

ボロン硝石の半導体レーザー着火におけるレーザー波長の影響

Effect of Laser Wavelength on Diode Laser Ignition of Boron Potassium Nitrate

中野 正勝¹⁾

Masakatsu Nakano¹⁾

Abstract: The effects of wavelength of laser diodes on ignition power and probability of a pyrotechnic ignitor—boron–potassium nitrate (B/KNO₃)—initiated in vacuum has been investigated experimentally and numerically at irradiation wavelengths of 462, 520, and 808 nm for use in micro-rocket motor applications. As observed during experiments, the minimum ignition power, at which ignition of at least one B/KNO₃ sample occurred, equaled 152 ± 2 mW, 162 ± 2 mW, and 199 ± 2 mW, respectively, for the three above-mentioned wavelengths, thereby demonstrating a decrease with reduction in laser-irradiation wavelength. In contrast, values of the minimum 100-percent ignition power, at which all B/KNO₃ samples were observed to have ignited, equaled 413 ± 2 mW, 382 ± 2 mW, and 260 ± 2 mW corresponding to the said three wavelengths, thereby demonstrating an increase with reduction in irradiation wavelength. Simultaneously, the ignition probability demonstrated rapid increase from 0 to 100 percent as a function of the laser power when employing the 808-nm laser diode for ignition, whereas the corresponding increase in probability values when employing the 462- and 520-nm laser diodes was rather gradual. To provide a scaling model for design of a laser-diode-based B/KNO₃ ignitor, a laser-heating model was developed. The results successfully predict the minimum ignition power whilst demonstrating good agreement with experimental data.

Keywords : Laser Ignition, B/KNO₃, Vacuum, Diode Laser, Wavelength

1. 緒言

小型・低コスト・高出力の半導体レーザーを利用することによって、従来の火工品の点火装置を小型軽量化することができる¹⁻⁵⁾。部品の小型化と消費電力の低減が必須である宇宙機において、半導体レーザーを用いた着火方式は、点火玉までの電気的なリード線が不要であること、省スペース・低コスト化が可能なこと、着火部への光路を遮断する装置を Safe Arm Device として設けることで意図しない着火を容易に防ぐことができるなどの利点が多い。本研究で扱う B/KNO₃ は真空中での着火が可能であることから宇宙用ロケットの着火器に長年使用されており、半導体レーザーによる着火方式と組み合わせることで、近年発展が著しい超小型宇宙機にも搭載可能な小型固体ロケットの着火器への応用が期待できる。

2009年に東京都立産業技術高等専門学校が開発した超小型衛星「KKS-1」(図1)のスラスターとして、近赤外波長(808 nm)出力1 Wの半導体レーザーを用いた小型固体ロケットが搭載された³⁾。KKS-1は、一辺の長さが15 cm、総重量2 kgの超小型衛星で、H2A 15号機によって7基のピギーバック衛星の1基として打ち上げられた。KKS-1は、H2A 15号機への搭載条件となる火工品とクラス4レーザーの使用に関する安全要件を満たしていた。このKKS-1用に開発されたレーザー着火装置は、東京大学が2017年に開発した

レーザー着火マイクロ小型ロケット(LIMO)の着火装置として使用できるように改修された(図2)^{4,5)}。KKS-1およびLIMOに搭載されたレーザー着火装置は、波長808 nmの半導体レーザーを使用することを前提に設計されており、半導体レーザーの絶対最大出力は1 W、着火部のレーザー照

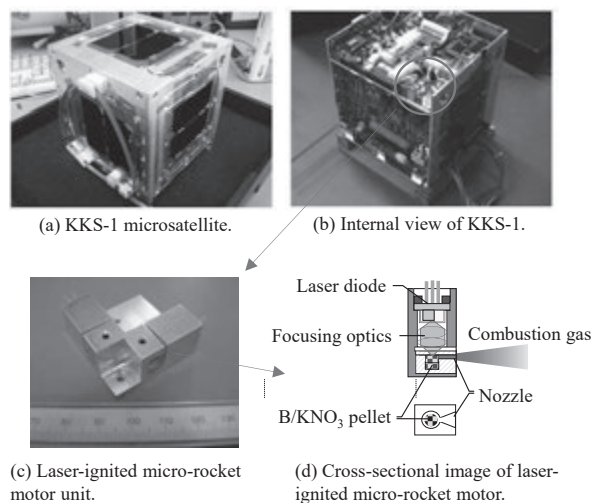


図1 KKS-1のレーザー着火装置—(a) KKS-1衛星; (b) KKS-1の内部; (c) レーザー着火装置; (d) レーザー着火装置の断面図。

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

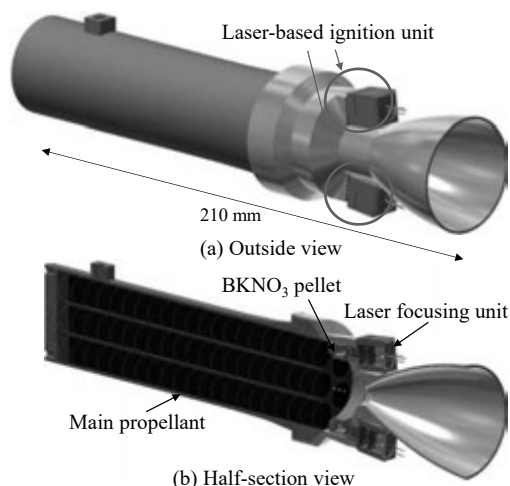


図2 LIMOのレーザー着火装置—(a)外観図; (b)断面図.

射強度は $3.2 \times 10^3 \text{ W/cm}^2$ である。レーザー着火の信頼性を実証するために、100個以上の着火器サンプルを用いて着火の有無を確認する試験を行ったが、レーザー照射パワーに対する着火確率の取得など物理的な着火特性の把握は行っていない。波長 808 nm の半導体レーザーを採用したのは、当時最も入手が容易だったからであるが、現在では紫外から近赤外に亘る種々の波長の半導体レーザーが入手可能であり、レーザー着火装置に組み込んで試験することができる。

宇宙機の小型化は今後も進むことが予測されており⁹⁾、レーザー着火装置の低電力化と小型化も引き続き求められている。このような要求に応えるためには、真空中での B/KNO₃ のレーザー着火に関して、最小着火パワー（最低でも1つのサンプルを着火させることができる最小パワー）や最小 100%着火パワー（全てのサンプルを着火させることができる最小のパワー）の他、レーザーパワーに対する着火確率の推移など基礎的なデータの取得やそれらのモデル化が重要になっている。上記のパラメータにおいて、最小着火パワーは、偶発的で意図しないレーザー照射時においても B/KNO₃ が着火することがないように守るべく最小の照射パワーを与える。また、最小 100%着火パワーは、レーザー着火装置に組み込むレーザーが最低限出すべき出力を与えることになる。この他にも、ロジスティック回帰分析により得られる 50%着火パワーとそれに伴う標準偏差はレーザー着火装置の信頼性を評価する上での指標を与え、ユーザーが求める信頼性を満たすようにレーザー照射パワーを最適化する上で重要である。例えば、6 σ 設計ルールを採用する場合、照射レーザーパワーは 50%着火パワーに 6 σ を加えた値以上でなければならない。しかしながら、真空中での B/KNO₃ の半導体レーザーによる着火に関しては、限られた数の研究しか行われていない^{3-5,7)}。

レーザーを用いた B/KNO₃ の着火については、いくつかの研究⁷⁻¹²⁾が行われているが、そのほとんどは、真空中で

表1 ホウ素の吸収率と吸収係数¹⁶⁾.

波長 [nm]	462	520	808
吸収率	0.69	0.70	0.74
吸収係数 [1/cm]	67800	24200	140

はない、すなわち大気圧下もしくは加圧状態で行われている。Yong ら⁸⁾は、広帯域キセノンランプと高出力半導体レーザーを用いて、B/KNO₃（実験では SR44 と呼称）などの火工品の着火を行い、着火閾値に対する照射波長の影響を調べた。彼らの実験では、キセノンランプから放射される電磁スペクトルのうち、紫外光（340 nm）と可視光（500 nm）では発火しなかった。しかし、キセノンランプの波長 710 nm や半導体レーザーの近赤外波長（810 nm）では着火が確認された。Armada ら⁹⁾は、レーザー着火に及ぼす波長、火薬の組成、火薬の閉じ込めの影響を調査した。彼らは、アルゴンレーザーの 500 nm における典型的な出力密度範囲において SR44 の着火時間が再現できないことを確認した。また、小径（100–250 μm ）の照射スポットでは、近赤外ダイオードレーザー（808 nm 動作）を使用した場合と比較して、アルゴンレーザー（500 nm）を使用した場合に SR44 が速く着火することを確認している¹⁰⁾。Gillard ら^{11,12)}と中山ら¹³⁾は、非真空状態で実験と数値解析を行っており、実験データと数値解析の間に比較的良好な一致を得ている。

真空環境下でのレーザー着火の実験は Koizumi ら⁷⁾により行われており、真空環境下で波長 808 nm の半導体レーザーを用いて B/KNO₃ を着火する場合の着火確率をレーザー照射パワーの関数として求めている。実験的に得られた最小着火パワーは 160 mW、最小 100% 着火パワーは 400 mW であり、それらの値は B/KNO₃ 表面への入熱を考慮したフーリエの熱伝導方程式からも数値的に確認された。

レーザー照射による火工品の着火性は、照射波長の関数である吸収率や吸収係数などの光学的パラメータに大きく影響されることが報告されている^{14,15)}。B/KNO₃ の構成要素の一つであるホウ素の吸収率は、可視光から赤外光の間の波長域で 0.70–0.75 であり、波長が長くなるほど大きくなる（表1の中段）¹⁶⁾。そのため吸収係数も波長によって変化することとなり、462 nm では約 $6.8 \times 10^4 \text{ cm}^{-1}$ 、808 nm では $1.4 \times 10^2 \text{ cm}^{-1}$ まで低下する（表1の下段）¹⁶⁾。KNO₃ の吸収係数はホウ素の吸収係数に比べて3桁以上大きい¹⁷⁾、入射したレーザー光の大部分がホウ素粒子に吸収されることになる。その結果、レーザー加熱とそれに続くレーザー着火は、各波長におけるホウ素の吸収係数の影響を強く受ける。ホウ素の吸収係数が大きい 462 nm の半導体レーザーを使用した場合、入射したレーザーパワーの大部分が照射スポットの薄い表面層で吸収されるため、少ない照射レーザーパワーで温度が上昇しやすい一方で、808 nm などの長波長では、同じ温度上昇を与えるには大きな照射パワーが必要になる。この違いが最小着火パワーや着火確率などの着火性能に影響することが予想される。

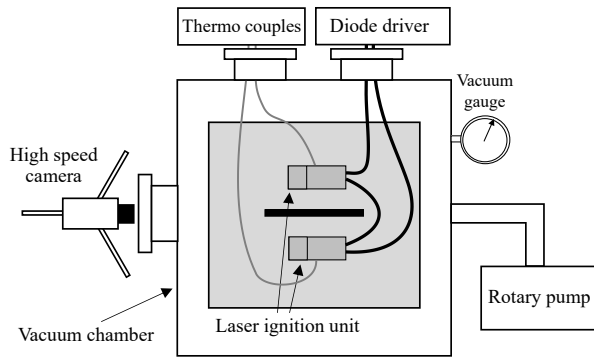


図3 実験装置の概略図。

本研究では、半導体レーザーを用いた真空下におけるB/KNO₃の着火について、着火性能に及ぼすレーザー照射波長の影響を調査した。一般的な超小型宇宙機の着火装置の電力は数W以下に制限されているため、エネルギー変換効率を考慮して、出力が400–500 mW以下の連続発振半導体レーザーを使用することとした。実験では、波長462 nm, 520 nm, 808 nmの半導体レーザーを使用した。半導体レーザー、光学系とB/KNO₃を一体化したレーザー着火ユニットを作成し、真空容器内においてレーザー着火させることで着火データを取得した。実験結果の説明を与えるために数値シミュレーションも併用した。

2. 実験の説明

図3はレーザー着火実験で用いた実験系の概略図である。1辺0.8 mの立方体の真空容器内に設置したブレッドボード上に図4に示すレーザー着火ユニットを配置した。真空容器内部はロータリーポンプで減圧している。レーザー着火ユニットは3Dプリンタで製作したプラスチックケースに半導体レーザー、レンズ、B/KNO₃ペレットを1個入れたものである。半導体レーザーは、波長462 nm (Thorlabs L462P1400MM)、波長520 nm (Nichia NDG7475)、波長808 nm (Hamamatsu Photonics K.K. L8763-42)の3種類を使用した。レーザー光の集光には2枚の非球面レンズ(Thorlabs CAY033およびCAW110)を用い、有効集光距離は3.74 mmである。B/KNO₃ペレットは、直径3.2 mm、軸方向の長さ2.0 mmの円筒形で、アクリル製の窓の表面に直接接触させている。この配置はこれまでの実験結果に基づいたもので、100%の着火率を実現するためには、アクリル窓とペレット表面との間の距離がゼロまたは5 mm以上でなければならない。また、着火遅れを最小限に抑えるためにはアクリル窓とペレットとを接触しなければならないことによる¹⁸⁾。本実験でのレーザー光のスポット径は、B/KNO₃ペレットの表面上で100 μmであり、照射強度はレーザー照射パワー200 mWにおいて $1.28 \times 10^3 \text{ W/cm}^2$ であった。スポット径に対する波長の影響は、光学ソフトウェアOSLOを用いて解析し、3つの半導体レーザーの発光点の違いを考慮して半導体レーザーの位置を決定した(図4右図)。なお、このスポット径は、文献

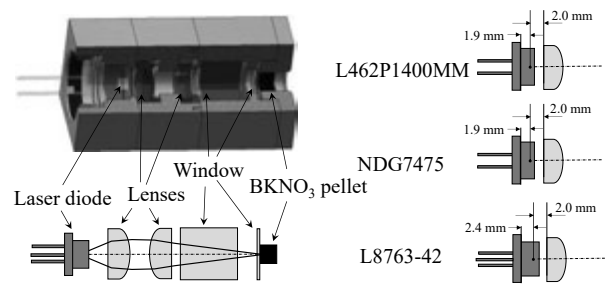


図4 レーザー着火ユニットの3D-CAD画像(左上)とレーザー経路の模式図(左下)、及び半導体レーザーと左側レンズとの位置関係(右)。

10および12で報告されている実験および数値解析で得られた最適な照射強度の値と同程度のものであり、KKS-1およびLIMOの開発において最も着火遅れが短かったものである。なお、今回の実験で使用したB/KNO₃ペレットは、日油技研工業株式会社から購入したもので、ホウ素28%、硝酸カリウム70%、バインダ2%で構成されている。ホウ素は直径1 μm以下の粉末を採用した。バインダの成分は開示されていない。

実験の一般的な手順は以下の通りである。

- 1) 駆動電流を設定することでレーザー照射パワーを決め、波長に合わせて校正したパワーメータ(Thorlabs PM160T)を用いて照射パワーを測定した。照射パワーは、集光光学系の影響を排除するため、B/KNO₃に接するアクリル窓の下側で測定した。レーザー照射時間は、KKS-1やLIMOにおけるシステム側からの要求値^{3,5)}に基づき100 msとした。
 - 2) レーザー着火ユニットを真空容器内に設置した後、ロータリーポンプを用いて動作圧力を10 Pa程度に下げる(先行研究[19]から真空容器内部の圧力が1 kPa未満であればB/KNO₃の燃焼速度への影響は無視できるが、真空容器内部の圧力変化をレーザー着火ユニットの着火の確認に用いていることからB/KNO₃燃焼による圧力上昇を判定できる領域まで圧力を下げている)。
 - 3) レーザーを照射してレーザー着火ユニットのB/KNO₃を着火させる。レーザー出力回路の信号に同期して高速度カメラを動作させ、レーザー照射から着火に至る過程を撮影した。着火の有無は、B/KNO₃ペレットの燃焼を示す真空チャンバー内の圧力変化(ペレット1個あたり平均18 Paの上昇)とレーザー着火ユニットからの発光で判定した。雰囲気温度はレーザーの着火性能に影響を与えることが分かっているため²⁰⁾、すべての実験は23–26°Cの範囲で行われた。雰囲気温度によるレーザー出力の変化は2%未満である。レーザー出力と雰囲気温度との関係は、事前に恒温槽(ESPEC PU-2J)を用いた実験から求めた。
- 着火確率を実験的に算出するために268個のレーザー着火ユニット(波長462 nm, 520 nm, 808 nmの実験でそれぞれ118個, 86個, 64個照射)を使用した。着火確率0%と100%の判定には、慣例的に5回または10回の連続不着火数と連続着火数を要することから、レーザー着火ユニット

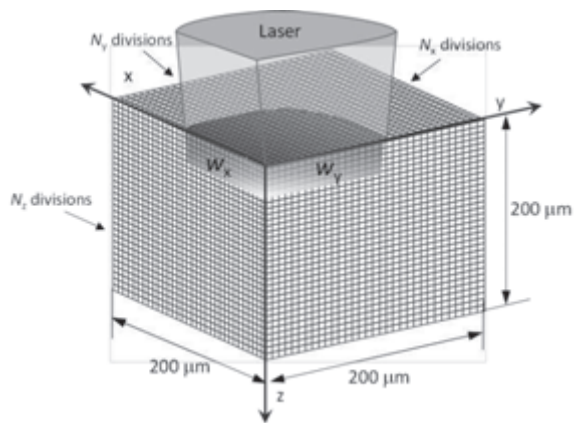


図5 数値解析領域とレーザー照射部.

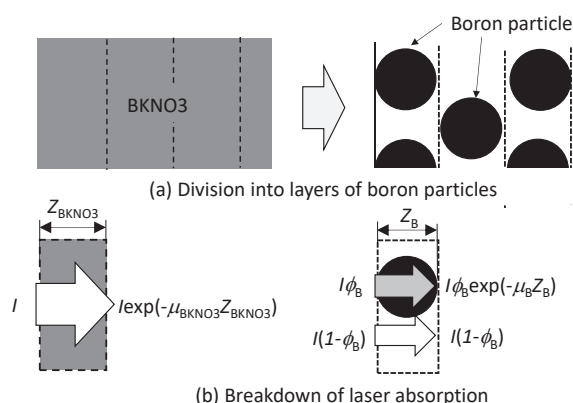


図6 B/KNO₃のレーザー吸収モデル.

の個数の許す6回までの連続試行を行った。すなわち、照射パワーを変え、6回連続して着火しない場合に着火確率を0%とした。同様に6回連続して着火した場合には着火確率を100%とした。各試験の終了後、集光光学系を水とアルコールで洗浄し、その後乾燥させてB/KNO₃反応物による汚染を除去した。発火していないB/KNO₃ペレットは破壊し、新しいペレットと交換して実験を行った。

3. 数値解析の説明

半導体レーザーによるB/KNO₃の着火を理解するためにレーザー加熱モデルを開発した。計算領域を図5に示す。小泉らの計算モデル⁷や中山らのモデル¹³)によれば、着火の有無の判定はレーザー照射面の温度が着火閾値となる温度を超えるかどうかで決定される。そこで、B/KNO₃の燃焼反応が始まる前までのレーザー加熱と熱伝導にのみ着目したモデルを構築している。支配方程式はフーリエの熱伝導方程式である

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \nabla^2 T + Q_{\text{laser}} \quad (1)$$

ここで、 ρ 、 C_p 、 λ はそれぞれB/KNO₃の密度、比熱、熱伝導率を表し、 Q_{laser} はレーザー吸収による発熱項である。具体的には

$$Q_{\text{laser}} = \alpha I(x, y, t) \mu_{\text{BKN03}} e^{-\mu_{\text{BKN03}} z} \quad (2)$$

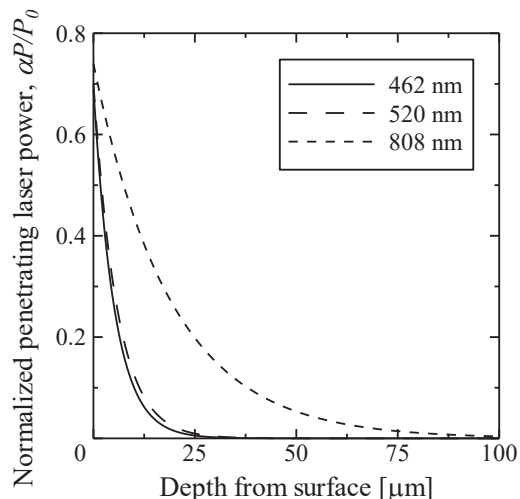


図7 レーザーパワーと浸透距離.

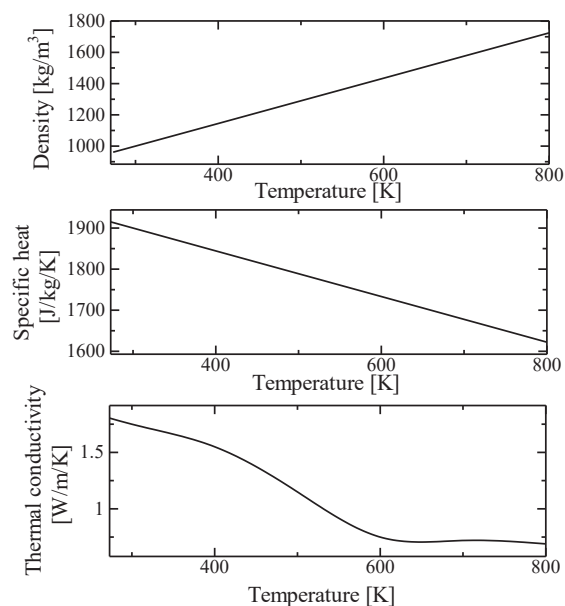


図8 B/KNO₃の物性値の温度依存性：(a)密度，(b)比熱，(c)熱伝導率.

である。ここで、 α は入射面の吸収率、 μ_{BKN03} はB/KNO₃の吸収係数を表す。関数 $I(x, y, t)$ はレーザーパワーの分布を示し次のように表される。

$$I(x, y, t) = \frac{2P}{\pi w_x w_y} e^{-\left\{ \left(\frac{2x}{w_x} \right)^2 + \left(\frac{2y}{w_y} \right)^2 \right\}} \quad (3)$$

ここで、 P は入射レーザーパワー、 w_x と w_y は x 軸と y 軸方向のビーム幅である。

吸収係数 μ_{BKN03} の正確な測定は困難であるため、層状に分布するホウ素粒子内でのみレーザー吸収が起こるという単純なモデル(図6参照)を用いて、以下の関係式で値を推定した。

$$I e^{-\mu_{\text{BKN03}} z_{\text{KNO3}}} = \phi_B I e^{-\mu_B z_B} + (1 - \phi_B) I e^{-\mu_{\text{KNO3}} z_{\text{KNO3}}} \\ \cong I \phi_B e^{-\mu_B z_B} + (1 - \phi_B) I \quad (4)$$

ここで、 μ_B 、 μ_{KNO3} はそれぞれホウ素と硝酸カリウムの吸収係数($\mu_{\text{KNO3}} \gg \mu_B$)、 Z_{BKN03} 、 Z_B 、 Z_{KNO3} はそれぞれB/KNO₃、ホウ素、KNO₃内の距離($Z_{\text{BKN03}} \cong Z_B \cong Z_{\text{KNO3}}$)、 ϕ_B はホウ素の面積率を表す。照射波長462 nm、520 nmでは、表1に示

表 2 波長 462 nm, 520 nm, 808 nm のレーザー使用時における各パワーにおける着火数と試行数.

462 nm	パワー [mW]	113±9	152±2	183±17	236±20	303±23	332±22	377±7	423±11	
	着火数/試行数	0/6	2/16	7/26	9/22	9/16	10/14	9/12	6/6	
520 nm	パワー [mW]	115±2	162±2	184±2	229±9	263±2	329±2	340±2	365±2	382±2
	着火数/試行数	0/6	1/6	2/6	10/20	10/14	5/6	9/10	9/10	6/6
808 nm	パワー [mW]	180±2	199±2	222±2	236±2	260±2	275±2	366±2	409±2	468±2
	着火数/試行数	0/6	5/16	6/14	8/12	6/6	2/2	2/2	2/2	2/2

すように、ホウ素の吸収長がそれぞれ $0.15 \mu\text{m}$ ($\mu_B = 6.80 \times 10^4 \text{cm}^{-1}$)、 $0.41 \mu\text{m}$ ($\mu_B = 2.42 \times 10^4 \text{cm}^{-1}$) であることから、 B/KNO_3 の最表面の第 1 層に存在するホウ素粒子にレーザー吸収が起こる¹⁶⁾。したがって、 μ_B と Z_B の値は、波長 462 nm のレーザー照射時にはそれぞれ $6.80 \times 10^4 \text{cm}^{-1}$ と $1 \mu\text{m}$ (ホウ素粒子 1 個分の直径)、波長 520 nm のレーザー照射時にはそれぞれ $2.42 \times 10^4 \text{cm}^{-1}$ と $1 \mu\text{m}$ とした。一方、波長 808 nm のレーザー照射では、ホウ素の吸収長が約 $70 \mu\text{m}$ ($\mu_B = 140 \text{cm}^{-1}$) と、ホウ素粒子の大きさをはるかに超えるため、ホウ素粒子層間でのレーザー光の反射・吸収現象が無視できなくなる。そこで、式(3)の第 1 項を $I\phi_B e^{-\mu_B D_B} \times \alpha^2 / \{1 - (1 - \alpha)^2\}$ に置き換え、層間でのレーザーパワーの吸収を考慮した。このモデルから得られる波長 462 nm, 520 nm, 808 nm における浸透長とレーザーパワーの変化を図 7 に示す。

式(1)の計算は有限差分法で行い、図 5 の格子に対して、空間 2 次精度の中央差分と時間 4 次精度のルンゲクッタ法を適用した。レーザーのプロファイルは、ペレット表面で $w_x = w_y = 100 \mu\text{m}$ のガウス分布に従うと仮定した。 B/KNO_3 の初期温度は 298 K とし、照射面以外の境界では温度変化がないものとした。 B/KNO_3 の温度が閾値を超えた時点で着火条件を満たしたとして計算を終了したが、その閾値については 720 K とした⁷⁾。計算に用いた B/KNO_3 の密度、比熱、熱伝導率の値を図 8 に示す¹³⁾。

なお、図 7 に示すように、波長 462 nm および 520 nm の半導体レーザーを用いて照射した場合、入射したレーザーパワーは B/KNO_3 の最表面のごく薄い層で吸収されることから、メッシュ分割数の影響を強く受ける。シミュレーション結果がメッシュ分割数に依存しないことを示すために、照射波長が 462 nm と 808 nm の場合について、メッシュサイズを変えて得られた結果を次節の図 11 の右図に示すこととする。メッシュの分割数を 100 程度にすることで適度な収束が得られ、分割数を 96 から 128 に変更した場合に生じる予測温度の最大偏差は 2.5% となる。この結果から、計算コストを削減し、より速く収束させるために、96 分割のメッシュを採用することとした。

4. 結果および考察

4.1 表と図の概略説明

表 2 は試行数に対して得られた着火数を照射パワーに対して示したもので、レーザーの波長ごとに表している。これらのデータは、レーザーに流す電流を 100 mA 単位で変化させて取得した。また、表 2 のボールド体の部分は最小着火パワーと最小 100%着火パワーを与える部分である。

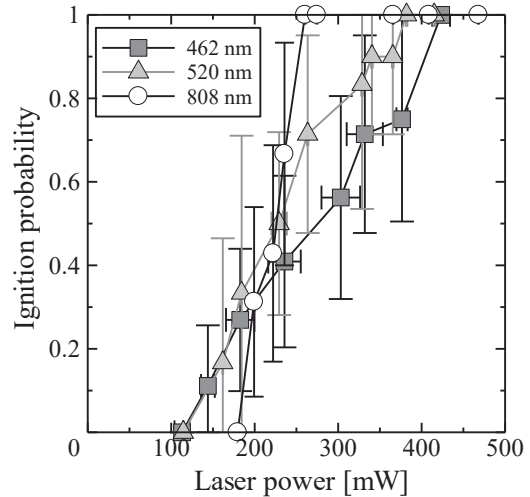


図 9 着火確率とレーザー出力

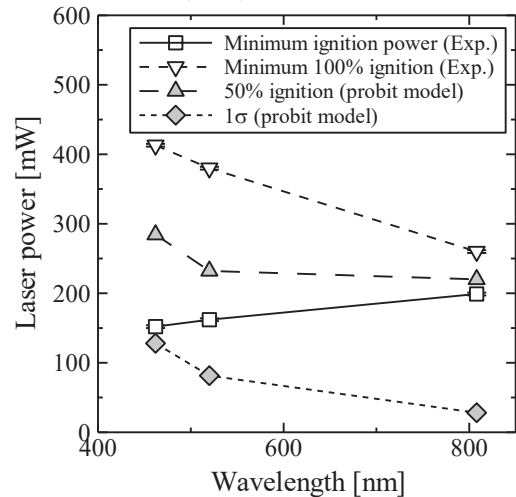


図 10 着火パワーとレーザー波長：最小着火パワー、100%着火パワー、プロビットモデルによる 50%着火パワーと標準偏差。

図 9 は表 2 のデータに基づいて B/KNO_3 の着火確率を照射パワーの関数としてプロットしたものである。各データには 95% 信頼区間のエラーバーが設定されている。

図 10 はロジスティック回帰分析による着火確率と照射パワーの関係を示している。最小着火パワー、50%着火パワー、最小 100%着火パワーを表す曲線を照射波長ごとに示したものである。

4.2 着火パワー

図 10 に示すように、最小着火パワーは、照射波長 462 nm で $152 \pm 2 \text{mW}$ 、520 nm で $162 \pm 2 \text{mW}$ 、808 nm で $199 \pm 2 \text{mW}$ と照射波長が短いものほど小さかった。なお、照射波長 808

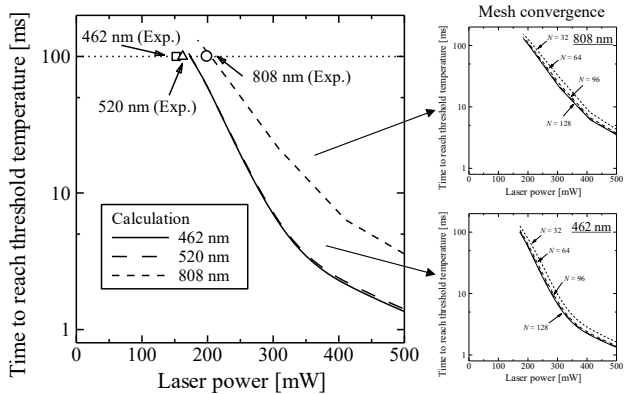


図 11 照射波長 462 nm, 520 nm, 808 nm における着火閾値温度 720 K に達する時間と照射パワーの関係。

nm における結果は、小泉ら⁷⁾が報告した真空中における近赤外半導体イオードを使用した場合の最小着火パワー160 mW と概ね一致している。

図 11 は、波長 462 nm, 520 nm, 808 nm のレーザーを照射したときに着火閾値温度 720 K に到達するまでの時間を、照射レーザーパワーの関数として表したシミュレーションの結果である。照射時間が同じであれば、波長 462 nm と 520 nm のレーザー光を用いた場合に閾値温度に到達するために必要なレーザーパワーはほぼ等しく、波長 808 nm のレーザー光を用いた場合にはこれらよりも大きいレーザーパワーが必要となる。照射時間を 100 ms とした場合、着火閾値 720 K に達するために必要な半導体レーザーの出力は波長 462 nm, 520 nm, 808 nm のそれぞれに対して 160 mW, 163 mW, 200 mW であった。実験ではレーザー加熱は 100 ms で終了し、それ以降の加熱は行わなかったことから、上記の値はレーザーを用いた点火に必要な最小パワーに相当する。シミュレーションの結果は実験結果とよく一致し、誤差は 5% 以下であった。

なお、実装においては、B/KNO₃ の形状や位置、各光学パラメータ等にランダムで細かなずれが発生するため、レーザー着火は本質的に確率的な現象となる。したがって上記のシミュレーションで得られたパワーは着火を引き起こすための条件の一つであるものの 100% の着火を引き起こすものではなく、より多くのパワーが 100% の着火を引き起こすために必要とされる。すなわち、最小 100% 着火パワーは最小着火パワーよりも大きくなる。

図 10 から最小 100% 着火パワーについては、波長 462 nm, 520 nm, 800 nm でそれぞれ 423 mW, 382 mW, 260 mW であった。これは最小着火パワーで見られた波長と最小着火パワーの関係と反対の傾向を示しており、波長の長い 808 nm において最小 100% 着火パワーが一番小さく、波長の最も短い 462 nm で最も大きくなっている。なお、着火率が 0% から 100% に推移するためには、波長 462 nm で 423 - 152 = 271 mW, 520 nm で 382 - 162 = 220 mW, 808 nm で 260 - 199 = 61 mW を要しており、波長が短いものほど全てのペレットを着火させる

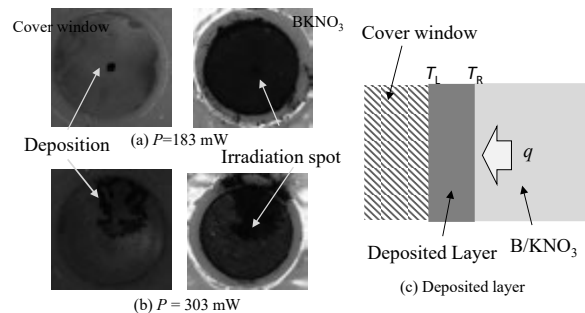


図 12 B/KNO₃ 表面とカバー窓の写真：(a) P 183 mW, (b) P=303 mW, (c) 堆積層における熱バランス。

ために必要なパワーは大きくなっている。この理由については次節で考察する。

4.3 着火確率と信頼性

図 9 に示すように、波長 808 nm のレーザー光を照射した場合の着火確率は、ごくわずかな照射パワーの変化で 0 から 1 へと変化している。一方で、波長 462 nm と 520 nm の着火確率は、着火率 0% から 100% の間に広い照射パワーの遷移領域があることが分かる。前節の結果からも、着火率が 0% から 100% に推移するためには、波長 462 nm で 271 mW, 520 nm で 220 mW が必要であり、波長 808 nm の 61 mW と比較すると約 3.6-4.4 倍の追加のパワーを要している。

図 12 (a), (b) は、着火に失敗した B/KNO₃ ペレットとアクリル窓の写真である。B/KNO₃ ペレット表面にレーザーの照射痕がある一方で、カバー窓に黒い汚れが付着していた。B/KNO₃ ペレットはボロンと硝酸カリウムの粉末を加圧して生成することから剥離も生じやすい。アクリル窓表面は常温度であることから剥離した B/KNO₃ は反応を起こすことなくアクリル窓表面に付着して薄い層を形成すると考えられる。B/KNO₃ の反応閾値温度が 720 K であることから、この付着層の厚さ δ は一次元の熱伝導方程式を用いて評価することができる。図 12 (c) に基づき、カバー窓に接する部分の温度 T_L は周辺温度と同程度の 300 K とし、B/KNO₃ に接する側の温度 T_R は 720 K とする。B/KNO₃ の燃焼速度が 4 mm/s であり¹⁹⁾、反応熱が 5 MJ/kg であることから、この層への熱入力 q は 3 MJ/m²・s である。図 8 の物性値を用いることにより、 $\delta = \kappa(T_R - T_L)/q = 0.7(720 - 300)/3 \times 10^6 \sim 10 \mu\text{m}$ と概算できる。

図 7 から厚さ $\delta = 10 \mu\text{m}$ の B/KNO₃ 層を透過した後のレーザーパワーは波長 808 nm で入射前の約 40%、波長 462 nm と 520 nm とで入射前の約 10% である。したがって、厚さ 10 μm の付着層を通過した後に波長 808 nm のレーザーと同程度の加熱を行うためには、波長 462 nm と 520 nm のレーザーにおいては 40%/10% = 4 倍の入射パワーが必要となる。この値は、着火率が 0% から 100% に推移するためには必要なパワーが、波長 462 nm と 520 nm において波長 808 nm の約 3.6-4.4 倍必要であることと整合する。すなわち、アクリル窓に近傍に形成された B/KNO₃ の剥離層が波長 462 nm と 520 nm で最小 100% 着火パワーを増加させた原因と考えられる。

なお、図 10 に示した 50%着火パワーと標準偏差を用いて、レーザー着火装置の信頼性を正規分布に基づいて評価することができる。例えば、LIMO に採用されているレーザー着火装置は、波長 808 nm の半導体レーザーを用いて 1 W のレーザーパワーで動作していた。光学系でのレーザーパワーの損失を考慮しても B/KNO₃ペレット表面への入射レーザーパワーは約 800 mW と推定され、これは 50%着火パワーに対して 20.7 σ 高く、優れた信頼性を確保していたことを示している。ここでもし、6 σ 設計ルールを採用する場合には、B/KNO₃ペレット表面への入射レーザーパワーを 388 mW にまで低減することができ、消費電力の削減と装置の小型化、ひいてはペイロードの増加に貢献することができる。

これまでの議論は、B/KNO₃への照射パワーを用いていたが、実運用においては半導体レーザーでのエネルギー変換効率も考慮する必要がある。今回使用した半導体レーザーの定格におけるエネルギー変換効率は波長 462 nm の L462P1400MM で約 21%、波長 520 nm の NDG7475 で 14%、波長 808 nm の L8763-42 で 42%であり、波長 808 nm の L8763-42 が最もエネルギー変換効率が高かった。したがって、最小 100%着火パワーが低く、エネルギー変換効率が高い波長 808 nm の L8763-42 が実運用において最も適していると言える。

5. まとめ

小型軽量な半導体レーザーを用いて B/KNO₃を着火するレーザー着火器は、近年著しい発展を遂げる超小型宇宙機の推進装置の着火装置として有望である。この着火装置を高性能化していく上で必要な着火パワーと着火率について、半導体レーザーの波長を変えて実験的に取得した。得られた最小着火パワーは、半導体レーザーの波長が 462 nm で 152 \pm 2 mW、520 nm で 162 \pm 2 mW、808 nm で 199 \pm 2 mW であり、波長が短いほど小さかった。一方、100%の着火に必要な最小レーザーパワーは、波長 462 nm で 413 \pm 2 mW、520 nm で 382 \pm 2 mW、808 nm で 260 \pm 2 mW であり、波長が大きいものほど小さかった。波長 808 nm のレーザーを使用した場合の着火率は照射パワーの増加に対して急激に上昇する一方で、波長 462 nm と 520 nm のレーザー照射では照射パワーの増加に対して緩やかに上昇することが確認された。ロジスティック回帰分析の結果、50%の着火確率を得られるレーザーパワーは、波長 462 nm で 284 mW、520 nm で 232 mW、808 nm で 220 mW であり、その場合の標準偏差は波長 462 nm で 128 mW、520 nm で 81 mW、808 nm で 28 mW であった。これらの値は、レーザー着火装置の信頼性を評価する上で重要であり、消費電力と信頼性のトレードオフに利用可能である。

実験をシミュレートするために行った数値解析では、波長 462 nm で 160 mW、520 nm で 163 mW、808 nm で 200 mW の最小着火パワーが得られた。これらの値は実験結果とよく一致しており誤差は 5%以下であった。一方で、B/KNO₃ペレットとカバー窓の間に生じる薄い B/KNO₃層による吸収損失を考慮すると、100%の着火を実現するパワーは波長

808 nm で最も小さくなることも分かった。いずれも、B/KNO₃のレーザーパワーの吸収が、波長が短い場合に大きく、波長が長い場合に小さいことが原因である。

超小型宇宙機などの推進装置にレーザー着火装置を採用する場合には、コンパクトであるとともに、消費電力の削減と高い信頼性の獲得が重要である。今回使用した波長 462 nm、520 nm、808 nm の半導体レーザーの全てで 500 mW 以下の照射パワーで B/KNO₃の真空下での着火が可能であった。波長による違いに着目すると、波長 462 nm と 520 nm の半導体レーザーは、最小着火パワーでは波長 808 nm レーザーよりも優位であるものの、最小 100%着火パワーでは劣る結果となった。具体的な選定を考える場合、半導体レーザーにおける電力からレーザー光へのエネルギー変換効率も重要な要素であり、本研究で用いた光学系と B/KNO₃ペレットの配置においては、808 nm の半導体レーザー使用によるレーザー着火系の構築が最も適している結果となった。

参考文献

- [1] H. Nasim, Y. Jamil, "Diode Lasers: From Laboratory to Industry," *Optics & Laser Technology* 56 (2014) 211–222.
- [2] D. N. Herreros, X. Fang, "Laser Ignition of Elastomer-Modified Case Double-Base (EMCDB) Propellant Using a Diode Laser," *Optics & Laser Technology* 89 (2017) 21–26.
- [3] M. Nakano, H. Koizumi, M. Watanabe, Y. Arakawa, "Laser Ignition Microthruster Experiments on KKS-1," *Trans. JSASS Aerospace Tech. Japan*. 8 (2010) Pb_7–Pb_11.
- [4] S. Kojima, J. Asakawa, H. Koizumi, M. Nakano, "Study on Stable Operation of Micro-Thruster Using Stacked Solid Propellant Pellets," *J. JSASS*. 65 (2017) 215–218.
- [5] J. Asakawa, H. Koizumi, M. Nakano, "Laser-Ignited Micro-motor Using Multiple Stacked Solid Propellant Pellets," *J. Propul. Power* (2018), published online DOI:10.2514/1.B36715.
- [6] B. Doncaster, C. Williams, "2017 Nano/Microsatellite Market Forecast," *SpaceWorks Enterprises, Inc.*, 2017.
- [7] H. Koizumi, M. Nakano, M. Watanabe, T. Inoue, K. Komurasaki, Y. Arakawa, "Ignition Characteristics of Boron/Potassium Nitrate Using a Diode Laser in a Vacuum," *International Journal of Energetic Materials and Chemical Propulsion*. 8 (2009) 345–356.
- [8] L. Yong, F. Lui, "Radiative Ignition of Pyrotechnics: Effect of Wavelength on Ignition Threshold," *Propellants, Explos., Pyrotech.* 23 (1998) 328–332.
- [9] S. R. Ahmad, D. A. Russel, "Laser Ignition of Pyrotechnics — Effects of Wavelength, Composition and Confinement," *Propellants, Explos., Pyrotech.* 30 (2005) 1312–1392.
- [10] S. R. Ahmad, D.A. Russell, "Studies into Laser Ignition of Confined Pyrotechnics," *Propellants, Explos., Pyrotech.* 33 (2008) 396–402.
- [11] P. Gillard, F. Opdebeck, "Laser Diode Ignition of the B/KNO₃ Pyrotechnic Mixture: An Experimental Study," *Combust. Sci. Technol.* 179 (2007) 1667–1699.

- [12] P. Gillard, M. Roux, "Ignition of Pyrotechnic Mixture by Means of a Laser Diode. Part I: Numerical Modelling," *Propellants, Explos., Pyrotech.* 22 (1997) 256–262.
- [13] H. Nakayama, T. Miyashita, N. Yoshitake, R. Orita, "A Numerical Model of Laser-Induced Ignition of Boron / Potassium Nitrate Pyrotechnic Incorporating Temperature Dependence of Thermo-Physical Properties," *Science and Technology of Energetic Materials: J. Japan Explos. Soc.* 71 (2010) 98–105.
- [14] H. Östmark, N. Roman, "Laser Ignition of Pyrotechnic Mixtures: Ignition Mechanisms," *J. Appl. Phys.* 72 (1993) 1993–2003.
- [15] H. Östmark, M. Carlson, K. Ekvall, "Laser Ignition Explosives: Effects of Laser Wavelength on the Threshold Ignition Energy," *J. Energetic materials.* 12 (1994) 63–83.
- [16] H. Werheit, R. Schmechel, "The Complete Optical Spectrum of β -Rhombohedral Bom," *J. Sol. St. Ch.* 133 (1997) 129–131.
- [17] M. Hafez, I. S. Yahia, S. Taha, "Study of the Diffused Reflectance and Microstructure for the Phase Transformation of KNO_3 ," *Acta Phys. Pol. A* 127 (2015) 734–740.
- [18] T. Hayashi, H. Koizumi, J. Asakawa, M. Nakano, K. Komurasaki, "Ignition Probability Improvement of a Laser-Ignition Micro Solid Rocket," *Trans. JSASS Aerospace Tech. Japan.* 12 (2014) Tb_37–Tb_41.
- [19] 中野正勝, 各務聡, $\phi 3.2\text{mm}$ BKNO₃ ペレットの低圧下における燃焼速度の取得, *日本航空宇宙学会論文集* 64(2016), 139–143.
- [20] S-B. Xiang, X. Xiang, C-G. FFeng, "Effects of Temperature on Laser Diode Ignition," *Optik* 120 (2009) 85–88.