

スラストスタンドの簡易較正法

A Simple Calibration Procedure for Thrust Stand Measurement

中野 正勝¹⁾, 各務 聡²⁾

Masakatsu Nakano¹⁾ and Akira Kakami²⁾

Abstract: A simple calibration procedure for the impulse measurement using a thrust stand is presented. In this procedure, the oscillation periods with and without the additional weight of known inertia of momentum are measured to determine the inertia of momentum of the thrust stand arm. Once the inertia of momentum is obtained, the impulse applied to the thrust stand can be calculated from the displacement of the thrust stand arm. A comparison of this simple calibration procedure to the one using a force transducer was conducted. The simple procedure provides fair results and reduces time-consuming calibration processes.

Keywords : Simple calibration procedure, Impulse measurement, Thrust stand

1. 緒言

パルス型プラズマスラストや BKNO_3 を用いた固体推進器などのパルスの作動するスラストのインパルス（力積）計測には振り子式のスラストスタンドを用いることが多いが¹⁾、スラストの取り付け位置や作動に必要なケーブル類やセンサー等により、測定ごとにスラストスタンドのアームの慣性モーメントなどの特性が変わる。そのため高精度な測定のためには、測定ごとの較正作業が必要になるが、その作業は煩雑であり時間がかかる。

インパルスとスラストスタンドのアームの変位の関係を取得する一つの手段として、スラストスタンドのアームの慣性モーメントを用いない力変換器を用いた手法があり、多くの測定で用いられている。この手法はインパクトハンマーによりスラストスタンドのアームに固定された力変換器を叩くことでアームに変位を与えるもので、力変換器の力出力を時間積分することでインパルスを取得できるので、インパルスと変位間の較正直線を得ることができる。ただし、運動量保存則によりインパクトハンマーからの力積はアームに伝わるが、インパクトハンマーを力変換器のセンサー入力部に正確に衝突させなければ正確な力履歴が得られないなど、測定に注意が必要であるとともに、力変換器の出力からインパルスを求める際の積分作業が煩雑である。また、力変換器で用いる圧電型ロードセルの電圧感度には $\pm 15\%$ 程度の誤差がある。

力変換器による従来の較正手段を補うべく、簡易かつ高精度が見込まれる計測手段が必要である。そこでスラストスタンドによるインパルス計測法の基本に立ち返り、スラストスタンドのアームの慣性モーメントを簡易的に求めることでインパルス測定を行う手段を構築した。ただし、慣性モーメントを求めるために煩雑な計算を行うことは避

け、慣性モーメントが事前に確定している錘をスラストスタンドのアームに追加し、振動周期の違いから慣性モーメントを算出することとした。

本稿では、この簡易的な測定法について述べ、従来までの力変換器を用いたインパルス計測に対する精度の違いを明らかにすることで、この手法の適用性について検討を行った。

2. スラストスタンド測定

2.1 測定原理

インパルスの計測には様々な手段があるが、図 1 に示すスラストスタンドを用いた手法が小型スラストのインパルスの計測装置として実績がある³⁾。

このスラストスタンドには、変位角 $\theta(t)$ に比例してトルクが発生する振り子ばねが中心に配置されており、その運動方程式は、スラストスタンドの慣性モーメントを J 、粘性係数を c 、ばね定数を k とし、推力 $F(t)$ の発生箇所を中心軸から l_f の場所として

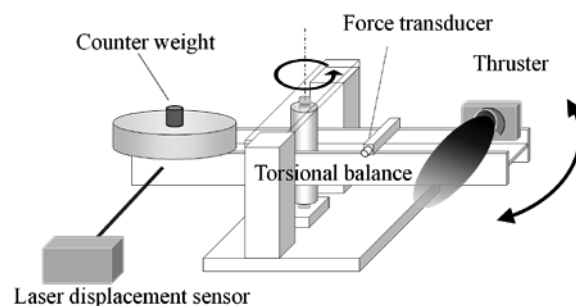


図 1 スラストスタンドによるインパルス測定。

1) 東京都立産業技術高等専門学校 ものづくり工学科 航空宇宙工学コース

2) 宮崎大学 工学部 機械設計システム工学科

$$J \frac{d^2\theta(t)}{dt^2} + c \frac{d\theta(t)}{dt} + k\theta(t) = F(t)l_f \quad (1)$$

と書くことができる。スラストスタンドのアームの角度変化は、レーザー変位計などの手段を用いて、測定点の水平方向の変位 $x(t)$ として計測することができる。すなわち、アームの中心から測定点までの距離を l_s とすれば変位は

$$x(t) = l_s \sin \theta(t) \approx l_s \theta(t) \quad (2)$$

と近似できる。式(1)はスラストスタンドのアームの固有角周波数と粘性係数

$$\omega_0 = \frac{2\pi}{T_0} = \sqrt{\frac{k}{J}}, \quad \mu = \frac{c}{2J} \quad (3)$$

を導入することで、次のように変位角から変位へと運動方程式を書き直せる。

$$\frac{d^2x(t)}{dt^2} + 2\mu \frac{dx(t)}{dt} + \omega_0^2 x(t) = F(t) \frac{l_f l_s}{J} \quad (4)$$

ここで、推力発生時間が τ で与えられる場合、推力をインパルス I を用いて

$$F(t) = \begin{cases} \frac{I}{\tau} & (0 \leq t \leq \tau) \\ 0 & (\tau < t) \end{cases} \quad (5)$$

とおくことができる。スラスト作動時にスラストスタンドが静止しているとする、初期条件は

$$x(0) = \dot{x}(0) = 0 \quad (6)$$

である。

予備実験から求めたスラストスタンドの減衰比は最大でも 0.04 程度であるため、測定系の粘性係数を無視して式(4)を解くと、その解は

$$x(t) = \begin{cases} \frac{Il_f l_s}{J\omega_0^2} \frac{1 - \cos \omega_0 t}{\omega_0 \tau} & (0 \leq t \leq \tau) \\ \frac{Il_f l_s}{J\omega_0^2} \frac{\sin \frac{\omega_0 \tau}{2}}{\frac{\omega_0 \tau}{2}} \sin \omega_0 \left(t - \frac{\tau}{2}\right) & (\tau < t) \end{cases} \quad (7)$$

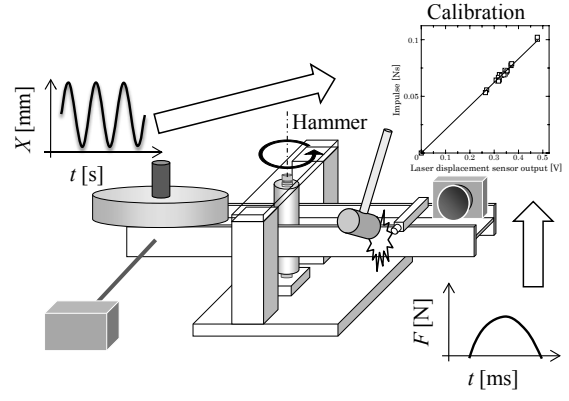
となる。 $\lim_{\tau \rightarrow 0} \sin \frac{\omega_0 \tau}{2} / \frac{\omega_0 \tau}{2} = 1$ であるので、インパルスの発生時間が十分に短ければ、式(7)から単振動の解

$$x(t) = \frac{Il_f l_s}{J\omega_0} \sin \omega_0 t \quad (8)$$

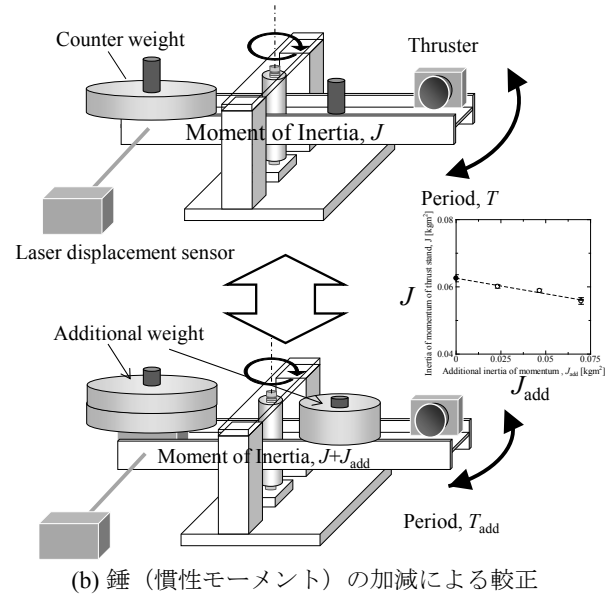
が得られ、振幅がインパルスに比例することが分かる。また、式(8)の 1 回微分である速度や 2 回微分である加速度の振幅もインパルスに比例した値となる。したがって、変位、速度、加速度の振幅のいずれかを計測することができればインパルスは評価可能である。

2.2 力変換器を用いた較正

原理的には式(8)の各パラメータを決定することで、変位、速度あるいは加速度の振幅からインパルスを求めることができるが、スラストスタンドのアームにはスラストをはじめとして様々な計測装置等が置かれるために、アームの慣性モーメントを正確に求めるのは時間のかかる作業である。そのため、既知のインパルスをアームに与え、同時に変位または加速度の振幅を取得して較正直線を作ることで、スラストスタンドのアームの慣性モーメントを用いず、イ



(a) 力変換器による較正



(b) 錘（慣性モーメント）の加減による較正

図2 インパルスと変位の較正手段

ンパルスを取得するのが一般的である⁴⁾。つまり、インパルスが変位に比例するという事実のみを用い、 I/x_{\max} または I/α_{\max} を外的に決定するもので、ここでは力変換器を用いた計測法について述べる。

今、図2の(a)のようにスラストスタンドのアームに固定された力変換器をハンマーで叩く。これによりスラストスタンドのアームに加えられた力の時間履歴を得ることができる。この力変換器の出力を時間積分したものがアームに加えられたインパルスになるので、その値を I_{cal} とし、力変換器の位置を l_{cal} 、スラストスタンドのアームの変位の振幅を A_{cal} とすると、最小自乗法を用いることで、振幅からインパルスを与える傾き

$$\frac{I_{\text{cal}}}{x_{\max}} = \frac{\sum_i A_{\text{cal},i} I_{\text{cal},i}}{\sum_i A_{\text{cal},i}^2} \quad (9)$$

が計算できる。ここで、スラスト作動時のアームの変位の振幅 A が計測されたなら、インパルスを

$$I = \frac{l_{\text{cal}}}{l_f} \times \frac{I_{\text{cal}}}{x_{\max}} \times A \quad (10)$$

で求めることができる。式(10)の評価には、力変換器とスラストの位置が必要であるが、変位センサーの位置が計測中変わりなければ、計測センサーの位置情報は必要ない。

2.3 錘（慣性モーメント）の加減による簡易手法

上述のように式(8)の慣性モーメントや固有角周波数を計算により評価することは難しいが、実験的に評価することは可能である。固有角周波数は、スラストスタンドのアームを振動させ、その周期から算出する。また、慣性モーメントは、慣性モーメントの重ね合わせを用いて評価可能である。

具体的には、錘（慣性モーメント J_1 ）を加えて測ったスラストスタンドのアーム（慣性モーメント $J+J_1$ ）の周期 T_1 を用いる（図 2(b)）。このとき、式(3)と同様な形の

$$\frac{2\pi}{T_1} = \sqrt{\frac{k}{J+J_1}} \quad (11)$$

が成立する。式(3)と上式よりねじりばね定数 k を消去すると

$$J = \frac{J_1}{\left(\frac{T_1}{T_0}\right)^2 - 1} \quad (12)$$

となり、スラストスタンドのアームの慣性モーメントは、スラストスタンド単独の周期 T_0 と錘を加えて計測した周期 T_1 の比から計算できる。慣性モーメントの加え方としては、スラストスタンド上の支持柱に円盤型の錘を追加するなど種々の方法があり、例えば、中心軸から l_1 離れた場所にリング状円盤（質量 M 、外径 a 、くり抜き内径 b ）を置いた場合、その慣性モーメントは平行軸の定理を用いて

$$J_1 = \frac{1}{2}(a^2 + b^2)M + Ml_1^2 \quad (13)$$

であり、容易に計算できる錘を用いればよい。

錘（慣性モーメント J_2 ）を追加する場合には、次の二通りの慣性モーメントの計算法がある。一通り目は、錘 2 つを同時に加えたスラストスタンドのアーム（慣性モーメント $J+J_1+J_2$ ）の周期 T_{12} を計測して、式(3)と同様な形の

$$\frac{2\pi}{T_{12}} = \sqrt{\frac{k}{J+J_1+J_2}} \quad (14)$$

が成立することを利用する。式(3)と上式からねじりばね定数 k を消去すると

$$J = \frac{J_1+J_2}{\left(\frac{T_{12}}{T_0}\right)^2 - 1} \quad (15)$$

である。二通り目は、錘 1 つ（スラストスタンドのアームの慣性モーメント $J+J_1$ ）を加えて計測した周期 T_1 と錘 2 つ（スラストスタンドのアームの慣性モーメント $J+J_1+J_2$ ）を加えて計測した周期 T_{12} を用いて、スラストスタンド単独の周期 T_0 を用いず

$$J = \frac{J_1+J_2}{\left(\frac{T_{12}}{T_1}\right)^2} - J_1 \quad (16)$$

から慣性モーメントを評価する。

したがって、インパルス計測に先立って、スラストスタンドのアームの単独の振動周期を測り、追加で錘を加えて振動周期を計測することにより、式(12)からスラストスタンドのアームの慣性モーメントを直接計算することができる。さらに追加の錘を加える場合には式(15)または式(16)も用いることができる。スラストの位置と変位センサーの位置は既知であるので、式(7)もしくは式(8)を用いてスラスト作動時の振幅測定結果からスラストのインパルスを計算することが可能である。

この計測方法による誤差であるが、追加する錘の慣性モーメントの誤差 ΔJ_1 、周期 T_0 と T_1 の測定誤差を ΔT_0 と ΔT_1 とすると、それによってもたらされるスラストスタンドのアームの慣性モーメントの誤差 ΔJ は、式(12)から誤差伝播を考えて

$$\frac{\Delta J}{J} = \frac{1}{J_1} \sqrt{\left(\frac{\Delta J_1}{J_1}\right)^2 + 4 \left(\frac{T_1}{T_0}\right)^4 \left\{ \left(\frac{\Delta T_0}{T_0}\right)^2 + \left(\frac{\Delta T_1}{T_1}\right)^2 \right\}} \quad (17)$$

と導くことができる。固有角振動数について

$$\frac{\Delta \omega_0}{\omega_0} = -\frac{1}{2} \frac{\Delta J}{J} \quad (18)$$

であるため、 $I_{\text{cal}}/x_{\text{max}}$ に与える誤差は、式(17)、(18)から

$$\frac{\Delta(I_{\text{cal}}/x_{\text{max}})}{I_{\text{cal}}/x_{\text{max}}} = \frac{1}{2} \frac{1}{J_1} \sqrt{\left(\frac{\Delta J_1}{J_1}\right)^2 + 4 \left(\frac{T_1}{T_0}\right)^4 \left\{ \left(\frac{\Delta T_0}{T_0}\right)^2 + \left(\frac{\Delta T_1}{T_1}\right)^2 \right\}} \quad (19)$$

である。一方、 T_1 と T_{12} とから求める場合には、式(16)から誤差は

$$\frac{\Delta(I_{\text{cal}}/x_{\text{max}})}{I_{\text{cal}}/x_{\text{max}}} = \frac{1}{2} \frac{J+J_1}{J_1} \frac{J+J_2}{J} \times \sqrt{\left(\frac{J-J_2}{J+J_1}\right)^2 \left(\frac{\Delta J_1}{J+J_1}\right)^2 + \left(\frac{\Delta J_2}{J+J_1}\right)^2 + 4 \left(\frac{T_{12}}{T_1}\right)^4 \left\{ \left(\frac{\Delta T_{12}}{T_{12}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta T_1}{T_1}\right)^2 \right\}} \quad (20)$$

と評価できる。なお、式(20)で一方の錘の慣性モーメントを 0 とすると、1 個の錘を用いて計算した式(19)と一致するはずであるが、実際 $J_1 \rightarrow 0$ 、 $\Delta J_1 \rightarrow 0$ 、 $T_1 \rightarrow T_0$ 、 $\Delta T_1 \rightarrow \Delta T_0$ とし $J_2 \rightarrow J_1$ 、 $T_{12} \rightarrow T_1$ 、 $\Delta T_{12} \rightarrow \Delta T_1$ と読み変えると式(19)と一致することが確認できる。

追加する錘の慣性モーメントの誤差については事前に値を決めておくことが可能であるが、周期の誤差については計測者や計測方法で実験毎に値が変わりやすい。そこで周期の計測誤差が与える影響について評価する。式(19)より周期の計測誤差の拡大率 K を次のように定義する。

$$K \equiv \frac{1}{2} \frac{J}{J_1} \sqrt{4 \left(\frac{T_1}{T_0}\right)^4} = \frac{J}{J_1} \left(\frac{T_1}{T_0}\right)^2 = \frac{J+J_1}{J_1} = \frac{J}{J_1} + 1 \quad (21)$$

T_1 と T_{12} とから求める場合には、式(20)から周期の計測誤差の拡大率は

$$K \equiv \frac{1}{2} \frac{J+J_1}{J_1} \frac{J+J_2}{J} \sqrt{4 \left(\frac{T_{12}}{T_1}\right)^4} = \frac{J+J_1}{J_1} \frac{J+J_1}{J} \frac{J+J_1+J_2}{J+J_1} = \frac{J+J_1}{J_1} \frac{J+J_1+J_2}{J} \quad (22)$$

と評価できる。

この周期の計測誤差の拡大率を追加する錘の慣性モーメント J_{add} に応じてプロットしたものが図 3 である。式(22)において簡単のため 2 つ目に追加する錘は 1 つ目と同じとした。 T_0 と T_1 とから求める式(21)では、誤差の拡大率は追加

表 1 力変換器を用いたインパルス取得. インパルスと変位の関係: $I/x_{\max} = 4.62 \pm 0.10 \text{ N}\cdot\text{s}/\text{mm}$

回数	変位 mm	インパルス N·s	I/x_{\max} N·s/mm
1	0.0213	0.0980	4.61
2	0.0188	0.0830	4.43
3	0.0220	0.0986	4.48
4	0.0235	0.110	4.70
5	0.0235	0.111	4.74
6	0.0128	0.0583	4.57
7	0.0108	0.0495	4.60
8	0.0135	0.0635	4.70
9	0.0143	0.0670	4.70
10	0.0140	0.0655	4.69

表 2 簡易較正法のための周期測定

加えた錘	周期	慣性モーメント
アームのみ	$0.8003 \pm 0.0015 \text{ s}$	求める対象
錘 1	$1.065 \pm 0.002 \text{ s}$	$J_1 = 0.04634 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$
錘 1 と 錘 2	$1.286 \pm 0.003 \text{ s}$	$J_1 = 0.04634 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ $J_2 = 0.04668 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$

する錘の慣性モーメントを大きくすることで単調に減少する. 一方, T_1 と T_{12} とから求める式(22)の場合には, 誤差の拡大率は $J_1 = J_2 = J/\sqrt{2}$ で最小値を持つ下に凸の曲線となる. なお, 2 つの曲線の交点は $J_1 = J_2 = J/2$ にあり, それより大きい追加慣性モーメントでは, 錘 1 つを追加する方が誤差の拡大率は小さくなる. したがって, スラストスタンドのアームの慣性モーメントが予想できる場合, 追加する錘の慣性モーメントが $J/2$ 以下であれば, 錘を順に加えて計測した周期 T_1, T_{12} から慣性モーメントを算出し, $J/2$ 以上であれば, 錘を 1 つ追加するのみにして T_0, T_1 を用いることで周期の計測誤差の拡大を抑制することができる.

3. 実験

追加する錘の慣性モーメントによりスラストスタンドアームの振動周期が変わることを利用した本計測手法 (簡易較正法) について, 実験により評価を行う.

3.1 評価方法

力変換器を用いた較正と簡易較正法の比較を行う. 具体的には,

- (1) 力変換器にインパクトハンマーを衝突させることによって得られる I_{cal}/x_{\max} (式(9)から計算する.)
- (2) 簡易較正法により得られる力変換器位置における

$$I_{\text{cal}}/x_{\max} \text{ (式(8)から } \frac{I\omega_0}{t_f t_s} \text{ を計算して得られる.)}$$

を求め, 振幅に対するインパルスの感度 I_{cal}/x_{\max} を比較する. また, 測定データの誤差が I_{cal}/x_{\max} に与える影響 (誤差の伝播) についても評価する.

3.2 比較条件

スラストスタンドのアームに取り付けられた力変換器にインパクトハンマーを衝突させて, アームの変位をレーザー変位計で計測し, 変位の最大値と最小値から振幅を算出した. 力変換器の設置位置はアームの回転中心から 290 mm である. 力変換器には PCB Piezotronics 社製のミニチュア

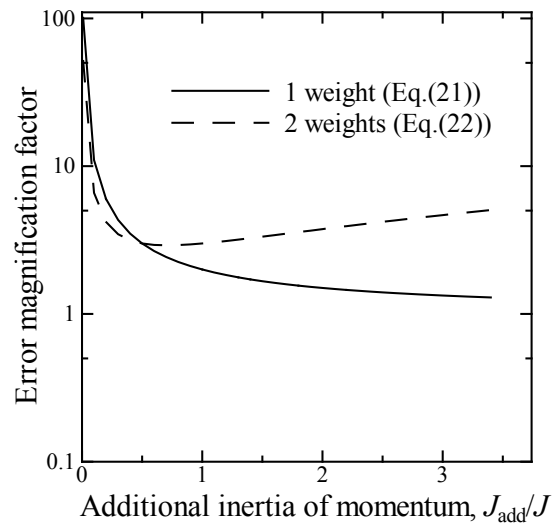


図 3 周期誤差の拡大率

ICP®ロードセル 209C01 型を用い, 480E09 型シグナルコンディショナを用いた. このセンサーの測定精度は $\pm 15\%$ である. アームの変位はキーエンス社の LK-500 を用いてアームの中心軸から 275 mm で取得した.

簡易較正法で使用した錘は, 質量 2.385 kg と 2.400 kg の円盤状の錘 (直径 173 mm, 孔径 27 mm) で, アームの中心軸から 123 mm の位置に配置した. 慣性モーメントの増加分は 1 個の錘を追加した場合には $0.04634 \pm 0.00046 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$, 2 個の錘を追加した場合には $0.09306 \pm 0.00093 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ である. 周期については 10~20 周期分の時間を測って振動回数で割って求め, 錘を追加するごとに得た 6 個の周期の標準偏差を周期の測定誤差とした. 測定値の誤差伝播が興味対象であるので, 誤差はデータのばらつきを表す標準偏差を用いている.

4 結果および考察

4.1 較正手法による違い

力変換器を用いた計測結果を表 1 に示す. インパクトハンマーによるデータ取得を 10 回行った. 振幅に対するインパルスの感度 I/x_{\max} は $4.62 \pm 0.10 \text{ N}\cdot\text{s}/\text{mm}$ であり, 10 個のデータから得られる回帰直線の R2 値は 0.9920 であった. なお, センサーの測定精度が $\pm 15\%$ あるため, それを考慮するとエラーバーは拡大し $4.62 \pm 0.81 \text{ N}\cdot\text{s}/\text{mm}$ となる.

表 2 は簡易較正法で用いた振動周期と追加した錘の慣性モーメントについてまとめたものである. この T_1, T_0 を用いて算出したスラストスタンドアームの慣性モーメントは $0.0601 \pm 0.0005 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ であり, T_2, T_0 を用いて算出した慣性モーメントは $0.0589 \pm 0.0004 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ であった. 一方, T_{12}, T_1 から算出した慣性モーメントは $0.0558 \pm 0.0010 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ であり, エラーバーの範囲が広い. これは図 3 で示されるように, 追加した錘の慣性モーメントとスラストスタンドのアームの慣性モーメントが同程度の今回の場合, 2 個の錘を組み合わせると周期の計測誤差が拡大しやすいからである.

次にスラストスタンドのアームの慣性モーメントを決定する. 錘の追加がスラストスタンドに与える影響は追加慣

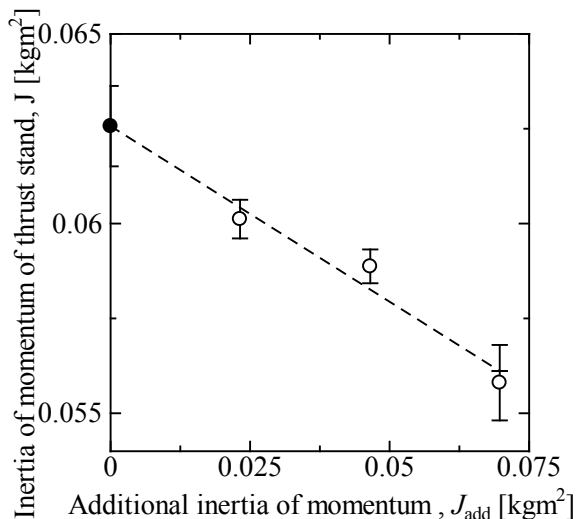


図4 外挿による慣性モーメントの算出

性モーメントが 0 で無くなるが、周期の測定誤差の拡大率は追加する錘の慣性モーメントが 0 で無限大となる。そのため図 4 のように錘の慣性モーメントを横軸にしてスラストスタンドアームの慣性モーメントを縦軸にプロットし、回帰直線の切片から求める。横軸の錘の慣性モーメントは周期の算出に用いた錘の慣性モーメントの平均とし、エラーバーは錘を追加して求めた慣性モーメントのエラーバーを回帰直線の誤差伝播式から評価した。この結果、得られたスラストスタンドのアームの慣性モーメント J は $0.06257 \pm 0.0011 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ であり、力変換器位置における I/x_{\max} は $6.160 \pm 0.093 \text{ N} \cdot \text{s}/\text{mm}$ となる。

以上、得られた結果を比較すると、簡易較正法で求めた I/x_{\max} は力変換器で得られた値よりも 3 割強大きくなり、エラーバーの範囲を含めても一致しない。力変換器を用いた計測では、ハンマーが力変換器の検出部に不完全に衝突する場合があります。その場合には力積が過小評価されるために I/x_{\max} の値が小さくなることもある。しかしながら、力変換器の測定結果を線形近似した際の R^2 値は 0.9920 でばらつきは見られなかった。また、簡易較正法ではスラストスタンドを剛体と仮定しているが、インパクトハンマーの力積がアームの剛体回転以外の成分に変換した可能性もあり、定量的な解析を進めたい。

なお、簡易較正法では、追加する錘の慣性モーメントを事前に正確に求めていることが前提になるが、錘を加えて周期を測るだけの方法であり、ミスが入りにくい。周期については、速さが最大となる振動の中心を通過する時刻を測定することで測定誤差を減らすことができる。

4.2 測定精度の差、較正のやり易さ

力変換器を用いた計測においては、力変換器そのものの精度を除いた I/x_{\max} の測定誤差は 2% 程度であった。力変換器の誤差も加えると測定誤差は 17% 程度となる。したが

って、力変換器を用いた際に測定精度を決めるのは力変換器の精度であり、測定精度向上の制約となる。

一方、スラストスタンドと同程度の追加慣性モーメントを用いることとなった今回の簡易較正法では測定誤差は 1.5% 程度であった。簡易較正法では、追加する錘の慣性モーメントの大きさにより、図 3 に示されるように周期の測定誤差の拡大率に違いがあるため、誤差拡大率が小さくなるような追加慣性モーメントの値を選ぶ必要がある。また、錘の追加によりばね定数等に少なからず影響を与えることは否めず、実際、錘を追加して求めたスラストスタンドアームの慣性モーメントは追加した錘の慣性モーメントが大きいものほど小さくなった(図 4 参照)。しかしながら、このばらつきを含めても I/x_{\max} の誤差は 1.5% 程度であるために簡易較正法は有用であろう。また、計測にかかる時間は、簡易較正法では周期の測定を追加錘の有る無し の 2 つに対して測定するのみであるのに対して、力変換器を用いた手法ではハンマーによる測定回数分だけデータを取得する必要があり、加えてインパルスを得るための積分計算作業が発生するなど、簡易較正法と比べて時間がかかった。

4. まとめ

スラストスタンドを用いたインパルス計測の較正法として、慣性モーメントが既知な錘を加減してスラストスタンドのアームの振動周期を求め、周期の比からアームの慣性モーメントを求める簡易的手法を提案した。また、誤差伝播解析から、追加する錘の慣性モーメントの設定方針についても指針を得た。この較正法は既存の力変換器を用いたものと比較して較正にかかる時間を短縮できる利点があり、測定時にミスが入る余地が少ない点で利用価値が高い。簡易較正法から得られる振幅に対するインパルスの傾きは力変換器を用いたものより 3 割程度大きく、エラーバーの範囲でも一致をしなかった。今後、この差を生んだ原因の解明を行うとともに、より詳細な簡易較正法の適用条件を明らかにしていきたい。

5. 参考文献

- [1] M. Nakano, H. Koizumi, M. Watanabe et al. : A Laser Ignition Microthruster for Microspacecraft Propulsion, Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Aerospace Technology Japan, 7-ists26, pp.Pb_7-Pb_9, 2009.
- [2] K. Koizumi, K. Komurasaki and Y. Arakawa : Development of Thrust Stand for Low Impulse Measurement from Microthrusters, Review of Scientific Instruments, 75, pp.3185-3189, 2004.
- [3] Stark, K W., Dennis, T., McHugh, D. and Williams T.: Design and Development of a Micropound Extended Range Thrust Stand (MERTS), NASA TN D-7029, 1972.
- [4] 中野正勝 : 3D プリンタを用いた小型ロケットモータの製作とスマホを使った性能取得, 東京都立産業技術高等専門学校研究紀要, 第 8 号 (2014), pp.74-78.