

# スワールインジェクションを用いた 15kW 級 DC アークジェット の着火特性に関する研究

○吉田航己<sup>1</sup>, 中田大将<sup>2</sup>, 杵淵紀世志<sup>3</sup>, 細田聡史<sup>3</sup>, 神田大樹<sup>1</sup>, 月崎竜童<sup>4</sup>, 國中均<sup>4</sup>  
<sup>1</sup>東大・院, <sup>2</sup>室蘭工大, <sup>3</sup>JAXA, <sup>4</sup>JAXA/ISAS

Ignition characteristics of 15 kW Arcjet with swirl injection

Koki Yoshida<sup>1\*</sup>, Daisuke Nakata<sup>2</sup>, Kiyoshi Kinefuchi<sup>3</sup>, Satoshi Hosoda<sup>4</sup>, Daiki Koda<sup>1</sup>,  
Ryudo Tsukizaki<sup>4</sup> and Hitoshi Kuninaka<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Department of Aeronautics and Astronautics, The University of Tokyo, Tokyo, Japan

<sup>2</sup>Muroran Institute of Technology, Hokkaido, Japan

<sup>3</sup>Japan Aerospace Exploration Agency, Ibaragi, Japan

<sup>4</sup>Japan Aerospace Exploration Agency, Kanagawa, Japan

Key Words : Arcjets, Electric Propulsion, Hollow Cathode

## 1. 緒言

DC アークジェットは電熱方式に分類される電気推進であり、推力密度が大きく消費電力に対する重量が軽いという特徴がある。一方で、ホールスラスタやイオンエンジンと比較して低推進効率であることや寿命が短いことが課題である。短寿命の要因として主に電極、特にカソードの損耗が挙げられる。損耗は高い作動温度による電極材の昇華が原因である。低温度作動は損耗の低下につながり、この意味でホローカソードの適用が有力な解決策の一つと考えられている [1, 2]。

先行研究において15 kW級 DC アークジェットにホローカソードを適応し、推進剤の投入方法をホロー内側からと、外側からで分配することによりホロー内面での放電に成功した。しかしプラズマ初期着火時の不安定作動が問題となった [3]。

本研究では、推進剤スワール投入による作動初期の安定化を計る。さらに熱線流速計を使用して放電室内の推進剤流れと着火特性との関係性を調べることが目標とする。

## 2. 実験装置

### 2.1 DC アークジェットスラスタ

Figure1 に本研究で使用した15 kW級アークジェットの断面図を示す。スラスタは主に陽極、陰極および主放電部以外を絶縁する二種類のインシュレータ、そして外装部からなる。陽極は銅製で、陰極は主に2%参加ランタン入りタングステン製のものを使用し、銅製のカソードホルダーと根元部でろう接合してある。陽極・陰極共に水冷方式である。インシュレータは下流側がBN製、上流側はマコール製である。陽極コンストラクタ部形状は直径2 mm、長さ4 mmの円柱状である。電極間距離はカソードホルダー部を前後させることで調節が可能となっており、今回の実験においては1 mmに設定した。本研究ではまずロッドカソードを用いて推進剤スワール投入による影響を調べたため、今回の実験ではホローカソードを使用していない。

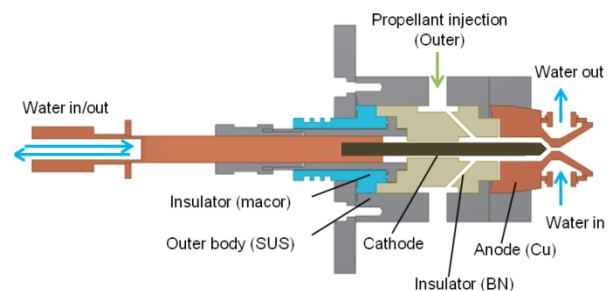


Fig. 1 スラスタ断面図

## 2.2 実験装置

Figure2 に実験装置の概略図を示す。使用した真空チャンバーの大きさは長さ 2 m, 直径 1 m であり, 10 Pa 程度の真空度で実験を行った。チャンパー内圧力はピラニ真空系を用い測定した。スラスタ主電源として直流電源装置 (NW-300ASR) を用いた。推進剤の流量制御にはマスフローコントローラを用いた。推力測定は板バネ支持の架台にスラスタを設置し, 変位を LED 変位計で計測することで行った。このスラストスタンドによる推力測定誤差は5%程度であった。

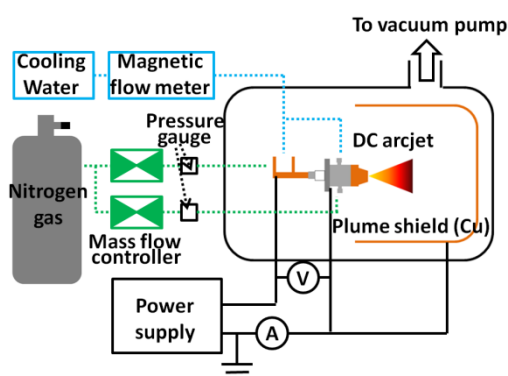


Fig. 2 実験装置概略図

## 3. 再現性実験

### 3.1 推力測定誤差

初めに本研究の実験系における推力測定の再現性を調べる為, ノミナル作動を 3 回行い得られた推力データを比較した。ノミナル作動条件を Table1 に, 計測結果を Fig. 3 に示す。それぞれの作動の間に毎回, スラスタを分解しスタンドへの取り付けおよび推力較正を行っている。各グラフは20sのプラズマ点火時と前後20sの生ガスみのデータからなる。

Table1 ノミナル作動条件

| Cathode                    | Rod                 |
|----------------------------|---------------------|
| Cathode material           | ThO <sub>2</sub> -W |
| Electrodes minimum gap, mm | 1.0                 |
| Discharge current, A       | 150                 |
| Propellant gas             | Nitrogen            |
| Mass flow rate, g/s        | 0.1                 |

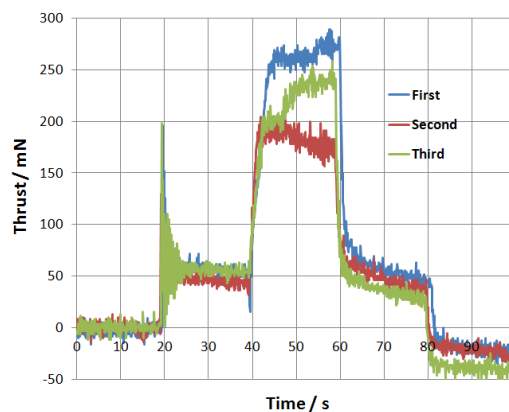


Fig. 3 ノミナル作動計測結果

3 回の組み直しによる推力の誤差は最大で70 mN であり, 平均値から10%程度であった。

### 3.2 電極間距離

次に電極間距離の設定誤差によるスラスタ性能への影響を調べる為, 電極間距離と電流電圧特性の関係を調べた。結果を Fig. 4 に示す。

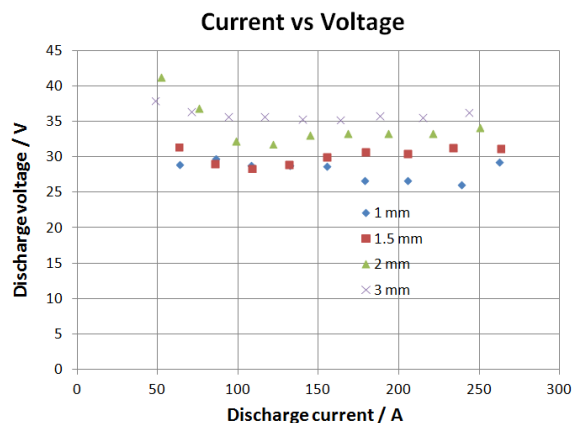
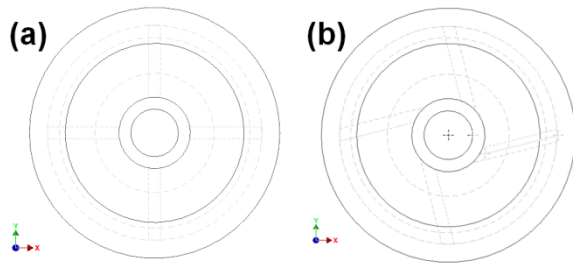


Fig. 4 電極間距離と電流電圧特性

電極間距離  $d$  とした時の電圧値  $V$  は  $V = 3.9d + 24.4$  であった。電極間距離設定誤差を  $\pm 0.1$  mm と仮定すると, スラスタ性能への影響は1%程度であった。

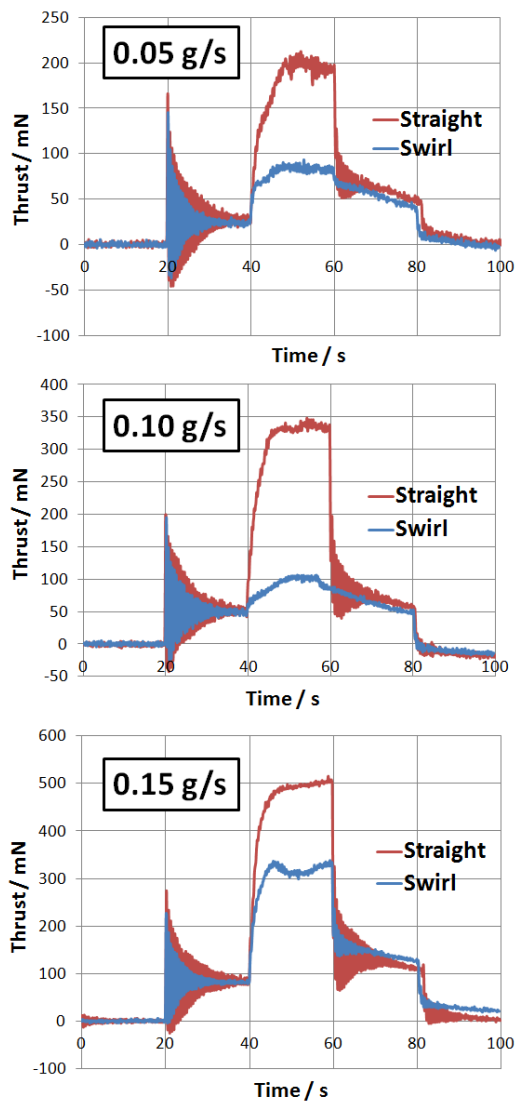
## 4. スワール作動

推進剤スワール投入は放電室内壁絶縁部材兼推進剤ガスポートであるフロントインシュレータのポートをノミナルから傾けることで実現する。インシュレータの模式図を Fig. 5 に示す。ガスポートの傾きはカソード軸方向を  $z$  軸としたとき, ノミナルで (1 0 1), 対してスワールは (4 1 2) となっている。



**Fig. 5** カソード先端方向からのインシュレータガスポート透視図 (a) ノミナル (b) スワール

このインシュレータを使用して、推進剤スワール投入作動を行いノミナル作動とその性能を比較した。それぞれ推進剤流量0.05 g/s, 0.10 g/s, 0.15 g/sで作動を行った結果を Fig. 6 に示す。



**Fig. 6** 各推進剤流量におけるノミナル作動とスワール作動の推力値比較結果

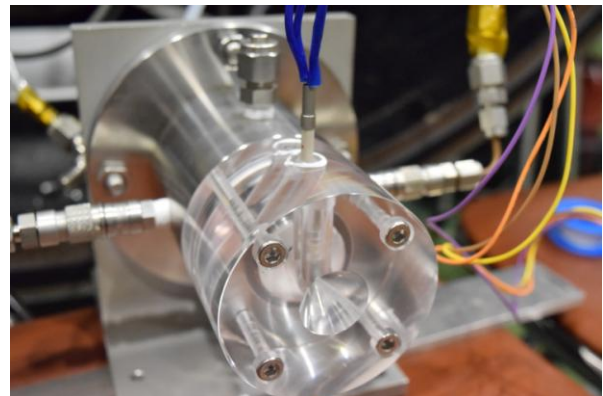
Figure6 からわかるように推進剤流量0.05 g/s,

0.10 g/sにおいてスワール作動では高電圧モードへの移行が見られず, 0.15 g/sにおいてのみ高電圧モードへ移行はしたがノミナル作動時と比べ性能が低下することが分かった。

スワール投入により高電圧モードへの移行が早くなることを期待したが結果的に悪化した原因として、今回使用したインシュレータでは期待する旋回流を実現できなかったことが予想された。

## 5. 風速計測

実際に放電室内で推進剤がどのような流れになっているか調べる為、熱線流速計を使用した。熱線流速計はX型プローブ (0252R-T5, KANOMAX) を使用し、流速測定用のアクリルアノードを用いて放電室内に直接プローブを挿入することで流速測定を行った。熱線流速計設置時のスラストの様子を Fig. 7 に示す。



**Fig. 7** 熱線流速計装着時のスラスト

大気圧下において推進剤流量を0.029 g/sから0.049 g/sまで変化させ、ノミナルインシュレータとスワールインシュレータを使用した場合での流速計の出力電圧値変化を比較した。結果を Fig. 8 に示す。

Figure8 が示すようにスワールインシュレータ使用時は、流量0.035 g/sから0.037 g/sにかけて乱流に移っていた。一方でストレートインシュレータ使用時は、0.037 g/sの段階ではまだ層流を保持しており0.040 g/s付近で乱流に移っていることが分かった。

この乱流遷移する流量の違いが真空下のプラズマ点火時においても影響を与えていると考えられる。

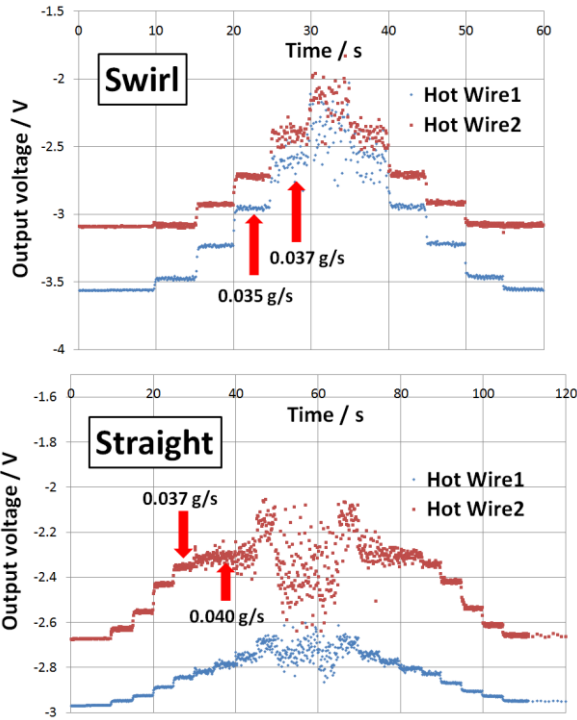


Fig. 8 流速計出力電圧値

## 6. 結論

推進剤スワール投入による DC アークジェット初期作動の安定化を試みた。結果、ノミナルインシュレータよりも初期放電後の高電圧モードへの移行が安定しなくなった。

この原因を調べる為熱線流速計を使用して大気圧下における放電室内の推進剤流れを調べた。結果、スワールインシュレータを使用するとノミナルストレートインシュレータを使用した場合と比べて少ない流量で乱流遷移することが分かった。この原因として旋回流にしたことにより流れの干渉等が発生し不安定な条件になってしまったのではないかと予想される。

高流量で乱流遷移させないために現在よりも推進剤がポート出口において低レイノルズ数になるよう、ポート径を大きくしたインシュレータを開発したので今後これを使用して期待される旋回流の実現を図っていく。

さらにカソードの短寿命を根本的に解決するため交換式カソードシステムの開発も進めている。概念図を Fig. 9 に示す。損耗したカソードを新品のもの

に交換することでスラストの長寿命化を図る。

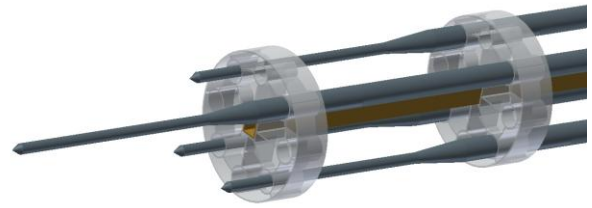


Fig. 9 交換式カソード機構概念図

## 参考文献

- [1] Downey R. T. *et al.*, *Proceedings of International Electric Propulsion Conference*, IEPC-2009-224 (2009)
- [2] Ferreira, C. M. *et al.*, *Journal of Applied Physics*, **49** (4) (1978), pp.2380-2395
- [3] M. Kinoshita *et al.*, *Proceedings of International Electric Propulsion Conference*, IEPC-2013-243 (2013)