

高周波プラズマと誘導加速を用いた無電極推進機のパルス式加速の評価

Evaluation of Pulsed Acceleration Experiment of Radio-Frequency Inductive Plasma Accelerator with Low-Aspect Ratio RF-Plasma

○柳沼 和也（東大院）・松隈 俊大・小泉 宏之（東大）・小紫 公也

○Kazuya Yaginuma (The University of Tokyo)・Toshihiro Matsuguma・Hiroyuki Koizumi・Komurasaki Kimiya

Abstract（概要）

Radio-frequency inductive plasma accelerator with low-aspect ratio RF-plasma is produced for 1MW-class high-power, full-electrodeless plasma thruster. RF-plasma is independently generated and accelerated in the same region of an insulation chamber. Generated plasma is accelerated continuously by radio frequency inductive acceleration of an applied magnetic field and an induced current within the plasma. We performed impulse measurement using pulsed acceleration circuit for demonstration of thruster's concept. Thrust generation was validated by impulse measurement using target-type-thrust-stand. A measured impulse to energy used for plasma acceleration was evaluated under three conditions changed acceleration coil shape. Acceleration coil shape of the flat-spiral type has shown a larger impulse to energy value than the other loop-coil-shaped.

記号の説明

j :	電流
f_{ac} :	加速用コイル電流周波数
f_{as} :	加速信号周波数
f_t :	ターゲットスタンドの周波数
l :	加速用コイルの長さ
m :	質量
t :	時刻
t_s :	パルス加速を開始した時刻
α :	加速用コイル電流減衰率
ε :	残差
μ :	ターゲット変位減衰率
φ_n :	ターゲット変位の位相
A_n :	パルス加速 n 回後の推定ターゲット変位
$A_{measured}$:	測定ターゲット変位
B :	磁束密度
C :	キャパシタ容量
E :	パルス加速消費エネルギー
E_{ac} :	加速用コイル消費エネルギー
E_c :	消費エネルギー
E_{plasma} :	プラズマ消費エネルギー
E_{total} :	キャパシタ充電エネルギー
I :	インパルス
R_{ac} :	加速用コイルの実抵抗
R_c :	パルス加速回路の実抵抗

1. 緒言

現在, 医療やエネルギー技術の発展などを求め 2030 年までに有人深宇宙探査を行う計画が進められている⁰. 有人深宇宙探査ミッションを達成するためには 1MW 級大型電気推進が必要となってくるが, 現在は実現に至っておらず, 開発が渴望されている.

既に実用化されている数 kW 級電気推進をスケールアップすることで 1 MW 級電気推進を達成することは可能である. ホールスラストやイオンスラストなど電極を有する数 kW 級電気推進は高効率で達成されており²⁰, 軌道上での作動実績がある⁵⁰. しかし, 実用化されている電気推進はその作動において電極を用いており, 原理的な寿命が存在する. よって電極損耗と寿命評価のための地上試験が必須となる. さらに 1 MW 級電気推進の長時間地上作動試験には数 kW 級電気推進の試験にくらべてより巨大なチェンバが必要になる. 1 MW 級電気推進の寿命評価のためには膨大な時間と費用を要する.

電極損耗がなく原理的な寿命がない無電極推進機も提案されており, 1 MW 級電気推進を目標として研究が進められている⁷⁹. 完全無電極推進機において, 高効率を達成しかつ実用化された例はいままでにない. 無電極推進機として最適なプラズマ源とプラズマ加速方法の組み合わせはわかっていない. しかし, 無電極推進機の欠点は現在主要な原理が明らかになっていないということ 1 点だけであり, 研究がすすみ無損耗でかつ地上長時間作動試験が不要の電

気推進が実用化されると、有人深宇宙探査ミッション・軌道間大規模宇宙輸送などが活発になり、よりいっそう宇宙開発を促進することにつながる。

1 MW 級大電力電気推進を達成する電気推進の候補として、高周波プラズマと高周波誘導加速を組み合わせた完全無電極推進機が提案されている¹⁰⁾。本研究の目的は、提案加速スキームによる推力発生の実証とインパルス測定による加速条件の評価である。本研究では作動実証のために、パルス加速回路とターゲット式スラストスタンドを用いたインパルス測定実験を行い、パルス加速回路の条件ごとのインパルス・エネルギー比を評価し、推進機の定常作動に向けた加速条件の傾向を評価した。

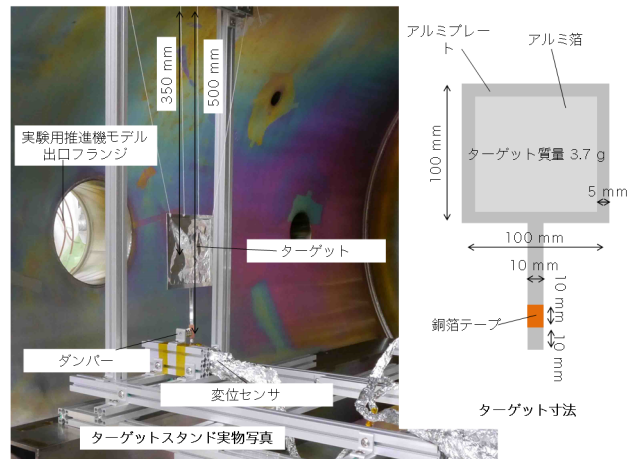


図 3 ターゲット式スラストスタンド

2. 高周波プラズマと誘導加速を用いた無電極推進機

2.1 高周波プラズマを用いたプラズマ原 プラズマが生成されてから排出されるまでの時間を短くすることでプラズマの壁面損失を抑えることができる。つまり、プラズマ生成領域から推進機出口までの距離を短くする。従ってプラズマ源の形状として低アスペクト比形状を選択した(図 1)。

2.2 誘導加速 推進機の周辺に配置した加速コイルに大電流を流すことで、磁場 B とプラズマ中に電流 j が誘起される。これらの相互作用、ローレンツ力 $j \times B$ によってプラズマは加速される(図 1)。

提案する無電極推進機はプラズマ生成領域とプラズマ加速領域が重なっている。推進機が定常作動する際には図 2 に示す(1) - (4)のサイクルを誘導磁場 B の位相に従い繰り返す。図 2 において、(1)は加速フェーズの開始、(2)は加速フェーズの終了、(3)は減速フェーズの開始、(4)は減速フェーズの終了を表している。加速フェーズ時には B^2 が時間的に増加し、それに伴いプラズマは磁気圧によって押し、加速される。そして、加速フェーズ中に推進機内に存在するプラズマを全て排出する。減速フェーズ時に推進機に存在するプラズマは排出されない、一方でプラズマは生成し続ける。減速フェーズ中には次の加速フェーズが訪れる前までに十分なプラズマ生成を行う必要がある。

3. 実験装置

3.1 真空装置 本研究では $\phi 1.2$ m、長さ 1.7 m のステンレス製の真空チェンバを使用した。真空チェンバ側面の $\phi 180$ mm のフランジに実験用推進機モデルを取り付けて実験を行った。高真空引き用に排気量 2500 l/s (N_2) のクライオポンプを使用した。実験用推進機モデルは真空チェンバの側面フランジに取り付けたまま実験を行った。

3.2 プラズマ生成装置 プラズマ生成用高周波電源には印加周波数が 13.56 MHz、最大出力電力は 400W のものを使用した。特性インピーダンスは 50 Ω である。プラズマ生成用コイルには $\phi 2$ mm の銅線を $\phi 180$ mm のガラス管

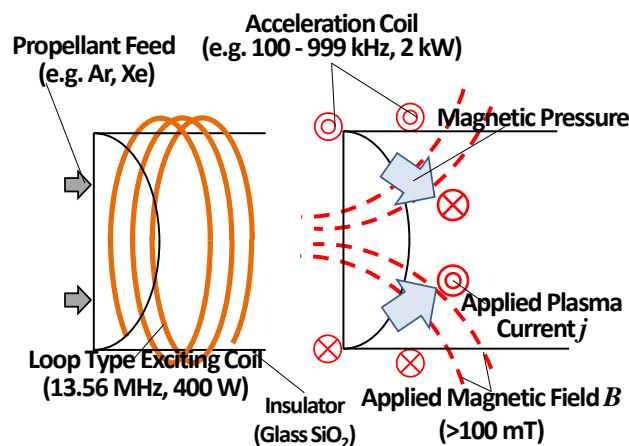


図 1 プラズマ生成とプラズマ加速の概念図

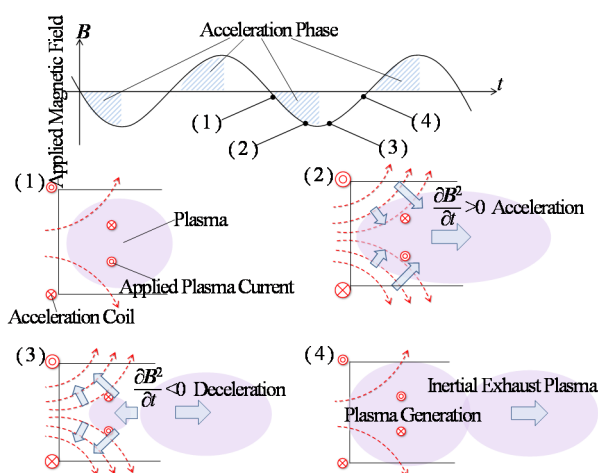


図 2 定常作動時のプラズマ生成と加速のサイクル

に3回巻きつけたものを使用した。生成用コイルのインピーダンスマッチングは可変インダクタと可変キャパシタを用いて行った。

3.3 ターゲット式スラストスタンド 加速されたプラズマをターゲットに当て、ターゲットの変位を測定しそこからインパルスを測定する。ターゲット式スラストスタンドの外観を図3に示す。ターゲットは100 mm×100 mmのターゲット部に変位計での測定レベルを上げるために設けた10 mm×100 mmの測定部からなり、さらターゲットは裁縫用糸4本によって吊るされている。ターゲット部のアルミプレートの厚さは0.3 mmで、中央に90 mm×90 mmの正方形ができるように繰り抜かれている。アルミプレートの繰り抜かれた部分にはアルミ箔が貼られている。変位の測定にはオムロン製の品番 Z4D-F04ALED 変位計を用いた。測定レンジは4 mm 分解能は5 μ mである。

3.3 パルス加速回路 パルス加速実験において、加速コイル電流にパルス電流を印加するパルス加速回路について述べる。パルス加速回路の等価回路図を図4に示す。パルス加速回路はインダクタ(加速用コイル)、キャパシタ、キャパシタ充電用電源およびスイッチからなる。

パルス加速実験では3種類の加速用コイルを使用した。3つの加速用コイルの外観を図5(a)–(c)に示す。それぞれの巻数は7巻であり、形状は内径120 mm、外径200 mmのフラットスパイラル形状(図5(a))、外径120 mmのループ形状(図5(b))と外径200 mmのループ形状(図5(c))である。

パルス加速回路を駆動するスイッチにはIGBTを使用した。ターゲットスタンドの固有振動数に近い振動数 f_{as} で、IGBTに加速信号を加えることで、加速用コイルに高周波大電流を印加した。

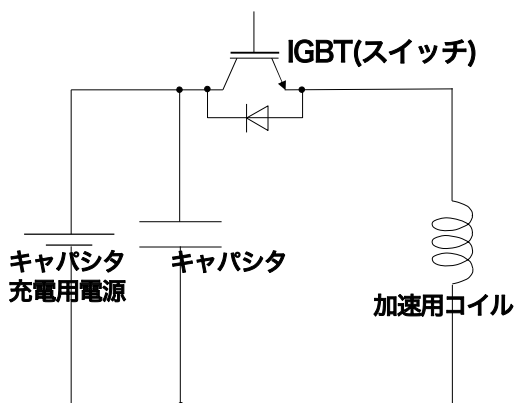
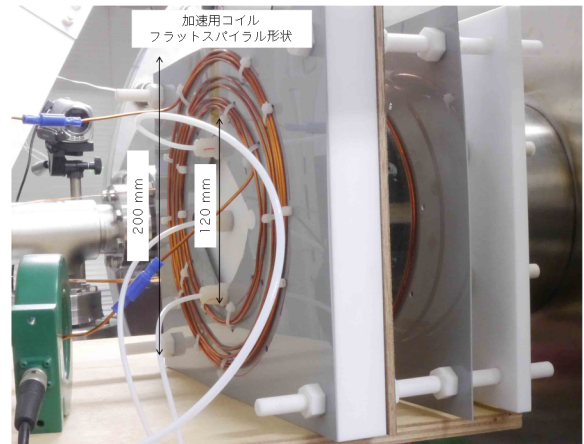
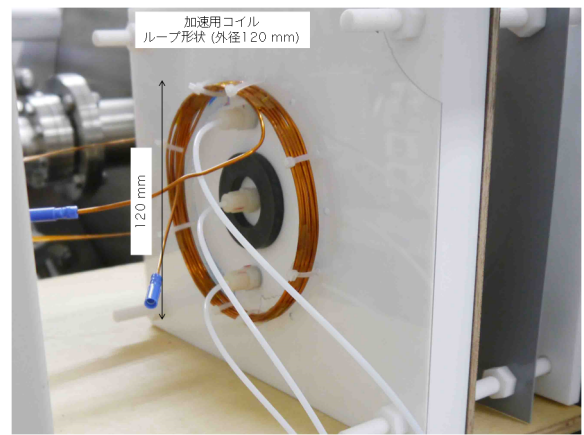


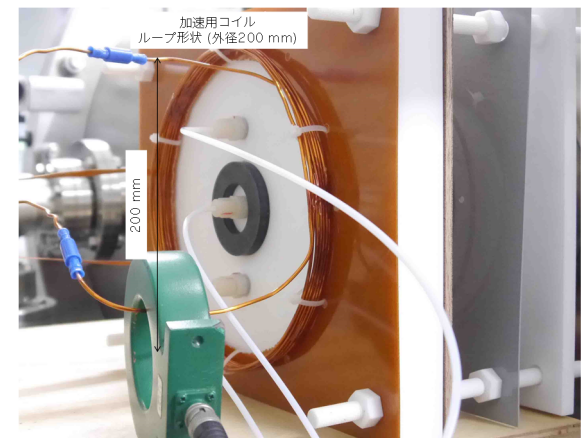
図4 パルス加速回路図



(a) 加速用コイル 7巻 フラットスパイラル形状



(b) 加速用コイル 7巻 ループ形状 外径120 mm



(c) 加速用コイル 7巻 ループ形状 外径200 mm

図5 パルス加速実験に使用した3種類の加速用コイル

4. 実験方法

パルス加速実験の加速条件の評価値として、プラズマ加速に使用されたエネルギーに対する測定されたインパルス I/E を用いる。ここではインパルス I の推定方法と加速エネルギー E の推定方法をそれぞれ述べる。

4.1 インパルスの推定方法

に近い周波数でパルス加速を繰り返し、 n 回目のインパルスが加えられた時のターゲット振幅を A_n とする。インパルスが加えられる前のある時刻 t におけるターゲット変位 x を、

$$x = A_0 e^{-\mu(t-t_s)} \sin(2\pi f_i(t-t_s) + \varphi_0) \quad (1)$$

と表す。パルス加速を開始する前の 5 周期分のターゲット変位履歴データと式(1)のフィッティングを行い、ターゲット変位の初期条件 A_0 及び φ_0 を決定する。また、インパルスが加えられる前後において、与えられるインパルスを I とするとターゲット変位の振幅と位相 $A_n, A_{n+1}, \varphi_n, \varphi_{n+1}$ の間には次の連続の式(2)と運動量保存の式(3)が成り立つ。

$$A_n e^{\mu \tau} \sin(2\pi f_i/f_{ac} + \varphi_n) = A_{n+1} \sin(2\pi f_i/f_{ac} + \varphi_{n+1}) \quad (2)$$

$$2\pi f_i m A_n e^{-\mu \tau} \cos(2\pi f_i/f_{ac} + \varphi_n) + I = 2\pi f_i m A_{n+1} \cos(2\pi f_i/f_{ac} + \varphi_{n+1}) \quad (3)$$

さらに式(2), (3)を変形すると、

$$A_{n+1} = \sqrt{(e^{-\mu/f_{as}} A_n)^2 + 2e^{-\mu/f_{as}} A_n \cos(2\pi f_i/f_{as} + \varphi_n) \frac{I}{2\pi f_i m} + \left(\frac{I}{2\pi f_i m}\right)^2} \quad (4)$$

$$\varphi_{n+1} = \sin^{-1}(e^{-\mu/f_{as}} A_n/A_{n+1} \sin(2\pi f_i/f_{as} + \varphi_n)) - 2\pi f_i t \quad (5)$$

ここで測定したターゲット変位の振幅 A_{measured} と A_n に対して、残差 ε を、

$$\varepsilon = \sum (A_{\text{measured}} - A_n)^2 \quad (6)$$

を最小化するような I と f_i を数値的に求める。

ターゲット変位の時間履歴データからインパルスを推定する 1 例を示す。図 6 はパルス加速前後のあるターゲット変位の時間履歴と、ターゲット変位初期条件を決定するフィッティングラインおよび、推定したターゲット振幅を表している。パルス加速は図 6 の $t = 7$ s に始まり、 $t = 47$ s に終わっている。

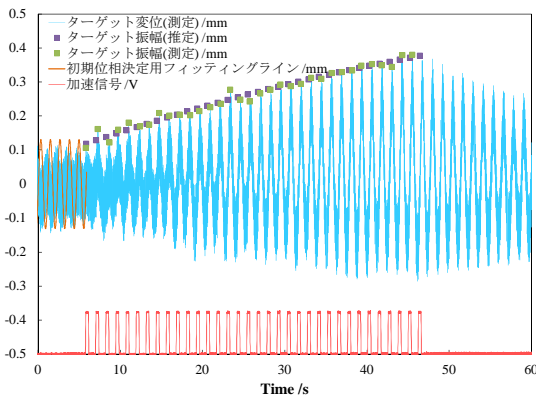


図 6 測定したターゲット変位の時間履歴と、ターゲット振幅及びターゲット位相の推定例。この測定データにおける推定インパルスは $I = 0.22 \mu\text{Ns}$ である。

シタに充電されたエネルギー E_{total} は、パルス回路内で消費されるエネルギー E_c 、加速用コイルで消費されるエネルギー E_{ac} とプラズマに投入されるエネルギー E_{plasma} の 3 つのエネルギーの和に等しい。

$$E_{\text{total}} = E_c + E_{ac} + E_{\text{plasma}} \quad (7)$$

提案する推進機は定常作動を目標としているため、パルス回路内で消費されるエネルギーは推進機システムを評価する上で考慮する必要がない。パルス加速実験において加速に使われたエネルギー E を次のように決めた。

$$E = E_{ac} + E_{\text{plasma}} \quad (8)$$

一方で、本研究において現在 E_{total} に対する E_{plasma} は無視できるほどに小さい。よって加速に使われたエネルギー E はパルス加速回路の実抵抗 R_c と加速用コイルの実抵抗 R_{ac} の和 $(R_c + R_{ac})$ に対する R_{ac} の比から、

$$E = E_{\text{total}} R_{ac} / (R_c + R_{ac}) \quad (9)$$

と決めた。ここで $(R_c + R_{ac})$ はパルス加速回路放電時の加速用コイル電流の時間履歴から求めた。加速用コイル電流 $j(t)$ を次の関数、

$$j(t) = j_{ac} e^{-\alpha(t-t_s)} \sin(2\pi f_{ac}(t-t_s)) \quad (10)$$

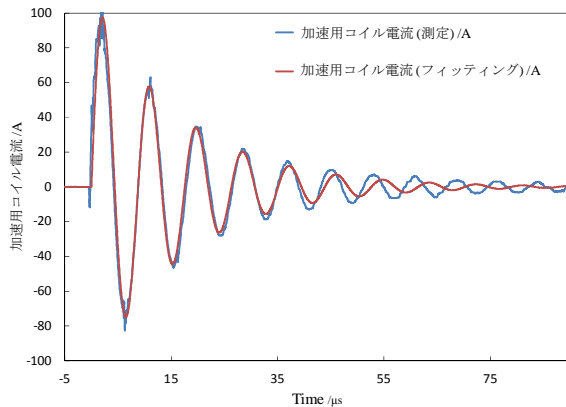
にフィッティングし、加速用コイルの減衰率 α を推定すると、 $(R_c + R_{ac})$ が次のように計算できる。

$$(R_c + R_{ac}) = \alpha / (C(2\pi f_{ac})^2) \quad (11)$$

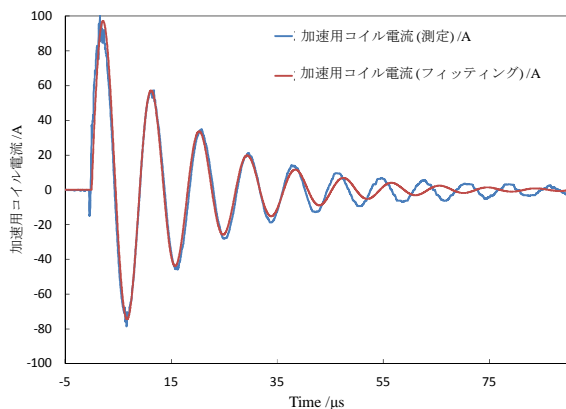
さらに、 R_{ac} は加速用コイルの長さ l に比例すると仮定する。加速コイル形状が外径 200 mm のループ形状の時の添字を D200、外径 120 mm のループ形状の時の添字を D120 と決めると R_c は、

$$R_c = \{l_{D200}(R_c + R_{ac})_{D200} - l_{D120}(R_c + R_{ac})_{D120}\} / (l_{D200} - l_{D120}) \quad (12)$$

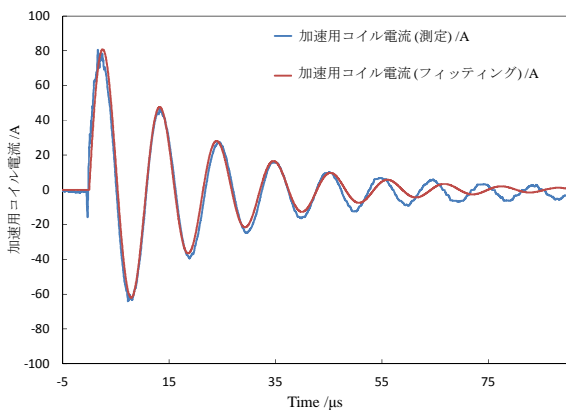
と求められる。ログスキーコイルを用いて測定した加速用コイル電流履歴を図 7 に示す。図 7(a) はフラットスパイラル型の加速コイルで、減衰率 $\alpha = 0.059$ /s、加速用コイル電流周波数 $f_{ac} = 114$ kHz (72 mJ) であった。図 7(b) は外径 120 mm のループ型加速コイルで減衰率 $\alpha = 0.058$ /s、加速用コイル電流周波数 $f_{ac} = 110$ kHz (72 mJ) であった。図 7(c) は外径 200 mm のループ型加速コイルで、減衰率 $\alpha = 0.049$ /s、加速用コイル電流周波数 $f_{ac} = 93$ kHz (72 mJ) であった。



(a) フラットスパイラル形加速用コイルの電流履歴.
加速コイル電流周波数: 114 kHz (72 mJ).



(b) 外径 120 mm ループ形加速用コイルの電流履歴.
加速コイル電流周波数: 110 kHz (72 mJ).



(c) 外径 200 mm ループ形加速用コイルの電流履歴.
加速コイル電流周波数: 93 kHz (72 mJ).

図 7 加速用コイル電流履歴

4.3 実験条件 パルス加速実験では定常的な高周波プラズマを生成した後、パルス加速回路をターゲットスタンドの固有振動数に近い振動数で駆動させ、ターゲットを励振させた。加速条件のパラメータは加速用コイル形状、加速コイル電流周波数、プラズマ生成電力の3つである。加速コイルにはフラットスパイラル形状 (内径 120 mm, 外

径 200 mm)、ループ形状 (外径 120 mm) とループ形状 (外径 200 mm) の3種類を使用した。加速コイル電流周波数はパルス加速回路内のキャパシタ容量を変化させることによって 50 kHz – 240 kHz (キャパシタ充電エネルギー: 18 mJ – 288 mJ) の範囲で変化させた。プラズマ生成電力は 200 W, 300 W, 400 W で変化させた。推進剤はキセノン (流量 1.93 mg/s) を用いた。

5. 実験結果

加速用コイル形状ごとのパルス加速実験の結果を図 8-図 10 に示す。図 8 はフラットスパイラル形加速用コイルの結果、図 9 は外径 120 mm ループ形加速用コイルの結果、図 10 は外径 200 mm ループ形加速用コイルの結果である。図 8-図 10 はそれぞれプラズマ生成電力ごとの加速用コイル電流周波数に対する加速エネルギー・インパルス比 I/E を表している。

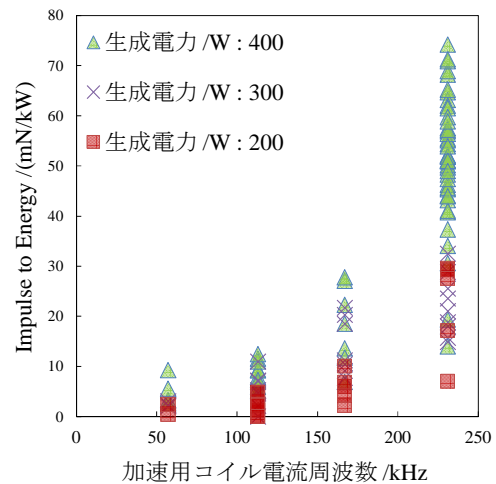


図 8 フラットスパイラル形加速用コイルを用いたパルス加速実験結果。

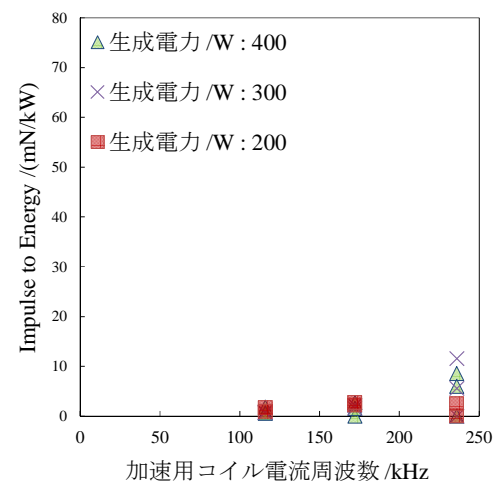


図 9 外径 120mm ループ形加速用コイルを用いたパルス加速実験結果。

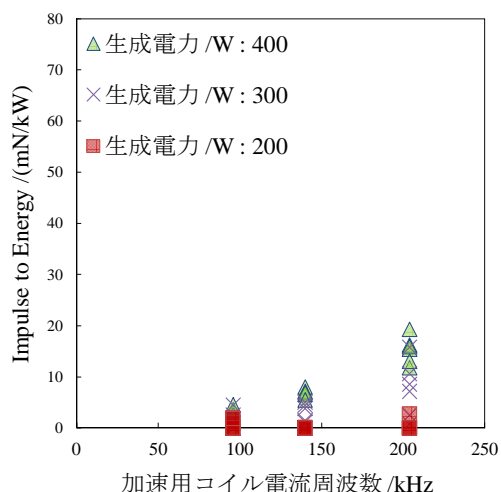


図 10 外径 200 mm ループ形加速用コイルを用いたパルス加速実験結果.

6. 考 察

加速コイル電流周波数の増加にともなって I/E は増加した. これは誘導加速の原理において磁気圧が $\partial B^2 / \partial t$ に比例していることから, 加速コイル電流周波数が増加に伴いと磁場の変動速度が増し, 加速後のイオン粒子速度が増加したと考えられる. ただし, イオンがこの現象に追従できなくなるほど加速コイル電流周波数を大きくすると加速が行えなくなる. この加速コイル電流周波数の増加に伴い I/E が増加する効果には限界があるが, 本研究における加速条件の範囲 (50 kHz - 240 kHz) では限界が発見できなかったと考えられる.

加速コイル形状はフラットスパイラル型, $\phi 200$ ループ型, $\phi 120$ ループ型の順でより大きい I/E が得られた. 加速コイル形状によって推進機性能に優劣が現れたことにより最適な加速コイル形状が存在すると考えられる. 今後の加速コイル形状の探索方針は 2 つある. 1 つ目は生成する誘導磁場形状をより平面にする方針, 2 つ目はループ型とフラットスパイラル型の間で最適な加速コイル形状を探索する方針である. 将来的に多段コイルによるプラズマ加速を考えた場合, 方針 1 は 1 段目の加速コイル形状の探索に, 方針 2 は 2 段目以降の加速コイル形状の探索に有効な研究になると考えられる.

7. 結 言

結言として以下 2 つをあげる.

(1) 加速コイルに高周波大電流をパルスのに印加するパルス加速実験を行い, ターゲット式スラストスタンドによってインパルス測定を行うことで, 提案加速スキームによ

る推力発生を実証した.

(2) 加速に使用されたエネルギーとスラストスタンドにより測定されたインパルスの比: I/E を評価値とした. 加速コイル形状, 加速コイル電流周波数, プラズマ生成条件をパラメータとして I/E の変化を調べた. 加速コイル形状はフラットスパイラル型のもので I/E が大きくなり, 加速コイル電流周波数は 50 kHz - 240 kHz の範囲で実験を行い, 加速コイル電流周波数の増加に従い I/E が増加する傾向を掴んだ.

謝 辞

本研究は日本学術振興会 科学研究費助成事業 挑戦的萌芽研究 No. 25630387 の補助を受けて行われました.

参 考 文 献

- 1) International Space Exploration Coordination Group, The Global Exploration Roadmap, 2013.
- 2) Kristi de Grys, Alex Mathers and Ben Welander "Demonstration of 10,400 Hours of Operation on a 4.5 kW Qualification Model Hall Thruster," 46th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, AIAA 2010-6698, 2010
- 3) David Manzella, Robert Jankovsky and Richard Hofer "Laboratory Model 50 kW Hall Thruster," NASA TM-2002-211887, AIAA-2002-3676, 2002
- 4) Hermann, D. A. : Status of the NEXT Ion Thruster Long-Duration Test After 10,100 hr and 207 kg Demonstrated, NASA TM-2008-215030, AIAA-2007-5272, 2008.
- 5) Christophe R. Koppel and Frederic Marchandise: The SMART-1 Electric Propulsion Subsystem In Flight Experience, AIAA-2004-3435, 2004
- 6) 細田聡史, 國中均 : イオンエンジンによる小惑星探査機「はやぶさ」の帰還運用, J. Plasma Fusion Res., Vol86 No.5 pp.282-292, 2010.
- 7) Charles, C., Boswell, R.W. and Alexander, P. : Helicon Double Layer Thrusters, 42nd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, AIAA 2006-4838, 2006
- 8) Cassady, L. D., Longmier B. W. and Olsen, C. S., et al. : VASIMR Performance Results, 46th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, AIAA 2010-6772, 2010
- 9) 都木恭一郎, 篠原俊二郎, 谷川隆夫 他 : 小ヘリコン源プラズマの RF アンテナ加速," JAXA RR-09-003, 2003
- 10) Yaginuma, K., Koizumi, H., Komurasaki, K. : Fundamental Experiment of RF-Inductive-Accelerator in Low Aspect Ratio Helicon Plasma using the Cusp Magnetic, 34th International Electric Propulsion Conference, 2015-b/IEPC-443p, Kobe Japan, Jul. 2015