

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2007～2010

課題番号：19206087

研究課題名(和文) レーザー支持爆轟波の物理の解明

研究課題名(英文) Research on Laser Supported Detonation Physics

研究代表者

小紫 公也 (KOMURASAKI KIMIYA)

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・教授

研究者番号：90242825

研究成果の概要(和文)：レーザー支持爆轟波の生成・駆動するために、炭酸ガスレーザーよりも波長が一桁短いガラスレーザーを用いた場合でも、炭酸ガスレーザーの場合と同程度に高効率でレーザーから爆轟波へエネルギー変換できることが分かった。さらに、2波長マッハツェンダー干渉法を用いたレーザー支持爆轟波内の電子密度計測より、衝撃波より先行するプラズマの存在を確認し、その観点からレーザー爆轟波の支持条件を理論的に解明した。

研究成果の概要(英文)：Efficient energy conversion from a laser to a blast wave through Laser Supported Detonation was achieved with a glass laser whose wavelength is shorter than that with CO₂ lasers by one order of magnitude. In addition, precursor plasma was found ahead of a shockwave by two-wavelength Mach-Zehnder interferometer electron density measurements. The Laser Detonation supporting condition was analytically discussed.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	17,200,000	5,160,000	22,360,000
2008 年度	9,100,000	2,730,000	11,830,000
2009 年度	6,600,000	1,980,000	8,580,000
2010 年度	3,700,000	1,110,000	4,810,000
年度			
総計	36,600,000	10,980,000	47,580,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・航空宇宙工学

キーワード：レーザー，プラズマ，爆轟波，宇宙，推進

1. 研究開始当初の背景

レーザー支持爆轟は、衝撃波とそれに隣接する電離波面の2層構造になっており、あるレーザー強度閾値以上では電離波面が衝撃波を駆動し続ける。この際に、レーザーエネルギーは効率よく流体の運動エネルギーに変換されるため、レーザー推進機やレーザーエネルギー変換装置への応用が研究されている。

Myrabo らが行ったライトクラフト打ち上げ実験(2000年)が先駆けとなり、その後世界

各国で打ち上げデモンストレーションが競われる一方で、レーザー支持爆轟の物理に関する基礎研究は乏しいのが現状である。

195-60年代にRaizerらは、レーザー支持爆轟についてまとめた研究を残している。しかし、その成果は残念ながらレーザー推進機的设计に用いることができるほど、詳細・高精度・汎用なものではなかった。

近年、Wang等のライトクラフトCFD計算例や、白石等のデトネーション計算のスキームを用いた詳細な数値計算があるが、レーザ

一支持爆轟が瞬間的で高温、高圧な現象のため定量的な測定が困難で、検証すべき実験結果が存在しない。そこでレーザー支持爆轟の物理的構造とその維持条件について詳細な実験的研究を行い、その内部構造を明らかにしつつ、爆轟波面の伝播特性や、エネルギー変換効率の大気圧力依存性を調べるのが重要である。

成果は、レーザー推進機やレーザーエネルギー変換器の設計に役立てることができる。

2. 研究の目的

本研究は、実験的なアプローチを中心にしつつ、より一般的な爆轟波理論を構築することを目的とする。具体的な研究目標は以下の通りである。

(1) 従来の炭酸ガスレーザー（波長 $10.6 \mu\text{m}$ ）と発振波長の異なるガラスレーザー（波長 $1.053 \mu\text{m}$ ）を用いて、レーザー爆轟終了条件、爆轟波エネルギー変換効率を調べるとともに、爆轟波背後の電子密度空間分布計測および電子温度履歴計測によって詳細な爆轟波構造を解明する。

(2) レーザー支持爆轟の物理的構造とその維持条件について、実験結果をもとにレーザー爆轟波理論を構築する。また、大気圧力依存性や雰囲気ガス種依存性を調べ、レーザー推進機やレーザーエネルギー変換器の設計に役立てる。

3. 研究の方法

毎秒1億コマで撮影可能な超高速カメラを利用した、極めて時間分解の高いレーザーシャドウグラフ法や空間分解能1 mm以下で電子温度分布を測定可能な2波長マッハツェンダー干渉法など高精度のプラズマ可視化法を利用した。また波長分解能及び波長測定領域の高いエッセル分光器を利用したプラズマ発光分光法により、レーザー支持爆轟波内部の状態を測定した。

4. 研究成果

(1) シャドウグラフ法によるレーザー支持爆轟波・衝撃波伝播の測定

レーザーシャドウグラフ法による高速カメラの撮影結果を図1に示す。これらの写真から爆轟波伝播履歴を読み取り、爆轟波終了条件および爆風波エネルギー変換効率を調べた。ガラスレーザーの場合、炭酸ガスレーザーと比較して爆轟終了時の電力密度や吸収係数がレーザー波長依存性により3桁近く異なるにも拘らず、爆風波エネルギー変換効率はほとんど差異がなく、40%程度であった。これはレーザー光をほぼ遮るように、プラズマ密度・温度が補完的に上昇したため

と推測できる。

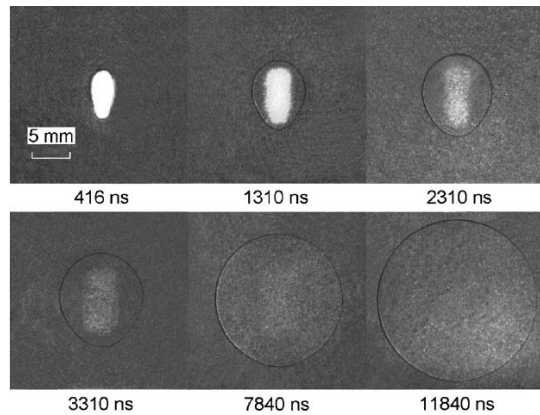


図1 ガラスレーザー駆動レーザー支持爆轟波のシュリーレン写真

(2) レーザー支持爆轟波の加熱構造とその伝播物理の解明

2波長マッハツェンダー法によるレーザー支持爆轟波の撮影結果を図2に示す。高解像度ICCDカメラの導入により、非正常現象の高精度な可視化が可能となった。以前は電子密度の算出において50%近い測定誤差があったものが大幅に改善され、5%程度の誤差で分布を測定可能となった。（図3）

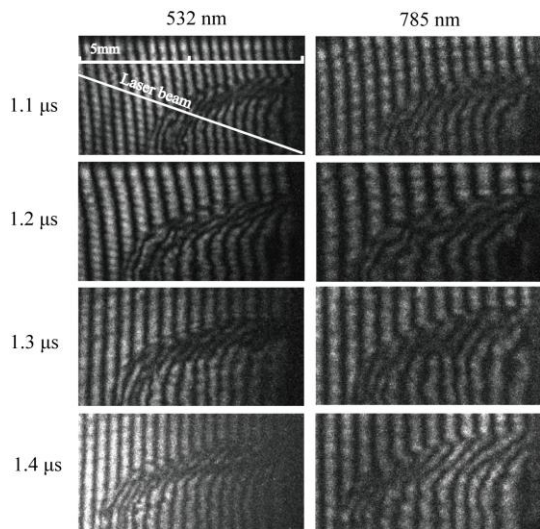


図2 マッハツェンダー干渉画像

この結果、レーザー支持爆轟が維持されている時間帯は、衝撃波の前にプリカーサ電子が存在することが示された。図3中のレーザー照射後 $t = 1.2 \cdot \text{s}$ において電子密度が衝撃波近傍で0ではないことがわかる。

これらのプリカーサ電子は、背後のプラズマ層の真空紫外放射に誘起された光電離が種となっているとの仮定の元、電離エネルギー以上の光子放出数を計算すると、どちらのレーザーでも同等の放出量で維持され

ていることが分かった。

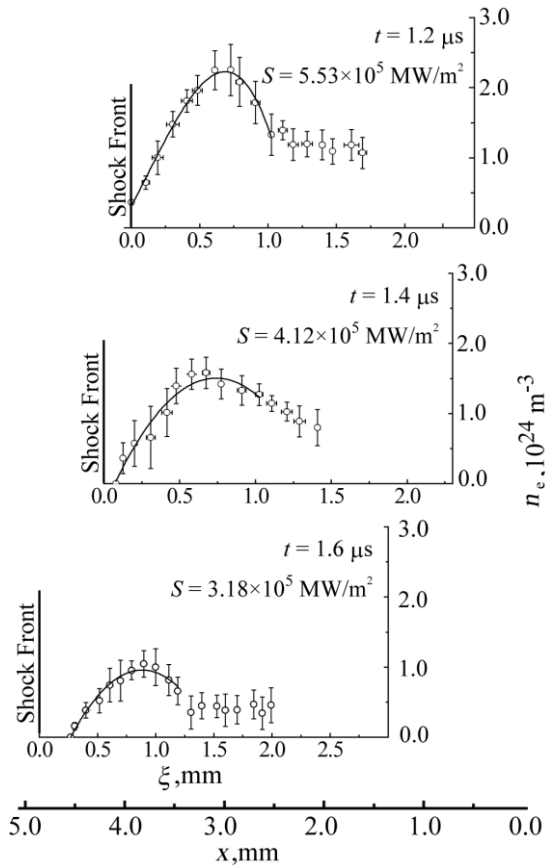


図3 レーザー支持爆轟波内部電子密度分布

(3) 発光分光法によるガラスレーザー誘起プラズマの電子温度計測

広範囲の波長領域のスペクトルを同時測定可能なエッセル分光器を用いて電子温度履歴測定(最高温度の履歴)の精度を上げた. 図4に示す様に, 原子発光線のきれいなボルツマン分布が得られ,

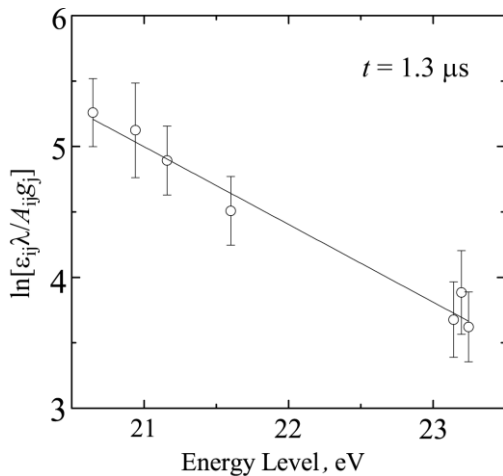


図4 ボルツマンプロット

気体が局所熱平衡(LTE)にあり, 温度は20,000 Kを上回ることが示された.

上記の2項目を含めたこれらの結果は, 今後の数値解析との比較検証にも供しうる貴重なデータである.

5. 主な発表論文等

(研究代表者, 研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計6件)

- ① Shimamura K., Hatai K., Kawamura K., Fukuda A., Wang B., Yamaguchi T., Komurasaki K., Arakawa Y., Internal structure of laser supported detonation waves by two-wavelength Mach-Zehnder interferometer, J. Appl. Phys. Vol. 109, 084910, (2011), 査読あり
- ② Wang B., Komurasaki K., Yamaguchi Y., Shimamura K., Energy conversion in a Glass-laser-induced blast wave in air, J. Appl. Phys. Vol. 108, 124911, (2010), 査読あり
- ③ 嶋村耕平, 畑井啓吾, 河村好一, 福井章泰, 福田章雄, 王彬, 山口敏和, 小紫公也, 荒川義博, 2波長マッハツェンダー干渉法を用いたレーザー支持爆轟波構造の解明, 日本航空宇宙学会誌, 58巻, 2010, pp. 323-329, 査読あり
- ④ Katsurayama K., Komurasaki K., Arakawa Y., A Preliminary Study of Laser powered Launcher Performance., Acta Astronautica Vol. 65, pp. 1032-41, 2009, 査読あり
- ⑤ Oda Y., Kajiwara K., Takahashi K., Kasugai A., Sakamoto K., Komurasaki K., In-Tube Shock Wave Driven by Atmospheric Millimeter-Wave Plasma., Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 48, 2009, 116001, 査読あり
- ⑥ 山口敏和, 畑井啓吾, 小紫公也, 荒川義博, レーザー支持爆轟の終了条件とレーザー波長, プラズマ応用科学会誌, 16巻, 2008, pp. 125-130, 査読あり

[学会発表] (計17件)

- ① Wang B., Michigami K., Komurasaki K., Han T., Arakawa Y., Thrust measurement of laser detonation thruster with a pulsed glass laser, 7th International Symposium on Beamed Energy Propulsion, Ludwigsburg, Germany, Apr. 11 (2011)
- ② Shimamura K., Michigami K., Wang B., Komurasaki K., Arakawa Y., Photoionization in the precursor of Laser supported detonation by ultraviolet radiation, 7th International Symposium on Beamed Energy Propulsion, Ludwigsburg, Germany, Apr. 11 (2011).
- ③ Shimamura K., Michigami K., Wang B.,

- Yamaguchi T., Komurasaki K., Arakawa Y., Laser wavelength dependency of laser supported detonation, 7th International Symposium on Beamed Energy Propulsion, Ludwigsburg, Germany, Apr. 11 (2011).
- ④ 嶋村耕平, 道上啓亮, 王彬, 小紫公也, 荒川義博, レーザー支持爆轟波前方における光電離構造, 平成 22 年度衝撃波シンポジウム, 18-A-2-3, 相模原, 2011 年 3 月 18 日
- ⑤ 道上啓亮, 嶋村耕平, 王彬, 班太郎, 小紫公也, 荒川義博, レーザー支持爆轟波性能の f 値及び気体種依存性, 第 51 回航空原動機宇宙推進講演会, JSASS 2011-002, 広島市, 2011 年 3 月 4 日
- ⑥ 道上啓亮, 嶋村耕平, 王彬, 山口敏和, 小紫公也, 荒川義博, レーザー支持爆轟波の伝播構造における気体種依存性, レーザー学会学術講演会第 31 回年次大会, 調布, 2011 年 1 月 9 日
- ⑦ Shimamura K., Michigami K., Wang B., Komurasaki K., Arakawa Y., Laser supported detonation in argon gas, 49th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, AIAA-2011-1139, Orlando, Florida, USA, Jan. 4 (2011)
- ⑧ 福成雅史, 嶋村耕平, 道上啓亮, 葛山浩, 小紫公也, 荒川義博, マイクロ波ロケットによる単段式打ち上げの検討, 第 54 回宇宙科学技術連合講演会, 静岡, 2010 年 11 月 17 日
- ⑨ Wang B., Han T., Shimamura K., Yamaguchi T., Komurasaki K., Arakawa Y., Study of Laser Propulsion Efficiency from Solid State Laser to Shock Wave Energy in Reduced Ambient Pressure, 61th International Astronautical Congress, IAC-10. C4.8.3, Prague, Czech, Republic, Sep. 27 (2010).
- ⑩ 王彬, 嶋村耕平, 山口敏和, 小紫公也, 荒川義博, ガラスレーザーによるレーザー誘起プラズマの生成と衝撃波の伝播, 日本航空宇宙学会第 41 期年会講演会, C28, 本郷, 2010 年 4 月 15 日
- ⑪ Wang B, 嶋村耕平, 山口敏和, 小紫公也, 荒川義博. Experimental Investigation on the Shock Wave Generated by Solid Laser Induced Plasma in air., 平成 21 年度衝撃波シンポジウム, さいたま, 2010 年 3 月 19 日
- ⑫ Shimamura K, Sawahara H, Oda A, Komurasaki K., Arakawa Y., A cost Evaluation for Transport of Solar Power Satellite by Beamed Energy Propulsion., Asian Joint Conference on Propulsion and Power 2010, Miyazaki, Japan, Mar. 5 (2010)
- ⑬ 嶋村耕平, 澤原弘憲, 小田章徳, 小紫公也, 荒川義博., ビームエネルギー推進を用い

た宇宙太陽光発電の輸送., 平成 21 年度宇宙輸送シンポジウム, 相模原, 2010 年 1 月 13 日

- ⑭ Yamaguchi T, Wang B, Shimada Y, Shimamura K, Hatai K, Komurasaki K., Arakawa Y., Terminating Conditions of laser supported detonation in two different laser., 6th International Symposium on Beamed Energy Propulsion, Scottsdale, Arizona, USA Nov. 26 (2009)
- ⑮ Wang B, Yamaguchi T, Hatai K, Komurasaki K., Arakawa Y., Energy Absorption Structure of Laser Supported Detonation Wave., 6th International Symposium on Beamed Energy Propulsion, Scottsdale, Arizona, USA, Nov. 26 (2009)
- ⑯ Wang B, Yamaguchi T, Hatai K, Komurasaki K., Arakawa Y., Heating Structure and its sustaining condition of laser supported detonation wave., 60th International Astronautical Congress, Daejeon, Korea, Oct. 12 (2009)
- ⑰ 山口敏和, 畑井啓吾, 小紫公也, 荒川義博, レーザー支持爆轟波内部の電子密度および電子温度の計測, 日本航空宇宙学会第 40 期年会講演会, 調布, 2009 年 4 月 15 日

[その他]

ホームページ等

<http://www.kml.k.u-tokyo.ac.jp/rpl/research.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小紫 公也 (KOMURASAKI KIMIYA)

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・教授

研究者番号：90242825

(2) 研究分担者

森 浩一 (MORI KOICHI)

名古屋大学・大学院工学研究科・講師

研究者番号：90375121