

磁気圏探査に向けた 中間エネルギーイオン分析器の開発

東京大学大学院 理学系研究科 地球惑星科学専攻
笠原 慧

背景

地球磁気圏のプラズマダイナミクスを包括的に理解するためには、電子、イオンのそれぞれについて、1[eV]程度から10[MeV]超までの幅広いエネルギーレンジを連続的に網羅する観測が重要である。特に、イオンについては、その起源に関する情報を得るため、質量や荷電状態をも調べる必要がある。そのような観測に特に重要なのが、中間エネルギー帯の粒子計測器の開発である。低エネルギー側(~ 40 [keV/q])、高エネルギー側($> \sim 100$ [keV])に比べ、中間エネルギー帯($\sim 10 \sim 200$ [keV/q])はこれまで十分な研究開発がなされていないからである(海外では数例、日本ではほぼ皆無)。

イオンのエネルギー(E)、質量(m)、荷電状態(q)を調べるためには、図1のように静電分析器、TOF型質量分析器、固体検出器を用いるのが常套手段である。しかし、静電分析器は通常、低エネルギー粒子計測に頻繁に用いられるもので、中間エネルギー帯ではそのサイズを大きくしなければならない。そのため、海外での設計においては視野を大幅に狭めるなどの、性能を劣化させるトレードオフが行われてきた。また、過去の中間エネルギーイオン分析器では、高いエネルギー分解能を得るために感度を低くしすぎていた。

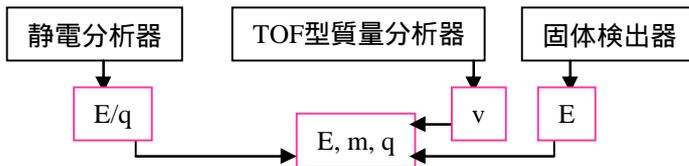


図1: 静電分析器, TOF型質量分析器, 固体検出器の組み合わせによる、イオンのエネルギー(E)、質量(m)、荷電状態(q)の測定の概念図。

静電分析器の設計

中間エネルギーイオンを観測対象とした場合、静電分析器を設計する上で一番の問題になるのが装置のサイズである。静電分析器の原理上、測定エネルギーの上限が高いほど、大きな極板曲率半径が必要となる。そこで、本研究では、 ~ 200 [keV/q]までの計測のために必要な極板の曲率半径を縮める事なく、装置全体のサイズを小さくするデザインを考案した(カスプ型、図2)。そして、このアイデアを元に、内部磁気圏探査に適した性能(表1)をもつテストモデルの詳細な形状を決定した。

表1: カスプ型静電分析器テストモデルの性能。過剰なエネルギー分解能の追求を避け、高い感度を確保した。また、周方向 360° の視野は、衛星のスピンの組み合わせる事で全立体角の視野を実現する。

| | |
|---|---------------------------------|
| G-factor[$\text{cm}^2 \text{sr keV/keV}$] | 2.2×10^{-2} |
| FOV | $\sim 5^\circ \times 360^\circ$ |
| 上限エネルギー[keV/q] | 190 |
| エネルギー分解能 | 15% |
| 装置直径[mm] | 250 |

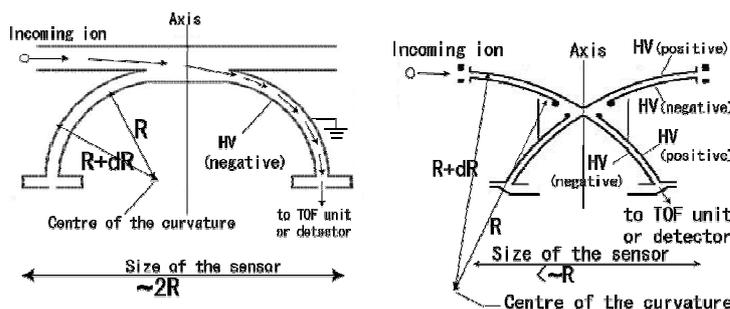


図2: 低エネルギー荷電粒子計測によく用いられるトップハット型(左)と、今回考案したカスプ型(右)。

静電分析器テストモデルの試験

カスプ型静電分析器テストモデル(図3)の粒子計測性能を調べるため、実験室においてイオンビームを入射させる試験を行った(図4のようにMCPを配置した)。装置出口でのカウントトレイトが、イオンの入射エネルギー E 、入射角度(装置対称軸に垂直な面から測った仰角)にどう依存するかを調べた。それらをシミュレーションの結果と比較した結果、テストモデルの性能はほぼ設計通りのものである事が確認できた(図5)。

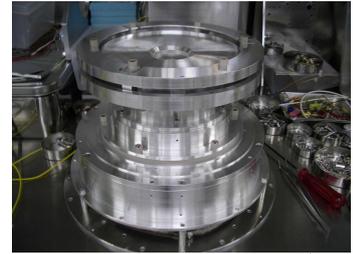


図3:静電分析器テストモデル

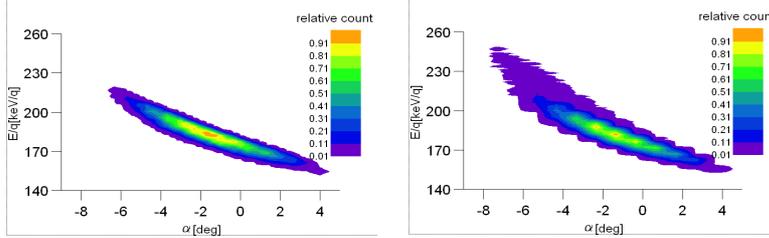


図5:カウントトレイトの入射エネルギー(E)、入射角度(α)依存性を色で表したもの。左が計算結果、右が実験結果。実験結果に見られる高エネルギー側の裾野の広がり装置の性能には殆ど影響を及ぼさない。

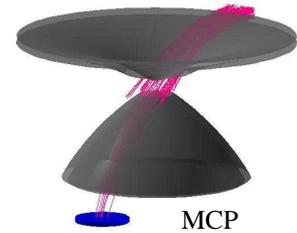


図4:粒子計測試験時の構成。青の円盤はMCP、桃色の曲線はイオンの軌道を表す。

TOF型質量分析器の設計

質量分析部についても詳細な設計を行った。図6に、極板配置と電位分布、そしてイオンとスタート/ストップ電子の軌道を示す。図7、8にはそれぞれ ~ 190 [keV/q]、 ~ 12 [keV/q]の各種イオンを入射させた場合のシミュレーション結果を表示してある。 ~ 190 [keV/q]の結果では、 H^+ と He^{2+} の分布の裾野が重なってしまっているが、これらはSSDのデータを用いて分離できる(H^+ : ~ 190 [keV]、 He^{2+} : ~ 380 [keV])。また、 O_6^+ や O_7^+ などは He^{2+} の分布の裾野に隠れてしまう(ここには表示されていない)が、それらもSSDのデータから弁別できる。

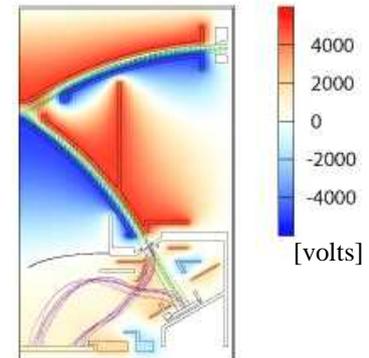


図6:緑、紫の曲線はそれぞれイオン、電子の軌道を表す。MCPで検出された2つの電子の到達時間差からイオンの質量・電荷比(m/q)が推定される。なお、上図には静電分析部も併せて表示してある。

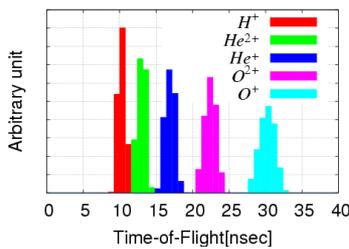


図7: ~ 190 [keV/q]の場合

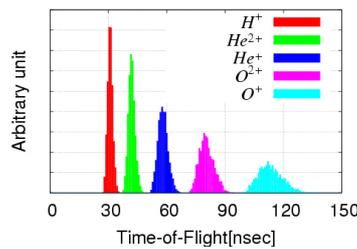


図8: ~ 12 [keV/q]の場合

纏め

次期磁気圏探査に向け、中間エネルギーイオン分析器の開発に着手した。

- ・エネルギーレンジの上限を ~ 200 [keV/q]まで伸ばすため、cusp型という、全く新しいデザインの静電分析器を考案した。

- ・カスプ型静電分析器のテストモデルを製作、試験した。その結果、テストモデルの性能は設計どおりである事が確認できた。

- ・質量分析部の詳細なデザインを決定した。その質量分解能は、磁気圏の主要イオンを弁別するのに十分なものである。