

## パルスプラズマスラスタの実験計測系の構築と作動実証

### Introduction of experimental equipment for pulsed plasma thruster in the University of Yamanashi

○大堀 一樹(山梨大・院)・嶋田 悠斗(山梨大・院)・青柳 潤一郎 (山梨大)

○Kazuki Ohori・Yuto Shimada・Junichiroh Aoyagi (The University of Yamanashi)

#### Abstract (概要)

At University of Yamanashi, the space engineering laboratory was established in 2014. In order to operate an electrothermal pulsed plasma thruster (PPT), a high voltage power supply was developed, and a pendulum thrust target and a Rogowski coil was designed to measure the impulse and discharge current, respectively. We also developed a PPT that supplies plate like propellant from both side of the cavity by springs. Experiments were carried out using ceramics as the component of cavity wall. However, self-running discharge occurred after 100 shots. On the other hand, soda lime glass and neoceram as the cavity wall increased repetitive operation number, and 100 to 200  $\mu$ Ns of the impulse bit was obtained. Through the experiment, we also confirmed the operation certification of the manufactured devices.

#### 記号の説明

- $\tau$ : 時定数
- $R$ : 積分回路の抵抗
- $C$ : 積分回路の静電容量
- $x$ : 振幅
- $\Delta V_{ig}$ : レーザ変位計による出力電圧
- $F_i$ : おもりが与えたインパルス
- $m$ : おもりの質量
- $h$ : おもりの最下点からの高さ

#### 1. はじめに

近年、超小型衛星と呼ばれる総重量 100kg 以下の人工衛星が年間 100 機以上も打ち上げられている。<sup>1)</sup>その背景として、大型の人工衛星と比較して低コストであり、開発期間が短いという特徴がある。また、小型で軽いことから打ち上げロケットの余剰スペースを利用した相乗りによって、大学や民間企業でも人工衛星の開発が行われ、打ち上げられている。しかし、人工衛星の小型化によって積載量に制限が設けられ、従来使用していた計測機器や推進機も小型化が必要となった。その小型の推進機として注目されているのが電熱加速型パルスプラズマスラスタ(以下:PPT)と呼ばれる電気推進機である。<sup>2)</sup>電熱加速型 PPT は他の推進機に比べて小型であり、固体のポリテトラフルオロエチレン(以下:PTFE)を推進剤として用いているのでタンクやバルブが必要ない。しかし、放電室(キャビティ)を推進剤内部

に設けているため、内側から推進剤を昇華していき、それによりプラズマ密度が減少し推力が低下していく問題がある。

本研究室では 2014 年に宇宙工学研究室を発足以降、上記の課題解決を目指してキャビティ体積を維持する推進剤供給機構を設けた電熱加速型 PPT の開発を続けている。今までに側面供給型 PPT や四面供給型 PPT を開発するとともに、作動実験の際に必要な電源や計測装置も本研究室で製作した。ここでは本研究室で製作した主放電用電源装置、主放電電流測定装置、振り子式インパルス測定装置について紹介する。また、これらの装置を用いて側面供給型 PPT の作動実験を行ったので、その推進性能についても述べる。

#### 2. 主放電用電源装置<sup>3,4)</sup>

**2.1 高電圧出力回路の設計および製作** 本研究では商用交流電源 AC100V で使用できるように、トランス電源と昇圧回路を用いてキャパシタバンクへ充電することに決めた。まず市販のトランス電源を用いて AC100V から AC200V まで昇圧する。その後、コッククロフト・ウォルトン回路を用いて AC200V を整流、昇圧し、キャパシタバンクへ DC1.8kV で印加する。図 1 にコッククロフト・ウォルトン回路を、表 1 に各電子部品の性能を示す。この回路はコンデンサとダイオードの 2 種類の部品からなる回路である。

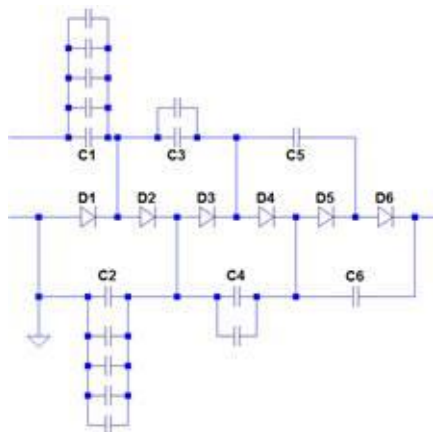


図1 コッククロフト・ウォルトン回路

表1 各電子部品の性能

部品名	性能	
積層セラミック コンデンサ	静電容量	470nF
	耐電圧	630V
	許容差	±20%
整流ダイオード	最大連続順方向電流	2A
	ピーク逆繰返し電圧	1000V

最初に電流がD1を通りC1に充電される。次に、C1に充電された電荷がD2を通りC2に流れ、C2が充電されて電圧は2倍になる。コッククロフト・ウォルトン回路はコンデンサ1つとダイオード1つを1段として、2段なら2倍、4段なら4倍に交流電圧を昇圧、整流して直流電圧を出力する。また、C6のコンデンサはキャパシタバンクへ、C5のコンデンサはC6のコンデンサへ電荷を送りながら自身も電荷をためているが、C1のコンデンサでは自身で電荷をためながらC2～C6のコンデンサへ電荷を送っている。そこで、C1～C4のコンデンサの容量を増やすことで充電時間が短くなると考えた。この回路では同じコンデンサを並列につなぐことで容量を増やした。C3とC4にはC5、C6の2倍の静電容量としてコンデンサを2個並列に接続し、C1とC2にはそれぞれ5個ずつコンデンサを接続してC5、C6の5倍の静電容量にした。図2は実際に製作したコッククロフト・ウォルトン回路である。

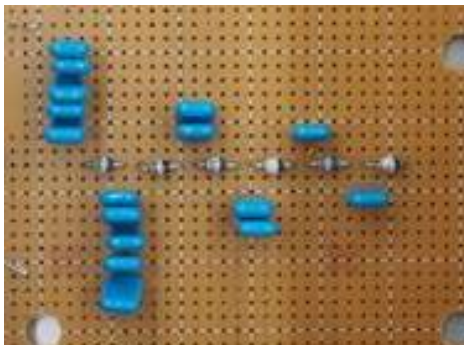


図2 製作したコッククロフト・ウォルトン回路

**2.2 印加試験および結果** 製作した主放電用電源装置を用いて印加試験を行った。図3に使用したキャパシタバンクを示す。



図3 キャパシタバンク

キャパシタバンクは銅板を用いて並列に接続しており、静電容量は実測値で4.9μFである。電圧の測定にはTektronix社製の高電圧プローブ(P6015A)とオシロスコープ(TBS1064)を用いて読み取った。

印加試験の結果、印加電圧はDC1.88kV、充電時間は約20秒になった。数秒で1回作動を目標としているので、今後も充電時間短縮のため、改良を続けていく必要がある。改良の方向性としては次の3つの方法が考えられる。

1. 高電圧出力回路の段数を減らす
2. 各コンデンサの容量を増やす
3. 高周波に増幅する

1つ目の方法として、倍電圧回路の段数を減らす方法がある。今回、6段で製作した倍電圧回路の入力電圧を上げ、段数を減らすことで昇圧部分が減るため、より充電時間が早くなる。しかし、コンデンサの耐電圧以下で昇圧しなければならないため、入力電圧を上げることは望ましくない。

2つ目の方法は今回のように各コンデンサの容量を増やす方法である。コンデンサの容量を増やしていけば電荷が増えるため、充電時間は短くなっていく。しかし、無極性で耐電圧が高く、静電容量の大きいコンデンサは手に入れることが難しいため、市販品を並列に接続するしか方法がない。今回のコンデンサと同じものを使用すると、シミュレーションの結果では1段目に50個ものコンデンサを並列に接続することになるので、非常に大きな装置になってしまうため、製作や設置が困難である。

3つ目は高電圧出力回路の入力電圧を高周波にする方法である。今回の電源装置では商用交流電源の50Hzをそのまま昇圧していた。トランス電源と高電圧出力回路の間にインバータを用いることで入力電圧を200Hzや400Hzなど高周波に増やすことで電荷量を増やし、充電時間の短縮ができると考える。

### 3. 主放電電流測定装置<sup>5,6)</sup>

**3.1 ログスキーコイルの製作** 主放電の電流は数μsで最大10kAと、回路の途中に組み込んで直接測定することは難しい。そこで、本研究ではログスキーコイルと積分器を用いて測定することにした。

製作したロゴスキーコイルを図4に示す。ロゴスキーコイルはキャパシタバンクを接続している電極の周りを取り付ける必要がある。このロゴスキーコイルは、内径4mm、外径6mmのビニールチューブに巻線半径0.4mmのエナメル線を800回巻いた。その上から内径7mm、外径9mmのビニールチューブを被せ、保護している。コイルの接続部には内径9mm、外径12mmのビニールチューブを使用し、コイルの両端がしっかりと接触し、ギャップを生じないように注意した。エナメル線の先は同軸ケーブルと接続し、同軸ソケットを用いて真空装置の外へ接続できるようにした。



図4 ロゴスキーコイル

**3.2 積分器の製作** 主放電によりコイル両端に発生する電位差を積分することで、ロゴスキーコイルの内側に流れる電流を求めることが出来る。本研究では、コイル両端の電位差を積分する方法としてRC回路を用いた。図5に製作した積分回路(左)とその回路図(右)を示す。RC積分回路は抵抗器とコンデンサの受動素子のみで構成されるため、測定用の別電源が不要である。また比較的破損しにくいいため、本測定に適している。

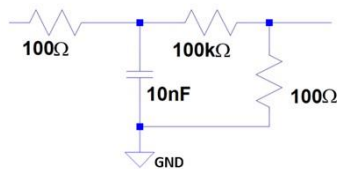


図5 積分回路(左)と回路図(右)

積分回路に抵抗器は $R=100[\Omega]$ 、コンデンサは $C=10[\text{nF}]$ を用いて式(1)より時定数を $\tau=1[\mu\text{s}]$ と設計した。

$$\tau=RC \quad (1)$$

また、積分回路から出力される電流はオシロスコープのレンジでは計測できないため、100k $\Omega$ と100 $\Omega$ の抵抗器を用いて分圧し、オシロスコープで読み取れるようにした。オシロスコープは主放電用電源装置を接続しているオシロスコープに接続した。

#### 4. 振り子式インパルス測定装置<sup>7,8)</sup>

**4.1 振り子式インパルス測定装置の製作** PPTの推力は短時間での変化が大きく、また、PPTの自重に比べて小さいので、ロードセルなどを用いて直接測定することは難しい。そこで、本研究では推力をインパルスビットとして間接的に測定し、評価する。インパルス測定装置の構造に

は剛体振り子の原理を利用する。PPTから排出された推進剤がインパルス測定装置に当たることで測定装置が揺れる。その時の振幅をレーザ変位計で測定することによりインパルスビットを算出する。

電熱加速型PPTのインパルスビットを最大1mNsと想定してインパルスビット測定装置を製作した。図6に測定系全体の構成図を、図7に製作したインパルス測定装置を、表2にインパルス測定装置の各部の寸法を示す。

PPTから排出された推進剤がインパルス測定装置の円筒部の穴から内部へ入り、底面の円錐部で反射し、スリットの間から外側へ排出されるようになっている。底面の円錐部から反射したPPTの排気ブルームがすべて円盤に当たるようにスリットの間隔を設計することで、排気ブルームの水平方向の運動エネルギーをすべて受け、測定誤差を低減させている。円錐部の円板は厚さ1mmの塩化ビニルを、円筒部を支えている周りのアームには厚さ2mmのアルミニウムを用いて総質量121gで製作した。

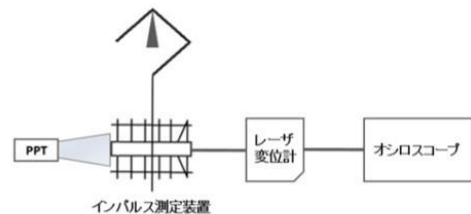


図6 測定系の構成図

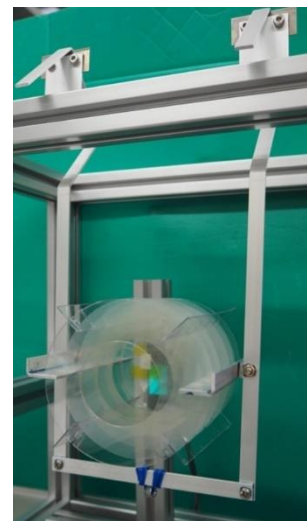


図7 インパルス測定装置

表2 インパルス測定装置の各部寸法

材質	寸法	
円筒部 (塩化ビニル)	外径	100mm
	内径	50mm
	奥行	100mm
	側面積表面と円盤の面積比	16
アーム (アルミニウム)	腕の長さ	300mm
	横幅	128mm

インパルス測定装置は、チャンバ内のフレームに固定さ

れたナイフエッジから2本のアームで吊るすことにより、振り子運動ができるようにした。インパルス測定装置の振幅はPPTと反対側からレーザ変位計(OPTEX CD1-30)で計測し、オシロスコープ(Tektronix DPO2014B)で読み取った。レーザ変位計の出力電圧を測定するために、レーザ変位計とオシロスコープの間に47Ωの抵抗器を接続した。抵抗器によりレーザ変位計の検出範囲128~1010mVをオシロスコープで8mVずつ計測することができる。振幅は式(2)から算出できる。

$$x = \frac{\Delta V_{lg}}{93.6665} \quad (2)$$

## 4.2 インパルスビット校正実験

**4.2.1 校正方法** インパルス測定装置の振幅からインパルスビットを算出するため、製作したインパルス測定装置の校正実験を行った。図8に校正実験の方法の概略図を示す。

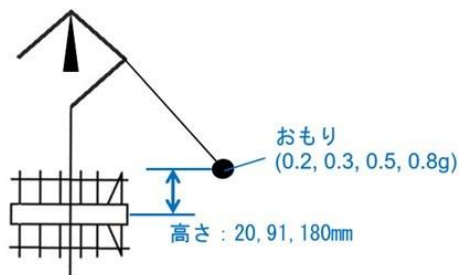


図8 校正実験方法概略図

インパルス測定装置に紐で吊るしたおもりを所定の高さから自由落下させ、インパルス測定装置に衝突させることで疑似的なインパルスビットを与えることにした。おもりを衝突させることでインパルス測定装置が揺れ、レーザ変位計で計測した振幅の1周期目を読み取り、既知のインパルスビットと振幅のグラフから算出式を求める。おもりの質量と落下させる高さから、おもりが与えるインパルス  $F_l$  は次式から求めることができる。

$$F_l = m\sqrt{2gh} \quad (3)$$

本研究では0.2, 0.3, 0.5, 0.8gのおもりを、最下点から20, 91, 180mmの高さから落下させた。1回毎にインパルスビットを測定するため、装置は下側に取り付けた電磁石を作動させ、非接触でインパルス測定装置を静止させた。

**4.2.2 校正実験結果** 大気圧下で校正実験を行い、式(2)から算出した理論値とオシロスコープから読み取った振幅をまとめたグラフを図9に示す。インパルスビット校正実験の結果から製作したインパルス測定装置のインパルスビット算出式は以下の式が得られた。本研究室でのPPT作動実験はこの式を用いてインパルスビットを算出している。

$$I_{bit} = 338.03x - 55.116 \quad (4)$$

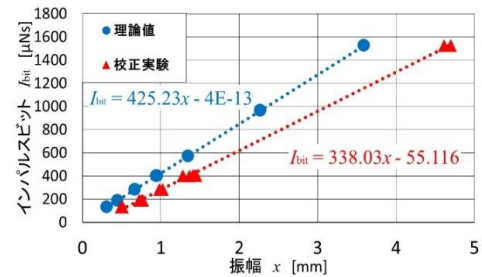


図9 インパルスビット校正実験

理論式と比較して、理論式の傾きに近い算出式を得ることができた。しかし、インパルスビットが増えるにつれて理論式との振幅の差は大きくなっている。これは振り子の等時性によるものだと考えられる。高インパルス域になるにつれて、インパルス測定装置の揺れが最下点の揺れ方向軸からずれていくため、固有振動数の誤差が大きくなり、その誤差が理論値との振幅の誤差に影響していると考えられる。

## 5. 側面供給型パルスプラズマスラスタ<sup>9)</sup>

**5.1 推進剤供給方法** 本研究室では構造の簡便さを維持しつつ、推進剤を安定して供給できる機構を設けた電熱加速型PPTの開発を続けている。その一つとして図10に示すような推進剤供給機構を設けた電熱加速型PPTを開発した。

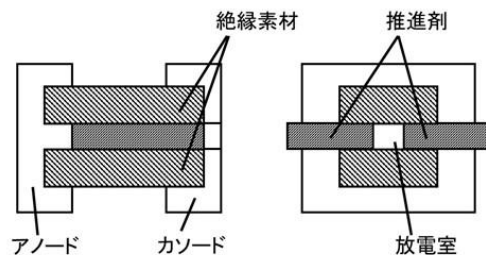


図10 側面供給型PPTの断面図(左:側面, 右:正面)

この側面供給型PPTは板状に加工したPTFEを電極間の側面から供給し、上下方向を絶縁素材(インシュレータ)で囲むことで正方形断面のキャビティを形成する機構になっている。連続ショットによる推進剤の消費に伴い、両側から推進剤を供給することで連続的な推進剤の供給を可能にしている。

**5.2 側面供給型PPTの設計および製作** PPTの電極は真鍮で製作した。図11に製作した電極を示す。

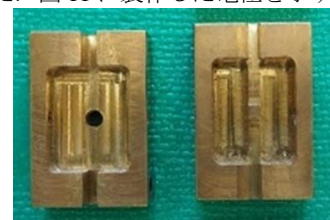


図11 製作したカソード(左)とアノード(右)

電極に溝を設けることで推進剤のガイドとし、アノードの凸部で放電室の形状を維持するようにした。推進剤には厚さ 2mm の板状の PTFE を使用する。インシュレータには厚さ 2mm のセラミックを用いた。製作した PPT を図 12 に、各代表寸法を表 3 に示す。推進剤の供給に関してはコイルばねにより、両側から数 N の力を加えることで、推進剤を押し出す機構となっている。ばねはピアノ線(AWP-A)コイルばね(直径 8mm、線径 0.8mm、自然長 25mm、ばね定数 0.672N/mm)を使用している。イグナイタはカソードノズル部の側面に設置した。インシュレータは電極の溝部に差し込むことで固定し、両電極の上下からボルト締め付けることにより、推進剤との密着を高めるようにした。

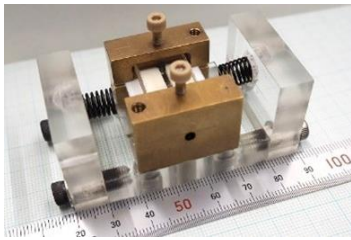


図 12 側面供給型 PPT

表 3 PPT 代表寸法

外径寸法(高さ×幅×奥行)	30×70×36mm
キャビティ長	21mm
キャビティ断面積	4(2×2)mm <sup>2</sup>
キャビティ体積	84mm <sup>3</sup>
ノズル断面積	9.4mm <sup>2</sup>

## 6. PPT 作動実験<sup>10)</sup>

**6.1 実験条件(セラミック)** 本実験は本研究室にある真空チャンバを使用して行った。大きさは直径 600mm、長さ 1000mm で、ロータリーポンプとターボ分子ポンプの 2 つを使用して真空引きを行っている。PPT 作動実験中の真空度は  $3.0\sim 5.0 \times 10^{-2}$  [Pa] である。また、静電容量 6.5μF のキャパシタバンクを使用し、1 ショットあたりの投入エネルギーは 10.53J で行った。

**6.2 実験結果(セラミック)** インシュレータにセラミックを用いた実験を 8 回行った。しかし、すべての実験でキャパシタバンクへの充電完了前に主放電が起こる自走放電が発生してしまい、最大ショット数は 100 ショットであった。この時のインパルスビットの結果を図 13 に示す。

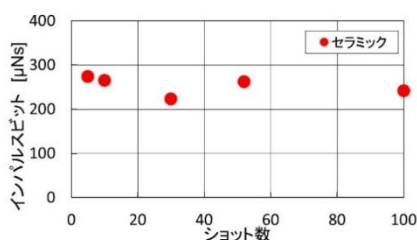


図 13 PPT 作動実験結果

どの実験でもインパルスビットは 200~300μNs という結

果になった。実験の前後で推進剤の質量を量り、比推力と推進効率を算出した結果、比推力は 200~250s、推進効率は 2~3% であった。

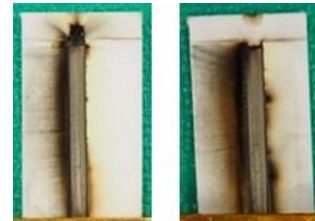


図 14 インシュレータ(実験後)

実験後に PPT を分解してキャビティ内を確認した。図 14 にインシュレータの写真を示す。図で見ても分かるように、インシュレータのキャビティに面していた部分は黒くなっていた。これは昇華した推進剤に含まれていた炭素成分が付着したのだと考えられる。このことから、すべての実験における自走放電は、インシュレータの炭素成分の付着により電極間が導通し、短絡したのだと推測される。

**6.3 インシュレータの変更** セラミックで炭素成分が付着していたことを受け、インシュレータの材質の変更を行った。使用したインシュレータはソーダ石灰ガラスとネオセラムと呼ばれる 2 種類のガラスである。ソーダ石灰ガラスを選んだ理由としては耐熱温度が挙げられる。セラミックの耐熱温度が 1000℃ に対し、ソーダ石灰ガラスの耐熱温度は 380℃ と比較的低い。これによりガラスに付着した炭素成分を昇華したガラスと一緒に外へ排気できるのではないかと狙いである。この比較をするため、同じガラスで耐熱温度が 750℃ と高いネオセラムを用いた作動実験も行った。

**6.4 実験条件(ガラス)** インシュレータに厚さ 5mm のソーダ石灰ガラス、ネオセラムを用いた実験をそれぞれ行った。PPT の代表寸法は表 3 と同じにした。電源や測定系も同じものを使用した。投入エネルギーはキャパシタバンクの静電容量を 4.9μF にしたので、1 ショットあたり 7.94J で行った。

**6.5 実験結果(ガラス)** インシュレータにソーダ石灰ガラスを用いた実験を 3 回、ネオセラムを用いた実験を 4 回行った。連続ショット試験結果を表 4 に示す。

今回の実験でソーダ石灰ガラスでは最大 2371 ショット、ネオセラムでは最大 900 ショットとなった。この結果から、狙い通りソーダ石灰ガラスの昇華が付着した炭素成分と一緒に外へ排気することでショット数が増加したと考えられる。しかし、すべての実験で自走放電が発生した。

表 4 連続ショット試験結果

絶縁素材	総ショット数[回]			
	1回目	2回目	3回目	4回目
ソーダ石灰	27	550	2371	
ネオセラム	415	425	900	836

実験終了後に PPT を分解すると、図 15 のようにキャビティ外に炭素成分が付着していた。インシュレータの締め付けはガラスが割れないギリギリの力で留めている。そのため、インシュレータと推進剤の隙間に炭素成分が入り込み、溜まった炭素が導通して自走放電が発生したと考えられる。これを解決するためには、推進剤とインシュレータの隙間を埋める方法や、ばねの力を強めてインシュレータの締め付けを強くするといった工夫が必要になってくる。

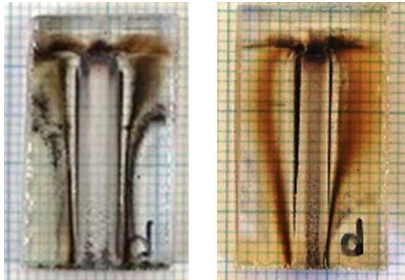


図 15 実験後のソーダ石灰ガラス(左)とネオセラム(右)

次に推進性能の結果として図 16 にショット数に対するインパルスビットのグラフを示す。この結果は 100 ショット毎に前後 5 回の計測を行い、その平均を示している。

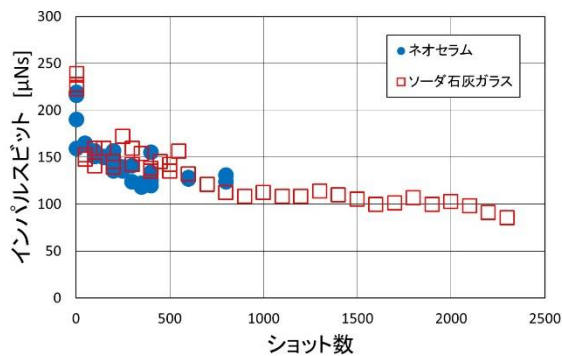


図 16 インパルスビット(ガラス)

始めの 5 ショットは、真空装置に入れる前に付着していた大気成分も一緒に排気されたことでインパルスビットが大きくなったと考える。100 ショット毎に計測をしていくと、すべての実験でインパルスビットが 150 $\mu$ Ns 前後になった。このことから、ガラスであれば物性に関係なく推力は一定になると考えられる。比推力と推進効率も同様に、すべての実験で比推力は 200~400s、推進効率は 1~4%であった。

ソーダ石灰ガラスの 3 回目の実験ではショット数が 1000 を超えたが、インパルスビットの傾向を見ると下がり続けていた。今回の実験では推進剤の供給ができていなかったと思われる。今後、同形状のキャビティで供給機構のない PPT の作動実験を行い、インパルスビットの推移を比較することが必要である。

3 章で製作した主放電電流測定装置で得た放電波形を図 17 に示す。図の放電波形はネオセラムの 3 回目の時の放電波形である。また、校正実験を行っていないため、ログス

キーコイルの出力は電圧で表している。

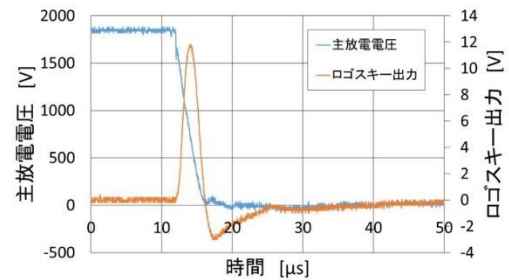


図 17 放電電流波形

キャパシタバンクへ 1.8kV まで印加されていた電圧が主放電によって低下するにともない電圧が上昇している。0V から最大 11.8V まで上昇した後、約 5 $\mu$ s ほどでマイナス側へ反転し、その後徐々に 0V まで上昇している。一般的な電熱加速型 PPT は電流が大きく、ダンピングが小さい傾向がある。この結果から、側面供給型 PPT は一般的な電熱加速型 PPT と同じ放電現象が再現できたとと言える。また、900 ショット目で最大電圧が 13.2V 出力されていた。一般的な電熱加速型 PPT はショット数が増加するにつれてキャビティの体積が増えるため、電流は大きくなる傾向がある。今回の結果から、ショット数増加にともないキャビティ体積が増加し、電圧が 1.4V 大きくなっているのが確認できた。今後は校正実験を行い、電流値を算出できるようにする必要がある。

## 7. 結 論

本研究では製作した電源装置や測定装置の作動実証を確認し、側面供給型 PPT の推進性能の評価をした。以下にその結論をまとめる。

### ◆ 実験・計測系

#### I. 主放電用電源装置

- 高電圧出力回路のコンデンサの静電容量を増やすことで、4.9 $\mu$ F のキャパシタバンクへ 1.8kV の電圧を約 20 秒で充電可能にした。
- 数秒に 1 回作動を目標にしているため、今後も充電時間短縮のための改良が必要である。

#### II. 主放電電流測定装置

- 大電流を直接測定するのは難しいため、ログスキーコイルを製作し、積分回路に接続することで波形を読み取れるようにした。
- 主放電の放電時間は数  $\mu$ s なので、積分回路は時定数が 1 $\mu$ s になるように設計した。
- 今後は校正実験を行い、電流値も算出できるようにする必要がある。

#### III. 振り子式インパルス測定装置

- 振り子式インパルス測定装置を製作し、推力をインパルスビットとして測定した。
- 校正実験を行い、測定範囲 130~1520 $\mu$ Ns での算出式を求めた。

## ◆ PPT 作動実験

### I. 連続作動

- 本研究で製作した PPT の最大ショット数は、インシュレータにセラミックを用いた場合は 100 ショット、ソーダ石灰ガラスを用いた場合は 2371 ショット、ネオセラムを用いた場合は 900 ショットである。
- ソーダ石灰ガラスのほうがネオセラムに比べて耐熱温度が低いため、昇華したソーダ石灰ガラスが付着した炭素成分と一緒に外へ排気され、ショット数が増えたと考えられる。
- ガラスへの炭素成分の付着は少なかったが、推進剤との隙間に溜まり自走放電が発生したため、隙間を埋める方法を考える必要がある。

### II. インパルスビット

- セラミックを用いた場合のインパルスビットは 250 $\mu$ Ns 前後であった。
- ガラスの物性に関係なく、インシュレータにガラスを用いた場合のインパルスビットは 150 $\mu$ Ns 前後である。
- 1000 ショット超えた実験ではインパルスビットが下がり続けていたので、側面からの供給ができてなかったように思われる。

### III. 比推力、推進効率

- セラミックの場合、比推力は 200~250s、推進効率は 2~3% であった。
- ガラスの物性に関係なく比推力は 200~400s、推進効率は 1~4% で推移している。

### IV. 主放電電流

- 主放電電流の放電波形から一般的な電熱加速型 PPT にあるダンピングの少ない放電波

形を確認した。

- ネオセラムを用いた 3 回目の PPT 作動実験で、最大出力電圧が 5 ショット目から 900 ショット目までの間に 1.4V 増えており、このことからキャビティ体積が増加していると考えられる。

## 参 考 文 献

- 1) SpaceWorks, Nano/Microsatellite Market Forecast, (2016).
- 2) 大阪工業大学, 閲覧日 2017 年 1 月 23 日  
<http://www.oit.ac.jp/japanese/proiteres/>.
- 3) 赤崎正則, 基礎高電圧工学, 照晃堂, (1980).
- 4) 中野義映, 石橋鎌造, 原田達哉, 現代電気工学講座「高電圧工学」, オーム社書店, (1966).
- 5) 下村直行, 長田正義, 秋山秀典, 自己積分型ロゴスキーコイルの共振特性, 電気学会論文誌, (1994).
- 6) 望月瞬, 小型パルスプラズマスラスタの大電流測定系構築・評価に関する研究, 山梨大学工学部機械システム工学科機械デザインコース卒業論文, 2014 年度.
- 7) R Yanagi and I Kimura, : A New Type Target for the Measurement of Impulse Bits of Pulsed Plasma Thrusters, International Electric Propulsion Conference, (1981).
- 8) 戸田盛和 : 力学[物理入門コース I ], 岩波書店, (1982).
- 9) 嶋田悠斗 : 電熱加速型パルスプラズマスラスタの推進剤側面供給に関する研究, 山梨大学工学部機械システム工学科機械デザインコース卒業論文, 2014 年度.
- 10) 宇佐美雄史 : 電熱加速型パルスプラズマスラスタの放電室材質による連続動作性能に関する研究, 山梨大学工学部機械システム工学科機械デザインコース卒業論文, 2015 年度.