

## フラーレン負イオン源のビーム測定

# Measurements of Ion Beam Accelerated from a Fullerene Negative Ion Thruster

○神田 大樹 (東大) ・ 國中 均 (宇宙航空研究開発機構)

○Daiki Koda(The University of Tokyo) ・ Hitoshi Kuninaka (JAXA)

### Abstract

Conventionally, neutralizers in ion thruster systems do not generate thrust force. Hence the power consumption of neutralizer regulates the thrust efficiency of the ion thruster system. To realize more efficient ion thruster system, a negative ion source, which generates thrust force as well as neutralizes the positive ion beam, is newly developed using fullerene as a propellant in this paper. To prove a negative ion beam, three measurements are conducted. First measurement is an  $E \times B$  probe measurement to identify the species of positive and negative ions. Secondly, a magnetically filtered faraday probe is used to measure quantitatively the negative ion currents. Finally, a beam target is used to measure the thrust. The results of these measurements indicate that the negative fullerene ions are accelerated correctly.

### 記号の説明

$\eta$ : 推進効率  
 $F$ : 推力  
 $m$ : 推進剤流量  
 $P$ : 電力  
 $V_S$ : 加速電圧  
 $M$ : イオン質量  
 $g$ : 重力加速度  
 $e$ : 電化素量  
 $I_{sp}$ : 比推力

### 1. 研究背景

イオンスラスタ 1)は電気推進の中でも高比推力であるため推進剤消費量が少なく、惑星間航行、衛星の軌道制御に有利となる。実際、JAXA の小惑星サンプルリターンを成し遂げた「はやぶさ」や、NASA の複数小惑星ランデブーを行った「Dawn」はイオンスラスタを用いている 2)。しかし既存のイオンスラスタは、正イオンビームスラスタと宇宙器を中性に保つために電子を放出する中和器を用いるシステムであり、中和器は推力に寄与しないため推進剤と電力を無駄に消費している。式(1)はスラスタの推進効率  $\eta$  の定義式である。

$$\eta = \frac{F^2}{2mP} \quad (1)$$

中和器は推力  $F$  に寄与せず推進剤流量  $m$  と電力  $P$  を増加さ

せるため、推進効率  $\eta$  は減少する。よって中和器使用によりシステム全体の推進効率は、正イオンビームスラスタ単体とくらべて低下する。そこで図1のように中和器を排除し、代替として負電荷を射出する負イオンビームスラスタを用いた正負イオンビームスラスタシステムが構築できれば、スラスタシステム全体としての理想化がおこなえる。負イオンスラスタの推進剤として、電子親和力が大きく負イオン生成が容易なフラーレンを用いる。またフラーレンはキセノンの 5.5 倍の質量をもつため、式(2)のように  $I_{sp}$  を固定すると加速電圧  $V_S$  が上昇するために電圧効率が上昇し、中和器排除との相乗効果で推進効率の向上が見込まれる。

$$V_S = \frac{Mg^2}{2e} I_{sp}^2 \quad (2)$$

図2に従来のイオンスラスタシステムと、中和器を排除し負イオンスラスタの推進剤にフラーレンを、正イオンスラスタの推進剤にキセノンをを用いた正負イオンスラスタシステムの推進効率を示す。なお、表1に推進効率を求めるときに使用したパラメータを示す 4)。負イオン生成コストが 2000 W/A と正イオンスラスタの 10 倍としても、正負イオンスラスタシステムの推進効率は従来のスラスタシステムを上回ることがわかる。このように、フラーレン負イオンスラスタはイオンスラスタシステムの推進効率を改善する可能性がある。

負イオンスラスタを用いた類似の研究として、フランスで研究されている PEGASES スラスタが存在する 3)。

PEGASES スラスタは RF 放電方式を用いたスラスタで、推進剤に SF6 を用いており、1つのイオン源から正負イオンをおよそ 200kHz で交互に射出している。PEGSESE スラスタは正負イオンを1つのイオン源から引き出すことでシステムが複雑になっているため、本研究では正負イオン源を分けてそれぞれのイオンに特化したスラスタを構築した。本研究の目的は、フラーレン負イオンスラスタのビーム引き出しの実証である。そこで3つの異なる手法によりビーム計測実験を行い負イオン引き出しの実証を試みた。1つ目はイオン質量特定のための E×B プロブによる負イオンビームの計測。2つ目は負電荷ビーム中の電子ビームと負イオンビームの割合を計測するための MFPP( Magnetically Filtered Faraday Probe)による計測実験。3つ目はビームターゲット法を用いた負イオンビームの推力推定である。それら3つの異なるビーム計測によりフラーレン負イオンの引出の実証を行った。

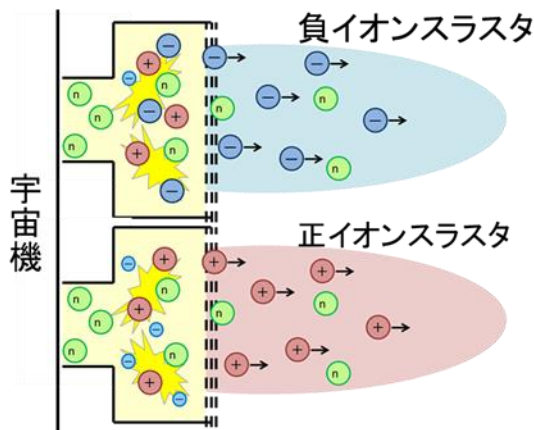


図1 正負イオンスラスタシステムの概念図

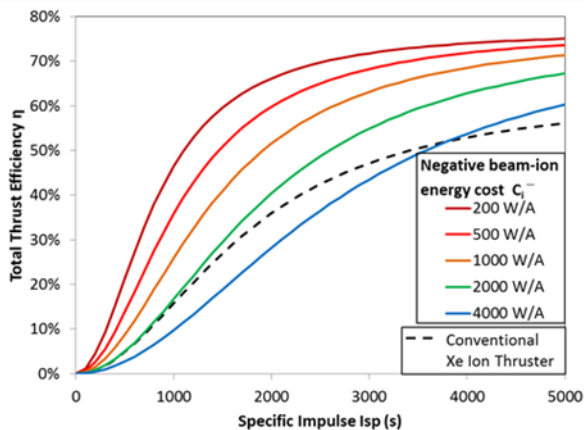


図2 正負イオンスラスタと従来スラスタシステムの推進効率比較

表1 図2の推進効率導出に用いたパラメータ

Negative and positive thruster head		Positive xenon ion thruster head		Xenon neutralizer	
$\eta_{div}$	0.97	$C_i^+$	200 W/A	$C_n$	80 W/A
$\eta_{multi}$	0.96			$\eta_{U^n}$	4
$\eta_I$	0.99				
$\eta_U$	0.9				

## 2. 実験装置

本研究で開発したスラスタの回路図を図に示す。プラズマ生成にはフィラメントカソードを用いた電子衝撃型放電方式を採用した。これはフラーレンがプラズマ中の電子を吸収するため、フラーレンプラズマの維持には電子源が必要なためである。スラスタは  $7 \times 7 \text{ cm}^2$ 、長さが 14 cm の直方体のステンレス製である。フィラメントカソードは  $\phi 0.27$  の 2% Th-W である。フラーレンを放電室内に導入するために、フラーレン昇華装置を開発した。フラーレンの昇華レートはおおよそ  $0.5 \text{ mg/s}$  で、フラーレン昇華装置全体を電子天秤に乗せており、フラーレンの昇華量をリアルタイムで計測している。スクリーングリッド付近の電子密度を抑制するために、磁気フィルタと電子収集電極を使用している。磁気フィルタの磁場はネオジウム磁石により最大磁場強度 24mT の磁場を生成しており、電子の移動度を抑制している。電子収集電極は、電極電位がプラズマ電位を上回った時に磁気フィルタにトラップされた電子が収集されて電子密度を抑制する。

真空チャンバは、 $45 \text{ cm} \times 45 \text{ cm}$ 、奥行きが 1m の直方体で、窒素換算で 200 L/s のターボ分子ポンプ 2 台と 3400 L/s の油拡散ポンプ 1 台、ロータリーポンプ 3 台で排気している。

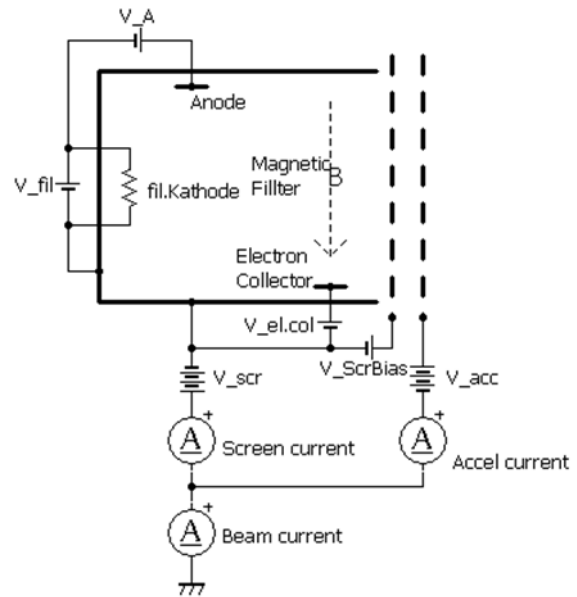


図3 負イオンスラスタの回路図

表2 負イオンスラスタのパラメータ

Param.	Value
$V_{fil}$	6 A
$I_{fil}$	7 A
$V_A$	40 V
$I_A$	0.15 A
$V_{el.col}$	50 V
$V_{ScrBias}$	25 V
$ V_{Scr} $	700 V
$ V_{Acc} $	200 V

### 3. E×Bプローブによる負イオンビーム計測

**3.1 E×B プローブ計測の実験環境** 負イオンビーム中のイオン種の計測にはE×Bプローブを用いた<sup>5)</sup>。E×Bプローブは一定電圧で加速されたイオンの質量を測定することができ、イオンの質量Mは、式(3)で表すことができる。

$$M = \frac{2eZV_s B^2 d^2}{V_{dprobe}^2} \quad (3)$$

式(3)中のeZはイオンの電荷を、V<sub>s</sub>はスクリーン電圧を、BはE×Bプローブの磁場を、dはE×Bプローブの電極幅を、V<sub>dprobe</sub>はE×Bプローブの電極電圧を表しており、V<sub>s</sub>=700V、B=176mT、d=4mmでV<sub>dprobe</sub>を変化させてイオン質量Mを計測する。E×Bプローブは、スラスタのアクセラグリッドから60cmのところ設置した。

**3.2 E×B プローブ計測の実験環境** 純フラレンプラズマから負電荷を引き出した時のE×Bプローブによるビーム計測の結果を図4に示す。結果は10V付近にピークが1つ存在することがわかる。これは式(3)から求められるC<sub>60</sub><sup>-</sup>が計測されるプローブ電圧9.6Vとよく一致する。またC<sub>60</sub><sup>-</sup>以外のピークは見られないことがわかる。電子が計測されるプローブ電圧は11kVであるので、E×Bプローブでは測定されていない。

以上の結果から、フラレン質量相当の負イオンが負電荷ビーム中に存在することがわかる。

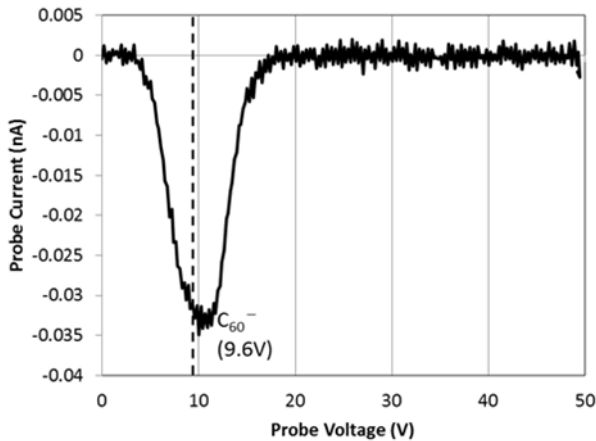


図4 フラレンプラズマから加速電圧-700Vで引き出した負電荷ビームの計測結果

### 4. MFFPによる負電荷ビーム計測

**4.1 MFFP 計測の実験環境** フラレンプラズマから負電荷を引き出すとき、負イオンだけでなく同電荷の電子も引き出される可能性がある。引き出された負電荷にどの程度電子が含まれるかを測定するため、磁気フィルタを用いたファラデープローブ(MFFP)による負電荷ビーム計測を行った。MFFPは図5に示すようにファラデープローブの前面にコイル電流によってONとOFFが切り替えられる磁気フ

ィルタがあり、磁気フィルタがOFFのときにはイオンと電子の合計電流を測定し、磁気フィルタがONのときはイオン電流のみを測定する。よって磁気フィルタのON/OFFでの電流値の差分から負電荷ビーム中のイオン電流の割合を計測することができる。MFFPはスラスタのアクセラグリッド下流7cmのところ設置した。図6に純キセノンプラズマから負電荷(電子)を引き出してMFFPで測定した結果を示す。この結果より、MFFPの磁気フィルタが電子ビームを完全に排除できていることがわかる。電子ビームの抑制のために、アクセラグリッド下流に電的にアクセラグリッドと接続した磁気フィルタを設置した。

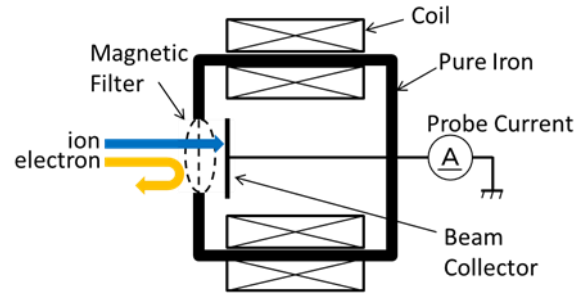


図5 MFFPの概念図

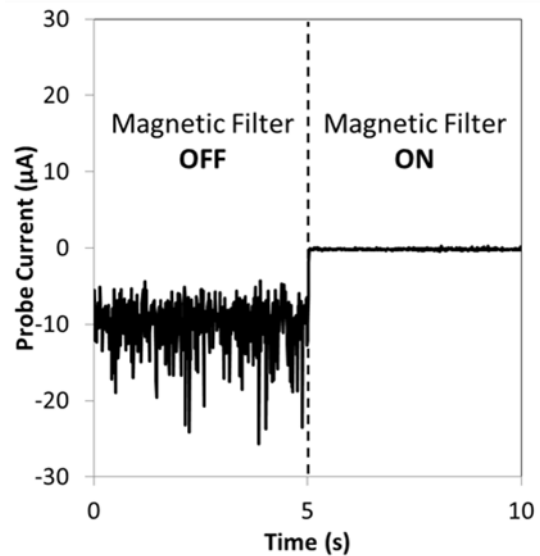


図6 MFFPによる電子ビーム計測

### 4.2 MFFPによるフラレン正負イオンビーム計測結果

スラスタで純フラレンプラズマを生成し、正電荷を引き出したときのMFFP計測結果を図7に示す。また、スラスタで純フラレンプラズマを生成し、負電荷を引き出した時のMFFP計測結果を図8に示す。図8で磁気フィルタのON/OFFでプローブ電流が変化していないことから、負イオンビーム中には電子が存在せず、フラレン負イオンのみから成るビームであることがわかる。また、図7の正イオンビーム計測結果とプローブ電流が等しいことから、純フラレンプラズマから同電流の正負イオンを引き出すことがわかる。

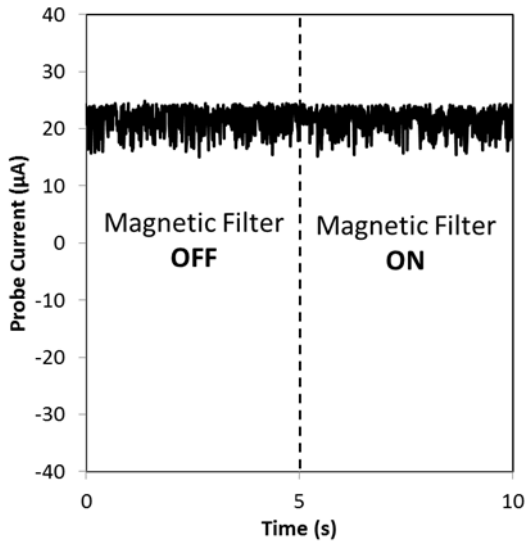


図7 MFPPによる正フラレンイオンビームの計測

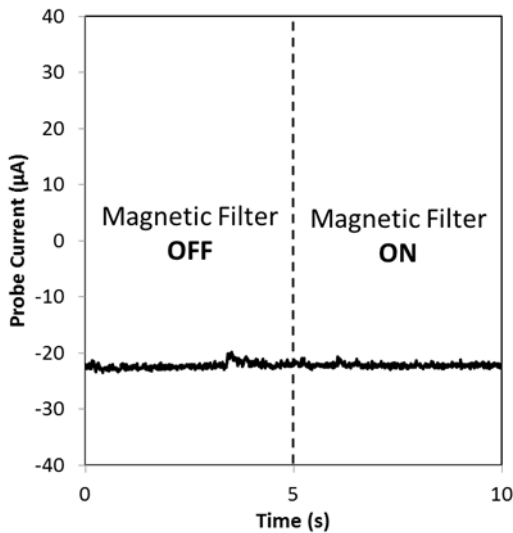


図8 MFPPによる負フラレンイオンビームの計測

## 5. ビームターゲットによる推力測定

ビーム計測の3つ目の手法として、ビームターゲットを用いた推力測定を行った。推力の直接計測を行うことにより、負イオンビームが正イオン同様に推力を発生するかの検証ともなる。

**5.1 ビームターゲット計測の実験環境** ビームターゲットとしてアルミ箔を用いた。これは推定される推力が数十 $\mu\text{N}$ 程度と小さいため、ビームターゲットの質量は出来るだけ小さくする必要があることと、ビームターゲットに照射されるビーム電流を測定するために金属である必要があるためである。

図9にビームターゲット計測の概念図を示す。ビームターゲットの変位量はレーザ変位計により計測しており、ビームターゲットの質量から求められるレーザ変位計変位量

と推力の関係は、ビームの反発係数を0とすると1Vで16.8 $\mu\text{N}$ である。またビームターゲットに流れる電流も同時に計測しており、その電流量とビーム加速電圧から推定される推力と、レーザ変位計から求められる推力との比較が可能である。なお純キセノンプラズマを点火して負電荷引出(電子引出)を行ったが、ビームターゲット電流は流れず、レーザ変位計の出力電圧も変化しなかったことを確認している。

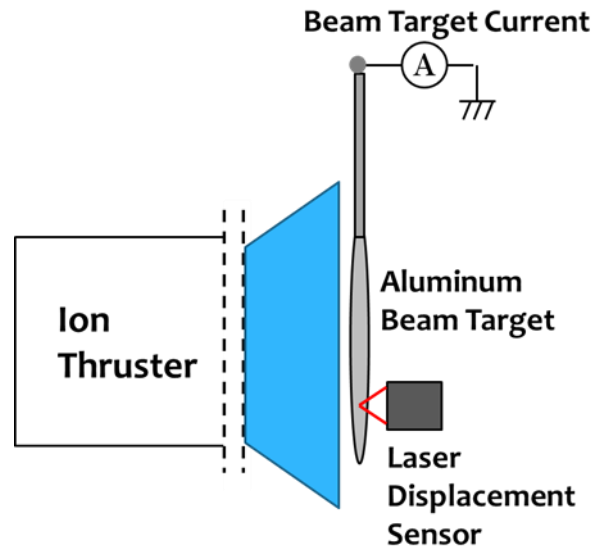


図9 ビームターゲットによる推力測定概念図

**5.2 ビームターゲット計測の実験結果** フラレン負イオンビーム引き出し時の、ビームターゲットによる推力測定結果を図10に示す。図10からわかるようにビームターゲットにはダンパーを設けていないために一定周期の振り子振動が発生しているが、1周期で平均をとったレーザ変位計出力電圧の値はビーム電流と同期していることがわかる。またターゲット電流は負電荷が流れる電流方向であることから、ビームターゲットが負イオンの照射により変位したことがわかる。ビーム照射前後でレーザ変位計出力電圧がドリフトしているため、レーザ変位計の変位量はビーム照射直前直後の差を読みとることとする。

また同一のセッティングでキセノン正イオン、フラレン正イオンの引出も行い推力測定を行った。それらの結果を図11にまとめた。図11の横軸はビームターゲット電流と加速電圧(700V)から推定される推力で、縦軸はレーザ変位計変位量である。図より、すべての計測において粒子種にかかわらずほぼ1直線上に乗ることがわかる。またレーザ変位計変位量1Vで求められる推力は16.8 $\mu\text{N}$ であるため、この推力測定値は妥当であると考えられる。以上の結果より、フラレン負イオンビームはキセノン正イオンやフラレン正イオンと同様に推力を発生していることがわかる。

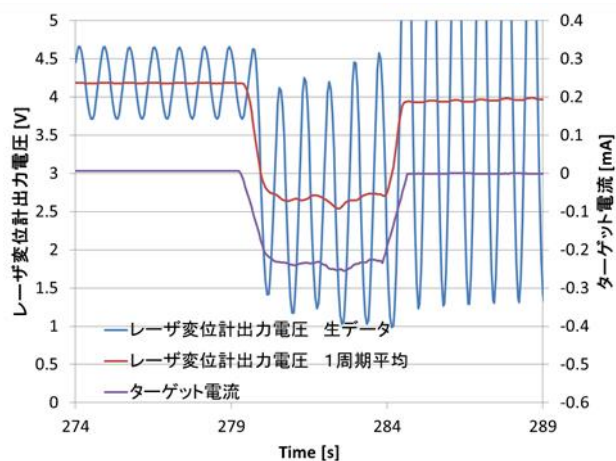


図 10 フラールン負イオンビーム引き出し時のビームターゲット測定結果

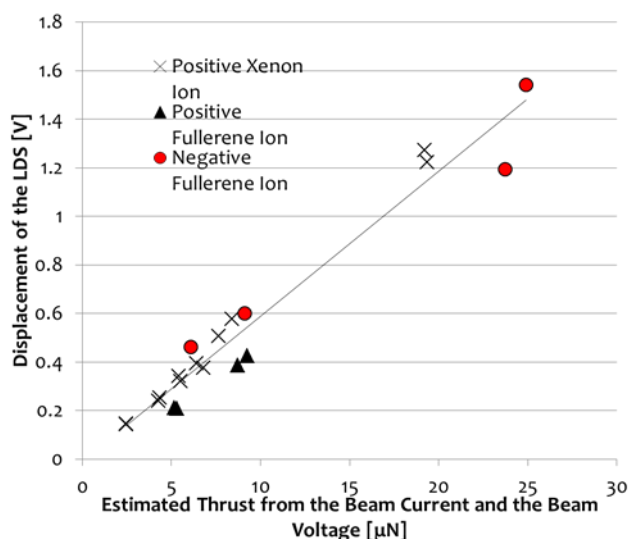


図 11 キセノン正イオン，フラールン正イオン，フラールン負イオンビーム引き出し時のビームターゲットによる推力測定結果まとめ

## 6. 結論

本研究では中和器を用いない正負イオンスラスタシステムを提案した。負イオンスラスタとしてフィラメントカソードを用いたフラールン負イオンスラスタを開発した。開発した負イオンスラスタより負電荷を引き出し、3つの異なるビーム計測を行った。E×Bプローブによるビーム計測では負イオン種の特定を行い、負イオンビーム中にはフラールン質量相当の負イオンが含まれていることを示した。MFFPによる計測では、ビームは電子を含まず、引き出された負電荷はすべて負イオンであることを確かめた。ビームターゲットによる推力測定ではフラールン負イオンビームもキセノン正イオン、フラールン正イオンと同様に推力を発生していることがわかった。以上の結果から、フラールン

負イオンの引出を実証したといえる。

## 参考文献

- 1) Goebel, D.M. and Katz, I., Fundamentals of Electric Propulsion, Wiley, New Jersey, 2008.
- 2) John R. Brophy: AIAA-2004-3433, 2004.
- 3) Dmytro R, Lara P and Ane A, “Experimental validation of the dual positive and negative ion beam acceleration in the plasma propulsion with electronegative gases thruster”, Journal of Applied Physics 115, 053301, 2014.
- 4) 荒川義博, 國中均ほか: イオンエンジンによる動力航行, コロナ社, 2006.
- 5) Shastry, R., Hofer, R. R., Reid B. M. and Gallimore A. D., “Method for Analyzing E×B Probe Spectra from Hall Thruster Plumes”, Rev. Sci. Instrum, Vol. 80, pp. 063502, 2009.
- 6) Hiroyuki K. and Hitoshi K., “Performance of the Miniature and Low Power Microwave Discharge Ion Engine  $\mu 1$ ”, 46th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit 25-28 July 2010.