



## 講座 宇宙機用電気推進機のための計測法

# 2. 宇宙機用電気推進機のためのプローブ計測

## 2. Probe Measurement Methods for Study of Electric Propulsion

渡邊 裕樹

WATANABE Hiroki

宇宙航空研究開発機構

(原稿受付：2020年07月20日)

電気推進機自身の損失割合や宇宙空間での排気プラズマと宇宙機の相互干渉の予測、数値解析コードの検証などには、推進機から排気される推進剤イオンの特性をプローブにより計測する必要があります。本章では、推進剤イオンのプローブ計測器として代表的なガード電極付平面プローブ、逆電位アナライザ、 $E \times B$  プローブについて解説するとともに、すべてのプローブで必須の微小電流計測についても解説します。

### Keywords:

electric rocket propulsion, Faraday probe, retarding potential analyzer,  $E \times B$  probe, low-current measurement

### 2.1 はじめに

第1章で述べられた通り、電気推進機の推力発生の大半は推進剤イオンの噴射によるものなので、排気イオンの特性を計測し、把握することは推進機の放電状態や損失割合を予測する上で有効な手段になります。筆者はこれまでにホールスラストやイオンエンジンといった推進剤イオンを静電的に加速する静電加速型[1]の電気推進機の研究開発に従事してきました。放電チャンネル内で準中性的にイオン生成と加速が行われるホールスラストは、性能を把握するために、第4章で紹介されるように推力計測装置を用いて推力を計測します。推力計測により、投入した電気エネルギーが運動エネルギーにどの程度変換されたかを示すアノード効率を求めることができます。一方で、推力計測だけでは損失の内訳まで把握することはできません。

例えば、ホールスラストでは推進剤を100%電離し、加速することは困難です。このため、供給した推進剤の内、どの程度の推進剤が電離し、加速されたかを把握する必要があります。このためには静電プローブを用いてイオンビーム電流密度の空間分布を計測し、イオンビーム電流の総量を求める必要があります。加えて、イオンビームの空間分布からビームの発散角を求めることにより、宇宙機の加速・減速に寄与しない発散による損失を求めることができます。また、放電チャンネル内でのイオン生成にどの程度のエネルギーが費やされたかを予測するためには、イオンビーム電流の総量と放電電流の差分から、余分にアノードに流れた電子電流の値を算出する必要がありますし、中和電子がイオンビームを中和するのに要するエネルギーは、逆電位アナライザによりイオンエネルギーを、ラングミュアやエミッシブプローブのI-V特性から排気プラズマの電位を計

測し、放電電圧に対する割合を求める必要があります。加えて、多価イオン生成による損失や損耗に対する影響を予測するために $E \times B$  プローブにより多価イオンの生成量を計測する必要があります。より詳しいプローブ計測結果を用いたホールスラストの体系的な損失評価については、Brownらの論文[2]を確認ください。

一方、荷電分離によりイオンを加速するイオンエンジンの場合には排気されたイオンビーム電流が電気回路上で計測でき、イオンエネルギーも加速電圧でほぼ決まるため、推力計測やプローブ計測を行わなくても推力と損失割合を電流と電圧からある程度予測可能です。しかし、すべてのイオンが1価であるとの仮定が必要な点、また、イオンの発散による損失は考慮できないため、静電プローブによる発散角の算出や $E \times B$  プローブによる多価イオンの存在比の算出により、イオンビーム電流から算出した推力や損失割合の補正を行います[3]。

以上のように電気推進機の研究開発において、効率改善のために各種プローブによる排気プラズマ計測は有効です。また、プローブ計測はそれだけにとどまらず、人工衛星や探査機といった宇宙機に電気推進機を搭載する際には、推進機から排気される推進剤プラズマが宇宙機自身に衝突し、不必要なトルクやスパッタリングによる宇宙機表面の損耗、損耗物質の再付着による宇宙機表面の汚染が発生するため、プローブ計測により排気プラズマの密度の空間分布やエネルギーなどの素性を把握しておくことは、宇宙機の機能を維持する上で重要なことです[4]。加えて、プローブを挿入するのが困難な推進機内プラズマの挙動の把握や推進機の設計に使用される数値シミュレーションの検証や境界条件の設定にも排気プラズマの計測結果は活用

されます[5].

このため、プラズマ物理や核融合プラズマ分野の先人たちが構築してきた各種測定器の技術[6]をもとに、電気推進機からの排気プラズマの計測に適した各種プローブ形状の研究やその精度評価が推進機の研究開発とともに行われてきました。本章では、図1に外観を示す電気推進機用のガード電極付平面プローブ、逆電位アナライザ、 $E \times B$ プローブについて解説します。また、紙面の都合から、計測結果の処理や補正方法、計測精度の議論については文献を紹介するにとどめ、測定原理や計測結果の一例を説明した後、各プローブの製作方法について詳しく説明します。なお、計測結果の一例は過去に筆者が計測した小型ホルスラスタ[7]のものになります。

## 2.2 ガード電極付平面プローブ

電気推進機からの総イオンビーム電流の計測は、ビーム径に対して十分に大きな電極を推進機下流に設置し、負電圧に印加することによりイオン飽和電流を計測すれば、簡単に計測することができます。しかし、この方法の場合、電極材料がスパッタにより飛散し、推進機や真空チャンバーを汚染します。また、電極に衝突し、中性粒子に戻った残留推進剤が推進機の作動に影響を与える場合があります。加えて、イオンビームの発散角も計測できないため、一般的には、負電圧を印加した静電プローブを2軸の直線ステージや回転中心を推進機出口に合わせた回転ステージを使って掃引し、図2に示すようなある平面で

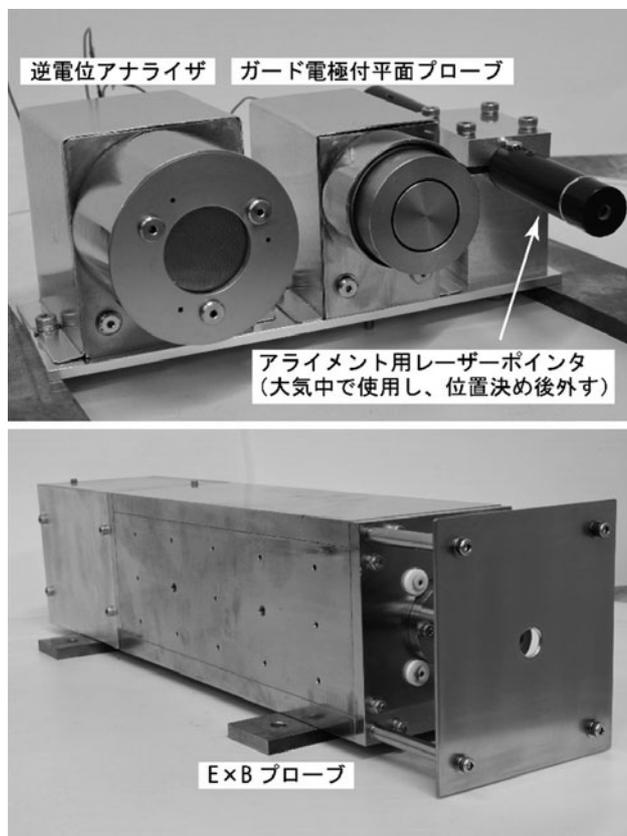


図1 各種プローブの外観写真。

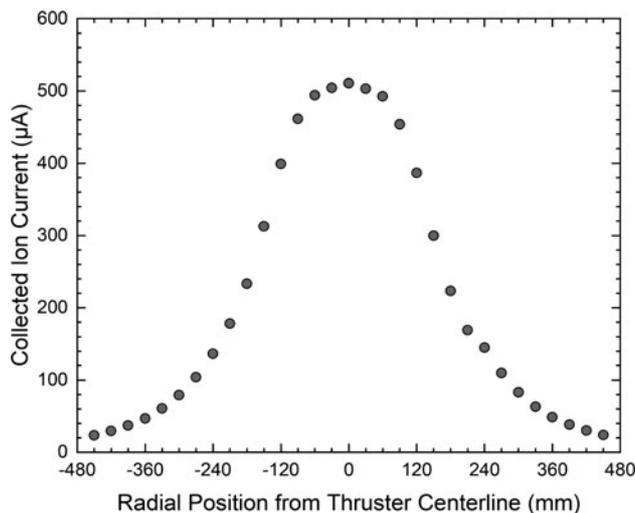


図2 ガード電極付平面プローブによる計測結果の一例。

のイオンビーム電流密度分布を計測し、積分により総イオンビーム電流や発散角を算出します。

空間的にプラズマ密度が大きく変化するイオンビーム電流密度を静電プローブで正確に計測するには、イオンの捕集面積を可能な限り一定に保つ必要があります。図3に示すようなシース端効果を抑制し、コレクタ電極表面積と同じ捕集面積を持ったシースを形成するためのガード電極付きの平面プローブ（電気推進機のコミュニティではこの静電プローブを「ファラデープローブ」と呼ぶことがあります）が良く使用されます。また、イオンビーム電流計測で一般的なファラデーカップ[8]も電気推進機の計測によく用いられますが、カップ内での残留推進剤とイオンの衝突による影響への懸念から、比較的大流量の推進剤を流すホルスラスタではガード付平面プローブが使われる傾向があります。一方で、真空ポンプの排気速度が十分でない場合には、一定量の推進剤が真空チャンバー内に残留し、推進機からの高速イオンと電荷交換衝突を起こし、低速イオンが発生、イオンビームが見かけ上広がるため、エネルギーに関係なく入射したイオンをすべて捕集するガード付平面プローブでは、真空チャンバー内圧力が高い場合に発散角の算出誤差が大きくなる傾向を持ちます。ファラデーカップは入口のコリメータにより指向性の弱い低速イオンがイオン捕集面に到達しにくい構造になっているため、電荷交換衝突による低速イオンの影響を受けにくい特性を持っています。

Mazouffreら[9]は、ガードの無い平面プローブ、ガード付平面プローブ、ファラデーカップの3つのプローブについて比較評価を行い、推進機作動時に  $10^{-3}$  Pa 以下の真空チャンバー内圧力を保持できる真空環境下であれば、ガード付平面プローブとファラデーカップのイオン電流密度の空間分布が一致することを確認しています。また、電荷交換衝突による低速イオンの除去を目的に磁場によるフィルタリング[10]を実施するなど、残留推進剤による影響やイオンビーム電流計測に適した静電プローブについては、現在でも研究課題の1つです。

本節では、構造が簡素で、筆者が製作したことがある

ガード付平面プローブについて詳細に解説します。なお、ラングミュアプローブやエミッシブプローブのI-V特性による排気プラズマの温度や電位計測も2.1節で述べた通りで重要ですが、製作で大きく躓くことがないと思われる点、測定原理や精度、注意点など本誌で過去に集中講座[11]が組まれており、Lobbiaら[12]やSheehanら[13]がラングミュアおよびエミッシブプローブによる電気推進機のプラズマ計測について総説論文を出していますので、そちらを確認ください。また、ガード付平面プローブについてはBrownら[14]が、測定原理や製作方法をはじめ、捕集面積の補正方法や真空チャンバー内の残留推進剤との衝突による計測誤差、プローブの掃引方法や推進機とプローブ相対位置の補正などを網羅的に解説した総説論文を出していますので、本講座を読んで興味を持たれた方はそちらを確認することをお勧めします。

ガード付平面プローブは図3に示すように、イオン電流を計測するコレクタ電極、シース端の広がりを抑制するガード電極、これら2つを保持する絶縁物と電極に電線を結線するためのボルトの頭などをプラズマに曝露しないよう全体を覆うハウジングから構成されています。コレクタとガードは二次電子放出による影響を同じにするため、同じ材質で製作する必要があります。また、高速で入射するイオンによるスパッタリングに耐えるため、耐スパッタ性の強い材料を使用します。さらに、ガード付平面プローブには二次電子放出を抑制する機能が備わっていないため、推進剤であるキセノンなどのイオンの入射に対する二次電子放出係数についての実験データが存在する材料を選定し、次節以降で解説する逆電位アナライザや $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ プローブなどによる計測結果から、二次電子放出による影響について補正[14]を行う必要があります。以上の観点から、コレクタおよびガード電極には純モリブデンや純タングステンが良く使われます。

コレクタとガードを固定する絶縁物は、各電極を構造的に支え、十分な電気絶縁性を持つ必要があります。コレクタ・ガード間の絶縁抵抗が低いとガードからコレクタへの漏れ電流が増加するため、イオンビーム電流が見かけ上増加し、計測誤差となります。このため、コレクタ・ガード間の絶縁抵抗は実験前後に絶縁抵抗計などにより、排気プラズマ・コレクタ間の抵抗に比べて十分に大きいことを確認する必要があります。また、イオンビームによりスパッ

タされ、飛散した真空チャンバー壁面材などにより絶縁抵抗が低下しないように、ハウジングによる保護やコレクタ・ガード電極間隙は図3のようなラビリンス構造にし、飛散物質の絶縁物上への堆積を抑制する必要があります。加えて、排気プラズマによりプローブは加熱されるため、耐熱性を考慮する必要があります。以上の観点から、絶縁物にはセラミックスを使用します。高熱伝導率、高耐熱衝撃の窒化ホウ素や高い強度を持つアルミナを使用するのが一般的ですが、加工コストが高くなります。このため、熱的な特性や機械的な特性は若干妥協して、マコール<sup>®</sup>などのガラス系のマシナブルセラミックスや熱的に耐えられるのであればPEEKなどの耐熱性樹脂を使用することも検討して良いと思います。これであれば、丸棒を購入し、大学の工作機械室で旋盤加工することができ、加工コストを抑制できます。

ハウジングもコレクタやガードと同様に、排気プラズマに曝露されるため、グラファイトやモリブデンなどの耐スパッタ性の強い材料を使用するに越したことはありません。しかし、ビームを正面から受けない点、また、各電極や絶縁物と違い計測精度に大きな影響を及ぼす部品ではないため、加工コストを抑制するために、実験環境を考慮しながら、SUS316などの入手性の良い非磁性のステンレスを使用するのも良いと思います。ステンレスであれば、工作機械室で円板と円筒をそれぞれ加工し、TIG溶接機で点付けすることにより、安価に自作することができます。

以上、ガード電極付平面プローブの各部品の材料について述べてきましたが、設計にあたって重要な寸法は、コレクタの外径( $2r_c$ )、コレクタとガードの間隙( $d_g$ )およびガードの外径( $2r_p$ )になります。図3に各寸法の設計指針[14]を示します。まず、コレクタ外径はイオンビーム電流密度の空間的な分解能により決まります。プローブを回転ステージに載せ、推進機の出口を中心軸に推進機出口から距離 $r$ で円弧掃引した場合、電流密度の角度分解能 $\theta$ は $2r_c = r\theta$ の関係から求まります。例えば、スラストから1 m下流で角度分解能1 degを得たい場合には、コレクタ外径は17 mm程度に設定する必要があります。次に、電極間隙は均一なシース面を形成する観点からの寸法決定となるため、排気プラズマのデバイ長 $\lambda_D$ の5~10倍以下に設定します。例えば、最大で $10^{16} \text{ m}^{-3}$ 、1 eVの排気プラズマを考えた場合、デバイ長は0.08 mm程度のため、間隙は0.5 mmに設定します。プローブを推進機に近づけると排気プラズマ密度は上昇し、より狭い間隙が要求されるので、加工精度やはめ合いによるズレを考慮しながら、計測距離と間隙については設定してください。最後に、ガード外径は薄いシース条件が有効になるよう排気プラズマのデバイ長の100倍以上に設定します。例えば、 $5 \times 10^{14} \text{ m}^{-3}$ 、1 eVが下限の排気プラズマの計測の場合には、デバイ長は0.33 mm程度ですので、ガード外径は34 mm程度に設定します。

プローブ長さ方向の寸法ですが、特に大きな制限はありません。しかし、Brownら[15]により電極間隙に入射したイオンのコレクタ側面での捕集が実験的に示唆されており、コレクタ電極の長さ方向をパラメータにした補正が推

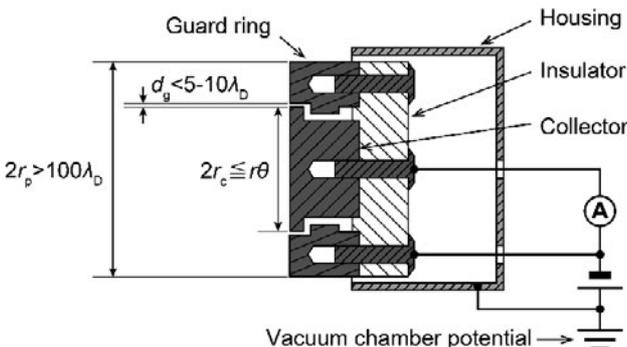


図3 ガード電極付平面プローブの概要。

奨されているため、絶縁物に固定するために必要な雌ねじが加工できる最小の長さにコレクタおよびガード電極は設定するのが良いと思います。また、ハウジングの長さは、電線の結線が十分に行え、それを覆える程度に設計する必要があります。

最後に、各部の配線やコレクタに流れるイオン電流計測については、逆電位アナライザや  $E \times B$  プローブと共通な点が多いため、2.5節にまとめますが、ガード付平面プローブはイオン飽和電流を測る機器ですので、コレクタおよびガードの負電圧をどの程度に設定すべきか、本格的な計測の前に印加電圧をパラメータに流れるイオン電流値を計測し、電流が飽和しているか確認する必要があります。通常であれば、 $-20\text{ V}$  以下にすれば十分に飽和します。また、ガード電極の効果を確認するために、飽和する電圧以下の領域で印加電圧を変更してもイオン電流が大きく変化しないことを確認してください。

### 2.3 逆電位アナライザ

図4に排気された推進剤イオンのエネルギー分布関数を計測するための逆電位アナライザの概要を示します。逆電位アナライザは、4枚の多孔グリッド電極とイオンコレクタ電極、それらを保持する絶縁スペーサやハウジングで構成されています。グリッド1は電位を浮遊にし、アナライザの電位が外に漏れださないように測定位置付近のプラズマ浮遊電位に設定します。グリッド2および4は直流電源により一定の負電圧を印加し、グリッド2は入射プラズマからの電子を排斥し、グリッド4は各グリッドやコレクタに入射したイオンによる2次電子放出を抑制するために用います。グリッド3は一定速度以下のイオンを排斥するフィルタとしての役割を持たせるため、直流電源により正電圧を印加、掃引します。なお、グリッド2および4の電位は十分に電子を排斥するために $-30\text{ V}$ 程度に設定し、グリッド3については予想されるイオンエネルギーの1.5倍程度の電圧まで掃引します。

2.1節で述べた通り、一般的に電気推進機の排気プラズマには多価イオンが含まれていますが、2.4節で示すように、排気イオンの90%は1価イオンが占めます。このため、価数によらず、単位電荷あたりのイオンの運動エネルギー

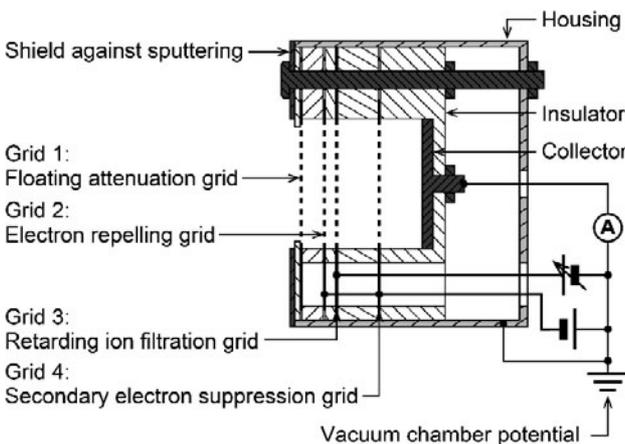


図4 逆電位アナライザの概要。

は一定と仮定した場合、イオンのエネルギー分布関数  $f(V)$  は計測したイオン電流  $I_{\text{coll}}$  をグリッド3の掃引電圧  $V_{\text{bias}}$  で微分することにより、以下のように求まります。

$$\frac{dI_{\text{coll}}}{dV_{\text{bias}}} = -A_c \frac{n_e e^2 q_{\text{eff}}^2}{m_i} f(V) \quad (1)$$

ここで、 $A_c$  はイオン捕集面積、 $n_e$  は電子密度、 $m_i$  は推進剤質量です。また、実効的なイオンの価数  $q_{\text{eff}}$  は、 $j$  価のイオンの密度  $n_j$  と価数  $q_j$  を用いて、以下のように定義します。

$$q_{\text{eff}}^2 = \frac{\sum_j (n_j q_j^2)}{\sum_j n_j} \quad (2)$$

図5に逆電位アナライザによる計測結果の一例として、掃引電圧に対する捕集電流のプロットとその微分を示します。なお、図5ではイオンエネルギーのピークを検出しやすいように、Savitzky-Golay法により計測値を平滑化し、数値的に微分を行っています。電気推進機の損失を予測する際には、1つの方法として、このイオンエネルギーのピークを最確イオンポテンシャル  $V_{\text{mp}}$  として求め、静電加速の実効的な加速電圧  $V_a$  を算出します。ただし、図4に示すように逆電位アナライザの基準電位は多くの場合、真空チャンバ電位（接地電位）にしますので、真空チャンバ電位に対する排気プラズマ電位  $V_p$  をラングミュアやエミッシブプローブのI-V特性から求め、実効的な加速電圧を求める際にはその分を除く必要があります ( $V_a = V_{\text{mp}} - V_p$ )。

以上のように、逆電位アナライザは電場によってイオンをフィルタリングするため、計測結果から1価と多価を区別することはできず、あくまで単位電荷あたりのエネルギー分布関数を計測していることに注意してください。また、平行平板電極間に電圧を印加し、入射したイオンの軌道を電場により偏向し、イオンのエネルギー分布関数を計測する装置[16]も電気推進機の排気プラズマ計測では使用されており、Bealら[17]が2つの測定器を使った逆電位アナライザの相対評価を行っていますので、逆電位アナライザの計測精度についての議論はそちらを確認してください。

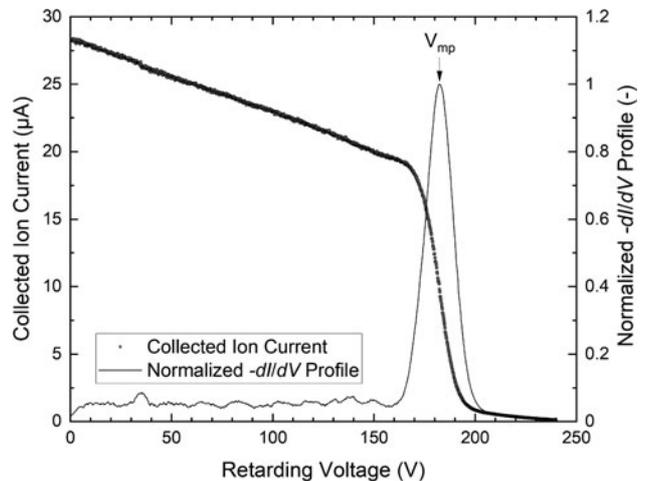


図5 逆電位アナライザによる計測結果の一例。

電子やイオンをフィルタリングするグリッド電極には、市販の金属メッシュやイオンスパッタ装置の加速グリッドのような多孔加工をした金属板を使用します。イオンビームが衝突する部品のため、耐スパッタ性の高いものを使用するのが望ましいですが、市販されている金属メッシュはステンレス製が多く、モリブデンなどの多孔加工も高コストのため、SUS316などの非磁性のステンレスが良く用いられます。また、ステンレスであれば化学エッチングにより安価に多孔加工が可能で、電位を与えるための電線を溶接により簡単に取り付けることが可能になります。フィルタリングされたイオンを受けるコレクタ電極も耐スパッタ材のモリブデンなどで製作するのが望ましいですが、ガード電極付平面プローブに比べ、図5のように電流としてはnAからμAオーダーと、グリッドにより入射するイオンの量はかなり絞られますので、ステンレスや銅で製作することもあります。絶縁スペーサは2.2節の静電プローブと同様の理由から、窒化ホウ素やアルミナが望ましいですが、使用条件によってはガラス系マシナブルセラミックスや耐熱性樹脂の使用を検討しても問題ありません。ハウジングに関しても同様にSUS316などで問題ありませんが、イオンビームが直撃する正面部分のシールド機能を担う箇所には、耐スパッタ材であるグラファイトやモリブデンの円板を用いるのが推奨されます。

逆電位アナライザで重要な寸法は、イオンを通す空間の大きさを決めるメッシュの目開き $l_g$ もしくはグリッド孔径 $2r_g$ 、排気プラズマを荷電分離しイオンを減速する領域であるグリッド2とグリッド3の距離 $d_{2-3}$ になります[18]。目開きや孔径がデバイ長より大きい場合には、孔の中心での電位が低下するため、一様な電場を維持するために $l_g < 2\lambda_D$  や  $2r_g < 2\lambda_D$  に設定する必要があります。2.2節で述べた通り、最も濃いプラズマ計測時でデバイ長は0.08 mm程度ですので、200メッシュ以上のステンレスメッシュや孔径0.1 mm程度のグリッドが良く使われます。また、グリッド3よりコレクタ側はイオンのみが存在する領域になるため、空間電荷制限を回避するために、上流からのイオンの量を絞る観点から、グリッドの開孔率は30%程度に設定するのが一般的です。

グリッド間距離は空間電荷制限を回避するために、以下の関係から設定します。

$$d_{2-3} < \frac{2}{3} \left[ \frac{2}{\exp(-1)} \right]^{1/4} \left( \frac{eV_{2-3}}{T_e} \right)^{3/4} \lambda_D \quad (3)$$

ここで $V_{2-3}$ はグリッド2・グリッド3間の電位差になります。先に述べたようにグリッド2には電子を十分に排斥するために-30 V程度の電圧を一般的に印加しますので、 $V_{2-3}$ の最小値は30 V程度になります。また、排気プラズマの電子温度を1 eV、デバイ長を0.08 mmとすると、グリッド間距離は1 mm程度に設定する必要があります。逆電位アナライザのグリッドはイオン光学系ですので、より正確に電場の張り出しやイオン軌道を把握し、最適な各グリッドの孔径や各グリッド間距離を設定するには数値シミュレーション[19]の助けを借りる必要があります。

## 2.4 ExB プローブ

図6に排気プラズマ中の多価イオンの存在比を計測するためのE×Bプローブの概要を示します。E×Bプローブは上流側のコレクタで直進するイオンビームのみをプローブ内に入射させ、ビームに対して垂直かつ互いに直交する電場と磁場により形成されたウィーンフィルタによりイオン速度 $u$ の選別を行い、再度下流のコレクタで直進性を担保し、最下流のイオンコレクタにより各イオン速度のイオン電流を計測する機器です。ウィーンフィルタ部ではローレンツ力 $F$ によりイオンの軌道は変化しますが、電場 $E$ と磁場 $B$ の影響が相殺するローレンツ力がゼロとなる速度を持ったイオンは直進します。この通過イオン速度 $u_{pass}$ は以下の関係から求められます。

$$F = q_i e (\mathbf{E} - \mathbf{u} \times \mathbf{B}) = 0 \quad (4)$$

$$u_{pass} = \frac{E_y}{B_z} = \frac{V_{bias}/d_p}{B_z} \quad (5)$$

ここで、各ベクトルは一方向の成分のみを持ちます。

$$\begin{aligned} \mathbf{u} &= (u_x, 0, 0) \\ \mathbf{E} &= (0, E_y, 0) \\ \mathbf{B} &= (0, 0, B_z) \end{aligned} \quad (6)$$

通過させるイオンの選別は式(5)より電場か磁場を変化させる必要がありますが、磁場は永久磁石により一定の強さを印加し、距離 $d_p$ を保った平行電極平板間に印加する電圧 $V_{bias}$ を変化させることにより印加電場を調整するのが計測実施の観点から容易なため、一般的に採用されます。

静電加速型の電気推進機の場合、推進剤質量や加速電圧は既知もしくは予測しやすいため、以下の式より*j*価イオンの速度 $u_j$ を予測することができます。

$$u_j = \sqrt{\frac{2q_j e V_a}{m_i}} \quad (7)$$

例えば、キセノンを推進剤とした放電電圧200 V作動のホールスラスタの場合、推進剤質量は $2.18 \times 10^{-25}$  kg、実効的な加速電圧は180 V程度であるので、イオン速度は16.3 km/s (1価)、23.0 km/s (2価)、28.2 km/s (3価)となります。このため、E×Bプローブにより各イオン速度でのイオン電流を計測することにより、図7のように価数分離することが可能となり、各価数の相対的なイオン電流値

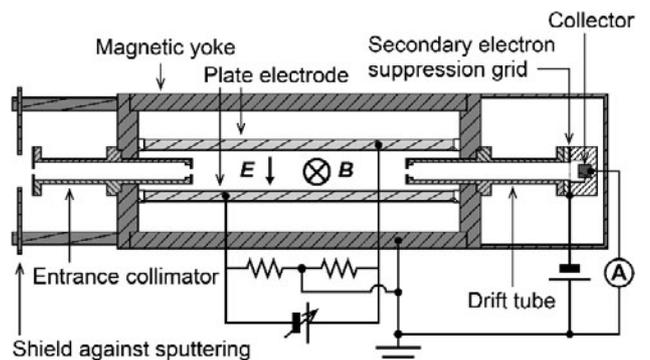


図6 ExB プローブの概要。

や存在比を求めることができます。存在比を求める際には各価数のイオン電流のピーク値を求める方法、正規分布や三角形でのフィッティングにより面積を求める方法があり、Shastry ら [20] が真空チャンバー内の残留推進剤との衝突による計測誤差とともに、データ解析方法による誤差について言及しているのです。そちらを確認してください。

ウィーンフィルタ部に一様な方向磁場を形成するためには直方体のヨークを構築する必要があります。ヨークには磁気特性が良好な電磁軟鉄を使用しますが、柔らかく、加工が難しいため、重量は増加しますが入手性が良く、加工がしやすい SS400 などの炭素が多く含まれた構造鋼を使用しても問題ありません。ただし、ヨーク内での磁気飽和が起らないよう磁場シミュレーションにより各寸法を決定してください。また、常に真空中にプローブを置いておく場合は問題ありませんが、大気で保管する可能性がある場合には、防錆の観点から無電解ニッケルめっきを加工後に実施することをお勧めします。また、上下流のコリメータもフィルタ内に挿入する場合には、磁場の浸透を防止するためにヨークと同じ材質で製作します。磁場の発生には、許容温度に収まるようであれば、入手性が良く、大きな板状のものがラインナップ化されているフェライト磁石をお勧めしますが、耐熱性が必要な場合にはサマリウムコバルト磁石を用いる必要があります。例えば、電極間距離を 10 mm とすると、先に挙げた数十 km/s のイオンを選別するのに電極間に印加する電圧を 50 V 以下に抑えようとした場合、式 (5) より、磁場は 0.1 T 程度となりフェライト磁石でも簡単に形成できます。一方で、広範囲のイオン速度を計測する場合に、電場の強化だけでは対応できない場合には、永久磁石ではなく、電磁石による磁場発生を検討してください。

$\mathbf{E} \times \mathbf{B}$  プローブは後述するエネルギー分解能を高めるため、コリメータにより入射イオンの量をかなり絞り、イオン電流は pA から nA オーダーになります。このため、ウィーンフィルタ部での偏向により平板電極に入射するイオンによるスパッタ量は微少のため、電極には軽量で加工性が良いジュラルミンなどのアルミ材料を使っても問題ありません。また、一様電場を発生させるため、電極は十分な剛性を持ち、側面に雌ねじが加工できる程度の板厚を設定してください。なお、コレクタやグリッド電極、入口のシールドの材料の選定は 2.3 節と同様です。

$\mathbf{E} \times \mathbf{B}$  プローブは上下流にコリメータを配置し、可能な限り直進イオンのみをコレクタに入射するように設計しますが、孔の直径やコリメータ部の長さは有限のため、ウィーンフィルタ部で若干軌道が曲がったイオンもコレクタに入射します。このため、図 7 に示すように、計測されるイオン電流は、あるピークイオンエネルギー  $V_i (= 1/2 m_i u_i^2)$  に対して、あるエネルギーの幅  $w$  を持ちます。この  $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$  プローブのエネルギー分解能  $w$  は以下の関係式 [21] から求められます。

$$w \leq \frac{d_p V_i}{l_f} \left( \frac{a_1 + a_2}{l_c} + \frac{a_3 + a_4}{l_m} \right) \quad (8)$$

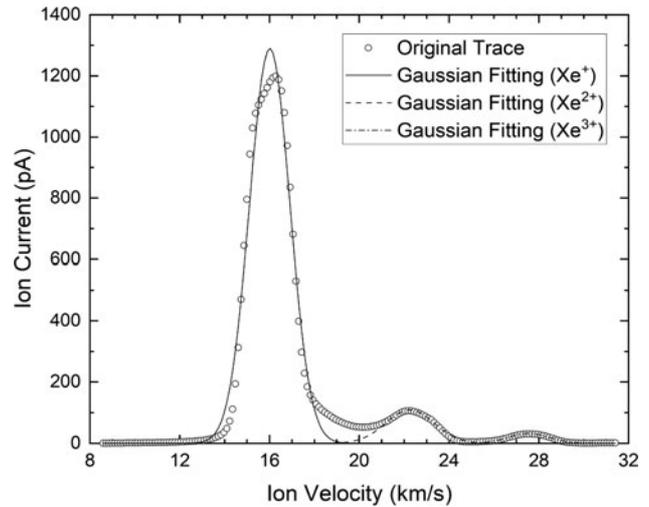


図 7  $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$  プローブによる計測結果の一例。

ここで、 $a_1, a_2, a_3, a_4$  はそれぞれ上流コリメータの入口孔径と出口孔径、下流コリメータの入口孔径と円筒コレクタの外径になります。また、 $l_f, l_c, l_m$  はそれぞれウィーンフィルタ部の長さ、上流コリメータの長さ、下流コリメータの長さになります。式 (8) より、分解能を上げるためには各孔径を小さくするか、各部の長さを大きくする必要がありますが、孔径を小さくするとコレクタへの入射イオン電流が減少し、計測が困難になり、長さを大きくするとプローブの重量増加を招きます。このため、多価イオンのピークが検出できる分解能を検討し、精度よく計測可能なイオン電流と許容できるプローブ重量を踏まえながら、各寸法を決定してください。また、プローブに入射したイオンは壁面で中性粒子に戻りますが、プローブ外に流出しにくいいため、プローブ内でのイオンとの衝突を抑制するために、ヨーク側面にガス抜き孔をいくつか開けることをお勧めします。

これまで述べてきた通り、 $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$  プローブはウィーンフィルタ部で直進したイオンを計測する装置です。このため、上流コリメータと下流コリメータの軸合わせが非常に重要です。組み上げ時には真直度が高い棒状の治具などを使い、軸合わせを行ってください。一方で、どんなに軸合わせをしても加工精度やはめ合いによる軸ずれは起こるため、その分、イオン電流のピークが出るイオン速度の値は不確かなものになります。このため、今回は解説記事のため厳密性を求めずに図 7 のように横軸をイオン速度としましたが、一般的には  $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$  プローブの横軸は電極間に印加した電圧を取り、多価イオンの存在比のみを算出するようにし、イオンエネルギーの情報については逆電位アナライザから算出します。ただし、軸ずれによるイオン速度は価数に関係なくオフセットするため、逆電位アナライザで得られない 1 価と 2 価で単位電荷あたりの運動エネルギーは同じかなど、相対的な議論には  $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$  プローブの計測結果は用いることができます。

## 2.5 微小電流計測

これまで解説してきた通り、どのプローブを用いる場合

でもイオン電流の計測は非常に重要です。電流計測ではじめに思い浮かぶのが、図8(a)のように計測したい電流ラインに既知の抵抗値を持ったシャント抵抗 $R_s$ を挿入し、そこに発生する電圧降下 $V_s$ を計測することにより、流れている電流( $I_s = V_s/R_s$ )を算出する方法だと思えます。シャント抵抗方式では計測対象の電流が小さくなる場合、電圧降下を一定するにはシャント抵抗の値を大きくする必要があります。しかし、電圧降下を計測する電圧計の入力インピーダンスはシャント抵抗より十分に大きくしなければならぬため、シャント抵抗と電圧計を結線する電線や入力部の絶縁抵抗を高く保つ必要があります。また、実験室でよく使用するデータロガーやオシロスコープの入力インピーダンスは数~数十M $\Omega$ のため、ガード電極付平面プローブのmA- $\mu$ Aオーダーの電流計測が限界です。このため、逆電位アナライザや $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ プローブのpA-nAオーダーの電流を計測する場合には、シャント抵抗と電圧計の間に入力抵抗の高い直流増幅器を挿入することも考えられますが、図8(b)に示すようなオペアンプを使ったフィードバック方式が良く使用されます。

フィードバック方式の電流計測は市販のピコアンメータで採用されています[22]。この方式では計測する電流はオペアンプの反転入力・出力間に接続されたフィードバック抵抗 $R_f$ にほとんど流れるため、オペアンプの出力電圧 $V_s$ を計測することによって流れている電流( $I_s = -V_s/R_f$ )を算出します。手元にKeithleyの6400シリーズやエーディーシーの5350などのピコアンメータがあれば、それを使用すればよいですが、無い場合には購入するか、自作する必要があります。フィードバック方式の設計で最も重要なことは計測する電流に比べて、十分小さい入力バイアス電流のオペアンプ、例えば、AD549JHZなどを使用することです。このほかにどのような素子を使用すべきか、また、オペアンプの発振防止のためにどのようなキャパシタを挿入すべきか、文献[23]などを参考にしてください。また、反転入力端子を基板にはんだ付けすると基板を介した漏れ電流が発生し、フィードバック抵抗以外の電流経路ができるなど、実装についても注意すべき点がありますので文献[22, 23]などを参考にしてください。

以上の通り、各プローブで計測される電流値は非常に小さいので、配線にも注意が必要です。イオン電流計測以外のプラズマのフィルタリングのための電極への配線は、真空中でのアウトガスが少ないふっ素樹脂電線の単線をツイストさせて実施しても問題ありません。一方、イオン電流が流れるラインは推進機や真空ポンプなどからの誘導や放射ノイズを可能な限り遮断するために同軸ケーブルを使用

することをお勧めします。電気推進機を試験する真空チャンパーは推進機の動作を担保するために大型になるため、真空フィードスルーからプローブまでの配線は長くなります。加えて、チャンパー内で回転ステージなど駆動装置にプローブを載せるために配線はさらに長くなります。このため、各プローブの背面の可能な限り直近でBNCやSMAなどの同軸コネクタを取り付け、真空チャンパー内は同軸ケーブルで配線してください。真空チャンパー内の配線はカプトン被覆の同軸ケーブルなどが市販されていますが、費用とアウトガスの影響のバランスを見ながら、耐熱性に注意し、RG58などの一般用途の同軸ケーブルの使用を検討しても良いと思います。また、フィードスルーに関しても可能であれば同軸コネクタのものを使用するのが望ましいです。加えて、同軸ケーブルで内部導体から外部導体に流れる漏れ電流によるオフセットが大きく、さらに変動する場合にはドライビングガードと三重同軸ケーブルの使用[22]も検討してください。最後に同軸ケーブルを曲げたり、振動させたりした場合に発生する摩擦電気効果による微小電流など様々なノイズ源がありますので、文献[24]などを確認しながら、真空チャンパー内での同軸ケーブルの這わせ方にも注意をしてください。また、プラズマ実験におけるノイズに関しては本誌で過去に講座[25]が掲載されていますので、そちらを一読ください。

## 2.6 おわりに

以上、電気推進機の排気プラズマを計測する代表的なプローブについて材料選定や設計に重きを置いて解説してきました。本章の内容が学部生や大学院生といったはじめて研究活動に取り組む方の計測器製作の助けになれば幸いです。また、MPDスラスタやパルスプラズマスラスタなどの電磁加速型の電気推進機で使用する磁気プローブ[26]や電気推進機内の高密度プラズマを計測するための高速掃引機構を備えた静電プローブ計測装置[27]など、それぞれの用途に特化したプローブも研究開発されていますので、参考文献を確認していただければ幸いです。

## 参考文献

- [1] D. Goebel and I. Katz, *Fundamentals of Electric Propulsion* (Wiley, 2008), p. 3.
- [2] D. Brown *et al.*, *J. Propul. Power* **25**, 1163 (2009).
- [3] 荒川義博 他：イオンエンジンによる動力航行（コロナ社，2006），p.113.
- [4] T. Muranaka and Y. Inanaga, *Trans. JSASS Aerospace Tech. Japan* **16**, 366 (2018).
- [5] J. Boeuf, *J. Appl. Phys.* **121**, 011101 (2017).
- [6] I. Hutchinson, *Principles of Plasma Diagnostics* (Cambridge University Press, 1987), p. 6.
- [7] H. Watanabe *et al.*, *Acta Astronaut.* **166**, 227 (2020).
- [8] G. Gerdin *et al.*, *J. Appl. Phys.* **52**, 3269 (1981).
- [9] S. Mazouffre *et al.*, *Proc. 35th IEPC, IEPC-2017-336* (2017).
- [10] J. Rovey *et al.*, *Rev. Sci. Instrum.* **77**, 013503 (2006).
- [11] 雨宮 宏：プラズマ・核融合学会誌 **81**, 482 (2005).
- [12] R. Lobbia and B. Beal, *J. Propul. Power* **33**, 566 (2017).
- [13] J. Sheehan *et al.*, *J. Propul. Power* **33**, 614 (2017).

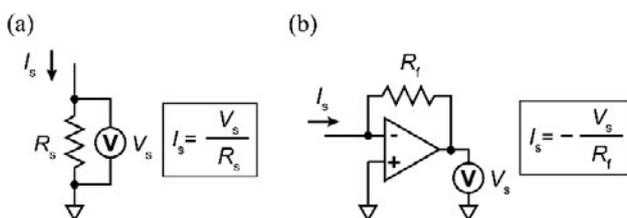


図8 微小電流の計測方法。

- [14] D. Brown *et al.*, J. Propul. Power **33**, 582 (2017).  
[15] D. Brwon and A. Gallimore, Rev. Sci. Instrum. **81**, 063504 (2010).  
[16] C. Farnell *et al.*, J. Propul. Power **33**, 638 (2017).  
[17] B. Beal and A. Gallimore, Proc. 28th IEPC, IEPC-2003-035 (2003).  
[18] C. Marrese *et al.*, Proc. 25th IEPC, IEPC-97-066 (1997).  
[19] 船木一幸 他：プラズマ・核融合学会誌 **90**, 234 (2014).  
[20] R. Shastry *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **80**, 063502 (2009).  
[21] S. Kim, Ph. D Dissertation, The University of Michigan (1999).  
[22] 鈴木直司：応用物理 **70**, 868 (2001).  
[23] 本多信三：トランジスタ技術 SPECIAL **126**, 87 (2014).  
[24] 内山正敏：計測と制御 **44**, 681 (2005).  
[25] 井 通暁：プラズマ・核融合学会誌 **95**, 563 (2019).  
[26] K. Polzin *et al.*, J. Propul. Power **33**, 659 (2017).  
[27] J. Hass *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **71**, 4131 (2000).



わた なべ ひろ き  
渡 邊 裕 樹

宇宙航空研究開発機構・研究開発部門・主任研究開発員、首都大学東京大学院・システムデザイン研究科・博士後期課程を修了(博士(工学))。研究分野は宇宙推進工学、

特にホールスラストやイオンエンジンをはじめとした電気推進機の性能および信頼性向上に関する研究を進めています。今年4月から現職に就き、日本の宇宙開発の発展に貢献できるよう日々精進しています。