

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2007～2009

課題番号：19206089

研究課題名(和文) Push-Pull 複合推進の基礎研究

研究課題名(英文) Basic Study of Push-Pull Hybrid Propulsion

研究代表者：

佐宗 章弘 (SASOH AKIHIRO)

名古屋大学・工学研究科・教授

研究者番号：40215752

研究成果の概要(和文)：本研究は、レーザーパルスを繰り返し照射し推進仕事の一部を抗力低減に費やしエネルギー効率の最適化を図る「Push-Pull 推進」の有効性を実証することを目的として行われ、時間平均レーザーパワー70Wで最高1000%のエネルギー付加効率を達成した。さらに、レーザーパルスエネルギー付加によって生成される高温・低密度領域と衝撃層が干渉して生じる渦輪の挙動と抗力低減メカニズムが明らかになった。

研究成果の概要(英文)：This study aimed in the establishment of ‘push-pull hybrid propulsion,’ in which a small fraction of propulsion power is supplied to reduce a wave drag over a body in supersonic flow. We obtained an efficiency of energy deposition of up to 10. The drag reduction mechanisms, in which vortex rings generated by shock wave-laser-heated gas interaction played an important role were clarified.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	20,400,000	6,120,000	26,520,000
2008年度	5,100,000	1,530,000	6,630,000
2009年度	3,000,000	900,000	3,900,000
総計	28,500,000	8,550,000	37,050,000

研究分野：高速流体力学

科研費の分科・細目：航空宇宙工学

キーワード：抗力、レーザーパルス、超音速流れ、プラズマ、数値流体力学

## 1. 研究開始当初の背景

弱電離気体による抗力低減が1980年代にロシアで始まり、1990年代には繰り返しレーザーパルスによる45%の抗力低減が実証された。ただ、この結果はエネルギー収支の面では実用的ではなく、有効な抗力低減と大きなエネルギー利得の両立が必要な段階となり、本研究が始まった。

## 2. 研究の目的

本研究では、レーザーパルスとアブレーションによる極めて短い時間の運動量、エネルギー作用を繰り返すことによって流れの時間平均的性質が大きく変化する物理機

構を解明し、その性質を積極的に引き出すことによって小パワーで大幅な抗力低減を実現し、推進仕事の一部を抗力低減に費やしエネルギー効率の最適化を図る「Push-Pull 推進」の有効性を実証することを目的とする。吸込み風洞による実証実験および数値流体力学シミュレーションを有機的に融合し、現象解明および作動条件の最適化に関する知見を得ることを目指す。

## 3. 研究の方法

実験は、図1に示す装置によって行った。自作の吸込み式超音速風洞は、真鍮製で、亜音速吸込み部、80mm×80mmの正方断面試

験部、拡大部、バタフライバルブを経て、容積 11.5m<sup>2</sup> のダンプタンクに流入する。設計マッハ数は 2.0 であったが、ピトー圧分布測定によってコア部のマッハ数は 1.92 であることがわかった。

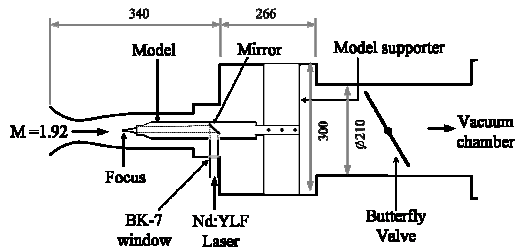


図 1 実験装置

高繰返しエネルギー付加源として、Nd:YLF レーザー（波長 1047nm、パルス時間幅 10 ns (FWHM)、最高繰返し周波数 10 kHz、最高時間平均パワー 80 W) を用いた。ビーム断面形状は、5mm×5mm の矩形である。レーザーパルスは、3 枚の 45° 反射鏡、BK7 製風洞窓を経て、試験体内部に導入され、45° 反射したのち試験モデル先端に取り付けられた平凸レンズによって物体平頭面より 21mm 上流の中心軸上で集光され、絶縁破壊によって流れにエネルギー付加された。

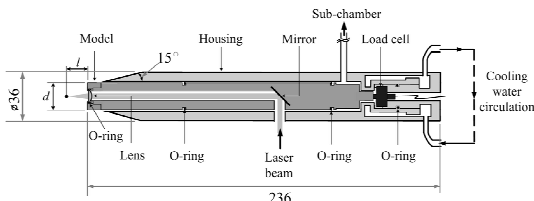


図 2 推力測定装置

図 2 は、抗力測定装置に搭載された試験モデルを示している。試験モデルは、シリンダー内で 2 つの O リングによって保持されており、前方試験部の圧力に応じて背部の圧力を外付けの容器によって一定値に設定することができる。モデルに掛かる差力は、ロードセルによって測定する。抗力測定の較正実験例を図 3 に示す。

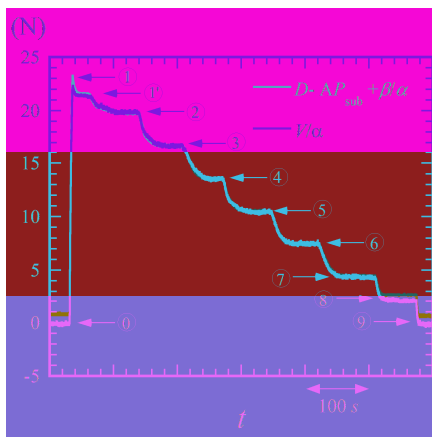


図 3 抗力測定較正実験例

さらに、高速度カメラによって流れ場時間変化のシュリーレン可視化計測を行った。数値シミュレーションでは、AUSM-DV 法により軸対称 2 次元オイラー方程式の解を求めた。

#### 4. 研究成果

図 4 は、抗力測定実験例で、数値計算結果も共にプロットしている。レーザーパルスを繰り返し照射した約 1 秒間だけ、抗力が 3% 低減することを実証した。

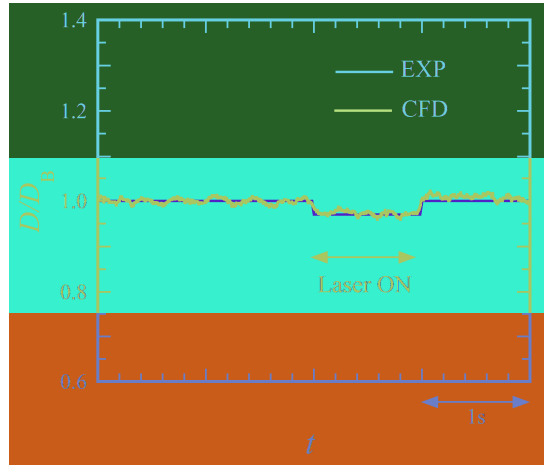


図 4 抗力測定例

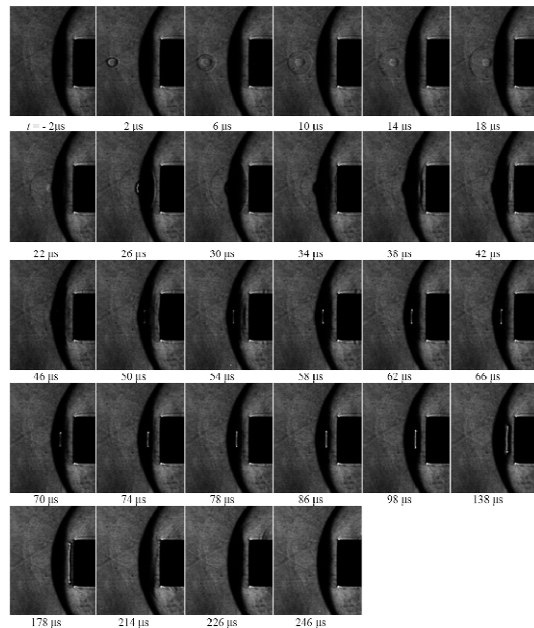


図 5 シュリーレン画像

図 5 は、高速度カメラをもちいたシュリーレン可視化計測例である。これと図 6 に示す数値シミュレーション結果を比較することによって、レーザー加熱気体が衝撃層に入り、バロクリニック効果によって渦輪が生成、淀み点付近で滞留することによって圧力変動

(低下) が起こり抗力が低減することが確かめられた。

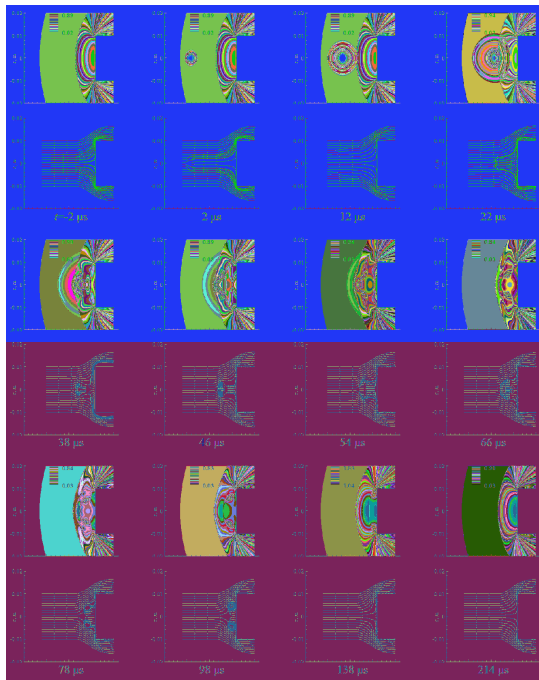


図6 数値シミュレーション

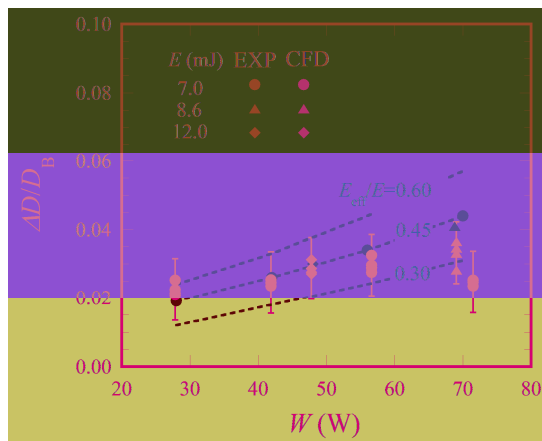


図7 レーザーパワーと抗力低減量の関係

図7に示すように、抗力低減量は、レーザーパワーの増加関数であるが、数値シミュレーション結果と比較するとその増加の割合は非常に小さい。これは、図8に示すエネルギー付加効率の変化にも反映されており、特に5kHz以上の高繰り返し条件において、エネルギー付加効率が大幅に低下している。同程度のレーザーパワーであっても、繰り返し周波数が高い条件の方がこの低下が著しいことから、これは衝撃層によるレーザー光の屈折に起因するとの検討結果となった。この問題は、レーザーパルス照射を風洞側壁窓を通して行うことによって、解決した。

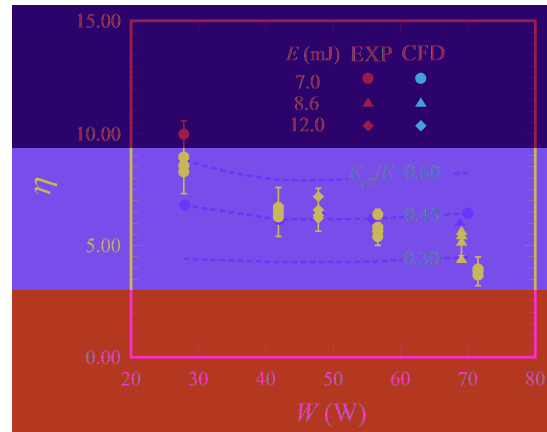


図8 レーザーパワーとエネルギー付加効率の関係

図7、8に示すように、本研究では、マッハ1.92の超音速流れに置かれた平頭円柱に対して10kHzまでの繰り返しレーザーパルス照射によって最大3%の抗力低減、最高エネルギー付加効率10を達成した。流れ場診断より、バロクリニック効果によって生成された渦輪による圧力変調が抗力低減に主要な役割を果たすことがわかった。

#### 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 Akihiro Sasoh, Yohei Sekiya, Takeharu Sakai, Jae-Hyung Kim and Atsushi Matsuda, "Supersonic Drag Reduction with Repetitive Laser Pulses through a Blunt Body," AIAA J., AIAA Journal, 査読有, vol. 48, no. 12, 2010, pp. 2811-2817.
- ② Sakai T., "Supersonic Drag Performance of Truncated Cones With Repetitive Energy Depositions," International Journal of Aerospace Innovation, 査読有, Vol.1, No.1, 2009, pp.31-43.
- ③ Sakai T., "Impulse Generation on Aluminum Target Irradiated With Nd:YAG Laser Pulse in Ambient Gas," Journal of Propulsion and Power, 査読有, Vol.25, 2009, pp.406-411.
- ④ Masaaki Kawamura, Atsushi Matsuda, Hiroshi Katsurayama, Hiroataka Otsu, Detlev Konigorski, Shunichi Sato, Takashi Abe, "Experimental Study on Drag Enhancement for a Blunt Body with Electro Dynamic Heatshield in a Weakly Ionized Plasma Flow," Journal of Spacecraft and Rockets, 査読有, vol.46, No.6, pp1171-pp1177, 2009
- ⑤ T. Sakai, Y. Sekiya, K. Mori, and A. Sasoh, Interaction between laser-induced plasma and shock wave over a blunt body

in a supersonic flow, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Vol. 222, Part G: Journal of Aerospace Engineering, 査読有, 2008, pp. 605-617.

- ⑥ Sakai T., “CFD Simulation of Laser-Ablative Impulse Generation on Aluminum Target,” Journal of Space Technology and Science, 査読有, Vol22. No.2 pp.1-10, 2007.

[学会発表] (計 12 件)

- ① Atsushi Matsuda, Daisuke Takagi, Akihiro Sasoh, Shigeyoshi Ito, Koji Nagata, Yasuhiko Sakai, “ Experimental Study of Interactions Between Weak Shock Wave and Turbulence,” 48<sup>th</sup> AIAA Aerospace Science Meeting, Orlando, USA, 7 January, 2010.
- ② 松田 淳、金 幸亨、荻田直弥、米元聖貴、酒井武治、佐宗章弘「レーザーエネルギー繰り返し注入による超音速飛行体抗力低減実証に向けた ISAS/JAXA 風洞実験」平成 21 年度宇宙航行の力学シンポジウム、相模原、2009 年 12 月 11 日
- ③ 酒井武治、市橋克弘、荻田直也、松田淳、John Sinko、佐宗章弘、「高分子材料のレーザーアブレーションの数値計算」、第 23 回数値流体力学シンポジウム、宮城県仙台市、平成 21 年 12 月 16-18 日
- ④ 松田 淳、関谷洋平、金 幸亨、酒井武治、佐宗章弘「超音速流中でのパルスレーザーエネルギー繰り返し注入による抗力低減効果」第 46 回中部・関西合同秋期大会、京都市、2009 年 11 月 28 日
- ⑤ Atsushi Matsuda, Katsuya Shimizu, Kosuke ikuchi, Kakuei Suzuki, Akihiro Sasoh, “Three dimensional free flight experiment using square bore ballistic range,” 6th International Symposium on Flow Dynamics, Sendai, Japan, 4 November, 2009
- ⑥ Atsushi Matsuda, Daisuke Takagi, Akihiro Sasoh, Koji Nagata, Yasuhiko Sakai“ Preliminary study of interaction between weak shock wave and turbulent flow ”6th International Symposium on Flow Dynamics, Sendai, Japan, 4 November, 2009
- ⑦ Yohei Sekiya, Jae-hyung Kim, Rosli Rizal, Atsushi Matsuda, Takeharu Sakai, and Akihiro Sasoh, “ Supersonic Drag Reduction Using Repetitive Laser Pulses, ”27th International Symposium on Shock Waves, St-Petersburg, Russia, 19-24 July, 2009
- ⑧ Sakai T., Ichihashi K., Matsuda A., Sasoh A., “Calculation of Pulsed Laser-Ablative Impulse on Polyacetal” AIAA Paper 2009-3590, San Antonio, Texas, USA, 22 June, 2009
- ⑨ 酒井武治、市橋克弘、松田淳、佐宗章弘

「ポリアセタールのパルスレーザーアブレーション推力生成」, 日本航空宇宙学会第 40 期年会講演会, 東京都調布市, 2009 年 4 月 9 日

- ⑩ 酒井武治、関谷洋平、松田淳、佐宗章弘「繰返しエネルギー注入による超音速流中の円錐台形状物体の抗力低減効果」, 平成 20 年度衝撃波シンポジウム, 愛知県名古屋市, 2009 年 3 月 17-19 日
- ⑪ Sakai, T., Sekiya, Y., Mori K., Sasoh, A., “An Experimental Sand Numerical Study On Interaction of Laser-Induced Plasma With Shock Wave Over a Blunt Body”, The Forth International Conference on Flow Dynamics, Sendai, Japan, 26-28 September, 2007.
- ⑫ Sakai T., Anju, K., Sawada K., Mori K., and Sasoh A., “Computational Analysis of Impulse Generation Mechanisms in Intense Laser-Solid Interaction,” Lectures and Workshop International -Recent Advances in Multidisciplinary Technology and Modeling-Tokyo, Tokyo, Japan, 25 May, 2007

[その他]

ホームページ等

<http://akagi.nuae.nagoya-u.ac.jp/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

佐宗 章弘 (AKIHIRO SASOH)  
名古屋大学・大学院工学研究科・教授  
研究者番号：40215752

### (2) 研究分担者

酒井 武治 (TAKEHARU SAKAI)  
名古屋大学・大学院工学研究科・准教授  
研究者番号：90323047  
松田 淳 (ATSUSHI MATSUDA)  
名城大学・理工学部・助教  
研究者番号：80415900  
森 浩一 (KOICHI MORI)  
名古屋大学・大学院工学研究科・講師  
研究者番号：90375121

### (3) 連携研究者 なし