研究では、イオン流失に関わる超熱的イオンを観測する衛星搭載用イオン質量分析器の開発と、その較正試験に必要な超熱的イオンのエネルギーを制御できる新しい低エネルギーイオンビーム発生装置の開発を行った。

研究成果の概要（英文）：

To know how the respective ion species of thermal energy in the lower ionosphere obtain nonthermal energies is especially important for the understanding of the ion escape mechanisms in the polar ionosphere. We have developed a space-borne ion mass spectrometer for observations of the suprathermal ions related to the ion escape. In addition, we newly developed a low energy ion beam generator because ions of suprathermal energy are required for the laboratory calibration of the ion mass spectrometer.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
平成19年度	3,700,000	1,110,000	4,810,000
平成20年度	8,100,000	2,430,000	10,530,000
平成21年度	1,600,000	480,000	2,080,000
年度			
年度			
総計	13,400,000	4,020,000	17,420,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・超高層物理学

キーワード：電離圏、イオン、質量分析器、飛行体搭載

1. 研究開始当初の背景

最近の人工衛星による観測から、地球大気の上層部から1日当たり数百トンもの水素・ヘリウム・酸素などの原子イオンが流失

している事実が明らかになった。これらのイオン流出現象のメカニズムを解明するために特に重要なのは、電離圏下部で熱的なエネルギーを持つ各イオン種がそれぞれどのよ

うな過程で非熱的なエネルギーを獲得するかを明らかにすることである。研究代表者らは、カナダの衛星に搭載した中性気体質量分析器の開発過程で、この測定器を改良することでイオン質量分析器として応用できることに着目した。また、その開発には実験室で超熱的エネルギーを持つイオンを作り出す必要がある。

2. 研究の目的

(1) 超熱的エネルギーを持つ各種イオンを照射できるようなイオンビーム発生装置を新たに開発することと、(2) (1) で発生させた超熱的イオンを高時間分解能で分析できる性能を持ち、かつ衛星に搭載可能な耐環境性を持ったイオン質量分析器を新たに開発すること、の2つが本研究の目的である。

3. 研究の方法

本研究では、以下の2つの開発を並行して進めた。

(1) 低エネルギーイオンビーム発生装置の開発：

熱的イオンを電界で加速させる従来型のイオンビーム発生装置では、イオンの加速エネルギーに熱的エネルギー程度のばらつきが避けられない。そこで、数 eV 以下の超熱的エネルギーのイオンビームを発生させるために、中性気体のビームを発生させた後に電離してイオンビームとする、新しい低エネルギーイオンビーム発生装置の開発を目指した (図1)。

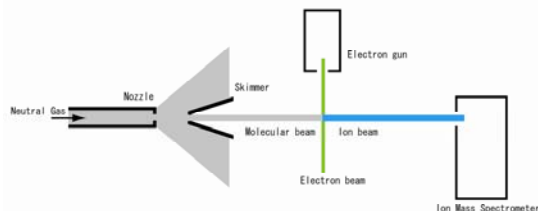


図1. 低エネルギーイオンビーム発生装置の概略図

当初の計画では、モンテカルロ直接法 (DSMC 法) を用いて、気体分子流の数値シミュレーションを行って装置を設計する予定であったが、研究を進めるうちにこの手法では期待した密度と速度を持つビームが得られないことと、計算時間がかかりすぎるのがわかった。

そこで、超音速気体分子ビーム発生法の理論を用いて装置を設計し、製作したイオンビーム発生装置の性能評価には、所属機関である宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究本部の真空チャンバーを用いて試験を行った。このチャンバーは中性質量分析器の開発に用

いた設備を再利用して、イオンビーム発生装置用にチャンバーを一部改修した。

発生したビームのイオン化には、新たにワイヤフィラメント型の電子銃を開発して用いた。

(2) 高時間分解能イオン質量分析器の開発：

研究代表者らのグループで開発してきた中性気体質量分析器では、入射する中性気体を電子銃部で電子ビームによってイオン化した後、分析部の電極にかける電圧をスイッチングして飛行時間法 (TOF 法) を用いて質量分離し、各気体種の2次元速度分布を検出部のマイクロチャンネルプレート (MCP) で検出する。MCP で検出されたイオンは電子電流に変換・増倍され、MCP の背面からレジスタ型アノードに流れ込んだ後、四隅の端子に電気信号として出力される。この端子間の出力の比から検出イオンの位置、すなわち速度が測定できる。この速度から衛星の速度を差し引けば、中性気体粒子の速度が得られる。

中性気体質量分析器では、中性気体粒子だけを測定するために、同様に入射してくるイオンはイオンリペラーを用いて反射している。そこで、中性気体質量分析器からイオンリペラーと電子銃を取り外せば、今度は逆にイオンだけを測定し、中性気体は分析部を通過して排出させることができる。

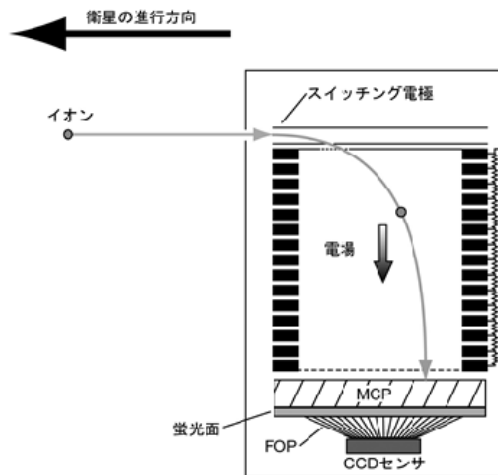


図2. イオン質量分析器の概略図

しかし、中性気体質量分析器では中性気体を電子ビームでイオン化する効率が低いので、一個一個のイオンの位置検出が可能だったが、イオン質量分析器では電離圈イオンが比較的大量に入射してくるため、カウンティング可能な時間分解能は達成できない。それを克服するため、MCP で増倍された電子電流を蛍光面で発光させ、その2次元像を円錐型のファイバオプティカルプレート (FOP) に

よって歪みを抑えつつ縮小して CCD センサに伝達する検出器を考案した。質量分析については、MCP を高速ゲート動作させることで TOF 法によって分離する (図 2)。

MCP と蛍光面および FOP の組み合わせは、イメージ・インテンシファイア (I・I) と呼ばれる映像増強管から一段目の光電面を除けば、ほぼ同一のものである。I・I は CCD センサの前段に配置されて、微弱光の画像測定に広く用いられている。

当初の計画では、円錐型の FOP を使用する予定であったが、円錐型の FOP はまだ開発途上にあり、実用に耐えられる製品は存在しないことがわかった。そこで、従来から実績のある縮小のない円筒型 FOP を使用し、その代わりに面積の大きな CCD センサを用いる方針に変更した。その結果、円錐型 FOP の使用に伴う耐環境性能の試験は省略することにした。

4. 研究成果

本研究により、以下の成果が得られた。

(1) 低エネルギーイオンビーム発生装置の開発 :

中性ガスビームを制御するためのノズルおよびガス導入システムの設計と製作を行った (図 3)。

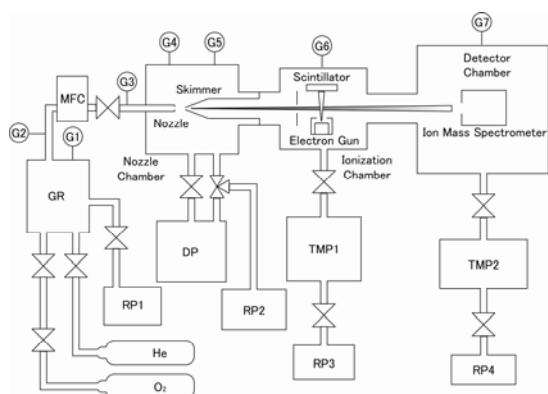


図 3. 低エネルギーイオンビーム装置の概略図

この装置では、ガスリザーバー (GR) に窒素・酸素・ヘリウム等のガスを導入し、混合比を調整する。質量が軽い気体ほどビーム速度が速くなるため、混合比によって速度を調整することができる。ノズル内の気体圧力はマスフローコントローラー (MFC) によって調節可能で、ノズル内圧力における気体の平均自由行程よりもノズルの穴径を十分に小さくすることでノズルから超音速気体分子ビームが噴出する。これをスキマーによって絞り、さらにスリットを通した後に電子ビームを照射してイオン化する。ワイヤフィラメント型電子銃によってシート状の電子ビームを発生することで、気体分子ビームと交差

する断面積を増やしてイオン化の効率を上げる工夫を行った。

ノズルからの流量と残留圧力から推測して気体分子ビームが超音速となる条件を十分に満たしていることを確認した。この気体分子ビーム発生装置とイオン化用電子銃システムとのアライメントを調整して、低エネルギーイオンビームを発生させる実験を行った。後述するイオン質量分析計の検出器部のみを取り出してイオン検出器として用いて測定し、期待通りイオンビームが生成されていることも確認した (図 4)。

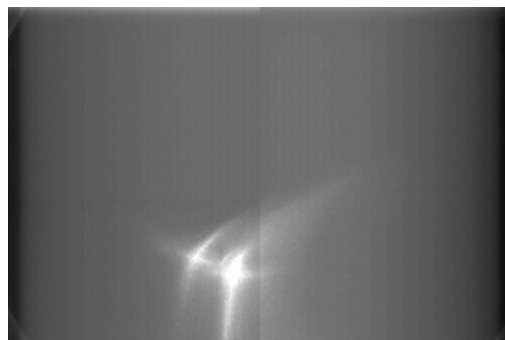


図 4. 検出されたイオンビームの画像

図 4 は本来のイオン質量分析計の位置より約 2m 後方で検出した画像であるが CCD の有効視野である 36mm×24mm の範囲にほぼ収まっており、極めて収束性の高いイオンビームの生成に成功したと言える。

(2) 高時間分解能イオン質量分析器の開発 :

電離圏イオン観測用高時間分解能イオン質量分析器の検出部を設計・製作した。低エネルギーイオンビーム発生装置を取り付けた真空チェンバーにこの検出部を設置し、図 4 にも示した通り、イオンビーム発生時に CCD カメラで検出されることを確認した。

前述のように、円錐型 FOP を用いることで初段の MCP の検出面積を CCD 視野に対して数倍にすることは、現時点では難しいことがわかった。しかしながら、CCD 画素数の大型化により、4000×2672 画素という非常に大きな画素数を持つ CCD センサを採用することで位置分解能を稼ぐことができた。

本研究により開発した低エネルギーイオンビーム装置と高時間分解能イオン質量分析器は、今後の電離圏流出イオン観測に大変有効である。

本研究の目的は地球電離圏から磁気圏に流出していくイオンを観測する装置を開発することであったが、この開発により、地球以外の惑星における電離圏イオンの観測にも利用できる環境が整った。例えば、現在日本で計画されている火星大気散逸観測ミッ

ションにおいて、太陽風との相互作用によって火星電離圏から流出する低エネルギーイオンを観測する測定器を提案中であるが、複数の測定器が本研究で開発した装置を使用することが検討されている。このように本研究の成果は、広く地球・惑星電離圏観測にインパクトを与え初めている。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計0件)

[学会発表] (計4件)

① 栗原宜子, 栗原純一, 早川基, 惑星電離圏イオン質量速度測定器と低エネルギーイオンビーム発生装置の開発, 第11回宇宙科学シンポジウム, 2011年1月6日, 独立行政法人宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所.

② Yoshiko Koizumi-Kurihara, Junichi Kurihara, Hajime Hayakawa, Development of an ion mass spectrometer for measurements of ionospheric suprathermal ions, COSPAR Scientific Assembly 2010, 22 July 2010, Bremen Exhibition & Conference Center, Germany.

③ 栗原宜子, 栗原純一, 早川基, 衛星搭載型電離圏イオン質量分析器の開発, 日本地球惑星科学連合2010年大会, 2010年5月26日, 幕張メッセ国際会議場.

④ 栗原宜子, 栗原純一, 早川基, 衛星搭載型電離圏イオン質量分析器の較正試験用低エネルギーイオンビーム発生装置の開発, 第10回宇宙科学シンポジウム, 2010年1月7日, 独立行政法人宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究本部.

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

○取得状況 (計0件)

[その他]

特になし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

早川 基 (HAYAKAWA HAJIME)

独立行政法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究本部・教授

研究者番号: 90167594

(2) 研究分担者

阿部 琢美 (ABE TAKUMI)

独立行政法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究本部・准教授

研究者番号: 40255229

栗原 宣子 (KURIHARA YOSHIKO)

独立行政法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究本部・研究員

研究者番号: 10444423

(3) 連携研究者

栗原 純一 (KURIHARA JUNICHI)

北海道大学・大学院理学研究院・博士研究員

研究者番号: 50392816