

レーザー着火マイクロ固体ロケットの着火率に関する研究

○林知之(東大・院) 小泉宏之(東大) 中野正勝(産技高専)

小紫公也(東大) 荒川義博(東大)

1. はじめに

日本における宇宙開発は初期段階において国家プロジェクトとして扱われ、中でも人工衛星は大型のものを、莫大な予算と時間が費やして開発してきた。ミッション当たりのコストを減らすために複数のミッションを大型衛星に搭載してきたのである。しかし、大型の衛星では一機能にトラブルがあると複数のミッションに影響が出てしまったり、開発期間が長くなるため、最新機器を搭載できないなどの欠点があった。

近年ではこの状況を改善するべく、小型衛星・超小型衛星の開発が盛んである。小型衛星開発は開発期間を短く、開発コストを抑えられるため、大学やベンチャー企業が小型衛星開発に参加することを可能にした。また、小型衛星は複数機を同時打ち上げすることで冗長性の確保や群衛星による多点同時観測などの新たなミッションを行うことができる。実際に、ユタ州立大学やワシントン大学らが開発した衛星重量10kgのION-F¹⁾や、アリゾナ州立大学らが開発した15kg級のThree Corner Satellite²⁾などが複数衛星によるフォーメーションフライトの実証衛星として打ち上げられている。

このような群衛星を利用した新しいタイプのミッションを行うために、推進器は不可欠のものとなっている。しかし、小型衛星に搭載される推進器は、サイズ、重量、消費電力などの面で厳しい制限を受けるため、多くの研究機関によってマイクロスラスタの研究が行われている。

著者らはこれまでマイクロスラスタに関する研究として、半導体レーザーを用いたレーザーアブレーションスラスタ²⁾、レーザー着火マイクロ固体ロケット³⁻⁵⁾、およびそれらを組み合わせたデュアルモードスラスタ⁶⁾の提案・開発を行ってきた。レーザーアブレーションモードにより姿勢制御に適した微小な推力(1~10[μ Ns])を、レーザー着火マイクロ固体ロケットにより大推力

(約1[Ns])を得ることができる。近年はレーザー着火マイクロ固体ロケットを中心に研究を行っている。

2. レーザー着火マイクロ固体ロケット

レーザー着火マイクロ固体ロケットの模式図を下の図1に示す。ダイオードレーザーを用いて、アクリル製透過窓から燃焼室内に封入された推進剤を着火し、燃焼ガスをノズルから排出することで推力を得る。推進剤の供給はスラスタケースを周方向に回転、上下方向に移動することで行う。

推進剤にはボロン(B)/硝酸カリウム(KNO₃)の混合火薬を用いる。これは他のコンポジット系、ダブルベース系の固体推進剤に比べて真空中における着火特性が優れていたためである。一個あたりの推進剤は、 ϕ 10mm×高さ6.3mmの円柱形で質量は約0.9gである。質量混合比は、着火特性および推進性能が良いという理由から B : KNO₃ : binder = 28 : 70 : 2 を選定した。

スラスタケースにはエポキシ樹脂を用いる。これは、金属材料に比べて軽量で済むこと、そして高い推進性能を持つからである。

推進剤の着火には浜松ホトニクス社製L10451-42ダイオードレーザーを用いている。このダイオードレーザーは出力1W、発振波長808nmである。レーザー着火の利点は、非接触で着火できるため複雑な配線を回避することができること、パワー密度が高いため着火の確実性を上げられることである。

3. 研究目的

先の研究により、B/KNO₃を使用することにより真空中で着火特性が良いことが示されているが、スラスタ形状にした場合にLDを推進剤に照射しても着火に至らない場合がしばしばあった。そこで着火率を測定し、着火率の向上につなげることを本研究の目的とした。

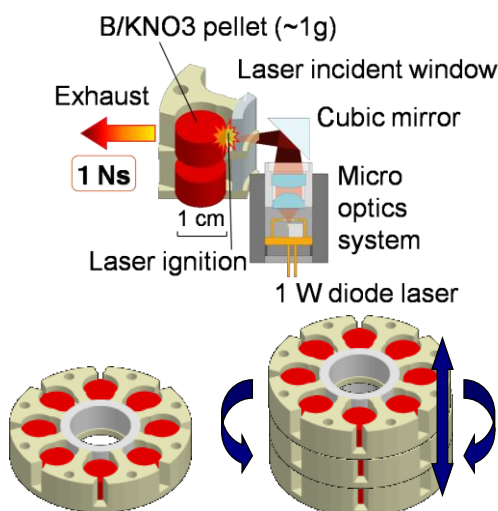


図 1.レーザー着火マイクロスラスタ概念図

4. 実験装置および実験方法

4.1 真空チェンバ

実験は全て、一辺の長さが 90 cm の立方体型の真空チェンバ内で、背圧 200 Pa 未満のもとで行った。一般に固体火薬の燃焼速度は圧力に依存する。背景圧力は燃焼特性とノズルでのガスの加速特性に影響を与える。過去の研究により、 B/KNO_3 の着火特性は 10^{-2} Pa の高真空におけるレーザー着火、10 kPa 以下において燃焼速度が一定になることが示されている⁷⁾。また、マイクロ固体ロケットの燃焼初期における燃焼室圧力は 200 Pa よりも十分大きいことが分かっている⁸⁾⁹⁾。以上のことから、背圧 200 Pa での実験が、マイクロスラスタの燃焼特性や性能に与える影響は小さいと考えている。

4.2 着火率および着火時間測定

着火しないことがある原因として、LD による推進剤照射時の初期アブレーションが透過窓を曇らせることで LD の出力が下がるためだと考えている。曇らせやすさは火薬表面と透過窓の距離 D に依存すると考え、火薬-透過窓間距離 D を変化させて着火率を調べた。

4.3 着火実験

着火率および着火時間測定の結果を基にスラスタを設計、製作した。製作したスラスタの着火実験を行い、構造破壊が起こらないか確認した。

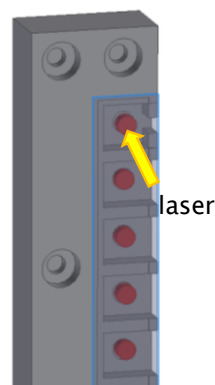


図 2.着火率測定用スタンド

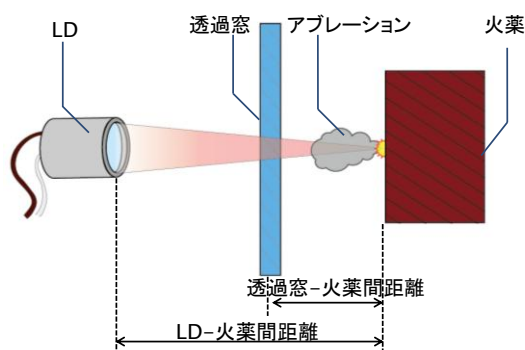


図 3.着火率測定実験模式図

5. 実験結果

5.1 着火率測定結果

火薬-透過窓間距離 D をパラメーターにして 1 つの火薬につきレーザーを一度照射し、着火率を算出した (図 4.)。距離 $D = 0$ [mm] にプロットが 2 つあるのは、着火率 100 % となっているものが火薬表面と透過窓の間にエポキシを塗布し、すき間を完全に埋めたもの、着火率が 0 % となっている方が火薬表面と透過窓との間にわずかながら隙間があるものである。グラフから、火薬表面と透過窓の間をエポキシで埋めたもの以外は、距離 D が大きくなるにつれて着火確率が大きくなる傾向がある。

5.2 平均着火時間測定結果

レーザーを照射し始めてから着火に至るまでの時間と火薬-透過窓間距離 D との関係も調べた。結果を図 5. に示す。

着火率と同様に距離 $D = 0$ [mm] にプロットが 2 つあるのは、平均着火時間が小さい方が火薬表面と透過窓の間にエポキシを塗布し、すき間を完全に埋めたもの、他方が火薬表面と透過窓との間にわずかなが

ら隙間があるものである。

ここで図 5.における縦軸の平均着火時間は以下の式(1)で定義する。

$$T_{ave} = \frac{1}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (1/t_i)} \quad (1)$$

T_{ave} : 平均着火時間[s]

n : レーザー照射回数

t_i : 照射開始から着火に至るまでの時間[s]

平均着火時間を算出には、着火しなかった場合でも同じ火薬で 3 回までレーザーを照射したものも t_i に含んでいる。また、着火しなかった場合は $t_i = \infty$ とした。

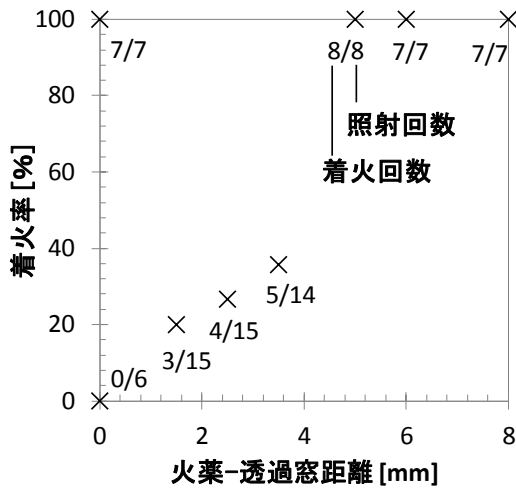


図 4. 火薬-透過窓間距離 D と着火率の関係

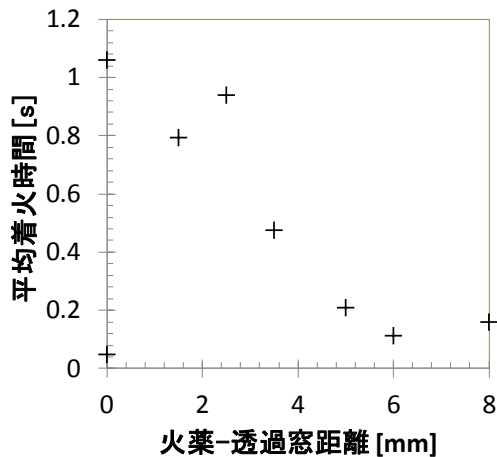


図 5. 火薬-透過窓間距離 D と平均着火時間の関係

5.3 着火実験結果

着火率測定実験で確率 100 %, および着火時間測定で平均着火時間が測定したものの中では最も短くなった, 距離 $D=0$ [mm], 火薬と透過窓の間をエポキシで埋めたものをスラストに適用し, 設計および製作を行った。この新しいタイプのスラストを 3 つ作成し, 構造破壊が起こらないことを確認した。

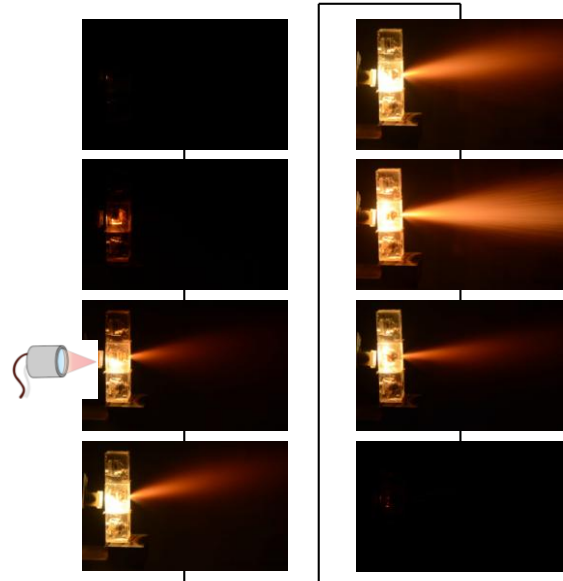


図 6. 新スラストの燃焼の様子

6. 考察

6.1 着火率と距離 D の関係

火薬表面と透過窓の間をエポキシで埋めたもの以外は, 距離 D が大きくなるにつれて着火確率が大きくなる傾向みられた。火薬表面から発生するアブレーションは等方的に広がると考えられ, 距離 D が大きいほどアブレーションが透過窓を曇らせる影響が小さくなるために着火率が向上すると考えている。

このことを定式化すると次のようになる。透過率を $T(t)$, LD の出力を I_0 [W], 火薬上におけるレーザーの出力を $I(t)$ [W] とすると式(2)のように書ける。

$$I(t) = T(t) \cdot I_0 \quad (2)$$

ここで透過率 $T(t)$ は, それまでに透過したエネルギーに比例して減少すると仮定すると, 比例定数を k として式(3)と書ける。

$$T(t) = 1 - k \int_0^t I(t) dt \quad (3)$$

式(3)の k は値が大きいくほど、時間の経過に伴い透過率 $T(t)$ が落ちやすい、つまり曇りやすいということを示している。距離 D が大きいほど着火確率が大きくなるという実験結果から、距離 D と比例定数 k は負の相関があると考えられる。

式(2)および(3)から $I(t)$ は時間 t について解くことができ、ある時間 τ までに火薬に伝わったエネルギーは式(4)右辺のように表わすことができる。

$$\int_0^{\tau} I(t) dt = \frac{1}{k} (1 - e^{-I_0 k \tau}) \quad (4)$$

$\tau \rightarrow \infty$ の時、(右辺) $\rightarrow 1/k$ となり、火薬に伝わるエネルギーには上限があり、それは k によって定まることが分かる。

着火するために必要なエネルギーの閾値があると仮定すると、 k がある値より小さい時、つまり距離 D がある値より大きい時に閾値を超えて着火に至ると考えることができる。

6.2 火薬-透過窓間にエポキシを塗布したことの影響

距離 $D=0$ [mm] かつ火薬-透過窓間にエポキシを塗布した時、着火率が 100% となり(図 4)、平均着火時間も、実験した中で最も短くなった(図 5)。この理由については以下の 2 点を考えている。

1 点目は、火薬と透過窓が密着しており、レーザーによるエネルギーは透過窓が曇ったとしても窓から火薬へ伝わるためであると考えられる。

2 点目の理由は、燃焼圧力の問題である。一般に固体推進剤は背景圧力が上昇すると燃焼速度も上昇することが知られている(Vieille の法則)。距離 $D=0$ [mm] かつ火薬-透過窓間にエポキシを塗布した場合、燃焼初期において、燃焼ガスが抜けるパスがなく局所的に圧力が上昇することで燃焼速度も上昇し、反応が促進されるためだと考えている。

7. まとめ

本研究では、レーザー着火マイクロ固体ロケットの着火率の向上を目的として、火薬表面と透過窓の距離 D を変化させ、着火率とレーザーを照射してから着火に至る

までの時間を調べた。その結果、距離 $D=0$ [mm] で透過窓と火薬の間をエポキシで埋めたもので良好な結果が得られた。

良好な結果が得られたものをスラスタに適用した。3 つのスラスタを作成し、着火実験を行ったが構造破壊はなかった。

本研究で得られた知見はスラスタに限らず、固体火薬のレーザー着火に応用できると考えている。

参考文献

- 1) Sara Gidlund : Design study for a formation-flying nanosatellite cluster , Lulea University Master of science program in space engineering, 2005.
- 2) Koizumi, K., Inoue, T., Komurasaki, K., and Arakawa, Y. : Fundamental Characteristics of a Laser Ablation Microthruster, Trans. Japan Soc. Aero. S Sci., Vol. 50 (2007), pp.70-76
- 3) 濱崎享一, 小紫公也, 荒川義博, 小泉宏之, 中野正勝: “固体推進剤を用いたレーザー着火マイクロスラスタに関する実験的研究” プラズマ応用科学, Vol.15, No. 2 (2007), pp. 111-116.
- 4) Koizumi, K., Nakano, M., Inoue, T., Watanabe, M., Komurasaki, K., and Arakawa, Y. : “Study on Laser Ignition of Boron / Potassium Nitrate in Vacuum”, Sci. Tech. Energetic Materials, 67(2006), pp.193-198
- 5) 小泉宏之, 井上孝祐, 中野正勝, 渡辺将史, 小紫公也, 荒川義博: “レーザー着火式 20Ns 級マイクロスラスタの開発” 平成 17 年度宇宙輸送シンポジウム
- 6) Koizumi, H., Inoue, T., Arakawa, Y., Nakano, M. : A Dual Propulsive Mode Microthruster Using a Diode Laser , Journal of Propulsion and Power, Vol.21, No.6, pp.1133-1136, 2005
- 7) Koizumi, H., Nakano, M., Inoue, T., Watanabe, M., Komurasaki, K. and Arakawa, Y. : Study on Laser Ignition of Boron / Potassium Nitride in Vacuum, Sci. Tech. Energetic Materials, Vol. 67, No. 5, pp.193-198, 2006.
- 8) 小泉宏之, 濱崎享一, 近藤亮, 岡田佳祐, 中野正勝, 荒川義博: レーザー着火マイクロスラスタにおけるスラスタ形状の影響, 日本航空宇宙学会論文集, 第 58 巻, 第 677 号, pp.178-186, 2010.
- 9) 濱崎享一, 岡田佳祐, 近藤亮, 小泉宏之, 中野正勝, 渡辺将史, 小紫公也, 荒川義博: マイクロ固体ロケットの性能に与えるスラスタ形状の影響, 平成 20 年度宇宙輸送シンポジウム講演集, STCP-2008-16, 2008.