

LSD におけるレーザ強度及び比熱比の爆風波変換効率への影響

Effect of laser intensity and specific heat ratio on blast wave energy conversion efficiency in LSD

○新井 天(九工大)・松井 康平(九工大)・北川 幸樹(九工大)

○Ten Arai (Kyushu Institute of Technology)・Kohei Matsui (Kyushu Institute of Technology)・Koki Kitagawa (Kyushu Institute of Technology)

Abstract (概要)

It is necessary to understand the mechanism of Laser supported detonation (LSD) propagation for optimal design of laser detonation thrusters. The blast wave energy conversion efficiency and the energy ratio, which are important parameters of LSD, represent the energy efficiency from laser to fluid. However, in previous studies, the blast wave energy conversion efficiency was 0.48 and the energy ratio was 0.10, and the values were different. The purpose of this study is to clarify the causes of differences between the blast wave energy conversion efficiency and the energy ratio. As the first step, the energy ratio is calculated when the specific heat ratio and the laser intensity were changed under the assumption that the LSD was Chapman-Jouguet detonation. As the result, the energy ratio obtained under the conditions that the laser intensity was 600 GW/m² and specific heat ratio 1.18 corresponding to the temperature of LSD is 0.189. In addition, the energy ratio obtained by averaging the laser intensity over time is 0.064 at specific heat ratio of 1.40 and 0.157 at 1.18. The specific heat ratio of 1.18 is about 2.5 times larger than that of 1.40, and the ratio of radial enthalpy flow at the tip of the blast wave changes greatly depending on the specific heat ratio. Therefore, when analyzing, it is necessary to use the specific heat ratio corresponding to the actual LSD temperature.

記号の説明		η_{bw}	: 爆風波変換効率	[-]
A	: 爆風波エネルギー算出のための補正係数	[-]		
E_{bw}	: 爆風波エネルギー	[J]		
E_{laser}	: レーザエネルギー	[J]		
h	: エンタルピー	[J]		
P	: 圧力	[Pa]		
q	: 加熱量	[J]		
R	: 気体定数	[J/K·mol]		
R_x	: 衝撃波の x 方向の変位	[mm]		
R_y	: 衝撃波の y 方向の変位	[mm]		
S	: レーザ強度	[GW/m ²]		
T	: 絶対温度	[K]		
t	: レーザ発振からの経過時間	[s]		
t_{Tm}	: LSD から LSC に遷移した時間	[s]		
U	: 衝撃波静止系における流速	[km/s]		
U_{CJ}	: C-J デトネーションの伝播速度	[km/s]		
V	: 電離波面伝播速度	[km/s]		
v	: 比体積	[-]		
α	: 爆風波エネルギー算出のための補正係数	[-]		
γ	: 比熱比	[-]		
		η_{trans}	: エネルギー加熱比	[-]
		$\overline{\eta_{trans}}$: エネルギー加熱比の時間平均値	[-]
		ξ	: 爆風波エネルギー算出のための補正係数	[-]
		ρ	: 密度	[kg/m ³]

1. 研究背景および目的

新しい宇宙輸送システムとして、レーザ推進が提案されている¹⁾。レーザ推進は地上からの繰り返しパルスレーザを駆動源として推力を得る。特徴として、空気を推進剤として用いることから推進剤の搭載が不要となり高ペイロード比を実現でき、また、パルスデトネーションエンジンサイクルを用いることによりターボポンプが不要で構造が簡素である。

レーザ推進の推力発生機構²⁾の模式図を図1に示す。レーザを集光して空気を急激に加熱し、絶縁破壊によりプラズマを発生させる。プラズマが後続のレーザエネルギーを吸収する際に、電離波面が衝撃波とともにレーザ入射方向へ伝播するレーザ支持爆轟波(Laser Supported Detonation, LSD)が駆動され、LSD による推進器内の気体の圧力上昇により推力を得る。そのため、レーザ推進器の最適設計を行うには、LSD 後

方での圧力上昇を正確に予測する必要がある。

Raizer³⁾は LSD が燃焼デトネーション波に見られる ZND 構造と相似なモデルであることを提案した。ZND 構造とは、可燃性ガス中を衝撃波が通過することにより、ガス中の流体粒子が高温高圧になり化学反応を誘起する。化学反応は発熱反応フェーズに移行しガスが加熱され、そのエネルギーによって前方の衝撃波を駆動し進展するという構造である。LSD において、デトネーション状態を維持するためには、LSD 波がチャップマン-ジュゲ(C-J)デトネーション以上の伝播速度で進展する必要があり、C-J 速度は以下のように記述される。

$$U_{CJ} = \left\{ 2(\gamma_2^2 - 1) \frac{S}{\rho_1} \eta_{trans} \right\}^{\frac{1}{3}} \quad (1)$$

波面前後の添字をそれぞれ 1,2 とした。

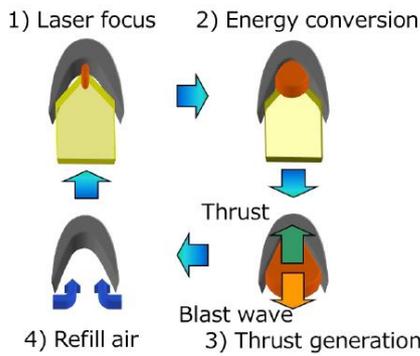


図1 レーザ推進の推力生成サイクル

武田ら⁴⁾は最大出力 10 J/pulse、波長 10.6 μs の TEACO₂ レーザにより LSD を発生させ、爆風波変換効率を測定した。具体的には、高速度カメラより撮影された LSD 終了後（断熱膨張過程）の衝撃波波面伝播履歴から爆風波エネルギーを求めている。爆風波は回転楕円体を半分にしたような形状と近似でき、その爆風波エネルギーは以下のように表せる⁵⁾。

$$E_{bw} = \frac{25}{4} A \left(\frac{U}{c_a} \right)^a \gamma P \xi^5 R_y R_x^2 \quad (2)$$

$$c_a = \sqrt{\gamma \frac{P_a}{\rho_1}} \quad (3)$$

実際には回転楕円体の半分の爆風波しか形成されておらず、LSD の時間中に照射させたレーザーエネルギーのみが爆風波エネルギーに変換されるとすると、爆風波変換効率は式(4)のように表される。結果として、算出された爆風波変換効率は、パルスエネルギー 6.1 J、空気 1 atm において 48±5% だった。

$$\eta_{bw} = \frac{E_{bw}}{2E_{laser}} \quad (4)$$

しかし、算出された爆風波変換効率でユゴニオ解析を行ったところデトネーションの解が存在しなかった。解が存在するためにはエネルギー加熱比が 7-16% であるとし、爆風波先端から半径方向に 80-90% 程度のエンタルピ流出があると考えられると報告した。

ここで、爆風波変換効率とエネルギー加熱比はともにレーザーから流体へのエネルギー変換効率を表している。しかし、先行

研究⁴⁾では、両者が一致していない。同一の効率を表している両者が一致していないことは不可解である。そこで、両者の一致しない原因を明らかにすることを目的とし、その第一ステップとして、LSD が C-J デトネーションという仮定のもと、レーザー強度と比熱比を変化させた場合のエネルギー加熱比を算出した。

2. 解析方法

2.1 ユゴニオ解析 LSD は、加熱領域と衝撃波が一体となって伝播することから燃焼デトネーションと同等の解析を行うことができ、その解析方法をユゴニオ解析と言う。ユゴニオ解析はある時間におけるデトネーションの状態を理解するための解析方法である。燃焼デトネーションに対して、LSD の異なる点は、LSD では加熱方式がレーザーによることである。LSD 波を含む 1 次元の検査体積を想定する。LSD 波前後の質量保存、運動量保存、エネルギー保存式はそれぞれ式(5)-(7)で表せる。

$$\rho_1 U_1 = \rho_2 U_2 \quad (5)$$

$$P_1 + \rho_1 U_1^2 = P_2 + \rho_2 U_2^2 \quad (6)$$

$$\frac{1}{2} U_1^2 + h_1 + q = \frac{1}{2} U_2^2 + h_2 \quad (7)$$

$$P = \rho R T = \rho \frac{\gamma - 1}{\gamma} h \quad (8)$$

加熱量は以下のように表せる。

$$q = \frac{S}{\rho_1 U_1} \eta_{trans} \quad (9)$$

式(6)(7)を用いて、式(10)のように変形できこれをレイリー線と呼ぶ。また、式(7)(9)は式(11)のように変形できユゴニオ曲線と呼ぶ。

$$\frac{P_2}{P_1} = 1 + \frac{U_1^2}{\rho_1 v_1} \left(1 - \frac{v_2}{v_1} \right) \quad (10)$$

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{\frac{\gamma_1 + 1}{\gamma_1 - 1} \frac{v_2}{v_1} + \frac{2q}{\rho_1 v_1}}{\frac{\gamma_2 + 1}{\gamma_2 - 1} \frac{v_2}{v_1} - 1} \quad (11)$$

ユゴニオ解析の物理的意味として、直線であるレイリー線と、曲線であるユゴニオ曲線の解が存在する時にデトネーションが発生するというものである。LSD はデトネーション現象なので、理論的には解が存在することになる。特に、レイリー線とユゴニオ曲線が接する、つまり解が 1 つ存在する状態は Chapman-Jouguet (C-J) デトネーションと呼ばれる。

2.2 爆風波先端でのエネルギー加熱比の解析方法 エネルギー加熱比を算出した際の先行研究⁴⁾での比熱比は標準大気に相当する 1.40 を用いていた。しかし、実際の現象は標準大気よりも大幅に高い温度であることが予想される。実際に、嶋村ら⁶⁾は発行分光により電子温度を測定し、レーザー強度が 400-1090 GW/m² の範囲における LSD の電子温度は 25000-26000 K と報告した。また比熱比は温度により変化する。Zeldovich ら⁷⁾によると温度と比熱比の関係は図 2 のように

なることが報告されており, LSD の温度帯に相当する比熱比は 1.18 程度であることが確認できる. そのため, 本解析では比熱比を 1.16-1.40 の範囲でのエネルギー加熱比を解析により求めた. この際, 先行研究と同様に LSD は C-J デトネーションであるという仮定のもと解析を行った. C-J デトネーションでの LSD 波の伝播速度は式(1)のように表され, エネルギー加熱比について変形すると以下ようになる.

$$\eta_{trans} = \frac{\rho_1 U_{CJ}^3}{2(\gamma_2^2 - 1)S} \quad (12)$$

ここで, 松井⁸⁾により空気 1.0 atm での LSD 波伝播速度とレーザー強度の関係は以下のように表せることが報告されている.

$$V = 0.22 S^{0.46} \quad (13)$$

よって, 式(12) の U_{CJ} に式(13)を代入することでエネルギー加熱比はレーザー強度および比熱比に依存する関数になり以下のように表せる.

$$\eta_{trans} = \frac{1.1 \times 10^{-2} \rho_1}{2(\gamma_2^2 - 1)} S^{0.38} \quad (14)$$

式(14)を用いてレーザー強度および比熱比を変化させることで, レーザー強度および比熱比のエネルギー加熱比への影響を調査した.

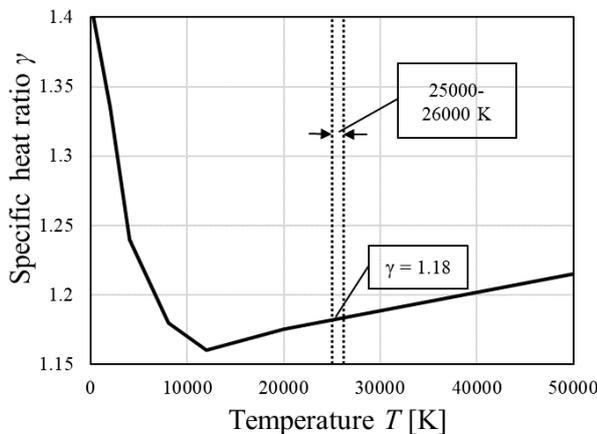


図2 温度と比熱比の関係⁷⁾

レーザー強度の範囲に関しては, LSD が発生する最小値とされている 100 GW/m^2 から, 300 GW/m^2 間隔で値を上昇させた $400, 700, 1000 \text{ GW/m}^2$, そして先行研究との比較を行うために 600 GW/m^2 で調査を行った. 以上の解析条件を表 1 にまとめた.

表1 レーザー強度および比熱比のエネルギー加熱比への影響解析に関する解析パラメータ

大気密度 ρ_1 [kg/m^3]	1.225
比熱比 γ	1.16 - 1.40
レーザー強度 S [GW/m^2]	100, 400, 600, 700, 1000

さらに, 先行研究⁴⁾では, エネルギー加熱比は時間とともに変化していると考えられるが, 時間平均近似してエネルギー加熱比は一定と考えていた. その上で, レーザー強度が $100\text{-}700 \text{ GW/m}^2$ においてユゴニオ解析で解を持つにはエネルギー加熱比が, 7-16%であると報告していた. しかし, レーザー強度は図 2 のように時間変化している.そのため, エネルギー加熱比も時間とともに変化していることが考えられる. そこで, 報告されたある一瞬でのエネルギー加熱比との比較を行うために, レーザー強度の時間履歴に対して LSD の時間中のエネルギー加熱比の時間平均値を算出した. LSD の時間中のエネルギー加熱比の時間平均値は式(15)のように表せる.

$$\overline{\eta_{trans}} = \frac{\sum_{t=0}^{t_{Tm}} \eta_{trans} \cdot \Delta t}{t_{Tm}} \quad (15)$$

式(15)に式(14)を代入すると以下のように表せる.

$$\overline{\eta_{trans}} = \frac{1}{t_{Tm}} \left\{ \sum_{t=0}^{t_{Tm}} \frac{1.1 \times 10^{-2} \rho_1}{2(\gamma_2^2 - 1)} S(t)^{0.38} \cdot \Delta t \right\} \quad (16)$$

レーザー強度は時間変化しているため, レーザー強度の時間履歴を図 3 のイメージのように $\Delta t = 0.005 \mu\text{s}$ として離散化し, エネルギー加熱比の時間平均値を求めた. 解析条件は先行研究⁸⁾の実験データをもとに表 2 のように定めた. 大気密度のパラメータは表 1 と同様である.

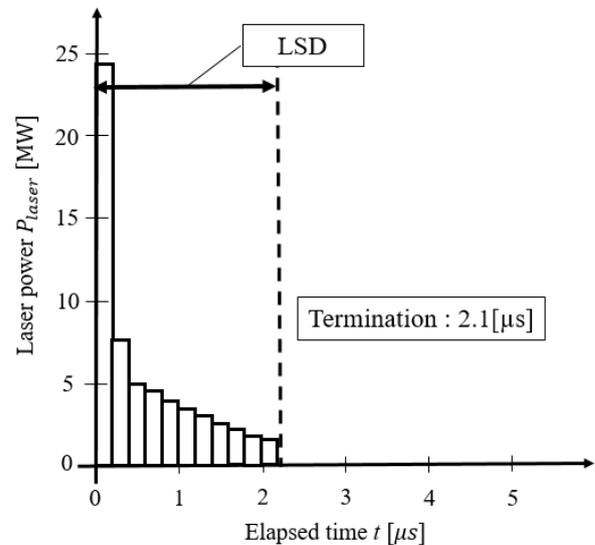


図3 レーザー強度の時間履歴の離散化イメージ

表2 エネルギー加熱比の時間平均値の解析条件

パルスエネルギー P [J]	8
Termination の時間 $t_{Termination}$ [μs]	2.1
Termination 時のレーザー強度 S [GW/m^2]	133
比熱比 γ	1.16, 1.18, 1.20, 1.24, 1.30, 1.40

3. 解析結果

まず初めに、式(13)よりレーザー強度と波面伝播速度の関係を以下の図4に示す。また、式(14)よりレーザー強度および比熱比のエネルギー加熱比への影響を図5に示す。

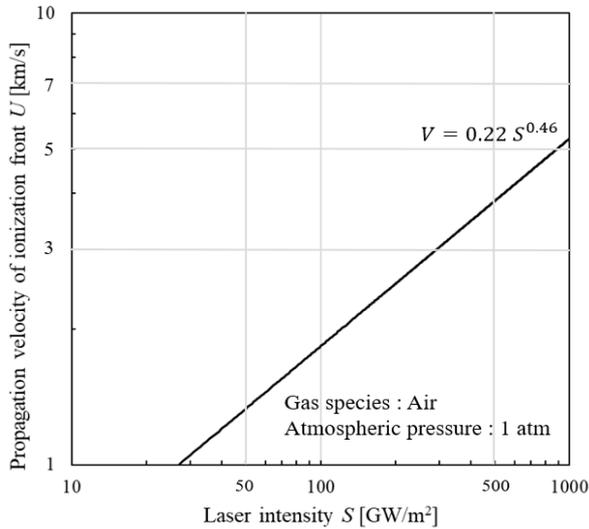


図4 LSD 波波面伝播速度とレーザー強度の関係

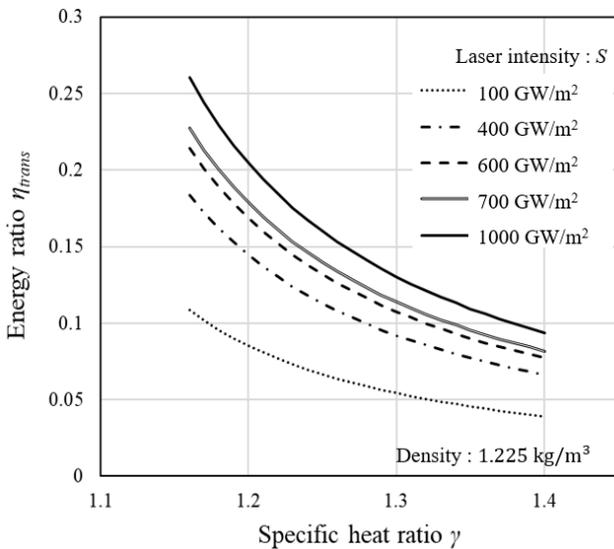


図5 レーザー強度と比熱比のエネルギー加熱比への影響

図5から分かるように、レーザー強度が増加するほどエネルギー加熱比は増加し、また、比熱比が減少するほどエネルギー加熱比は増加することが分かった。つまり、比熱比が小さいほど、レーザー強度の上昇に対するエネルギー加熱比の上昇量が大きくなるという結果が得られた。次に、先行研究⁴⁾との比較を行う。前述したように、ユゴニオ解析で解を持つためにはレーザー強度600 GW/m²で爆風波先端でのエネルギー加熱比が0.124と報告されていた。しかし、実際のLSDの温度は

25000-26000 Kほど⁶⁾で、その温度に対応する比熱比は1.18付近⁷⁾である。本解析結果より比熱比1.18付近で、ユゴニオ解析で解を持つためには、爆風波先端でのエネルギー加熱比が0.189であることが分かる。

次に、レーザー強度の時間履歴に対するLSD時間中での爆風波先端におけるエネルギー加熱比の時間平均値の結果は、以下の表3のようになった。ここで、本解析で得られた結果との比較を行うために先行研究⁴⁾のデータも表3に記載した。

表3 爆風波先端におけるエネルギー加熱比時間平均値の解析結果と先行研究⁴⁾との比較

比較対象	比熱比 γ	爆風波先端におけるエネルギー加熱比の時間平均値 $\overline{\eta_{trans}}$
解析結果	1.16	0.178
	1.18	0.157
	1.20	0.140
	1.24	0.114
	1.30	0.089
	1.40	0.064
先行研究 ⁴⁾	1.40	0.07-0.16

表3の結果から、実際のLSDの温度に対応する比熱比である1.18付近では、爆風波波面先端でのエネルギー加熱比は0.157であることが読み取れる。図5の結果と比較することにより0.02程度、値が小さくなっていることが分かる。表3の結果と先行研究⁴⁾の爆風波先端でのエネルギー加熱比を比較すると、比熱比1.40では本解析での結果が0.064となり、本解析の結果の方が小さい値になったため、時間平均することによりエネルギー加熱比は、より低い値を取ることが予想される。また、先行研究⁴⁾で報告されていたように、爆風波先端でのエネルギー加熱比は、測定された爆風波変換効率に比べ非常に低い値を示しているため、爆風波波面先端においては、半径方向へのエンタルピ流れが大きい割合を占めていることが予想される。しかし、比熱比1.18での時間平均したエネルギー加熱比は0.157であり、比熱比1.40でのエネルギー加熱比である0.064と比較すると約2.5倍大きい値になっている。そのため、半径方向へのエンタルピ流れの割合は比熱比によって大きく変化することが確認でき、実際のLSDの温度に対応する比熱比を用いて解析を行う必要があると言える。

4. 結論

本研究では、実験より測定された爆風波変換効率とユゴニオ解析により求められたエネルギー加熱比が一致しない原因を明らかにすることを目的とし、その第一ステップとして、LSDがC-Jデトネーションという仮定のもと、レーザー強度と比熱比を変化させた場合のエネルギー加熱比を算出した。結果として、実際のLSDの電子温度に対応する比熱比1.18では、爆風波先端でエネルギー加熱比が0.189だった。また、比熱比が小さいほど、レーザー強度の上昇に対するエネルギー加熱比の上昇量が大きくなるという結果が得られた。さらに、エネルギー加熱比の時間平均値に関しては、比熱比1.18でエネルギー

加熱比は 0.157 であり、時間平均していない値よりも時間平均した方が値は小さくなった。また、爆風波先端でのエネルギー加熱比は、測定された爆風波変換効率に比べ非常に低い値を示しているため、爆風波波面先端においては、半径方向へのエンタルピ流れが大きい割合を占めていることが予想されるが、時間平均したエネルギー加熱比は、比熱比 1.18 の方が比熱比 1.40 よりも約 2.5 倍も値が大きく、爆風波先端における半径方向へのエンタルピ流れの割合は比熱比によって大きく変化する。解析を行うときには実際の LSD の温度に対応する比熱比を用いる必要があるということが分かった。

参 考 文 献

- 1) K.Komurasaki and M.Fukunari: Microwave Rocket: Its Development Status and Future, J. Plasma Fusion Res, Vol.92, No.5, 2016, pp323-331.
- 2) K.Komurasaki and K.Kawamura: Laser Supported Detonation and Energy Conversion to Blast Waves, Journal of Combustion Society of Japan, Vol.48, No.146, 2006, pp323-327.
- 3) Yu.P.Raizer, Heating of a Gas by a Powerful Light Pulse, Vol.21, No5, 1965, pp1009-1017
- 4) R.Takeda, K.Kanda, K.Matsui, K.Komurasaki and H.Koizumi, Hugoniot Analysis of Laser Supported Detonation Using Measured Blast Wave Energy Efficiency, J. IAPS, Vol.28, No.1, 2020, pp34-40
- 5) B.Wang, K.Komurasaki and Y.Arakawa, Energy conversion in a Glass-laser supported detonation wave in air, J. Applied Physics, Vol.108, 2018, 124911
- 6) K. Shimamura, J. Ofosu and K. Komurasaki, Investigation on the effects of self radiation and the precursor ionization ahead of laser supported detonation, Proceedings of Space Transportation Symposium, 2013
- 7) Y. B. Zeldovich and Y. P. Raizer, Physics of Shock Waves and High-Temperature Hydrodynamic Phenomena, ACADEMIC PRESS New York and London, Vol1, pp188, 1966
- 8) K. Matsui, Study on laser parameters for determining the propagation velocity and wave front shape of Laser Supported Detonation waves, PhD thesis, The University of Tokyo, 2020