

磁力線に沿ったアノードを装着した外部磁場印加型 MPD スラスタの開発

○木村竜也、小島康平、安井正明(三菱重工)

市原大輔、鶴生知輝、片岡久志、岩川輝、佐宗章弘(名大)

横田 茂(筑波大)

1. はじめに

近年、衛星の軌道遷移用として化学推進機の代わりに電気推進機を搭載した衛星が衛星市場において注目されている¹⁾。電気推進機は、従来の化学推進機と比べて格段に比推力が高いため、少ない推進剤での軌道遷移が可能であり、衛星の質量低減による打上コスト削減や、全備質量に対するペイロード質量割合の増加等、様々なメリットが期待できる²⁾。一方で化学推進と比べて推力が低く、追加で太陽電池パネルやラジエータが必要になる点から、大推力で、かつ高効率な電気推進機が必要である。中でも、ホールスラストや MPD スラストは推力密度が高いため、大推力電気推進機として有望な候補の1つである(図1)。

このうち、MPD スラストはホールスラストより“構造が単純であること”や“推進剤の選択肢”が多い等のメリットがあるが、デメリットとして、“放電電流の集中による陰極の損耗”と“高い推力効率が得られていないこと”が挙げられる。陰極の損耗を防ぐために近年ではホローカソード(図2)を用いた研究がなされているが、国内では100A 級の大電流の引出しに成功した例は報告されていない。そこで我々は今後の大電力電気推進機に用いるため、100A の電流が引出可能なホローカソードの開発を行っている³⁾。

本研究ではMPD の推力効率改善の設計指針を得るために開発中のホローカソードに、外部磁場印加型 MPD 推進機として、アノードノズルを装着して、種々の試験条件で性能データを取得した。その結果について報告する。

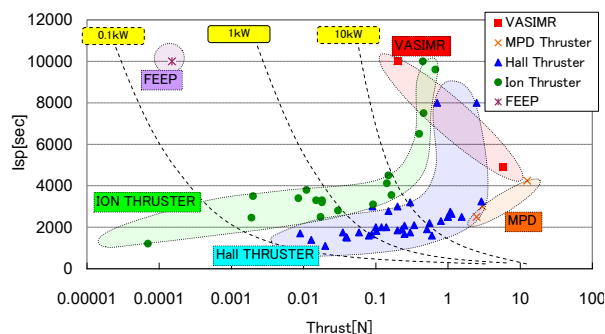


図1 主な電気推進機の推力と比推力の関係

2. ホローカソードの開発状況

ホローカソードについて、基本構造(図3)と特徴を以下にまとめる。構成要素は、大きく3つあり、電子放出部(カソード部)、ヒーター、キーパーである。電

子放出部は、大電流を取るために、主に熱電子放出による電子放出機構を採用した。ヒーターは熱電子放出を促す為に電子放出部を加熱するためのものである。キーパーはその電子を外に放出するため、電子放出部に比べて正の電圧が印加されている部分である。開発中のホローカソードは以下の設計方針に従い製作を行った。

- ① 電子放出部材料は電子放出密度と取扱性から LaB_6 を選定^{4,5)}
 - ② 内部のプラズマの分布を推算、インサート形状を決定
 - ③ 熱設計を行い、カソードボディや構造を決定
- 製作したホローカソードは作動試験を行い、80～100A の電子電流の引き出しを約120秒間成功している(図3)。

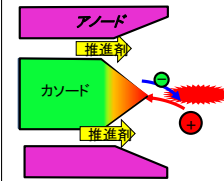
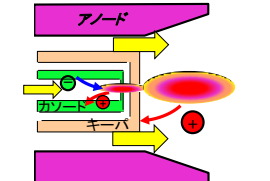
	従来カソード(尖頭形状)	ホローカソード(中空形状) カソード+キーパー
カソード		
特徴	尖頭部が局所放電/加熱 ⇒尖頭部が溶損し、短寿命。	平面的な放電/加熱で損傷分散。⇒長寿命

図2 従来カソードとホローカソード概略図

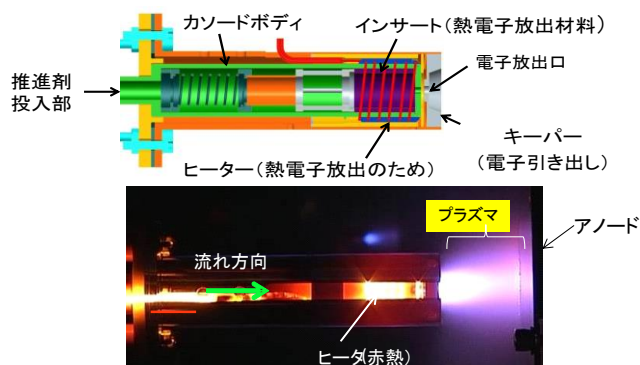


図3 ホローカソード構造と作動状況

(Xe, 6.8mg/s, 100 A作動)

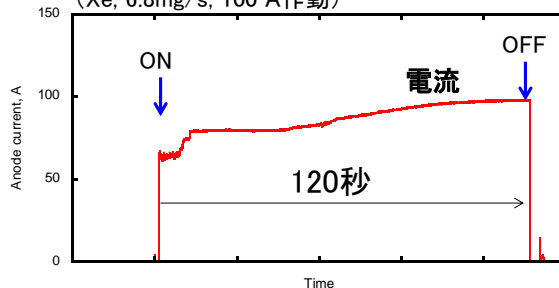


図4 ホローカソード作動試験

3. 外部磁場印加型 MPD 推進機の試作

3.1 磁場印加方式

MPD 推進機は磁場に関して、自己誘起磁場型、外部磁場印加型に分けられる。自己誘起磁場型の推力は放電電流とそれに伴う自己誘起磁場のローレンツ力によって生じるため、電流の 2 乗に比例する。効率的な作動には数 kA もの大電流(電源)が必要となり、準定常作動でも陰極損耗が発生した事例がある。放電電圧については、100V 程度必要となるため、数百 kW 以上の電力が必要となる。

一方、外部磁場印加型は放電電流と磁場強度を独立に設定可能であり、比較的低い電流(～数百 A)により陰極損耗のリスクは低減され、数十 kW の電力でも磁場強度を高めることで高推力効率の達成が可能である。そこで本研究では外部磁場印加型を採用した。

3.2 加速原理

外部磁場印加型 MPD 推進機のおもな加速成分としてホール加速、スワール加速が挙げられる(図 5)²⁾。

【ホール加速】 $\mathbf{J}_\theta \times \mathbf{B}_r$ ($\mathbf{J}_\theta \propto \mathbf{J}_r \times \mathbf{B}_z$)

周方向ホール電流 \mathbf{J}_θ と外部磁場の径方向成分 \mathbf{B}_r のローレンツ力 $\mathbf{J}_\theta \times \mathbf{B}_r$ が直接プラズマを軸方向に加速される成分。 \mathbf{J}_θ は半径方向電流 \mathbf{J}_r と外部磁場の軸方向成分 \mathbf{B}_z の干渉によって発生する。

【スワール加速】 $\mathbf{J}_r \times \mathbf{B}_z$

半径方向電流 \mathbf{J}_r と外部磁場の軸方向成分 \mathbf{B}_z のローレンツ力 $\mathbf{J}_r \times \mathbf{B}_z$ で発生する角運動が磁気ノズルまたは固体ノズルにより軸方向の運動に偏向される成分

他にも \mathbf{J}_θ と軸方向磁場 \mathbf{B}_z のローレンツ力 $\mathbf{J}_\theta \times \mathbf{B}_z$ で発生する径方向内面へのピンチ力(ポンピング力)、自己誘起磁場、ジュール加熱による加速成分がある。

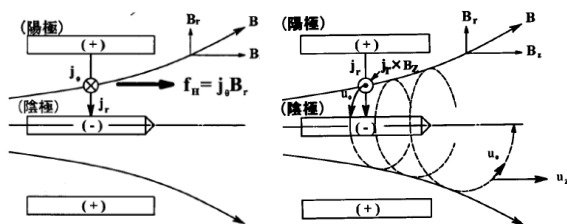


図5 ホール加速とスワール加速

3.3 課題と打ち手

自己誘起磁場型の推力は下式により定式化され、アノード形状の最適化については、試験と解析から様々な研究がされている²⁾。

$$F = \frac{\mu J^2}{4\pi} \left[\frac{3}{4} + \ln \left(\frac{r_a}{r_c} \right) \right]$$

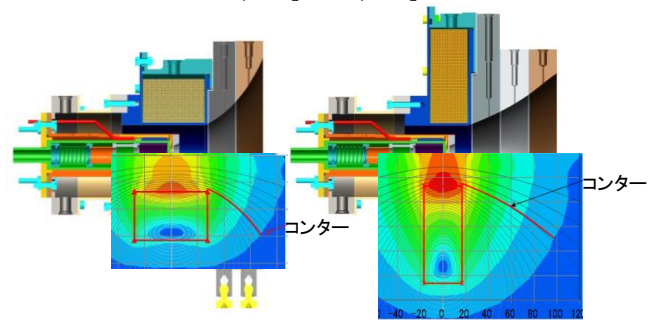
μ : 真空の透磁率、 r_a : 有効アノード半径、

r_c : 有効カソード半径

一方、外部磁場印加型については、様々な方向の放電電流と磁力線が複雑に相互作用しているため、印加する磁場分布やアノード形状の最適設計指針は確立されていない。

そこで、本研究では、MPD の推力効率改善に向けた設計指針を得るために、磁場分布の異なる 2 種類のソレノイドコイルを作成し、相互比較した。アノードは、発生した磁場を有効に活用するために磁力線に沿った形状で試作し、試験で検証をした。カソードには開発中 100A 級ホローカソードも使用した。

各ソレノイドコイルの発生磁場とアノードノズル形状を図 6 に示す。発生磁場の磁力線は①アノード壁面付近で約 45 度($B_r \approx B_z$)のモデルと、②アノード壁面付近で $B_r < B_z$ のモデルとした。ここで、それぞれの供試体モデル名を“ $B_r \approx B_z$ ”、“ $B_r < B_z$ ”と呼ぶ。



(a) “ $B_r \approx B_z$ ”

(b) “ $B_r < B_z$ ”

図6 ソレノイドコイル発生磁場とアノードノズル

4. 作動試験

4.1 試験装置と試験条件

本試験は名古屋大学の真空装置を使用した。試験装置の概略と MPD 推進機を図 7 に示す。作動試験は直径 2m 長さ 3m の真空チャンバの中で行った。この真空チャンバは、ターボ分子ポンプ(排気量 $3.2 \times 10^2 \text{ L/s}$) 1 台と補助ポンプである油回転ポンプ(排気量 33L/s) 1 台によって排気され、真空到達度は $1.0 \times 10^{-2} \text{ Pa}$ 程度であった。

推力計測は重力振り子式スラストスタンドによって行った。スラストの作動によって生じる振り子の微小変位をアームの先端に設置された差圧変動器によって測定する。推力値は、各作動条件にて 3 回測定し平均値と標準偏差を算出した。スラスト作動時時間は約 7 秒であった。

試験条件と測定値を表 1 に示す。評価パラメータは推力 F と下式に示す比推力、推力効率、推力電力比である。

$$\begin{aligned} \cdot \text{比推力 } I_{sp} &= \frac{F}{\dot{m}} \\ \cdot \text{推力効率 } \eta &= \frac{F^2}{2\dot{m}P} \\ \cdot \text{推力電力比} &= \frac{F}{P} \end{aligned}$$

ここで、 \dot{m} 、 P はそれぞれ推進剤流量、投入電力を表す。

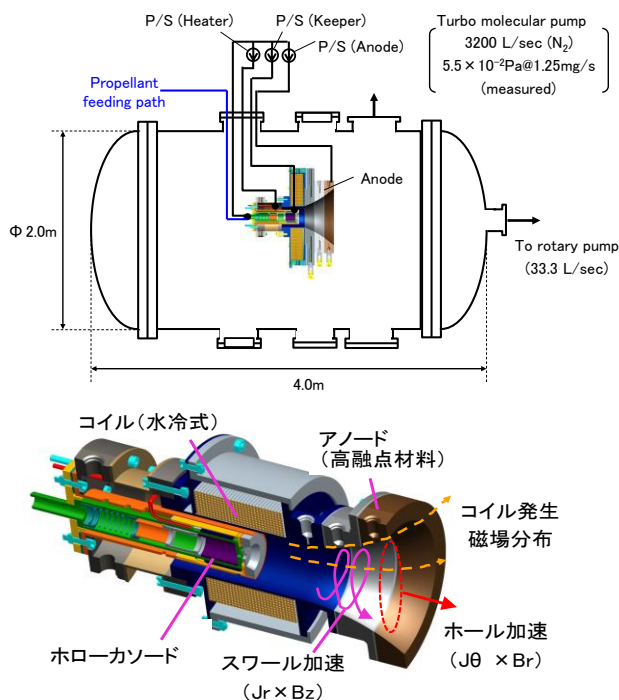


図7 試験装置概略図とMPD推進機

表1 作動条件

コントロールパラメータ			
ガス種		Xe, H ₂	
質量流量 (mg/s)	\dot{m}	0.9~10.3	
放電電流 (A)	J_d	10, 20, 30	
キープ電流 (A)	J_k	2	
コイル電流 (A)	J_c	1 (25mT) ~10 (250mT)	
カソード~アノード距離 (mm)	L	26.0, 30.8	
カソード外周から供給する推進剤流量の全推進剤流量に対する割合	$\dot{m}_{HC} / \dot{m}_{BK}$	0%, 20%, 50%, 80%	
測定パラメータ			
推力 (mN)	F		
放電電圧 (V)	V_d		
キープ電圧 (V)	V_k		
コイル電圧 (V)	V_c		

4.2 試験結果および考察

表1に示すコントロールパラメータについての試験結果と考察を4.2.1~4.2.4項に示す。

4.2.1 放電電流、外部磁場、推進剤流量

推力、放電電圧は外部磁場強度に対して線形的に増加する、推力は放電電流の増加に伴い増加することが確認された(図8)。アノードノズル下流のプルームは強磁場、大電流ほど放電電流が下流まで張り出し、アノードに戻ってくる経路が観察される(図9)。また、強磁場ほど放電電流の付着位相が回転していると考えられるプルームの回転が観察された。スワール加速によるプラズマの回転運動が上昇

している可能性がある。

推進剤流量は、少ないほど推力が増加し、推力効率が高い結果であった(図10)。これは、電磁加速による推力は理想的には推進剤流量には依存しないため、推進剤流量が低下するに従って排気速度が増加した結果と考えられる。但し、推進剤流量が少なすぎる場合は不安定な放電となった。今後は低流量作動が可能な条件(アノード形状やカソード位置)と推力効率が高い条件の最適化が必要となる。

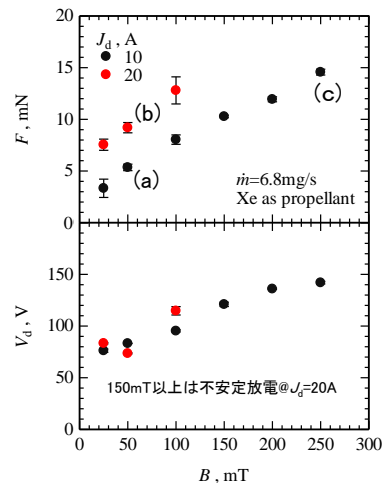


図8 外部磁場強度、放電電流と推力、放電電流の関係

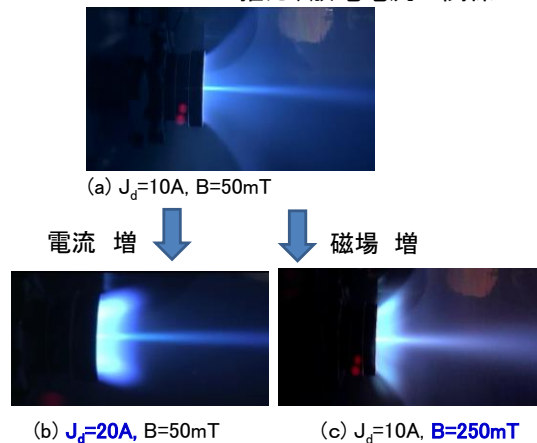


図9 アノードノズル下流のプルーム

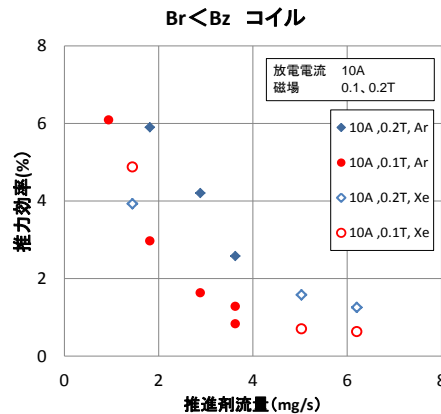


図10 推進剤流量と推力効率の関係

4.2.2 カソードとアノードの距離

カソード下流端とアノード上流端の距離 D に対する作動点特性変化を調べるため、異なるカソード位置で試験を実施した。カソード位置が推力と放電電圧に与える影響を図 11 に示す。カソードを下流に配置して D を短くすると、放電電圧、推力は増加した。これは、何れの条件も放電電流は 10A であるため、 D が短い方が J_z 成分が小さく、代わりにホール加速とスワール加速に有効な J_r 成分が大きくなるのが効いていると考えられる。一方でカソードを上流に配置する方が、推進剤が放電室内で早く拡散し、放電室内に均一に分布すると考えられる。カソードを上流に配置することで、低推進剤流量時に、大電流や高磁場でも作動が可能となった事例もあり、今後もカソード位置が性能に与える影響を調べる必要がある。

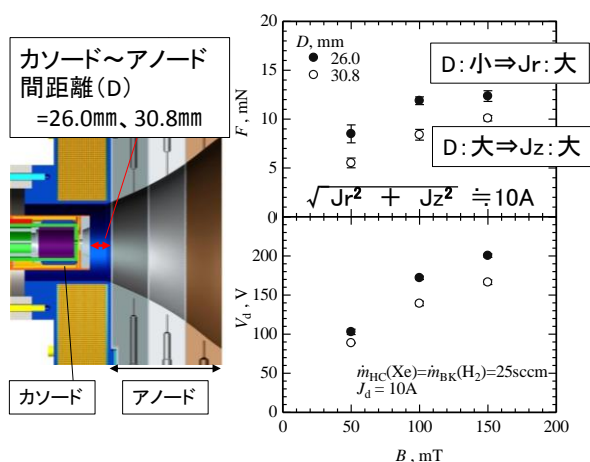


図 11 カソードとアノードの距離が性能に与える影響

4.2.3 MPD 内の推進剤流量配分

推進剤の一部をホローカソードの外周に供給することで(図 12)、全推進剤をカソードから供給する場合より推力が最大 1.4 倍に増加した。これは、推進剤が放電室内で均一に分布し、加速が有効に働いたためと考えられる。また、外周から、より低分子量のガスを供給することで排気速度は増加し、推力が増加することも期待される。本研究では水素を外周から供給した。結果、ホローカソード外周から水素ガス供給時の推力は、同量の Xe ガスを全てカソードから供給した場合より最大 1.8 倍大きくなった(図 13)。

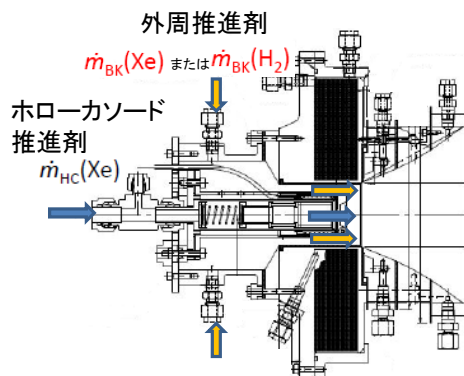


図 12 推進剤流入箇所

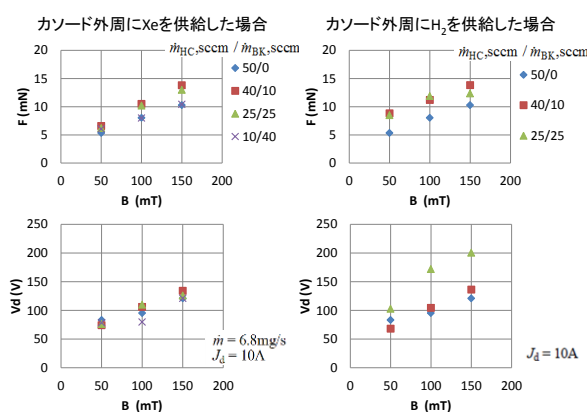


図 13 ホローカソード外周に推進剤を供給した効果

4.2.4 磁場分布とアノード形状

磁場分布とアノード形状の異なる供試体 “ $B_r \div B_z$ ” と “ $B_r < B_z$ ” にて、 I_{sp} と推力効率 η_t の相関を図 14 に示す。“ $B_r < B_z$ ” の方が η_t / I_{sp} ($= F/P$) が高い傾向が見られる。これは、磁場分布が “ $B_r \div B_z$ ” の時、ホール加速が最大値を取ると考えられるが、スワール加速も全体の加速量に対して無視できるレベルではない、或いはスワール加速が支配的であるため、ホール加速とスワール加速の両方で必要な磁力 B_z 成分の高い磁力線分布を持つ供試体の推進性能が高くなったと考えられる。

ホール加速 $J_\theta (\propto J_r \times B_z) \times B_r : B_z = B_r$ で最大
スワール加速 $J_r \times B_z$

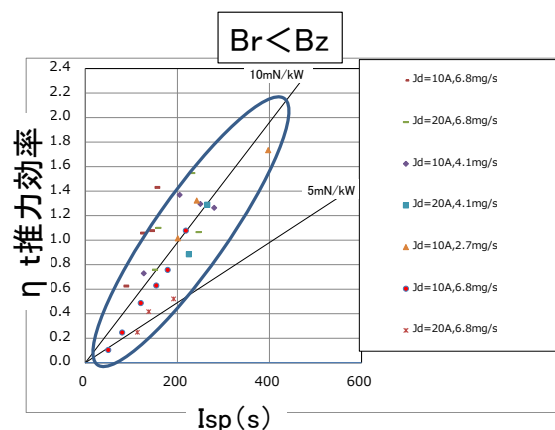
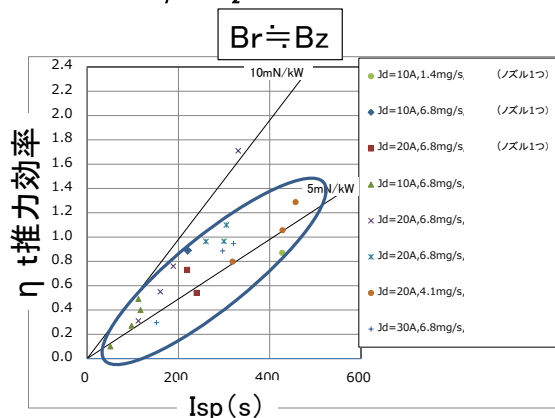


図 14 磁場分布とアノード形状

4.2.5 性能データ

図 15 に $B_r < B_z$ ノズルでの I_{sp} と推力効率の相関を示す。また、推力としては最大 47mN を記録した。

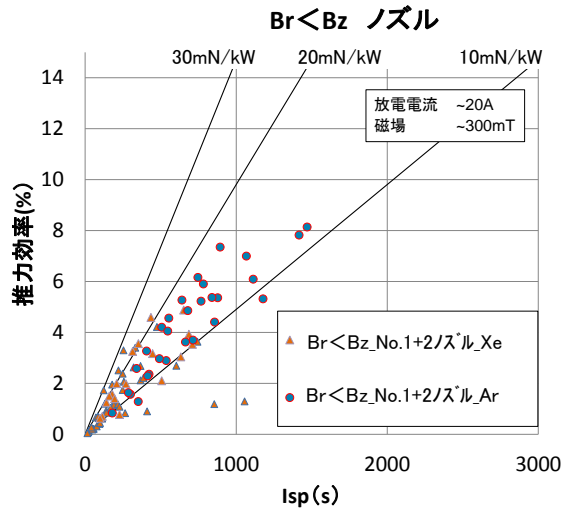


図 15 最高性能データ

5. まとめ

- ・ 開発中のホローカソードは 80~100A で約 120 秒の連続作動まで実証した。
- ・ MPD 推進機(試作機)の各種性能データ(感度データ含)を取得した。
- ・ 各種感度データから、以下に示す MPD 推進機の特長・傾向を得た。

>カソードとアノードの距離

カソードとアノードの距離は短い方が、軸方向放電電流 I_z が小さく、代わりにホール加速とスワール加速に有効な半径方向放電電流 I_r が大きい。そのため推力が高い。

>MPD 内の推進剤配分

推進剤の一部を、加速が有効に働くホローカソード外周に供給することで推力は増加する効果がある。

>磁場分布とアノード形状

アノード壁面付近の磁力線ベクトルは、 B_r 成分より、ホール加速とスワール加速の両方で必要な B_z 成分が高い ($B_r < B_z$) 方が推力/電力比が高い。

参考文献

- 1) <http://www.globalspaceexploration.org/wordpress/>
- 2) 栗木恭一, 荒川義博, “電気推進ロケット入門” 東京大学出版会, 2003.
- 3) 横田茂, 片岡久, 鶴生知輝, 佐宗章弘, 小島康平, 木村竜也, “大電流ホローカソードの開発,” 平成 26 年度宇宙輸送シンポジウム, STEP-2013-013, 相模原, 2013.

- 4) D. Goebel, I. Katz, “Fundamental of Electric Propulsion,” Wiley, pp.243–324, 2008.
- 5) D. Goebel, E. Chu, “High Current Lanthanum Hexaboride Hollow Cathodes for High Power Hall Thrusters, IEPC Paper 2011-053, 2011.