

100 μ Ns級インパルス測定用高精度スラストターゲットの開発について

Development of Thrust Target for Evaluating 100 μ Ns Level Impulse Bit

○田尻 啓祐, 森 真也, 山下 大治郎, 渡邊 裕樹, 竹ヶ原 春貴 (首都大学東京)

Keisuke Tajiri, Shinya Mori, Daijiro Yamashita,
Hiroki Watanabe and Haruki Takegahara (Tokyo Metropolitan University)

Key Words : Thrust Stand, Thrust Target, Pulsed Plasma Thruster, Trade off

Abstract: 宇宙用搭載機器の急速な小型化・高性能化により人工衛星のミッションレベルが向上し、精密な姿勢制御の要求も高まっている。精密な姿勢制御を行うためには微小力積を発生可能な推進機を適用する必要があり、微小力積の精密な測定には高信頼度の測定装置が必須である。本研究では、スラストスタンドのトレードオフを実施し、PPTの発生力積測定においてはカウンターウェイト搭載型スラストターゲットが最も相応しいことを示した。また、この結果を用いて設計開発・作動試験で実際に運用することにより、精度の高い単発インパルスビット測定が可能であることを示した。

1. はじめに

宇宙用推進機の代表的なパラメータとしては、1. 推力 (または発生力積)、2. 比推力、3. 推進効率、4. 推力電力比の4種類が挙げられ、これらで推進機の性能が決定する。比推力、推進効率、推力電力比は以下の式のように発生力積または推力の関数として表すことができる。

$$I_{sp} = \frac{I_{bit}}{\Delta m g} \quad \left(= \frac{F}{m g} \right) \quad (1)$$

$$\eta = \frac{I_{bit}^2}{2 \Delta m E_0} \quad \left(= \frac{F^2}{2 m P} \right) \quad (2)$$

$$T/P = \frac{I_{bit}}{E_0} \quad \left(= \frac{F}{P} \right) \quad (3)$$

ここで、 I_{bit} はインパルスビット、 Δm はマスショット、 E_0 は投入エネルギー、 g は重力加速度、 F は推力、 \dot{m} は単位時間あたりの推進剤流量、 P は投入電力である。これらの式より、実際に性能取得を行う際には発生力積または推力測定が最も重要であると言える。その推力を測定する装置は一般的に“スラストスタンド”と呼称され、本研究で取り上げるものである。

従来、化学推進機の推力測定にはロードセルをはじめとした接触式の測定系が使われていたが¹⁾、電気推進機の推力は小さい。特にパルスプラズマスラスト (Pulsed Plasma Thruster, PPT) の力積は μ Ns \sim mNsオーダーであり、この分解能を実現できる

接触式測定系は、外部振動のノイズや電気推進機特有の高電圧の影響を受けやすい等の問題により実現できていない。以上の背景により、マイクロスラストの推力測定についての研究が世界各国の研究機関で進められている²⁻⁷⁾。

μ Nsオーダーの微小力積測定には、変位測定式のスラストスタンドが約40年にわたる歴史を有する。1970年、ゴダード宇宙飛行研究所により水平振子の原理を用いた“Micropound Extended Range Thrust Stand (MERTS)”が開発された²⁾。この水平振子型スラストスタンドは中心軸に振りばねを用い、梁の端に設置したスラストの推力を打ち消す原理を利用する。水平振子型スラストスタンドはNASA、フェアチャイルド、プリンストン大学³⁾などの企業・研究機関による開発と運用により広まった。一方で、マサチューセッツ工科大学リンカーン研究所では単純な原理を用いた、重力振子型のスラストスタンドが開発された³⁾。リンカーン研究所自身は後に水平振子型のスラストスタンドを開発しているが⁴⁾、重力振子型は構造や原理が単純であることから、国内では大阪工業大学⁵⁾をはじめとして、現在でも他の多くの研究機関が利用している。また、1981年には東京大学の木村研究室でスラストターゲットが開発された⁶⁾。これは、推進機の排気ブルームを下流側に設置したターゲットで受け止め、その反力によって発生する振動を測定するものである。推進機自身をスラストスタンドに搭載する必要がないことから、配線などの接続部品の

影響を無視できる等、幾つの特徴を有している。

このように、スラストスタンドには様々な種類があるが、それぞれが特有の利点と欠点を持ち合わせているため、推進機の種類と力積または推力レベル毎に最適なスラストスタンドが存在すると考えられる。本研究室では投入エネルギー5 J級PPTであるTMU-PPT-5Pの研究開発を行っており、この微小力積を測定することを想定し、トレードオフと開発を行う。TMU-PPT-5Pのインパルスビットを単発測定できる、スラストスタンドの開発を研究目的とする。

2. スラストスタンドのトレードオフ

インパルスビットの測定方法にはロードセルや固定端 - 自由端の板を用いた接触式の測定方法も考えられるが、これらは得られる振幅が非常に小さく、 μNs オーダの推力測定には適さないため、本研究では省略する。以後、スラストスタンドは変位測定式のみを指すものとする。上記の通りスラストスタンドには様々な種類が存在し、それぞれが利点や欠点の特徴を持っている⁷⁾。以上より、推力計測系のトレードオフを実施する。

2.1 スラストスタンドの測定原理

Fig. 1に振り式スラストスタンドを、Fig. 2にカウンターウェイト搭載型スラストターゲットの概念図を示す。後ほど一体型振り式スラストスタンドの説明も記述するが、これはターゲットの位置にスラストが差し代わるのみで原理が同じになることから導出式はスラストターゲットと同じとなるため、図は省略している。

A. 振り式スラストスタンド (一体型)

振り式スラストスタンドはその名前の通り、振りばねを回転軸に用いることで水平方向の運動を利用する。振りばねの回転方向に推力を発生し、梁の振幅を測定することで推力を算出できる装置である。ばね-マス-ダンパ系による回転運動の運動方程式を以下に示す。

$$J\ddot{\theta} + c\dot{\theta} + k\theta = 0 \quad (4)$$

ここで J は系の回転方向に持つ慣性モーメント、 c はダンパ項、 k は振りばねのばね定数を表す。この運動方程式の θ に関する一般解を以下に示す。

$$\theta(t) = e^{\frac{-c}{2J}t} (c_1 \sin qt + c_2 \cos qt), c^2 - 4Jk < 0 \quad (5)$$

$$\left(q = \frac{\sqrt{4Jk - c^2}}{2J} \right)$$

初期条件は、 $t = 0$ の時にスラストスタンドの位置がゼロである点、またPPTのインパルスビット I_{bit} によってスラストスタンドに角速度が与えられる点であり、以下のように表すことができる。

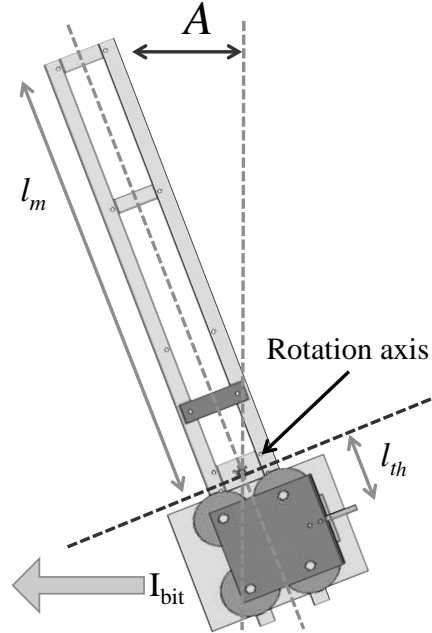


Fig. 1 Principle of Torsion type Thrust Stand

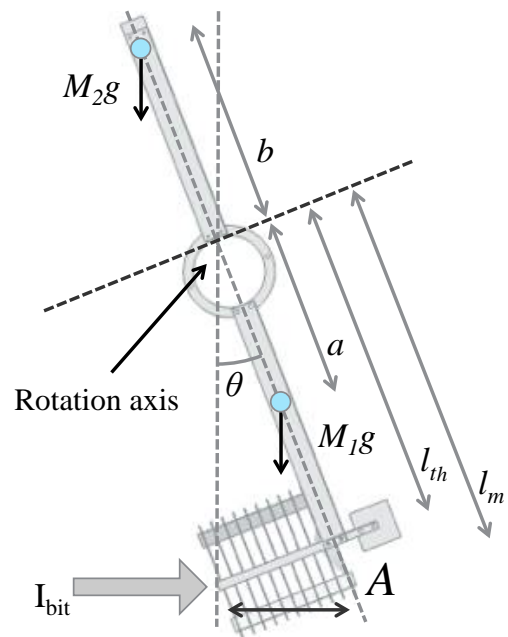


Fig. 2 Principle of Pendulum type Thrust Stand

$$\theta(t=0) = 0 \quad (6)$$

$$\dot{\theta}(t=0) = \frac{I_{bit} l_{th}}{J} \quad (7)$$

以上より任意定数 c_1, c_2 を求め、固有振動数 ω_0 と減衰率 ζ を用いて、 θ は以下のように表すことができる。

$$\theta(t) = \frac{I_{bit} l_{th}}{J\omega_0\sqrt{1-\zeta^2}} e^{\zeta\omega_0 t} \sin\sqrt{1-\zeta^2}\omega_0 t \quad (8)$$

$$\left(1-\zeta^2 < 0, \omega_0 = \sqrt{\frac{k}{J}}, \zeta = \frac{c}{2\sqrt{Jk}} \right)$$

ここでスラストスタンドの振幅は、第一波と第二波におけるPeak to Peakを測定するので、減衰項を無視することができる。減衰率 $\zeta = 0$ とみなすと、

$$\theta(t) = \frac{I_{bit} l_{th}}{J\omega_0} \sin\omega_0 t \quad (9)$$

である。スラストスタンドの振幅は、振り角 $\theta(t)$ に回転軸から測定点までの距離 l_m を掛けて表されることから、インパルスビットと振幅の関係式、振幅の最大値は、以下のように表すことができる。

$$A(t) = l_m \sin\theta(t) \cong l_m \theta(t) \quad (10)$$

$$= \frac{I_{bit} l_m l_{th}}{J\omega_0} \sin\omega_0 t$$

$$A_{max} = \frac{I_{bit} l_m l_{th}}{J\omega_0} \quad (11)$$

B. 振子式スラストスタンド (一体型/スラストターゲット/C.W.搭載型スラストターゲット)

振子式スラストスタンドは、一般的にナイフエッジと軸受けの組み合わせなどの低摩擦な回転軸が用いられる。(回転軸に振りばねを用いた振子式スラストスタンドも存在するが、減衰率が大きく、得られる振幅も小さいことから一般的にPPTのインパルスビット測定では用いられないため、割愛する。) 振子の回転方向に推力を発生し、振り式と同様に梁の振幅を測定することで推力を算出できる装置である。従って、ばね-マス-ダンパ系

による回転運動の運動方程式によって表せることから、原理は振り式スラストスタンドと同じである。違いとなるのは、振り式スラストスタンドがばねによる向心力を利用していたものが、振子式では重力を利用するという点である。回転軸の上部にカウンターウェイトを設置することにより、振幅の大きさを簡単に設定できるという利点を持つ。以上より、運動方程式は以下のように表すことができる。

$$J\ddot{\theta} + c\dot{\theta} + a \cdot M_1 g \sin\theta - b \cdot M_2 g \sin\theta = 0 \quad (12)$$

初期条件は振り式スラストスタンドと同じであることから(6)(7)式を適用し、振幅Aは(10)式にならない以下のようにして表すことができる。

$$A_{max} = \frac{I_{bit} l_m l_{th}}{\sqrt{aM_1 - bM_2}g} \quad (13)$$

2.2 トレードオフの条件・評価項目

以上の原理を用い、スラストスタンドのトレードオフを実施する。まず、評価対象とするのは「振り式スラストスタンド」「振子式スラストスタンド」「スラストターゲット」「C.W.搭載型スラストターゲット」の4種類とする。評価項目については次節で説明する。なお、トレードオフを実施するにあたり「変位あたりの力積」を統一し、比較を行う。基準となる値は、亀岡らが開発した振り式スラストスタンドの $0.33 \mu\text{Ns}/\mu\text{m}$ とし¹⁰⁾、残りのスラストスタンドと統一する。従ってサイズや重量等は理論値として算出し、Table 1に示す。

Table 1 Condition on Trade-off of Thrust Stand

Item	Torsion	Pendulum	Target	Target /C.W
freq. (Hz)	0.0667	0.0167	0.844	0.16
m, (kg)	5~10	5~10	0.50	0.934
l_{max} , (mm)	728	1000	1100	670

次に評価項目について説明する。これらは全12項目で構成されており、PPTのインパルスビット測定における重要性に応じて重み付けの点数が3点(優)~1点(劣)で与えられている。

a. 周波数：3点

スラストスタンドの持つ固有周波数を比較するための項目である。インパルスビットや推力の大きさのみを測定する場合、スラストスタンドの振幅で評価すればよい。しかし、例えば定常推力を発生させるホールスラストにおいては、作動直後には定常状態に移行するための「準定常状態」が存在し、推力の立ち上がる段階が存在する。PPTの場合、インパルスビットの準定常状態を実際に確認したという研究は報告されていないが、その電流波形や、ハイスピードカメラによるカレントシートの画像により準定常状態の存在を否定することができない。よって、PPTよりも10倍以上高い周波数のスラストスタンドが求められており、PPTのインパルスビット測定において周波数の評価は重要と言える。

b. 減衰率：2点

スラストスタンドの持つ減衰率を比較するための項目である。振幅の大きさでPPTはインパルスビットを評価するので、減衰率は低い方が望ましい。ただしコンフィグレーションが同一である場合、減衰率は校正時も実験時も変わらないため、減衰率によって性能が変わるということはあまりないので上記の点数となっている。

c. 零点の遷移：3点

スラストスタンドによる測定時の、零点の遷移しにくさを比較するための項目である。遷移しやすい場合にはインパルスビットによる振幅の評価ができない、あるいは難しくなる。従って、零点の遷移はしないものが望ましい。

d. 重量：2点

スラストスタンドの重量を比較するための項目であり、重量が測定に及ぼす影響は大きく分けて2点存在すると考えられ、それぞれ軽量の方が望ましい。1点目は、ナイフエッジや振りばねなどの荷重を受ける軸部品は塑性変形する可能性を持つということである。スラストスタンドが高重量であるとき、ナイフエッジの場合にはエッジ部の変形が軸受けとの接触面積が増加し、結果的に摩擦が無視できなくなる可能性がある。振りばねは回転軸方向に塑性変形するとばね定数が変わり、校正値や振幅の大きさの精度が大きく損なわれてしまう。

2点目は、高重量の物体は外部振動の影響を受けやすいという点である。これは亀岡らの研究に示されており、高慣性モーメントの物体はS/N比が低いということが報告されている。慣性モーメントは荷重と距離の二乗の積で表されるため、シグナルからノイズの影響を削減するには低荷重が求められる。

e. 理論式の近似数：1点

スラストスタンドの理論式の妥当性を評価するための項目である。スラストスタンドの運動を理論式を用いて解析する際に、複雑な要素を近似式によって簡略化することがある。近似式は多用してしまうと、実際の運動原理とは大きくかけ離れてしまう可能性が高い。構成直線と理論直線の比較を実施するためにも、できる限り用いるべきではない。

f. 疲労による影響：3点

スラストスタンドのコンポーネントの、疲労による影響を評価するための項目である。重量の項目で述べたように、回転軸などの部品は荷重を受けると塑性変形する可能性を持つ。この原因として挙げられるものは、大荷重に対する強度不足だけではなく、連続して運用する際に起こりうる疲労変化の可能性も大いにあり得る。

g. 流れ場への影響：3点

スラストスタンドによるインパルスビット測定が、流れ場に及ぼす影響について評価するための項目である。正確な測定を実現するには、流れ場に与える影響は少ない方がよい。

h. 測定簡易性：2点

スラストスタンドの運用のしやすさについて評価する項目である。インパルスビット測定を実施するとしても、実際には多くの手間が掛かるもの、反対に手をかける必要が殆どないものも存在する。運用が簡易であることが望ましいが、決して必須ということではないので上記の点数としている。

i. 温度の影響：3点

スラストスタンドに対する温度の影響を評価するための項目である。スラストの連続作動によって、スラストスタンドは熱による影響を受ける。微小レンジの測定を目的とするスラストスタンドにお

いて、熱による部材の膨張の影響は非常に大きい¹¹⁾。

j. コンポーネント数 : 2点

スラストスタンドの信頼性を評価するための項目である。スラストスタンドを構成する要素は少ないほど、信頼性が高くなる。

k. サイズ : 3点

スラストスタンドのサイズを評価するための項目である。スラストスタンドは計算式より、中心軸から測定点までの距離を長くすれば長くするほど振幅を大きくすることができるが、実際には真空槽の大きさによる制限を受けることになる。また、外部振動によるノイズの影響はスラストスタンドのサイズに比例するので、できる限り小さなスラストスタンドでありながら、優れた分解能が実現できるものが優れていると言える。

l. 価格 : 2点

スラストスタンドは上記の11項目について最も優れているものを選定するべきだが、実際には優れた機構を持つ部品は高価であることが多い。以上の理由により、コストによる比較を実施する。

以上の評価項目と重み付けのまとめをTable 2に示す。

2.3 トレードオフ結果・考察

トレードオフの結果をTable 3に示す。最も点数が高いものは、カウンターウェイト搭載型スラストターゲットとなった。スラストスタンドにインパルスビットやその反力を与えると振動運動が開始するが、ばね-マス-ダンパ系の運動方程式で示している通り、静摩擦力によるダンパ項が存在する。その原因として最も大きいものがスラストに接続する配管や配線である。一体型のスラストスタンドを利用するには極力細く、影響の少ないものを使用することで減衰率を抑えているが、その手法にも限度がある。また、配管や配線は零点を遷移させる主要な要因でもある。以上より、一切の配管や配線を介さないスラストターゲットが高い点数を得やすくなっている。

スラストターゲットの中でもカウンターウェイト搭載型の方が点数が高くなっているのは、カウンターウェイトを搭載型の方が小さいサイズで開

発できる為である。サイズは、限られた空間である真空槽内での実験を考慮すると重要な評価項目であると言える。

2.4 結論

第2章では4種類のスラストスタンドのトレードオフを実施し、PPTのインパルスビット測定に資するスラストスタンドの選定を実施した。トレードオフの結果として、ターゲット式スラストスタンドが最もふさわしいということを明らかにした。

3. C.W. 装着型スラストターゲットの開発

トレードオフの結果より、上部にカウンターウェイトを配置したスラストターゲットの開発を実施した。原理については2.1節（スラストスタンドの測定原理）で述べているため割愛する。実際に設計したスラストターゲットの概念図をFig. 3に示す。構成部品は大別して、上部カウンターウェイト、L型アルミニウム製上部アーム、SUS440C製ナイフエッジ軸受、L型アルミニウム製下部アーム、下部カウンターウェイト、ポリカーボネート製ターゲット部から構成されている。

3.1 ナイフエッジ軸受

スラストターゲットを開発するにあたり、まず回転軸にあたるナイフエッジ軸受の新規開発を行った。ナイフエッジ軸受の特徴として代表的なものを以下に示す¹²⁾。

- 1) 構造がきわめて簡素である
- 2) ころがり抵抗が小さい
- 3) 支点位置の再現性が優れている
- 4) 高荷重に耐えられる

以上の理由によりナイフエッジは計量衡器や材料試験機をはじめとして、一般計測機器にてこの支点として広く用いられている。しかし軸受けには曲率半径の大きさで分類して3種類の形状が存在する。Fig. 4にその基本的な形状を示す¹²⁾。

Table 2 Evaluation criteria

評価項目	重み付け / PPT	○ (3Point)	△ (2Point)	× (1Point)
周波数	3 PPTの応答性の測定にはMHzオーダが必要	1MHz<f	100Hz<1MHz	f<100Hz
減衰率	2 精度の指標. 低いほど良い	hour<t	min<t<hour	x<min
零点の遷移	3 精度の指標. 零点のズレは測定に大きな影響を及ぼす	遷移なし	-	遷移あり
重量	2 S/N比の指標 重量が軽いほど大きい	m<1kg	1kg<m<5kg	5kg<m
理論式近似数	1 信頼性の指標	近似なし	近似式×1	近似式×2
疲労	3 疲労変化が大きいと、測定値が変化してしまう	影響なし	複数回の実験により影響有	実験毎に影響有
流れ場への影響	3 流れ場への影響は小さいほうが良い	無	-	有
測定簡易性	2 使いやすさの指標	高	中	低
温度の影響	3 熱の影響による変化が大きいと測定値が変化する	無		有
コンポーネント数	2 使いやすさの指標	x<4	x=5	6<x
サイズ	3 真空槽の大きさから、小さいほうが望ましい	l<700	700<l<1000	1000<l
価格	2 使いやすさの指標	x<¥50,000	¥50,000<x<¥100,000	¥100,000<x

Table 3 Result of Trade-off of Thrust Stand

評価項目	PPT	Target	Target / C.W.	Pendulum	Torsion
周波数	3	× 0.844	× 0.16	× 0.0167	× 0.0667
減衰率	2	○ hour<t	○ hour<t	× min<t<hour	△ x<min -
零点の遷移	3	○ 無	○ 無	× 有	× 有
重量	2	○ 0.50kg	○ 0.934kg	△ 5~10kg	△ 5~10kg
理論式近似数	1	△ Sinθ=θ	△ Sinθ=θ	△ Sinθ=θ	△ Sinθ=θ
疲労	3	○ 無	○ 無	△ ナイフエッジの損耗	× 回転軸の塑性変化
流れ場への影響	3	× 有	× 有	○ 無	○ 無
測定簡易性	2	○ 無	○ 無	△ PPTの搭載	× スラストとC.W.釣合
温度の影響	3	△ ターゲット部の摩耗	△ ターゲット部の摩耗	○ 影響なし	× 回転軸変形
コンポーネント数	2	○ 4	△ 6	△ 6	○ 4
サイズ	3	× 1100mm	○ 670mm	× 1000mm	△ 728mm
価格	2	△ ナイフエッジ 8万円	△ ナイフエッジ 8万円	△ ナイフエッジ 8万円	△ C型パイプ 数万円
合計		62	66	52	48

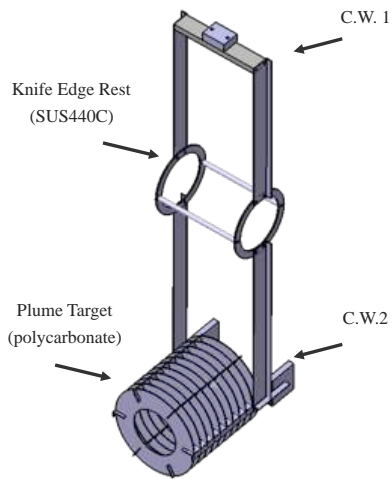


Fig. 3 Schematic View of Thrust Target

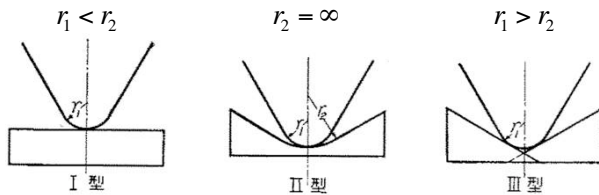


Fig. 4 Type of Knife Edge¹²⁾

I型：平行受

3種類の軸受けの中で最も摩擦が小さい。化学天秤、微量天秤など指示値の高い再現性を必要とするはかりのてこに用いられる。欠点として、水平方向の力に対する抵抗力を持たないことから、表面粗さによる零点の遷移のしやすさが挙げられる。

II型：V型刃受

刃とV型刃受を用いたナイフエッジ軸受はI型と違い、それ自身で水平方向の力に抵抗できるという特徴を持つ。一般計器類や上皿天秤のように比較的軽荷重のものから材料試験等高荷重のものまで広く用いられている。

III型：交さ刃受

刃と交差刃受を用いたナイフエッジ軸受けはII型よりも優れた水平方向の力に対して抵抗力を持つので、理論的にはこの移動が存在しない。しかし実際には、ふたつの部材によって構成される交差軸受はふたつの支点を持つことになり、それぞれの摩擦力は常に等しいとはいえないので中心は測定の度に代わり、結果的にばらつきが生じると考えられる。

上記に挙げた3種類の軸受けの特徴を考慮し、ナイ

フエッジ軸受けの形状を検討する。実際の測定においては、ポンプの振動から真空槽の開閉などの外部振動が軸受けに与える影響は大きいと考えられる。そこで零点の遷移を防ぐために、ナイフエッジとの接点部分に切り欠けを設けたII型のSUS440C製軸受けを設計した。

3.2 円筒型ターゲット部⁶⁾

円筒入り口からの軸方向プルームがターゲット底面の円錐部および側面のスリットで方向を半径方向に変化させる構造になっている。写真をFig. 5に示す。排気プルームがターゲット前面で弾性反射し、測定誤差が生じることを防いでいる。



Fig. 5 Schematic view of Target Corn

3.3 校正方法について

校正には、錘をスラストターゲットに衝突させる方法を利用した。原理は、糸に吊るした既知の力積を与える錘をスラストターゲットに衝突させ、その変位量を測定するというものである。用いた錘と糸の概要図をFig. 6に、校正方法の概要図をFig. 7に示す。微小力積による校正を実現するため、錘はポリエステルパテに砂鉄を混ぜ込み乾燥させたものを、糸には直径0.104 mm、長さ405 mmのナイロン糸を利用している。校正を行う際には錘を糸で吊るし、ターゲットに力積を与える位置から高さ20 mmとなるようにしている。また、糸の支点はナイフエッジの先端と同じ位置になるよう配置しており、糸の張力が校正に及ぼす影響をできる限り削減している。錘の衝突によってスラストスタンドに与える力積は、力学的エネルギー保存則から得られた次式によって算出した。

$$I_{cal} = m \cdot v_1 = \sqrt{2gl_{cal}(1 - \cos\theta)} \quad (14)$$

校正は大気中で実施した。大気中と真空中における校正の値がほとんど同じであることは、当研究

室の過去の研究により報告されている¹³⁾。衝突前の錘は電磁石の一点で固定し、電源をOFFにすることで電磁石から錘を離れた。使用した錘は10種類であり、それぞれの質量ともたらす力積をTable 4に示す。なお糸の質量は錘に対して無視できないので、計算に加味している。また、スラストスタンド上の錘が衝突する部分には少量の真空グリスを塗布し、錘を完全非弾性衝突させている。

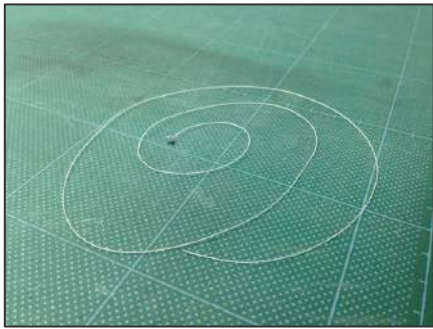


Fig. 6 Schematic view of Calibration mass and monofilament Thread

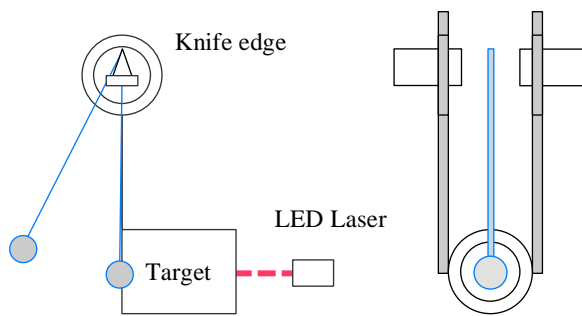


Fig. 7 Schematic of Calibration
(Left: Side View, Right: Front View)

Table 4 Impulse Bit used on Calibration

Mass Number	Mass, g	Ibit, μNs
1	32.4	22.3
2	54.0	35.8
3	66.6	43.7
4	101	65.5
5	136	87.0
6	170	108
7	234	149
8	263	167
9	296	187
10	330	208

3.4 校正結果

Fig. 8に、錘によって与えた力積、それらにより得られた校正直線、式(13)を用いて算出した理論直線を示す。校正直線と理論直線の比較により、これらがほぼ一致していることが判る。従って実際に開発したスラストターゲットは、カウンターウェイトによる影響を考慮した設計を反映し、正しい運動をしていると言える。また振幅に対する力積の大きさは $0.186 \mu\text{Ns}/\mu\text{m}$ 、校正における誤差は $\pm 5.6 \mu\text{Ns}$ であった。インパルスビット測定を実施する際にスラストターゲットの性質による測定誤差の許容値を10%とするならば、このスラストターゲットを用いる場合には最小で $56 \mu\text{Ns}$ のPPTのインパルスビットが測定可能であるといえる。今後は更なる誤差の低減化が求められるため、校正方法をはじめとした誤差を発生させる可能性がある部分の手法の改善が求められる。

Fig. 9に実際にPPTを単発作動(1 shot)させた際の、スラストターゲットの振幅の時間履歴を示す。時間経過にかかわらずスラストターゲットは非減衰運動を維持しており、摩擦によるダンパがほぼ無視できるということが判る。また1 shotによる振幅が、PPTを作動させる前のノイズに対して十分大きいことが判る。従って、PPTのインパルスビットの単発測定が可能であると言える。しかし、測定を通してノイズによるピークが数多く確認できる、これはLED変位計をはじめとした測定系が何らかの影響を受けて発生していると考えられ、今後は原因を絞り込み、除去する必要がある。

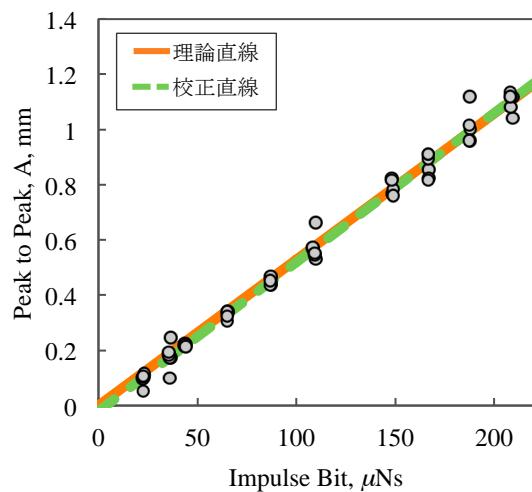


Fig. 8 Calibration Map of Peak to Peak vs. Impulse Bit

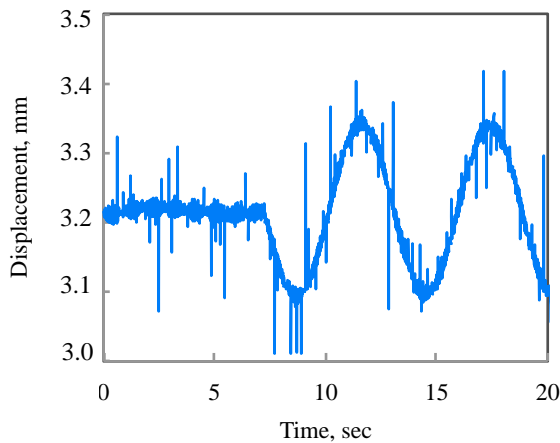


Fig. 9 Signal of 1 shot Pulse Displacement

3.5 結論

第3章ではC.W.搭載型スラストターゲットの開発を行った。理論直線と校正直線がほぼ一致し、振幅に対するインパルスビットが $0.186 \mu\text{Ns}/\mu\text{m}$ 、誤差 $\pm 5.6 \mu\text{Ns}$ であることから、精度の高い推力測定が可能であることを示した。また、実際にPPTの作動試験で実際に運用することにより、精度の高いインパルスビット測定が可能であることを示した。

4. まとめ

本研究では、スラストスタンドのトレードオフと、その結果を踏まえたC.W.搭載型スラストターゲットの開発を行った。スラストスタンドのトレードオフの結果により、PPTの発生力積測定においてはカウンターウェイト搭載型スラストターゲットが最も相応しいことを示した。また、この結果を用いて設計開発・作動試験で実際に運用することにより、精度の高いインパルスビット測定が可能であることを示した。

参考文献

- 1) 杵淵紀世志, et al., “ISAS あきる野実験施設における H2A ロケット高度化ベントリテンション開発試験”, 2012 年度宇宙輸送シンポジウム, STCP-2012-048
- 2) Thomas Williams, “DESIGN AND DEVELOPMENT OF A MICROPOUND EXTENDED, RANGE THRUST STAND (MERTS)”, NASA Goddard Space Flight Center, 1971
- 3) Michael J, Wilson, et al. “A COMPACT THRUST STAND FOR PULSED PLASMA THRUSTER”, 25TH International Electric Propulsion Conference, Cleveland, Ohio, USA, IEPC-97-122
- 4) Manuel Gamero-Castaño and Vlad Hruby, “A Torsional Balance that Resolves Sub-micro-Newton Forces”, Busek Co. Inc., International Electric Propulsion Conference, Pasadena, California, USA, 2001, IEPC-01-235
- 5) 枝光敏章, “電熱加速型パルスプラズマ推進機の性能向上に関する研究”, 大阪大学大学院 基礎工学研究科機能創成専攻 2005 年度博士論文
- 6) Yanagi, R., Kimura, I., “New Type Target for the Measurement of Impulse Bits of Pulsed Plasma Thrusters,” 15th IEPC, Las Vegas, Nevada, USA, AIAA-81-0712
- 7) Sasoh, A., Arakawa, Y., “A high-resolution thrust stand for ground tests of low-thrust space propulsion devices”, Rev. Sci. Instruments, Vol. 64, No. 3, 1993
- 8) 亙理厚, “機械振動”, 丸善株式会社, 昭和 50
- 9) 北郷薫, 玉置正恭, “機械振動学 基礎と応用”, 工学図書株式会社版, 昭和 52
- 10) 亀岡昌彦, “パルス型プラズマスラストの高信頼度インパルス測定”, 東京都立科学技術大学大学院 2003 年度修士論文
- 11) 寺地一拓, “推力のリアルタイム計測の実現”, 2015 年宇宙輸送シンポジウム, 相模原, STEP-2014-035
- 12) 増尾竜一, “ナイフエッジ軸受の摩擦”, 潤滑 第 15 巻 第 3 号, 1970
- 13) 佐藤健輔, “PPT の性能測定方法の検討”, 東京都立科学技術大学工学部航空宇宙システム工学科, 1999 年度卒業研究論文