

# 宇宙推進機用スラストスタンドについて

○各務聡 (宮崎大・工)

## Abstract

This paper deals with various type thrust stand, a thrust evaluation device for space propulsion device. Pendulum-type thrust stands have been utilized because of simplicity and accuracy. On the other hand, if thrusters tested in the thrust stand yields diverse thrust levels, mechanical parts such as springs and dampers should be exchanged in order to suppress oscillation and overshoot, which are induced by rapid change in thrust and result in accuracy deterioration. Some research groups prototyped the other type thrust stand: null balance type. A controller adjusts an actuator in accordance with pendulum displacement to settle the pendulum at a target point. The method requires no mechanical damper because the actuator with controller suppresses the unnecessary oscillation induced by rapid variation in thrust. Parameters corresponding to spring and damper constants are flexibly adjustable, and resultantly the null-balance thrust stand can measure wide range thrust only by adjusting controller settings. The paper describes the properties of three types of thrust stand: pendulum-type, and null-balance type, and null-balance thrust stand with disturbance observer for evaluating higher-frequency time variation in thrust.

## 記号

- $c$ : スラストスタンドの減衰係数,  $\text{Nm rad}^{-1}$   
 $F_0$ : 制御用ソレノイドアクチュエータの推力電流比,  $\text{N A}^{-1}$   
 $i$ : 制御用ソレノイドアクチュエータ駆動電流,  $\text{A}$   
 $I_m$ : スラストスタンドの慣性モーメント,  $\text{kgm}^2$   
 $k$ : スラストスタンドの弾性係数,  $\text{Nm rad}^{-1}$   
 $l_d$ : スラストスタンドの振り子の支点から変位センサまでの長さ  
 $l_s$ : スラストスタンドの振り子の支点から制御用ソレノイドアクチュエータまでの長さ  
 $l_t$ : スラストスタンドの振り子の支点から推進機までの長さ  
 $T$ : 推力,  $\text{N}$   
 $T_{\text{acc}}$ : 加速度から算出した推力,  $\text{N}$   
 $T_{\text{cur}}$ : 電流値*i*から算出した推力 (零位法から算出した推力),  $\text{N}$   
 $T_{\text{des}}$ : 提案する方法で算出した推力,  $\text{N}$   
 $T_{\text{ref}}$ : 校正装置による参照推力,  $\text{N}$   
 $x$ : 変位センサが測定する振り子の変位  
 $\Delta$ : 振幅  
 $\theta$ : スラストスタンドの振り子の振れ角度,  $\text{rad}$   
 $\xi$ : 減衰比  
 $\omega_n$ : 固有振動数,  $\text{rad/s}$

## 1. はじめに

宇宙機用に搭載する推進機は、化学推進から電気推進に至るまで多岐にわたり、その推力は $\mu\text{N}$ から  $500 \text{ N}$  と広く重量や推力重量比も推進機により大きく異なっている。このような宇宙機用推進機の性能評価には、推力測定装置 (スラストスタ

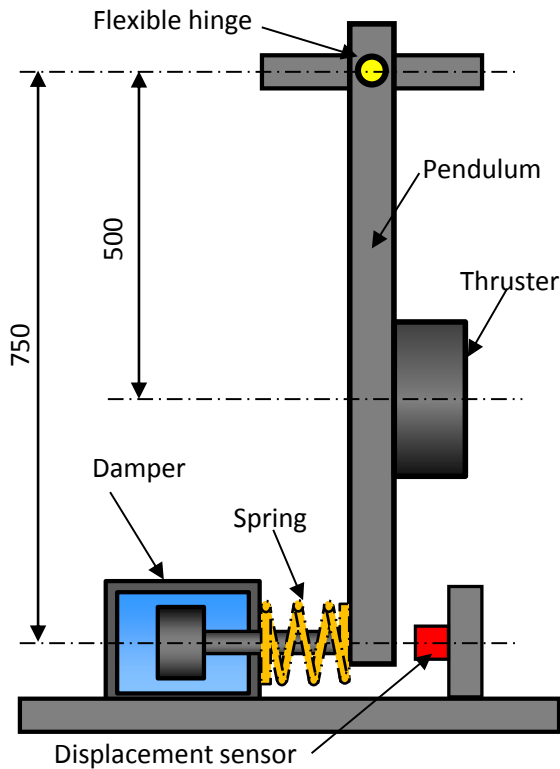
ンド) が用いられてきた。振り子型が一般的には多用され、外力と振り子の変位が比例することを利用している。構造が簡単で原理も明快であることから多くの推進機の推力測定に供せられてきた<sup>1-3)</sup>。

振り子型以外にも零位法が適用された例がある<sup>4-8)</sup>。零位法とは、先述の振り子型に定置制御を利用したもので、推力による振り子の変位をセンサにより検出し、アクチュエータの制御量を調整して、変位が  $0$  となるようにする方式である。推力をアクチュエータの制御量を以て評価している。このように推力測定法も多彩であり多くの研究が進められてきた。

今回、 $0.3 \text{ N}$  級のホールスラスト ( $5 \text{ kW}$  級、重量  $15 \text{ kg}$ ) を内径  $1 \text{ m}$  の真空容器で推力測定を行うことを想定し推力測定方法を検討する。また、ホールスラストのような定常作動型の推進機の高い周波数変動や作動開始時の推力変化だけでなく、準定常作動の推進機の推力を計測するために、外乱オブザーバを適用することにより高い周波数変動も評価するスラストスタンドの研究を行って来たことからこれについても検討する<sup>9-11)</sup>。

## 2. 振り子型スラストスタンド

**2.1 原理** 第 1 図に振り子型スラストスタンドを示す。本図は垂直振り子であるが、重力による感度低下を避けるために水平振り子にしたものもある<sup>1)</sup>。水平、垂直振り子にかかわらず、バネ-マス-ダッシュポット系であることから回転方向の運動方程式は<sup>12)</sup>、



第1図 振り子型スラストスタンド

$$I_m \ddot{\theta} + c\dot{\theta} + k\theta = l_t T \quad (1)$$

$$x = l_d T \quad (2)$$

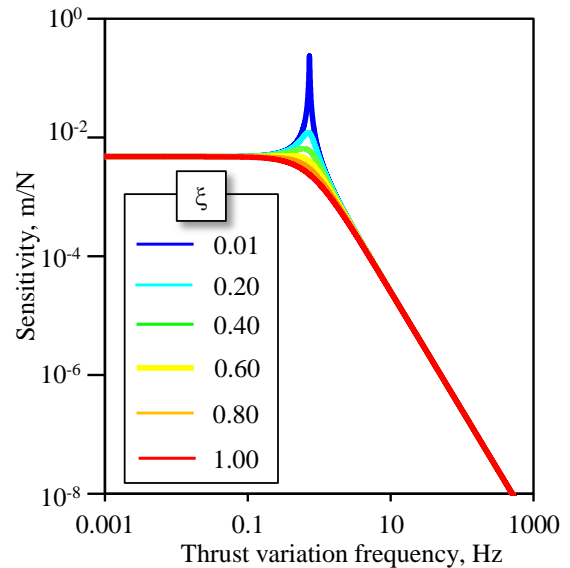
となる。なお、 $k$ には重力と flexible hinge による復元力の和である。ここで、一般化のために第 1 式を变形すると

$$\ddot{\theta} + 2\xi\omega_n\dot{\theta} + \omega_n^2\theta = \frac{l_t}{I_m}T \quad (3)$$

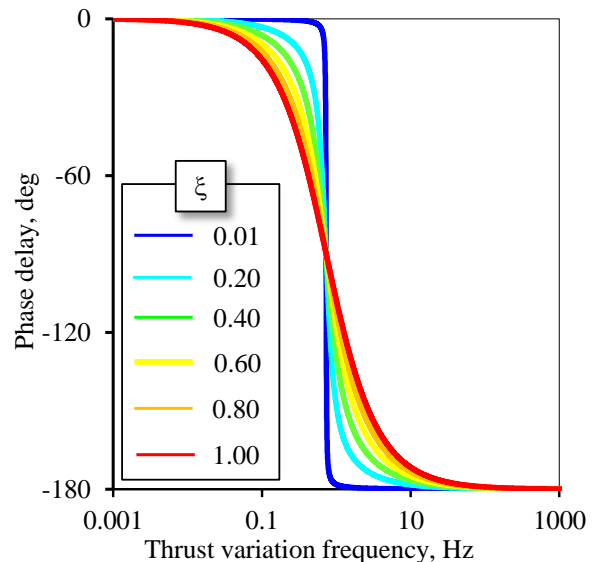
を得る。

**2.2 重力振り子の時** はじめに、ばね要素がない重力振り子に着目し、第 3 式を Scilab<sup>13)</sup>で解析する。第 2, 3 図は、解析により得られた周波数特性であり、共振点が 2.6 Hz にあることが分かる。このときの振り子の変位の応答は第 4 図のようになる。これは、時刻  $t=0$  秒において 0.3 N の推力がステップ関数状に生成した時を想定している。減衰比  $\xi$  が小さいと、推力の立ち上がりのために振り子がオーバーシュートするばかりか、推力が一定になった後も変位が収束せず推力測定が困難である。

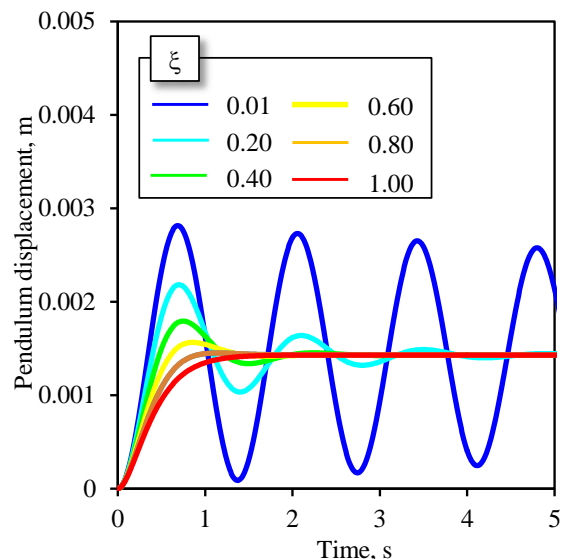
一方で、減衰比  $\xi$  を大きくしすぎると、 $\xi = 1.0$  の時のように応答性が著しく低下する。以上より、減衰比  $\xi$  は、誤差と応答性を勘案して適切に定めダンパを調整する必要がある。なお、10%の誤差

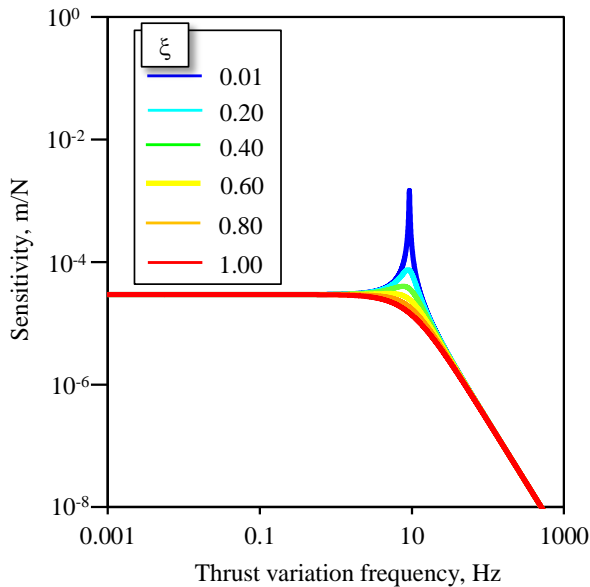


第2図 重力振り子の時の感度の周波数特性。



第3図 重力振り子の時の感度の周波数特性（位相遅れ）。


 第4図 重力振り子に 0.3N のステップ状推力を時刻  $t=0$  秒で与えたとき。



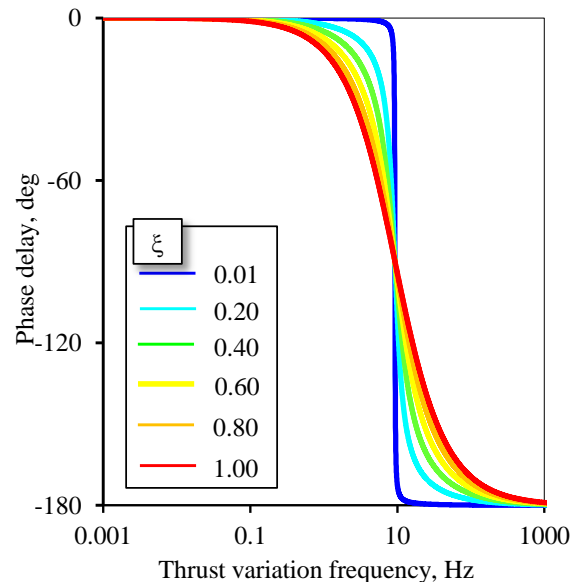
第5図 弾性振り子の感度の周波数特性.

を許すならば、応答性と精度を両立するには減衰比 $\xi$ は0.6~0.7程度にする必要がある。

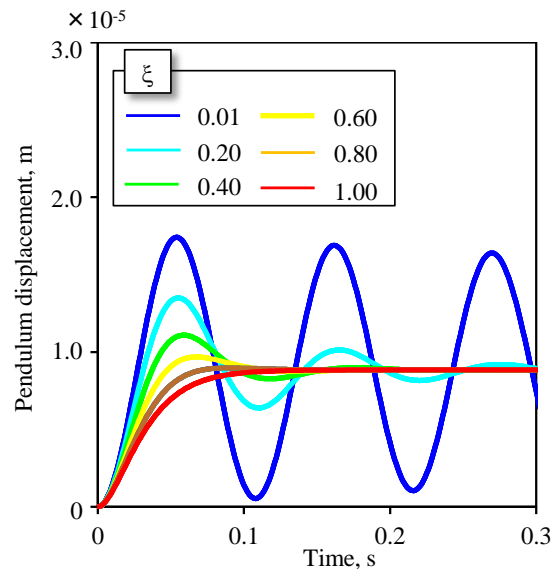
感度は $4.8 \times 10^{-3} \text{ m/N}$ となり、0.3 Nの推力に対して変位は1.4 mmとなる。必要な分解能を0.03 Nとすると変位センサには0.14 mmの分解能が必要となる。この程度の変位の分解能であれば、比較的廉価な差動トランス (LVDT) やレーザ変位計を適用することが可能となる。また、減衰比0.6を得るのに必要な減衰係数 $c$ は、 $10.3 \text{ Nm}^{-1}\text{s}$ であり、ピストンシリンダ型のオイルダンパならば比較的製作しやすい。なお、その設計方法は文献 14 に詳述されている。

一方で、固有振動数が2.6 Hzであり、第4図のように、推力が発生してから誤差10%以内に収まるまでに約1秒を要している。よって、準定常作動の推進機の推力測定に不向きである。そこで、第2.3節では、ばね用いて力学系の固有振動数を高くし応答性を向上する。

**2.3 ばねの追加による周波数特性の向上** 周波数特性と応答性の向上のためにスラストスタンドに25000 N/mのコイルばねをダンパと同じ位置に加えたとする。このときの周波数特性とステップ状推力(0.3 N)に対する振り子の変位の応答性を第5~7図に示す。周波数特性に着目すると、誤差10%となる周波数は10.4 Hzにまで向上している。また、減衰比 $\xi = 0.6$ の時の振り子の変位の応答に着目すると、ステップ状の推力を時刻 $t=0$ 秒に与えてから0.07秒後に振り子の振動が収束している。このことから、周波数特性と応答性の向上にはばねの高剛性化が必要であることが分かる。



第6図 弾性振り子の時の感度の周波数特性 (位相遅れ)。

第7図 弾性振り子に0.3Nのステップ状推力を時刻 $t=0$ 秒で与えたとき。

一方で、周波数特性の向上は、感度や変位測定、ダンパ設計に影響を与える。第5図より、感度は、ばねを加えることにより $4.8 \times 10^{-3} \text{ m/N}$ から $3.0 \times 10^{-5} \text{ m/N}$ にまで低下した。これにより0.03 Nの分解能を得るためには、 $0.89 \mu\text{m}$ の分解能を有する高精度の変位センサを要する。

また、減衰比 $\xi = 0.6$ を得るためには、ダンパの減衰係数 $c$ を $131 \text{ Nm}^{-1}\text{s}$ にまで増加させる必要がある。これは、ばね要素用いない重力振り子の場合に比して10倍以上高く製作には困難を伴う。

### 3. 零位法

零位法(null balance method)は、第8図のような振り子の変位を0にするようにアクチュエータが制御力を与え、アクチュエータの制御量により力

や加速度を評価する方法である。すなわち、天秤の原理そのものであり、重量測定にも供されている。推力測定においても零位法を適用した例があるが<sup>4-8)</sup>、その特徴として以下が挙げられる。

- 制御器を適切に設計することによりアクチュエータにダンパの役割を果たさせることができ、メカニカルダンパが不要となる。
- 制御器の調整によりスラストスタンドの特性を変化させられるため、推力レベルや周波数特性を柔軟に調整可能である。先述の振り子型ではばね要素とダンパを交換する必要があるが、零位法では不要となる。
- 変位を以て推力を評価しないため、線形性のない廉価な微小変位センサを適用可能である。一方、電流や電圧センサは低価格でありながら精度と応答性に優れる。

ここで、零位法の原理を力学的に考えると、運動方程式は、**第1式**の運動方程式にアクチュエータによる推力が加えられたものとなる。

$$I_m \ddot{\theta} + c \dot{\theta} + k \theta = l_t T + l_s F_0(\theta, i) \quad (4)$$

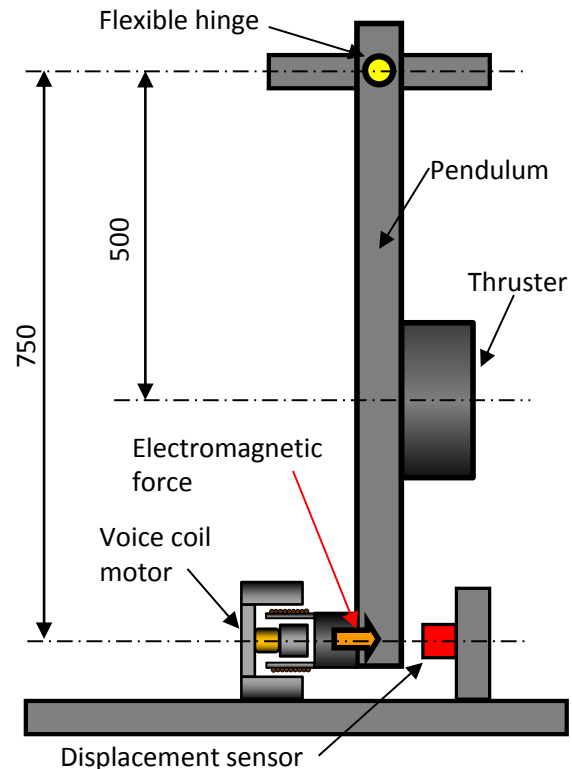
$$i = k_p \theta + k_d \dot{\theta} + k_i \int \theta dt \quad (5)$$

ここで、 $\theta = 0$  を目標変位とし、定置制御にPID制御(proportional integral derivative control)を適用する。このとき、比例ゲイン $k_p$ 、微分定数 $k_d$ 、積分定数 $k_i$ を適切に与えることにより、 $\theta \sim 0$  となり**第4式**の左辺が0となる。また、一般にアクチュエータの推力は、変位と制御量(電流、電圧)に依存するが、今回は変位が0になるようにしているため、 $F_0(\theta, i) = F_0 i$  ( $F_0$ は一定値)とできる。今回はソレノイドアクチュエータを利用すると考えると、

$$T = -\frac{l_s F_0}{l_t} i \quad (6)$$

を得る。このように、推力をソレノイド駆動電流 $i$ により評価することが可能となる。詳しくは**第4節**で詳述するが、零位法が優れた精度と線形性を有している。

一方で、零位法も測定可能周波数に限界がある。推力の変動周波数が低ければ振り子の変位を0にできるが、変位測定の分解能の限界や、振り子の力学的特性と制御系の特性のために、零位法の感度が推力の変動周波数により変化する。これまでの研究の結果、測定可能周波数は10 Hz程度であった<sup>9)</sup>。なお、零位法の周波数特性については、**第4節**にて外乱オブザーバを適用した零位法の改



第8図 零位法を適用したスラストスタンド

良とともに詳述する。

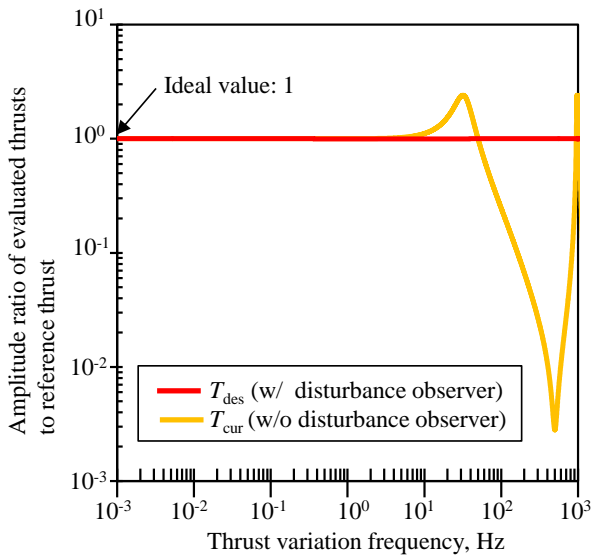
#### 4. 外乱オブザーバを用いた改良型零位法

**4.1 原理** 本方式においても運動方程式とPID制御は**第4,5式**でそれぞれ表わされる。先述の零位法では、制御により完全に $\theta$ 、 $\dot{\theta}$ 、 $\ddot{\theta}$ を無視できるとしたが、実際には完全に0とみなすことができない。そこで、高階数の微分ほど周波数の影響が出やすいことに着目して、 $c\dot{\theta} + k\theta$ のみを無視できるとする。すると**第4式**より、

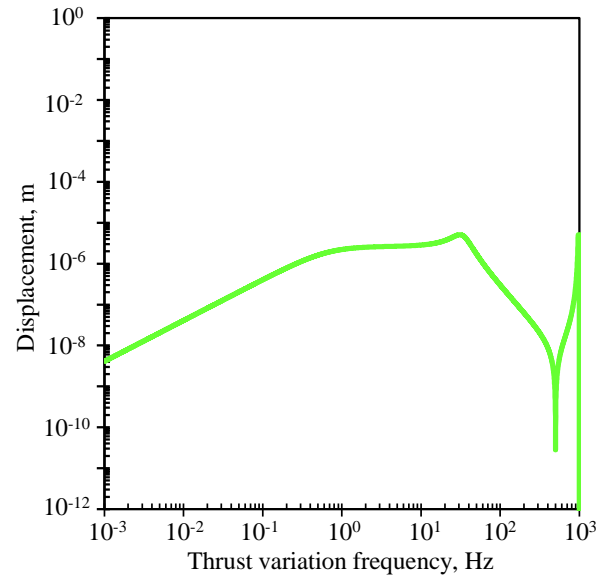
$$T = \frac{I_m}{l_t} \ddot{\theta} - \frac{l_s F_0}{l_t} i \quad (7)$$

を得る。すなわち、推力 $T$ は、制御用ソレノイドアクチュエータの駆動電流 $i$ と角加速度 $\ddot{\theta}$ を計測することにより評価できる。なお、これは、現代制御理論の外乱オブザーバに相当する<sup>15)</sup>。

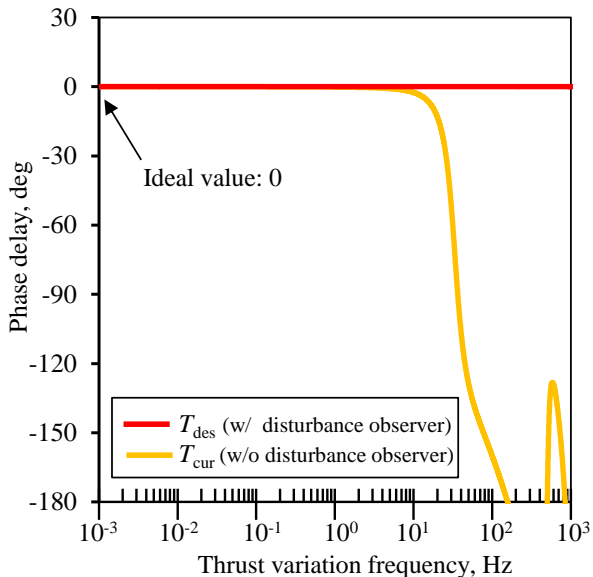
**4.2 解析結果** 第9,10図は、第8図で示した振り子型スラストスタンドにアクチュエータと変位センサや加速度系を含む制御系を設置した場合の周波数特性である。図のように、零位法により評価した推力 $T_{\text{cur}}$ は30 Hzの共振点を有し、10%の誤差を許したときに9.3Hzが限界であるが、外乱オブザーバと電流計測を併用した零位法 $T_{\text{des}}$ では、理論的には1000 Hz以上まで測定できることが分かる。ただし、このモデルは剛体振り子を想



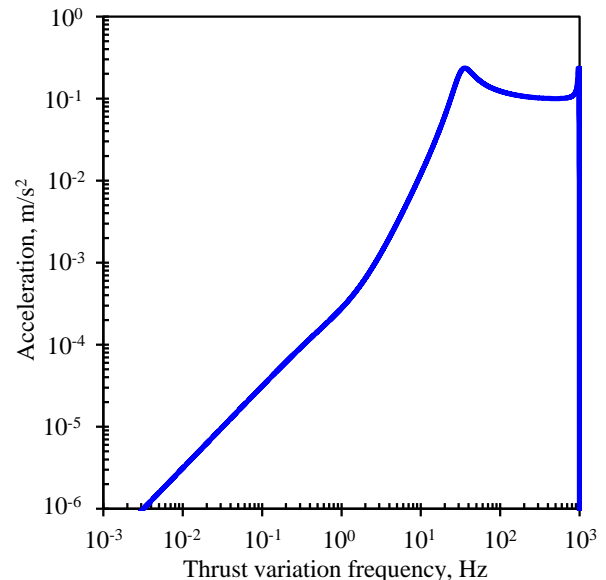
第 9 図 零位法および外乱オブザーバを適用した零位法の周波数特性。



第 11 図 零位法を用いたスラストスタンドの変位の周波数特性。外乱オブザーバの有無にかかわらず同じ結果になる。



第 10 図 零位法および外乱オブザーバを適用した零位法の周波数特性 (位相の遅れ)。



第 12 図 零位法を用いたスラストスタンドの加速度の周波数特性。

定しているが、実際には部材が弾性振動を誘起するため、数百 Hz 程度が限界である<sup>9)</sup>。

このときの振り子の変位と加速度を第 11, 12 図に示す。1 Hz 未満の領域において変位が小さくなっているが、これは PID 制御の積分のためである。一般に、PID 制御の積分要素は低周波数領域の振動を抑制するためである。逆に、共振点付近では変位が大きくなっているものの 10  $\mu\text{m}$  程度で抑えられている。

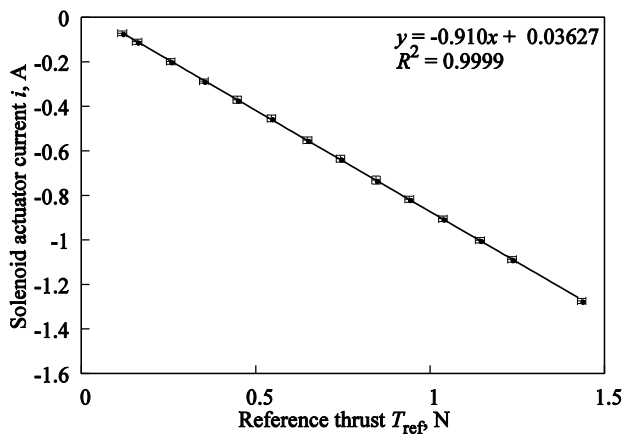
加速度も周波数が低くなるほど小さくなっているが、9.3 Hz 程度までは、零位法すなわちソレノイド駆動電流により推力を評価できるため、0 ~ 9 Hz の加速度を測定する必要がない。そのため、9 Hz 以上の加速度計測が必要となる。9 Hz の時の加速度は、推力 1 N あたり  $1.0 \times 10^{-2} \text{ m/s}^2$  であるた

め、0.03 N の分解能を得るためには、分解能が  $10^{-4} \text{ m/s}^2$  の加速度計が必要とある。この程度の加速度であれば、圧電型やサーボ型加速度センサにより計測することが可能であるため、推力重量比が小さい電気推進機にも本方式は適用可能であると言える。

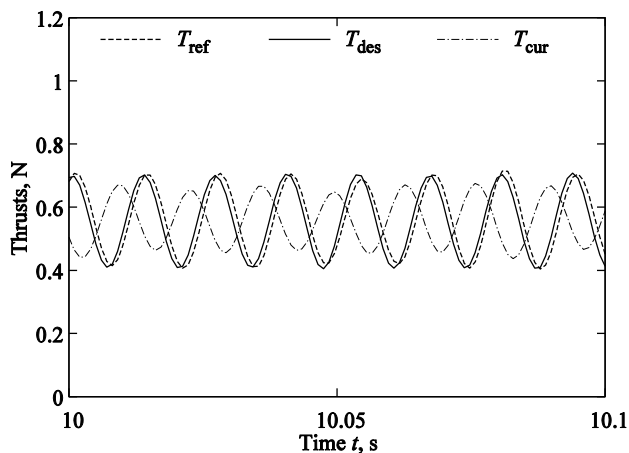
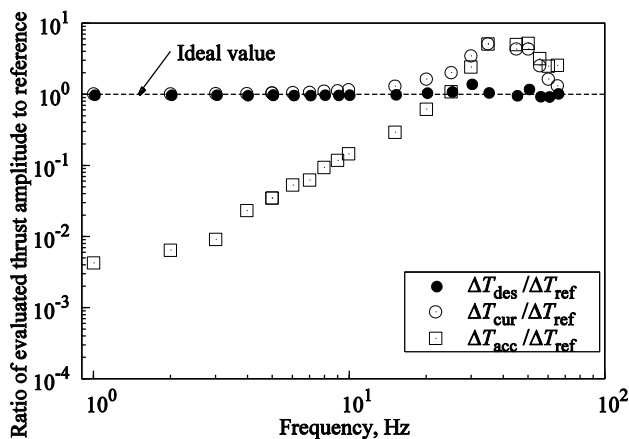
**4.3 実験結果例** 1 N の推力測定のために行った実験結果を第 13 図に示す。これは、一定の推力を与えたときの零位法と外乱オブザーバにより改良した零位法の応答である。図のように、参照推力と出力は極めて優れた線形性を有していると言える。

第 14 図は、75 Hz で変動する参照推力を与えたときの推力測定結果である。従来の零位法では、





第 13 図 零位法を用いたスラストスタンドの校正結果

第 14 図 外乱オブザーバを用いた零位法を適用したスラストスタンドによる測定結果. オフセット付き正弦波 (周波数 75 Hz, オフセット推力 0.55 N, 振幅 0.13 N) を供したときの  $T$ ,  $T_{des}$ ,  $T_{cur}$  の時間履歴.

第 15 図 外乱オブザーバを用いた零位法を適用したスラストスタンドの感度特性. 理想値は 1.0.

$T_{cur}$  で示すように参照推力  $T_{ref}$  に全く追従できていないが、外乱オブザーバを併用する方式では  $T_{des}$  のように参照推力  $T_{ref}$  に追従していることが分かる。また、周波数特性に着目すると、第 15 図のように零位法では、30Hz に共振点を有しているが、提案する方法では、共振点を越えた 75 Hz までの推力を測定できている。以上のように実験

的にも解析的にも外乱オブザーバを利用した零位法の改良は有効であることが示されたと言える。今後は、電気推進機のような推力重量比が小さい推進機に関しても、解析のみならず実験的に有効性を示す必要があると考える。

## 5. 今後の推力測定についての考察

以上のように代表的な推力測定法や外乱オブザーバを用いた零位法の改良について検討してきた。ここで、実験設備等の現状を考え、スラストスタンドに求められる特性を検討する。

- 真空容器は高価であるため複数の推進機で共用することとなる。交換や調整の労力と時間とに鑑みて、スラストスタンドを交換することなく、一台で多くの推進機に対応することが望ましい。
- 部品は簡素でその点数を減らすことにより堅牢であること。
- 準定常の推進機の推力評価だけでなく、推進機の推力変動や作動開始時の推力変化を評価すること。

よって、スラストスタンドには以下の特性を有することが望ましいと考えられる。

- 広範な推力レベルへの対応。
- ダンパなどの機械要素を最小限にする。
- 部品交換を不要とし、調整が容易である。
- スラストスタンドのパラメータ調整を自動化し、可能ならば自己最適化を実現し得ること。
- 高い周波数の推力変動測定。

この実現には、従来の振り子型ではなく、零位法がふさわしいと言える。また、準定常の推進機の性能評価や定常型推進機の推力変動を評価するためには、外乱オブザーバを併用して高周波数に対応するのが適切である。

また、制御系の調整には知識と経験を要するため、ゆくゆくは自己最適化を実現する必要となろう。その点、零位法と外乱オブザーバを用いた改良法は、アクチュエータにより敢えて外乱を供することにより自身の力学的パラメータ（慣性モーメントなど）を同定しうるため、制御系の自己最適化に対する適合性を有している。以上のように、零位法の推力変動測定への適用の研究の方向性として、

- 1) 外乱オブザーバによる高周波数の計測の実現
- 2) 実験装置の稼働率向上に資する自己最適化があると考えている。

## 6. まとめ

推力測定法を検討するために、0.3 N 級のホールスラストを用いてケーススタディーを行った。本内容を以下に箇条書きにて記す。

1. 重力振り子を用いた場合は、ばね定数が小さいため弱いダンパを用いることが可能で感度も高い。一方で固有振動数が低く、高い周波数で変動する推力の測定や推力の立ち上がり測定することは出来ない。
2. ばねを追加することにより、10 Hz 程度の推力変動を計測でき、推力の立ち上がりも 0.07 秒にまで短縮できる。一方で、感度は、大きく低下し、強いダンパを使用する必要が生じる。
3. 零位法を用いることにより、ダンパを用いない推力測定が可能となる、また、推進機を換えても、制御器のパラメータの変更のみで対応可能であり、部品交換や調整の手間が省ける。
4. 大型のホールスラストのような重量が思いものでも、零位法を利用して推力を測定することは可能である。ただし、測定可能な周波数は、10 Hz 程度である。
5. 外乱オブザーバを用いた零位法により、測定可能周波数を極めて高くできる。理論的には、1000 Hz も可能であるが、実際には部材の弾性振動のため数百 Hz が限界である。

## 参考文献

- 1) 小泉宏之, 各務聡, 小紫公也, 荒川義博: [低電力電気推進用微小推力測定スタンド](#), 日本航空宇宙学会論文集, **51** (2003), pp. 270-275.
- 2) Stark, K W., Dennis, T., McHngh, D. and Will T.: [DESIGN AND DEVELOPMENT OF A MICROPOUND EXTENDED, RANGE THRUST STAND \(MERTS\)](#), NASA Technical Note, NASA TN D-7029, 1972.
- 3) Haag, T W.: [PPT thrust stand](#), NASA Technical Memorandum, NASA-TM-107066, 1995.
- 4) Kakami, A., Hiyamizu, R., Masaki, S., Tachibana, T: [A Preliminary Study on an Active-controlled Thrust Stand for Thrust Variation Measurement](#), Selected paper of 25th International Symposium on Space Technology and Science, ISTS2006-b-19 (2006), pp. 212-217.
- 5) Nagao, N., Yokota, S., Komurasaki, K. and Arakawa, Y.: [Development of a two-dimensional dual pendulum thrust stand for Hall thrusters](#), Review of Scientific Instruments, **76** (2007), 115108.
- 6) Orioux, S., Rossi, C. and Este`ve, D.: [Thrust stand for ground tests of solid propellant microthrusters](#), Review of Scientific Instruments, **73**(2002), pp. 2694-2698.
- 7) Rocca, S.: [ONERA micronewton thrust balance: Analytical modelling and parametric analysis](#), Aerospace Science and Technology, **15** (2011), pp. 148-154.
- 8) Xu, G. K., and Walker, L. R. M.: [High-power, null-type, inverted pendulum thrust stand](#), Review of Scientific Instruments, **80** (2009), pp. 055103-1 055103-6
- 9) 各務聡, 橘武史: [外乱オブザーバと定置制御とを併用した広帯域の推力測定](#), 日本航空宇宙学会論文集, Vol. 60, No. 5, pp. 203-211, 2012 年 10 月.
- 10) Akira Kakami and Takeshi Tachibana: [Thrust Evaluation in Wide Frequency Range using Active Control and Disturbance Observer](#), Journal of Propulsion and Power, Vol. 29, Issue 6, pp. 1274-1281, DOI: 10.2514/1.B34849, November 2013.
- 11) 各務聡, 橘武史: [高い周波数の推力変動評価に資する加速度計測と定置制御を適用したスラストスタンド](#), 平成 23 年度宇宙輸送シンポジウム, STCP-2011-027, 2012 年 1 月 19-20 日.
- 12) 近藤恭平: 工学基礎 振動論, 培風館, 1993.
- 13) Scilab: <http://www.scilab.org>
- 14) 社団法人日本機械学会編: 振動のダンピング技術, 第 1 版, 養賢堂, 1998 年.
- 15) 土谷武士, 江上正: 新版 現代制御工学, 産業図書, 2005 年.