

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2008～2010

課題番号：20360383

研究課題名(和文) レーザーアブレーション誘起液体ジェットによる  
間欠パルスデトネーション

研究課題名(英文) Repetitive Pulse Detonation by Laser Ablation Induced Liquid Jet

研究代表者

永山 邦仁(NAGAYAMA KUNIHITO)

九州大学・名誉教授

研究者番号：20040446

## 研究成果の概要(和文)：

本研究は、透明物質境界に対して、パルスレーザー入射方向により、レーザーアブレーションのフルエンス閾値が劇的に減少する我々の研究を流体へ発展させたものである。透明な流体同士では、アブレーションに続いて高速の液体ジェット発生し、急速な微粒化へと至る過程を発見し、その現象が、フルエンス、入射エネルギー、レーザービーム形状に依存することを明らかにした。また、エネルギー物質の液体物性に依存する微粒化過程を明らかにした。

## 研究成果の概要(英文)：

Present study is an extension of our previous study concerning appreciable reduction of laser ablation threshold fluence of transparent material interface. This effect is laser direction dependent. For transparent fluid combinations, it is found that laser ablation is followed by high-speed liquid jet with very fast slow down due to very fast atomization at the jet tip. It is shown that this phenomenon depend on fluence, energy, and beam profile. We obtained characteristic atomization process depending on energetic liquid material properties.

## 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	8,600,000	2,580,000	11,180,000
2009年度	4,000,000	1,200,000	5,200,000
2010年度	1,100,000	330,000	1,430,000
総計	13,700,000	4,110,000	17,810,000

研究分野：航空宇宙工学

科研費の分科・細目：総合工学・航空宇宙工学

キーワード：アブレーション、瞬間写真観測、液体ジェット、微粒化、デトネーション

## 1. 研究開始当初の背景

本研究は、透明物質同士の境界に対して、屈折率の大きい物質から小さい物質へパルスレーザーを入射させたとき、いわゆるパルスレーザーアブレーションのフルエンス閾値(単位面積あたりのエネルギー密度)が劇的に減少するという過去の我々の研究を基礎としている。

本グループの既往の研究において、透明な固体材料(PMMA およびガラス)と空気あ

るいは水との界面において、固体材料から周囲媒体へレーザーを入射させた場合に限り、アブレーションが容易に生じることが発見された。この事実は、屈折率の大きい物質から小さい物質へレーザーを入射させるとき、反射光の電界と入射光の電界とが加算されるのに対し、その逆の場合、反射による位相変化によって打ち消し合うことになり、前者の場合、入射・反射光が加算される高屈折率物質表面では、実効的に強電界となることが

フレネル式で説明できる。ただし、アブレーションは、非線形現象であり、かつ光エネルギー吸収による現象であり、上述の光学式ではあくまで定性的記述であることに注意しなければならない。

少なくとも、我々の研究グループが試験した限りでは、すべての場合において、定性的には上述の規則で説明できない現象は観測できなかった。

## 2. 研究の目的

このことが、一般的な規則として成立するならば、透明な流体同士でも類似もしくは同等の現象が観測されるはずであるとの予測に基づき、本研究は、基本的な現象の解明と、航空宇宙応用を目指した基本データの取得を目的としたものである。

予備的実験から、液体ジェットとそれが微粒化する過程を含み、正確な現象把握には、高解像度の写真撮影が不可欠であり、現状では、可視パルスレーザーを光源とするシャドグラフ撮影だけが要求を満たす実験方法であるとの認識から、レーザーアブレーションのエネルギー源および光源としてのパルスレーザー、さらには着火試験にもレーザーパルスを利用するため、レーザー装置を備品として含む研究計画をまとめた。

## 3. 研究の方法

主要な実験としては、使用の利便性、基本的な組み合わせとして、水-空気系を選択した。屈折率の大きな物質から小さい物質へのレーザー光入射を実現するため、図1の実験アセンブリを用いた。水-空気界面での光反射を全反射もしくはそれに近づけた方が電界強度が増大することはあきらかであり、前述のアブレーション閾値の低下につながると考えられることから、図のように斜め下方から入射させた。

また、集光レンズによるビームウエストの近傍では、液体の誘電破壊によるキャビテーションとプラズマ発光が生じる。この発光と、液体界面でのアブレーションによる発光とを区別してとらえるため、図1のように、液体表面での反射位置と集光点を離れた場所に設定した。後に示すように、このことにより、ビームウエスト近傍と、液体表面との2カ所で別々の発光が生じていることを確認できた。

本研究の最終目標は、液体燃料等のエネルギー物質のアブレーションと着火過程の情報取得であるが、液体のエネルギー物質に対しては異なる試料アセンブリを用いた。後述する。

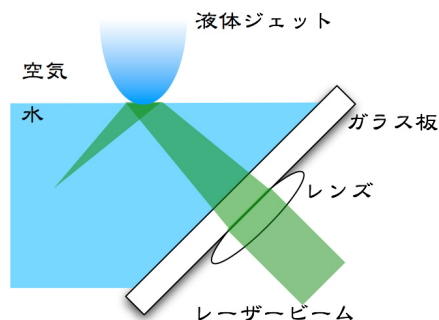


図1 水-空気系実験アセンブリ模式図

パルスレーザーを光源とし、高解像力フィルムに記録する手法は、すでに確立された手法であるが、フィルム入手の困難な現状では記録密度の優位性はあきらかであるのに、行われなくなりつつある。本研究では、書類コピー用に開発されたミニコピーフィルムを撮影に使用した。コントラストが高すぎるものが欠点だが、研究遂行時点で入手できるフィルムでは、十分高い空間解像力（850 pixel/mm）を持ち、35mmフィルム1駒で約2億 pixel の記録が可能である。

この他に、現有の増倍機能付き CCD カメラなどを適宜使用した。

研究結果から、現象がパルスレーザーのフルエンス、エネルギーの他に、ビーム形状へ大きく依存することが明らかとなり、3台の Nd:YAG レーザーを用い、ビーム形状をガウス型、トップハット型（ほぼ平坦強度分布）およびトーラス型（中央低強度）の3つについて試験した。特にトップハット型を基準とし、それと比較することによりビーム形状依存性を調べた。

## 4. 研究成果

### 4.1. 入射方向依存性

透明体表面で、レーザービーム入射方向によりアブレーションフルエンス閾値が大きく異なることを見るために、図1のアセンブリによる試験と、空中から水中へ集光する実験とを行ない、結果を比較した。

図2がその典型的な結果を示す。(a)は図1のアセンブリを用い、対物レンズ側にピンホールを使用し、シャドグラフ光学系を用いて撮影したものである。予測のように、ビームウエスト近傍でキャビテーションバブルが発生し、そこを起点として、圧力波列が観測できる。また、水面では、発光が生じつつ、キャビテーションより強い圧力波面が伝播している。空中にも衝撃波面が確認できる。

水面の発光は、ビームウエスト近傍のものより明るく、この撮影は、オープンシャッターであるため、シャドグラフ光学系でピンホールを使用しても強い発光であるため記

録されている。水面上にもジェットが見えるが、これは後述する。これに対して、(b)は水中の大きなバブル位置にパルスレーザーを集光して得られた写真である。この場合も水面上に小さいアブレーションによると考えられるジェットが撮影されている。

ただし、この2つの写真には大きな実験条件の差がある。(a)では、水面での入射光のフルエンスは、 $25 \text{ J/cm}^2$  であるのに対し(b)での対応する値は、 $190 \text{ J/cm}^2$  と、フルエンスにしてほぼ 10 倍の差がある。水と空気という流体同士の組み合わせに対しても、屈折率の異なる物質の界面でのアブレーションフルエンス閾値の大きな方向依存性については、同じ規則が成立するという証拠になる試験結果である。フレネル式によれば、全反射条件では、電界強度は2倍となり、電磁気エネルギー密度は4倍となるが、実験結果からは、10 倍の違いとなった。現象の非線形性等の効果によると考えられる。

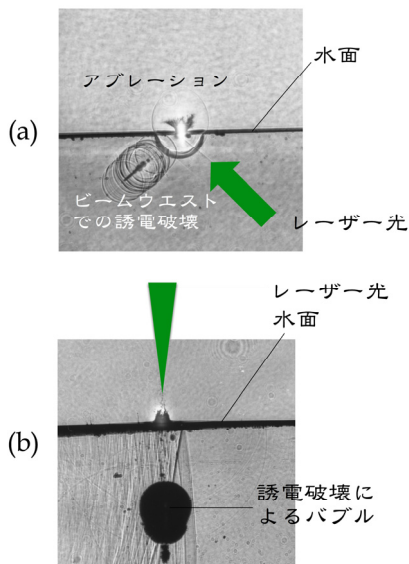


図2 アブレーションフルエンス閾値の入射方向依存性試験結果

#### 4.2. 水のレーザーアブレーションと液体ジェットの発生

図3は、3種類のレーザービーム形状に対して、レーザー入射後、 $5 \mu\text{s}$  後の液体ジェットの写真を示している。(a)はトップハット型、(b)はガウス型、(c)はトーラス型のビームを用いた。フルエンスとエネルギー値はそれぞれ、(a)  $30 \text{ J/cm}^2$ ,  $300 \text{ mJ/pulse}$ , (b)  $20 \text{ J/cm}^2$ ,  $300 \text{ mJ/pulse}$ , and (c)  $25 \text{ J/cm}^2$ ,  $62 \text{ mJ/pulse}$  である。トーラス型のレーザーのみ出力が小さいため、他の条件と異なる。

アブレーションフルエンス閾値は、レーザービーム形状には依存せず、ほぼ  $20\text{--}25 \text{ J/cm}^2$  であった。この値は、固体の透明材料の対応する条件での閾値の約2倍である。

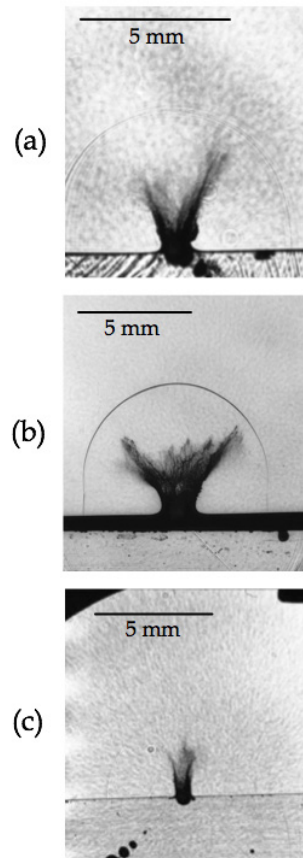


図3 水のレーザーアブレーション誘起ジェットとそのビーム形状依存性 (実験条件は本文中に記載)

図3より、アブレーションによって、生じた高温高圧の水のプラズマが、空気中の衝撃波および水中の圧力波を誘起し、さらにそれが、高速の液体運動を誘起してジェットを発生させていることが分かる。液体ジェットは、多数の細いリガメントの形で水面から立ち上がっている。

アブレーションからの遅延時間を変化させてジェットの挙動を撮影した結果から、以下のような結論が得られた。ジェットを構成するリガメントの先端速度を写真から見積もると、ビーム形状がガウス型の場合が最も速く、約  $1 \text{ km/s}$  となった。この結果は、アブレーションで発生するプラズマの状態がビーム形状に依存することを示している。すなわち、ガウス型の場合が最も高効率で吸収されていることになる。

また、ジェットの時間履歴の観察から、リガメント先端は時間とともにきわめて急激に減速していることが明らかとなった。これは、通常の噴流で観測されているように、リガメントは進展とともに引き延ばされ、分断されて微粒化が生じるという事実と理解できる。ただし、ここで観測しているのは、非

常に速いジェットであり、現象の進展は通常より非常に速い。リガメント先端で生じる微粒化による液滴群は写真に撮影されているのが確認でき、20-50 ミクロン程度のものが生じている。

ジェットの到達点、大きさ、速度、履歴、すべて入射レーザーフルエンスだけでなく、入射エネルギー値に依存することがわかった。アブレーションであるから、現象がフルエンスに依存するのは当然だが、レーザーエネルギー自体への依存性は、固体表面の通常のアブレーションでは問題にならない。液面のアブレーションでは、投入エネルギーによって、同じフルエンスであれば、液面での集光径が決まり、その結果として、アブレーションで生じるプラズマ塊のサイズが決まることになる。これが、空気中の衝撃波だけでなく、水面を駆動して圧力波の発生と流動を誘起してジェットを発生させるのであるから、現象のエネルギーへの依存性は、流体のアブレーション特有のものである。

#### 4.3. 液体エネルギー物質のレーザーアブレーション特性

以上の水の結果を基にして、液体状エネルギー物質の挙動について調べた。物性の異なる液体試料として、水の他にエチルアルコール、および真空用油を選択し、そのアブレーション挙動を撮影した。粘性の大きな違い、および蒸気圧の大きな違いによる効果を見ることが目的である。また、それ以外にも別の数種類の油についてもアブレーションと着火試験をおこなった。

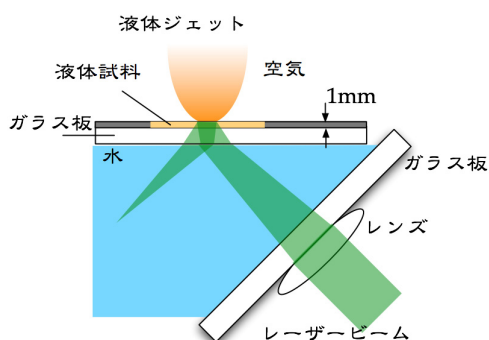


図4 液体状エネルギー物質実験アセンブリ模式図

図4はエネルギー物質を試料とする場合に用いた試料アセンブリの模式図である。液体試料の中には、揮発性のものがあるので試料を設置してから、アブレーション試験まで短時間でこなす必要があるが、撮影試験では困難な条件であること、試料液体の界面の高さは、レーザー集光レンズからの距離が、界面でのレーザーフルエンスを決める主要な

パラメータであることから、図1のアセンブリは不可能であると考えた。図4のアセンブリでは、液体試料は膜状に設置しているため、レンズからの距離は多少の蒸発によっても大きく変化することはない。それでフルエンスの再現性を担保する。

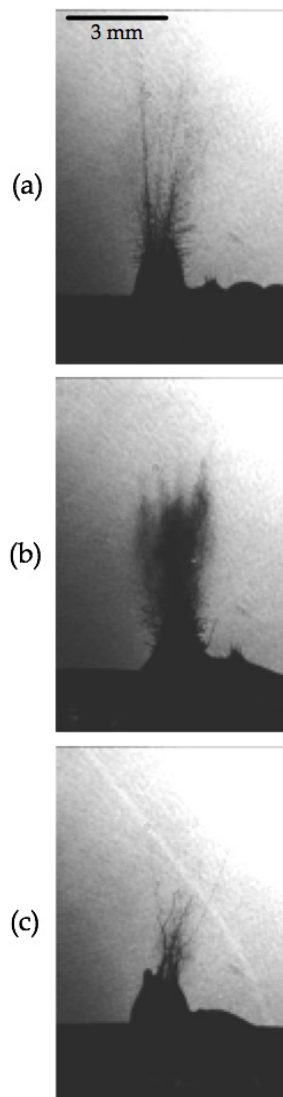


図5 3種類の液体試料のアブレーション誘起液体ジェットの典型写真(a)は水、(b)はエチルアルコール、(c)は真空用油の結果である。すべて、遅延時間 30  $\mu$ s 後の写真である。

なるべく反射効果を高めるため、各試料の全反射の臨界角となるような入射角が望ましいが、図4の系について、ビーム経路を計算すると、レーザービーム入射角は、最終の液体試料の臨界角ではなく、途中に介在する水の臨界角となるように入射させれば、液体試料表面では自動的に、試料の臨界角となることがわかった。したがって、試料によらず

常に同じ入射角で試験できる。

図5は、3種類の液体試料に対しておこなった撮影試験の結果の一部を示す。アブレーションより、その後の液体ジェット、微粒化、蒸発挙動等に違いがあるので、アブレーション後、30  $\mu$ s の写真を掲載している。標準となるように掲載した水(a)と比較すると、エチルアルコール(b)は、揮発性が高い(蒸気圧が高い)ために、微粒化というより蒸発によって、明瞭なリガメントを形成せず霧状のジェットとなっていることが分かる。

これに対して、真空油(c)の場合、蒸気圧が極めて低く、粘性も大きいため、微粒化の進行が最も遅くなっていることが遅延時間の異なる写真から確認できる。

数種類のエネルギー物質に対して、アブレーション誘起液体ジェットによる着火試験を別途おこなった。アブレーション位置上方に熱線を設置した系で試験し、すべての試料で燃焼を確認できた。ただし、上述のように、微粒化後は、空気の粘性のため、粒子速度は急速に減少し、アブレーションから着火まで比較的大きな遅延時間を有することが分かった。

微粒化が生じた領域に、3つ目のパルスレーザーを集光して、空気のブレイクダウンを生じさせ、そのプラズマによって、反応を誘起することも試みた。集光位置、ブレイクダウンプラズマ発生タイミングを制御すれば、高温による発光領域の拡大が認められた。アブレーションの閾値、燃焼挙動、等については、大きな物質依存性はないことが確認できた。

## 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. Y. Utsunomiya, T. Kajiwara, T. Nishiyama, K. Nagayama, S. Kubota and M. Nakahara, *Liquid Atomization Induced by Pulse Laser Reflection underneath Liquid Surface*, Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 48, 052501-01-05 (2009)
2. T. Kajiwara, Y. Utsunomiya, T. Nishiyama, K. Nagayama, S. Kubota and M. Nakahara, *Generation of Energetic Liquid Jet and Atomization by Pulse Laser Reflection at Inclined Surface of High Refractive Index Material*, Sci. Tech. Energetic Materials, Vol.70, No.4, pp. 105-108 (2009)
3. Y. Utsunomiya, T. Kajiwara, T. Nishiyama, K. Nagayama, S. Kubota and M. Nakahara, *Liquid Atomization Induced by Pulse Laser Reflection at and beneath the Liquid Surface*, Proc. SPIE, Vol. 7126,

71261G-1-8 (2009)

4. Y. Utsunomiya, T. Kajiwara, T. Nishiyama, M. Nakahara and K. Nagayama, *New Method of Liquid Atomization Based on Pulse Laser Ablation of Liquid Surface*, Proc. 11th Triennial Int. Annual Conf. Liquid Atomization and Spray Systems, (2009)
5. Y. Utsunomiya, T. Kajiwara, T. Nishiyama, K. Nagayama, and S. Kubota, *Pulse laser ablation at water-air interface*, Applied Physics A, Vol.99, pp. 641-649 (2010)
6. Y. Utsunomiya, T. Kajiwara, T. Nishiyama, K. Nagayama, S. Kubota and M. Nakahara, *Laser ablation of liquid surface in air induced by laser irradiation through liquid medium*, Applied Physics A, Vol.101, pp. 137-141 (2010)

【学会発表】(計9件) 主要なもののみ掲載

1. Y. Utsunomiya et al, *Liquid Atomization Induced by Pulse Laser Reflection at and beneath the Liquid Surface*, 28<sup>th</sup> International Congress on High Speed Imaging and Photonics, Canberra (2008)
2. Y. Utsunomiya et al, *New Method of Liquid Atomization Based on Pulse Laser Ablation of Liquid Surface*, 11th Triennial Int. Annual Conf. Liquid Atomization and Spray Systems, Vail, USA (2009)
3. Y. Utsunomiya et al, *Laser ablation of liquid surface in air induced by laser irradiation through liquid medium*, Conf. Of Laser Ablation 2009, Singapore (2009)
4. K. Nagayama et al, *High-speed imaging of pulse laser ablation of liquid surface in air*, 29<sup>th</sup> International Congress on High Speed Imaging and Photonics, Morioka (2010)

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

永山邦仁 (名誉教授)

研究者番号: 20040446

(2) 研究分担者

西山貴史 (助教)

研究者番号: 80363381

(3) 連携研究者

梶原隆司 (技術職員)

研究者番号: 80423507