

電磁鋼板を用いたホールスラスタ用磁気回路の高速磁場応答性

Magnetic Responsiveness of Magnetic Circuit composed of Electrical Steel for Hall Thruster

○岡 優介(東大)・細田 聡・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)・

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

Abstract (概要)

One of the main problems of a Hall thruster is the discharge current oscillation, especially at the frequency range of 10 kHz. This phenomenon makes the thruster operation unstable and reduces the thrust efficiency. 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. For the first step, we composed two types of magnetic circuit (composed of pure iron and electrical steels) and investigated the magnetic responsiveness of electrical steels magnetic circuit. Though electrical steels magnetic circuit showed higher responsiveness than the pure iron circuit, they did not have much difference at 1 kHz and 10 kHz. Optimization of the magnetic circuit's shape is required.

1. 研究背景

1.1 ホールスラスタ ホールスラスタは、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とから、地球近傍でのミッションや有人宇宙探査に最適な電気推進機構である¹⁻³⁾。しかし、ホールスラスタ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 PPU (Power Processing Unit) への悪影響、スラスタ作動停止、そして推進効率低下などを引き起こすためである。過去の研究から、この現象はホールスラスタ内部で周期的に発生する電離不安定性に起因することがわかってきた^{4,7)}。

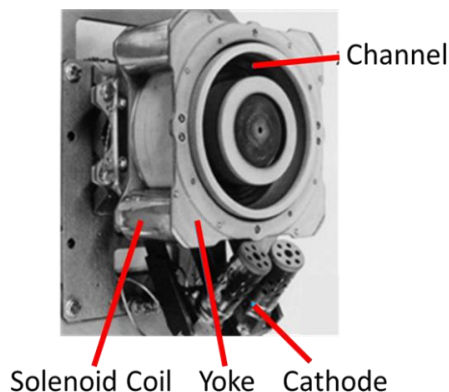


図 1: ホールスラスタ概観

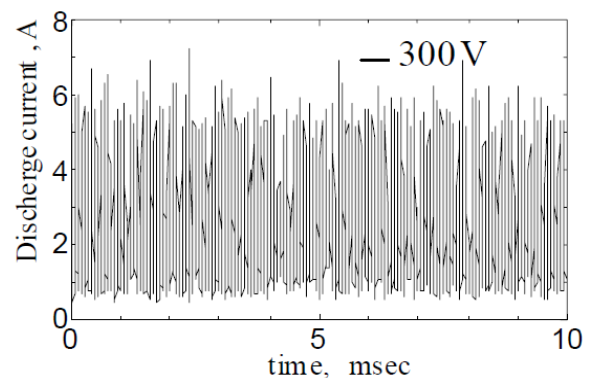


図 2: 放電電流振動の例²⁾

1.2 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。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”と各方向の磁気特性が均一である“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(巻き鉄芯)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)。

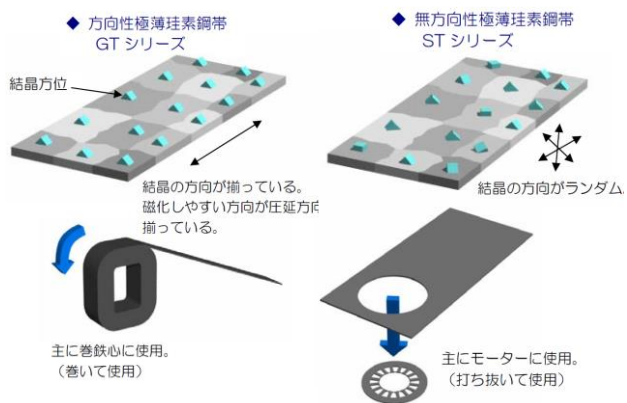


図 3: 電磁鋼板⁹⁾

1.3 研究目的 本研究では、放電電流振動の低減を最終目標とし、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。同時に、コイル-放電回路を直列接続したときに、電磁鋼板の高速磁場応答性により、異常放電や放電電流振動による磁場の作動不安定を抑制する効果も期待される。これらの前段階として、電磁鋼板を用いた磁気回路の高速磁場応答性を検証する必要がある。研究目的を以下にまとめる。

- ・電磁鋼板を用いた磁気回路にて高速磁場応答性の検証
- ・高速磁場応答性を用いた放電電流振動の抑制
- ・コイル-放電回路を直列接続時の作動不安定抑制

2. 実験の詳細

2.1 実験目的・磁気回路設計 電磁鋼板を用いた磁気回路の高速磁場応答性を検証するために、以下を目的とした実験を行った。

- ・ホールスラスト用磁気回路の設計
- ・高速磁場応答性の検証
- ・磁気回路形状の最適化

磁気回路は電磁鋼板製と純鉄製の2種類を製造した。電磁鋼板製のものは、方向性電磁鋼板を用いたトランスコア4個と無方向性電磁鋼板を用いた内部ヨーク・外部ヨークを組み合わせる(図4参照)。純鉄製のものは、電磁鋼板製と同形状だが、トランスコア・内部ヨーク・外部ヨークの材質がすべて純鉄である(図5参照)。

2.2 実験条件 磁気回路にコイル1つ(内部コイル)を装着し、コイルに変動電流 0.29~0.31 A (DC成分 0.30A, AC成分 0.01A)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 10Hz, 100Hz, 1kHz, 10kHz の場合について測定した。同様の実験を2種類の磁気回路で行い、電磁鋼板製・純鉄製の磁場挙動の違いを検証した。(図7参照)

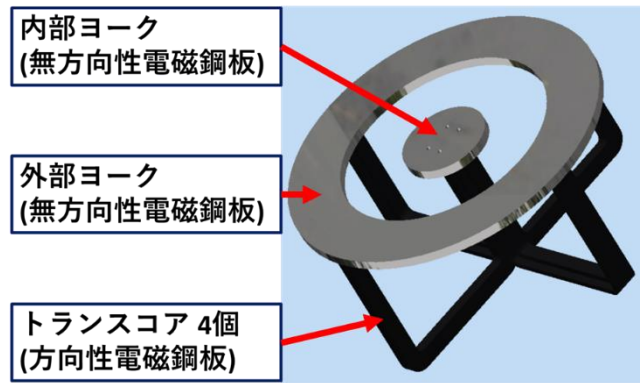


図 4: 磁気回路設計 (電磁鋼板製)

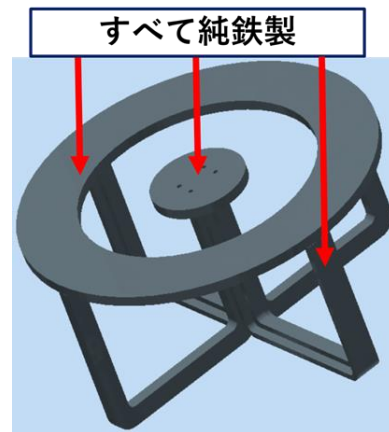


図 5: 磁気回路設計 (純鉄製)

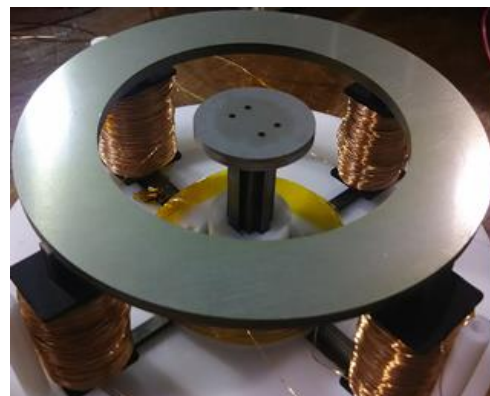


図 6: 製造した磁気回路

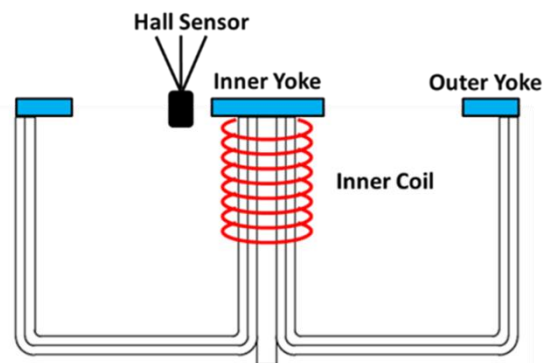


図 7: 実験条件概念図

3. 実験結果

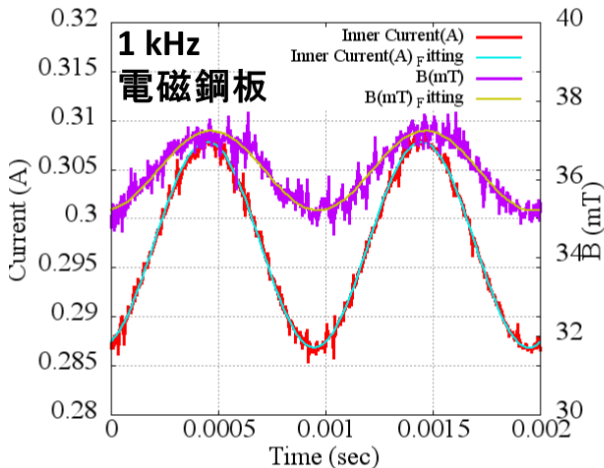


図 8: コイル電流 - 磁束密度 (電磁鋼板 1 kHz)

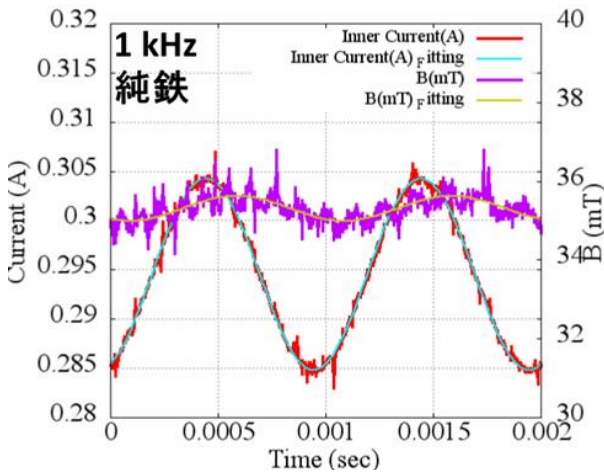


図 9: コイル電流 - 磁束密度 (純鉄 1 kHz)

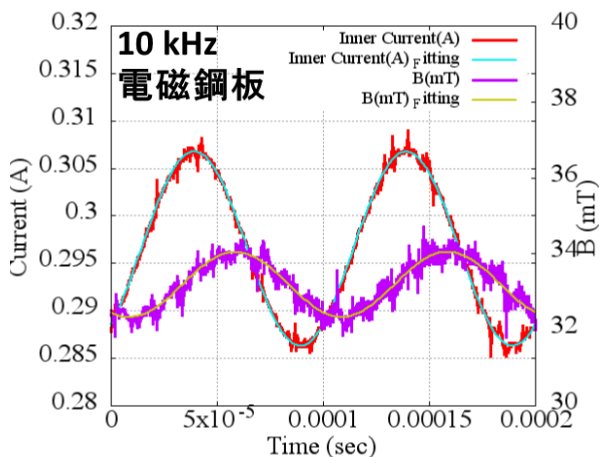


図 10: コイル電流 - 磁束密度 (電磁鋼板 10 kHz)

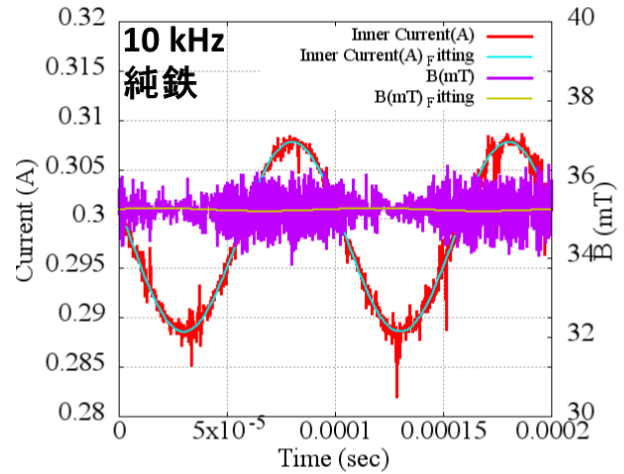


図 11: コイル電流 - 磁束密度 (純鉄 10 kHz)

3.1 実験結果について 図 8,9 に 1kHz の変動電流を流した場合の電磁鋼板・純鉄製の coils 電流, 磁束密度波形を, 図 10, 11 に 10kHz の変動電流を流した場合の電磁鋼板・純鉄製の coils 電流, 磁束密度波形を示す。これらの図から, 1kHz では磁束密度波形の振幅が, 純鉄より電磁鋼板の結果のほうが大きいことが視覚的にわかる。また 10kHz でも, 純鉄の磁束密度波形は安定して変動していないことがわかる。

図 12 に磁束密度波形振幅の比較図, 図 13 に電流 - 磁場波形の位相差の比較図を示す。図 12 より, 定量的に見ても磁束密度波形振幅は電磁鋼板のほうが大きいことがわかる。また図 13 から, 電磁鋼板の結果のほうが, 電流 - 磁場波形の位相差が少ないことがわかる。これらのことから, 電磁鋼板製の磁気回路のほうが高速磁場応答性をもつことができた。

3.2 Discussion 図 13 より, 電磁鋼板製の磁気回路でも, 1kHz, 10kHz の結果では電流 - 磁場波形の位相差が大きく, 純鉄製の結果からあまり改善されていないことがわかる。最終目標である, 放電電流振動の抑制のためには, 放電電流振動と同じ周波数 (10kHz 前後) の変動電流を流す必要があり, 1kHz-10kHz の高速磁場応答性を改善する必要がある。この原因として, ヨークのトランスコア接触面にて生じる渦電流や磁気抵抗が考えられる。

そのため今後, 磁気回路形状の最適化を行っていく。具体的には新たな磁気回路(放射状磁気回路)を設計・製造中であり, 新しい磁気回路で同じ実験を行い, 今回の実験で用いた磁気回路の実験結果との比較を行っていく。

4. まとめ

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用いて、磁場を意図的に変動させることによって、放電電流振動を抑制することを提案した。

本論文では、その前段階として、電磁鋼板を用いたホールスラスト用磁気回路を試作し、電磁鋼板の高速磁場応答性を検証する実験を行った。同じ変動電流を流した結果、電磁鋼板の磁気回路にて、磁場変動の振幅が大きくなり、また電流 - 磁束密度波形の位相差が少なくなった。これらの結果から、電磁鋼板を用いた磁気回路のほうが、純鉄製のものと比べて、高速磁場応答性があること示せた。しかし 1kHz, 10kHz での高速磁場応答性改善のために、磁気回路形状を最適化する必要がある。

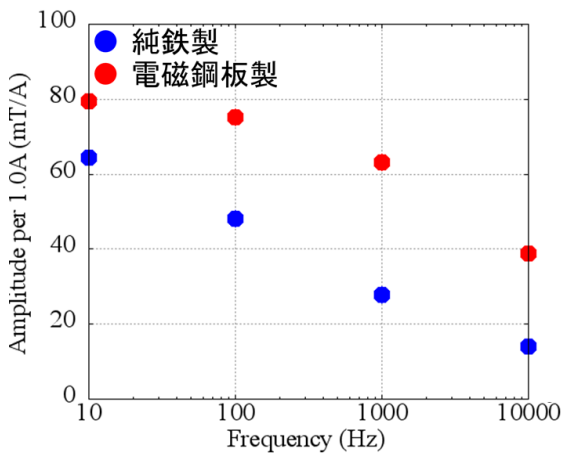


図 12: 磁場振幅の比較

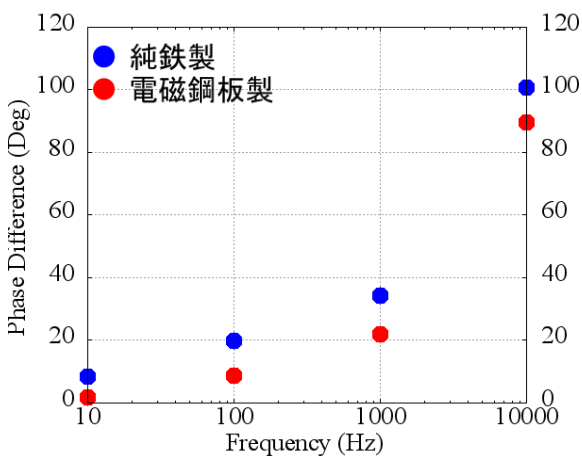


図 13: 電流 - 磁場波形の位相差比較



図 14: 新しい磁気回路 (放射状磁気回路)

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