

# 半導体レーザーによる BKNO<sub>3</sub> の着火遅れの温度依存性評価

## Evaluation of Temperature Dependence of Ignition Delay of BKNO<sub>3</sub> by Diode Laser Irradiation

中野 正勝<sup>1)</sup>

Masakatsu Nakano<sup>1)</sup>

Abstract: This work presents a comparative study of experiments and calculations to understand the temperature dependence of ignition delay of BKNO<sub>3</sub> pyrotechnics by 1-Watt diode laser irradiation. For hot and cold operating conditions, experiments were conducted to measure the ignition delay times under various temperatures between -10°C to 75°C. To explain the temperature dependence of the ignition delay time of BKNO<sub>3</sub>, three models were proposed and their results were compared with that of the experiments. It was shown that the ignition delay time is influenced not only by the change in the reaction speed of BKNO<sub>3</sub> and the output power of a diode laser but also by the change in the refractive index and the thermal expansion/contraction of focusing optics.

Keywords : Temperature dependence, Ignition delay time, Laser ignition, BKNO<sub>3</sub>, Diode laser

### 1. 緒言

固体ロケットの着火器には、安全装置として着火器と推進薬との間を物理的に遮断する Safe Arm Device (SAD) という装置が必要であるが (MIL-STD-1576 requirement 202.1b) , 小型化が望まれる超小型宇宙機用固体ロケットにおいては、従来型の火道を遮断するタイプの SAD はスペースに制約があることから設置が難しい。火道を物理的に遮断するのではなく、着火のために必要とされるエネルギー伝達経路を遮断する方法もあり、その一つは図 1 に示す超小型衛星 KKS-1 で用いられたレーザー着火スラストのレーザー遮蔽板である<sup>1,2)</sup>。KKS-1 のレーザー着火スラストでは、1 W の半導体レーザーで BKNO<sub>3</sub> を着火させている。KKS-1 のレーザー着火スラストは JAXA の H2A の安全審査を通過して打ち上げられた実績があるため、レーザー遮蔽板を用いた SAD は今後も活用可能な有効な手段である。

KKS-1 のレーザー着火スラストは衛星バスの不具合により軌道実証されなかったが、そのシステムを発展させて、より大きなサイズの小型固体ロケットの着火器として使用することを旨としたレーザー着火器の研究を行ってきた。

レーザー着火では、確実な着火と着火遅れ時間のばらつきを抑えることが必要とされる。レーザー着火は、照射するレーザーパワーに強く依存することが知られており、BKNO<sub>3</sub> の着火には約 0.5 W 程度のレーザーパワーが必要とされる。したがって、商用で入手可能な 808 nm, 1 W の半導体レーザーを用いれば、着火そのものは確実に起こすことが可能であり、着火遅れ時間が重要な要素となる。

着火遅れ時間については、レーザー出力、照射強度、火薬の温度等の複数のパラメータで決定されると考えられ、大気圧下で実験結果をよく再現する 1 次元的なレーザー着

火モデルも提案されている<sup>3,4)</sup>。

超小型宇宙機用の固体ロケットでは、着火が実現するならば、レーザー受光面の入熱条件が 1 次元的である必要はなく、1 W 半導体レーザーの出力パターンである Gaussian 分布等の 2 次元的な入熱条件が現実的である。また、BKNO<sub>3</sub> の燃焼速度は圧力による影響を受けることから<sup>5)</sup>、真空を想定したモデル化が必要である。日陰・日照が繰り返され、温度が大きく変わる宇宙環境に対応するため、着火遅れ時間の温度依存性についてもモデル化しなくてはならない。

着火遅れ時間に影響を与えると考えられるレーザー照射強度は、使用する光学系により調整可能であり、レンズの組み合わせと配置を変えれば必要な照射強度を得ることができる。したがって、レーザー照射強度が着火遅れ時間に与える影響を調べるのは比較的容易である。一方、温度特性については、半導体レーザーの出力が雰囲気温度に伴い上下する特性と BKNO<sub>3</sub> の反応速度が増減する特性を併せて考慮する必要があり、さらには光学系の屈折率の変化や光学系ケースの伸び縮みの影響による照射強度の変化も考え

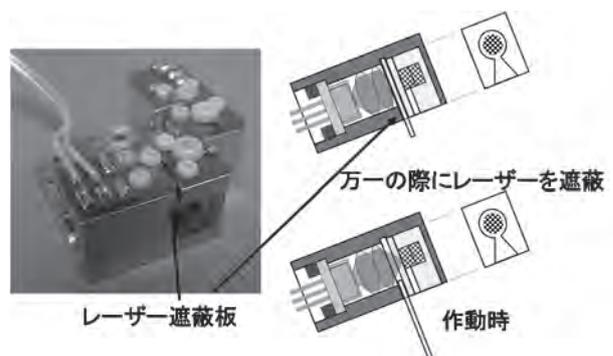


図 1 KKS-1 におけるレーザー着火スラストと SAD

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

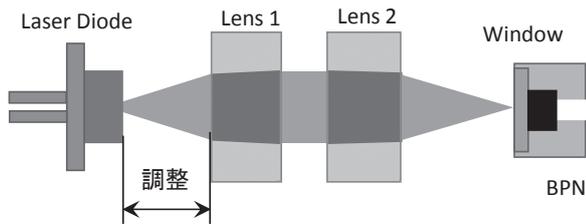


図2 レーザー着火装置の模式図

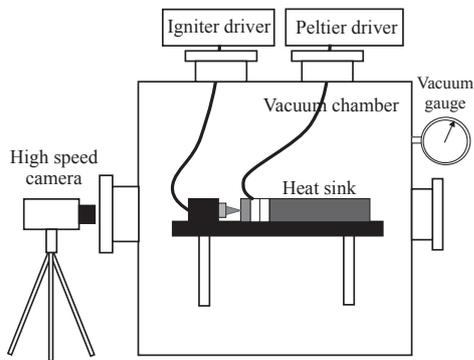


図3 真空容器と実験装置の概略

なくてはならず、簡単に評価することはできない。

着火遅れ時間を実験的に取得するには、真空環境下での実験であることから、多くの時間とコストがかかる。真空条件に加えて雰囲気温度を変えて着火試験を行う場合には、試験に伴う時間とコストが膨大であるため、数値解析の支援が無くてはならない。したがって、温度変化が着火遅れ時間に与える影響を高精度で評価できるモデルの構築は早急に取り組むべき課題である。

本稿では、レーザー着火遅れ時間の温度依存性を実験で明らかにし、同時に数値解析モデルを構築することで、着火遅れ時間を工学的に予測可能な手法の確立を目指す。

## 2. 実験装置および数値解析の説明

### 2.1 実験装置

図2にレーザー着火装置の概略を示す。装置は、半導体レーザー、レンズ、BKN03ペレット(φ3.2 mm×2.0 mm)から構成され、各パーツは光硬化アクリル系樹脂の Verowhite を用いて3Dプリンタにより作られたケースに収められている。実験は図3に示すロータリーポンプで減圧した真空容器中で行い、実験中の圧力は10~100 Paの範囲であった。この圧力は一般的な電気推進機の実験環境よりも高いが、レーザー着火性能の確認に十分な圧力であることは、過去の実験から確認済である。レーザーは1 W出力で波長が808 nmの半導体レーザーを用いており、2枚のアクリル製のレンズにより有効焦点距離3.95 mmの光学系を構成している。半導体レーザーからBKN03表面までの光学系のレーザー光の透過率についてはパワーメータを用いて実測した。

着火遅れ時間については、半導体レーザーへの通電開始をトリガー入力として高速度カメラ HAS-200 を起動し、着火による高輝度が発生するまでの時間をレーザー着火遅れ

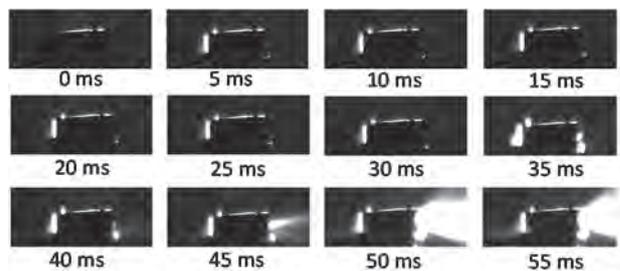


図4 高速度カメラによる着火遅れ時間計測

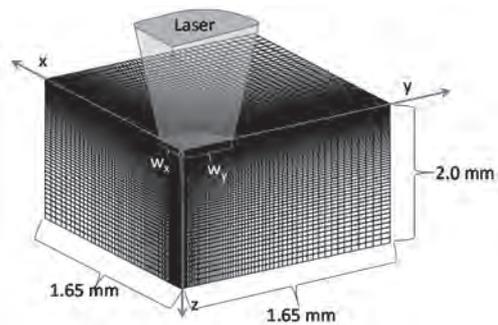


図5 数値解析領域とレーザー照射位置

として計測した。図4が高速度カメラの撮影画像の一例である。ケースの材料である Verowhite はレーザー光を透過するため、レーザー光の照射の有無は画像から判断することができる。具体的には、5 ms~55 msの左の白い箇所はレーザー光の漏れ光であり、35 ms以降の輝度の増加はBKN03の反応によるものである。この一連の画像から、レーザー照射は0 ms~5 msの間に開始され、30 msから35 msの間にBKN03の反応が始まったことが分かる。したがって、着火遅れ時間は30±5 msである。

実験では、半導体レーザーとレンズとの距離を0.1 mmごとに変化させ、着火遅れ時間が最短となる距離を決定した後、レーザー着火装置全体の温度を変えて着火遅れ時間を計測した。温度の調節は、ヒートシンクにつけたペルチェ素子により行ったが、冷却能力がヒートシンクの熱容量により制限されるために、低温側の下限は-10°Cまでであった。一方、高温側は75°Cまで加熱を行った。

### 2.2 数値解析モデル

数値解析モデルは、これまでの複数の研究<sup>34,6)</sup>の結果を受けて以下の仮定のもとでモデル化した。まず、レーザー照射部への熱入力が熱伝導によりBKN03中に伝わり、着火閾値温度を超えることでBKN03の反応が始まるものとする。着火閾値温度に達した部分は、局所的な反応速度から決定される燃焼時間の間、反応熱を発生するものとし、この熱が熱伝導により周辺に伝播することで反応が継続する。一方で、局所的な温度が着火閾値温度に達しない場合には燃焼反応は始まらないものとする。BKN03の温度特性を詳細に入れたモデルもあるが、ここでは小泉のモデル<sup>6)</sup>に従い、物性値については平均化した定数値で扱うものとする。着火

表1 各モデルと組み込んだ温度依存性

名前	モデルの説明
Model 1	BKNO3 の反応速度
Model 2	Model 1 + レーザー出力
Model 3	Model 2 + 熱膨張, 屈折率変化

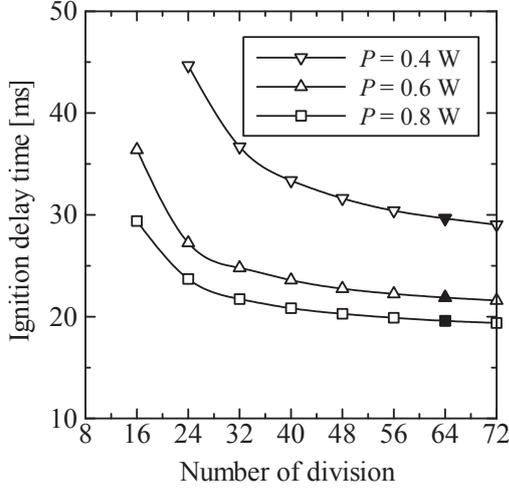


図6 格子収束性

遅れ時間は、BKNO3 の反応により発生する熱出力がレーザー入力を超えた時間とした。

数値解析では図5に示す解析領域を設定し、各軸を定めるものとする。このモデルの支配方程式は熱伝導方程式であり、 $\rho$ を密度、 $C_p$ を比熱、 $\kappa$ を熱伝導係数、 $H_R$ を反応熱、 $\omega$ を反応速度、 $s$ をSwitching関数として

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \kappa \nabla^2 T + \rho H_R \omega s(t) \quad (1)$$

と書くことができる。境界条件として、レーザー照射部について $\alpha$ を吸収係数として

$$\left( \frac{\partial T}{\partial z} \right)_{z=0} = -\frac{\alpha q(x,y)}{\kappa} \quad (2)$$

で与える。ここで、右辺の $q$ はレーザー照射による熱入力であり、レーザー光の出力パターンとしてガウス分布を仮定した場合には、ビーム幅 $w_x, w_y$ を用いて、次のように位置の関数として書ける。

$$q(x,y) = \frac{4Q}{\pi w_x w_y} e^{-\left\{ \left( \frac{2x}{w_x} \right)^2 + \left( \frac{2y}{w_y} \right)^2 \right\}} \quad (3)$$

ここで、 $Q$ はレーザーの出力である。他の境界については次の自然境界条件を与える。

$$\frac{\partial T}{\partial n} = 0 \quad (4)$$

式(1)のSwitching関数については、 $t_R$ を着火閾値温度 $T_R$ に達した時間として

$$s(t) = \begin{cases} 1, & t_R < t < t_R + \frac{1}{\omega} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

を用いて切り替える。

次に、初期温度の影響を評価するために、温度により影響を受ける各因子についてモデル化していく。まず、燃焼速度はBKNO3の初期温度に依存することから、燃焼速度の温度感度係数 $\sigma$ を用いて

$$\omega = \omega_0 e^{\sigma(T - T_{ref})} \quad (6)$$

とする。なお、BKNO3の $\sigma$ は通常の固体推進薬よりも小さい値となり、文献から0.001~0.003である<sup>78)</sup>。式(6)を考慮したモデルをModel1とする。

これとは別に、半導体レーザーの出力については、温度が上昇すると出力が低下するという特性があり、これを

$$Q = Q_0 (1 + \alpha(T - T_{ref})) \quad (7)$$

としてモデル化する。式(6)の他に式(7)を考慮したモデルをModel2とする。これに加えて、パーツの熱膨張と温度による光学系の屈折率変化を考慮したモデルをModel3とする。これら3つのModelの違いについて表1にまとめるものとする。

以上の定式化を行った後、式(1)を差分法で離散化して解いた。なお、各物性値については次のように定めた。

BKNO3の密度 $\rho = 2230 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $C_p = 1140 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ 、 $\kappa = 1.6 \text{ W}\cdot\text{K}^{-1}$ 、 $T_R = 720 \text{ K}$ 、 $H_R = 4.0 \text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $\omega = 40 \text{ s}^{-1}$ である<sup>9)</sup>。図2の光学系の透過率はパワーメータを用いた計測から80%である。また、BKNO3のレーザー光に対する吸収係数は70%としている<sup>9)</sup>。したがって、BKNO3に入るパワーは半導体レーザー出力の56%である。実験では半導体レーザーに流す電流を1.2 Aと固定した。これは常温において1 Wのレーザー出力を発生する電流値であり、これらから式(7)において $Q_0 = 0.56 \text{ W}$ として計算を行った。

解析領域は実験に使用したBKNO3ペレットのサイズと同程度の $1.65 \text{ mm} \times 1.65 \text{ mm} \times 2.00 \text{ mm}$ とし、レーザー照射部で分割を細かくする不等間隔メッシュを用いた。メッシュの最大幅と最小幅の比は10である。

レーザーとレンズ間の距離を2.1 mmとし、レーザーパワーを $P = 0.4, 0.6, 0.8 \text{ W}$ として、空間分割数を変えて着火遅れ時間をプロットした結果を図6に示す。図5の計算領域の分割数を $72 \times 72 \times 72$ としても $P = 0.4 \text{ W}$ ではまだ減少傾向にあるが、1 W照射時のBKNO3表面のレーザーパワー0.56 Wに近い $P = 0.6 \text{ W}$ では、着火遅れ時間が分割数の大きいところではほぼ一定値に収束していることから、計算コストを考慮して分割数を $64 \times 64 \times 64$ とした。なお、レーザー照射部のスポット径については光学計算ソフトOSLOから計算し、式(3)の照射強度を評価している。また、Verowhiteの線膨張係数は $7.3 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ 、レンズの屈折率の温度変化率を $-9 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ で与えた。式(7)の温度依存係数については、実測結果から $-0.008 \text{ K}^{-1}$ とした。

### 3. 結果および考察

図7は着火遅れ時間が最短となった半導体レーザーとレンズ間の距離2.0 mmにおける着火遅れ時間を、レーザー着火装置の初期温度を $-10^\circ\text{C} \sim 75^\circ\text{C}$ の範囲で変えて取得したものである。実験結果のプロットとそれらのプロットを2

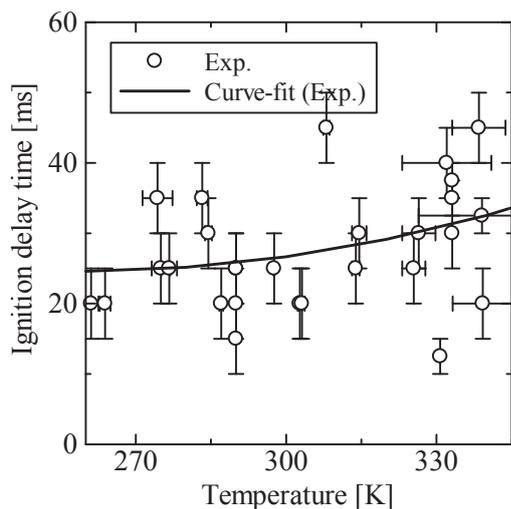


図7 着火遅れ時間とBKNO3の初期温度

次曲線で近似した結果を合わせて載せる。実験結果のエラーバーは、温度については、図2のレーザー着火装置の最大・最小温度箇所（ペルチェ素子接触面とそこから最も離れた場所）の温度差を示しており、着火遅れ時間については、高速度カメラの撮影フレームレートが200 fpsであることから、撮影コマ間5 msの不確定さを考慮している。

図7から着火遅れ時間はどの温度においてもばらつきは見られるものの、エラーバーを含めても50 ms以内に収まっている。温度に対する傾向としては、温度が上がるにつれて着火遅れ時間が大きくなる傾向が見られる。

図8は数値解析の結果をモデルごとに示したものである。燃焼速度の温度感度係数の文献値の範囲が0.001~0.003であるため、着火遅れ時間の上限と下限である温度感度係数0.001と0.003を用いて計算した。図7からBKNO3の反応速度変化のみを入れたModel 1では、温度に対して着火遅れ時間が単調に減少する結果となり、温度上昇に伴って実験値と大きくかい離していく。一方、温度上昇によるレーザーパワーの低下効果を加えたModel 2では、曲線の傾きが減少してややフラットなものとなるが、依然として実験値とのかい離は見られ、高温側で着火遅れ時間が大きくなる部分を説明できていない。一方、Model 3では高温部の着火遅れ時間の増加も再現されており、Model 1やModel 2の結果と比べて、すべての温度範囲でより定量的な一致を示すようになる。Model 3で追加されたものは、光学ケースの熱膨張と屈折率の変化であることから、温度変化による着火遅れ時間をモデル化するには、BKNO3の反応速度とレーザーの温度特性だけでは不足していることが分かった。一方で、光学ケースの熱膨張や屈折率の変化の影響も含めることで、着火遅れ時間を定量的に再現することが可能であることも明らかとなった。

なお、BKNO3を遠隔のレーザー源により着火させる場合には、レーザーや光学素子の温度依存性を考慮する必要がないので、着火遅れ時間はModel 1により予測可能である。

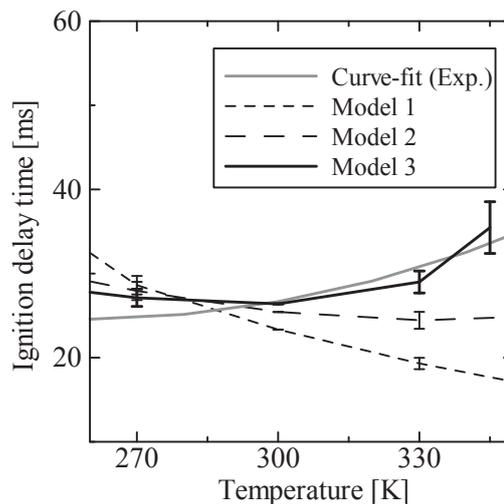


図8 モデルによる実験値の再現性の違い

#### 4. まとめ

宇宙環境下におけるBKNO3のレーザー着火遅れ時間を予測するために、真空下で温度をパラメトリックに変化させた実験を行い、数値モデルによる解析から、着火遅れ時間に影響を与える因子を抽出した。結果を箇条書きにして示す。

- (1) 実験結果からは、真空かつ $-10^{\circ}\text{C}\sim 75^{\circ}\text{C}$ の温度環境において1 Wの半導体レーザーを用いて50 ms以内にBKNO3を着火させることが可能であった。着火遅れ時間は雰囲気温度の上昇に伴い増加する傾向があった。
- (2) 着火遅れ時間については、レーザーからの熱入力が熱伝導によりBKNO3中を伝わり、ある閾値温度を超えた段階で着火するというモデルから評価可能であることが分かった。BKNO3表面上のレーザー照射強度分布等は別に光学ソフトを用いて計算したものを境界条件として与えればよい。
- (3) 着火遅れ時間の温度特性は、数値解析により予測可能である。ただし、BKNO3の反応速度の温度特性だけではモデル化に不十分であり、レーザーの温度特性とともに、温度変化による光学系の屈折率の変化や各パーツの熱膨張や熱収縮による影響も考慮する必要がある。

#### 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 (2009), pp.Pb\_7-Pb\_9.
- [2] Nakano, M., Koizumi, H. Watanabe, M., and Arakawa, Y., "Laser Ignition Microthruster Experiments on KKS-1," Trans. JSASS Space Tech. Japan, Vol. 8 (2010), pp.Pb\_7-Pb\_11.
- [3] 中山久広, 宮下友則, 橋野世紀, 吉武直彦, 織田律生, ホウ素/硝石系点火薬のレーザー着火機構の近似理論, 火薬学会, 71(1) (2010), pp.31-38.

- [4] 中山久広, 宮下友則, 吉武直彦, 織田律生, ホウ素/硝石系点火薬のレーザ着火モデル, 火薬学会誌 71(3), (2010), pp.98-105.
- [5] 中野正勝, 各務聡, “ $\phi 3.2$  mm BKNO<sub>3</sub> 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, Vol. 64 (2016), No.2, pp.139-143.
- [6] Koizumi, H., Nakano, M., Inoue, T., Watanabe, M., Komurasaki, K., and Arakawa, Y., “Study on Laser Ignition of Boron / Potassium Nitrate in Vacuum,” Science and Technology of Energetic Materials, Vo.67, No.6 (2006), pp.193-198.
- [7] 芦沢長嗣, ロケットモータの点火の温度感度, 工業火薬 Vol.50, No.5 (1989), pp.425-430.
- [8] 蓮江和夫, 田村久幸, ホウ素/硝酸カリウム混合物の極低温における燃焼特性, 火薬学会誌, Vol.58, No.6 (1997), pp.252-257.
- [9] Philippe Gillard and Frederic Opdebeck, Laser Diode Ignition of the B/KNO<sub>3</sub> Pyrotechnic Mixture: An Experimental Study, Combust. Sci. and Tech., 179 (2007), pp.1667-1699.