

# RPA によるイオンスラスタおよびホールスラスタ 噴出イオンビームのエネルギー分布評価

## Evaluation on Ion Beam Energy Distribution in Ion Thruster and Hall Thruster by RPA

○青山 周平・杉山 立・野末 直暉・竹ヶ原 春貴（首都大）

○Shuhei Aoyama・Tatsuru Sugiyama・Naoki Nozue・Haruki Takegahara（Tokyo Metropolitan University）

### Abstract（概要）

In recent years, the number of electric propulsion installed in commercial satellites is increasing. In addition, due to the increase in generated electric power of artificial satellites and improvement in thrust efficiency, places of activity for electric propulsion are expanding. In electric propulsion, Knowing the plasma condition of the plume is important for evaluating the performance of electric propulsion. So, we measured and compared Ion Energy Distribution Function (IEDF) of Ion Thruster and Hall Thruster(TAL) by Retarding Potential Analyzer (RPA). As a result, a characteristic difference due to its propulsion principle was observed in both IEDFs.

### 1. 研究背景および目的

電気推進は、化学推進に比べ高比推力であるため、打ち上げコストを低下することができ商用衛星への搭載数が年々増加している。また、発生電力の増加、推進機の効率の向上による大推力化し電気推進の活躍の場が拡大している。電気推進の基本的な推進原理はプラズマ中のイオンを電気エネルギーで加速噴出し、その噴出イオンビームの反作用により推力を得る。そのため電気推進において噴出プルームのプラズマ状態を知ることは推進機の性能評価するうえで重要である。

そこで本研究の目的は、プラズマ診断の一つである Retarding Potential Analyzer (RPA)を用いて電気推進機の噴出イオンビームのイオンエネルギー分布関数 (Ion Energy Distribution Function: IEDF)を測定し評価する。また、電気推進機についてはホールスラスタとイオンスラスタの2種類を用い、比較する。

### 2. 実験装置

**2.1 ホールスラスタ (TMU-066)** 本研究室で製作されたアノードレイヤ型ホールスラスタ (TMU-066)を使用した。図1に TMU-066の外観図と断面図を示す。チャンネル外径が66 mm、チャンネル内径が38 mmである。磁場印加用に中心部に1本（インナーコイル）、外周部に6本（アウターコイル）のソレノイドコイルを配置されている。イ

ンナーコイル、アウターコイルの各コイル電流を変更することでチャンネル内磁場形状、強度が変更できる。アノード形状はホローアノードとなっている。

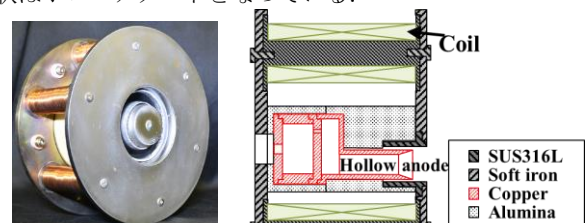


図1 TMU-066の外観図と断面図

**2.2 イオンスラスタ (TRS-12)** 本研究室で製作されたカスプ磁場型イオンスラスタ (TRS-12)を使用した。図2に TRS-12の外観図と断面図を示す。カスプ型の磁場形成にはサマコバ磁石を用いている。グリッド直径は120 mmである。グリッド構成はスクリーングリッドとアクセルグリッドの2枚構成であり、ディッシュ加工してある。またサマコバ磁石の熱減磁を防ぐため、放電室周りには通水管が巻かれており、実験時は冷却水を約2 l/min流している。

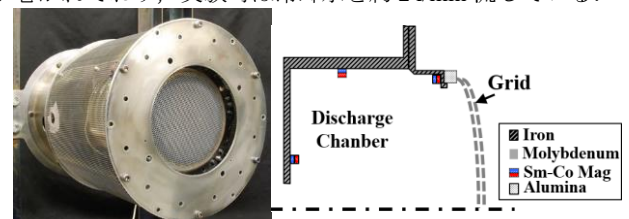


図2 TRS-12の外観図と断面図

**2.3 Retarding Potential Analyzer (RPA)** 図3にRPAの外観図, 図4にアイソメ図を示す。RPAは, 4枚のメッシュ状の金属グリッドとコレクタから構成されている。ブルーム侵入側からグリッドをG1, G2, G3, G4, コレクタをCとする。グリッドのメッシュ数, 開孔率は, G1が80, 18.8%, G2, 3, 4が200, 34%である。G1は, 電位的に浮かせることでRPA内部の電位がプラズマ空間への擾乱を防ぐ。また, RPA内のデバイ長を大きくするために, 開孔率の小さいグリッドを用い, RPA内部に侵入するプラズマを減少させている。G2は負電位にすることで電子の侵入を防いでいる。G3は, 0から正電位を掃引し, 印加電位よりも小さいエネルギーのイオンを遮断している。G4は, 負電位にすることで二次電子を跳ね返している。Cは, すべてのグリッドを通過した正イオンを捕集する。捕集しやすくするために負電位を印加している。IEDFは式(1)より求めた。ここで $I_{col}$ はRPAのコレクタ電流,  $V_3$ はRPAのG3のグリッド電圧である。

$$IEDF = -\frac{dI_{col}}{dV_3} \quad (1)$$

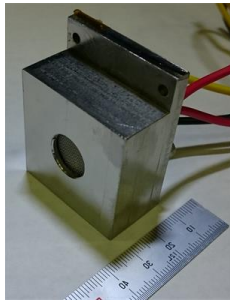


図3 RPAの外観図

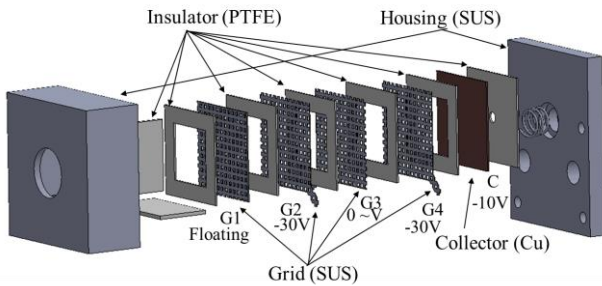


図4 RPAのアイソメ図

**2.4 真空チェンバ (しんかい 6500)** 真空チェンバは, 長さ3.2 m, 直径1.6 mのSUS304製の円筒型である。低真空排気にロータリーポンプ(RP)とメカニカルブースターポンプ(MBP), 高真空排気にクライオポンプ(CP)を使用した。クライオポンプの排気速度は, 28,000 l/sであり, 到達真空度は,  $7.5 \times 10^{-9}$  Torrである。

### 3. 実験条件

**3.1 TMU-066の実験条件** TMU-066の実験条件を表1, 実験構成を図5に示す。ツェナー機構はTMU-066とカソードを接地電位から浮かせるために挿入されている。

カソードはIon-Tech製のホローカソードHCN-252を使用した。アノード電圧と磁場印加用コイルの電流を変化させたときのIEDFを取得した。RPAの設置場所はホールスタスタ出口から噴出ブルーム下流250 mmである。実験時の真空度は $9.0 \times 10^{-6}$  Torrである。 $m_a$ はアノードガス流量,  $V_a$ はアノード電圧,  $I_{ci}$ はインナーコイル電流,  $I_{co}$ はアウターコイル電流,  $B_{max}$ はチャンネル内径方向最大磁束密度,  $m_c$ はカソードガス流量,  $I_k$ はキーパー電流,  $I_a$ はアノード電流,  $I_c$ はカソード電流である。

表1 TMU-066の実験条件

TMU-066		
Gas	Xe	
$m_a$ , sccm	10.0	
$V_a$ , V	20.0	300
$(I_{ci}, A, I_{co}, A, B_{max}, mT)$	(0.025, 0.1, 3.08), (0.05, 0.2, 5.51), (0.075, 0.3, 7.55), (0.1, 0.4, 8.77)	(0.05, 0.2, 5.51)
Cathode		
Gas	Xe	
$m_c$ , sccm	1.	
$I_k$ , A	0.30	

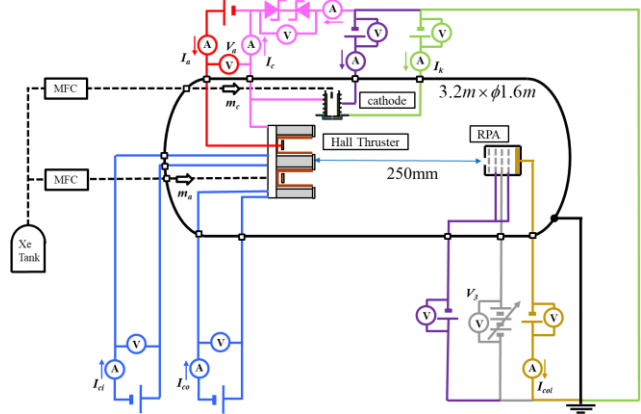


図5 TMU-066の実験構成

**3.2 TRS-12の実験条件** TRS-12の実験条件を表2, 実験構成を図6に示す。カソード, 中和器はIon-Tech製のホローカソードHCN-252を使用した。ビーム電圧とアクセルグリッド電圧を変化させたときのIEDFを取得した。RPAの設置場所はアクセルグリッドから噴出ブルーム下流250 mmである。実験時の真空度は $6.0 \times 10^{-6}$  Torrである。 $m_{mpf}$ は放電室ガス流量,  $I_d$ は放電電流,  $V_b$ はビーム電圧,  $V_{ac}$ はアクセルグリッド電圧,  $m_{nbc}$ カソードガス流量,  $I_{mk}$ はカソードキーパー電流,  $m_{nbc}$ は中和器ガス流量,  $I_{nk}$ は中和器キーパー電流である。

表2 TRS-12の実験条件

TRS-12			
Gas	Xe		
$m_{mpf}$ , sccm	4.0		
$I_d$ , A	1.50		
$(V_b, V, V_{ac}, V)$	(200, 200), (300, 300), (400, 400)		
Cathode		Neutralizer	
Gas	Xe	Gas	Xe
$m_{mhc}$ , sccm	0.80	$m_{nhc}$ , sccm	1.0
$I_{mk}$ , A	0.30	$I_{nk}$ , A	0.30

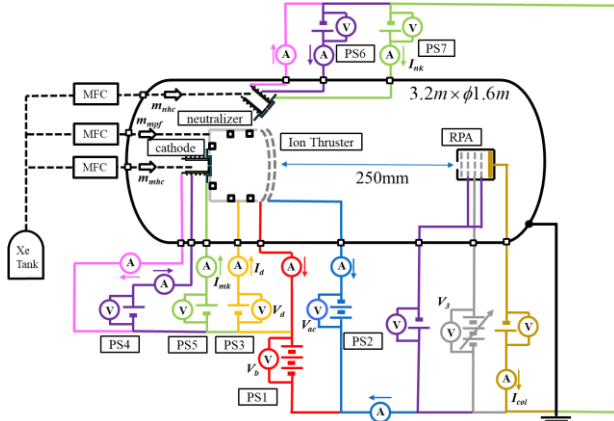


図6 TRS-12の実験構成

**3.3 RPAの実験条件** G2とG4は-30V, Cは-10Vを印加し, G3は0から正電位を手動で掃引した. 各条件において3回測定し,式1よりIEDFを求めた. 今回は, 各条件におけるIEDFを比較するために各IEDFのピーク値を1として規格化(raw)した. 次に, その規格化した3回分のrawデータをMatlabの近似曲線ツールで平滑化スプラインに近似し1つの近似曲線(spline)を求めた. splineからピークエネルギー, 5%幅を求めた. ここで5%幅とは, イオンエネルギーの分布の広がり进行评估するために用いた指標である. ピークに対して5% (IEDFの0.05)における横軸の幅を5%幅とする. (図7参照)

#### 4. 実験結果

**4.1 TMU-066の実験結果**  $B_{max}=5.51$  mTに固定し,  $V_a$ を変化させたときのTMU-066のIEDFを図7に示す. ピークエネルギー, 5%幅を表3に示す. 表3のピークエネルギーの%表示については $V_a$ に対するピークエネルギーの割合を示している.

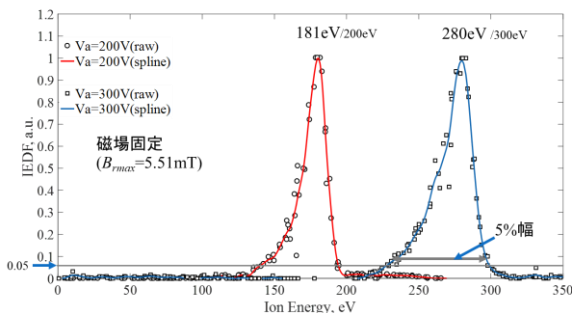


図7 TMU-066のIEDF ( $B_{max}$ 固定)

表3 TMU-066のピークエネルギーと5%幅 ( $B_{max}$ 固定)

	$V_a=200V,$ $B_{max}=5.51$ mT	$V_a=300V,$ $B_{max}=5.51$ mT
ピークエネルギー, %	90.5	93.3
5%幅, eV	57	72

次に,  $V_a=200$  Vに固定し,  $B_{max}$ を変化させたときのIEDFを図8に示す.  $\Delta$ は放電振動の大きさを表す指標であり, 式(2)で表せる. ここで $\tau$ は放電電流波形の計測時間である.

$$\Delta = \frac{RMS}{\bar{I}_a} = \frac{1}{\bar{I}_a} \sqrt{\frac{\int_0^\tau (I_a - \bar{I}_a)^2 dt}{\tau}}, \quad \left( \bar{I}_a = \frac{\int_0^\tau I_a dt}{\tau} \right) \quad (2)$$

ピークエネルギー, 5%幅,  $\Delta$ を表4に示す.  $\Delta$ と5%幅は $B_{max}$ に対して同様な挙動を示している.  $\Delta$ とピークエネルギーは,  $B_{max}$ に対して逆の挙動を示している.

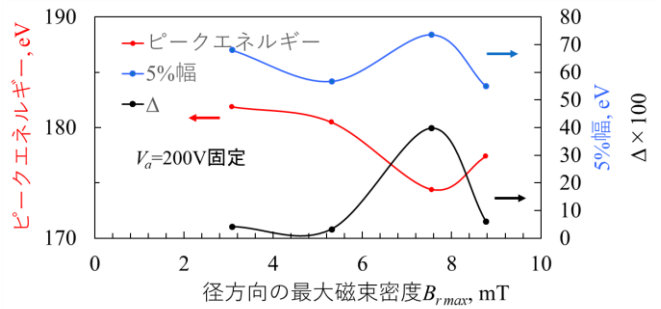


図8 TMU-066のピークエネルギーと5%幅 ( $V_a$ 固定)

表4 TMU-066のピークエネルギーと5%幅と $\Delta$  ( $V_a$ 固定)

	$V_a=200$ V, $B_{max}=3.22$ mT	$V_a=200$ V, $B_{max}=5.51$ mT	$V_a=200$ V, $B_{max}=7.42$ mT
ピークエネルギー, %	91.0	90.5	87.2
5%幅, eV	68	57	74
$\Delta$ , a.u.	0.0417	0.0323	0.398

**4.2 TRS-12の実験結果**  $V_b$ を変化させたときのIEDFを図9に示す. ピークエネルギー, 5%幅を表5に示す. 表5のピークエネルギーの%表示については $V_b+V_d$ に対するピークエネルギーの割合を示している.

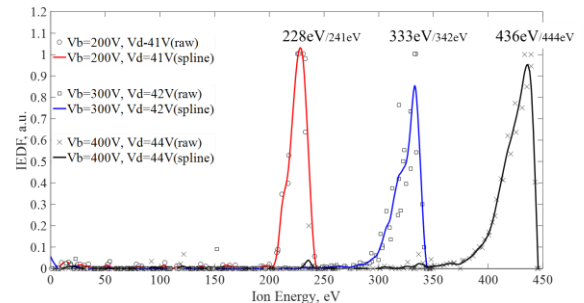


図9 TRS-12のIEDF

表5 TRS-12のピークエネルギーと5%幅

	$V_b=200\text{ V},$ $V_d=41\text{ V}$	$V_b=300\text{ V},$ $V_d=42\text{ V}$	$V_b=400\text{ V},$ $V_d=44\text{ V}$
ピークエネルギー, %	94.6	97.4	98.2
5%幅, eV	36	48	63

**4.3 TMU-066 と TRS-12 の比較** TMU-066, TRS-12のピークイオンエネルギー, 5%幅を表6に示す. TMU-066に比べ TRS-12は, ピークエネルギーが加速電圧に一致しており5%幅が小さいので, 均一のイオンエネルギーで効率よく加速されているといえる. これは, 推進原理に基づく相違によるものと思われる. ホールスラスタは, 放電チャンネル内でプラズマ生成かつチャンネル内のアノードにより静電加速させている. チャンネル内でのプラズマ生成領域により加速電圧が異なってしまう. よって, イオンエネルギーは  $V_a$  よりも小さく, ばらつきが多いと考えられる. イオンスラスタは, 放電室でプラズマ生成かつ  $V_d$  で加速された後に, スクリーニンググリッドのイオンシース  $V_b$  により全イオンが加速される. よって, イオンエネルギーは  $V_b+V_d$  にほぼ等しく, 均一と考えられる.

表6 TMU-066 と TRS-12 の比較

	TMU-066	TRS-12
ピークエネルギー, %	87.2 ~ 93.3	94.6 ~ 98.2
5%幅, eV	57 ~ 74	36 ~ 63

## 5. 結論

今回のホールスラスタとイオンスラスタのRPAによるイオンエネルギー分布関数の取得実験で以下のような結論を得た.

- ・RPAを用いてホールスラスタ(TMU-066)とイオンスラスタ(TRS-12)の噴出プルームのIEDFを取得
- ・TMU-066では径方向の磁場, 放電振動によりIEDFが変化
- ・ホールスラスタとイオンスラスタの推進原理の違いに基づくIEDFの違いを確認

## 参考文献

- 1)W. Andrew Hoskins, R. Joseph Cassady, Olwen Morgan, Roger M. Myers, Fred Wilson, David Q. King and Kristi deGrys, "30 years of Electric Propulsion Flight Experience at Aerojet Rocketdyne, " 33<sup>rd</sup> International Electric Propulsion Conference, IEPC-2013-439, Washington, D. C., 2013.