

2013 年度スペースプラズマ共同利用報告 熱-低エネルギー帯プラズマ粒子分析器の開発

浅村和史、齋藤義文、横田勝一郎、笠原慧(宇宙研)

1. 目的

地球・惑星磁気圏においては太陽風が物質・エネルギーの主たる流入源となっている。しかし、地球磁気圏、特に放射線帯には、物質の供給源である太陽風の構成プラズマに対し桁違いに高い、MeV レンジに至るエネルギーをもつ粒子が存在する。これらの粒子は安定的には存在しておらず、磁気嵐に伴ってフラックスが大きく変動していることから、地球磁気圏において効率的な粒子加速機構、及び消失機構が発動していることを示している。しかし、このような高エネルギー粒子の生成・消失過程については諸説あるものの未だ解明されていない。

地球の放射線帯粒子の加速過程を説明する考え方には外部供給、内部加速の2説がある。外部供給説では、地球の夜側に位置するプラズマシート領域に存在する数 10keV 程度の電子が、地球近傍に位置する放射線帯に拡散で輸送され、同時に加速される。この場合、より磁場強度の高い領域への輸送に伴うベータトロン加速が実際の加速を担う。一方、内部加速説では放射線帯内部での加速を考え、プラズマ波動を介在させて低エネルギー側から高エネルギー側に運動量を輸送する。これはプラズマ波動の位相速度と共鳴した粒子が加速されるプロセスである。ここで、プラズマ波動による粒子加速は背景プラズマ密度に影響される。例えば、地球磁気圏において数-数 10keV の電子を加速可能と考えられているホイッスラー波動では、共鳴エネルギーは背景プラズマ密度の関数である。背景プラズマ密度を決める粒子は熱的粒子 (1eV 程度以下) であり、熱的粒子から加速前のエネルギー帯 (100keV 程度以下)、加速後のエネルギー帯 (100keV - MeV レンジ) まで幅広く観測することが、高エネルギー粒子生成過程の理解につながると考えられる。また、高エネルギー粒子生成過程の理解は地球にとどまらず、木星・土星など天体磁気圏に普遍的に存在する高エネルギー現象を解明するためにも重要である。

本研究では数 eV/q 以下から 100eV/q 程度以下、また、10eV/q - 25keV/q 程度のイオン質量分析器の開発を目標とし、要素技術を開発する。一方、ERG 衛星が 2015 年度の打ち上げを目指し、現在開発中である。ERG 衛星にはイオンエネルギー質量分析器として LEPI (10eV/q - 25keV/q) 及び MEPI (10keV/q - 180keV/q) が搭載される予定であり、現在 EM フェーズにある。我々は LEPI の開発を担当していることから、本年度は LEPI に対する技術開発を行った。

2. 観測原理

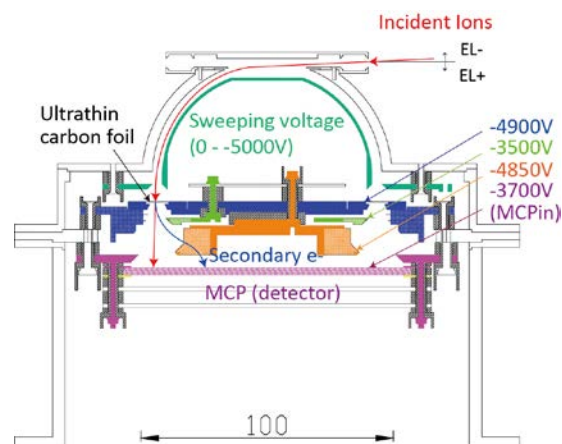


図 1: ERG LEPI センサー部 (試験モデル) の断面図。

LEPi は静電型エネルギー分析器の後段に質量分析部を配置した観測器である。図 1 に観測器センサー部(試験モデル)の断面図を示す。エネルギー分析部にはトップハット形状を採用しており、センサー単体ではほぼ 360 度の平面状の視野を確保可能な形状としている。このような視野形状の場合、観測器の搭載位置を工夫することで、衛星のスピン運動を利用して全方位 (4π str) をカバーすることが可能となる。なお、機器配置の制約上、実際には LEPi の周囲に他観測器が存在するなどの影響で視野干渉が発生している。この場合でも 180 度以上の視野を確保しており、全方位をカバーすることを可能にしている。

質量分析には飛行時間分析 (TOF: Time-Of-Flight) 法を用いる。LEPi では入射粒子に超薄膜カーボンを通わせ、通過時にたたき出された二次電子と入射粒子自体を検出し、その検出時間差から入射粒子の速度を導出する。前段のエネルギー分析部で入射粒子のエネルギー (実際にはエネルギー/荷電数) が分かっているため、速度を計測することで質量 (実際には質量/荷電数) を導くことができる。図 2 に LEPi の仕様を示す。

図 2: ERG LEPi の仕様

エネルギー範囲	0.01~25keV/q
視野範囲	290 度×5 度 (FWHM)
質量範囲	1~20AMU
エネルギーステップ数	32
エネルギー分解能	14% (FWHM)
角度分解能	5 度×22.5 度 (FWHM)
質量分解能	H ⁺ , He ⁺⁺ , He ⁺ , O ⁺
感度	$2.0 \times 10^{-3} \text{ cm}^2 \text{ sr keV/keV} / 22.5 \text{ deg}$

3. 実験内容

本年度は低エネルギー荷電粒子計測器較正装置を用い、試作した LEPi 試験モデルの粒子通過特性、質量分析性能、及び光子除去特性を取得した。計測セットアップを図 3 に示す。

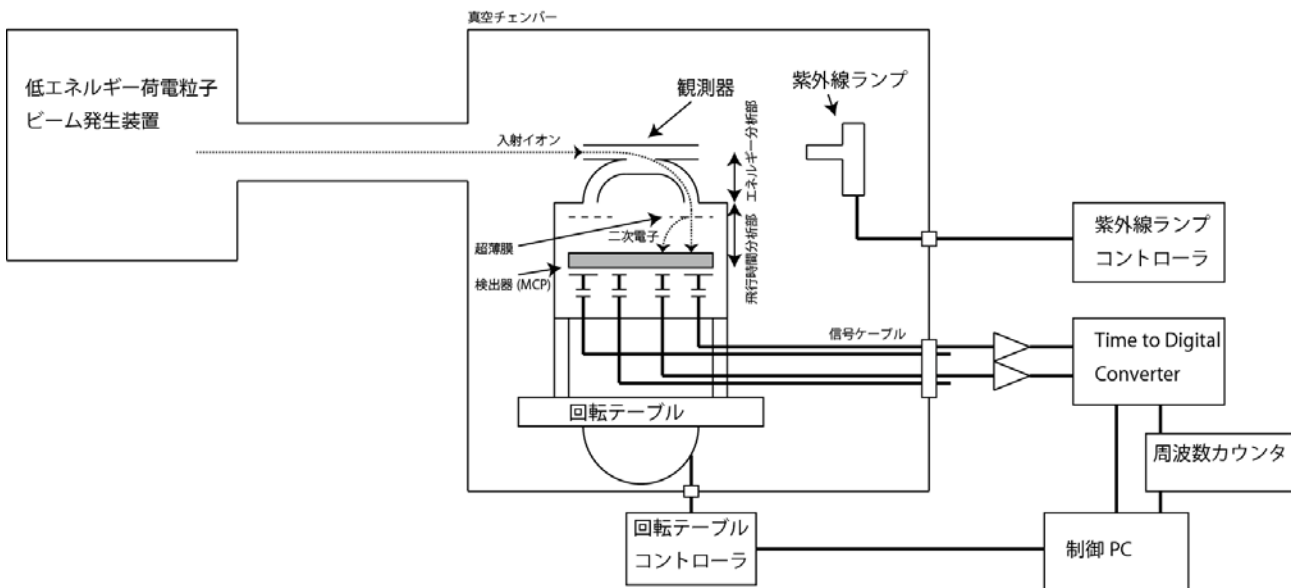


図 3: 低エネルギー荷電粒子計測器較正装置を用いた試験セットアップ

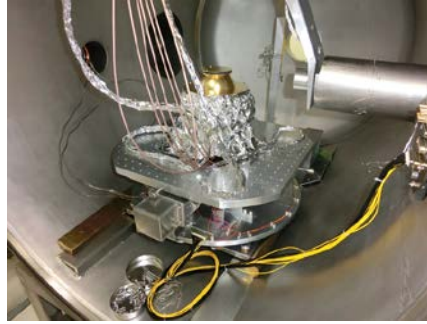


図 4: 試験セットアップ写真。真空引きした後、イオンビームは右手から照射される。

試験モデルは真空チェンバー外から制御可能な回転テーブル上に固定され、イオンまたは紫外線を照射される。このとき、観測器に照射されるイオンビームの強度・空間一様性などの変動を抑制するため、イオンビーム発生装置側の設定パラメータは粒子種・エネルギーを変更する場合以外は基本的に固定する。観測器の角度応答特性などは回転テーブルを用いて観測器側を回転させ、データを取得することで得る。

3.1 粒子通過特性

イオンビーム照射によって得られた粒子通過特性図 ($E-\alpha$ 図) を図 5(a) に示す。 $E-\alpha$ 図は入射粒子の入射角とエネルギーに対する観測器の感度分布を示す図である。図 5(b) は計算機シミュレーションによって得た特性であり、実験結果と良く一致していることが分かる。

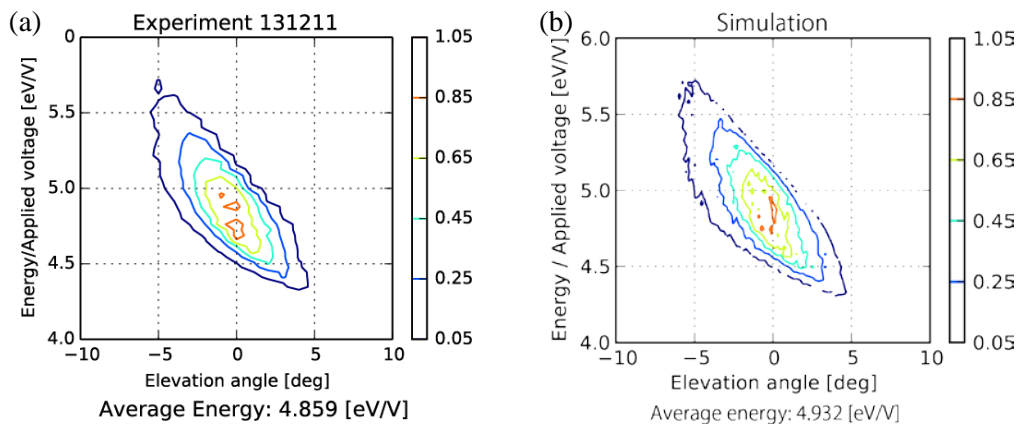


図 5: ERG LEPI 試験モデルの粒子通過特性。(a) 実験結果 (b) 計算機シミュレーション結果。

3.2 質量分析性能

H^+ , He^{++} , He^+ , N^+ , O^+ の各ビームを用いて得た飛行時間分析結果を図 6 に示す。エネルギーは $10\text{keV}/q$ 、 $2\text{keV}/q$ で固定し、イオン種毎に TOF 値を示している。粒子の飛行時間はエネルギーに依存するが、エネルギー分析部は時間的に極板印加電圧を変化させることによって広いエネルギー範囲をカバーしており、同一タイミングで飛行時間分析部に到達可能なエネルギー範囲は 14% (FWHM) 程度に制限されている。このため、入射エネルギー毎に飛行時間分布を比較している。図 6 を見ると、 $10\text{keV}/q$ 、 $2\text{keV}/q$ の場合とも H^+ , He^{++} , He^+ , O^+ の分離ができている。 N^+ と O^+ の分離はできていないが、明らかな差は見ており、統計的解析による分離は可能であろうと考えられる。なお、低エネルギー ($2\text{keV}/q$) イオン入射時に、特に重粒子において飛行時間分布の分散が大きくなっている。これは入射粒子が超薄膜カーボンを通過するときの角度散乱、エネルギーロス・分散の影響が低エネルギー・重粒子になるほど大きくなるためである。LEPI では観測器内で入射粒子に 4.9kV の加速を行って超薄膜カーボンに導いているため、入射粒子の超薄膜カーボン到達時のエネルギーは最低でも $4.9\text{keV}/q$ 以上ある。このため、 $2\text{keV}/q$ での実験結果は最低エネルギーに近い状況を示している。

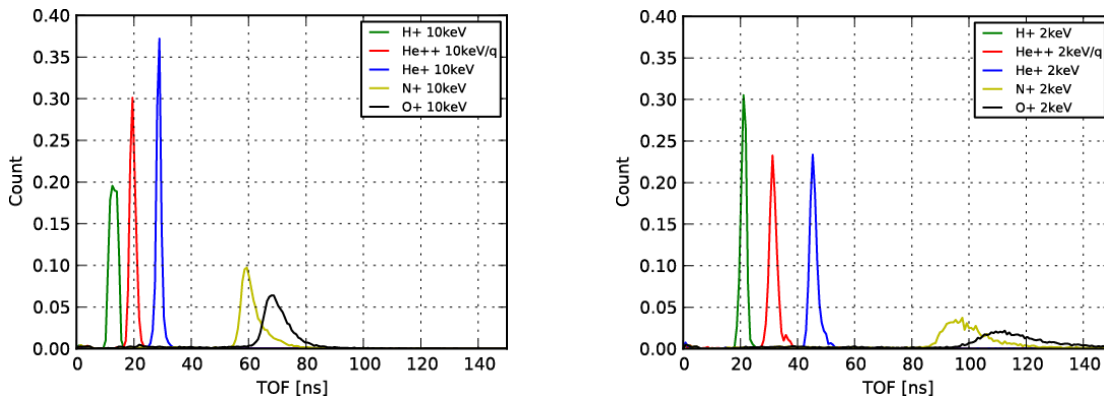


図 6: 飛行時間分析結果。

3.3 光子通過特性

LEPi が検出器に使用する MCP (マイクロチャンネルプレート) は紫外線にも感度を有している。一方、地球周辺において太陽起源の紫外線フラックスは Lyman- α 線で 3×10^{11} [1/s cm²] に及ぶ。このため、観測器には十分な紫外線除去特性を持つことが要求される。図 7 に重水素ランプを用いて観測器に紫外線を照射した際の応答を示す。光子の照射フラックスはほぼ 1AU における太陽紫外線強度に近いものと考えられる。図 7 から紫外線によるノイズカウントレートは太陽光が観測器内に直接入射した場合でも角度セクター(22.5 度)あたり 100 [1/s] 程度と考えられる。LEPi は飛行時間分析を行うが、飛行時間分析では 2 種類の信号がある一定時間内 (LEPi の場合は 150ns 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 100 [1/s] であった場合、LEPi ではノイズカウントレートは 0.0015 [1/s] となり、十分低い。

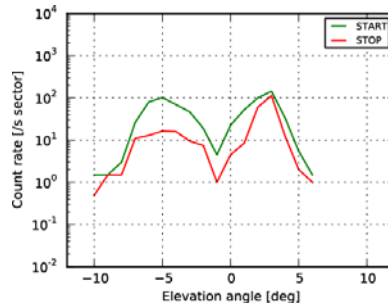


図 7: 重水素ランプによる紫外線照射時の観測器応答。

4. まとめ

試験モデルを用い、ERG に搭載が予定される LEPi (イオンエネルギー質量分析器) の開発を行った。粒子通過特性、質量分析性能、光子除去特性を実験によって取得したところ、実観測に供せる性能を持つことを確認できた。実際のフライト品などを使った性能確認試験はまだこれからであり、来年度以降進めてゆく。