

# 全天掃引静電分析器の試作・評価実験

## *Calibration Experiment of All-sky Electrostatic Analyzer*

三宅 互 山崎 敦

MIYAKE Wataru and YAMAZAKI Atsushi

### 要旨

人工衛星に搭載される静電分析器は、衛星周辺の宇宙空間プラズマ(イオンと電子各々)のエネルギー・角度分布を計測し、プラズマの流速、密度、温度を導出し、大規模な宇宙環境擾乱を検出し、その構造や伝搬に関する情報から、宇宙天気予報に役立てるものである。本稿では、L5ミッションなどの3軸制御の衛星への搭載を目指して試作した、全天掃引機能を持つ静電分析器の基本性能を確認する実験結果を紹介する。評価実験の結果は、設計に使用した数値モデルと、エネルギー特性・入射角度特性ともに、定量的に良い一致を示しており、L5ミッションなどの3軸制御衛星における宇宙空間プラズマの3次元計測実現に見通しを得た。

Electrostatic analyzers have been widely used for measuring the energy and incident angle distribution of space plasma on board the spacecraft. The measurement enables us to derive the flow velocity, density, and temperature of plasma, to detect the large-scale disturbances in space, and to forecast the space weather. An electrostatic analyzer with all-sky field of view has been developed for the L5 mission and the proto-type model is calibrated by a ground facility. The results demonstrate a fair agreement with the numerical model calculations and its capability of the space plasma measurement on board 3-axis stabilized spacecraft such as the L5 mission.

### [キーワード]

L5ミッション, 太陽風プラズマ, 静電分析器

L5 mission, Solar wind plasma, Electrostatic analyzer

## 1 はじめに

人工衛星に搭載し、宇宙空間プラズマのエネルギー分布や3次元速度分布などを計測するプラズマ計測器としては、静電分析器がよく使用されてきた。静電分析器は、静電場中の荷電粒子の運動の性質を利用して、粒子の $E/q$ (エネルギー/電気量)を計測するものである。計測された衛星周辺の宇宙空間プラズマ(イオンと電子各々)のエネルギーと分析器への入射角度分布から、プラズマの流速、密度、温度を導出し、大規模な宇宙空間擾乱を検出し、その構造や伝搬に関する情報から、宇宙天気予報に役立てられる。また、イオンや電子のミクロな速度分布関数から、宇宙空間プラズマ中における粒子加速、波動粒子相互作用、加速された粒子の伝搬などの

解明にも資するものである。さらに、静電分析器の後段に、TOF (Time-Of-Flight) 法による速度分析機能等を付加すること<sup>[1]</sup>で、イオン種(例えば、 $H^+$ 、 $He^{++}$ 、 $O^+$ など)の同定も可能となる。

静電分析器は、基本的には向かい合う2枚の電極板の間に電位差を与え、その間の空間に荷電粒子を通すもので、この電極板の形状から、平行板型や同心の円筒型、球型などがある。このうち、球型静電分析器は、一か所に設けた入射口に様々な角度から粒子が入射するがその入射角度によって出口の位置が異なるため、どの出口から出てくるかを計測することで入射角度分布(1次元)がエネルギー分布と同時に計測できる利点がある。このため、搭載される人工衛星が自転すれば、3次元的な速度分布の計測が可能となる。この利点のため、人工衛星での宇宙空間

プラズマの計測によく利用され、ISEE[2]-[5]、GEOS[6]、AMPTE[7][8]、Giott[9]、Ulysess[10]、Galileo[11]、などに搭載されてきた。しかし、この視野角の大きい球型においても、まだ死角が残ること、視野方向によって分析器特性が異なってくること、などの問題点があった。トップハット型静電分析器[12][13]はこれを解決したもので、完全な軸対象の形状により、 $2\pi\text{rad}$ にわたる視野で均一な分析器特性を持つものである。

現在までに、太陽風プラズマの観測を目的又は考慮した計測器としては、日本において開発、衛星に搭載されたのは3例ほどあり、 $270^\circ$ 球型静電分析器[14][15]とトップハット型静電分析器[16]が使用されている。しかし、これらはすべて、スピン安定型の姿勢制御を行う衛星に搭載されたものであった。上記の計測器はすべて1次元の角度分解能しかなく、その1次元の視野をほぼ衛星自転軸を含む平面内に置くことで、衛星の自転と、この1次元の角度分解能を組み合わせることで、直交2成分の角度分布の計測が可能となり、エネルギー分布の計測と合わせて3次元速度関数を求めるものである。

3軸姿勢制御を行う衛星においては、上記の分析器では、3次元速度分布を得ることは原理的に不可能となる。例えば、L5ミッション[17]では惑星間空間CMEや太陽面の撮像観測を主たる目的としており、3軸制御が想定される。このような衛星においては、計測器側で視野方向を広げる工夫が必要となる。静電偏向電極を分析器の導入部に設け、視野を静電的に掃引することが一つのやり方である。WIND衛星ではトップハット型分析器のコリメーター部に偏向電極を設け、 $\pm 45^\circ$ 程度の視野範囲をカバーしている[18]。このタイプの概念図を図1(a)に示す。図中の矢印は粒子の進行方向を示し、計測器に対する入射・出射を表している。分析器対称軸に垂直な面(図中の点線)を中心として $\pm 45^\circ$ 程度の円盤内が視野となるため、衛星本体との視野の干渉が生じやすく、ブームなどを突き出してその先端に分析器を取り付けしないと十分な性能を発揮できない。

これに対し、分析器軸に $45^\circ$ の円錐面を中心として、 $\pm 45^\circ$ 程度を視野の円錐面を閉じたり開いたりして掃引し、全天( $2\pi\text{str}$ )の視野範囲をカ

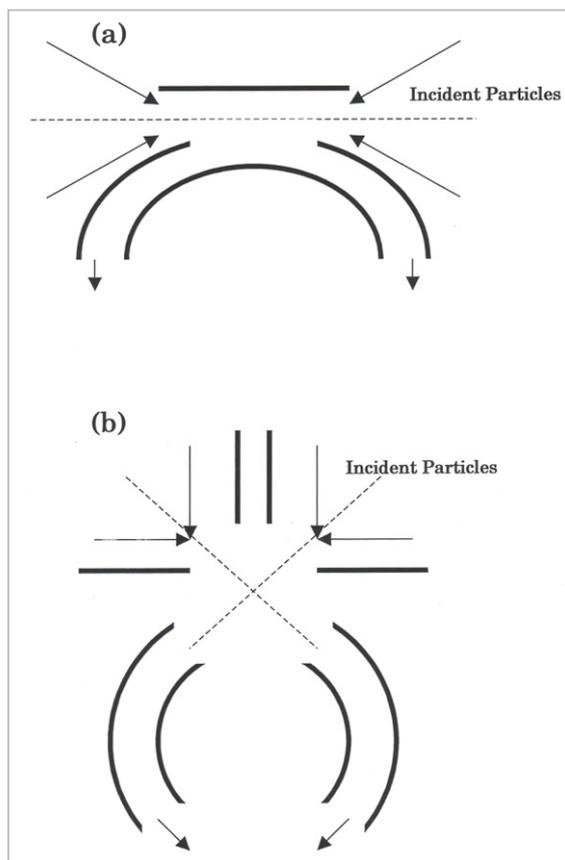


図1 トップハット型静電分析器(a)と今回試作した静電分析器(b)の断面と粒子入射・出射の概念図

バーし、分析器にはトップハット型ではなく、ボトルタイプの球型のものを使用することが考えられる。このタイプの概念図を図1(b)に示す。この場合は、衛星外壁面に直接に取り付けられる大きな利点がある。このタイプに関して、具体的な各電極の形状・配置を決めて、電位分布を求め、その中での多数の粒子軌道を追跡計算する数値モデルによる検討[19]を実施したが、良好な性能が予測された。本稿では、このL5ミッションなどの3軸制御の衛星への搭載を目指した、全天視野掃引機能を持つ静電分析器を実際に試作し、イオンビームを用いた荷電粒子計測器較正装置[20]による基本性能を確認する実験を行ったので、その結果を紹介する。

## 2 試作品概要

試作分析器の断面図を図2に示す。図1(b)を $90^\circ$ 回転させた場合に相当する。分析器は、アルミを主体として導体部分(図中の青斜線)を形成

し、偏向板やエネルギー分析用電極などを電気的に浮かすための絶縁材としてはエポモール(図中の赤斜線)を使用している。今回の試作は、地上実験装置における基本機能確認実験のためであるので、衛星に搭載する際には問題となる重量や、振動衝撃などの機械特性、さらに熱特性は考慮せずに、組立てにコツを要さずに寸法精度が得られる形状に設計されている。荷電粒子通路に沿っては通路間隔で $5 \pm 0.05 \text{ mm}$ の精度が出るように工夫されている。この分析器の形状は、数値モデル計算から決められたものであり、L5 ミッションを想定した太陽風電子の計測に最適化された大きさ[19]となっている。後述するように、太陽風イオンの計測には、同形状でより

大きい計測器が望ましいという予測があるが、実験で使用する荷電粒子計測器較正装置[20]で作られるイオンビームの口径(一様性)との兼ね合いで、あまり大きい計測器での実験では定量的な評価が難しくなる。このため、本試作に当たっては、形状に関する基本性能の確認を目的とし、大きさについては静電ポテンシャル場での荷電粒子の軌道の比例則から、結果に基づいて考察をすることとしている。

試作分析器は、大きく分けて、視野方向を大きく振るための静電偏向電極、感度を調整するためのリミッター電極、粒子エネルギーを分析するための球型電極、の3種の電極から構成され、これらの電極に外部電源により静電位を与えて

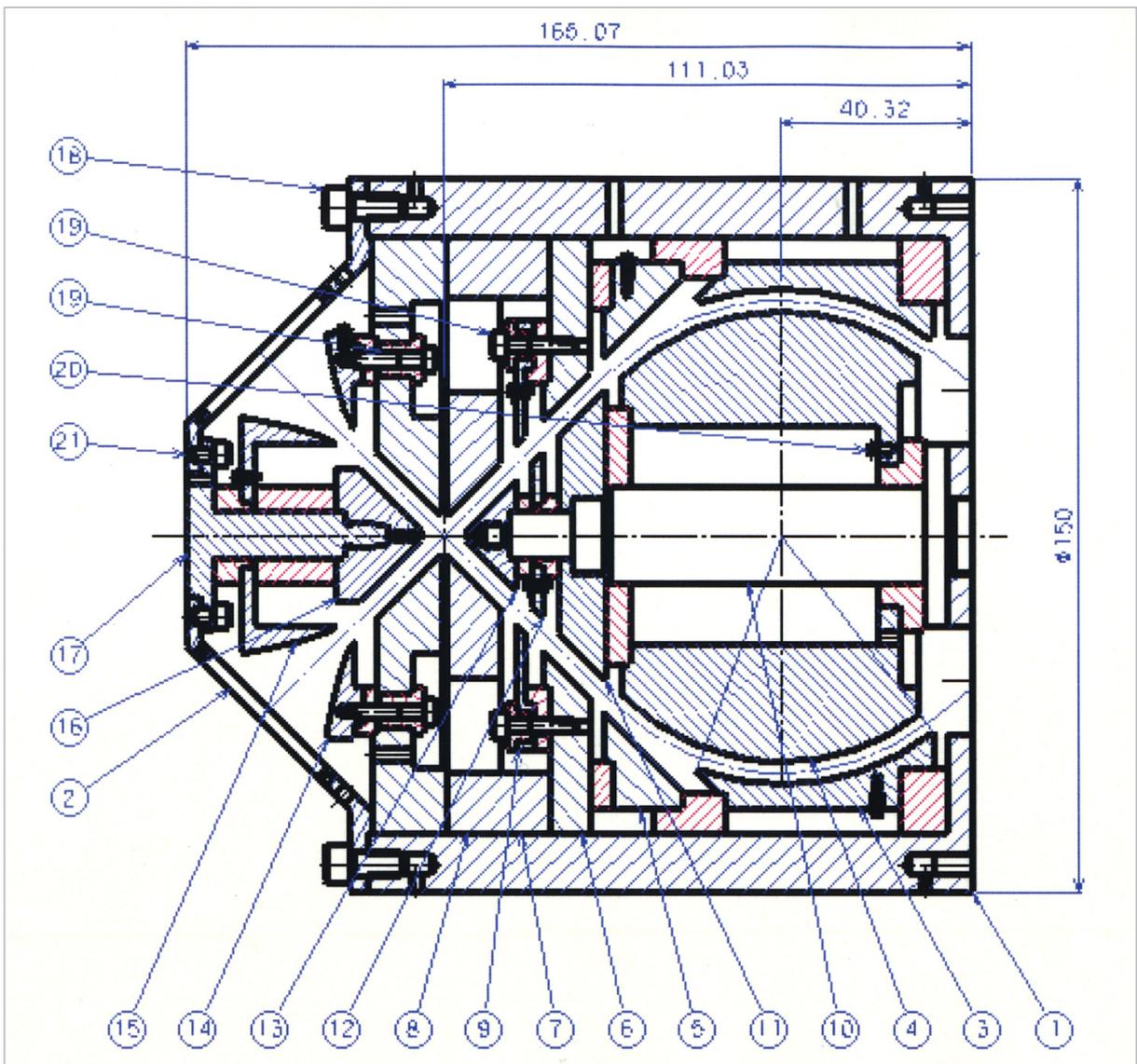


図2 試作分析器の断面図

働かせるものである。分析器は円筒対称形をしており、図中左上又は左下から中央のX点へ向けて入射してくる。はじめに、分析器内部の電位が外部に漏れないようにするためのメッシュを通過する。次に、二つの楔型断面の偏向電極が向き合う部分を通過する。この向き合った偏向電極に電位を与えることで、電極間に電場を発生させ、入射粒子を曲げて、視野方向を振ることが可能となる。

さらに粒子はX点を通過後、感度調整用の「しぼり」に相当する薄いリング状のリミッター電極を通過する。このリミッター電極に電圧を印加することで、透過粒子を絞り、高い粒子フラックスの計測を可能とする。最終段の粒子検出器のダイナミックレンジ(単位時間に計測される粒子数)には限界があるため、この機能により、計測器としてのダイナミックレンジを拡大し、微小な粒子フラックスから大きなフラックスまで計測可能となる。その後、粒子は球型静電分析部へと導入される。この分析部の外球と内球の半径は、それぞれ、525 mmと475 mmである。この両球の間に電位差を与え、その間で円軌道に近い軌道の粒子が透過する。与えた電位差に対してエネルギーの大きすぎる粒子は直線に近く運動し、外球にぶつかり、透過できない。一方、エネルギーが小さすぎる粒子は大きく軌道が曲げられ、内球にぶつかり、これも透過できない。適切なエネルギー範囲の粒子のみが選別され、球型分析器を透過する。

透過した粒子は、右端の出口へと到達し、ここに装着された検出器で、電気信号へと変換され、パルス数として検出される。本実験においては、2次電子倍増管のマイクロチャンネルプレート(MCP)[21]を検出器として使用した。この最後の検出器まで到達できるのは、分析器の外を飛び交う様々な運動方向・エネルギーを持つ粒子のうち、入射角度・エネルギーが各電極へ印加した電位と適切な関係を満たすものだけであり、それ以外の荷電粒子は途中のどこかで粒子通路壁にぶつかり、最後までには到達できない。この各電極への印加電圧の組合せを様々に変えて透過粒子数を調べることで、外部を飛び交う荷電粒子の角度・エネルギー分布を知ることができる。詳細は数値モデルによる検討[19]を参照

されたい。

### 3 実験装置・手順概要

試作品の性能確認は、荷電粒子較正装置[20]を用いて行われた。実際の宇宙空間プラズマとは異なり、この実験装置では、単一のエネルギーを持つ平行な $N_2^+$ イオンビームが真空チャンバー内で発生する。イオンビームの発生装置は大仕掛けなものであるため、そのエネルギーや放射方向を変えることはせずに、一定に保つ。分析器側を直交2軸の真空ジンバル(回転台)に載せて、回し、ビーム入射方向を変え、角度特性を取得する。また、分析器内部の電極への印加電圧を細かく変えて、エネルギー特性を得ることになる。図3に真空チェンバー内の2軸真空ジンバルに設置された分析器を示す。図中、左側から右に向かってイオンビームが入射する。

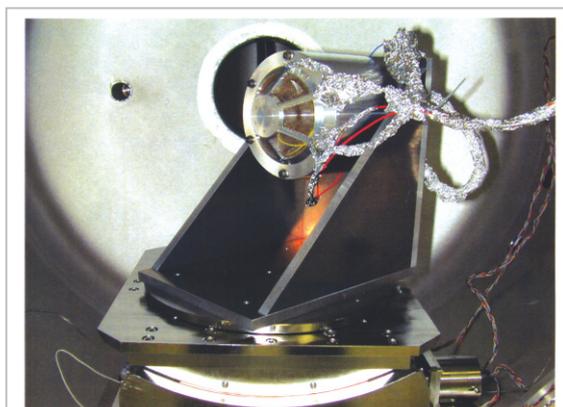


図3 真空チェンバー内の2軸真空ジンバル(回転台)に設置された試作分析器

分析器特性の測定に使用される機器は、すべて、1台のパソコンから GPIB 通信によって各機器を制御される。制御する機器は、

- ・イオンビーム制御装置へのコントロール電圧を与えるアナログ電圧電源
- ・イオンビームの電流・電圧モニター用マルチプレクサとマルチメーター
- ・ジンバル制御用コントローラー
- ・分析器へ印加する電源と出力電圧モニター用のマルチプレクサとマルチメーター
- ・検出器出力パルスのカウンター
- ・電離真空計(真空度モニター用)

である。図4に、パソコンのコントロール画面を示す。独立制御に対応するため、アプリケーションには各々のコントロールパネルを設計した(右側のパネル)。図には、自動制御掃引測定用のメインパネルと掃引制御パネルが見られる。ある一つのパラメタに対する分析器特性を調べるためには、他のすべてのパラメタを固定し、その一つのパラメタを自動掃引しながら出力パルス数をカウントしていくことで、手際よくデータを取得する。掃引測定項目は大きく3種類に分類できる。

- 1 出力イオンビームに関する測定(電圧・電流掃引)
- 2 分析器の向きに関する測定(入射角掃引)
- 3 分析器への印加電圧の測定(エネルギー・視野角・感度掃引)

測定1はイオンビーム制御装置へのコントロール電圧を GPIB 通信で制御するアナログ電圧出力機器から与えることによって行う。測定2はチェンバー内のジンバルを回転することによって掃引を行い、測定3は観測器への印加電圧を掃引するが直接電源電圧を GPIB 制御する。

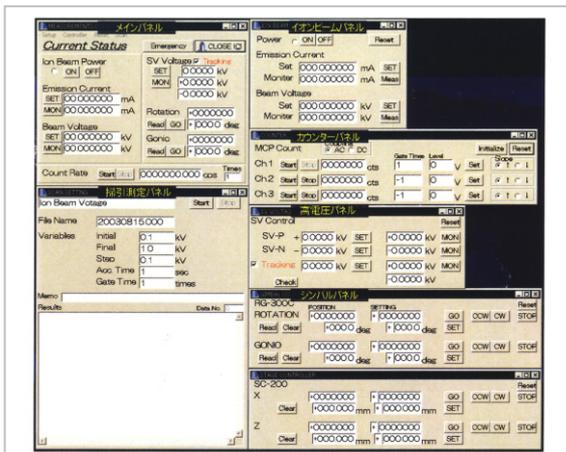


図4 パソコン画面上のコントロールパネル

測定は図5に示したフローチャートに沿い、パソコン画面上のコントロールパネル(図4)を操作する。まず、掃引項目を決め、その他の固定パラメタをメインパネルで設定する。次に掃引制御パネルにおいて、掃引パラメタの初期値・終了値・間隔値及び各測定点での観測時間を設定する。スキャンスタートボタンを押すと掃引測定を開始する。各点での測定は、パラメタ掃引

が停止した後1秒経過し、機器の安定後から開始される。各店での測定後結果は掃引制御パネルの下部のスペースに出力し、掃引最終点での測定が終了した後ファイルに出力し、解析に供する。

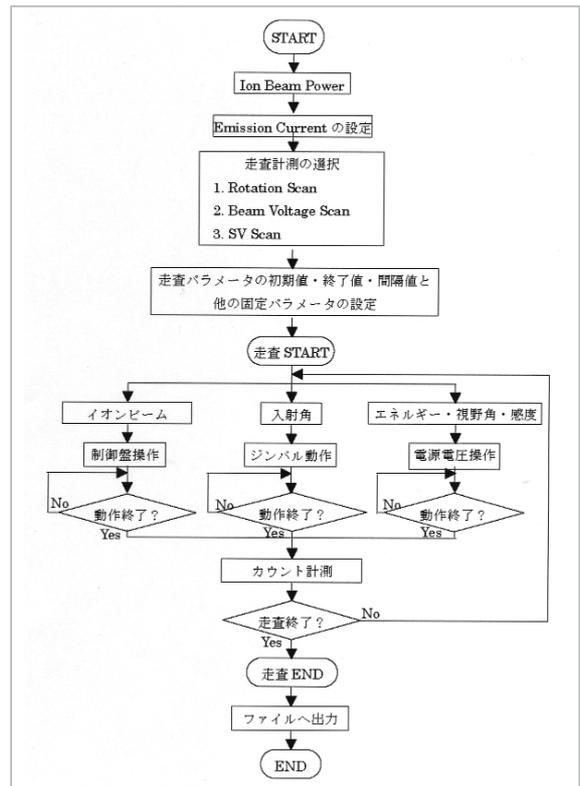


図5 測定のフロー

## 4 分析器各特性

### 4.1 エネルギー・角度特性

分析器は軸対称なため、角度特性としては、この軸からの離角に対する依存性が問題となる。ここでは、この軸に直交する面内を仰角(Elevation Angle)0°、この軸に平行な図2の左側方向を90°と定義する。視野掃引用の偏向電極を接地した場合(偏向がゼロの場合)、仰角45°を中心として入射粒子が球型エネルギー分析部の入り口まで到達することになる。ある仰角にジンバルを回転させて固定し、球型分析器の内・外球電極に印加する電位(SV: Sweep Voltage)をステップ状に変化させていき、各ステップでの単位時間当たりの粒子の透過数をデータとして取得する。この実験では、外球に正の、内球に同じ大きさの負の、電位を与えている。次に、

ジムバルをわずかに動かして仰角を変えて固定し、再び同じ範囲でSVの掃引を行う。これを繰り返すことで得られたのが、図6の45°近辺のエネルギー・角度特性である。図中、最大の透過率(粒子カウント数)を100%として、その80%、60%、40%、20%の等高線をそれぞれ表示してある。静電場中の荷電粒子の運動は、粒子の運動エネルギーとポテンシャルエネルギー(即ち電位分布)の比率が同じならば、同じ軌跡を描き、比例則が成立する。このため、ここでは横軸にSVに対する粒子エネルギーの大きさを示した。すなわち、外球・内球にそれぞれ±100Vを印加した場合、850eVから1000eV当たりのエネルギーの粒子が透過してくることになる。このSV値と、透過粒子エネルギー値は比例関係にある。すなわち、印加した±SVに対しておおよそ $9 \cdot SV$  [eV]の粒子が分析器を透過して検出器でカウントされることになる。

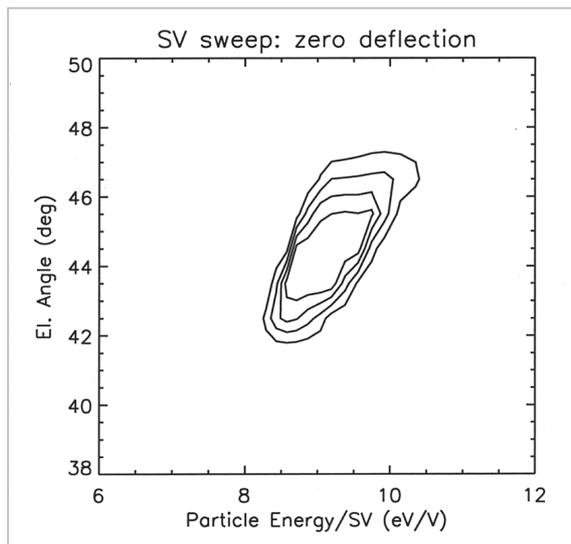


図6 仰角45°近辺のエネルギー・角度特性(実測)

エネルギー分解能・角度分解能は、図6の縦軸・横軸方向に、おおよその積分した分布の半値幅として、定義できる。横軸方向に対しては、上記の比例則があるため、半値幅の中央値に対する比率として定義される。この場合のエネルギー分解能はほぼ±7%、角度分解能はほぼ±1.8°である。

図7には数値モデル計算[19]で求めた分析器のエネルギー・角度特性を、図6と同じフォーマット

トで示した。図6と比較すると、ほぼ一致しており、モデル計算で期待された、設計どおりの結果が得られていることが分かる。詳細に比較すると、エネルギー・角度分布ともに、実験値がやや広がっているようにも見える。製作・組立て誤差のほかにも実験に使用したイオンビームのエネルギーの単一性、ビームの平行性などに限界があることも考えられ、その原因ははっきりしない。しかし、ここまでの一致が得られれば、十分に実際の使用に耐えるものといえる。

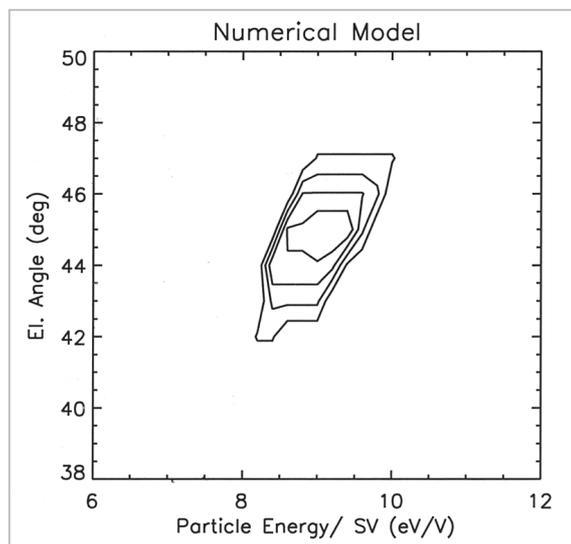


図7 仰角45°近辺のエネルギー・角度特性(モデル計算)

分析器の絶対感度はGファクターと呼ばれ、開口面積×中心透過エネルギーに対する透過エネルギー幅×透過立体角を意味するものである。すなわち、図6や図7の等高線表示された透過数をエネルギーと角度で積分し、仰角に直交する方位角方向も積分して、入射粒子フラックスが既知ならば、導出される。ある中心透過エネルギーEで計測された単位時間当たりの粒子数C (/sec)は、微分フラックス $F$  (/cm<sup>2</sup> str keV sec)と $C=F(E) \cdot G \cdot E \cdot \varepsilon$ で関係付けられる。ここで、 $\varepsilon$ は検出器の検出効率であり、GがGファクターである。この実験に関しては、実測に使用したイオンビームの絶対フラックス量が、十分な精度で得られていないので、Gファクターを実験的に求めることはできていない。しかし、エネルギー・角度特性が数値モデル計算と良い一致を示していることから、モデル計算のGフ

ァクターの値がそのまま適用できると思って差し支えない。

図6と図7では、どちらにも共通して、粒子のエネルギー/SVと仰角(El.)との間に、カップリングがあり、skewing[22] (ねじれ)が生じている。このskewingは、bending angle (球型分析器内の粒子軌道の曲がり角)が $180^\circ$ よりも小さい分析器の場合に顕著に生じるもの[23]である。エネルギーの大きい粒子は曲がりやすく、外球に近いところで出口に到達する。このため、入射方向が、外(内球から外球へ向かう方向)向きだと、なおさら出口では、同心球中心よりも遠くに行き、外球にぶつかって透過できない。入射方向が内向きならば、出口でより中心(内球方向)に偏るため、大きなエネルギーの効果が緩和され、透過できる。エネルギーが低い粒子の場合は、上記と逆のことが生じるため、エネルギーと入射角度に、図6や図7に見られるskewingが生じる。

実際の宇宙空間プラズマの計測データを処理する際には、このskewingやなだらかに透過率が変化することは無視して行われるのが普通である。すなわち、エネルギー分解能： $\delta\%$ 、角度分解能： $a^\circ$ の分析器の場合、印加したSVに対応する中心エネルギーに対して $\pm\delta\%$ 、分析器の向いている方向を中心として $\pm a^\circ$ の、図6や図7においては、長方形の領域の中は一様に透過、外は透過がゼロとして扱う。このような近似が成立するのは、測定対象のプラズマのエネルギー・角度分布が、 $\delta$ や $a$ に対して十分に大きい場合である。例えば温度が極度に低いプラズマでは、それに応じた小さい値の $\delta$ や $a$ の分析器を用いないと正確な計測はできないことになる。

#### 4.2 視野偏向特性

次に、視野掃引用の偏向電極に電位を与えた場合の、偏向電圧(V def)と仰角(El. Angle)の関係を調べた。図8にその結果を、図9に数値モデルによる計算結果を示す。4.1で述べたように、粒子エネルギーと電極への印加電圧に比例則があるため、縦軸は粒子エネルギーに対する偏向電圧の比を示した。実験では、二つの偏向電極のうち、一方に正の電位を与え、他方は接地(電位ゼロ)の条件で行った。図中縦軸が正の場合は、

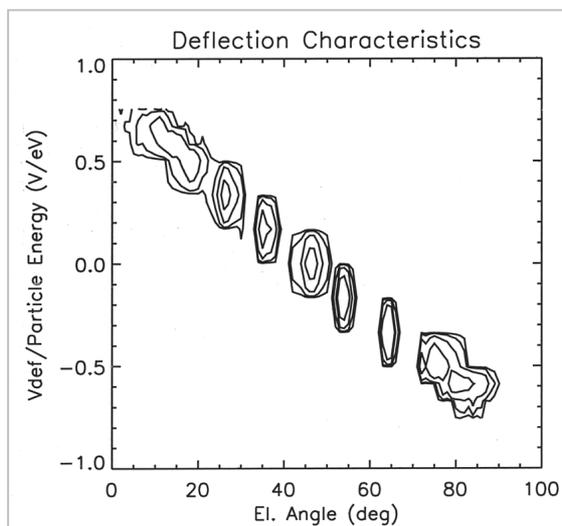


図8 視野偏向特性(実測)

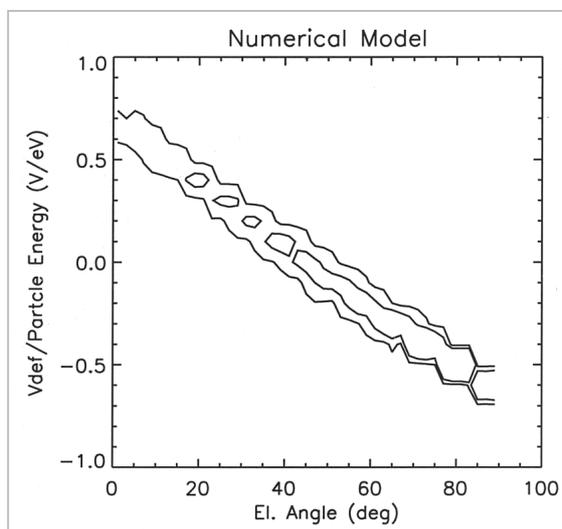


図9 視野偏向特性(モデル計算)

図2の対称軸に近く円筒状に軸を取り巻く電極に正の電圧を印加した場合を示している。また、縦軸が負の場合は、図2の円盤状に軸を取り巻く電極に正の電圧を印加した場合を、便宜的に示したものである。こうすることにより、視野掃引特性を全ぼうできる。縦軸がゼロの場合は、両電極ともに接地の場合である。

図8で、等高線が途切れ途切れであるが、これは測定点がまばらであるためであり、実際には滑らかにつながっているはずである。また、図9でもステップ的な変化が見られるが、これも数値計算点が有限数のために生じているものである。両図から、印加電圧と視野偏向仰角の間には、ほぼ線形の関係が成立していることが分かる。また、粒子エネルギーのほぼ70%–80%ま

での最大電圧で、全視野がカバーできる。

静電偏向電極は $45^\circ$ の円錐面を挟んで、一見、対称の構造のように思われるが、3次元的には軸に近い偏向電極は円柱に近く、もう一方の偏向電極は平面に近い。このため、形成されるポテンシャル構造は、対称軸に近く円柱状の電極に印加した場合は凸面鏡、円盤状の偏向電極に印加した場合は凹面鏡のように働く。したがって、平行入射した粒子軌道は、前者の場合( $< 45^\circ$ )は発散し、後者( $> 45^\circ$ )においては収束している。この発散/収束効果のため、仰角の大きい入射の粒子のほうが仰角の小さい入射の粒子よりも多く透過してきている。また、対称軸に近い円筒状の電極に印加した場合( $< 45^\circ$ )ともう一方の平面上の電極に印加した場合( $> 45^\circ$ )では、後者の方がわずかに偏向が大きい(低い電圧値で同程度の偏向が得られる)ことが分かる。これも上記のポテンシャル構造が発散性か収束性かの違いにより、偏向の効き方にわずかな違いが生じているものと思われる。

#### 4.3 リミッター特性

最後に、視野を振る静電偏向電極と、エネルギー分析を行う球型電極の間に取り付けたリング状のリミッター電極に電圧を印加して、感度調整機能について調べた結果を、図10に示す。図では、入射角度を変えてSVの掃引をして取得したデータを角度について積分(加算)したものを示している。実線が図6に対応するもので、リミッターへの印加電圧がゼロの場合である。破線が粒子エネルギーの80%、点線が90%に相当する電圧を印加した場合である。図11には対応する数値モデル計算の結果を示す。

実測とモデル計算とは良い一致を示し、期待どおり、感度を1/10程度に絞る制御は十分に可能であることが分かる。また、リミッター電極への電圧印加により、単に透過粒子数が減少するだけでなく、透過する粒子エネルギー/SVの値が、わずかに高くなることがモデル計算と一致して、示されている。これは、このタイプのリミッターが、単にその印加電圧以下に対応するエネルギーの粒子の透過を阻むものではなく、透過粒子についてその軌道を変えて、後段の球型分析器のエネルギー・入射角度特性と組み合

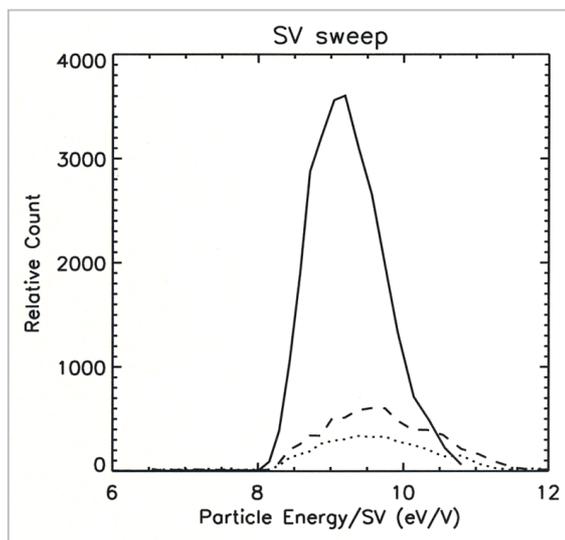


図10 リミッター特性(実測)

実線、破線、点線がそれぞれ、リミッター電圧/粒子エネルギーが0.0、0.8、0.9 (V/eV)の場合に対応する。

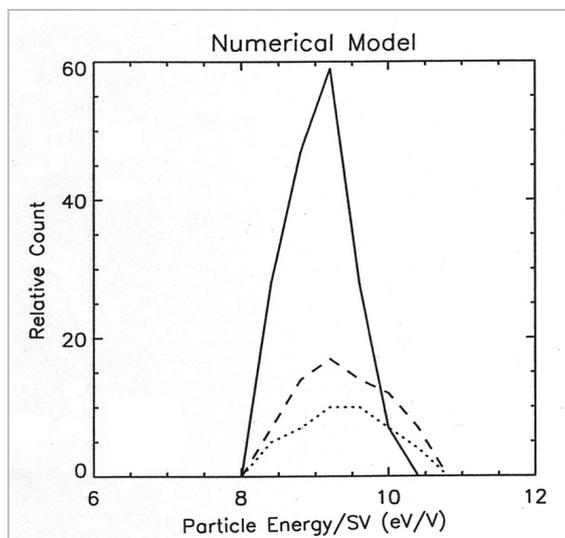


図11 リミッター特性(モデル計算)

実線、破線、点線は図10と同じ。

わさってリミッターとして機能することの現れである。このため、粒子エネルギー/qの80%程度の印加電圧でも大きな感度減少が生じている。

リミッター電極は内側と外側おのおのがほぼ同等に作用して、粒子進行方向に対してほぼ垂直の等電位面を形成するかのように、図2では配置されているが、視野掃引の静電偏向電極の場合と同じく、収束・発散のレンズ効果が働き、球型分析器に入射する以前に、それまでの平行粒子ビームが収束して焦点を持つことが、モデル計算の粒子軌道追跡からは分かっている。ま

た、3次元的な効果によりこの焦点は、中央ではなくわずかに外側によっている。このため、球型分析器に入射するときには、外球により近いところにある焦点からの発散粒子ビームとなり、すなわち粒子は外から内側に向かう軌道を取って入射してくる。したがって、4.1で説明した球型分析器のエネルギー・入射角度特性のskewingの場合と同じく、内向きに入射する粒子の透過は、SVがより小さく(すなわち、粒子エネルギー/SVが大き)曲がりが少ない粒子軌道が透過することになる。これが、図10と図11の破線や点線の場合の、粒子エネルギー/SVがわずかに大きい方へのずれが生じてくる原因と解釈される。

## 5 まとめと考察

以下に、試作した分析器の主要な特性をまとめる。

- (1) エネルギー分解能、入射角度分解能は、それぞれ、 $\pm 7\%$ 、 $\pm 1.8^\circ$ であり、中心透過エネルギー/分析器印加電圧は9(eV/V)である。
- (2) 粒子エネルギー/qの最大70%–80%の電圧を静電偏向電極に印加することで、 $\pm 45^\circ$ の視野掃引を達成し、全天( $2\pi$  str)を視野に収めている。
- (3) リミッター電極に粒子エネルギー/qの80%–90%の電圧を印加することで、感度を10%程度まで絞ることが可能である。

これらの数値は、若干のずれはあるものの、モデル計算からの期待値とすべて良い一致を示しており、ほぼ設計どおりに機能していることが確認され、試作品の製作が設計どおりであることが実証された。また、設計に先立って作成した数値モデルの有効性も検証されたといえ、今後の同モデルを用いた更なる詳細検討・設計が可能であることを示している。ここでは、計測器感度(Gファクター)は実測されていないが、上記のエネルギー・入射角度特性がモデル計算とよく一致していることから、これも数値モデルどおりの値と結論される。このことは、振動・衝撃の機械特性、真空中の熱特性、などの衛星に搭載するための検討課題は残っているものの、3軸制御の衛星に搭載して全天を視野に収

めるプラズマ計測器の実現に、大きく近づくものである。

具体的に、L5ミッションにおける太陽風プラズマの計測について考察する。太陽風電子はおよそ30eVまでの等方的熱的コアと磁力線沿いに数百eVまで伸びた高エネルギーテイルのハローからなっている[24]。さらに、太陽フレアが生じた際に加速された電子は、主として磁力線方向に数百eV以上のエネルギーをもって、伝搬してくる[25]。

ほぼ全方向( $4\pi$  str)にわたる視野が欲しい熱的コアやハローの太陽風電子の計測に関しては、計測器2台を衛星の反対側に取り付けることで、全方向を十分にカバーできる見通しを得たと言える。また、全天を視野に収める限界として掃引高圧電源の最大出力(数keV)の70%–80%が目安となるが、 $45^\circ$ の円錐に沿っての分布は最大計測エネルギーまで得られる。電子の場合、磁力線に対するピッチ角に依存する速度分布が想定されるため、この円錐面と磁力線が平行な場合は全ピッチ角がカバーされることになる。搭載に当たっては、惑星間空間磁場が統計的に最も頻繁に向いている方向であるパーカースパイラルの方向(太陽から $45^\circ$ 西側)に、計測器の $45^\circ$ の視野中心円錐面方向を一致させるように配置することが妥当であり、これによって、高エネルギーのフレアで加速された電子についてもかなりの角度分布のカバーが可能と思われる。

角度分解能とエネルギー分解能については、電子計測の場合は全く問題はなく、十分に熱的電子の温度やその異方性が計測される。また、太陽風電子の数フラックスは最大 $10^7/\text{cm}^2 \text{ sec str}$  eV程度である。仮に方位角分布をとる検出器アノードの中を $30^\circ$ とすると、入射角 $45^\circ$ 近辺の感度(Gファクター)は $7.2 \times 10^{-4} \text{ cm}^2 \text{ str eV}$ となる。これからカウント数を求めると、最大 $10^4/\text{sec}$ 程度となる。検出器全面への総カウント数は $10^5/\text{sec}$ 程度が想定される。

太陽風イオンの主成分はプロトンであり、これは超音速流である。粒子カウント数は大きく、計測器の感度という点では計測しやすい対象と言える。その一方で、バルク速度(数百km/sec)に比較して熱速度(数十km/sec)は低く、速度分布関数を得るのに必要な詳細なエネルギー・

角度分布を取得するためには、磁気圏内のイオン計測に比べて高いエネルギー・角度分解能が要求される。熱的プロトンの計測は太陽風のマクロな基本パラメタである、バルク速度、密度、温度を算出する上で必要不可欠である。これらの基本パラメタにより、太陽風中のCMEに起因する衝撃波と擾乱、CIR、高速太陽風を検出・同定する。また、これら基本パラメタの振動は、磁場データと合わせ、太陽風中のMHD波の検出・同定にも使用され、イオンのピッチ角散乱・加熱・加速についての基本情報をもたらす。

現状の入射角 $45^\circ$ 近辺のエネルギー分解能と角度分解能は、共にプロトンの速度分布関数をどうにか得られる値といえよう。一方、プロトンのエネルギーフラックスは、およそ $10^8/\text{cm}^2 \text{ sec str eV}$ の桁に達している。したがって、仮に $1^\circ$ の方位角巾を仮定したGファクターからは、 $10^4/\text{sec}$ 程度の桁のカウンタ数が想定される。現実には $1^\circ$ 幅のアノードを並べるのは非現実的であり、 $3^\circ$ から $5^\circ$ 程度が限界と想定される。また、太陽風プロトンの角度の広がりから、検出器全面への総カウンタ数は $10^6/\text{sec}$ の桁になる。

熱的プロトンのエネルギーは、およそ $1\text{keV}$ 前後であり、太陽風ではその流速がプロトンと重イオンでほぼ等しいため、この $E/q$ の分析器による観測では、イオンの $M/q$ に応じた分布となる。すなわち、 $\text{He}^{++}$ はプロトン( $\text{H}^+$ )のほぼ2倍の $E/q$ にピークがくる。太陽風中の様々なイオンは、上記の基本的な太陽風パラメタを導出する以外にも、惑星間空間衝撃波で加速・生成される高エネルギー粒子のソースとしてと、その組成・電離状態からCMEなどの太陽における起源を探る上での、二つの大きな観測意義を持つ。太陽風中の重イオンで最も多いものは $\text{He}^{++}$  ( $\alpha$ 粒子)であるが、その密度は太陽風プロトンの20%以下であり[26]、その他の重イオンは更に少ない。このため、現在までに3次元速度分布関数が求められているのはプロトンと $\text{He}^{++}$ のみであり、その他の重イオンは到来角度方向を積分したエネルギー分布が求められているだけである[27]。

太陽風中のイオンの到来方向は、超音速流ゆえ、太陽方向に強く収束している。このため $0^\circ$ から $90^\circ$ までに至る静電偏向電極による全天の掃

引は必要なく、太陽近辺の範囲が振れば十分である。 $45^\circ$ の円錐面の視野方向を太陽方向に一致するように配置することがよい。一方、衝撃波での反射・加速粒子やピックアップイオンの検出には、ある程度の視野角の掃引が望ましい。この分析器では、最大出力 $3\text{kV}$ の高圧電源使用時には、 $10\text{keV}$ 以上の粒子の視野角は $45^\circ \pm 15^\circ$ 程度以下に限られる。 $45^\circ$ の円錐面に沿っての方位角方向の情報は得られるので、両者の組合せで、高いエネルギーのイオンの計測についても、ある程度の範囲はカバーされる。

検出器に使用するMCPは出力電流(つまりカウンタ数)が大きくなりすぎると、利得が低下する[21]。この飽和特性は、MCPの抵抗値にもよるが、 $10^6/\text{sec}$ 程度が目安と考えられる。また、MCPの寿命はMCPから放出された総電荷量によるともされている[21]。このため、感度調整電極への電圧印加により、 $10^5/\text{sec}$ を超えるようなカウンタ数が入らないような運用が求められる。現状ではプロトンのピーク近傍がこの状態に相当すると予想され、低エネルギーレンジの計測にはリミッターを働かせ、高エネルギーレンジでは最大感度でフラックスの低い重イオンを計測する運用が必要である。これは、リミッター電圧が粒子エネルギー/ $q$ の80%–90%まで必要なことと、通常の搭載高圧電源の最大出力が数 $\text{keV}$ であることを考慮するとき、まさに実現可能な範囲である。

一般に、球型静電分析器のエネルギー分解能 $\delta E/E$ は、分析器の内球と外球の半径を $R1$ と $R2$ として、 $(R2-R1)/(R1+R2)$ に近似的に比例する。これから、両球の半径の差を現状の $5\text{mm}$ に保ったまま、球型電極を大きくすれば、エネルギー分解能も比例して向上することが分かる。衛星のリソースによる制限が問題であるが、仮に中心半径を $100\text{mm}$ まで大型化できればエネルギー分解能は、ほぼ $1/2$ に向上することが予想される。また、同様に粒子エネルギー/ $SV$ の値も2倍になると予想され、同じ高圧電源で、より高いエネルギー範囲が測定可能となる。さらに、方位角方向の分解能も、検出器の位置検出分解能で決まるため、大型化すれば、同じ位置分解能力で、より高い角度分解能を持たせられる。これらは、実際のイオン計測器の設計に当たって、考慮す

べき点といえる。

## 6 おわりに

本試作・評価実験により、3軸姿勢制御の衛星における、プラズマの3次元速度分布計測の実現へ見通しを得た。特に、L5ミッションにおける太陽風イオン・電子計測に関して、大きく前進したといえる。太陽風電子計測に関しては、現状の設計で十分であるといえる。太陽風イオン計測における今後の課題としては、計測器の大

型化とTOF法を用いたイオン種識別機能の付加の検討がある。また、本分析器はL5ミッションにとどまらず、地球磁気圏中のkeV粒子の計測などにも応用が考えられる。

## 謝辞

本分析器試作品の設計と製作に当たっては、情報通信研究機構(通信総合研究所)科学技術情報グループの小室純一氏にお世話になった。ここに厚く御礼申し上げる。

## 参考文献

- 1 G. Gloeckler, "Ion composition measurement techniques for space plasmas", *Rev. Sci. Instrum.*, 61, 3613, 1990.
- 2 K. A. Anderson, R. P. Lin, and H. D. Heeterds, "An experiment to measure interplanetary and solar electrons", *IEEE Trans. Geosci. Instrumen.*, GE-16, 153, 1978.
- 3 L. A. Frank, D. M. Yeager, H. D. Owens, K. L. Ackerson, and M. L. English, "Quadrispherical LEPDEAS for ISEE7s-1 and -2 plasma measurements", *IEEE Trans. Geosci. Electron.*, GE-16, 221, 1978.
- 4 S. J. Bame, J. R. Asbridge, H. E. Felthaus, J. P. Glore, G. Paschmann, P. Hemmerich, K. Lehmann, and H. Rosenbauer, "ISEE-1 and ISEE-2 fast plasma experiment and the ISEE-1 solar wind experiment", *IEEE Trans. Geosci. Instrumen.*, GE-16, 216, 1978.
- 5 S. J. Bame, J. R. Asbridge, H. E. Felthaus, J. P. Glore, H. L. Hawk, and J. Chavez, "ISEE-C solar wind plasma experiment", *IEEE Trans. Geosci. Instrumen.*, GE-16, 160, 1978.
- 6 G. L. Wrenn, J. F. E. Johnson, and J. J. Sojka, "The supra-thermal plasma analyzers on the ESA GEOS satellites", *Space Sci. Instrum.*, 5, 271, 1981.
- 7 A. J. Coates, J. A. Bowles, R. A. Gowen, B. K. Hancock, A. D. Johnstone, and S. J. Kellock, "The AMPTE UKS three dimensional ion experiment", *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, GE-23, 287, 1985.
- 8 H. M. Shah, D. S. Hall, and C. P. Chaloner, "The electron experiment on AMPTE UKS", *IEEE Trans. Geosci. Remote sensing*, GE-23, 293, 1985.
- 9 A. D. Johnstone, S. J. Kellock, A. J. Coates, M. F. Smith, T. Booker, and J. D. Winningham, "A space-borne plasma analyzer for three dimensional measurements of the velocity distribution", *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, NS-32, 139, 1985.
- 10 S. J. Bame, D. J. McComas, B. L. Barraclough, J. L. Phillips, K. J. Sofaly, J. C. Chavez, B. E. Goldstein, and R. K. Sakurai, "The Ulysess solar wind plasma experiment", *Astron. Astrophys. Suppl. Sre.*, 92, 237, 1992.
- 11 L. A. Frank, K. L. Ackerson, J. A. Lee, M. R. English, and G. L. Pickett, "The plasma instrumentation for the Galileo mission", *Space Sci. Rev.*, 60, 283, 1992.
- 12 C. W. Carlson, D. W. Curtis, G. Paschmann, and W. Michael, "An instrument for rapidly measuring plasma distribution functions with high resolution", *Adv. Space Sci.*, 2(7), 67, 1982.
- 13 M. J. Sablik, D. Golimowski, J. R. Sharber, and J. D. Winningham, "Computer simulation of a 360° field-of-view 'top-hat' electrostatic analyzer", *Rev. Sci. Instrum.*, 59, 146, 1988.
- 14 T. Mukai, W. Miyake, T. Terasawa and K. Hirao, "Observations of solar wind ions by the interplanetary

spacecraft Suisei (Planet-A)", J. Geomag. Geoelectr., Vol. 39, 377, 1987.

- 15 T. Mukai, S. Machida, Y. Saito, M. Hirahara, T. Terasawa, N. Kaya, T. Obara, M. Ejiri and A. Nishida, "The low energy particle (LEP) experiment onboard the GEOTAIL satellite", J. Geomag. Geoelectr., Vol. 46, 669, 1994.B
- 16 S. Machida, Y. Saito, Y. Ito and H. Hayakawa, "Instrument characteristics of the electron spectrum analyzer (ESA) onboard the Planet-B mission and observational perspectives of the electron measurements", Earth Planets Space, Vol. 50, 207, 1998.
- 17 秋岡真樹, 大高一弘, 長妻努, 丸橋克英, 三宅互, "L5ミッションと惑星間空間CMEの観測", 通信総合研究所季報, Vol. 48, No. 4, 11, 2002.
- 18 R. P. Lin, K. A. Anderson, S. Ashford, C. Carlson, D. Curtis, E. Ergun, D. Larson, J. McFadden, M. McCrthy, G. K. Parks, H. Reme, J. M. Bosqued, J. Coutelier, F. Cotin, C. D' uston, K. P. Wenzel, T. R. Sanderson, J. Henrion, and J. C. Ronnet, "A three-dimensional plasma and energetic particle investigation for the WIND spacecraft", Space Sci. Rev., Vol. 71, 125, 1995.
- 19 三宅互, 風間洋一, "L5ミッション用太陽風プラズマ計測器", 通信総合研究所季報, Vol. 48, No. 4, 23, 2002.
- 20 三宅互, 佐川永一, 川辺明, 喜岡理砂, "荷電粒子計測器較正装置", 通信総合研究所季報, Vol. 42, No. 2, 245, 1996.
- 21 MCPアッセンブリ技術資料, 浜松ホトニクス株式会社, 1991.
- 22 J. T. Gosling, J. R. Asbridge, S. J. Bame, and W. C. Feldman, "Effects of a long entrance aperture upon the azimuthal response of spherical section electrostatic analyzers", Rev. Sci. Instrum., 49, 1260, 1978.
- 23 T. Mukai, and W. Miyake, "Transmission characteristics and fringing field effect of a 270° spherical electrostatic analyzer", Rev. Sci. Instrum., 57, 49, 1986.
- 24 W. C. Feldman and E. Marsch, "Kinetic phenomena in the solar wind", in 'Cosmic winds and the heliosphere', 617, 1997.
- 25 R. P. Lin, "WIND observations of suprathermal electrons in the interplanetary medium", Space Sci. Rev., Vol. 86, 61, 1998.
- 26 G. Borrini, J. T. Gosling, S. J. Bame and W. C. Feldman, "Helium abundance enhancements in the solar wind", J. Geophys. Res., Vol. 87, 7370, 1982.
- 27 T. H. Zurbuchen, L. A. Fisk, N. A. Schwadron and G. Gloeckler, "Observations of non-thermal properties of heavy ions in the solar wind", in 'Acceleration and transport of energetic particles observed in the heliosphere: ACE 2000 symposium', 215, 2000.



み やけ 三宅 互

電磁波計測部門電離圏・超高層グループ主任研究員 理学博士  
宇宙天気



やま さき 山崎 敦

電磁波計測部門電離圏・超高層グループ特別研究員 理学博士  
地球惑星学