

## 50J 同軸型/平行平板型パルスプラズマスラスタの性能評価

○岩月由輝（首都大学東京・学） 森真也，田麥雄也，田尻啓祐（首都大学東京・院）  
青柳潤一郎，竹ヶ原春貴(首都大学東京)

本研究では、平行平板型パルスプラズマスラスタ(PPT)の性能向上を目指し、放電経路中のエネルギー損失を低減した 50J クラスのスラスタを設計・製作し、推進効率 27%を達成した。本研究では同軸型 PPT においてもエネルギー損失の低減をはかり、新たに 50J 同軸型 PPT を設計・製作した。新たに製作した同軸型 PPT においても推進性能の向上を確認した。

### 1.研究背景

電気推進機の一つであるパルスプラズマスラスタ(Pulsed Plasma Thruster; PPT)は固体推進剤を用いるため、推進剤タンク、供給配管などが不要になり、構造が簡素で信頼性が高く、軽量の推進機となる。また、数 W~数十 W という低電力で作動可能なため小型衛星に適している。PPT は平行平板型と同軸型の 2 種類存在し、平行平板型は微小インパルスビットで比推力が高く、同軸型は平行平板型と比べインパルスビットが高く、比推力が低い。

ホールスラスタやイオンスラスタは推進効率 50%以上と高い値を誇るが、PPT はそれらの電気推進機に比べ推進効率が 10%前後と低い値を示す。<sup>1)</sup> よって、小型衛星に適用可能なミッションレベルを向上させるため、PPT の性能向上を目指し研究開発を行っている。

昨年度、推進効率の向上を目標とし、平行平板型 PPT において伝送路におけるエネルギー損失を低減させるため、キャパシタ-電極間を銅板で接続した PPT を設計・製作し性能評価を行った。結果として、平行平板型 PPT では推進効率 27%、比推力 2,740 s を達成した。<sup>2)</sup>

### 2. 研究目的

本研究では同軸型 PPT においても、伝送路の電気抵抗低減により性能向上が達成できるか実験的に評価を行う。また、実験の結果から同様の改良を加えた同軸型、平行平板型の性能比較を行う。

### 3.キャパシタ-電極一体同軸型 PPT

過去、PPT の伝送路に導線を用いていたが、本研究では伝送路に銅板を用い、電気抵抗を低減したキャパシタ・電極一体同軸型 PPT を設計・作製した。過去の PPT と本研究で製作した PPT の写真をそれぞれ Fig1, Fig2 に示す。推進剤には PTFE を用いている。本研究で使用する Fig.2 の PPT はカソード径

が 40 mm、キャビティ内径 3 mm、キャビティ長さ 50 mm である。

伝送路に AWG18 相当の導線を 1 m 用いた際の電気抵抗は 20 mΩ である。PPT の回路全体の電気抵抗は一般的に 30~100 mΩ である。よって、伝送路の抵抗が 20 mΩ であった場合、投入エネルギーのおよそ 20~60% はジュール熱により伝送路で損失していた。

新たに作成した同軸型 PPT の伝送路における抵抗値を計算すると、直流の電気抵抗は 0.05 mΩ である。しかし、PPT の放電電流は実際には直流ではなく減衰振動であり交流とみなせる。よって銅板では交流における表皮効果を考慮する必要があるが、それを加味しても伝送路の電気抵抗は 0.25 mΩ である。すなわち本研究の改良によって、伝送路の電気抵抗は導線接続の約 1%にまで低減された。<sup>3)</sup>

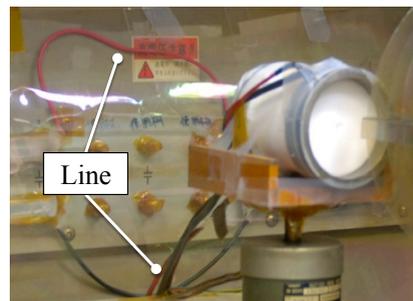


Fig.1 Previous Coaxial PPT

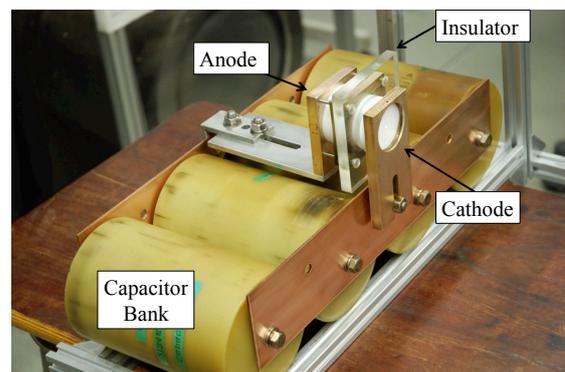


Fig.2 New Coaxial PPT

#### 4.実験条件

新同軸型 PPT に 50 J のエネルギーを投入し 40,000shot の性能評価実験を 2 回行った。性能比較対象として過去に本研究室で同軸型 PPT を 75J で作動させた際のデータを使用する。Table 1 に 50J, 75J それぞれの実験条件を示す。本実験の作動周期 0.75Hz は電源の制約によるものである。

Table1 Experimental Condition

		New 50J	Previous 75J
Cavity Length	mm	50	
Cavity Diameter	mm	3	
Cathode Diameter	mm	40	50
Capacitance	μF	38	34
Voltage	kV	1.62	2.09
Operation Frequency	Hz	0.75	1
Transmission Line	-	Copper Plate	Lead Wire

#### 5.実験結果

取得したインパルスビット履歴を Fig.3 に示す。Fig.3 において、ダイヤ形のシンボルは本研究で取得したインパルスビットを示し、十字形のシンボルは過去の 75 J 同軸型 PPT のインパルスビットを示している。旧 75 J 同軸型 PPT は新 50 J 同軸型 PPT の 1.5 倍のエネルギーで作動しているが、インパルスビットは新 50 J 同軸型が旧 75 J 同軸型よりも高い値を示し、作動回数に伴いインパルスビットの差が広がる結果となった。作動初期で旧 75 J 同軸型のインパルスビットは 4.6 mNs であるが、40,000 shot の時点では 1.1 mNs であり初期の約 20 % まで減少している。新 50 J 同軸型のインパルスビットは作動初期で 5.3 mNs, 40,000 shot 時で 2.3 mNs であり、初期の約 40 % のインパルスビットを維持している。また、インパルスビットの低減が抑えられたため、40,000 shot におけるトータルインパルスは旧 75J 同軸型 PPT の 67Ns に対し、新 50 J 同軸型 PPT は 120Ns と高い値を示した。

比推力および推進効率のショット履歴を Fig.4, Fig.5 に示す。図中凡例の実験①、実験②は再現性確認のため 2 回実験を行った 2 つの結果である。比推力は作動初期で 300 s であるが、作動を重ねる毎に増加し、40,000 shot では 500 s 程となった。推進効率は比推力とは反対に、作動を重ねる毎に減少し、最大で 18 %、最小で 10 % まで減少した。

#### 6.考察

Figure 6 に PPT の放電経路の概略図を示す。L, C, R はそれぞれインダクタンス、キャパシタンス、レジスタンスである。添字 L, C, P はそれぞれ電送路、

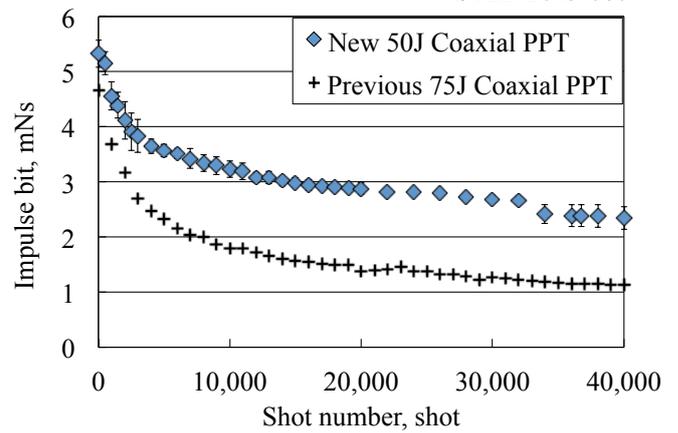


Fig.3 Impulse Bit

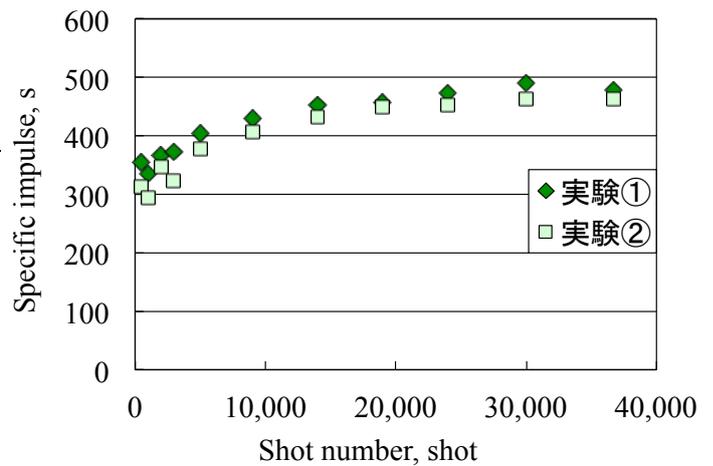


Fig.4 Specific Impulse@50J

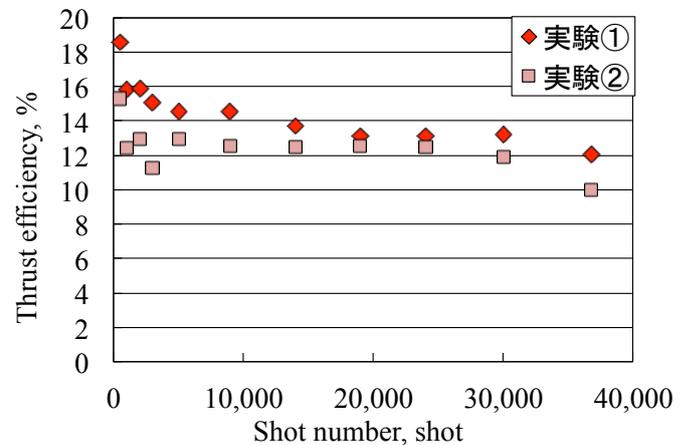


Fig.5 Thrust Efficiency@50J

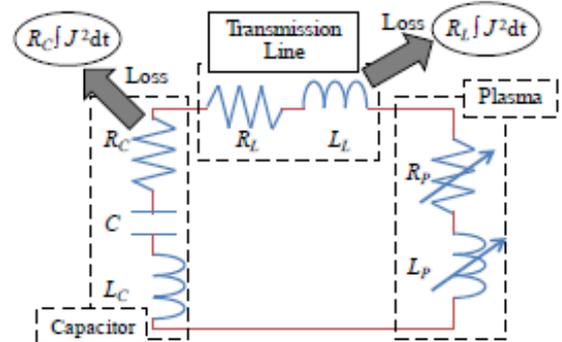


Fig.6 Equivalent Series LCR Circuit of PPT System

キャパシタ，プラズマを表している．PPTの放電経路は一般的に等価 LCR 回路として表される．等価回路はキャパシタ，伝送路，プラズマの3つの要素で構成され，それぞれが直列に接続されている．

Fig.7に示しているのは本実験で得られた新50J同軸型PPTにおける1, 3,000, 40,000 shotの放電波形であり，電流ピーク値はそれぞれ6, 14, 22 kAと作動毎に増加している．1 shotにおける電流波形は等価 LCR 回路では見られない波形を示し，この波形は1,000 shotあたりまで続く．通常見られない波形が現れた原因については現段階では不明である．

PPTのLCR回路中で抵抗が変化する可能性があるのはプラズマのみであり，電流ピーク値の増加はプラズマ抵抗の減少を意味している．LCR回路中で消費されるエネルギーの割合は抵抗の割合  $R_p:R_c:R_L$  で決定される．作動回数に伴いプラズマ抵抗が減少すると回路全体に対する伝送路の抵抗値の割合が増加するため伝送路でのエネルギー損失が増加する．40,000 shot時における回路全体の抵抗を放電波形のフィッティングより見積ると約 30 mΩである．30 mΩに対して伝送路の抵抗 0.25 mΩは1%以下でありほぼ無視できる値であるため，作動を重ねても伝送路のエネルギー損失は無視でき，推力減少率の低減に繋がったと考えられる．

### 7. 平行平板型 PPT 及び他電気推進機との比較

過去のPPTとキャパシタ-電極一体型PPTの性能比較を平行平板型，同軸型PPTそれぞれについてTable 2に示す．Table 2中の平行平板型における40,000shotでのトータルインパルスは，インパルスビットを一定と仮定した場合による計算値である．同軸型は初期値のみの比較となっている．

平行平板型，同軸型の両方において伝送路の電気抵抗低減により全体的な性能向上を達成した．平行平板型では特に推進効率27%，比推力2,740 sを達

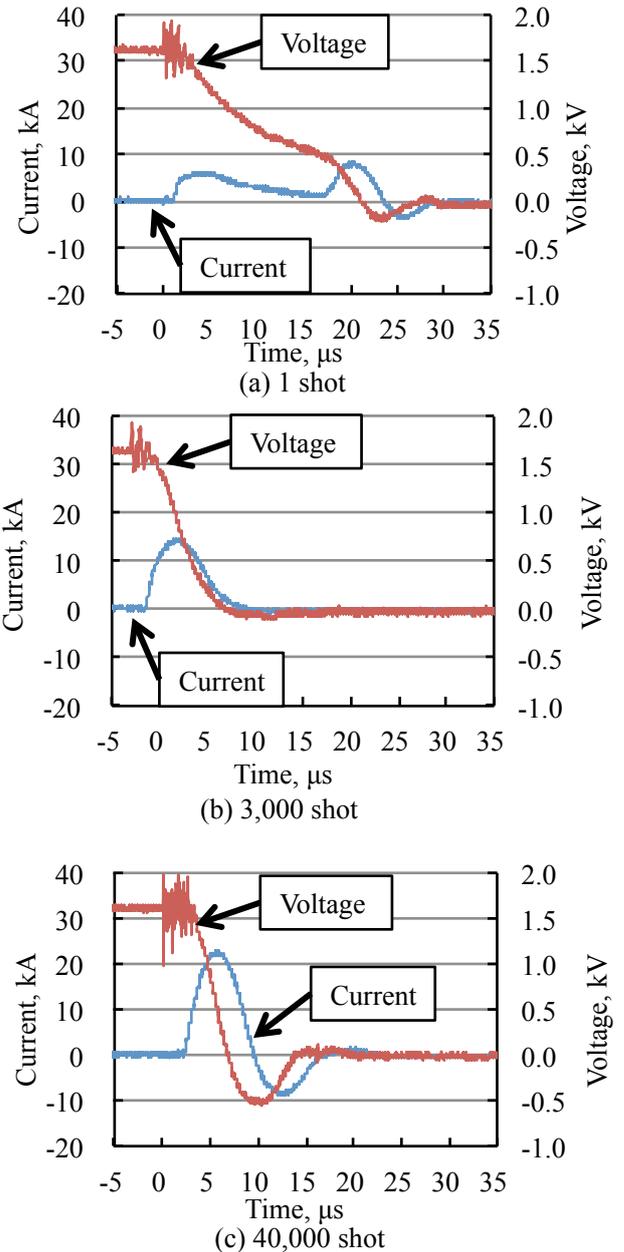


Fig.7 Electrical discharge of 50 J coaxial PPT at (a) 1, (b) 3,000 and (c) 40,000 shot.

Table2 Performance Comparison of Rectangular and Coaxial PPT

		Rectangular		Coaxial	
		Previous	New	Previous	New
Input Energy	J	50	50	75	50
Impulse Bit	mNs	0.4	1	4.6	5.3
Specific Impulse	s	1,100	2,740	295	300
Thrust Efficiency	%	4.3	27	10	18
Thrust-Power Ratio	mN/kW	8	20	61	102
Total Impulse at 40,000 shot	Ns	16	40	67	120

成し、この2つの性能向上が顕著である。同軸型では推力減少率の低減によるトータルインパルスの増加が顕著であり、40,000 shotで120Nsを達成した。

Figure 8に本研究の同軸型PPTの推力電力比のショット数に対する推移を示す。Fig.8の右に示すのは他の電気推進機の推力電力比の代表的な領域であり、Table 3に他の電気推進機の作動に必要な電力を示している。本研究の同軸型PPTの推力電力比は最高で102 mN/kWと高い値を示しており、これはDCアークジェットと同程度の値である。DCアークジェットの作動電力は1 kW以上であるのに対し、本研究のPPTは50 Wという低電力で102 mN/kWの推力電力比を達成した。作動を重ねると推力の減少に伴い推力電力比も減少するが、40,000 shot時においてもホールスラスタと同等の推力電力比 47mN/kWを維持している。

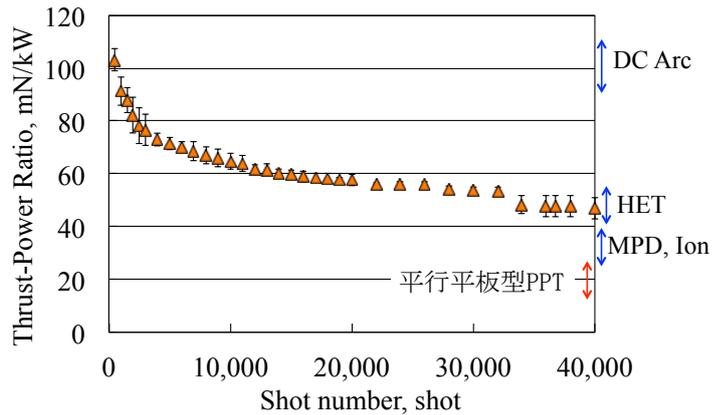


Fig.8 Thrust-Power Ratio

Table 3 Operation Power of others Electric Propulsions

	MPD	Ion	HET	DC Arc
Power	>10kW	>400W	>1kW	>1kW

### 8.同軸型 PPT のトータルインパルス予測

本研究の同軸型PPTを作動限界まで使用した場合のトータルインパルスを予測する。キャビティ内径がカソード径の40 mmに達する点を作動限界と仮定し、実験で取得した内径変化の履歴から作動限界に達するまでの作動回数を見積もり、インパルスビットの履歴から40,000 shot以降のインパルスビットを予測する。Fig.9に作動限界までのトータルインパルスを概算した結果と旧75 J同軸型におけるトータルインパルスの実測値を示す。その結果、作動限界は約300,000 shotであり、新同軸型PPT推進剤1本でトータルインパルス485 Nsを達成可能だと予測できる。新50 J同軸型の300,000 shotのトータルインパルス予測値は、旧75 J同軸型の2.2倍である。これは推進剤6本で50kgの衛星を高度500 kmから100 km軌道遷移させることが可能な値である。作動限界までのトータルインパルスについては予測なので今後実験によって評価する必要がある。

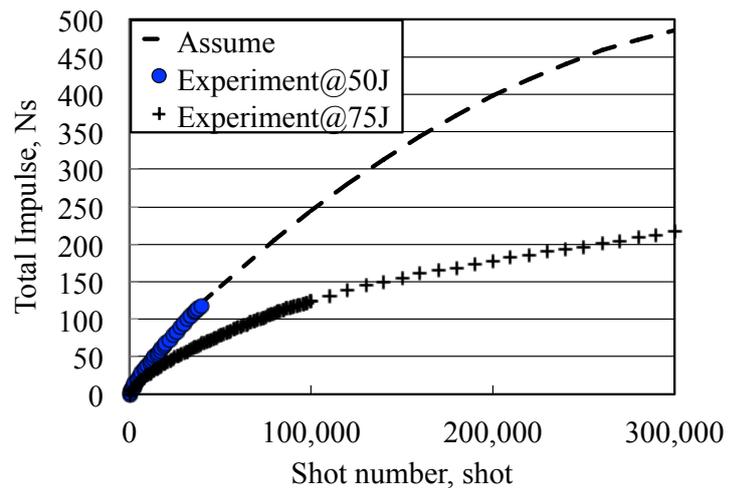


Fig.9 Assume of Total impulse

### 9.結論

伝送路の電気抵抗を低減させた同軸型、平行平板型PPTを性能評価することで以下の結論を得た。

- 電気抵抗を低減により、平行平板型PPTと同様に同軸型PPTにおいても性能向上を確認した。
- 平行平板型は推進効率と比推力の上昇が顕著であり、それぞれ27%、2,740 sを達成している。
- 同軸型においては推力減少率の低減とトータルインパルスの上昇が顕著である。40,000shotにおけるトータルインパルスは旧75J同軸型PPTの67Nsに対し、新50J同軸型PPTは120Nsと高い値を示した。

- 伝送路の電気抵抗低減は平行平板型は高比推力、同軸型は高インパルスビットというそれぞれの特徴を強めるような効果が確認された。

### 参考文献

- 1) Molina-Cabrera P., et al., "Pulsed Plasma Thruster: a worldwide review and long yearned classification" 32<sup>nd</sup> IEPC, IEPC-2011-340 (2011)
- 2) Takahiro S., et al., "Conceptual Design of High Efficiency Breech-Fed Ablative PPT in Tokyo Metropolitan University" 33<sup>rd</sup> IEPC, IEPC-2013-263(2013)
- 3) 雨宮好文, "工学基礎 電気工学" 培風館