

3D プリント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

Fabrication of 3-D printed small solid rocket motor and performance measurement using smartphone

中野 正勝¹⁾

Masakatsu Nakano¹⁾

Abstract: A small solid rocket motor was designed and fabricated by a 3-D printer for quick and cost-effective educational experiments. Printing and assembly of the solid rocket motor took about 4 hours, reducing preparation time for the experiments by two orders of magnitude. The 3-D printed solid rocket motor worked flawlessly in hot-fire tests and its impulse was measured to see there is any difference in measurement accuracy between a laser displacement sensor and a smartphone accelerometer. The results showed that the smartphone accelerometer has moderate accuracy and is cost-effective for educational experiments.

Keywords : 3-D printer, Small solid rocket motor, Impulse measurement, Smartphone

1. 緒言

航空宇宙工学コースでは、航空機や宇宙機に関連した科目から成るカリキュラムが組まれているが、宇宙機の推進の要めであるロケット推進については、第5学年前期の工学実験Ⅲ（ロケットエンジンの推力測定）と後期のロケット工学で、座学・実験の両面から学んでいく[1]。

ロケットエンジンは燃焼ガスを加速噴出することで推力を得るが、燃焼ガスの熱エネルギーを運動エネルギーに効率良く変換するのがノズルで、ノズル理論はロケット工学で重要な位置を占める[2]。このノズル理論は基礎的な熱力学から導かれ、その結果は容易な解析式で記述される。ノズル性能は実験で確認することが可能で、座学と実験実習がスパイラル的に進展する高専の教育システムと適合性がよい。

ロケットエンジンのノズルは釣鐘型をしており、再生冷却を行う液体ロケットエンジンでは、冷却用の推進剤を流すチューブ状のパイプをロウ付けしたものが用いられるが、固体ロケットではアブレーションにより冷却するため、一体型のものが多い。再生冷却を行わない小型ロケットエンジンのノズルは、旋盤などの切削加工で作ることが多く、

ノズルのスロート部は最も径が小さくなるために加工が容易ではない。学内に機械工場や技術職員を有する大学と異なり、本校では、それらの部品は、納期が1ヶ月程度かかる外注か、自作となる。実験結果を設計にフィードバックする作業は近年重視されるエンジニアリングデザイン教育において必須な作業とされ[3]、マイナーな改良でさえ納品までに時間がかかる現状を改善することは、エンジニア育成を使命とする本校にとって早急に解決すべき課題である。

解決策の一つは3Dプリンタの使用である。3Dプリンタによりノズルの作成は切削加工よりも容易になり（図1）、短時間かつ低コストでロケットエンジンの実験を行うことが期待できる。本研究では3Dプリンタを用いて小型ロケットモータ（固体ロケットエンジンのことを固体ロケットモータと称す）を製作することで、実験プログラムの準備時間を短縮し、コストを下げることを目標とする。

また、ロケットエンジンの推力測定には振り子式の推力測定スタンドを用いるが、現在は高価なレーザー変位計を用いて計測を行っている。教育用予算が潤沢でなくなる将来を見据えて、低コストで教育的な効果が保てる実験手段を今のうちに確保しなくてはならない。ここ数年で広く普及したスマートフォンには様々なセンサーが搭載されており、Android端末やiPhoneのいずれにも加速度センサーが搭載されている。スマートフォンには高性能なカメラが搭載されており、加速度計測と同時に直近でロケットエンジンが作動する様子も撮影可能である。

本稿では、3Dプリンタを用いて小型ロケットモータを製作し、実際の作動に耐えられるか評価するとともに、そのインパルスをスマートフォンで取得可能か実験的に確認することで、安価で効果的なロケット工学の実験プログラムの構築可能性について検討を行った。

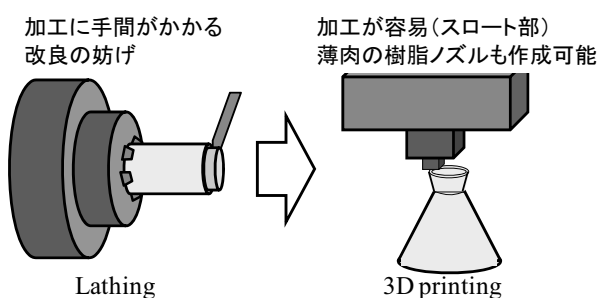


図1 3D プリントを用いたノズルの加工。

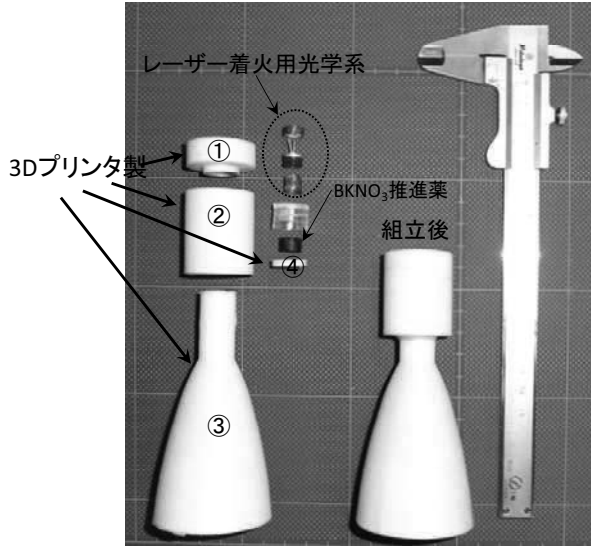


図2 ロケットモータの構成パーツ。

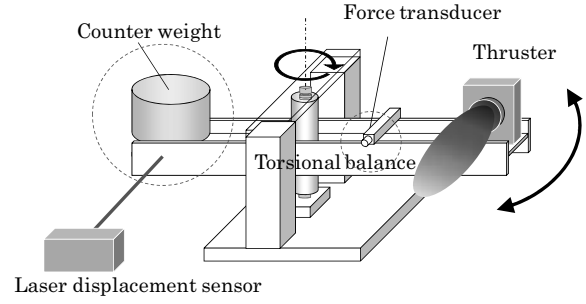
2. 実験装置

2.1 ロケットモータ

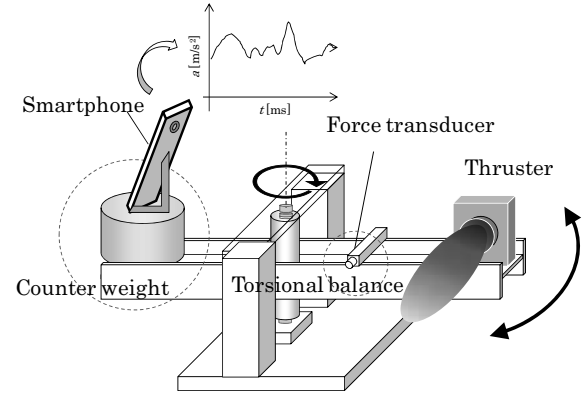
本研究で用いた固体ロケットモータは、KKS-1 ミッションのために開発され[4]，工学実験 III で用いられているレーザー着火スラスタをベースに，3D プリンタで製作できるように新規に設計したものである。KKS-1 搭載のレーザー着火スラスタには，1) 着火のためのレーザー光を透過する，2) 軽量安価，3) 内壁のアブレーションにより推力増強が期待できる，4) 熱伝導度が低く断熱効果がある，ことによりアクリル樹脂を採用した。そのため 3D プリンタで樹脂製のロケットモータを製作するのに技術的な問題はない。

ロケットモータの製作にはホットプロシード製の 3D プリンタ Blade-1 を用い，3 次元データの作成にはオートデスク製の Autodesk 123D Design を用いた。STL ファイルから G-code への変換は プリプロセッサである KISSlicer を用いた。パソコンを除く，3D プリンタを含んだコストは 13 万 6500 円である。3D プリンタの使用により，ロケットモータの製作に大きな自由度ができた。

本研究のロケットモータは，図 2 に示されるように，レーザー着火用の光学系のホルダー①，燃焼室②，ノズル③，推進薬の固定具④の 4 パーツが 3D プリンタで製作された。材料は ABS 樹脂である。ノズルの厚さは 2 mm，スロート直径は 5 mm，出口径は 45 mm であり，ノズルの膨張比は 81 である。燃焼室内には推進薬としてボロン硝酸カリウム (BKNO_3) の円筒状のペレット (直径 10 mm×高さ 6.2 mm，平均質量 920 mg) がアクリルの容器に入れられ配置されている。これらのパーツの接着にはエポキシ系の接着剤であるアラルダイト (ハンツマン・アドバンスト・マテリアルズ製) を用いた。 BKNO_3 推進薬の着火には半導体レーザーを用いており，発振波長は 808 nm，光出力は 1.0 W である。レーザー着火用の光学系は着脱可能で再使用する。



(a) 変位測定



(b) スマートフォンを用いた測定

図3 推力測定スタンドによるインパルス測定。

工学実験での使用を考えた場合，安全性を確保するために燃焼圧を下げ燃焼室の破裂を防止しなくてはならないが，同一推進薬に対して燃焼室圧力を測定した結果から，スロート径 5 mm の燃焼室圧力は最大で 4 atm 程度であり[5]，設計では十分な安全側のマージンを確保した。

このロケットモータの製作にかかる時間は合計約 4 時間であり，組み立ての約 10 分を除いて，全て人の手を介さない 3D プリンタでの作業である。ロケットモータの設計やデータの作成時間はどのような製作手段でも同じであることから，3D プリンタによる時間短縮効果は非常に大きい。

2.2 インパルス測定

本研究で用いた BKNO_3 は燃焼速度が速く，着火から燃焼終了まで 300 ms 以内である。したがって，推力はパルス的に与えられるため，推力履歴よりもその時間積分値であるインパルスが重要な性能指標になる。インパルスの計測には様々な手段があるが，図 2 に示す推力測定スタンドが最も実績があるため用いた[6]。

この推力測定スタンドには，変位角 θ に比例してトルクが発生する振り子バネが中心に配置されており，その運動方程式は，推力測定スタンドの慣性モーメントを J ，粘性係数を c ，バネ定数を 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

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

と書くことができる。推力測定スタンドの回転角が微小である場合、変位の計測点を中心軸から l_s として、その変位を

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

と近似でき、推力測定スタンドの固有角周波数と粘性係数

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

を導入することで、変位角から変位へと運動方程式を書き直せる。

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

本実験の推力測定スタンドの振動周期は約 2 s であり、推力発生時間より十分長いので、推力はパルスの的に与えられるものと考え、推力の時間積分であるインパルスを I とし、推力をデルタ関数を用いて

$$F(t) = I \times \delta(t) \quad (5)$$

と置く。初期条件

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

の下、式(4)を解くと、その解は

$$x(t) = \frac{Il_f l_s}{J\sqrt{\omega_0^2 - \mu^2}} e^{-\mu t} \sin \sqrt{\omega_0^2 - \mu^2} t \quad (7)$$

となる。ここで測定系の粘性係数 μ が小さければ、式(7)は、振幅がインパルスに比例する

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

のような単振動となるので、その 1 回微分である速度や 2 回微分の加速度も振幅はインパルスに比例することになる。

原理的には式(8)の各定数を決定することで、変位や加速度の振幅からインパルスを求めることができるが、様々なものが配置された推力測定スタンド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り、既知のインパルスを推力測定スタンドに与え、同時に変位または加速度を取得することで較正直線を作り測定するのが一般的である。

なお、既知のインパルスは推力測定スタンドに固定された Force transducer (力変換器) をハンマーで叩くことにより与える。Force transducer の出力を時間積分したものが、推力測定スタンドに加えられたインパルスになるので、その値を I_{cal} とし、Force transducer の位置を l_{cal} 、推力測定スタンドの変位の振幅を A_{cal} とすると、ロケットモータを作動させた際の変位の振幅 A からインパルスを

$$I = \frac{l_{cal}}{l_f} \times \frac{\sum_i A_{cal,i} l_{cal,i}}{\sum_i A_{cal,i}^2} \times A \quad (9)$$

で求めることができる。加速度センサーを用いる場合にもインパルスは式(9)で与えられる。ただし、この場合の振幅は加速度の振幅となる。いずれのセンサーを用いた場合にも、Force transducer とロケットモータの配置場所が必要で(本実験では $l_{cal} = 288 \text{ mm}$, $l_f = 139 \text{ mm}$)、センサーの計測位置は式(9)で明らかなように不要である。

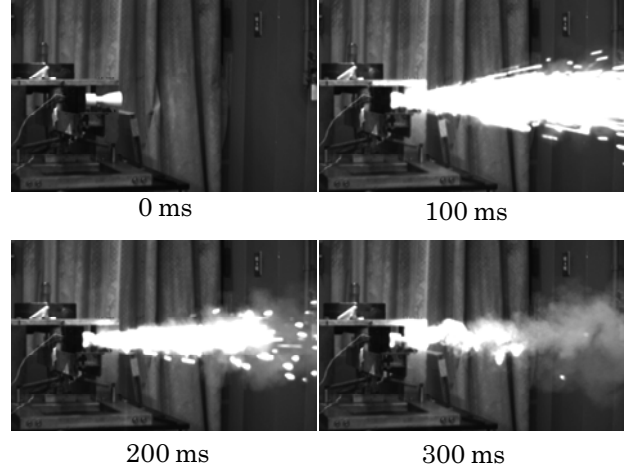


図 4 3D プリンタ製ロケットモータの作動の様子。

実験では、レーザー変位計を用いた変位計測とスマートフォンの加速度センサーを用いた加速度計測を同時に行い、それぞれの測定精度を比較した。レーザー変位計はキーエンス製の LK-500 をロングレンジモード (解像度 50 μm) で用い、スマートフォンはソニーモバイルコミュニケーションズ製の Xperia A SO-04E を使用した。スマートフォンでは動画の撮影も可能であることから、推力測定スタンド上のロケットモータが撮影できる位置に配置して、加速度と動画を同時に取得した。

なお、スマートフォンで撮影した動画を解析することで推力測定スタンドの変位を求めることも可能である。しかし、較正回数分の動画取得が必要でデータサイズが膨大となることや、計測結果がテキストベースの単純な時系列データで与えられないのでレポートの評価が困難になることなど、工学実験 III で行うには問題が生じるために、ここでは対象としない。

3. 実験結果

3.1 ロケットモータ作動試験

計測に先だて、ロケットモータ単体での試験を行った。図 4 に 3D プリンタで作ったロケットモータの作動の様子を示す。破損や燃焼ガスの漏れがないかを詳細に確認するために、ディテクト製の高速カメラ HAS-220 による撮影を行った。

プロトタイプならびに今回のロケットモータに対して合計 5 回作動試験を行ったが、いずれも正常に作動し、破損等の問題は発生しなかった。

作動後のロケットモータを中心線に沿って切断したものを図 5 に示す。BKNO₃ の燃焼ガスは金属ボロンの粒子を含んだ黒色をしているために、燃焼ガスの通過場所が黒く示される。図から明らかなように、燃焼ガスはノズル出口に向かっており、燃焼室上面や側面への燃焼ガスのリーク等の痕跡は確認できず、3D プリンタで作られたロケットモータは十分に使用に供できると判断できる。

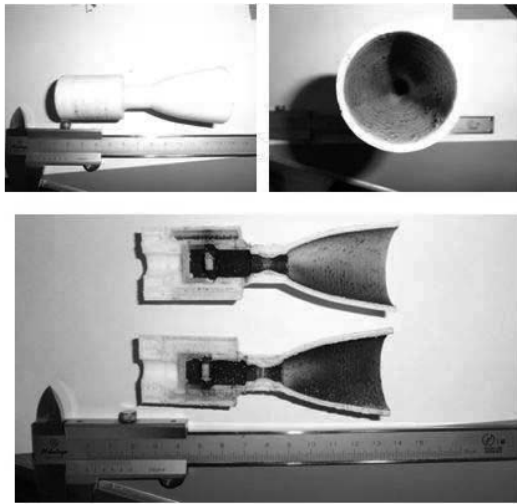


図 5 作動試験後のロケットモータの外面，ノズル内壁，切断面。

3.2 インパルス測定（較正）

3D プリンタで製作したロケットモータが問題なく作動することが確認できたため，そのインパルスをレーザー変位計とスマートフォンの加速度計を用いて計測した。

インパルス計測に先だって，レーザー変位計とスマートフォンの加速度計を用いて較正直線を求めた．インパルスを縦軸に，横軸を振幅として図 6 と 7 に示す．較正用のデータ点数は 20 点である．なお，Force transducer にインパルスを加えた直後のレーザー変位計の出力はノイズを含まない正弦波で与えられるため，変位の最大値と最小値の差の半分を振幅とした．一方，加速度計の出力はインパルスが加えられた瞬間に最大となり直後に多くのノイズ等を含むため，推力測定スタンドが揺れ出してから半周期後の最大値と最小値から振幅を計算した．

図 6 はレーザー変位計により取得したデータであり，較正データ□印を通る回帰直線があわせて示されている．インパルスと振幅との理論的な相関係数は 1 なので， R^2 値が 1 に近いほど信頼性が高いと言えるが，計測結果は R^2 値が 0.9935 と非常に高精度で計測可能であることが分かった．一方，図 7 は加速度センサーにより取得された較正データ△印と較正データから求められた回帰直線である． R^2 値は 0.759 であり，レーザー変位計を用いたものより精度は劣る．較正データを通る直線の傾きは，回帰直線の傾き 0.5517 から大小約 25% の範囲を通るため，最大で約 25% の誤差を許容する必要がある．

なお，インパルス測定における較正の必要性を理解し，較正図を作れるようになることが，工学実験 III のロケットの推力測定において，達成度の評価項目となるが，加速度計を用いた作業とレーザー変位計を用いた作業で本質的な違いはなく，今回，図 6 と同様の図 7 が描けたことから，センサーを変えることによる実験プログラムへの影響はないものと判断できる．

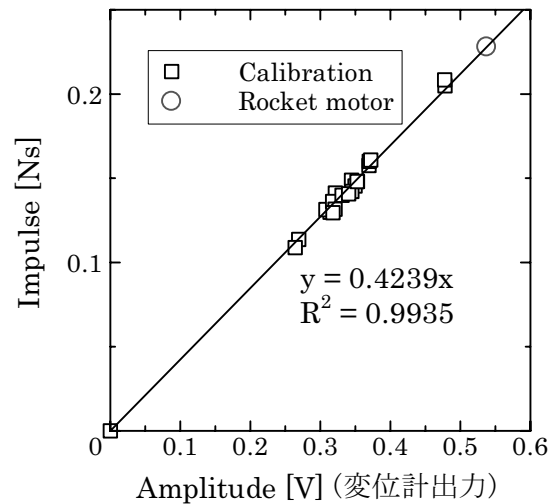


図 6 レーザー変位計による較正図。

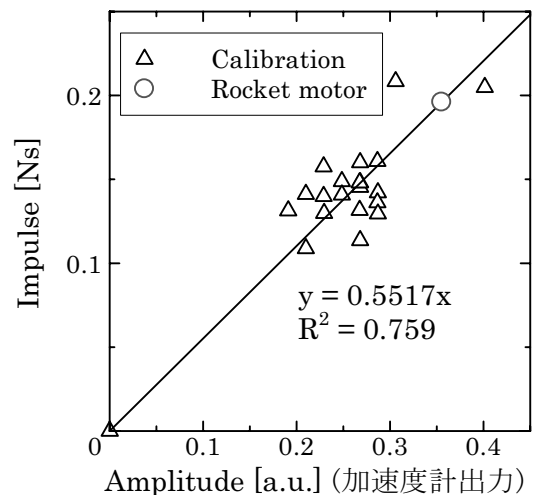


図 7 スマートフォンの加速度センサーによる較正図。

3.3 インパルス測定

各センサーの較正後，推力測定スタンドに配置したロケットモータを作動させ，変位，加速度，画像データの各種データを取得した．

高速度カメラによるロケットモータの作動の様子を図 8 に，推力測定スタンド上に配置されたスマートフォンで得られた動画から作動前後の様子を抽出したものを図 9 に示す．図 9 に示されるように，日常携帯する機器で，加速度ばかりではなく，作動の様子も記録できるのがスマートフォンを用いる利点であり，工学実験の場で大いに活用することができる．

レーザー変位計ならびに加速度センサーで得られた振幅から求められたインパルスは図 6 と 7 の赤丸で示され（Force transducer とロケットモータの位置補正後），レーザー変位計によるものが 0.228 ± 0.008 Ns，加速度計によるものが 0.196 ± 0.045 Ns であった．加速度センサーで得られたインパルスは，レーザー変位計で求められたインパルスよりも約 15% 小さく，エラーバーの範囲内では 0～30% 低い範囲

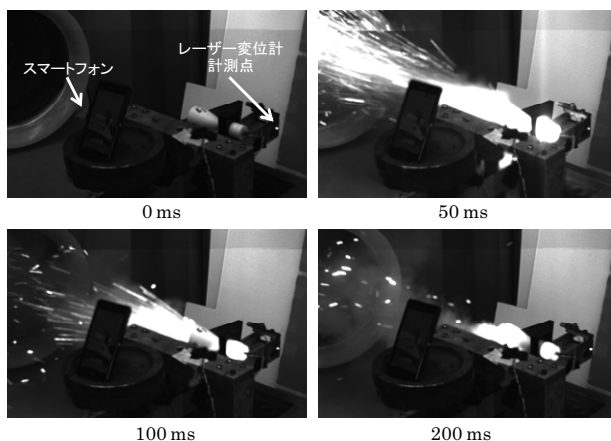


図 8 3D ロケットモータのインパルス計測の様子（高速カメラで撮影）。

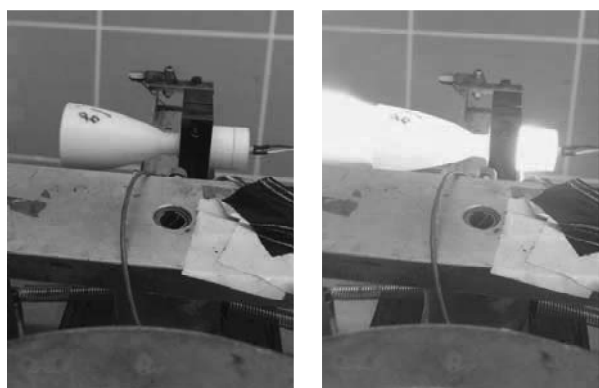


図 9 スラストスタンド上のスマートフォンで撮影した着火前（左）と瞬間（右）の様子。

に収まった。研究用や性能評価用としては不十分であるが、推力測定スタンドを用いたインパルス計測の手法を学ぶ上では十分な精度と言える。ローエンドのレーザー変位計でも価格が 10 万程度することから、学生の有するスマートフォンを活用すれば、計測機器にかかるコストを抑えた実験プログラムが構築できる。

4. まとめ

3D プリンタを用いて固体ロケットモータの製作を行い、実際に作動試験を行うとともに、スマートフォンを用いた

性能取得実験を行った。本研究で得られた結果を簡条書きにして示す。

- 1) ロケットモータの製作にかかった時間は約 4 時間であり、管理課から発注する場合の納期 1 ヶ月と比べて約 180 倍の時間短縮となった。教員の作業時間は組み立ての 10 分程度である。製作時間が短縮できたことにより、次の実験へのフィードバックが半日程度で実現でき、機動的な教育・研究を展開することができる。
- 2) 3D プリンタで製作したロケットモータは十分な強度を有しており、推力測定スタンドを用いたインパルス測定が可能であった。
- 3) スマートフォンを用いたインパルス計測では、精度はレーザー変位計を用いた計測と比べて悪いのは否めないが、最大で 30% 程度の誤差を許容するのであれば、インパルス計測を学ぶための手法として十分に利用することが可能である。
- 4) 3D プリンタやスマートフォンを活用することで、設計から実験までの待ち時間を大幅に短縮することが可能となるとともに、コストパフォーマンスのよい工学実験プログラムを構築することが可能である。

5. 参考文献

- [1] シラバス，平成 25 年度ものづくり工学科，東京都立産業技術高等専門学校，高専荒川キャンパス，2013.
- [2] G. P. Sutton : Rocket Propulsion Elements, Sixth. Edition, John Wiley and Sons, New York, 1992.
- [3] ナイジェル クロス, エンジニアリングデザイン—製品設計のための考え方, 培風館, 2008.
- [4] 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.
- [5] 小泉宏之, 濱崎享一, 近藤亮ほか: レーザ着火マイクロスラストにおけるスラスト形状の影響, 日本航空宇宙学会論文集, 58, pp.178-186, 2010.
- [6] 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.