

低軌道超小型衛星の大気抵抗補償用パルスプラズマスラスタの試験評価

Evaluation of Pulsed Plasma Thruster for Atmospheric Drag Compensation of Low Altitude Microsatellite

○小瀧 智範・西尾 美咲・長尾 真・竹ヶ原 春貴 (首都大学東京)

○Tomonori Kotaki・Misaki Nishio・Makoto Nagao・Haruki Takegahara (Tokyo Metropolitan University)

Abstract

In recent years, demand for microsatellites has increased, attention has been paid to pulsed plasma thruster (PPT), which are characterized by lightweight, compact and low power operation. Therefore, we developed PPT for microsatellite in this laboratory. One of applications of this PPT is to compensate for atmospheric drag of microsatellites. In this study, in order to show that this PPT cancels atmospheric drag on the satellite, we fabricated a device that can simulate the atmospheric drag and evaluated the performance of atmospheric drag compensation.

1. 研究背景および目的

近年、大型衛星の開発の長期化や運用コストの増大に伴い、100 kg以下の超小型衛星の需要が高まっている。しかし、超小型衛星は重量・容積・電力に制限があり、通常の推進機の搭載が困難という欠点がある。さらに、推進機が搭載できない超小型衛星を低軌道で運用する場合、大気抵抗などの影響により衛星の運用期間が制限されてしまう。そのため、衛星の寿命延長という観点において、軽量・コンパクト・低電力作動という特徴をもつ推進機が現在注目されている。

本研究室では超小型衛星搭載用のパルスプラズマスラスタ (以下、PPT) と呼ばれる電気推進機の開発を行っている。PPTは以下のような特徴を持つ

- (1) 固体推進剤を用いるため、タンク・バルブなどが不要になり小型で軽量化しやすい。
- (2) 数～数十Wの低電力で作動可能

上記の理由により PPT は、超小型衛星に適した推進機であると言える。

これまで本研究室では超小型衛星の大気抵抗補償用の PPT を開発してきた。特に本研究室で開発した 50J-PPT はインパルスビットが高く、低軌道でも長期間の大気補償が可能である。過去の研究では、投入エネルギーが 50J の PPT (以下、50J-PPT) が 1 年間衛星の大気抵抗補償したときの作動周波数や消費電力などが計算によって求められている¹⁾。そこで本研究では、この計算結果の妥当性を示すために、50J-PPT の大気抵抗補償性能を試験的に評価することに着目した。

そこで、本研究の目的は当研究室で開発した 50J-PPT を用いて衛星の大気抵抗補償性能を地上で試験的に評価することである。また、今回試験評価を行う PPT はインパルスビット・消費電力の性能

が良いという観点から 2013 年度に開発された TMU-PPT-50C²⁾ を使用するものとする。

2. 試験概要

今回の試験では、PPT を直接振子式のスラストスタンドに取り付けた振り搭載式スラストスタンドを使用している。そして、この装置を用いて、衛星にかかる大気抵抗を打ち消すことを実証する試験を行った。試験装置の概要図を図 1 に示す。

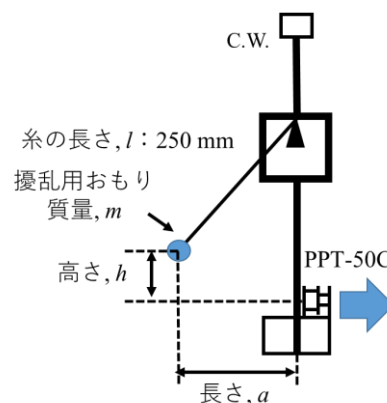


図 1 試験装置の概要図

試験の流れは次の通りである。

- (1) スラストスタンドに大気抵抗と同等の力積を発生させるおもりを衝突させる。
- (2) オシロスコープによりスラストスタンドの振幅を確認し、スラストスタンドの変位の波形が 1 周したところで PPT を作動させる。

(3) 作動後、スラストスタンドの変位が減衰しているところをオシロスコープにより計測する。

この一連の流れにより、PPTが大気抵抗に相当する力積を打ち消したといえる。そのため、大気抵抗補償性能の試験評価を行うにあたり、以下の四つの作業を行った。

- 振子搭載式スラストスタンド開発
 - PPT単体の性能評価
 - 擾乱用おもりの選定
 - 大気抵抗補償性能の実証試験の評価
- これらについて以下の文章にそれぞれ記す。

3. 振子搭載式スラストスタンドの開発

今回の試験評価のために新たに振子搭載式スラストスタンドの開発を行った。スラストスタンドの画像を図2に示す。

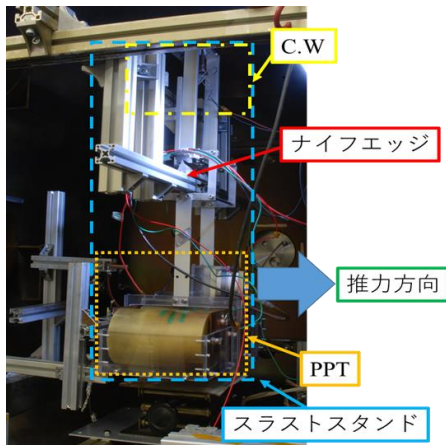


図2 スラストスタンドの写真

スラストスタンドの支点にはナイフエッジを使用しており、支点での摩擦を極力抑えた構造となっている。また、高分解能化のためにカウンターウェイト(以下、C.W)を設置している。このとき搭載しているC.Wの重さは7.82 kgである。今回使用するPPTの重量は13.6 kgとなった。重量内訳としては、推力を発生させるスラストヘッドが1.6 kg、電荷を蓄えるキャパシタバンクが12 kgとなっている。このPPTをスラストヘッドに搭載した場合における総重量は22.8 kgである。

次に開発したスラストスタンドの測定精度を調べるために校正を行った。校正結果を図3に示す。

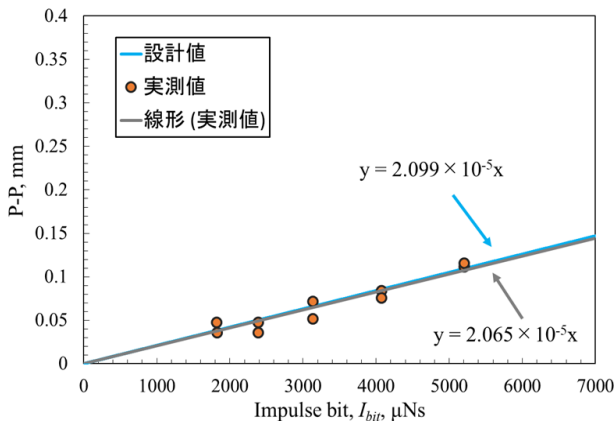


図3 校正結果

振子搭載式スラストスタンドの運動方程式は回転運動に支配的なので、次のような運動方程式で表すことができる。また、スラストスタンドの測定原理の概要図を図4に示す。

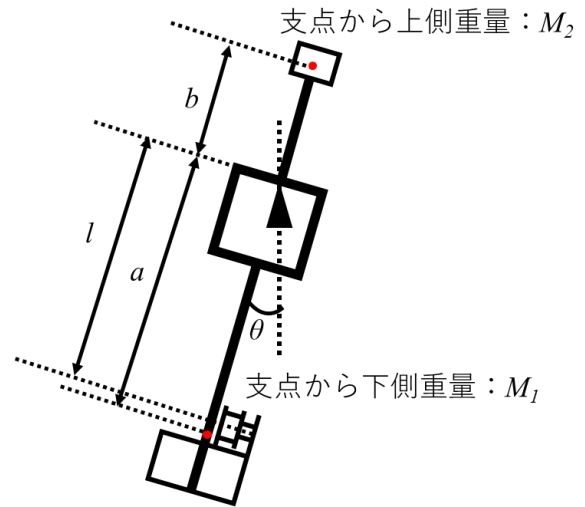


図4 スラストスタンドの測定原理

$$J\ddot{\theta} + (aM_1 - bM_2)g \sin \theta = 0 \quad \dots (1)$$

上記の運動方程式を展開し、インパルスビットおよび振幅の関係式に変換すると以下の式となり、スラストスタンドの変位を理論的に算出することができる。

$$A_{\max} = \frac{I_{bit} l^2}{\sqrt{Jg(aM_1 - bM_2)}} \quad \dots (2)$$

図3のグラフから理論式による設計値直線と実測値による校正直線の傾きの誤差が1.6%と非常によく一致したため、今回開発したスラストスタンドは理想に近い状態であることがいえる。

4. PPT単体の性能評価

今回使用するTMU-PPT-50Cの性能を評価するため、単体実験を行った。測定項目はインパルスビットおよび電流電圧波形である。実験条件を表1に、結果については図5および図6にそれぞれ示す。また、結果の比較として2013年度の実験結果²⁾を図5および図7に示す。

図5から今回測定したインパルスビットは2013年度の結果²⁾と比較して、インパルスビットが半分以下の $2069 \pm 330 \mu\text{Ns}$ (この値は1000 shotまでのインパルスビットを平均して求めた値) という結果となった。この原因としては、PPTの主放電回路内に働くレジスタンスによる影響と思われる。

図6から得られた電流のピーク値が図7と比較して5 kA程度低いという結果となっている。このことから、回路内にあるキャパシタまたは伝送経路のレジスタンスが増加し、エネルギー損失を起したことによって、PPTのインパルスビットが2013年度よりも低くなったと考える。

表1 実験条件

キャビティ長さ	50 mm
キャビティ径	3 mm
静電容量	38 μ F
主放電電圧	1.62 kV
投入エネルギー	50 J
イグナイタエネルギー	49 mJ
真空度	1.0×10^{-5} Torr

5. 擾乱用おもりの選定

大気抵抗と同等の力積を発生させるおもりの選定を行った。衝突させるおもりの高さおよびスラストスタンドからの距離を求めたグラフを図8, 図9に示す。

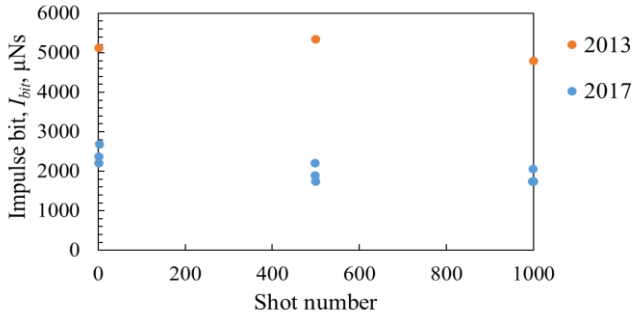


図5 インパルスビット履歴

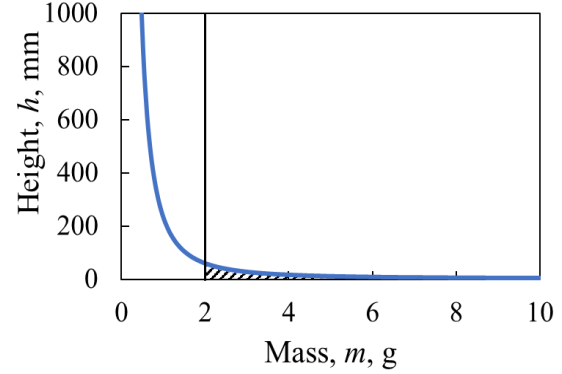


図8 おもりの高さ

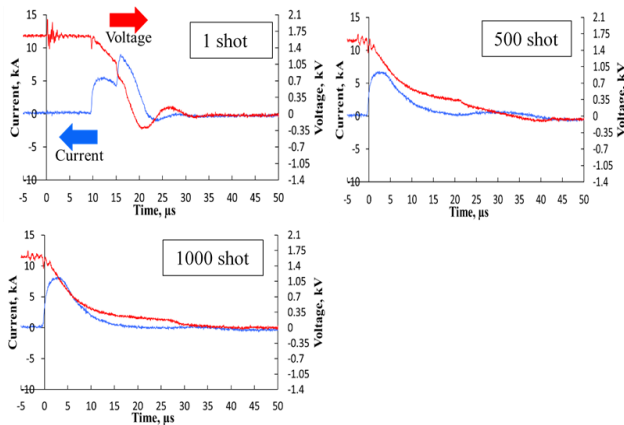


図6 電流電圧波形 (2017年度)

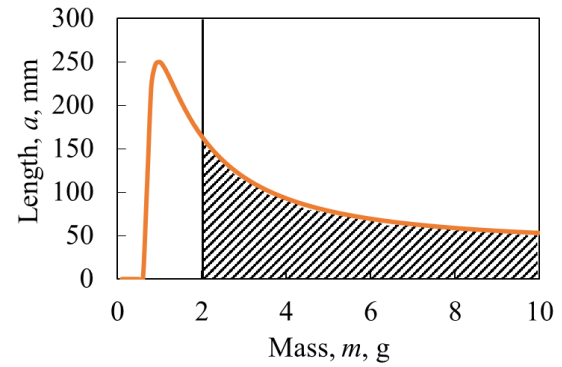


図9 おもりの距離

このとき、想定している大気抵抗の力積は単体実験の結果から 2100μ Ns とする。図8, 図9 および真空槽の容積の関係から衝突させるおもりの重さは各グラフのハッチング内である 2 g 以上が適当である。よって、今回の試験では 3.0734 g のおもりを使用した。このおもりを使用した場合における衝突高さ h は 29 mm, 衝突距離 a は 117 mm である。

6. 大気抵抗補償性能の実証試験

前章の結果から PPT の性能および大気抵抗用のおもりが決定したため、大気抵抗補償性能の実証試験を行った。

おもりの衝突によるスラストスタンドの変位を表したグラフを図10, おもりで発生する力積を PPT で打ち消した場合のグラフを図11にそれぞれ示す。

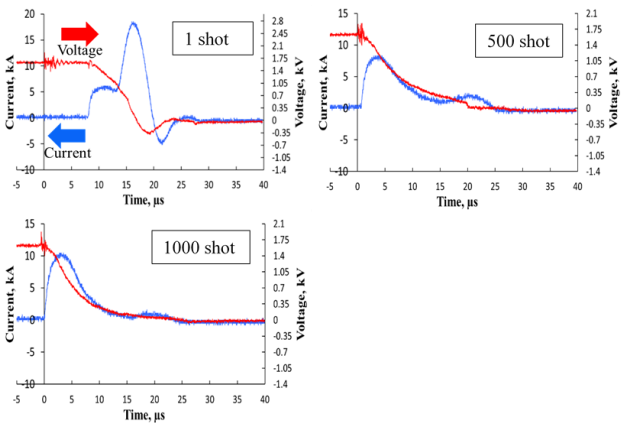


図7 電流電圧波形 (2013年度)

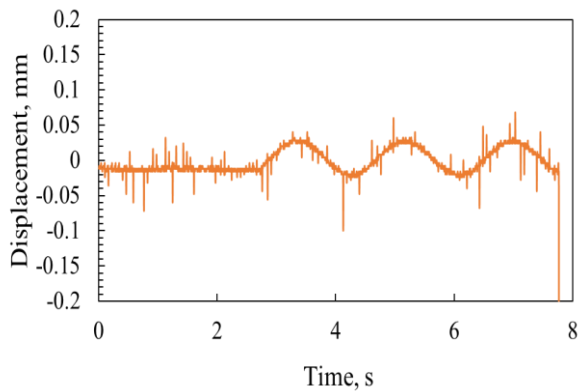


図 10 おもりの衝突によるスラストスタンドの変位

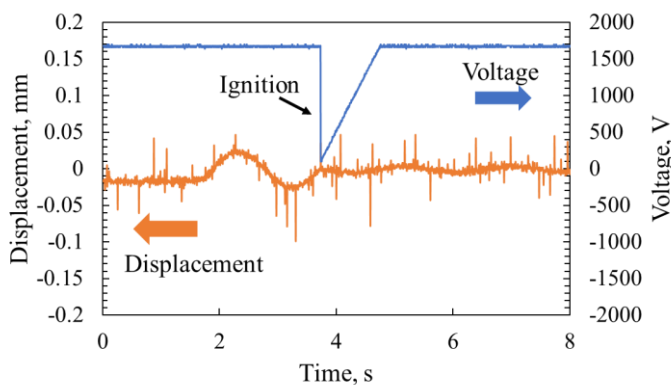


図 11 大気抵抗補償性能の実証試験結果

この時おもりによって発生している力積はおよそ $2148 \mu\text{Ns}$ である。図 10 および図 11 のグラフからおもりによって発生している力積を PPT の作動で打ち消していることがわかる。このことにより、大気抵抗と同等の力積を PPT の作動によって打ち消したといえる。

7. 結論

今回の試験評価により以下のような結論を得た。

- 衛星にかかる大気抵抗の空間を模擬するために新たに振り搭載式のスラストスタンドを開発した
- 2017 年度の TMU-PPT-50C のインパルスビットは 1000 shot の時点で $2100 \mu\text{Ns}$ 程度となり、2013 年度の PPT と比較して半分程度の値となった。
- 大気抵抗補償性能の実証試験では、およそ $2100 \mu\text{Ns}$ の擾乱に対して、PPT を作動させることによって擾乱を打ち消したことを実証した。

参考文献

- 1). 西尾美咲, 竹ヶ原春貴, 他, 首都大学東京におけるパルス型プラズマスラストの研究開発と超小型衛星搭載に向けた検討, 平成 29 年度第 61 回宇宙科学技術連合講演会
- 2). 岩月由輝, “50J 同軸型パルスプラズマスラストの性能評価”, 平成 25 年度首都大学東京卒業論文