

MPD スラスタの推力測定における真空下での推力校正装置の開発

○須藤 孝宏 (静大, 学), 月崎 竜童 (ISAS/JAXA), 杉本 諒 (静大, 院), 山極 芳樹,
松井 信 (静大), 國中 均 (ISAS/JAXA)

1. 序論

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。これらの実用化に伴い得た結果より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。例として International Space Exploration Coordination Group (ISECG) による The Global Exploration Roadmap では、将来の有人火星探査を見据えた小惑星または月を目標とした大規模なミッションを世界中の宇宙機関が連合し、各国の技術や資源を集結して実現させるという検討が始まっている。このような世界の動きの中で、日本独自の技術を用いた推進機として大電力型の電気推進機を提案する取り組みが日本国内でも始まっている。具体的な電力の規模としては単機で数百 kW クラスのスラスタを1台または2台程度搭載するか、もしくは数十 kW クラスのスラスタをクラスター化して複数台搭載し総電力にして数百 kW クラスとなるような推進機で構成されることが見込まれる。現在、このような大電力型の電気推進機の候補としてホールスラスタ、DC アークジェット、MPD スラスタなどが挙げられている。これらの中でも特に大電力において高性能を発揮することが期待され、また機械構造が単純であることや様々な種類の推進剤を選択可能なことから将来の実用化に有力な候補とされている MPD スラスタを本研究において研究対象としている。

1.2 MPD スラスタの作動原理

MPD スラスタの作動原理を示す。これらの原理の説明は参考文献[1], [2]詳しく記載されている。図1に示される一般的な MPD スラスタは同軸形状の電極を有しその電極間の放電室から構成される。作動原理は、まず放電室内に推進剤が供給され、電極間に高電圧が印加することでアーク放電を起こすこと

で始まる。高圧絶縁破壊によるアーク放電が起こらないような電圧の場合ではイグナイタを予備点火プラグとして用いる。絶縁破壊によって流れ出した放電電流は推進剤を電離しプラズマ化させアンペールの法則により電流周りに磁場 B を誘起する。これを自己誘起磁場と呼び、このような磁場とプラズマ内に流れる放電電流により排気方向にローレンツ力が発生し推進剤が下流方向に加速・排気される。その反力によって発生する推力を電磁推力といい、電磁推力が支配的である推進原理を持つ推進機を MPD スラスタと呼ぶ。図1には MPD スラスタの放電室の典型的な電流と磁場の分布およびそれらの相互作用によって生じるローレンツ力を示す。

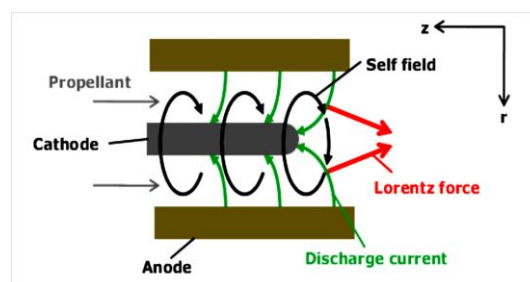


図1 MPD スラスタの作動原理

1.3 これまでの研究成果

先行研究では大電力型の電気推進機ということで実験環境の関係上定常作動ではなくパルス作動（準定常作動）で行われ、スラスタの種類は外部磁場型2次元 MPD スラスタを用いて研究が行われてきた。[3] この研究では、スラスタの設計を変更し電極間距離、放電室の排気方向長さを変化可能なものを開発し、多様なパラメータを取得した。[4]さらに、イグナイタを設置により推進材流量を絞った低流量での実験を可能とした。ところがパラメータの1つである推力の校正方法には、多くの問題点を抱えていた。

1.4 本研究の目的

投入電力数百 kW 級の規模において外部磁場型2次元 MPD スラスタの推力測定の正確性を向上させるために、先行研究での問題点を解決する必要がある。

る．問題点として較正曲線からのばらつきによる推力換算時の誤差，また較正毎に較正結果が異なる．さらに，低インパルスでの振動振幅の取得，真空中においての較正，さらに実験効率の向上などが挙げられる．これらを考慮した推力較正装置を開発することを本研究の目的とする．

2. 実験概要

2.1 実験環境概要

本節では，推力測定の実験を行う装置について述べる．実験は宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所内の設備を用いて行い，図2に示す真空チャンバ内で作動させる．実験装置の概要は図3に示す通りで，スラスタヘッドは重力振り子式スラスタスタンドに搭載され，スラスタの放電電極部と外部磁場印加用コイルへそれぞれ1ずつのパルス放電電源(PFN)が接続され，供給する電流は独立に定めることができる[4]．推進剤ガスは貯気槽に溜められており，電磁高速弁(FAV)の開閉によりパルス状で推進剤を放電室に供給できる．真空チャンバの真空度は，ロータリーポンプ，メカニカルブースターポンプ，油拡散ポンプを直列に使用することでスラスタ作動時において 10^{-3} Pa を維持することができる．

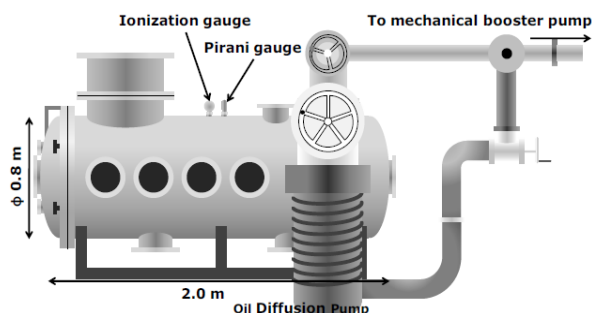


図2 真空装置概要

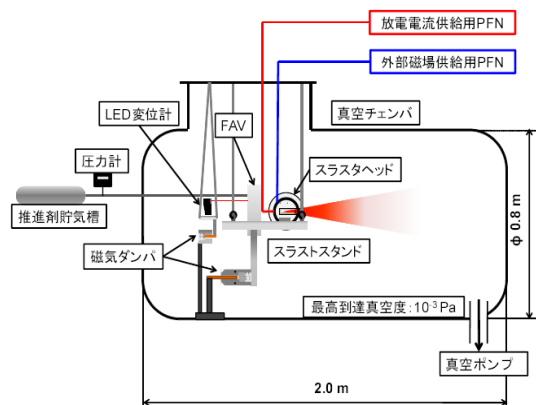


図3 実験装置概要

2.2 推力測定方法

図4に示した推力測定装置を用いて推力測定を行う．以下，推力測定の手順を説明する．スラスタの作動時の推力を直接測定することができないので，まずスラスタを重力振り子に搭載させスラスタ作動によるスタンド振り子の振動波形をLED変位計より測定する．その振幅の決定はプログラムのフィッティングを用いて振動波形から決定した．次に予めスタンドに既知のインパルスを与え振動振幅の関係を求め，その較正結果を用いてスラスタ作動時の振幅をインパルスに換算をする．さらにスラスタの作動時には推進剤の噴射によるコールドガスジェットによる推力の発生を考慮しなければならない．このコールドガスジェットとは放電を起こさずに推進剤の噴射より推力を発生させることである．そして，推力の測定は電磁加速のみで評価しなければならないためこのコールドガスジェット分を差し引かなければならない．したがってスラスタ作動時の振幅をインパルスに換算し，コールドガスジェット分を差し引いて放電時間で除したものを推力とする．

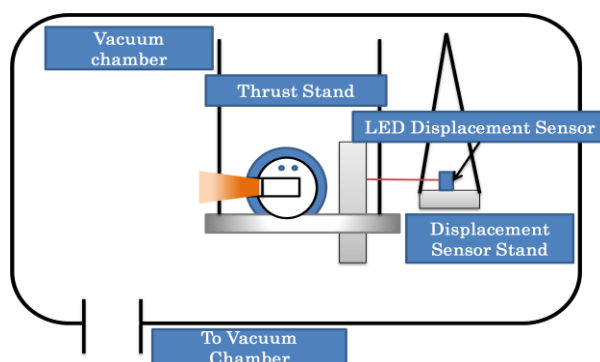


図4 推力測定の概要

3. 先行研究における較正方法

3.1 推力測定における振幅の定め方

図5に振動波形を示す．この振動波形を(1)に示した減衰振動の関数にフィッティングをし，その振幅 A をこの較正における振幅と定めている．また， B は減衰係数， ω は固有各振動数， t は時間である．

$$y = A * \exp(-Bt) \sin(\omega t) \quad (1)$$

図5において測定された生データが灰色，その移動平均のラインが黒色でプロットされている．振動波形は合成波となっており，その内訳は，スラスタの推力による振幅と放電および外部磁場コイルに流した電流より電磁干渉がおきスラスタスタンドの平衡

点がドリフトすることで生じる振幅となっている。すなわち、推力の算出には平衡点がドリフトすることで生じる振幅を差し引く必要がある。スラスタの作動時にステップ応答状の移動が起こりその移動を平衡点がドリフトとすると移動が起きた前後の差よりドリフトによる振幅を算出することができる。今回用いたプログラムフィッティングではこれらのことを考慮したものとなっており図 5 で赤色に示された線がフィッティングで算出されたライン、緑色のラインがドリフトによる振幅、青色のラインが正味のスラスタの推力による振幅であり赤色のラインから緑色のラインを差し引いたものである。これらのことから青色のラインの振幅 A が推力となる。

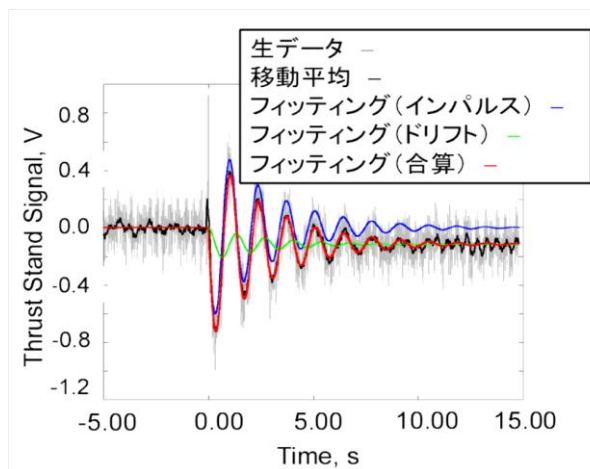


図 5 スラスタ振動による波形とフィッティング

3.2 先行研究における推力較正方法

前節で振動波形をフィッティングし推力となる振幅をインパルスに換算するために、既知のインパルスを与えた際の振動振幅を測定し振幅の較正を行う。先行研究における較正方法の概要を図 6 に示す。スタンド振幅の較正はスラスタヘッドの放電室出口にアルミ板を設置しその中心付近に鉄球を非弾性衝突させる方法を用いる。鉄球は振り子上となりアルミ板の中心付近に衝突するような鉄球を支える線の長さ、衝突時に鉄球の速度が最速となる構成となっている。また、アルミ板の衝突位置にグリスを塗布することで鉄球を非弾性衝突させる。鉄球の落下は電磁石の ON・OFF を用いて自由落下させる。この較正におけるインパルスは鉄球の重さと高さからエネルギーの保存則より衝突時の速度を求めることより求まる。そして、任意の高さからの衝突による振幅を測定する。これを鉄球の高さを変化させ複数回行うこと図 7 のようなインパルスと振幅の関係を得る。

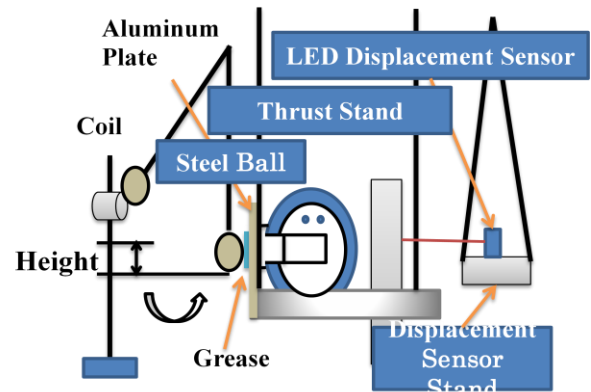


図 6 先行研究における較正方法

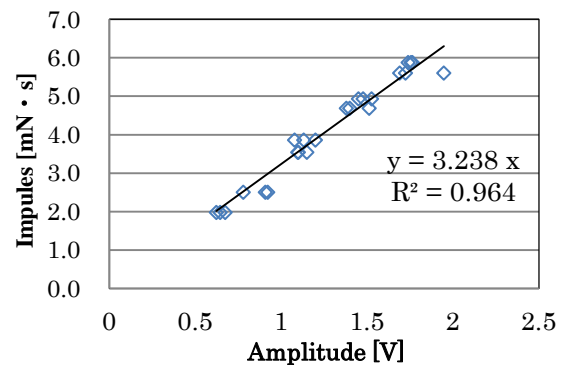


図 7 較正結果

3.3 先行研究における較正方法の問題点

先行研究より作動時間 0.5 ms で 1 N 程度の推力を得ることから、較正においても 0.5 mN · s のインパルスによる振幅の取得を行いたい。しかし、この較正方法では、対象とする領域において較正曲線からのばらつきが大きくなってしまったため、対象の電源で取得されると考えられるインパルス領域での振幅の取得を行うことができない。また、測定毎にチャンバの解放、真空を引く作業が必要になるため、スラスタ作動時の実験環境である真空下で較正を行っていない。さらに、較正結果のばらつきが大きくなるためインパルス換算時に最大 16.1% の誤差を生むなどの問題点を抱えている。

4. 本研究における推力較正方法

4.1 本研究における較正方法の概要

本研究における較正方法の概要を図 8 に示す。

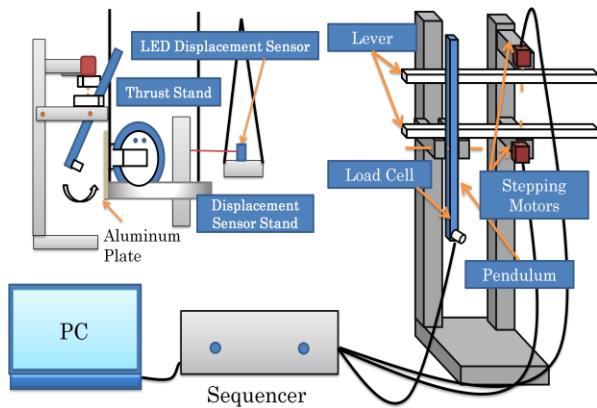


図8 本研究における較正方法の概要

本研究における較正方法は、振り子の先端に設置したロードセルをスラストの放電室出口に設置したアルミ板に衝突させることでインパルスが発生させ、そのインパルスの測定も行わせる。その際のインパルスはロードセルを介してオシロスコープに出力される。また、そのインパルスによるスラストスタンドの振動振幅はLED変位計を用いて電気信号として取得される。そして、衝突の際のロードセルの高さの位置決めはレバーの回転角によって行われる。このレバーの回転角はステッピングモータとシーケンサーにより制御されており正確な位置決めを行うことができる。また、真空環境での較正と実験効率の改善は、シーケンサーを用いたシーケンス制御により遠隔操作させることで可能としている。

実際に取得したインパルスの波形を図9に示す。縦軸は本来電圧であるが、ロードセルの仕様より荷重に変換したもので表示してある。

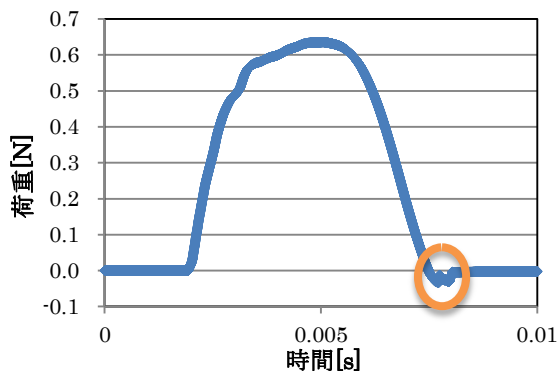


図9 本研究における較正方法でのインパルス波形

この波形を積分してインパルスとするのだが、図中の橙色の丸の部分で負の成分が生じている。この負の成分を実際を含めその部分のインパルスが正に加味する場合は+0.83%、負に加味する場合は-0.92%の較正結果の誤差となる。したがってこの程度の誤差は無視できると考えこの負の成分の積分値は加味しないこととした。

4.2 装置の製作において考慮した点

この較正装置を製作するにあたって考慮すべき点は、ロードセルがアルミ板に衝突した際に跳ね返り2度目以上の衝突を防ぐということ。また、使用する電源の作動時間に応じたインパルスによる振幅の取得を行えることである。それぞれを解決するために2回以上の衝突がおきる点では、図8の装置にレバーを2軸用意し、片方で振り子の位置決め、もう片方で衝突後の跳ね返り時にストッパーとしての役目をもたせることより解決した。図10に示すようにレバーが1軸の機構では2度目以上の衝突が起きている。それに対してレバーを2軸用意した機構では図11のように2度目以上の衝突を防ぐことができています。微小なノイズはストッパーとしての役割をもつレバーが振り子を止めた際の振動をロードセルが検知したものである。

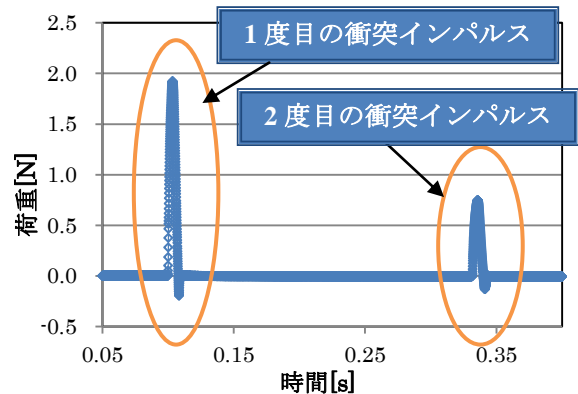


図10 レバー1軸による機構での衝突の様子

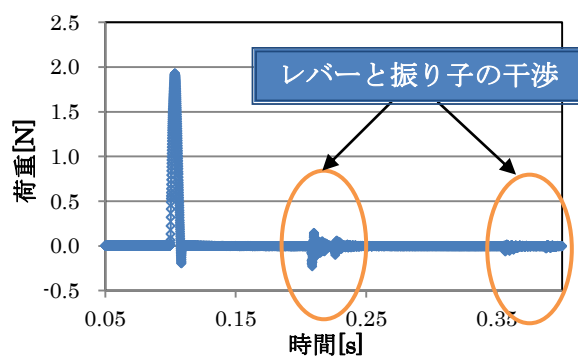


図11 レバー2軸による機構での衝突の様子

また使用電源に応じたインパルスによる振幅の取得では、振り子の長さ、重さを調節することで図12のように各電源において対応可能な装置となった。橙色の枠が0.5ms電源、赤色の枠が5ms電源に対応する領域である。以上の操作を複数回行い較正を行った。

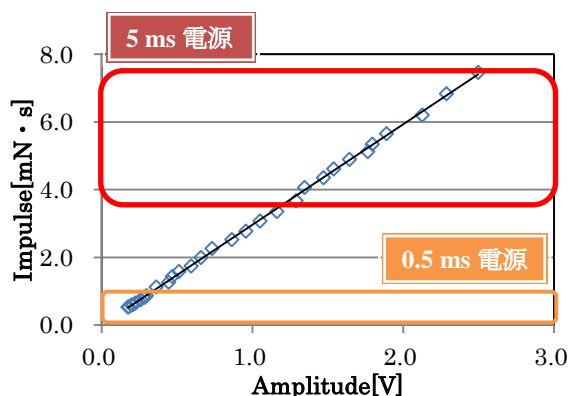


図 12 各電源において取得したい領域

5. 較正結果

5.1 各較正方法の較正結果の比較（大気中）

本研究における較正方法の較正結果と先行研究における較正方法の較正結果の比較を図 13 に示す。この結果は大気中において行われたものであり、較正の度に結果が異なっては以前の較正方法と変化がないので正確性の有無の確認のために 3 回較正を行った。その際の較正係数とばらつきをあらわす相関関数を表 1 に示す。

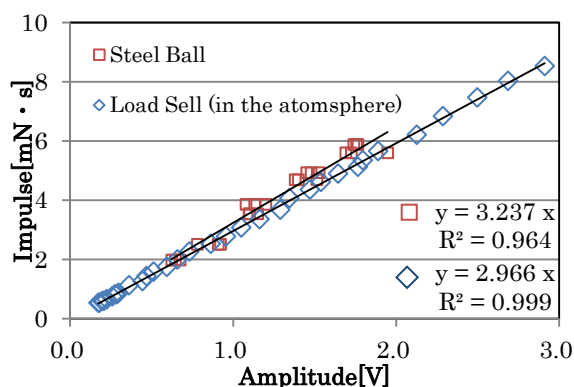


図 13 各較正結果の比較

表 1 較正毎の較正係数と相関関数

回数	1	2	3
較正係数	2.966	2.987	2.959
相関関数	0.999	0.999	0.999

ロードセルを用いた較正方法では相関係数は 1 に非常に近いものとなりばらつきを改善できたが、較正係数は大方向同じ結果となった。この結果から推力換算時に使用する較正係数より測定した振幅をインパ

ルスに換算するのと測定した振幅を実際に与えたインパルスに換算するのでは、0.5 ms 電源に対応する領域では-2.5～+5.3%，開発中の 5 ms 電源では、±2%の誤差が表れる。鉄球では、-10.6～+16.1%の誤差であったので大きく改善できた。また、先行研究における較正方法では較正係数が 2.8～3.3 と毎回変化していたが、本研究における較正では較正毎の値も変化はみられず正確性が向上したといえる。

5.2 実験環境による較正結果の比較

本研究における較正方法を用いて大気中とスラスト作動時と同じ真空中でそれぞれ較正を行った。その比較を図 14 に示す。

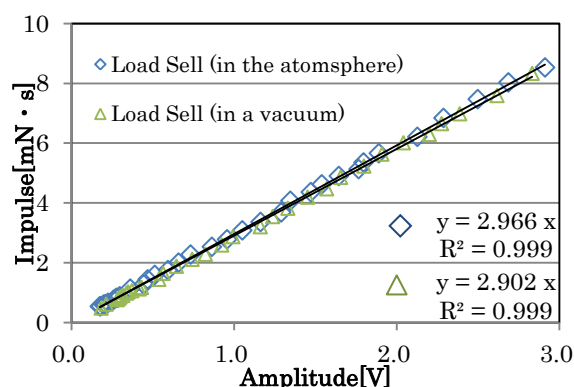


図 14 各実験環境での較正結果の比較

較正環境の変化ではほぼ同じような結果となった。

6. 考察

6.1 較正結果の妥当性について

今回の較正結果より妥当性について考えていく。まず本研究における較正方法の較正結果は表 1 より毎回同じ結果となるのに対して、先行研究における較正方法では較正毎に較正係数が 2.8～3.3 まで変化する。これよりどの値が真値であるのか不明である。したがって、妥当性の評価の方法として鉄球を用いた較正方法のインパルス計算に、実際に外乱として含まれる誤差を加え振幅との関係を考慮した結果と本研究での較正結果との比較を行う。

鉄球を用いた較正結果の変動について 3.2 節で述べたが、この方法で用いるインパルスは計算によって求めた理論値であり振幅はその理論値に何らかの外乱が加わり変化したインパルスによる振幅である。したがって、理論値と実験値の関係となり、較正係数が較正毎に異なると考える。この際の外乱により、計算したインパルスに誤差が生まれ振幅が本来の計算したインパルスに対応した振幅ではなくなる。

その外乱による誤差要因をあげるとチャンバ内の自由がきかない環境での鉄球の高さのセッティングを手作業で行わないといけない点、鉄球を落下させる際に鉄球が左右に多少のブレをもってアルミ板に衝突しているなどが考えられる。これらの誤差要因を理論値に含めて計算し実際に衝突する際のインパルス値を仮想的に求め、理論値を実験値として置き換えて考える。元々実験値であった振幅は様々な外乱によって影響を受けたインパルスによるものであったので誤差要因を含め計算したインパルスに対応するものとなる。したがって、鉄球による較正を実験値と実験値の関係に仮想的に置き換えることで、本研究の較正での実験値と実験値の関係に近似できたと考えることができる。

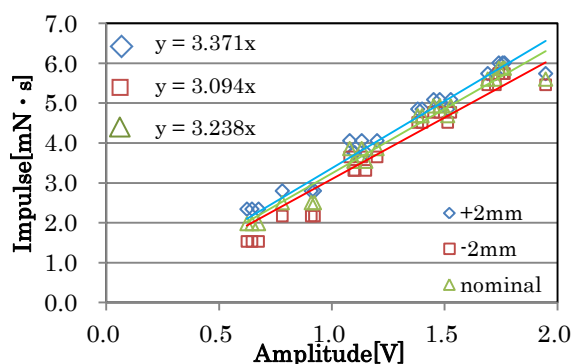


図 15 高さの誤差による鉄球を用いた較正結果

鉄球の高さのセッティングの誤差は鉄球の直径が 10 mm なので大きく見積もって ± 2 mm とする。この誤差が全測定点であられた場合の較正曲線を図 15 に示す。次に、鉄球がアルミ板に真っ直ぐに落下せず左右にブレ斜めに衝突してしまうことでインパルスが減少している点について考える。放電室出口につけたアルミ板の幅が最大 70 mm なので、最大のブレは 35 mm である。したがって、ブレの角度は鉄球のセッティングの高さにより変化するので各測定点で高さとの長さより角度を求め \cos 成分を実際の衝突したインパルスとして考えた。その結果を図 16 に鉄球の高さ誤差も考慮したものを図 17 に示す。

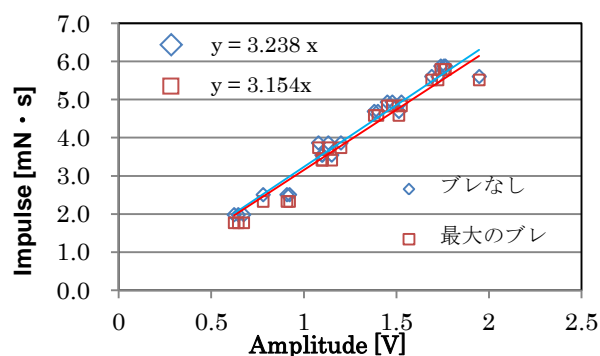


図 16 斜め方向のブレによる誤差

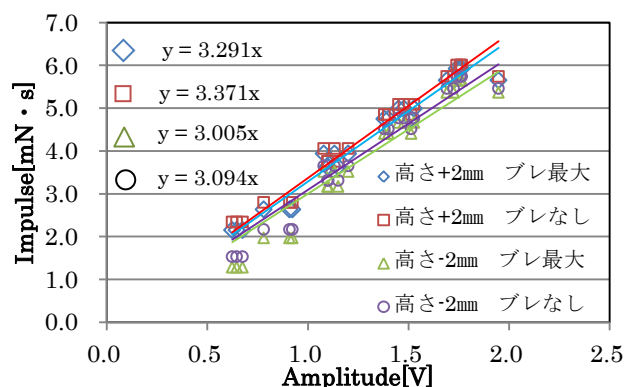


図 17 高さと斜め方向のブレによる誤差

以上より誤差によるものがばらつきを生み、そのばらつきにより較正係数も 3.0~3.3 の範囲で変動してしまうことがわかった。しかし、実際には高さの誤差は ± 2 mm ではおさまらないこと、今回挙げた要因以外のものを含めると、先行研究で行われた較正結果が 2.8 や 2.9 のものがあつたとしてもありえないものではない。したがって、較正係数は大方 2.8 から 3.3 の範囲であると考えられる。したがって、本研究の較正結果は妥当なものであつたと考えられる。

6.2 実験環境の変化による比較

真空環境における較正結果に変化がみられなかったのは、ロードセル側は真空による影響を受けたインパルスであること、振幅側はポンプの振動の影響がなかったことにより変化がなかったと考えられる。したがって、本研究で開発した較正方法では真空中で行う必要はなく大気中で用いた結果を推力換算に用いればよいことがわかった。

7. 結論

本研究において考案し開発した較正装置は、先行研究における較正方法での問題点を以下のように改善した。放電時間に応じたインパルスによる振幅の取得を振り子の長さ、重さより調整し可能とし、較正結果のばらつきをロードセルを用いて改善させ、推力換算時の誤差を従来の方法では $-10.6\sim+16.1\%$ であつたが 0.5 ms 電源では $-2.5\sim+5.3\%$ 、5 ms 電源では $\pm 2\%$ に改善することができた。また、シーケンス制御によりスラスト作動時と同じ環境である真空下での較正を可能とし、実験効率の向上を達成できた。

参考文献

- [1] R.G.Jahn, “*Physics of Electric Propulsion*,”. McGraw-Hill, New York, 1968
- [2] 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
- [3] M.Takubo,H.Koizumi,T.Hyakutake,and,H.Kuminaka.”Thrust Dependence of the 2D-MPD Thruster on the Magnetic Field Applied by the External Coil” .In 31st International Symposium on Space Technology and Science, ISTS-2011-b-10,2011
- [4] 田窪将也. “直行外部磁場型 2 次元 MPD スラスタに関する研究”. Master’thesis, 横浜国立大学大学院工学研究科, 2012