

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 10 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2013

課題番号：24656516

研究課題名(和文)液中ブレイクダウンとマイクロ波照射を用いた衝撃波・気泡による動噴霧形成メカニズム

研究課題名(英文) Mechanism of unsteady spray formations by shock wave and bubble formation induced by breakdown

研究代表者

中谷 辰爾 (Nakaya, Shinji)

東京大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：00382234

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円、(間接経費) 930,000円

研究成果の概要(和文)：レーザーブレイクダウンおよび放電を利用して体内でブレイクダウンし、衝撃波、気泡との干渉および気泡崩壊により局所高圧力場を形成し、それにより液体を噴射するメカニズムを実験により調べた。レーザー照射の場合、ビームウェスト上流に多数の気泡が形成され、気泡同士の干渉が観察された。気泡は膨張した後、収縮する。ノズルの噴射口から、レーザーの照射および気泡の収縮・崩壊に対応していると考えられる液体の噴射が確認された。二段目の噴射は非常に強力であり、その遅れ時間は気泡寿命とキャビテーションを含む液体の音速で推測された。放電においても、電極間隙に気泡が確認され液体の噴射が確認されたが、レーザーと比べて弱かった。

研究成果の概要(英文)：An atomization process of water injected by a laser breakdown and an electrical spark discharge was investigated experimentally. Bubbles were formed by the laser irradiation with a convex lens and the electrical spark discharge in a vessel with optical windows, and the behavior of shock waves, bubble formations, bubble growths and collapses were observed using a high speed video camera. Water was injected from a nozzle. In the case of the laser breakdown, bubbles were formed along the laser path mainly at the upstream of the beam waist. Bubble interactions were clearly observed, which affect the maximum radius and the bubble life time. Liquid thread injections were observed right after the laser breakdown. After a delay time of approximately 0.4 ms, a strong water jet was injected from the nozzle. In the case of the electrical discharge, bubble formations and water injections were also recognized although the injection was much weaker compared with that by the laser breakdown.

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：微粒化 キャビテーション レザーブレイクダウン 放電 液体ジェット 気泡崩壊

1. 研究開始当初の背景

インジェクタによる燃料噴射や微粒化の促進には、ディーゼルエンジンに使用されているコモンレールのように噴射圧力の高圧力化が有効である。しかしながら、システムの高圧化は機器の高耐圧化によるコストの増大やリークや摩耗などといった故障の原因となる。高圧力期間の短縮は、システムの安全性の向上かつ材料肉厚の低減につながり、信頼性の向上かつコストの低減に大きく寄与する。そのため、本研究では、常時高圧力をかけるのではなく、噴射口近傍付近を局所的に高圧力化し液体を噴射することを試みる。局所高圧力化には、能動的に気泡を生成し、その気泡が崩壊するときに生じる衝撃波を利用する。液体内で気泡や衝撃波を形成するため、レーザーおよび放電によりブレイクダウンを起こす手法を提案する。プラズマ生成により生じた衝撃波、また気泡と衝撃波の干渉、気泡崩壊は能動的な一種のキャビテーション生成と考えられる。これらのメカニズムは高速かつ定常、非線形的であり非常に複雑であるのに加え学術的理解が乏しい。また、噴射された液系は自由界面を有しており、その内外部を伝播する衝撃波との干渉による微粒化は学術的な理解は乏しく、非常に興味深い。

2. 研究の目的

液体中の衝撃波と気泡の干渉に関して、液相中の気泡崩壊により強いジェット上の流れ場が形成されることが知られており、医療分野ではドラッグデリバリーなどに応用されている。気液二相からなるこの非正常現象は非常に複雑である。また、それによる自由噴流の形成や、衝撃波と自由界面を有する液体の干渉を調べた例はほとんどない。本研究は、液相内でブレイクダウンを起こし、それにより生じる気泡、衝撃波および気泡崩壊のメカニズムの解明を目指す。また生じた衝撃波を利用し、噴射口からの液体噴射および微粒化機構のメカニズムを明らかにする。本研究ではこのような、衝撃波、気泡、気泡崩壊、ジェット形成および外部への噴射挙動といった混相流の複雑な挙動に関する理科学的な知見や基礎データの蓄積を行い、低圧力、小型、単純構造および低コストの高性能インジェクタの可能性について検討を行う。

3. 研究の方法

本研究では、液体内部でのブレイクダウン、気泡生成、衝撃波および気泡崩壊挙動を調べるため、内部が可視化可能な噴射装置を製作し、実験を行った。実験装置の概略図を図1に示す。図1はレーザーブレイクダウンにより気泡生成を行う場合の実験装置概略図である。容器内部には十分脱気した純水が満たされている。噴射された液体は液体タンクから供給される。また、タンクに高圧ガスポンペから加圧することで圧力噴射を行うこと

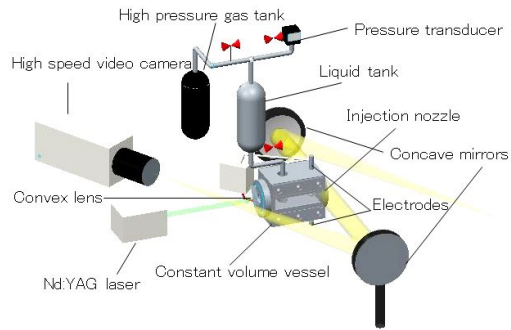
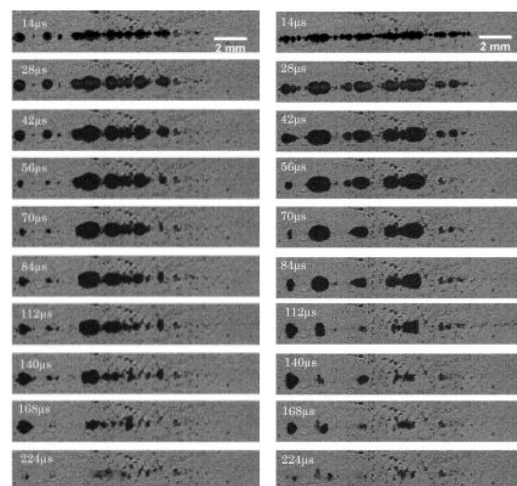


Fig.1 Experimental apparatus

も可能である。レーザーには Nd-YAG レーザー (Lotis TII, LS-2131M) の第二高調波 (532nm) を利用した。レーザーエネルギーは 140mJ 以下で可変とした。照射されたレーザー光は、 $f=100\text{mm}$ の凸レンズで集光される。ビームウェストの位置はノズル出口から 5mm, 10mm, 15mm とした。レーザーはノズル噴射口と同軸上に入射され、入射窓に対面にノズル出口が設置される。放電を行う場合には、噴射口から上流 6mm の位置に対向するように電極を設置した。電極間隙は可変である。今回は電極間隙を 0.1mm とした。また、放電用の回路には火花点火用の CDI 回路を利用した。220 μF のコンデンサに電荷をため、コイルで 1000 倍に昇圧する。噴射ノズル口径は 0.1mm とした。可視化容器内および噴射の様子の影写真をとるために、ピンホールで広げられたダイオードの光を凹面鏡で平行光にし、高速度カメラ (Vision Research, Phantom V710) で測定した。高速度カメラには 200mm の Nikkor レンズ、2.0 倍のテレコンバータおよびベローズを利用して拡大撮影を行った。撮影速度は、噴射微粒化の様子を 49026fps で、キャビテーション挙動を 71055fps で行った。

4. 研究成果

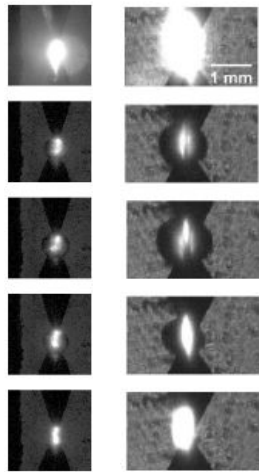
図2にレーザーを入射した場合の液相内の気



(a) 39mJ

(b) 99mJ

Fig.2 Formations of bubbles by laser irradiation with $f=100\text{mm}$ convex lens.



(a) with wall (b) without wall
Fig.3 Formations of bubbles by electrical spark discharge of 500kV.

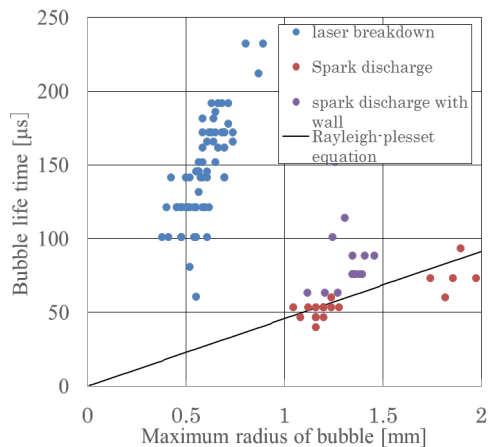


Fig.4 Relationship between bubble life time and maximum bubble radius.

泡の生成挙動を示す。レーザーの照射エネルギーを 39mJ と 99mJ の場合の結果を示す。今回の光学系の設定では、レーザー照射エネルギーと吸収エネルギー間には線形関係が観察され、レーザーの照射エネルギーを x とすると吸収エネルギー y は $y=0.8345x$ で近似される結果が得られた。画像の中心がビームウェスト位置であるが、より上流側で多くの気泡が生成していることがわかる。気泡生成後、気泡は膨張し、その後収縮する。入射エネルギーが大きいほど初期気泡の数が多い。また、気泡径の最大値はエネルギーが小さいほうが大きく、気泡が収縮する時間も大きい。これは列状に生成した気泡の干渉であることがわかる。また、衝撃波の伝播によりキャビテーションが生じている。気泡収縮後には、小さな気泡においてはトロイダルじょう状に気泡崩壊している。

図 3 に放電によって気泡を生成した場合の結果を示す。今回設計した容器では、電極の設置位置がノズル噴射口から離れており、強い噴射が観察されなかった。また、生成される気泡数も限定されていた。レーザーの場合と同様に、気泡の干渉効果を模擬するため、

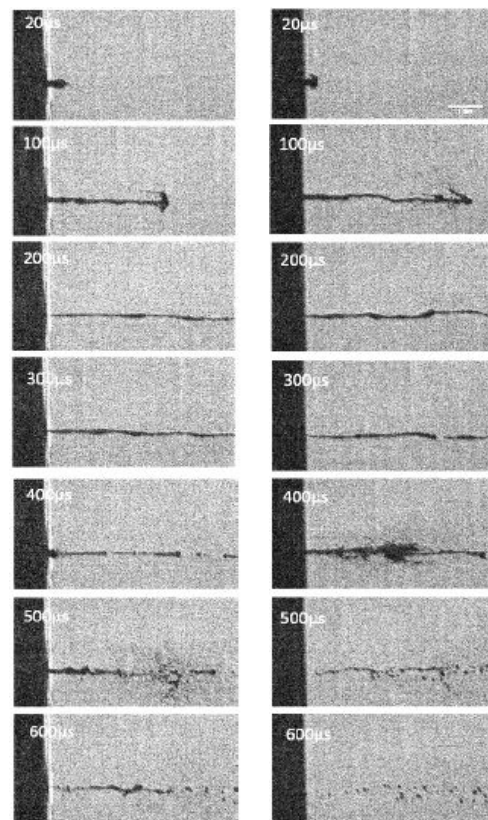
電極近傍に壁面を設置した。これは気泡が近傍に存在しているのと同じ効果を示す。それにより放電の場合においても液体の噴射が観察された。壁面の効果として、レーザーの場合と同様に、干渉の効果により気泡の最大径が抑制されていることがわかる。放電電圧を 200 から 500kV と大きく変化させてみたが気泡が崩壊するのに要する時間はあまり変わらなかった。

Rayleigh-Plesset の方程式は、単一気泡の膨張、収縮を扱う基礎方程式であり、以下のようにあらわされる。

$$R\ddot{R} + \frac{3}{2}\dot{R}^2 = \frac{1}{\rho} \left\{ p(R) - p_{\infty}(t) - \frac{4\mu\dot{R}}{R} - \frac{2\sigma}{R} \right\} \quad (1)$$

R は気泡半径、 ρ は密度、 p は圧力、 μ は粘性係数、 σ は表面張力である。この方程式から単一気泡の寿命を理論的に評価した。図 4 に寿命予測と測定結果を示す。壁面なしの放電の場合の寿命は理論的に予測することができた。しかしながら、レーザーブレイクダウンおよび壁面を有する放電の場合には、理論式で予測できない。これは気泡干渉の効果であると考えられる。

液体内部の状態を把握した後、水の噴射試験を行った。まずレーザーを照射した場合の噴射の様子を図 5 に示す。レーザーの照射エネルギーが 37mJ と 101mJ の場合の結果を示す。レーザー照射後すぐに、噴口から液体が噴射されているのがわかる。その後 300 μ s



(a) 37mJ (b) 101mJ

Fig.5 Instantaneous images of water injection by laser irradiation.

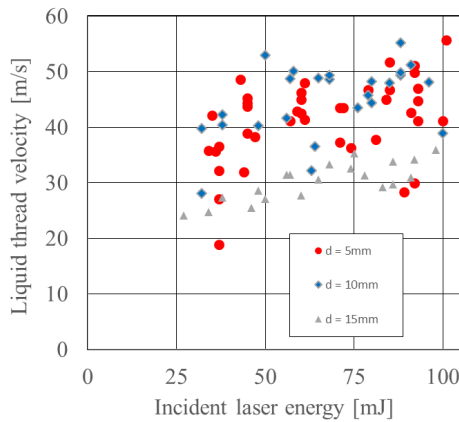


Fig.6 Relationship between liquid thread velocity and incident laser power.

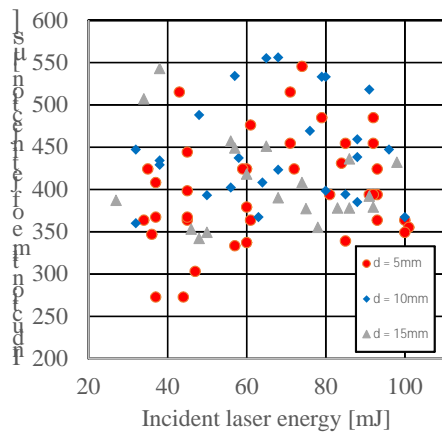


Fig.7 Relationship between induction time of liquid jet injection and incident laser power.

程度まで液系のように成長し、微粒化しているのがわかる。400 μ s 近傍で強力なジェット上の流れがノズルから噴射されているのがわかる。液系は概ね直線状に噴射されているものの、高速ジェットは比較的広範囲に噴射されていることがわかる。高速のジェット状の流れが後方から前方の液系に衝突し、微粒化が促進されていることがわかる。照射エネルギーが大きくなると、最初に生成する液系の速度が速くなる。図6にレーザー照射エネルギーと液系の速度の関係を示す。一方で、ジェット状の噴射が観察される時期も早くなる。図7にジェット状の噴射が観察される時期と入射エネルギーの関係を示す。これらの速度は、レーザーの照射位置がノズル噴射口近傍に近いほど速くなった。最初の噴射はレーザーブレイクダウンによって生じた衝撃波によって噴射されると考えられる。室温で液体の水の音速は 1500m/s に達し、数 μ s 以内に噴射されると考えられる。ジェット状の噴射は気泡崩壊に起因すると考えられる。図2で観察されるように、気泡は概ね 200 から 300 μ s で崩壊する。この時、キャピテーションの存在により、液相中のボイド率が増加し、音速が小さくなると考えられる。

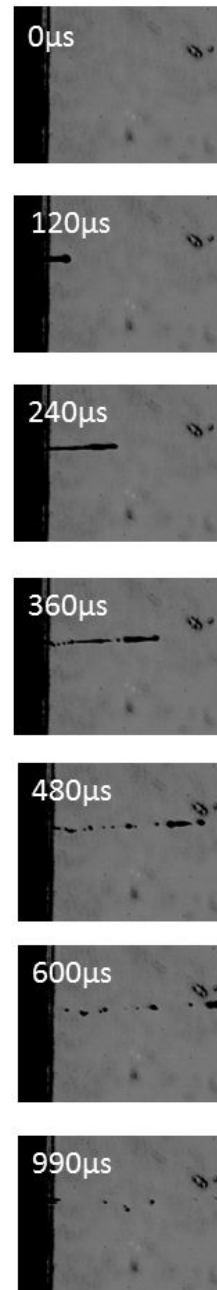


Fig. 8 Instantaneous images of water injection by electrical spark discharge of 384kV

100m/s 程度にまで音速が低下したと考えられ、5mm を伝播するのに 50 μ s 程度要し、結果的に 400 μ s 程度の遅れ時間が観察されると考えられる。また、液系の速度が入射エネルギーに対して正の相関を示すように、この速度から求めた噴射動圧も同様に正の相関を持つことが確認された。

同様に放電を使用して水の噴射を行った。その時の噴射の様子を図8に示す。放電の場合にはレーザーの場合ほど強い噴射は観察されなかったものの、同様に液体の噴射を観察することができた。弱いジェット状の噴射も観察された。電極近傍へ壁面を挿入した場合、より強い噴射が観察された。しかしなが

ら、壁面を設置した場合、電極から壁面へ放電する場合もあった。壁面へ放電した場合、より強い噴射が観察されており、電極形状の影響が強く観察された。高速度カメラを使用した観察は、ノズル外微粒化と液相内気泡挙動を同時に測定することができなかつたため、明確に関連付けることはできなかつた。そのため、図8には壁なしの場合の結果を示す。電極がノズル噴射口から離れると、噴射が弱くなった。インクジェットプリンタで観察されるような、液系が噴口から伸び、不安定性により波打ち、液滴が千切れる挙動が観察された。放電を用いた手法においても有効に液体を噴射することができることがわかつた。

レーザーブレイクダウンおよび放電により、液相内に気泡を生成し、それにより誘起される衝撃波、気泡生成、気泡崩壊および気泡干渉の挙動を詳細に調べ、生じる局所高圧力を利用して液体を噴射するメカニズムを実験的に調べ、基礎データの蓄積を行った。レーザーの場合には非常に多くの気泡が観察され、非常に強力な噴射が確認された。一段目の液系の噴射とそれに続く強力なジェットが観察され、概ね内部の気泡挙動と噴射挙動の関連が調べられた。気液二相流における気泡の干渉挙動に関する知見とそれによる液体噴射の可能性が示された。

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)

〔学会発表〕(計 1 件)

堀江 顕,夏目 和人,中谷 辰爾,津江 光洋,放電およびレーザーブレイクダウンによる気泡および衝撃波生成による液体噴射と微粒化の観察,第 51 回燃焼シンポジウム,2013 年 12 月 4 日~12 月 6 日,大田区産業プラザ Pio.

〔産業財産権〕

出願状況(計 1 件)

名称:液体噴射装置および液体噴射方法

発明者:津江光洋,中谷辰爾

権利者:津江光洋,中谷辰爾,国立大学法人 東京大学

種類:特許

番号:特願 2013-250324

出願年月日:2013 年 12 月 3 日

国内外の別: 国内

〔その他〕

ホームページ等

東京大学大学院工学系研究科航空宇宙工学 専攻津江・中谷研究室

http://park.itc.u-tokyo.ac.jp/kono-tsue_lab/jp/index.html

6. 研究組織

(1)研究代表者

中谷 辰爾 (NAKAYA SHINJI)

東京大学・工学系研究科・准教授

研究者番号:00382234

(2)連携研究者

津江 光洋 (TSUE MITSUHIRO)

東京大学・工学系研究科・教授

研究者番号:50227360