

## 電磁鋼板を磁気回路に用いたホールスラストの製造および試験作動

## Development and Experimental Test of Hall Thruster with Electrical Steels

○ 岡 優介(東大)

神田 大樹・細田 聡史・月崎 竜童・西山 和孝・國中 均 (宇宙航空研究開発機構)

○ Yusuke Oka(The University of Tokyo)

Daiki Koda・Satoshi Hosoda・Ryudo Tsukizaki・Kazutaka Nishiyama・Hitoshi Kuninaka (JAXA)

## Abstract (概要)

Hall thruster is an electric propulsion device and appropriate for satellite station keeping and mass transport of a future manned space mission. One of the main problems of a Hall thruster is the discharge current oscillation, especially around 10 kHz frequency range. This phenomenon causes damage to PPU and makes the thruster operation unstable. The objective of this research is suppression of unstable thruster operation and discharge current oscillation by using electrical steels as core material for a Hall thruster's magnetic circuit. Because of its low effect of eddy current, electrical steel core has higher magnetic responsiveness to alternating current than pure iron. This enables us to suppress the discharge current oscillation by flowing alternating current which has the same frequency as the oscillation into a coil. The magnetic circuit and the Hall thruster which the Electrical steel applied to have been designed, developed and tested. As a result, Suppression of the discharge oscillation by the AC magnetic field was failed. But the suppression by connecting coil and discharge circuit in series was success.

## 1. 研究背景

**1.1 ホールスラスト** ホールスラストは、50%以上の推進効率、1000～3000 secの高い比推力を両立し、イオンエンジンより高い推力密度を持つ。これらの特徴からロシアのSPT-100をはじめとするホールスラストが静止衛星などの地球近傍ミッションに200基以上使用されてきた。また近年、有人宇宙ミッションや火星探査に必要な軌道間輸送用の推進機や大電力推進機の筆頭候補に挙げられている(1-3)。

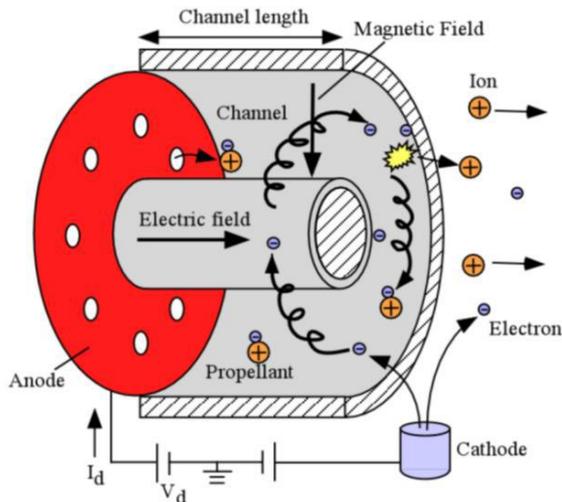


Figure 1: ホールスラストの原理

Figure 1 にホールスラストの概略図を示す。

**1.2 放電電流振動現象** ホールスラストが抱える問題として“放電電流振動”，主に10kHz帯前後の放電電流振動の低減が挙げられる。放電電流振動は衛星バスやPPU (Power Processing Unit) への悪影響、スラスト作動停止、そして推進効率低下などを引き起こすためである。特に1～20kHzの周波数帯の放電振動振幅が最も大きく、この低減が課題である。この周波数帯の振動の原因は放電室内で周期的に生じる電離不安定であること、磁束密度の強度や電圧モードによって振幅が変化することが分かっている(4-7)。

**1.3 本研究目的** 本研究では、放電電流振動の低減のために、高速磁場応答性を持つ電磁鋼板をホールスラスト用磁気回路に適用することを提案した。具体的には、電磁鋼板の変動磁場特性・高速磁場応答性を利用し、コイルに変動電流を流し、ホールスラスト磁場を意図的に変動させることにより放電電流振動の低減を図る(以下、変動磁場作動)。また、コイル-放電回路を直列接続(以下、直列作動と呼ぶ)したときに、コイルのインダクタンス値が向上し、放電電流振動や異常放電などの変動電流を抑制する効果も期待される。本研究では、まず電磁鋼板を用いた磁気回路を製造し、製造した磁気回路の変動磁場特性や高速磁場応答性を確認した。この磁気回路を用いたホールスラストについて、先述の変動磁場作動・直列作動を行い、放電電流振動抑制に効果があるのかを検証することを最終目的とした。

**1.4 電磁鋼板** 電磁鋼板とは、電気-磁気エネルギー変

換効率の高い鉄芯材料であり、鉄損や渦電流によるエネルギー損失（渦電流損）が小さいという特徴を持つ。Figure 2に電磁鋼板の一例を示す。電磁鋼板を積層した鉄芯材を用いることにより、鉄損・渦電流損を抑制した高効率のソレノイドコイルを作ることができる。また渦電流の影響が少ないことから、コイルの電流変動に応じた磁場の変動が速い特徴（高速磁場応答性）を持つと考えられる。一方向のみの磁気特性が高い“方向性電磁鋼板”と平面状の各方向の磁気特性均一である“無方向性電磁鋼板”の2種類があり、方向性電磁鋼板は変圧器などのトランスコアに、無方向性電磁鋼板はモーター鉄芯に用いられている(8,9)。

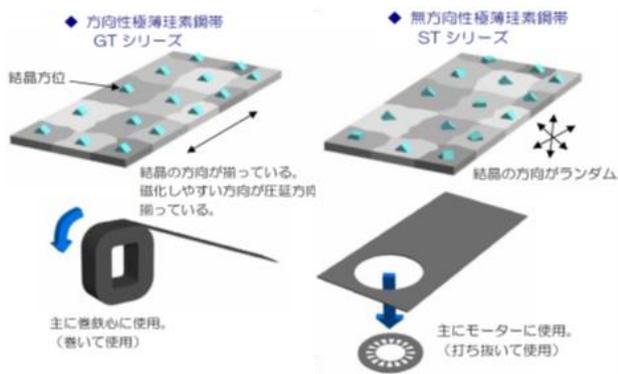


Figure 4：電磁鋼板の例と用途 9)

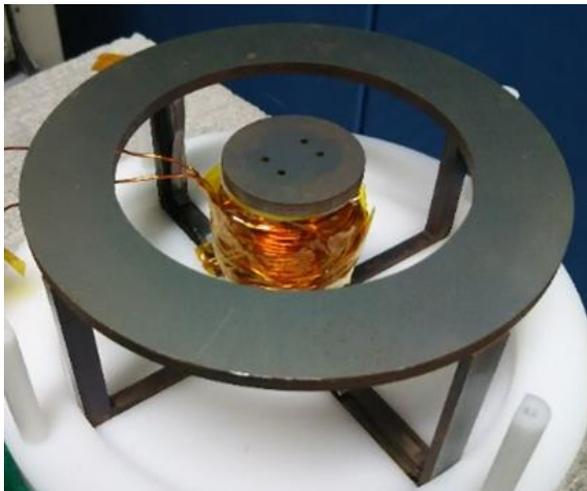


Figure 3：クロス状磁気回路（電磁鋼板）

## 2. 電磁鋼板を用いた磁気回路の変動磁場特性

2.1 試作した磁気回路について 電磁鋼板を用いて Figure 3, Figure 4 のような 2 形状の磁気回路を試作した。

Figure 3 の磁気回路（クロス状磁気回路）は電磁鋼板の用途であるトランスコアと平面ヨークを組み合わせた簡素な構造をしているが、平面ヨーク（無方向性電磁鋼板）は鉛直方向から入射する磁力線を通しにくく、また変動磁場を用いた場合、平面内で渦電流が発生する懸念がある。磁力線トランスコアには 0.050 mm 厚の方向性電磁鋼板、平面ヨークには 0.50 mm 厚の無方向性電磁鋼板を用いている。

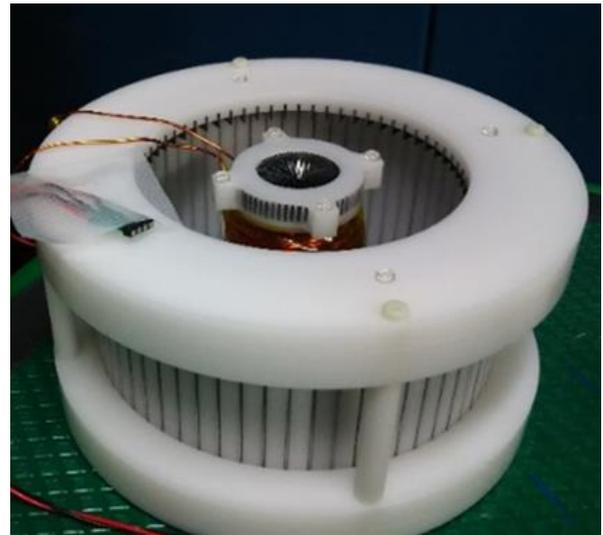


Figure 2：放射状磁気回路

Figure 4 は 0.50 mm 厚の無方向性電磁鋼板を 64 枚放射状に並べる形状である。平面ヨーク構造をなくすことにより、上記の磁気抵抗・渦電流の課題を克服するため、設計された。また比較のために Figure 3 のクロス状磁気回路と同じ形状で純鉄のクロス状磁気回路も製造した

2.2 変動磁場特性の検証実験 先述した 2 形状、3 つの磁気回路について変動磁場特性・高速磁場応答性の検証を行った。磁気回路にコイル 1 つ（内部コイル、巻き数 360 巻）を装着し、コイルに変動電流 0.7 ~ 1.3 A（DC 成分 1.0 A, AC 成分 0.30 A）を流し、内部ヨークまわりの磁場を測定する。磁場測定はホール IC を用い、変動電流の周波数を 10Hz, 100Hz, 1kHz, 5kHz, 10kHz に設定して測定した。それぞれの磁場挙動の違いを比較した。Figure 5, 6 にそれぞれコイル電流-磁束密度波形の位相差, 磁束密度の振幅を示す。Figure 5, 6 より純鉄の磁気回路と比較し、電磁鋼板の磁気回路は 2 つの波形の位相差が小さく、磁束密度の振幅が大きく、変動磁場に対する応答性が高い結果が見て取れる。なお 2 つの電磁鋼板の磁気回路の結果は、5 kHz までは放射状磁気回路のほうがコイル電流-磁束密度の波形の位相差が小さく追従が早かったものの、10 kHz ではクロス状磁気回路のほうが追従が早い結果になっている。Figure 6, 7 に、コイルにかかる電圧・電流から交流抵抗・インダクタンスを算出した結果を示す。どの磁気回路においても抵抗値が増大しているが、放射状磁気回路は 1 kHz 以上で交流抵抗値が急上昇している。これらの結果に影響を与えている要素として大きく次の 2 つある。

- ① 磁路中での磁性体の切断・接触面
- ② 電磁鋼板（または純鉄）の各層の厚み

①については、磁路上にて磁性体を切断・接触面を増やすことで、接触面にて磁力線と垂直面に渦電流を生じてしまうので高速磁場応答性を弱める要因となるからである。クロス状磁気回路に比べ放射状磁気回路のほうが磁路（磁力線の通り

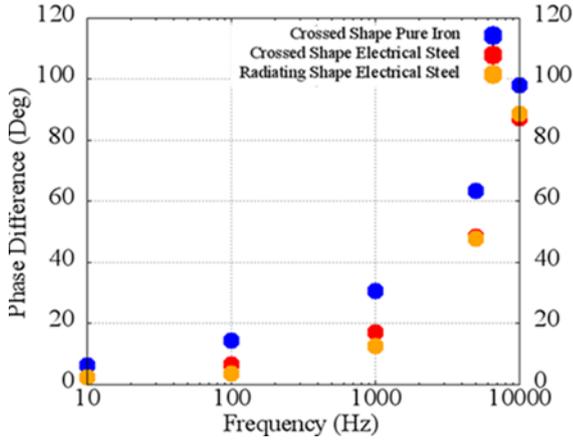


Figure 5 : コイル電流 - 磁束密度の波形位相差

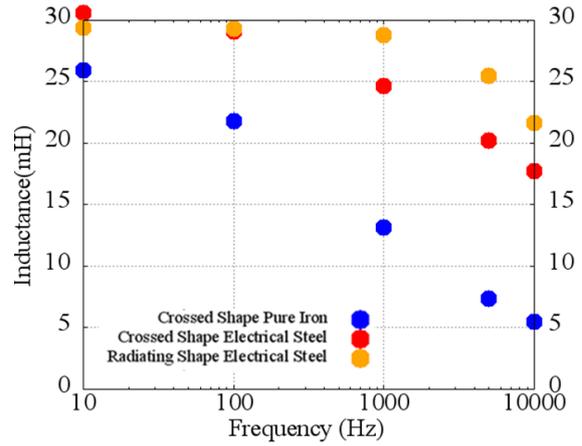


Figure 8 : インダクタンス成分

を優先し 0.50mm 厚の電磁鋼板を組み合わせている。10 kHz にてクロス状磁気回路 (電磁鋼板製) のほうがコイル電流-磁場波形の位相差の小さい結果になった要因であると考えられる

### 3. ホールスラストの作動試験

**3.1 定常磁場作動** Figure 9 に製造したホールスラストの構造断面図を示す。また Figure 10 にホールスラスト周りの電気回路図 (変動磁場作動時) を示す。

定常磁場作動を行い、放電電圧 100 V 未満の低電圧モードでの作動に成功した。Figure 11 に取得した放電電流・電圧特性、Figure 12 に放電電流 2.5 A (質量流量 20 sccm) の条件下での放電電流測定結果を示す。緑線が放電電流 (DC 入力)、黄色線が放電電流の振幅成分のみ (AC 出力) である。

一般的なホールスラストは高効率を実現できる高電圧モードで作動している (ex, SPT-100 の場合、放電電圧 300 V)。今回、高電圧モードにできなかった理由として、アノード電源の電流制限を徐々に上げていく形で作動を行っているため、電源が CC モードで駆動し、飽和電流値を超える

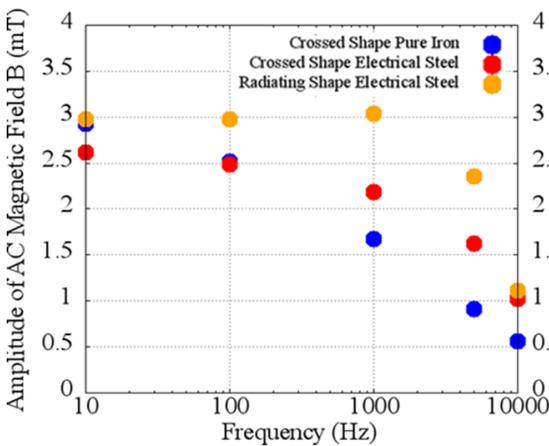


Figure 6 : 磁束密度の変動振幅

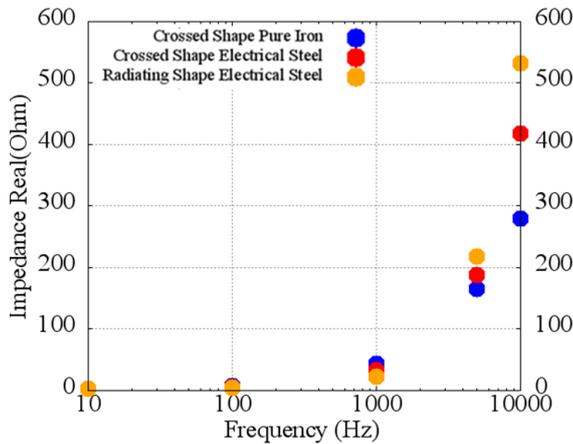


Figure 7 : 交流抵抗値

道) 中にて磁性体の切断面・接触面が少ないため、5 kHz までは放射状磁気回路のほうが高速磁場応答性を示した。②については、積層する電磁鋼板の層を薄くすることで電気抵抗が増し、渦電流が流れにくくなる効果があるためである。電磁鋼板の用途の1つ、トランスコアでは高周波電流を扱うものほど電磁鋼板層を薄くしている。今回の実験では、クロス状磁気回路 (電磁鋼板製) では 0.05mm 厚の電磁鋼板を積層したものをを用いたが、放射状磁気回路では製造しやすさ

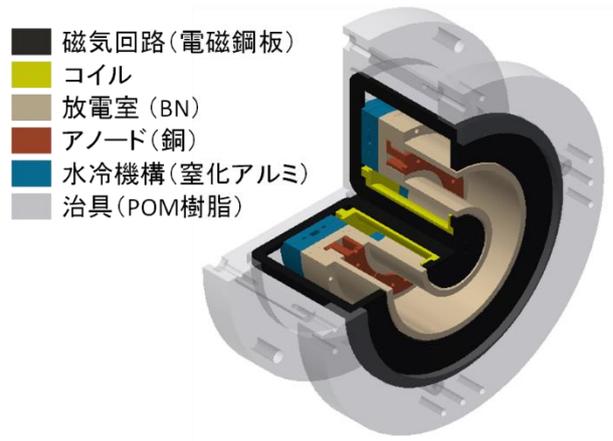


Figure 9 : ホールスラスト構造図

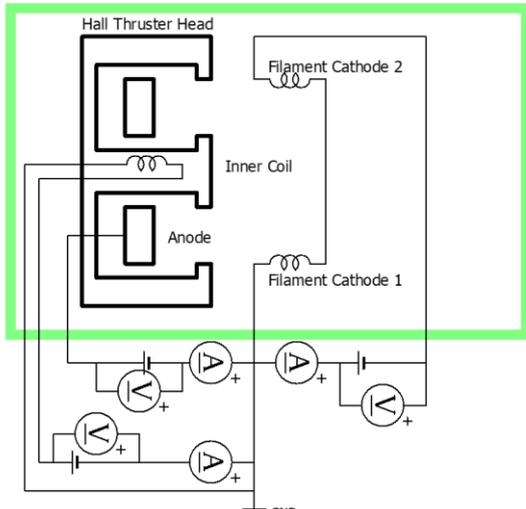


Figure 10 : 電気回路図 (変動磁場作動時)

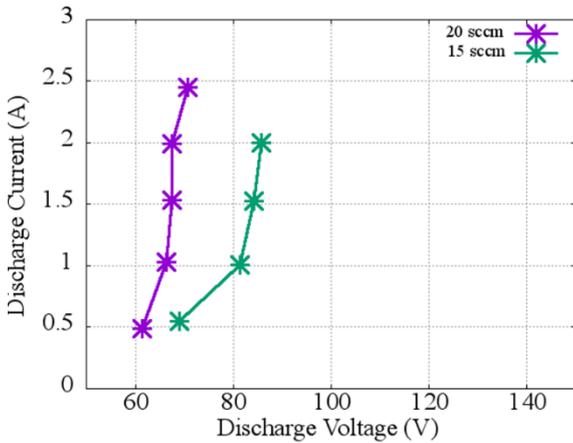


Figure 11 : 放電電流・電圧特性

あたりで止まってしまうからではないかと考えられる。そのため、CVモードでの作動も試みているがこちらで安定した放電は達成できていない。高電圧モード作動については今後の課題とする。

### 3.2 変動磁場作動

放電電流 2.5 A 付近において、1 kHz, 7 kHz, 10 kHz の変動磁場をかけ、放電電流振動の測定を行った。また測定結果について高速フーリエ変換 (FFT) を用いた解析を行い、周波数成分を算出した。Figure 15 ~ Figure 17 にそれぞれ定常磁場、1 kHz, 7 kHz, 10 kHz 変動磁場での作動時の放電電流振動・コイル電流の周波数成分 (FFT 結果) を示す。Figure 13, 15 との比較では、1 kHz 付近の放電振動成分が変化しており、1 kHz 付近の放電振動が増大していることが見て取れる。一方 Figure 7, 8 ではそれぞれ 10 kHz, 20 kHz 付近にてピークらしきものは見られるものの、Figure 5 と比較し大きな変化はない結果となった。Figure 9, Figure 10 はそれぞれ定常磁場作動、7 kHz 変動磁場作動の結果であるが、こちらでは 7 kHz 付近にて最大のピークが立っており、放電電流振動に変化を与えていることが見て取れる。

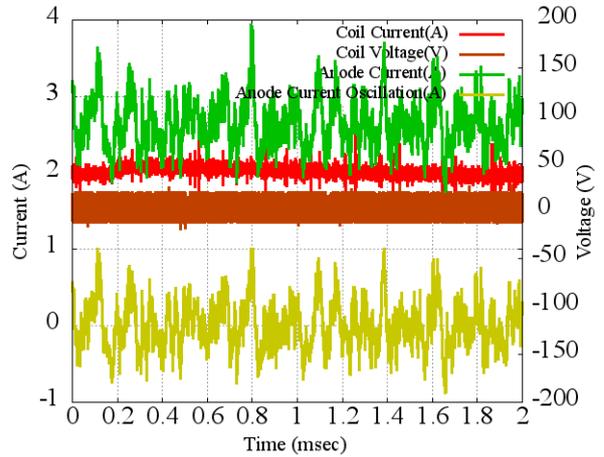


Figure 12 : 放電電流 2.5 A, 流量 20 sccm

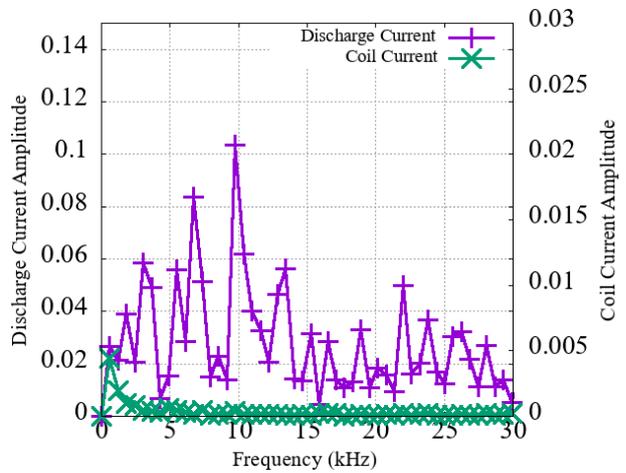


Figure 13 : 定常磁場作動での FFT 解析結果

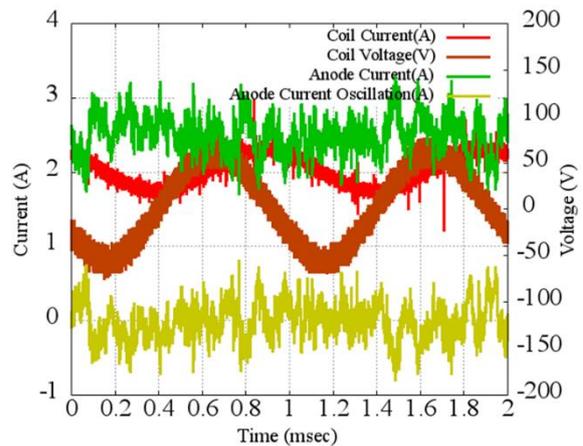


Figure 14 : 1 kHz 変動磁場, 放電電流 2.5A

高周波コイルでは交流電流の周波数が大きくなるにつれて、交流抵抗値の増大するため、交流電流が流しにくくなるということが知られている。現に Figure 6, 7, 8, 10 のコイル電流の周波数成分を比較すると、高周波になるにつれピークが小さくなっていることが分かる。このことを踏まえると、現時点では以下のことが考えられる。

- ・ 1, 7 kHz 作動においては磁場周波数付近の放電電流振動成分を増大させている
- ・ 10, 20 kHz ではコイル電流 (or 磁場) の変動が少なく, 主だった影響を与えられていない

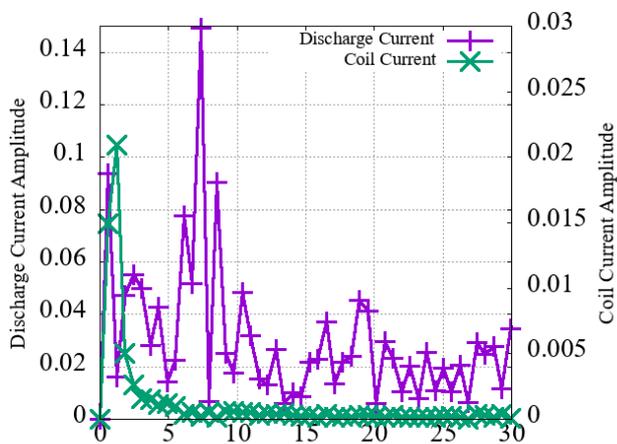


Figure 15 : 1 kHz 変動磁場作動での FFT 結果

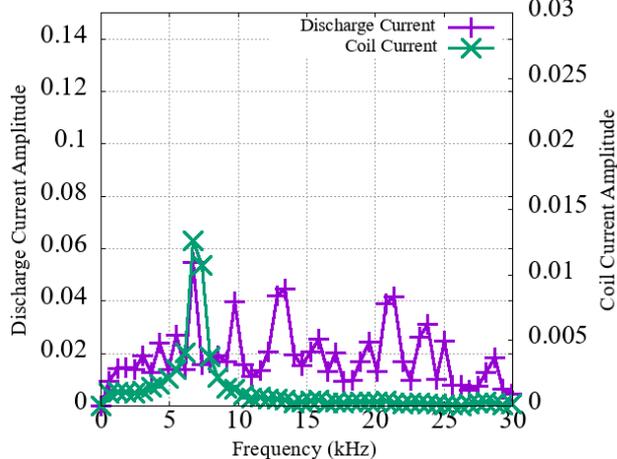


Figure 16 : 7 kHz 変動磁場作動での FFT 結果

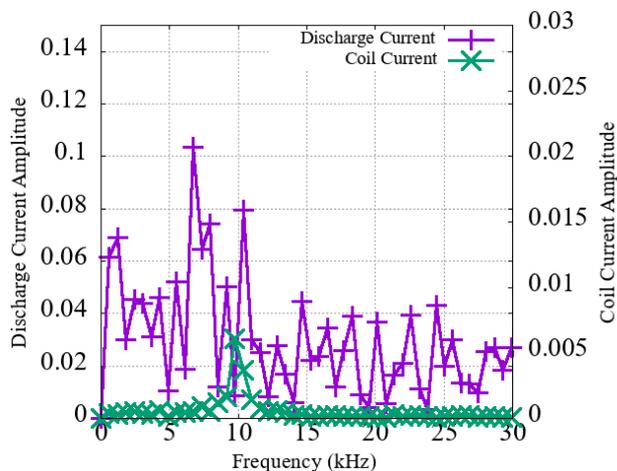


Figure 17 : 10 kHz 変動磁場作動での FFT 結果

**3.3 コイル - 放電回路直列での作動結果** コイルと放電回路を直列接続した状態にて, ホールスラストの作動を行った。Figure 15 に取得した放電特性を示す。また Figure 16 に放電電流・電圧波形の例を示す。定常作動時と比較し, こちらでは 250 V までの高電圧作動に成功した。また Figure 16 に示すように放電電流振動が大幅に抑えられており, コイルのインダクタンス値による効果があったものと考えられる。

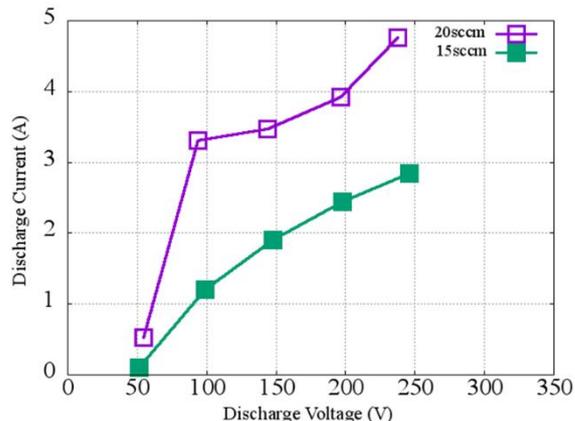


Figure 18 : コイル - 放電回路直列作動時の放電電流・電圧特性

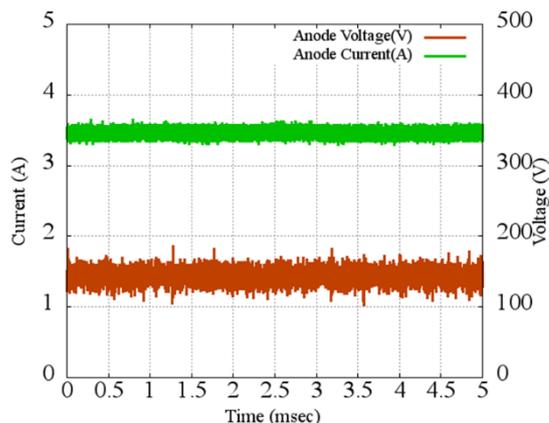


Figure 19 : 放電電圧 150 V での放電電流波形

**3.4 ホールスラスト試験作動のまとめ・考察** 定常磁場作動実験では, 100 V 未満の低電圧モード作動にとどまり, また測定された放電振動振幅は 500 mA 弱であり, 放電電流値の 20% に収まる。今後放電電流振動の抑制の実験のためには, 高電圧モードに移行し, 振幅値の大きい条件を探す必要がある。この放電振動に対して変動磁場の適用を試みたが, 変動磁場の周波数に対応した振動成分が増大する結果になった。また 10 kHz 変動磁場をかけた場合, 10 kHz 付近でピークは生じたものの, 10 kHz 以外の振幅値のピークのほうが大きかった。変動する磁場振幅が小さいため影響を与えていないと考えられる。高周波では, コイルの近接効果を抑制するようなコイル設計, 磁場形状の最適化を行っていく必要がある。

コイル-放電回路を直列接続した場合、先の定常磁場作動とは違い、250 V の高電圧モードまで到達した。また定常磁場作動の結果と比較し、放電電流振動の振幅を大幅に抑えることに成功した。コイルのインダクタンス値の効果によるものと考えられる。またこの作動方法はコイル電圧や放電電圧が変動する恐れがある。この状態での活動においては、近接効果のあるコイルを用いることで、異常放電や変動電圧が流れにくくなる利点がある。安定して作動しなかった定常磁場作動との違いは、磁場のかけ方にあると考えられる。定常磁場作動では磁場を弱めた状態でないとプラズマ点火しにくく、点火しても磁場を強めていくとプラズマが消えることが多い。一方直列作動の場合、プラズマ点火とともにコイルにも電流が流れ、ホールスラスタの安定作動もすぐ行える。

それぞれの作動について直近の課題は以下の通りである。

定常磁場作動においては

- ・高電圧モード作動
- ・各電圧での放電電流振動値の測定

変動磁場作動においては

- ・磁場発生機構、コイルの設計見直し
- ・放電振動値の大きい条件での作動

コイル-放電回路直列作動

- ・コイル電流と放電電流の最適化

#### 4. まとめ

放電電流振動の抑制を最終目的として、下記の3つを提案した。

- ・変動磁場を用いることによる抑制
- ・コイル-放電回路直列接続による抑制
- ・電磁鋼板を磁気回路に用いて、上記2つを達成する

電磁鋼板を用いた磁気回路およびホールスラスタを製造し、試験作動を行った。変動磁場を用いた試験では、現状では特定周波数の振動成分を増幅する結果となり、放電振動抑制は未達成である。一方、コイル-放電回路直列接続による抑制には成功した。こちらについては、コイル電流と放電電流の最適化が今後の課題である。

参考文献

- 1) K.Kuriki, Y.Arakawa: 電気推進ロケット入門 (東京大学出版, 2003)
- 2) H.Tahara, T.Fujita and Y.Shimizu, "Performance Prediction in Long Operation for Magnetic-Layer-type Hall Thrusters", IEPC 2009 -140
- 3) Boeuf, J.P. and Garritues, L., "Low Frequency Oscillation in a Stationary Plasma Thruster", J. Appl. Phys., 84(1998), pp.3541-3554

4) Baranov V. I., Nazarenko Yu. S., Petrosov V. A., Vasin A. I., and Yashonov Yu. M. "Theory of oscillations and Conductivity For Hall Thruster" AIAA 96-3192, 32nd

AIAA/ASME/SAE/ASEE joint Propulsion Conference, Lake Buena Vista, FL, July 1996

5) Fife, J. M., Martinez-Sanchez, Manuel, and Azabo, James "A numerical study of low-frequency discharge oscillations in Hall thrusters" AIAA96-3052, 33rd AIAA/ASME/SAE/ASEE joint Propulsion Conference. Seattle, WA, July, 1997

6) Darnon F., Kadlec-Philippe C., Bouchoule A., and Lyszuk M. "Dynamic Plasma & Plume Behavior of SPT thrusters" AIAA98-

3644, 34th AIAA/ASME/SAE/ASEE joint Propulsion Conference.

July 1998, OH.

7) N. Yamamoto, N. Yasui, K.Kourasaki and Y. Arakawa:

"Suppression of the discharge vibration of a Hall thruster" STEP-2003-04, 2003, pg.229-232

8) NIPPON STEEL & SUMITOMO METAL, "ELECTRICAL STEEL SHEETS", D003jec\_05\_201509f, 2012

9) NIKKIN DENJI KOGYO Co., Ltd., "Thin-gauge silicon steel strips and Applied products", 2008