

## サーマルドリフト対策として CFRP を用いた推力測定装置の開発

## Development thrust measuring device using a CFRP as a measure of thermal drift

○須藤 孝宏(静大・院)・月崎 竜童・國中 均 (JAXA) ・山極 芳樹 (静大)

## Abstract

Study of electric propulsion will require the development of thrust measuring device. Evaluation of the measuring device is an important measurement errors. For the measurement error, thermal drift can be cited as the biggest error factor of thrust measurement of electric propulsion. Thermal drift is generated from being displaced by the heat input, such as a frame of thrust measuring device. In the present study, the frame of the fabricated thrust measuring device to verify the effect of thermal drift change from aluminum to CFRP.

## Nomenclature

$T, T''$	: tension
$M$	: weight
$g$	: acceleration of gravity
$N$	: normal force
$N'$	: normal force before actuation
$N''$	: normal force after actuation
$L$	: wire length from the pulley
$\Delta L$	: amount subduction of dish
$F$	: force
$\rho$	: linear expansion coefficient
$\Delta$	: displacement

## Subscripts

1	: before actuation
2	: after actuation
3	: calibrating
c	: calibrating
L	: load cell

ストの観点より化学燃料の減少を狙いとした大電力型の電気推進機を用いることが必要となる。JAXA では、上記の産官学による土壌となる技術を集約・統合を行い効率的な研究開発を行っており、先日 2021 年度の打ち上げ目標に人工衛星のエンジンを電気推進機のみとする「オール電化衛星」<sup>2)</sup>の検討を打ち出した。その電気推進機の研究が活発に行われる一方、大電力型に適した推力測定装置の研究開発は行われていない。また、推力測定装置における測定精度の担保は衛星の運用において重要な問題となることから、今後の研究テーマにおいて大電力<sup>3)</sup>に適した推力測定装置の開発は求められると考えられる。

## 1.2 推力測定

一般に電気推進機は低推力であるため、自重に対する推力の割合、すなわち推重比が非常に小さい。このため、化学推進機の推力測定装置に比べ電気推進機の推力測定装置を高精度で開発することは非常に困難である。現在まで、推力測定装置すなわちスラストスタンドには様々な種類のものが開発されてきた。典型的なものは吊下振り子型と倒立振り子型であり、ともに振り子にスラストを搭載させ推力における振り子の変位量を変位センサで検知し、予め校正として既知の荷重による変位量の関係を取得することで推力に換算していた<sup>4)5)6)</sup>。

## 1. 緒言

## 1.1 研究背景

これまでに電気推進ロケットエンジンは、特徴として高比推力を有し静止衛星の長寿命化や小惑星探査機はやぶさに代表される深宇宙探査に必要な長期間のミッションに応用されてきた<sup>1)</sup>。これらの実用化に伴い将来の更なる電気推進機の応用先として軌道間の大規模輸送ミッションが検討されている。このようなミッションを達成するには、コ

## 1.3 従来のスラストスタンド

1.3.1 節で各のスラストスタンドの問題点について、1.3.2 節で共通の問題であるサーマルドリフトについて、1.3.3 節で電力規模の増加に伴う問題点についてそれぞれ記述する。

Table.1 様々なスラストスタンド比較

	東大	先行研究によるもの	その他(某メーカー)
測定方法	制御機と変位計	変位計	ロードセルによる0変位計測
校正方法	滑車を介した錘付ワイヤーを用いて変位量と荷重の関係の取得		
誤差要因	滑車の摩擦による校正誤差		
	配線の配管のフリクション		
大電力化への懸念	サーマルドリフトの増大		
	システムが複雑		

1.3.1 各スラストスタンドの問題点

滑車の摩擦による誤差を挙げる. 一般的な振り子式, 東大の2重振り子式スラストスタンドでは, 校正時の滑車の摩擦による誤差, ロードセルを用いた棒メーカーが開発したスラストスタンドでは, ロードセルの押し込み量による校正時に滑車の摩擦による誤差がそれぞれ発生してしまう. 概要を Fig.1, Fig.2 に示す.

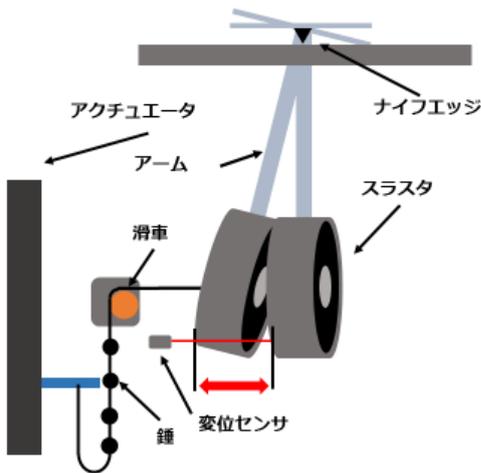


Fig.1 一般的なスラストスタンドの校正方法の概要

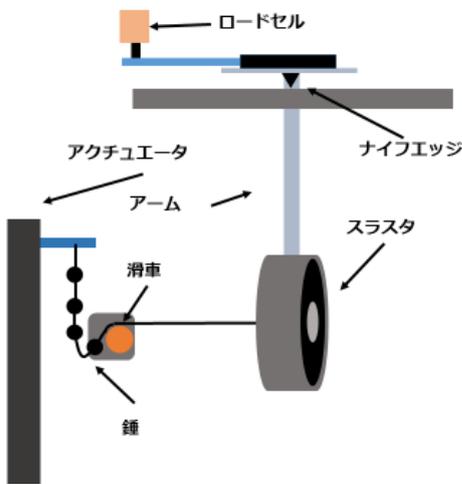


Fig.2 ロードセルを測定デバイスとした校正方法の概要

Fig.1 では, 錘による荷重を与えた際の振り子の変位により滑車の摩擦が既知の荷重に影響し摩擦分与えた荷重が変化してしまう. また, Fig.2 では, ロードセルはひずみゲージのものを使用するため 100mN で 1mm ロードセル検知部を押し込み, 振り子が変位するため Fig.2 と同様な滑車の摩擦の影響と配線・配管の干渉を受けるため校正時のばらつき誤差に起因してしまう.

1.3.2 サーマルドリフトにおける問題点

サーマルドリフトとは, Fig.3のようにスラスト作動で発生するブルームからの輻射熱よってのスラストスタンド自体や真空チャンバが歪み, その歪みを推力として計測することで, 推力が見かけ上増減してしまう. 主に, 熱入力され影響が見れるのは, スタンド振り子のアームである.

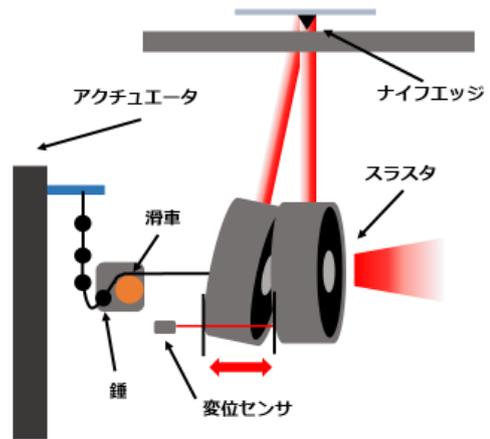


Fig.3 サーマルドリフトの概要

サーマルドリフトによる推力値の増減においてFig.4に示す. この測定では, スラストの作動に伴い推力値の増加がわかる. そのため, 先行研究では, 振動成分の誤差を含むがスラストを停止する直前の数値と作動直後の数値の差分を推力としていた. これにより, 推力値のリアルタイム測定が行えないことや長時間にわたる作動による推力測定が不可能であることなど問題がある.

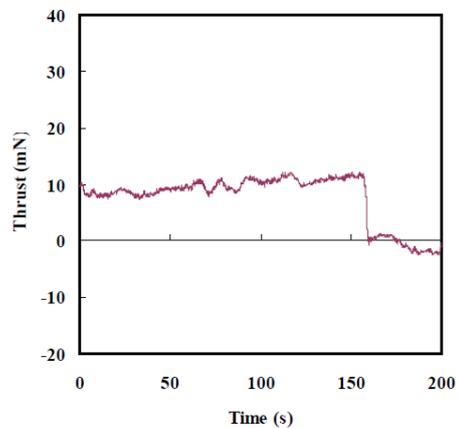


Fig.4 サーマルドリフトの様子

### 1.3.3 大電力化に伴う問題点

顕著に影響が出るのはサーマルドリフトである。現状では、長時間作動でなければドリフトの影響は少ないが、電力規模が増加すると短時間の作動でも推力測定にも影響が現れることが考えられる。

上記以外にも把握はできないが、大電力に伴いスラストスタンドを含む実験系には何かしらの影響が現れると考えられる。そのため、スラストスタンドの測定原理は複雑なものではなく、シンプルな原理が望まれると考える。

### 1.4 研究目的

今後の電気推進機の研究開発において、大電力型電気推進機の研究は注目される分野である。その実験環境構築において上記の問題点を克服した高精度で大電力化に適した推力測定装置を開発することが求められる。具体的な要求項目は以下の通りである。

- ・誤差要因を少なくするための簡易な測定システム
- ・滑車摩擦の影響を受けない測定原理と校正方法
- ・サーマルドリフトが発生しない
- ・フリクシヨンの影響を少なくする

上記の項目を達成する推力測定装置を提案・製作しスラスト作動による知見から将来の大電力型電気推進機への展望を得ることを本研究の目的とする。

## 2. スタンド設計

### 2.1 スタンド設計・製作

本スタンドの設計にあたって前節の要求項目に加え、宇宙科学研究所の耐久試験チャンバのサブタンク、メインタンク両方での試験が行える必要がある。そのため、サブタンク用にフランジに取り付けられる形状という条件が付加される。製作したスラストスタンドの概要を Fig.5 に示す。

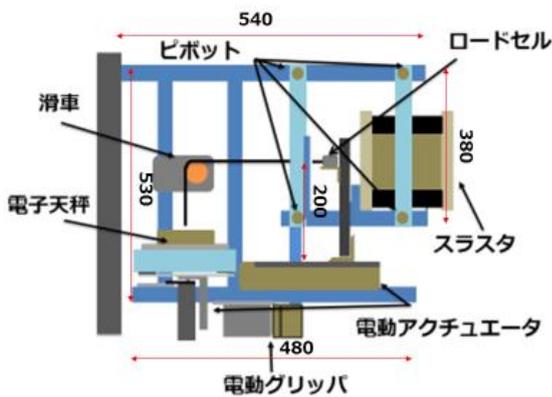


Fig.5 製作したスラストスタンドの概要

### 2.2 誤差要因を少なくするための簡易な測定システム

簡易な測定システムは誤差の要因が少なくなり大電力など今後の推進機の発達による新たな誤差要因が生まれにくくなる。そのため、将来的な電力規模における利用を考えるならば簡易な測定システムでの推力測定が好まれる。

したがって、自身のスラストスタンドの測定システムは簡易にするためにFig.6に示すような電子天秤を測定デバイスに用いることにした。電子天秤は荷重を測定するもので長い歴史の中製品として確立しており、制御器のように複雑な製作・制御が必要ではない。

この電子天秤の実験条件での使用可否については次章で記述する。



Fig.6 採用した音叉型電子天秤

### 2.3 滑車摩擦の影響を受けない測定原理と校正方法

#### 2.3.1 概要

滑車の影響を受けないためには振り子の平衡位置が変位しないことが重要となる。また、推力値は校正結果から換算を行うため校正原理が重要となる。1.3.1節で述べたことを考慮して製作するスラストスタンドの測定原理は、沈み込み量が数 $\mu\text{m}$ レベルの電子天秤を用いた0変位測定とした。また、校正原理は、既知の荷重が滑車を介した錘付ワイヤーによるものではなく、ロードセルにより振り子に取り付けた棒の推力軸と一致する位置を押すものに変更した。この既知の荷重とその際の電子天秤の出力値の関係も用いることにした。

次節より測定原理、校正原理を式より説明する。

#### 2.3.2 測定原理

測定原理を説明するために作動前と作動中のスタンド内の物理式も用いる。Fig.7に作動前の概要を示す。

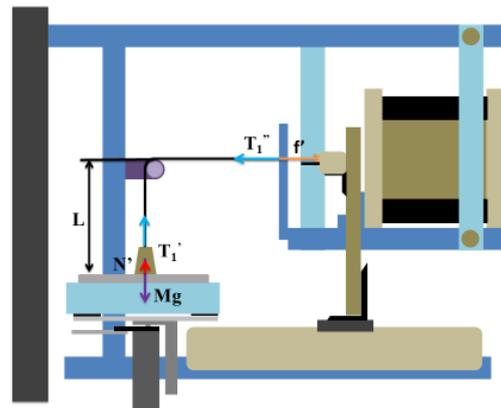


Fig.7 作動前の概要

ワイヤーの端に錘を取り付け、その錘を載せた電子天秤の高さをアクチュエータによって昇降させ、ワイヤーに初期張力を与え、その時点で電子天秤の風袋引きを行う。

天秤に皿における垂直方向のつり合い

$$Mg = T'_1 + N' \quad (1)$$

ワイヤーのつり合い式

$$T''_1 + \rho Lg = T'_1 \quad (2)$$

スラスタ搭載振り子の水平方向のつり合い

$$T''_1 = f' \quad (3)$$

式(1)を  $N'$  について変形させ式(2)を代入させると

$$N' = Mg - (T''_1 + \rho Lg) \quad (4)$$

式(4)に式(3)を代入する

$$N' = Mg - (f' + \rho Lg) \quad (5)$$

$N'$  の垂直抗力が作動前の電子天秤の出力値となる。

次に、作動中のスタンド内の物理を考える。Fig.8 に作動後の概要を示す。

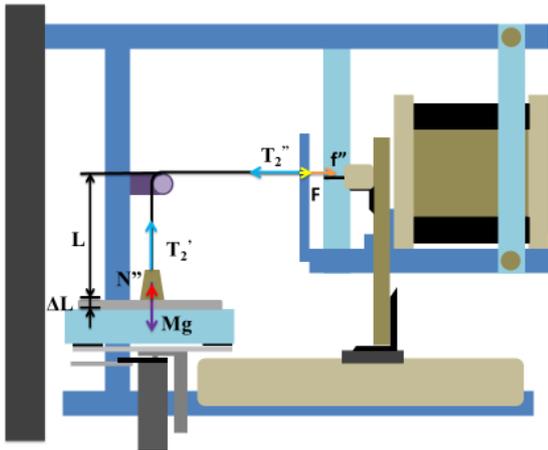


Fig.8 作動中の概要

天秤に皿における垂直方向のつり合い

$$Mg = T'_2 + N'' \quad (6)$$

ワイヤーのつり合い式

$$T''_2 + \rho(L + \Delta L)g = T'_2 \quad (7)$$

スラスタ搭載振り子の水平方向のつり合い

$$T''_2 + F = f'' \quad (8)$$

式(6)を  $N''$  について変形させ式(7)を代入させると

$$N'' = Mg - \{ T''_2 + \rho(L + \Delta L)g \} \quad (9)$$

式(9)に式(8)を代入する

$$N'' = Mg - \{ f'' - F + \rho(L + \Delta L)g \} \quad (10)$$

となる。

$N''$  は作動中の電子天秤の出力値である。

したがって、推力値は式(10)と式(5)の差である。

$$N'' - N' = F - (f'' - f') - \rho \Delta Lg \quad (11)$$

となる。

赤字が誤差成分として考えられるため推力校正を行う必要がある。

### 2.3.3 校正原理

既知の荷重はロードセルを電動アクチュエータにより水平移動させることで加える。校正中の概要を Fig.9 に示す。校正前は、作動前のスタンド内の物理式なので 2.3.2節を参照。校正中のスタンド内の物理式を考える。

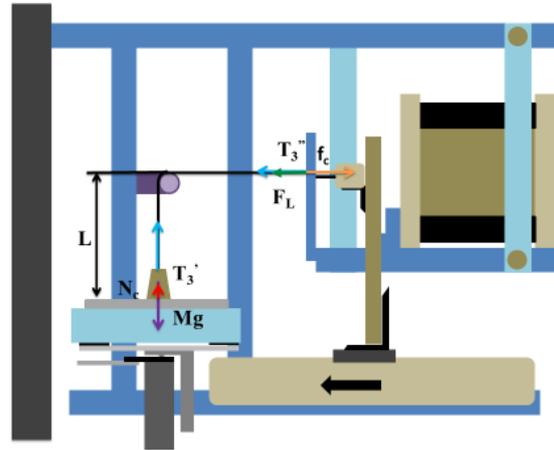


Fig.9 校正中の概要

天秤に皿における垂直方向のつり合い

$$Mg = T'_3 + N_c \quad (12)$$

測定用ワイヤーのつり合い式

$$T''_3 + \rho(L + \Delta L)g = T'_3 \quad (13)$$

スラスタ搭載振り子の水平方向のつり合い

$$T''_3 + F_L = f_c \quad (14)$$

式(12)を  $N_c$  について変形させ式(13)を代入させると

$$N_c = Mg - \{ T''_3 + \rho(L + \Delta L)g \} \quad (15)$$

式(15)に式(14)を代入する

$$N_c = Mg - \{ f_c - F_L + \rho(L + \Delta L)g \} \quad (16)$$

となる。 $N_c$  は校正中の電子天秤の出力値である。

校正荷重は式(16)と式(5)の差である。

$$N_c - N' = F_L - (f_c - f') - \rho \Delta Lg \quad (17)$$

となる。

赤字は校正時の誤差成分である。

$$f_c = f'' \quad (18)$$

と考えてよい。そのため、式(11)と式(17)の誤差成分は同じとなり、既知の校正荷重  $F_L$  とその際の電子天秤の出力値  $N_c - N'$  の関係を推力換算に用いることができる。また、1.3.1節で記述した誤差は校正荷重  $F_L$  が滑車の摩擦の影響は受けないので校正荷重は変化しない。

### 2.4 サーマルドリフトへの対策

サーマルドリフトの発生は、1.3.2節で述べたように、スタンド部材への熱入力による熱膨張が原因である。そのため、本スラストスタンドでは、部材を熱膨張係数の低い CFRP を使用することとした。CFRP と従来のスラストスタンドで用いられた A2017, SUS304 の熱膨張係数の比較を Table.2 に示す。

Table.2 各部材の熱膨張係数の比較

A2017	SUS304	CFRP
24	17.3	-0.1

CFRPの熱膨張係数はA2017の1/240, SUS304の1/173である。この数値は熱膨張において大いに期待できる。このCFRPの効果検証については、次章にて記述する。

### 3. スラストスタンド製作検討

#### 3.1 簡易な測定システムの検討

##### 3.1.1 概要

簡易な測定システムとして 2.2 節において測定デバイスに電子天秤を用いて簡易な測定システムとしていた。そのため検討には、電子天秤が試験環境で使用できるか

- ・真空環境下での使用
- ・外部磁場印加時での使用
- ・電子天秤を熱源としたドリフト

の項目の検討より考える。

##### 3.1.2 真空下での使用

真空環境における動作保障はメーカーではされておらず、電気推進機の推力測定を行うためには真空環境において作動できるのか、質量測定に支障がないか確認する必要がある。検討方法は、Fig.10 に示すようにアクチュエータを用いて錘をおろし真空中、大気中での測定値を比較することで行う。検討結果を Table.3 に示す。

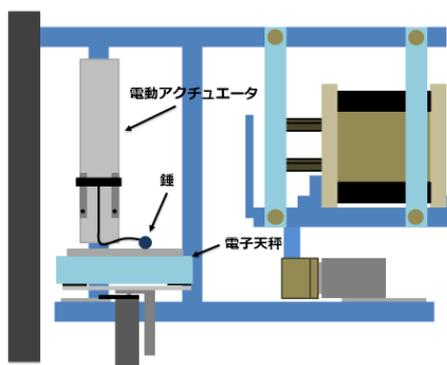


Fig.10 真空利用における検討方法の概要

Table.3 大気中と真空中での測定値の比較[g]

大気中	真空中
6.886	6.883

この結果より推力としても0.03%と無視できることから、電子天秤の真空環境での作動、質量測定に支障がないことが確認された。

##### 3.1.3 外部磁場印加時での使用

電気推進機の実作には磁場を印加するものが多い、そのため、スラストのコイル磁場を印加した場合推力にどのように影響するのか、そもそも磁場で壊れてしまわないか確認する必要がある。検証方法は Fig.11 に示す。電子天秤自体の磁

場耐性を確認するため、実際の推力測定時とは異なり、ワイヤーは張らず測定時の錘は載せないことにする。磁場強度は、推力測定で行うものと同じである。検証結果を Fig.12 に示す。

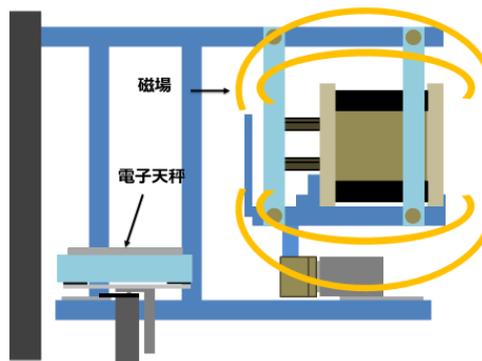


Fig.11 磁場印加による検証方法の概要

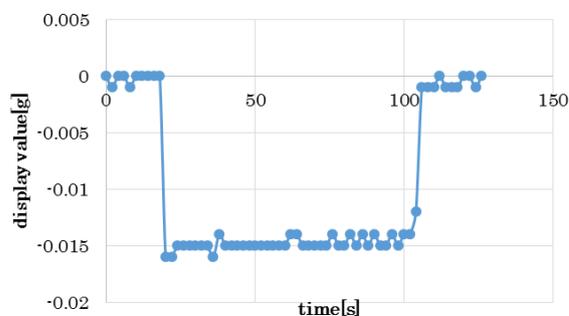


Fig.12 磁場印加における検討結果

この結果より、電子天秤は磁場では壊れないことはわかり、測定値はオフセットされているおり、磁場印加時間に応じたドリフトは見られない。これより、電子天秤の磁場印加においては使用できることが確認された

##### 3.1.4 電子天秤を熱源としたドリフト

真空環境において、熱を伝える媒体が大気中なくなるため熱放射されない。そのため、電子天秤に熱源がある場合温度が大気中での作動に比べて上昇していく。そのため熱源を排除による検証としてバックライトを ON/OFF させ比較した。比較結果を Fig.12 に示す。

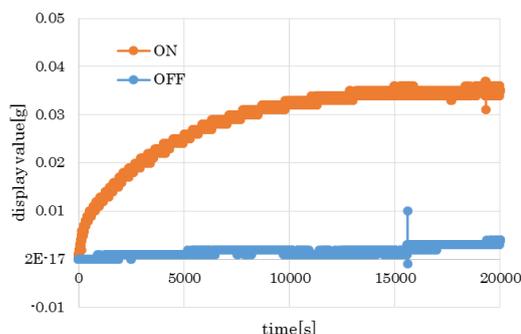


Fig.12 バックライト ON/OFF による影響比較

電子天秤のバックライトがONの場合、スラストの想定作動時間より(3600s)とすると 0.2mN 程度ドリフトしてしまう。一方 OFF の場合ほぼ 0 である。そのため、バックライトを OFF にすることで使用できると考える。

### 3.2 サーマルドリフトの影響の検討

サーマルドリフト対策として CFRP を用いて熱膨張を微小にすることにした。この CFRP の効果検証のためにヒーターをアームに貼り付けアーム前後の温度差による電子天秤のドリフトを取得した。検証方法の概要を Fig.13 に示す。SUS304 と CFRP の結果の比較を Fig.14 に示す。

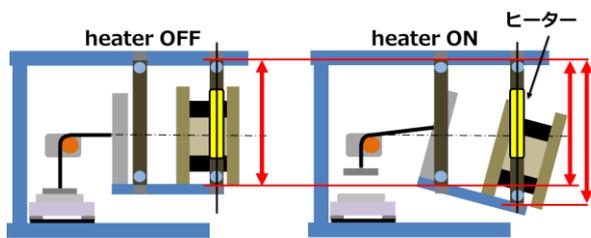


Fig.13 ヒーターによる検証試験の概要

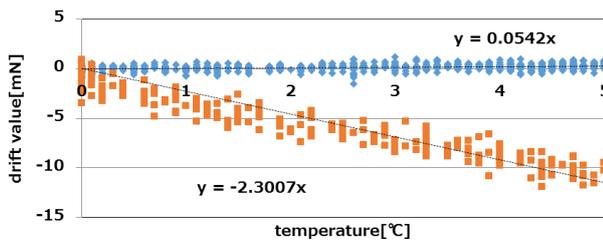


Fig.14 各部材のサーマルドリフトの比較

この検証結果の比較より SUS304 では、前後のアームの温度差 1°C において -2.3mN ドリフトし、CFRP では、0.0542mN であった。この結果よりスタンド部材を CFRP にすることでサーマルドリフトの対策として期待できると考える。

### 3.3 振り子の変位量検証

#### 3.3.1 概要

本スタンドは、配線・配管の干渉によるフリクションの影響を少なくするための 0 変位測定を考えている。同じ 0 変位測定である Fig.2 の某メーカーが開発したものではロードセルの押し込み量が 100mN において 1mm であった。このスタンドの変位量と比較することでフリクションの影響を判断する。

#### 3.3.2 電子天秤の沈み込み量の検証

電子天秤の検証対象は、ロードセル型、音叉型にて比較した。錘は 10~40g を 10g 刻みで加え、皿の沈み込み量を変位センサにて取得した。その検証結果を Fig.15 に示す。

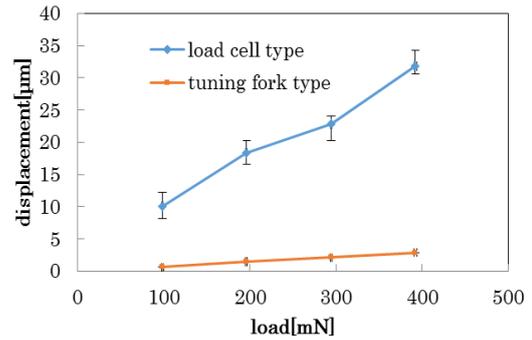


Fig.15 荷重における沈み込み量の比較

この結果より音叉型では、100mN で 0.79μm、ロードセル型で 10μm であった。某メーカーのスラストスタンドが 100mN で 1mm に比べてどちらも 1/100 以下のオーダーである。この結果からより変位量、ばらつきの少ない音叉型を使用することにした。

## 4. 実験環境

実験は Fig.16 に示す真空槽を用いて行われた。真空槽は主真空槽と 2 つの副真空槽(A,B)から構成されている。排気量 28,000 l/s のクライオポンプを 4 つ備えて、常時  $1.4 \times 10^{-5}$  Pa 程度の高真空を維持している。



Fig.16 真空槽

## 5. 実験結果と考察

### 5.1 概要

本章では、製作したスラストスタンドの性能取得試験を行った結果とその考察を行い、考察から生まれた新たな課題に対する対策とその検証試験の結果を示す。

5.2 節に、推力校正結果、5.3 節に推力測定結果、5.4 節に考察、5.5 節に新たな課題における対策と検証結果について記述する

### 5.2 推力校正結果

ロードセルが与える荷重は 4 回でアクチュエータの水平移動の回数である。ヒステリシスの確認のため作動前、作動後の往きと帰りで荷重における測定値を取得し、0 点での取得も含め各 5 点の関係をフィッティングした。Fig.17 には、計 20 点でフィッティングしたものを示す。

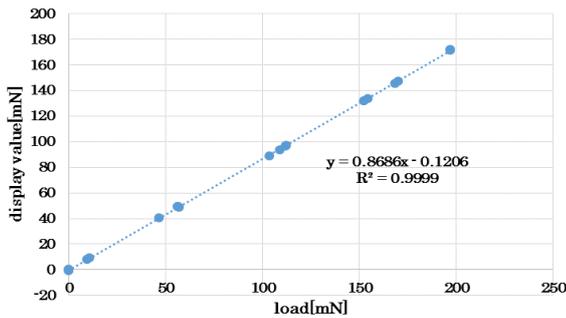


Fig.17 推力換算に用いる校正結果

この結果より、校正によるヒステリシスはほぼ無く、ばらつき誤差においても -0.98%~+0.91%という結果を得た。高線形性をもつスラストスタンドであると言える。

### 5.3 推力測定結果

この推力測定では、サーマルドリフトに対する本スラストスタンドの耐性の評価を行う。搭載するスラストは、某メーカーが開発中のホールスラストで、実験パラメータは放電電圧、アノード流量、カソード流量、内外コイルの外部磁場強度である。実験はこのパラメータを変更して5種類の推力データを取得する。

推力測定結果を Fig.18 に示す。

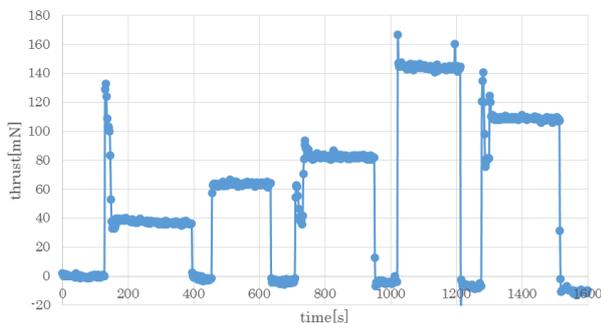


Fig.18 推力測定結果

この結果からサーマルドリフト量を Table.3 に示す。

Table.3 サーマルドリフト量

作動回数	サーマルドリフト量[mN]
1	-0.92
2	-1.27
3	-0.48
4	-3.06
5	-1.73
合計	-8.86

サーマルドリフトの数値については、作動回数に対応して1回毎の作動におけるドリフト量はばらつきがあり減少傾向にあるがアームへの熱入力由来ならばヒーターを用いた試験結果からこのようなドリフトは考えられない。別の要因があると考えられる。

## 5.4 考察

### 5.4.1 サーマルドリフトの原因

サーマルドリフトの原因として

- ・アームを含むスタンド部材への熱入力
  - ・配線への熱入力による熱膨張
- この2つの可能性より考える。

### 5.4.2 アームを含むスタンド部材への熱入力

本スタンドの部材は CFRP で構成されており、3.2 節で行ったヒーター試験では、振り子の前後のアームの温度差は 1°Cにつき 0.0542mN にドリフトすることがわかっている。前節のスラスト作動時における温度測定結果を Fig.19 に示す。温度測定部は振り子の前後のアームに貼り付けている。

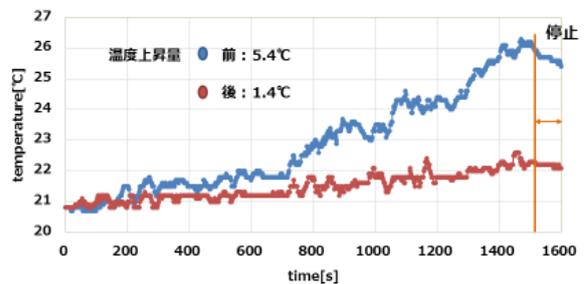


Fig.19 アームの温度測定結果

この結果では、前アームが 5.4°C 上昇、後ろアームは 1.4°C であった。前後のアーム温度差は、4.0°C である。この温度上昇分アームが熱変位してドリフトしたとすると、0.217mN となるはずである。しかし、推力測定時のドリフト量は、-8.86mN であった。この 9mN の差は、その他に原因があると考えられる。

### 5.4.3 配線への熱入力による熱膨張

配線への熱入力により配線が熱膨張しその膨張分が見かけ上推力となっている。特に問題があると考えられるのが、コイル配線である。このコイル配線は推力軸方向に硬いコイル線が伸びており熱膨張で振り子を押し出す方向に伸びると考えられる。試験時に測定可能な熱電対は内コイルのみであったので、その内コイルに電圧を印加し温度を上昇させその際の温度上昇における電子天秤のドリフトの関係を取得した。その結果を Fig.20 に示す。

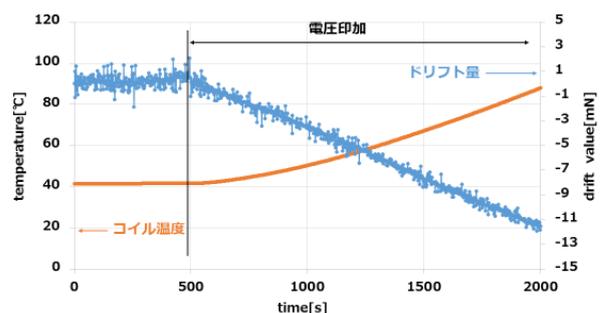


Fig.20 コイルの温度上昇におけるドリフト量

この結果から 1°Cの温度上昇において電子天秤のドリフトは-0.226mN/°Cであった。スラスタ作動における推力測定試験の際のコイルの温度上昇量は 60°Cであった。単純な計算をはじめ込むと-13.56mNとなる。この値は、サーマルドリフト量の-9mNと一致はしないが、サーマルドリフトにおいて配線への熱入力の問題になることがわかった。

## 5.5 配線への熱入力対策と検討

### 5.5.1 対策

コイル配線の取り回しを Fig.21 のようにアクリル板とボルト・ナットによりセパレートすることにした。

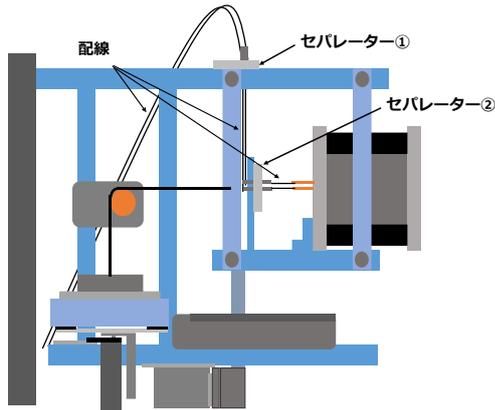


Fig.21 セパレーターを用いた熱入力対策

この配線をセパレートすることで、振り子内の配線の熱膨張による熱応力は内力として打ち消すことができ、セパレーター②からフィードスルーまでの熱入力の影響はスタンドの架台を押し引きするため振り子には影響をしない。

### 5.5.2 検証結果

コイルの温度を直接測れなかったため、コイル付近のスラスタのプレートとコイル配線の温度測定を行い、その温度上昇におけるドリフト量の取得を行う。検証は、Fig.21 のセパレーターの有無で比較を行った。その結果を Fig.22, Fig.23 に示す。

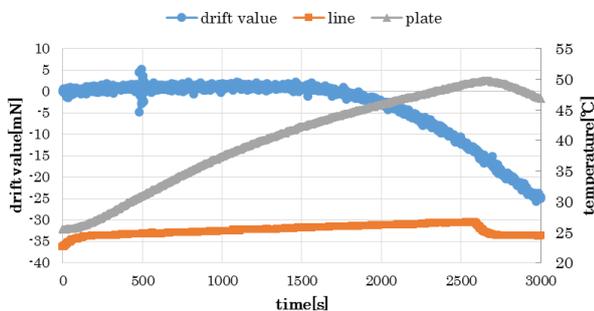


Fig.22 セパレーター無し

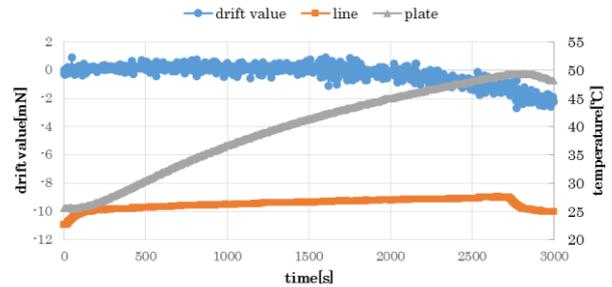


Fig.23 セパレーター有り

この結果から配線設置の変更前では、コイルに電圧を印加してから 3000s で-25mN、変更後では、-2mNであった。しかし、現状の 5.3 節の 1500s 程度で 2.3kW 程度の総電力ではほぼ配線への熱入力由来のサーマルドリフトは抑えることができると考えられる。

## 6. 結論

Table.1 からの要求項目の対策を検証しサーマルドリフト以外の項目は達成できた。また、サーマルドリフトにおいても原因の 1 つであるアームへの熱入力においては CFRP により対策でき、配線への熱入力においてはセパレートすることで可能性を見出すことができた。スラストスタンドとしての性能については、直接推力の誤差となる校正時のばらつき誤差は、-0.91%~+0.98 と高精度化を達成することができた。今後については、大電力化がより進むためセパレートしても限界が来ると考えられる。そのため配線を用いない送電方法、または、配線の取り付け方などスラスタ設計時から考える必要がある。

## 参考文献

- 1) 栗木恭一, 荒川義博, "電気推進ロケット入門," 東京大学出版会, 2003
- 2) Dan M. Goebel, Manuel Martinez-Lavin, Thomas A. Bond, and Andrew M. King Boeing Electron Dynamic Devices Torrance, "Performance of XIPS Electric Propulsion in On-orbit Station Keeping of the Boeing 702 Spacecraft" 38th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, AIAA2002-4348, 2002.
- 3) Naoji Yamamoto, Haruki Takegahara, Junichiro Aoyagi, Kyoichi Kuriki, Taichiro Tamida, and Hiroyuki Osuga, "Development of a Novel Power Processing Unit for Hall Thrusters" IEEE TRANSACTIONS ON PLASMA SCIENCE, VOL. 43, NO. 1, 2015, pp.158-164.
- 4) H. J. Junge, et al. : Direct Thrust Measurements and Beam Diagnostics on the Ion Thruster ESKA 18-P, AIAA Paper 72-433, 1972
- 5) Bruce Banks, et al. : Direct Thrust Measurement of a 30-cm Ion Thruster, AIAA Paper 75-340, 1975
- 6) Azuma, H, et al. : Direct Thrust Measurement on 5 Centimeter Diameter Mercury Ion thruster with a Torsion Type Thrust Balance, AIAA/DGLR IEPC Paper 78-700, 1978