

平成 30 年 6 月 5 日現在

機関番号：82645

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H03735

研究課題名(和文) 超熱的プラズマ粒子観測装置による新たな地球磁気圏観測

研究課題名(英文) Development of a supra-thermal ion energy-mass spectrometer for planetary magnetospheric missions

研究代表者

浅村 和史 (Asamura, Kazushi)

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・助教

研究者番号：50321568

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,100,000円

研究成果の概要(和文)：地球惑星磁気圏における 0.1eV - 100 eV のエネルギー範囲の粒子観測を念頭に、イオンエネルギー質量分析器を開発した。機器設計では、エネルギー分析部の極板形状・配置を工夫するとともに、質量分析技術として用いられてきた飛行時間分析法を改良した。その結果、小型形状を実現しつつ、感度を大きく損なわないセンサー形状を得た。次に、観測器を製作し、イオンビーム照射を行った。その結果、エネルギー分解能、角度分解能、質量分解能とも設計に即した性能を有することを確認した。また、紫外線照射を行い、1AU(太陽-地球間距離)における太陽紫外線強度で紫外線が観測器に直入射しても問題ないことを確認した。

研究成果の概要(英文)：A supra-thermal ion energy-mass spectrometer has been developed in order to measure ions with energies from 0.1eV to 100eV in a planetary magnetosphere in future. Shape and location of electrodes in an electrostatic energy analyzer were designed with numerical simulations. A time-of-flight (TOF) technique is used for mass analysis. As a result, a small instrument, but with high sensitivity has been obtained successfully. Testings with ion beam irradiations show that the sensor characteristics for energy, angular, and mass resolutions agree with the results of the numerical simulations. Also, a testing with ultraviolet photon irradiation show that the photon rejection capability of the sensor is enough.

研究分野：地球惑星磁気圏

キーワード：粒子観測器 地球惑星磁気圏 機器開発

1. 研究開始当初の背景

地球のように固有磁場をもつ惑星には太陽風との相互作用により磁気圏が形成され、オーロラや放射線帯の形成・消失、磁気嵐の生起など様々なプラズマ現象が起こっている。また、たとえば地球の場合、低高度域に形成される電離圏から酸素イオンなどの低エネルギー重イオンが磁気圏に広く供給されている。これらの重イオンは太陽風の主構成粒子である水素イオン、ヘリウム二価イオン (He^{++}) とは質量、エネルギー帯が異なっており、磁気嵐の発達や回復などのグローバルなプラズマ現象に大きな影響を与えているものと考えられている。なお、惑星低高度域から磁気圏への重粒子供給は地球に限られたものではなく、固有磁場を持ち、大気が希薄な天体 (水星、ガニメデ (木星の衛星) など) であっても磁気圏プラズマ粒子が天体表面に直接降りこみ、表面構成物質をたたき出す過程 (スパッタリング過程) などによって重粒子が供給されていると考えられている。しかしその一方で、磁気圏に流出する重粒子は初期エネルギーが非常に低く、観測が容易ではないことから、流出初期段階の観測に限られており、流出過程は未だ解明されていない。なお、Cluster 衛星の観測により、地球から 5-19 R_E (R_E : 地球半径) 程度離れた領域でも数 eV 程度以下のプラズマ粒子が存在していることが報告されている。このことは流出初期の地球近傍領域だけではなく、磁気圏に広範にわたって磁気圏の典型的エネルギーにまで加速されていないプラズマ粒子が存在していることを示唆しており、その理由は分かっていない。

また、地球・惑星磁気圏内には、MeV レンジに達する高エネルギー粒子を豊富に含む領域が存在する。高エネルギー粒子が存在すると、センサーの壁を突き抜けることでノイズとして低エネルギー粒子観測器に検出されてしまう。このことも、低エネルギー粒子に関する観測データが限定的にしか得られない理由の一つである。

2. 研究の目的

本研究では、0.1 - 100eV の超熱的-低エネルギー帯をターゲットとしたイオンエネルギー質量分析器の開発を行う。

地球電離圏からのイオン流出でプラズマ粒子が流出に必要なエネルギーを得るためには、プラズマ粒子が磁力線垂直方向に加速・加熱され、高度が高くなるとともに磁場強度が弱まることによる磁気ミラー効果で磁力線平行方向の速度を得る過程が重要と考えられている。密度が低く、粒子同士の衝突がほとんど起こらない磁気圏・電離圏内で磁力線垂直方向にイオン加速を行う過程としては、電磁イオンサイクロトロン (EMIC) 波動などのプラズマ波動とプラズマ粒子と

の波動粒子相互作用などが考えられる。これらのプラズマ波動は背景プラズマ粒子の粒子種 (質量) とその構成比によって加速効率が異なるため、イオン種を区別し、加速途中から加速後のエネルギー帯をカバー・弁別した観測が重要となる。

このため、本研究では、単に超熱的エネルギー帯 (~10eV 程度以下) をカバーしたイオン分析器の開発を行うのではなく、エネルギー、粒子種、到来方向を弁別可能なイオンエネルギー質量分析器を開発する。この時、背景高エネルギー粒子起源のノイズの除去に留意し、高放射線環境下であっても信頼性の高い観測が可能な観測器とする。

3. 研究の方法

観測手法の選択

エネルギー分析、及び方向弁別にはトップハット型静電分析器を用いることとする。トップハット型静電分析器は比較的感度が高く、また、原理的には 360 度の平面上の視野を持つために、人工飛行体のスピン運動を利用して全到来方向をカバーすることが可能である。また、視野を人工飛行体の運動方向に向け、RAM 方向を観測するモードとした場合、RAM 方向からの角度分布を得ることも可能となる。

質量分析は従来の低エネルギーイオン質量分析器などで実績を有する飛行時間分析 (Time Of Flight; TOF) 法を採用する。TOF 法は入射粒子に超薄膜カーボンを通して、その際にたたき出される二次電子と通過粒子そのものを別々に検出 (START 信号、STOP 信号と呼ぶ) し、その検出時間差から粒子の速度 v を計測する方法である。本研究で採用する TOF 法では、エネルギー分析部によってエネルギー (実際はエネルギー・電荷の比 E/q) が分かっている粒子が入射した場合、 M/q (質量電荷比) を導出することができる。TOF 法では START、STOP の 2 信号が一定時間以内に出現することが必要となるが、背景高エネルギー粒子によるノイズは START 信号または STOP 信号のみ出現することがほとんどである。したがって、このような TOF 法の性質を利用し、ノイズカウントを効率的に除去することが可能となる。

機器設計

機器設計は計算機シミュレーションを用いて行う。本観測器は、静電場による粒子軌道偏向が粒子のエネルギーに依存することを用いてエネルギー分析及び飛行時間分析を行う。このため、シミュレーション空間内に電極を構成し、電位を与えた状況で極板間電位分布を解き、入射粒子の軌道追跡を行うことで観測器の粒子通過特性を取得する。このシミュレーションを繰り返すことで電極配

置の最適化を図ってゆく。

機器の製作

JAXA 宇宙科学研究所では極域カスプ領域におけるイオン流出現象の解明を目的として観測ロケット SS520-3 を打ち上げる予定である。本観測器は SS520-3 に搭載されることとなったため、観測ロケットに搭載可能な機械的、電気的インターフェースを持つような機器設計とする。なお、計算機シミュレーションを行う際、組み上げ性や電極固定用のねじ位置、大きさなどを詳細に考慮することは困難であるため、製造図面を描く際に十分に考慮する。

観測器性能評価

観測器製造後、真空チェンバーにてイオンビームを照射し、エネルギー分解能、角度分解能、質量弁別性能などを確認する。また、本観測器は検出器に MCP (マイクロチャンネルプレート) を使用するが、MCP は紫外線にも感度を持つ。本観測器は将来の人工飛行体搭載に向けて小型高感度化を図っており、電極間隔が広がっている。このため、対策をとらない場合には光子が比較的検出器に到達しやすい構造となってしまう。本観測器では紫外線除去対策として電極の黒色化処理やバッフル構造の作り込みを行っており、その性能評価のために重水素ランプによる紫外線照射試験を行う。

4. 研究成果

製作を行った観測器のセンサー部を図 1 に示す。黄土色で電極が描かれている部分がエネルギー分析部、その下の銀色の部分が TOF 部、さらにその下の緑色の部分は検出器及び電子回路部の一部である。入射粒子の軌道例を黒線で、超薄膜カーボンからたたき出された二次電子の軌道例を黄線で示している。

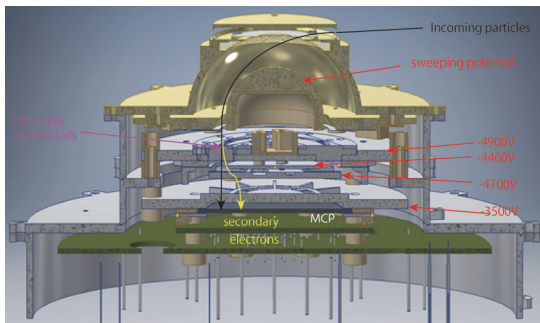
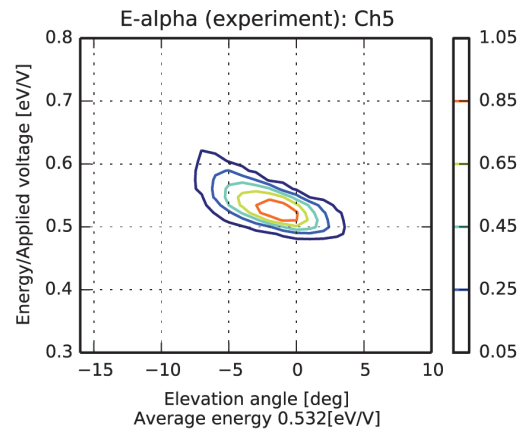


図 1: 製作した観測器の断面図

観測器を製作後、イオンビーム照射試験、紫外線照射試験によってその性能を確認した。図 2 にイオンビーム照射試験によって得た本観測器の粒子通過特性を示す。本観測器は 10% (FWHM) 程度 (@100eV) と十分なエネ



reffile: 170818\Hep100_ch5_d.000, 170818\Hep100_ch5_d.154

図 2: 100eV の He⁺ ビーム照射によって得られたエネルギーと入射粒子仰角に対する観測器応答。青、淡青、シアン、黄、橙線はそれぞれ最大感度に対して 5、25、45、65、85% のレベルを示す。

ルギー分解能を持っていることが分かる。

図 3 は 100eV/q のエネルギーで様々なイオン種を照射することによって得た飛行時間分析結果である。H⁺、He⁺、He²⁺、N²⁺、O⁺、N₂⁺ が分離できている。なお、N⁺ と O⁺ は分離できていないが、今回の TOF 部では N⁺ と O⁺ を分離する設計とはしておらず、問題ない。

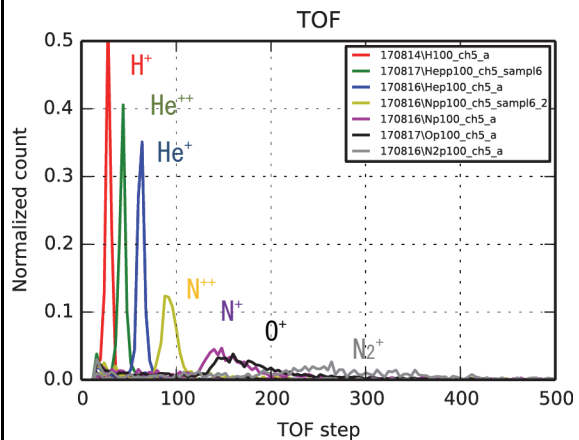


図 3: 100eV のイオンビーム照射によって得られた飛行時間分析結果。1 TOF step = 0.78ns である。

次に、重水素ランプによって紫外線を観測器に照射した結果を図 4 に示す。この時、光子照射強度は 1AU (太陽-地球間距離) における太陽紫外線 (H-Lyman α : 121.6nm) フラックス程度が観測器に照射される実験コンフィギュレーションとしている。図 4 から、紫外線によるノイズカウントは太陽光が直接観測器に入射する場合でも角度セクター (30 度) あたり 40 [/s] 程度であることが分かる。TOF 法では 2 種類の信号 (START 及び STOP 信号) がある一定時間内 (本観測器の

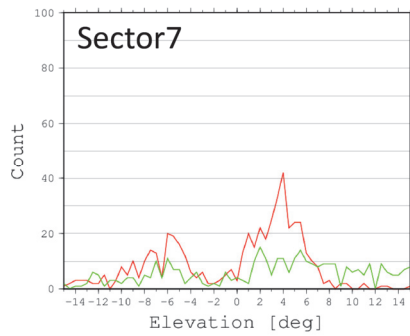


図 4: 重水素ランプによる紫外線照射結果。横軸は観測器に光子が入射する際の仰角。

場合は 400ns 程度以内) に検出される必要がある。光子 1 個では、検出される場合でもどちらか一方の信号しか検出されないと考えられるため、入射イオンとして誤検出される場合は他の要因によって他方の信号も検出された時となる。このレートは確率的に決まるが、仮に 2 種類の信号のカウントレートがそれぞれ 40 [1/s] であった場合、本観測器におけるノイズカウントレートは 0.00062 [1/s] となり、十分低い。

観測器を製作し、性能試験を行った結果、本観測器は設計に即した性能を持つことが分かった。

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 2 件)

①

須藤雄志、浅村和史、齋藤義文、人工飛翔体搭載用熱的・超熱的イオン分析器の開発、SGEPSS, 2016.11.19-23

②

須藤雄志、浅村和史、齋藤義文、人工飛翔体搭載用熱的・超熱的イオン分析器の開発、日本地球惑星科学連合 2016 年大会, 2016.5.22

[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]

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

浅村 和史 (ASAMURA, Kazushi)

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・助教

研究者番号：50321568

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし

(4) 研究協力者

なし