

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 26 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(S)

研究期間：2010～2014

課題番号：22226014

研究課題名(和文) Fly By Light Power: 低パワーによる飛躍的な高速空力性能の向上

研究課題名(英文) Fly By Light Power: Improvement in High-Speed Aerodynamics with Low-Power Deposition

研究代表者

佐宗 章弘 (SASOH, Akihiro)

名古屋大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：40215752

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 172,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、超音速飛行における、繰返しレーザーパルスによるパワー付加により、飛躍的な空力性能の向上を実現することを目的として実施され、つぎの成果を得た。(1) 衝撃波とレーザー加熱バブルの干渉によって発生する渦輪による運動量作用を利用し、20%以上の抗力低減、付加パワーの10倍以上の推進パワーの削減を達成した。(2) 衝撃波-境界層干渉領域にレーザー加熱バブルを作用させることによって、境界層の剥離が抑制できることを見出した。(3) 衝撃波の乱流による圧力変動により、平均値の減少量の一桁程度大きい標準偏差が得られ、僅かな作用で圧力場を大幅に変化させることができることが示された。

研究成果の概要(英文)：This study aimed for vastly improving supersonic aerodynamic performance by repetitive laser pulse energy depositions. The following results were obtained: (1) Utilizing the momentum production from the interaction between a shock wave and a laser-heated bubble, a wave drag reduction of higher than 20% and an efficiency of energy deposition of 10 (1000%) were obtained. (2) It was demonstrated that boundary layer separation could be suppressed by the laser energy deposition onto shock wave-boundary interaction region. (3) A standard deviation of one order in magnitude larger than the average decrement in post-shock overpressure modulation past turbulence was obtained, thereby demonstrating the possibility of strongly influencing pressure fields even through weak spatiotemporal inputs.

研究分野：航空宇宙工学

キーワード：超音速流れ レーザー エネルギー付加 乱流 圧力変動 抗力 衝撃波 境界層

1. 研究開始当初の背景

超音速飛行は、揚抗比の低さとソニックブームという大きな問題を抱え、未だ陸地上空での商用飛行は実現していない。グローバル化が進み旅客や物流をより高速に輸送する潜在的な需要が増え続けているにも関わらずこれが実現していないのは、抜本的な技術革新がなされていないためである。これを解決するためには、いわば既存の知識の積み上げでは不十分で、新しい原理を見出す基礎研究が不可欠である。1990年代からプラズマを利用した流体制御が盛んに研究されてきており、低速流れでは誘電体バリア放電(DBD)が境界層制御に有効であることなどが見出されている。しかし、原理的にプラズマ流体制御がより有効なのは超音速流れであるはずである。ロシアでは1980年代から先行研究がなされており、弱電離プラズマで超音速抗力が半減することを実証している。しかし、エネルギー付加効率が1を下回っており実用的に有用な結果ではない。アメリカ、フランス、インド、イギリスなどでも超音速流れに対する弱電離プラズマの効果に関する研究が進められているが、プラズマ生成にレーザーを用いる場合はそのほとんどが単パルス作動実験にとどまり、放電による場合は電極による擾乱の影響を除去できない。

これに対して我々は、過去のレーザー推進に関する研究の研究資産・実績を生かし、高繰返しレーザーパルスによって超音速抗力が低減することを実証、バロクリニック効果による渦生成が抗力低減に重要な役割を果たすことを実証してきた。また、三次元物体を姿勢制御して射出できる正方形断面バリステックレンジを開発、弱い衝撃波がスリットジェットを伝播するときの圧力変動の統計的挙動を明らかにするなどの研究実績、環境を有し、それらを活用して飛躍的な研究成果を挙げるべく、本研究課題が採択された。

2. 研究の目的

本研究は、超音速流れに低パワーの高繰返しレーザーパルスを付加し、圧縮性流れの性質を活用した新しい流体力学的機能を創成、その原理実証を行ない、飛躍的な空力性能の向上を実現、応用への展望を開くことを目的とする。

3. 研究の方法

流体機能の創成に関わる5つの研究課題
 (1) 圧力変動効果を利用した空力性能の向上、
 (2) 境界層への運動量作用 / エネルギー作用による剥離抑制・抗力の低下、
 (3) バロクリニック効果を利用した低密度領域滞留時間・作用力積量の増加、
 (4) 密度 / 速度乱れ場による衝撃波減衰、
 (5) エネルギー付加形態最適化について、衝撃波管、超音速風洞、正方形断面バリステックレンジ、低速格子乱流風洞、高繰返しパルスレーザーおよび放電装置、三次元非常Navier-Stokes方程式

数値シミュレーション、および診断計測を駆使して研究に取り組んだ。

4. 研究成果

(1) 圧力変動効果を利用した空力性能向上

レーザーパルスを繰返し付加することによって、超音速抗力の低減を達成した。図1は、2種類の高繰返しパルスレーザーを用いて得られた、抗力低減によるエネルギー付加効率とパルスエネルギーの関係を示す。エネルギー付加効率は、最高10以上(1000%)に達した。2台の装置は、最高繰返し周波数で1桁の違いがあるが、パルスエネルギー値によってエネルギー付加効率が統一的に整理されることが分かった。また、効率を最高にするための最適値があることは、過剰なパワーを付加せずにシステムを最適化できることを意味し、実用上大きな意義がある。

なお、本研究では独自のリング形状三分力天秤を開発し(論文投稿中)、揚抗比の評価も行ったが、このやり方では抗力を一定に保ったまま揚力のみを増加させることができなかった。すなわち、揚抗比を増加させるためには、マクロなパワーバランスのみを考慮するのではなく、境界層剥離抑制など、流れの局所的な作用を積み上げることが必要であることが示唆された。これの実現は、今後の課題である。

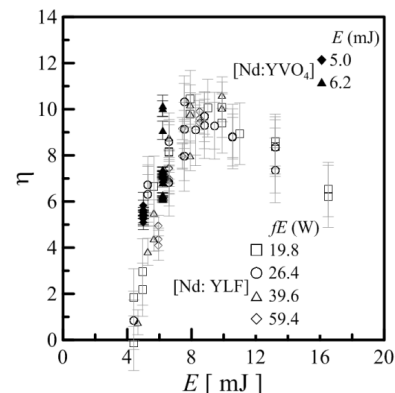


図1 付加エネルギーとエネルギー付加効率の関係

(2) 境界層への運動量作用 / エネルギー作用による剥離抑制・抗力の低下

図2に示すような半球(または円錐) - 円柱 - フレア(円錐台)を組み合わせたモデルにおいて、円柱上の境界層とフレアが誘起する斜め衝撃波の干渉領域における、レーザーエネルギー付加の影響を調べた。図2は実験で得られたシュリーレン画像であり、上半分がエネルギー付加あり、下半分がエネルギー付加が無い場合の流れ場を示す。エネルギー付加が無い場合は、半球頭から円柱部に差し掛かる箇所で境界層が剥離しているが、エネルギーを付加することによってそれが抑制されていることがわかる。

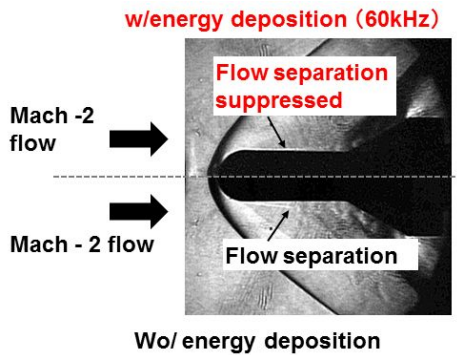


図 2 衝撃波境界層干渉領域に対するエネルギー付加の効果

この効果は、(1)の圧力変調効果とは明らかに異なり、エネルギー付加が上流からの擾乱導入として境界層の剥離抑制に効果を挙げていることを意味する。これは、本研究課題を開始したときに想定していたマクロなパワーバランス（僅かな入力パワーで大きな抗力パワーを削減する）による効果ではなく、「擾乱」という空間的にも時間的にもごく限られた作用が、流れ場の大領域に大きな影響を及ぼすことができることを示唆する、重要な結果である。また、(1)のアプローチは、レーザー加熱パルスの滞留時間が淀み点付近で長くなり、運動量作用が高められることを利用するものであった。これに対して、図2の場合はレーザー加熱パルスが境界層内にて滞留時間が増大することを利用するものであり、エネルギー付加により運動量作用を施す、流体力学として新しい方法である。

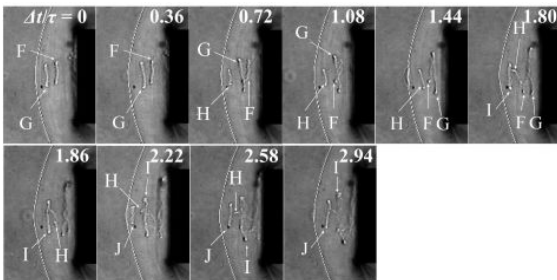


図 3 強干渉条件（繰返し周波数 30kHz）における渦輪の干渉のシュリーレン画像

(3)バロクリニック効果を利用した低密度領域滞留時間・作用力積量の増加

レーザー加熱パルスと衝撃波の干渉で、バロクリニック効果により生成された渦輪は、物体に圧力変調を及ぼす領域にできるだけ長く滞留することが重要であることが、実験・数値解析によって明らかになった。

図3に、マッハ1.9の流れに置かれた平頭円柱前方に形成される衝撃層に、レーザー加熱パルスを流入させたとき（エネルギー付加繰返し周波数 30kHz）の流れ場のシュリーレン画像を示す。この条件では、渦輪同士の干渉が強く、下流の渦輪(F)が上流の渦輪(G)に追い越される slip-through がみられる。さ

らに繰返し周波数を高めると、渦輪同士の距離がさらに短くなるが、過密状態となってかえって複雑な干渉が収まり、渦輪が物体前方に堆積したような形態となる（図4）。これにより、衝撃波は先鋭化し、背後の圧力が低下、抗力が低減する。

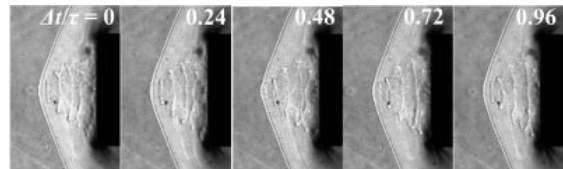


図 4 繰返し周波数 30kHz における衝撃波層のシュリーレン画像

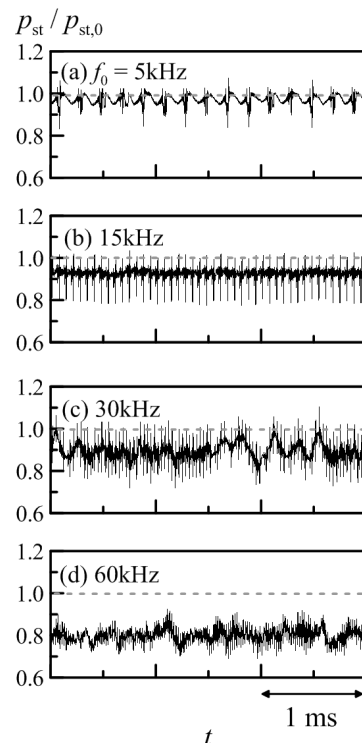


図 5 淀み点で測定された圧力履歴

図5に淀み点で測定された圧力履歴、図6にそのスペクトルを示す。繰返し周波数が低い（周波数帯 I、10kHz まで）場合は、エネルギー付加周波数のスペクトルが最も強いが、強干渉帯（周波数帯 II、10kHz ~ 30kHz）では、渦輪の相互干渉により、低周波数帯にピークが現れる。さらに高周波数帯（III、30kHz 以上）では、低周波数帯でブロードなスペクトルとなる。これは、図4で示した渦輪同士が堆積して、準定常的な流れ場を形成することに対応している。この解釈は、数値解析によっても裏付けられた（図7、8）。

以上で得られた知見をもとに、渦輪の滞留時間に着目し、truncated cone（図9）、平頭面にスパイクを配した形状（図10）を用いて、抗力値と推進パワー節約量とのトレードオフの向上がなされた。

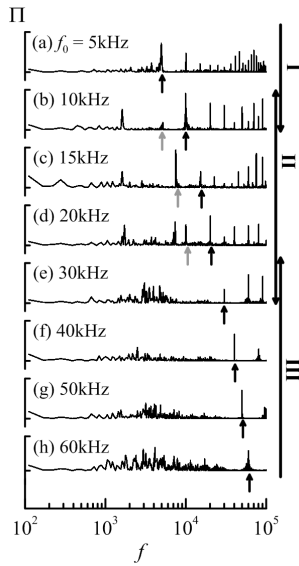


図6 図7のパワースペクトル密度分布

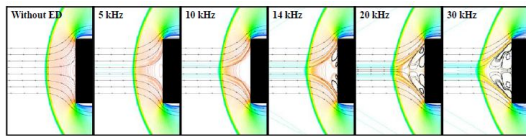


図7 図3、4と同一条件での数値解析により得られた流線分布

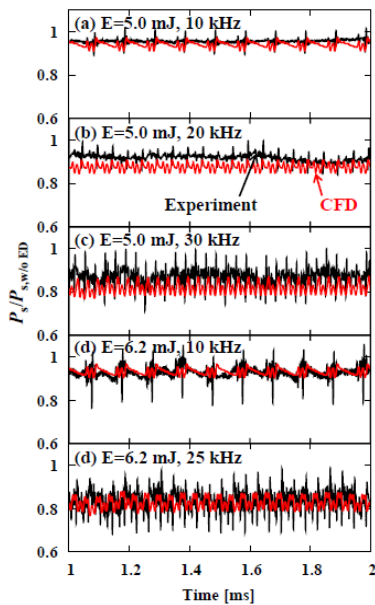


図8 図7と同一の数値解析により得られた淀み点圧力履歴

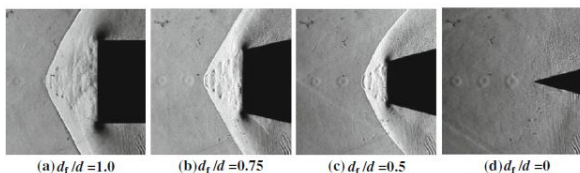


図9 エネルギー付加による Truncated cone 周りの流れ場変調のシュリーレン画像

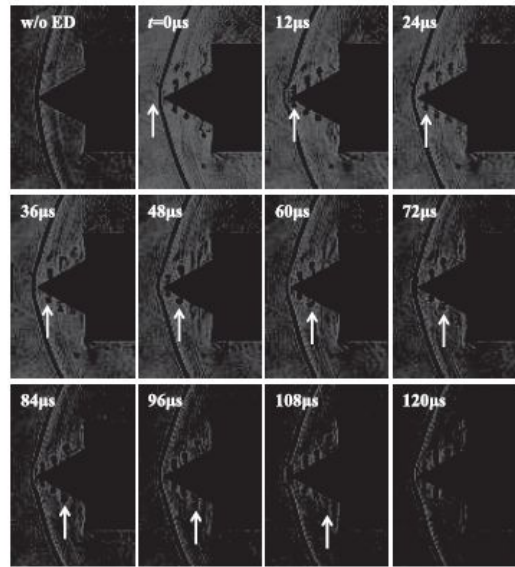


図10 エネルギー付加によるスパイク付平頭物体周りの流れ場変調のシュリーレン画像

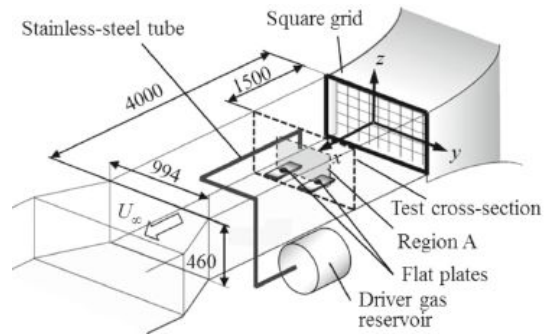


図11 衝撃波 乱流干渉実験システム

(4) 密度 / 速度乱れ場による衝撃波減衰

レーザーによるエネルギー付加を多点に施すと、流れに乱れを施すことができる。この場合、流れがどのような変調を起こし、圧力場にどう作用するかを系統的に調べる必要がある。ところが、その基礎となる衝撃波乱流干渉における圧力変調に関して、まだ殆ど明らかにされたとの報告が見当たらない。そこで本研究では、基礎に立ち返り、衝撃波と等方性乱流との干渉による圧力変調について、主に低乱風洞で生成した格子乱流を用い、実験的に調べた。

図11に実験装置の概要を示す。低乱風洞は、幅994mm、高さ460mmの矩形断面を持つ。縮流部出口に格子を置き乱流を発生させ、1.5m下流を試験部とした。圧力溜に蓄えられた高压空気を電磁弁で開放し、内径5.4mmのステンレス管内を3.75m伝播させたあとに、低乱風洞内、試験部上方の開放端から、プラスト様の衝撃波を発生させる。開放端から215mm離れた2箇所の対称位置にて、平板上で反射した衝撃波背後の圧力履歴を、圧電式圧力変換器にて測定した。なお、この衝撃波発生 - 圧力測定は、全て自動化され、1000回

程度までの実験回数からの統計値を取得できるようにしている。

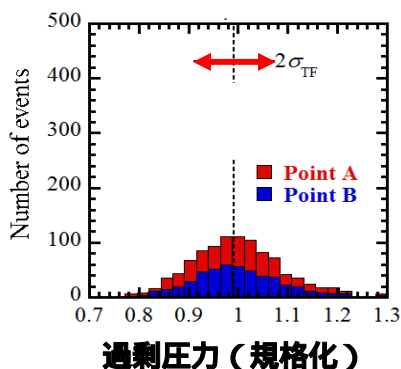


図 12 過剰圧力ピーク値のヒストグラム

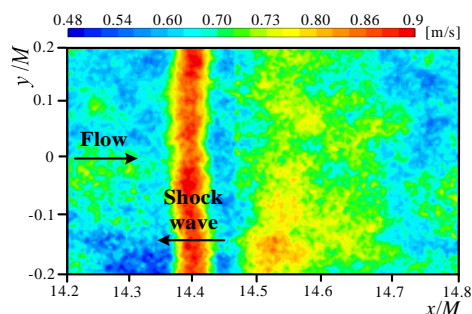


図 13 PIV 法で測定された速度変動分布、500 回の実験 2 乗平方平均より算出

図 12 に、500 回の測定によって得られた、過剰圧力ピーク圧のヒストグラムを示す。本実験条件の場合、衝撃波が乱流領域を通過することによって平均値が 1%減少したが、その標準偏差は 9%にも達した。すなわち、40%以上の割合で、ピーク圧はかえって高くなっていたことになる。すなわち、乱流による衝撃波の圧力変動を評価するとき、決定論的な評価ではなく、多数回あるいは多点での統計データ取得し、平均値だけでなく、標準偏差も評価することが重要であることが分かった。

さらに、図 13 に示すように、500 回の実験を繰り返して統計量を取得することによって、変動速度の 2 次元分布を得ることができた。

(5) エネルギー付加形態最適化

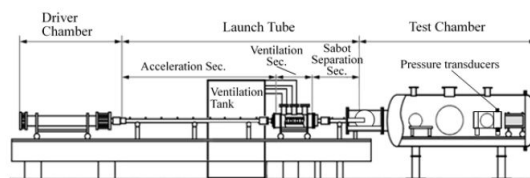
エネルギー付加形態として、放電によるエネルギー付加が流れに及ぼすメカニズムを、衝撃波管による実験によって調べた。放電の場合、電極を突起物としないように配置すると、絶縁破壊を起こし放電を持続できる条件が、流れの条件に大きく作用され、繰り返し付加については、さらに困難を極めた。これは、当初の予定通りに研究が進められなかった点であり、研究の展開としてはレーザーパルスによるエネルギー付加に力点を集約した。

一報、レーザーパルスによるエネルギー付加は、上記の制約が比較的弱く、繰り返し周波数、パルスあたりの付与エネルギーを制御パ

ラメーターとした系統的な実験を行うことができた。

(6) 実験手法・その他関連する成果

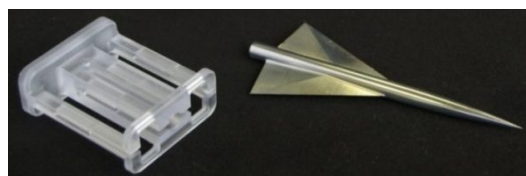
実験室で可能な超音速飛行実験装置として、風洞と自由飛行実験装置（バリスティックレンジ、図 14）の 2 つに大別できる。後者に関して、本研究では実験手法の向上に大きな成果が得られた。



(a) 装置全体図



(b) 加速管断面



(c) 自由飛行モデル（右）とサボ（左）の例

図 14 矩形断面エアロバリスティックレンジ

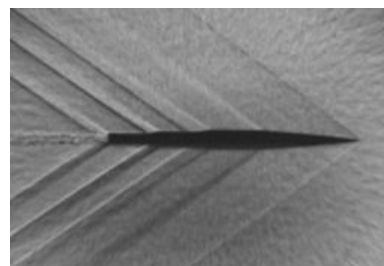


図 15 矩形断面エアロバリスティックレンジによるマッハ 1.7 自由飛行実験のシュリーレン画像

本装置は、3次元の超音速飛行体を制御された姿勢で飛ばすため、加速管断面を正方形から、図 14(b)に示すように矩形に改造した。さらに、「管内カタパルト射出法」を開発し、モデルとサボを姿勢を保ったまま加速管内で分離することによって、必要な自由飛行部の長さを 1m 程度まで短くすることができた。

(6) 総括

本研究では、Fly By Light Power の概念が実現可能であることを示す成果、すなわち

[推進パワー削減量] : [付加パワー]比 = 10 を達成し、さらにレーザー加熱バブルによって発生する渦輪の挙動をはじめとする関連基礎現象の解明、およびエネルギー付加による境界層剥離抑制、衝撃波背後圧力の擾乱による変調作用などの新たな発見・知見を得ることができた。これらの成果は、当該技術の近い将来の実用に向けたマイルストーンと位置付けることができ、今後の更なる展開の指針を示すものである。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 15 件)

Atsushi Toyoda, Kakuei Suzuki, Takahiro Imaizumi, Akihiro Sasoh, Staged Aftbody for Alleviation of Tail Boom, AIAA Journal, 査読有, Vol.52, No.12, 2014, pp. 2899-2901, DOI:10.2514/1.J052518

T. Osuka, E. Erdem, N. Hasegawa, R. Majima, T. Tamba, S. Yokota, A. Sasoh, K. Kontis, Laser Energy Deposition Effectiveness on Shock-Wave Boundary-Layer Interactions over Cylinder-Flare Combinations, Physics of Fluids, 査読有, vol.26, 2014, 096103, DOI: 10.1063/1.4896288

Akihiro Sasoh, Tatsuya Harasaki, Takuya Kitamura, Daisuke Takagi, Shigeyoshi Ito, Atsushi Matsuda, Kouji Nagata, Yasuhiko Sakai, Statistical behavior of post-shock overpressure past grid turbulence, Shock Waves, 査読有, vol.24, issue 5, 2014, pp.489-500, DOI: 10.1007/s00193-014-0507-6

Akira IWAKAWA, Takeharu SAKAI, Akihiro SASOH, Repetition Frequency Dependence of Wave Drag Reduction Induced by Laser-Pulse-Energy Depositions, Aerospace Technology Japan, 査読有, Vol.11, 2013, pp.53-60, <http://doi.org/10.2322/tastj.11.53>
T.Kitamura, K. Nagata, Y. Sakai, A. Sasoh, O. Terashima, H. Saito and T. Harasaki, On Invariants in Grid Turbulence at Moderate Reynolds Numbers, Journal of Fluid Mechanics, 査読有, Vol.738, 2014, pp. 378-406, DOI: 10.1017/jfm.2013.595

A. Sasoh, J.-H. Kim, K. Yamashita, T. Sakai, Supersonic aerodynamic performance of truncated cones with repetitive laser-pulse energy depositions, Shock Waves, 査読有, Vol.24, No.1, 2014, pp.59-67, DOI: 10.1007/s00193-013-0463-6

Jae-Hyung Kim, Atsushi Matsuda, Takeharu Sakai, Akihiro Sasoh, Wave Drag Reduction with Acting Spike Induced by Laser-Pulse Energy Depositions, AIAA Journal, 査読有, Vol. 49, No. 9, 2011, pp. 2076-2078, DOI: 10.2514/1.J051145

Jae-Hyung Kim, Atsushi Matsuda, Akihiro Sasoh, Interactions among baroclinically-generated vortex rings in building up an acting spike to a bow shock layer, PHYSICS OF FLUIDS 23, 査読有, 2011, 021703-1-4, DOI: 10.1063/1.3534002

[学会発表](計 122 件)

A. Sasoh, T. Tamba, N. M. Nguyen et al., Shock Wave Interaction Experiments Using Double-Driver Shock Tube, 21st International Shock Interaction Symposium University of Latvia, 2014/8/6, Riga (Latvia)

Akihiro Sasoh, N.Hasegawa, S.Yokota, Single-Plate-Imaging, Two-wavelength Mach-Zehnder Interferometer, 29th International Symposium on Shock Waves, University of Wisconsin, 2013/7/15, Madison (U.S.A)

[図書](計 0 件)

[産業財産権]

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

佐宗 章弘 (SASOH, Akihiro)
名古屋大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号: 4 0 2 1 5 7 5 2

(2) 研究分担者

酒井 康彦 (SAKAI, Yasuhiko)
名古屋大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号: 2 0 1 6 2 2 7 4
酒井 武治 (SAKAI, Takeharu)
名古屋大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号: 9 0 3 2 3 0 4 7
松田 淳 (MATSUDA, Atsushi)
名城大学・理工学部・准教授
研究者番号: 8 0 4 1 5 9 0 0
横田 茂 (YOKOTA, Shigeru)
筑波大学・システム情報系・准教授
研究者番号: 3 0 5 4 5 7 7 8

(3) 連携研究者

長田孝二 (NAGATA, Kouji)
名古屋大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号: 5 0 2 7 4 5 0 1