

# 高速往復プローブによるホールスラスタ放電室内部 プラズマ診断システムの開発

○伊藤裕樹、バンバツハ・パトリック、川嶋嶺、シヨンヘル・トニー、小紫公也、小泉宏之 (東京大学)

## Abstract

To investigate the feasibility of the application of a magnetic shielding to TAL, a plasma diagnosis system with an emissive probe was developed, and the electric field inside the TAL with a geometric configuration of the magnetic shielding was measured using this system. Because the magnetic shielding is realized with SPT by controlling the electric field, it is unclear that the effective electric field can be formed with TAL, the electric potential of the cannal wall of which is different from that of SPT. If a large electric field toward the channel wall in most of the area of the channel of TAL, it would be difficult to expect the effect of the magnetic shielding with TAL. From the measurement results, the electric field near the center of the channel was cleared to be quite small. Therefore, the feasibility of the magnetic shielding to TAL was confirmed.

**Key Words:** Hall thruster, channel wall erosion, magnetic shielding, probe measurement

## 1. はじめに

ホールスラスタとは燃費の良い宇宙推進機で、大型化が容易である[1]。そのため、宇宙空間で大量物資輸送の必要な大型宇宙インフラ整備の実現に大きく貢献すると期待される[2]。大型宇宙インフラ整備実現を目標としたとき、ホールスラスタの推進効率と寿命性能が重要である。ホールスラスタにはSPTとTALの二種類あるが、推進効率はTALのほうが高い。そのため、本研究では大型インフラ整備実現を念頭に、TALの寿命性能向上を目指す。

ホールスラスタの寿命は、イオンの衝突により引き起こされる放電室壁面の損耗により制限されている。しかし、最近になり壁面形状と磁場形状を工夫して、図1(a)のようにイオンが壁から遠ざかる電場を形成する(Magnetic shielding, MS)ことで、SPTで無損耗が実現されている[3]。この技術はTALに応用されたことがないが、応用できれば、推進効率と寿命性能の両者を向上させ、大型宇宙インフラ整備実現へ大きく貢献する。MSは放電室の壁面形状と磁場形状を工夫する技術であるが、本研究では変更の自由度の大きい壁面形状のみを変更したTALについて、MSの応用可能性を検証する。

MSのTALへの応用には課題がある。それは、TALの壁面はSPTと違ってカソード電位を持っているため、MSで期待されるような放電室内部の電場が形成されるか不明であることである。例えば、図1(b)に示されるような電場であればMSの効果が十分に期待できるが、図1(d)のように壁面に向かう電場が大きい場合はMSの効果は小さいと考えられる。そこで、本研究ではエミッシブプローブを用いて、壁面形状を変更したTALの放電室内部の電場を計測し、MSの応用可能性を検討する。

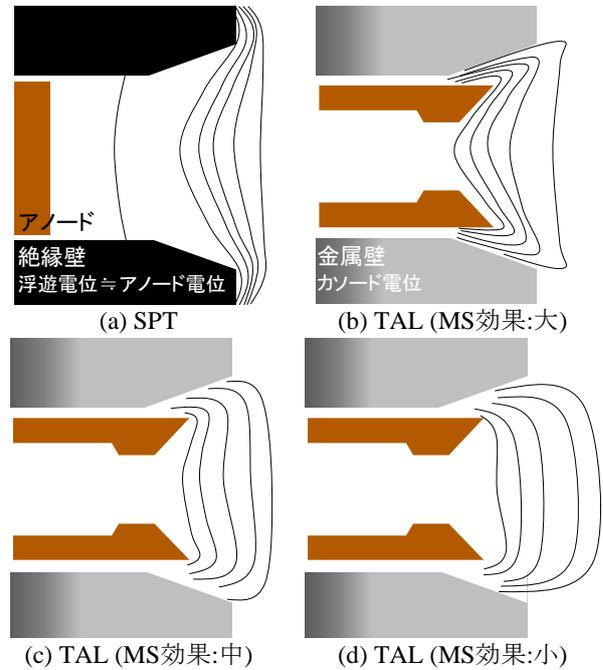


図1. MSを応用した際に予想される放電室内部の電場

## 2. 実験装置

### 2.1 アノードレイヤ型ホールスラスタ(TAL)

東京大学で設計・開発された1 kW級のTALであるUT-58 [4]を用いた。断面図を図2に、放電室の大きさを表1に示す。加速チャンネル長は2 mm、ホローアノード幅は最も狭いところで4 mmである。本研究では放電電圧を150 Vとし、最大供給電力は350 Wであった。チャンネルにはソレノイドコイルを用いて半径方向に磁場が印加されている。磁力線の形状を図1に示す。また、カソードにはイオンテック社製のホローカソードを用い、スラスタ作動中には常にキセノン $0.27 \text{ mg/s}$ 流した。

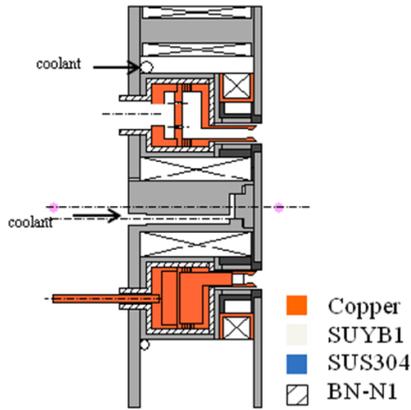


図2. UT-58の断面図

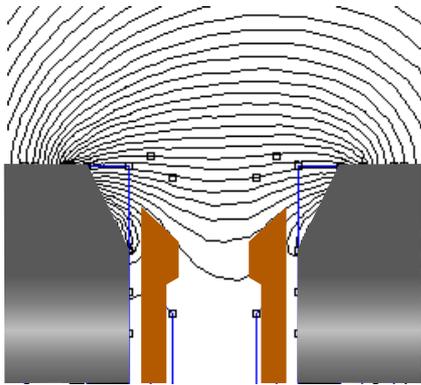


図3. UT-58の断面図と磁場形状

表1. UT-58の作動条件と放電室の大きさ

最大出力	350 W
放電電圧	150 V
キセノン推進剤質量流量	1.95 mg/s
加速チャンネル平均径	58 mm
ホローアノード幅	4 mm
加速チャンネル長	2 mm

## 2.2 プラズマ診断システム

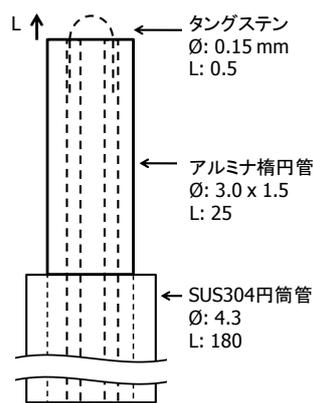
放電室内部の電場を計測するため、エミッシブプローブを用いたプラズマ診断システムを開発した。電場計測のためには二次元の空間電位分布を求める必要があるため、エミッシブプローブを放電室内部で半径方向に移動させて空間電位の半径方向分布を求め、同様の半径方向分布を様々な軸方向位置で求めた。エミッシブプローブは図5に示すものを用いた。電極には直径0.15 mmのタングステンワイヤを使い、電極加熱のため3.20 Aの電流を流した。また、絶縁管にはアルミナ楕円管を用い、放電室内部で半径方向の計測範囲を大きくするため、楕円管の短径が半径方向に一致するように固定した。また、プローブの位置を動かす際に生じるプローブの振動を抑制するため、電極から軸方向に25 mm以上離れたところはSUS304円筒管で覆った。

また、放電室内部ではプラズマからプローブへの熱入力が大きいので、プローブの放電室内部の滞在時間は100 ms程度である必要がある[5]。そこで、図4に示すように軸方向に高速で運動する円筒モータ（オリエンタルモーター社製 UCM640-7C: 運動速度 510 mm/s）を用いて、放電室内部の滞在時間を170 msとした。また、半径方向の移動にはトラバースモータ（オリエンタルモーター社製 PK545AW）を用いた。これらのモータは、LabVIEWを用いて制御することで、連動して動作させた。測定性能を表2にまとめて示す。

半径方向電位分布の代表的な計測結果を図6に示す。計測はスラスタの外側から内側と、内側から外側の二種類について、それぞれ5回行い、平滑化したのちに5回の平均をとった。結果が示すように、計測結果は移動方向に影響されず、位置制御の精度が高いことが確認された。



図4. プローブとUT-58



(a) 材質と大きさ



(b) 外観

図5. エミッシブプローブの形状

表2. プラズマ診断システムの測定性能

空間分解能	1 mm
測定範囲	アノード内 5 mmから アノード外 50 mm
放電室内滞在時間	170 ms

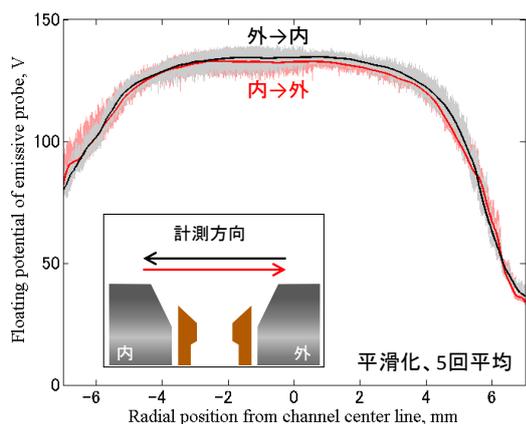


図6. 代表的な半径方向の電場計測結果



図7. 円筒形真空チャンバ

### 2.3 真空設備

実験には直径 1.4 m、長さ 3.0 m のステンレス製円筒形真空チャンバを用いた。真空排気には、2台のクライオポンプ（ULVAC 社製 Cryo-U20P：排気速度 10,000L/s、鈴木商館社製 SA-18T：排気速度8,000 L/s）を使用した。到達圧力は $3.0 \times 10^{-6}$  Torrであり、スラスタ作動中の背圧は最大で  $6.6 \times 10^{-5}$  Torrであった。

## 3. 実験結果と考察

### 3.1 加速領域の電場計測

放電室中心軸上の軸方向の電場を計測したところ、図8に示す分布を得た。電位を赤線で、電場を緑線で示す。結果が示す通り、イオンの加速は主にアノードから外側に10 mmの範囲内で行われることが分かった。そこで、この範囲を対象に、軸方向位置はアノードを原点として3.5 mmから10 mm、半径方向位置は放電室の中心を原点として-7 mmから7 mmの領域で電場計測を行った。この領域を図9に示す。測定結果は図10に示すとおりである。電場形状は磁場形状と相似の関係にあると分かった。特に、半径方向位置が-3 mmから3 mmの範囲内で電場が軸方向に平行

であり、この範囲内ではイオンが効率よく加速されることが分かった。

### 3.2 放電室内の電場計測結果

放電室壁面へのイオンの衝突を議論するため、放電室内部の電場を計測した。結果を図11に示す。白色のベクトルは局所的な電場を示したものである。放電室内部で計測された壁面方向の電場は小さく、壁面に向かう電場が強く形成されるのは、壁面から2 mm程度の範囲内であることが分かった。このため、TALにおいて壁面形状変更の効果が期待できることが分かった。一方、測定された電場形状は上に凸で、少なからず壁面方向の電場が存在するとわかる。そのため、壁面損失を0とし、無損耗スラスタを実現するためには、MSの磁場形状を応用することが有効と考えられる。

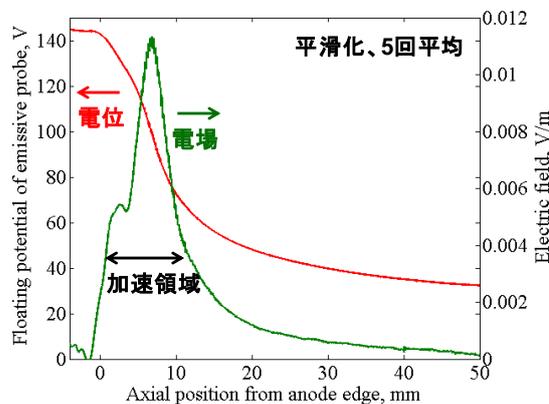


図8. 電場軸方向分布の計測結果

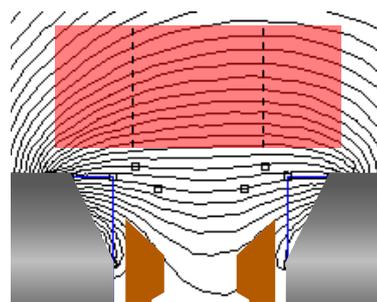


図9. 加速領域の測定範囲(実線は磁力線)

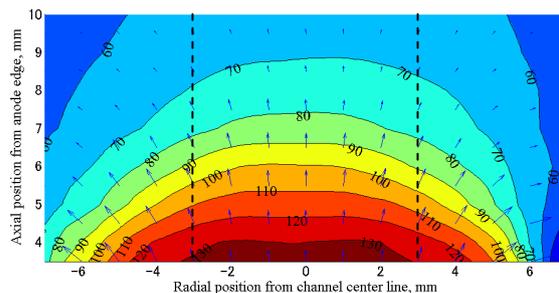


図10. 加速領域の電場測定結果

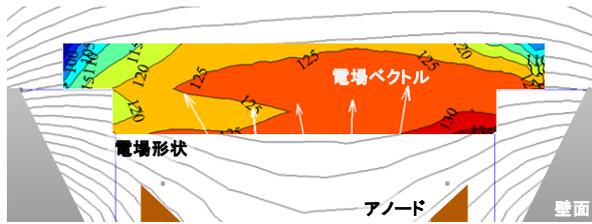


図11. 放電室内部の電場計測結果

#### 4. まとめ

Magnetic shieldingのTALへの適用可能性を調べるため、放電室内部を対象としたプラズマ測定システムを開発し、MSの壁面形状を適用したTALの電場を計測した。その結果、下記の知見を得た。

- ・ 放電室中心軸上の電場計測の結果、イオンは主にアノードから10 mmの範囲内で加速されることが分かった
- ・ 加速領域における電場形状は、おおよそ磁場形状に等しいことが分かった
- ・ 放電室内部のイオン生成領域で壁面に向かう電場は小さく、TALにおいて壁面形状変更の効果が期待できることが分かった
- ・ 壁面への電場を低減し無損耗スラスタを実現するためには、MSの磁場形状を応用することが有効と考えられる

#### 参考文献

- [1] Brophy, R. et al., "300-kW Solar Electric Propulsion System Configuration for Human Exploration of Near-Earth Asteroids," in *47th JPC*, San Diego, Aug. 2011, p. 5514.
- [2] Ito, Y, Nakano, M, Schönherr, T, Cho, S, Komurasaki, K, Koizumi, H, "Cost Evaluation of In-Space Transportation of a Solar Power Satellite Using OTVs with Hall thruster Propulsion Systems," in *29th ISTS*, Nagoya, 2013, p.o-1-05.
- [3] Mikellides, I. et al., "Design of a Laboratory Hall thruster with Magnetically Shielded Channel Walls, Phase III Comparison of Theory with Experiment," in *48th JPC*, Atlanta, Aug. 2012, p. 3789.
- [4] 藤田大樹, 川嶋嶺, 伊藤裕樹, 赤木将平, 鈴木淳, Tony Schönherr, 小泉宏之, 小紫公也, "アルゴンアノードレイヤ型ホールスラスタの作動特性," in *平成25年度宇宙輸送シンポジウム*, 神奈川, 2014, p.STEP-2013-054.
- [5] Haas, J. M. et al., "Development of a High-Speed, Reciprocating Electrostatic Probe System for Hall Thruster Interrogation," *Review of Scientific Instruments*, vol. 71, no. 11, pp. 4131-4138, Nov. 2000.