

研究論文

実用ガソリンインジェクタにおける微粒化過程の可視化 (液系分裂, 液滴の衝突・合体挙動)

Visualization of Atomization Process in Practical Gasoline Injector (Liquid Ligament Break-up, Droplet Collision and Coalescence)

河原 伸幸, 富田 栄二, 中越 真一, 住田 守
 (Nobuyuki KAWAHARA) (Eiji TOMITA) (Shinichi NAKAGOSHI) (Mamoru SUMIDA)
 岡山大学 岡山大学 岡山大学 三菱電機株式会社
 (Okayama Univ.) (Okayama Univ.) (Okayama Univ.) (Mitsubishi Electric Corp.)

The purpose of this study is to investigate breakup of liquid ligament and droplet interaction in gasoline sprays using an ultra high-speed video camera (maximum camera speed: 1Mfps) with a long-distance microscope. The visualized experiments were carried out using PFI injector in a closed chamber at the atmospheric pressure. Break-up of liquid ligament into droplets can be visualized near the nozzle. Droplets are formed in relation with wavelength of wavy shape on liquid ligament. Collision of droplets or interaction of droplets can also be visualized in downstream of spray from practical PFI injector. Coalescence, stretching separation, and penetration phenomena of droplets are affected by direction of droplet and Weber number. Regimes of droplet's interaction in downstream of PFI injector is well fitted with modeling of droplet collision using two droplets.

Keywords: Atomization, Microscopic visualization, Fuel break-up, Droplet interaction, Penetration, Coalescence

1. はじめに

ガソリンエンジンではインジェクタにより燃料（ガソリン）の微粒化を行い、数多くの小さな燃料油滴を形成させ、燃焼室等に供給される。インジェクタにより噴射される燃料噴霧は、ガソリンエンジンの出力や効率に強い影響を与えるために、その性能を評価することは非常に重要である^(1, 2)。一方、インジェクタのノズル孔から噴出される液体燃料は、液柱もしくは液膜状に広がり、それ自身の不安定性あるいは周囲気流との干渉から不安定となる。不安定となった液柱や液膜はやがて分裂（一次分裂）し、液塊・液糸・大液滴等を形成して、さらに微細な液滴に分裂していく（二次分裂）。

このようなインジェクタの微粒化過程を実験的に評価するために、高速度ビデオとレーザシートを用いた可視化手法⁽³⁾、レーザ誘起（エキサイプレックス）蛍光法（LIF）⁽⁴⁾、レーザドップラ流速計（LDV）および位相ドップラ流速計（PDA）^(5, 6)、粒子軌跡相関法（PIV）⁽⁷⁾などが用いられている。これらの手法により、噴霧の貫通距離や噴霧角、液滴/燃料蒸気分布、噴霧液滴粒径およびその速度を詳細に把握することができる。また、数値シミュレーションにおいてもTAB（Taylor Analogy Break-up）モデル⁽⁸⁾やDDM（Discrete Droplet model）法などが用いられている。これらは、二次分裂過程での燃料噴霧挙動の評価と考えられる。

一方、ノズル孔から噴出される液体燃料の基礎的な燃料噴射構造に関しては、数多くの研究がなされてきた。ChigierとReitzは液体噴流の分裂過程に関して、詳細にまとめている⁽⁹⁾。HiroyasuらやAraiらは、液体噴流の分裂過程を滴下域、

層流域、遷移流域、乱流域、噴霧流域の5領域に分けて説明している^(10, 11)。彼らは、一次分裂過程におけるノズル内キャビテーションの影響も評価している。Wierzbnaは、気流中に存在する液滴の分裂過程において、液滴ウェーバ数により評価している⁽¹²⁾。このように噴孔から噴出する液体燃料の分裂過程や液滴分裂過程に関しては以前から研究されているが、実用インジェクタが形成する噴霧において、液糸から液滴への分裂の様子や液滴同士が干渉する様子はほとんど報告されていない。

従来から液滴単体での衝突・合体現象は報告されている。例えば、エチルアルコールを用いて液滴半径比が1と0.5の異なった直径比での衝突現象における合体と跳ね返りの理論モデルが調査された⁽¹³⁾。また、液滴半径比1, 0.75, 0.5の場合において、分離衝突と合体衝突の境界は実験的に調査された⁽¹⁴⁾。シミュレーションにおいては、液滴径の等しい正面衝突における現象が報告された⁽¹⁵⁾。さらに、液滴が衝突・分離する様子をモデル化し、衝突噴霧形状を予測することも行われている⁽¹⁶⁾。ただ、実用インジェクタが形成する噴霧においては、液滴同士の合体や衝突といった挙動は非常に微小領域で高速に起こる現象であるため、高拡大で高速な撮影方法が必要となる。

我々は、このような実用インジェクタが形成する噴霧におけるノズル近傍での分裂過程を評価するために、超高速度ビデオカメラに長距離顕微鏡を組み、拡大・高速での可視化観察を行ってきた⁽¹⁷⁾。実用スワールインジェクタにおいて、ノズル近傍での液膜振動状態を可視化した。

そこで、本研究では噴霧形成過程を詳細に観察するため、

原稿受付：2009年4月30日

超高速ビデオカメラに長距離顕微鏡を組み、吸気管噴射式インジェクタが形成する噴霧における液糸から液滴への分裂過程ならびに燃料液滴同士の衝突・合体の様子を可視化した。また、二液滴を干渉させ構築された Ko の衝突モデル⁽¹⁰⁾に実用インジェクタでの衝突・合体の様子をあてはめ、モデルの適用性を評価した。

2. 実験装置および撮影方法

2.1 燃料噴射弁

本実験では、ポート噴射式火花点火機関を想定した噴霧観察可能なPFIインジェクタを使用した⁽¹⁸⁾。PFIインジェクタは噴孔数が10、噴孔径が0.2mmである。PFIインジェクタはノズル先端にカバーを装着し、一つの噴孔からの噴霧を観察できるようにしており、残りの九つの噴孔からの噴霧はドレンによりまとめて排出される(図1)。

2.2 実験装置

図2に実験装置の概略図を示す。インジェクタは、定容容器上部に垂直に取り付けられている。定容容器は円筒形状をしており、容器の大きさは直径φ180mm、高さ350mmである。容器は光学計測を行うため、四つの観測窓を有している。燃料にはガソリンと似た物性値を示し、安全性の高いドライソルベントを用いた。ドライソルベントを窒素により加圧することで噴射する。燃料の噴射圧力は0.3MPaであり、雰囲気圧力は大気圧で実験を行った。また、PFIインジェクタではパルスジェネレータでパルス幅を3.5msに設定した。その噴射信号を噴射弁ドライバを介してインジェクタに送ることにより燃料噴射を行い、カメラでの撮影タイミングの同期を取った。

2.3 計測方法

本研究で用いた超高速ビデオカメラ(島津製作所Hyper Vision HPV-1, 312×260 pixels)は、最大100万コマ/秒 (fps) の高速度撮影が可能である⁽¹⁸⁾。長距離顕微鏡と組み合わせることで、拡大撮影を行うことができる。さらにバローレンズを取り付けることにより、長距離顕微鏡のみの撮影画像に比べて約3倍に拡大して撮影することができる。長距離顕微鏡にバローレンズを組み合わせて拡大撮影した際の画像解像度は約5.7μm/pixelであり、焦点深度は約0.05mmであった。長距

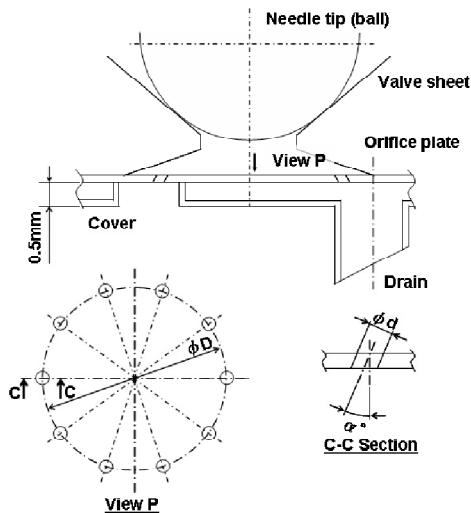


Fig. 1 Detail of nozzle shape

離顕微鏡と超高速カメラの設置方法を写真で図3に示す。図4で示す全体像は長距離顕微鏡のみを用い(カメラ撮影速度 250kfps : 露光時間 2μs)、その他の画像は全てバローレンズを長距離顕微鏡に取り付け撮影(カメラ撮影速度 500kfps : 露光時間 1μs)を行った。光源には高輝度のメタルハライドランプを用い、バックライト法により撮影を行った。バックライト法のため液滴径の検出を行う場合には、画像奥行き方向の影響が生じる。しかし、焦点深度が約0.05mmと短いため、焦点が一致するものを選ぶことにより、できるだけ精度よく検出を行った。図4に本計測法で得られる噴霧全体像とバローレンズを用いた拡大撮影結果を合わせて示す。ノズルから出た燃料は、まず液柱を形成し、その後、液柱先端部において分裂が始まり、液糸が形成され、最終的に液滴へと分裂する。本報では、液糸から液滴への分裂ならびに下流での液滴同士の干渉に関して、調査を行った。

3. 結果と考察

3.1 液糸から液滴への分裂

まず、液糸から液滴への分裂の様子を示す。図5に液糸表面での波長の定義を示す。ここで液糸表面での波長は液糸表面での波立ちの一波長として定義した。図6に液糸から液滴へ分裂する様子の例を示す。液糸が時間の経過とともに波打った状態となり、やがて液滴に分裂していく様子が見られる。また、液糸から液滴への分裂は、液糸長さによって二つの液滴

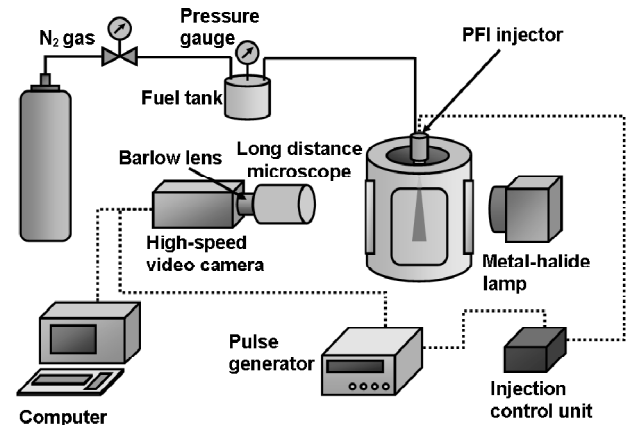


Fig. 2 Experimental setup

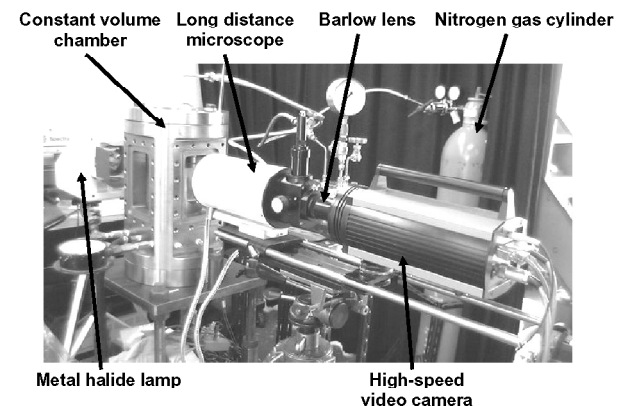


Fig. 3 High-speed video camera with long-distance microscope

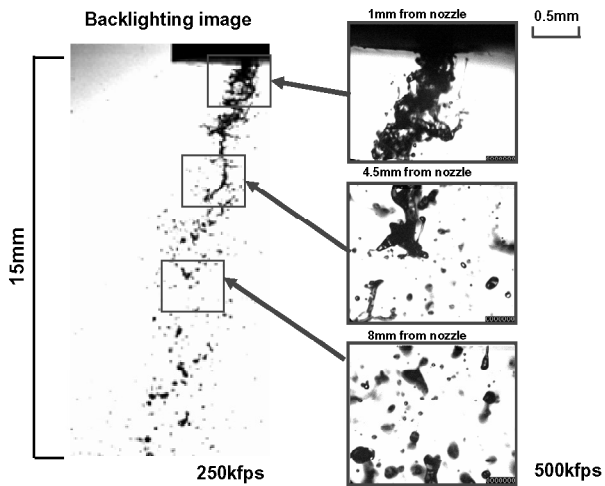


Fig. 4 Spray from PFI injector

に分裂するものや三つの液滴に分裂するものなど分裂する液滴の数は一定ではなかった。これは、周囲気体との干渉により液系表面に波立ちが生じ、波動の不安定性と表面張力により液滴に分裂しているため、液系の移動速度により周囲気体からの影響が異なることが原因と考えられる。そこで、液系表面での波長と分裂した後の液滴径との関係を 図7に示す。

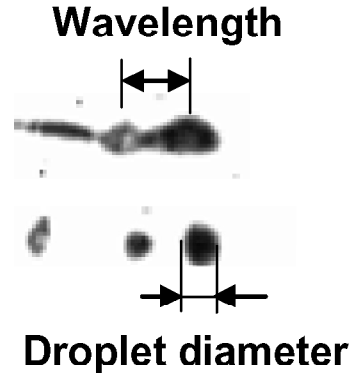
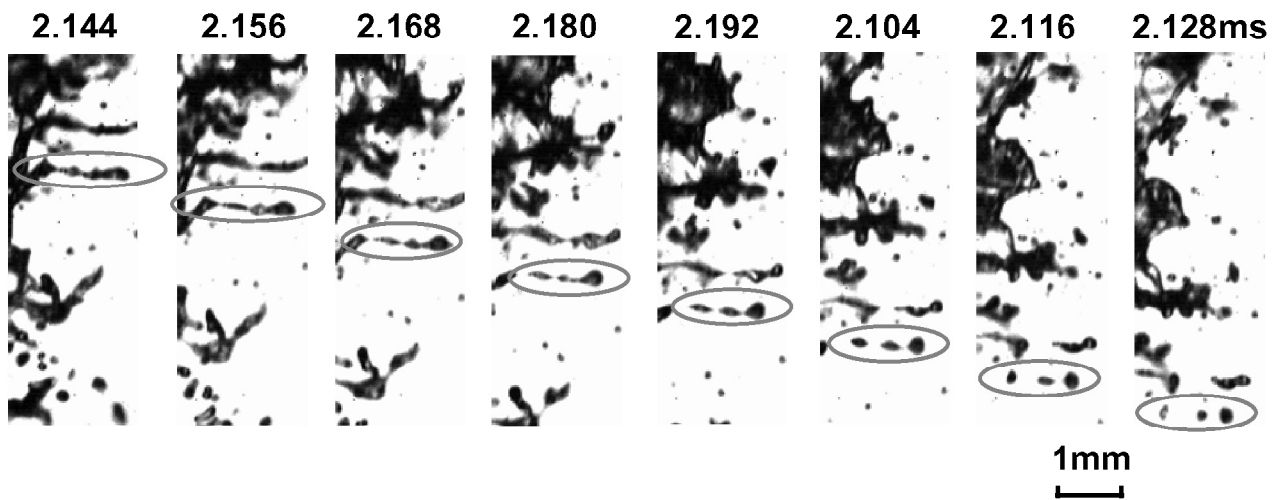
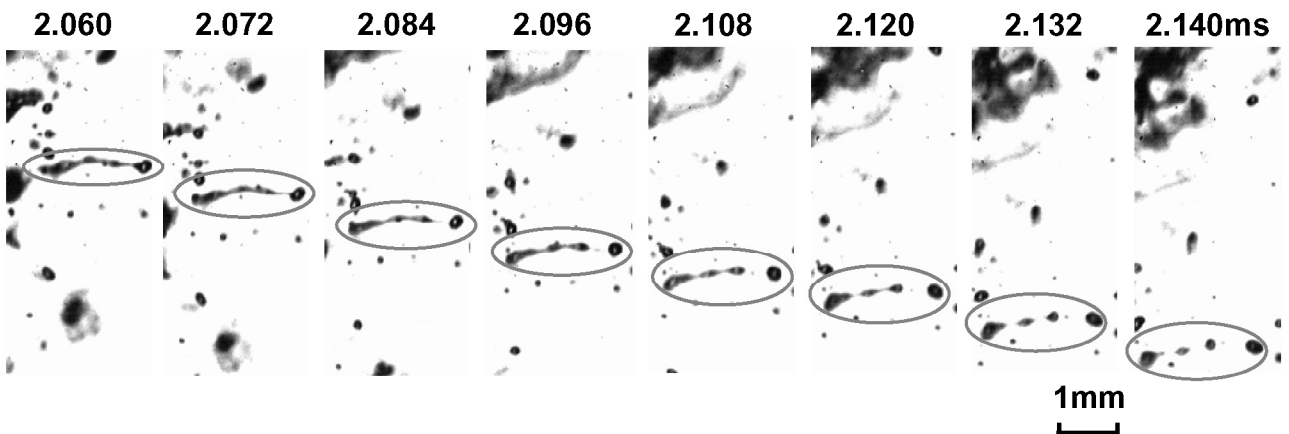


Fig. 5 Definition of length of liquid ligament



(a) Example 1



(b) Example 2

Fig. 6 Examples of break-up of liquid ligament into liquid droplets

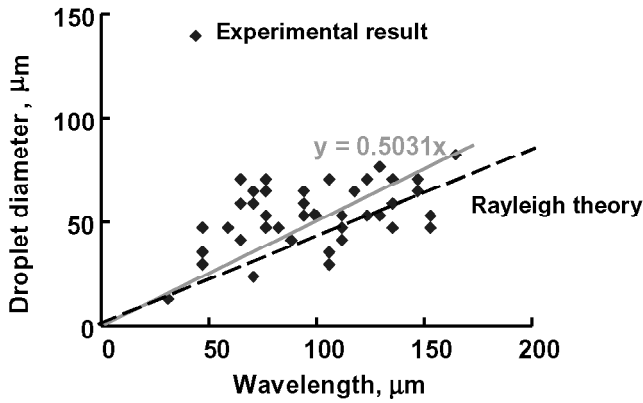


Fig. 7 Relationship between wavelength and droplet diameters

この際、画像奥行き方向の影響を受けにくい液糸ならびに液滴を選んでいく。図より液糸表面での波長が長くなると液滴径も大きくなる傾向が見られる。レイリーの理論⁽¹⁹⁾を用いて、液糸表面での波長と液滴径を求めた結果と比較すると傾向が類似していることが分かる。ただ、レイリーの理論による液滴径と比較すると計測された液滴径が若干大きい。これは燃料の噴射速度が遅いため液糸表面に生じる波動の不安定性に多少影響を与えているためと考えられる。液糸が液滴に分裂する際には、液糸表面での波長のほぼ半分の直径を持つ液滴が生成される。しかし、ほぼ同じ長さの波長の場合でも分裂した後の液滴径はバラつきが生じる。これは、液糸の移動速度に多少異なるため、液糸表面波動が若干影響を受けるためであると考えられる。また、奥行き方向に伸びている液糸も含まれていることも考慮する必要がある。

3.2 液滴衝突および合体

次に液滴同士が衝突する様子を可視化した。図8に液滴同士が合体する場合、図9に液滴が伸長分離する場合、図10に液滴を他の液滴が貫通する場合を示す。撮影は噴霧の中心軸付近で行った。二液滴により作成された衝突モデルには跳ね返り現象が存在する^(16, 20)が今回の実験では奥行き方向を考慮すると跳ね返っているかの判断が難しいので考慮していない。また、再起分離という現象^(14, 16, 20)も生じる可能性はあるが、今回の実験では見られなかった。

本研究で観察した噴霧においては、液滴同士が接触し各液滴の形状が変化した後、一つの液滴に合体する様子が見られる。また、合体する液滴の中には合体しながら回転する液滴も見られた。液滴同士が伸長分離する場合では、液滴が衝突し、液滴と液滴間に液糸が生じ二つの液滴に分裂していく様子が見られる。液滴同士が伸長分離する場合は、二つの液滴が合体するときと比較すると、衝突する二つの液滴の速度差が大きいため、一度合体した液滴が分裂していると考えられる。一つの液滴に他の液滴が貫通する場合は、個々の液滴の大きさがほとんど変わらずに貫通している様子がわかる。ただ、この貫通する場合は、今回行った噴霧撮影の中でまれにしか見られない現象であった。

このような液滴同士の衝突、合体におけるKoらのモデル⁽¹⁶⁾では以下の衝突パラメータとウェーブ数によりその衝突の様子を整理している。

$$h = 2B / (D_1 + D_2) \tag{1}$$

ここで h は衝突パラメータ、 B は衝突する液滴間の距離、 D はそれぞれの液滴径を示している。図11にウェーブ数と衝突パ

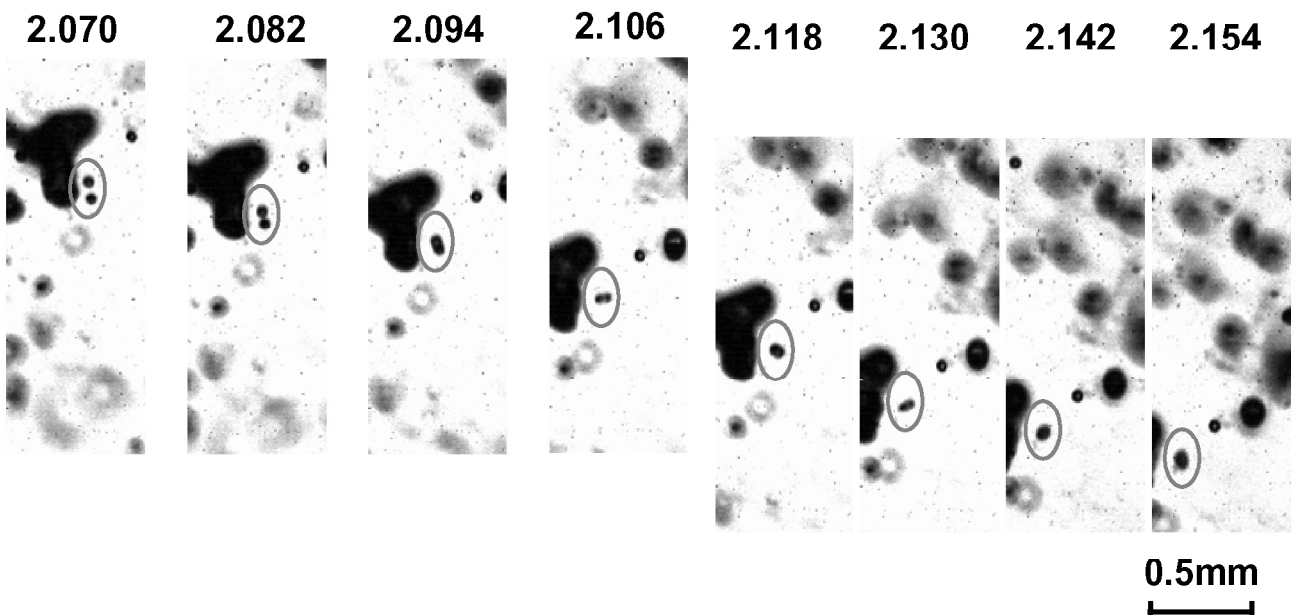


Fig. 8 Coalescence of droplets

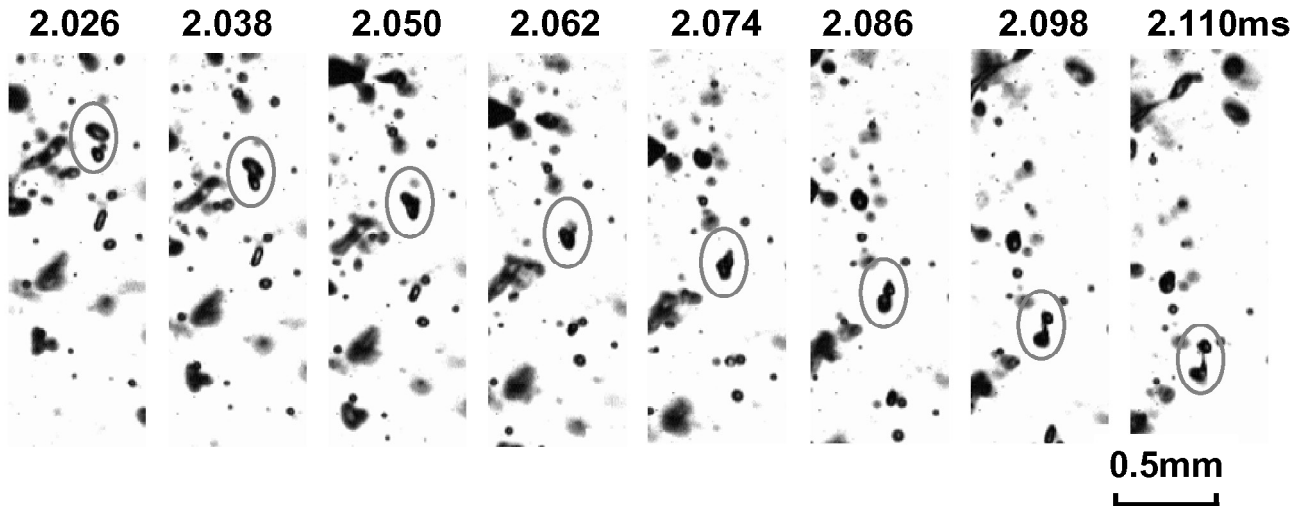


Fig. 9 Stretching separation of droplets

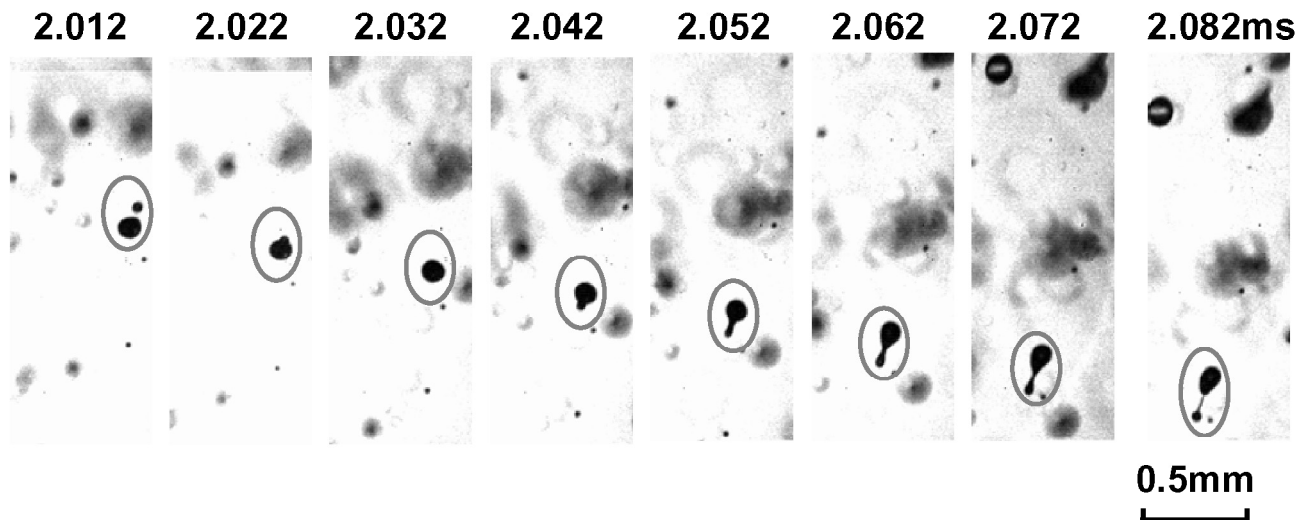


Fig. 10 Penetration of one droplet to another droplet

ラメーダの関係を示す。図中、記号により液滴同士が衝突し、伸長分離する場合 (●)、合体する場合 (■)、回転しながら合体する場合 (□)、貫通する場合 (▲) を示している。ここでウェーバ数は次式で示される。

$$We = \frac{\rho U^2 D_1}{\sigma} \quad (2)$$

ここで、 We はウェーバ数、 U は液滴の相対速度、 ρ は密度、 σ は表面張力、 D_1 は衝突する液滴径を示している。

図11より、本研究で観察された液滴同士が合体や伸長分離する様子はKoらのモデル⁽¹⁶⁾で整理されたそれぞれの領域にあてはまり、よく一致していると考えられる。液滴が衝突して伸長分離する場合、衝突する液滴同士が液滴中心から離れた位置で衝突するため合体せずに伸長すると考えられる。逆に液滴が衝突し合体する液滴の中には回転しながら液滴が合

体するものがある。この場合は、衝突する液滴同士の相対速度がそれほど大きくなく、表面張力に比べ液滴の運動量が小さいために、伸長分離することができずに、合体しながら回転していると考えられる。

液滴同士が衝突後に合体する場合は、液滴同士の相対速度が非常に小さい場合である。液滴が他の液滴を貫通する場合は、他の衝突現象と比較して、相対速度差が大きい。液滴同士が衝突後に回転しながら合体する液滴は回転せずに合体する液滴同士の場合と比較して伸長分離する液滴と合体する液滴の境界付近に存在している。このことから、相対速度が小さく液滴が伸長することができず衝突後に回転すると考えられる。このように従来の液滴同士の衝突モデルは二液滴の衝突現象を観察することで得られたモデルであったが、今回の結果より、実用インジェクタの噴霧において観察される液滴同士の衝突に関してもこのモデルが適用できると考えられる。

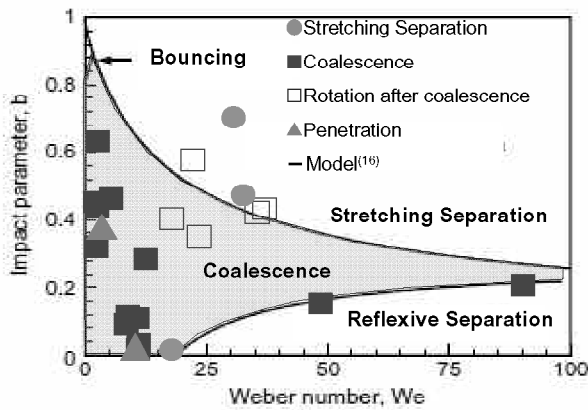


Fig. 11 Classification of droplets interaction

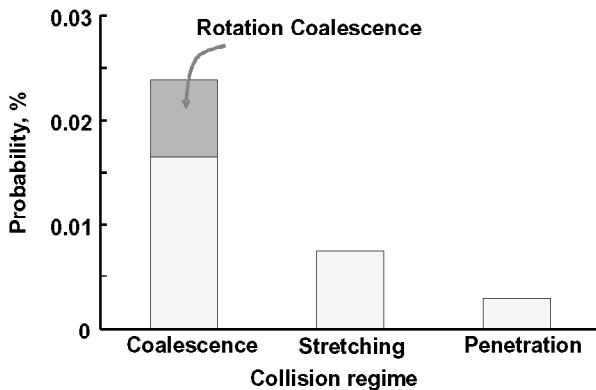


Fig. 12 Collision frequency

3.3 液滴衝突の頻度

最後に液滴同士が衝突する頻度を合体する場合（回転しながら合体する場合も含む）、伸長分離する場合、貫通する場合に分けて図12に示す。ここでは撮影した回数に対する各液滴衝突が見られた画像の数で頻度を表している。本来、液滴衝突の頻度としては、観測できた液滴数に対する液滴が衝突する液滴数で表す必要があるだろう。本研究では、一つの動画の中でも撮影焦点が合わないものもあるため、正確な総液滴数を検出することが困難であった。そこで、撮影回数に対する液滴衝突が観測できた画像数で表した。

液滴同士が合体する場合は他の場合に比べると数多く起こる。PFIインジェクタでは噴射圧を0.3MPaとしており、個々の液滴の速度がそれほど大きくないため液滴同士の相対速度にそれほど差がなく、合体する割合が多いと考えられる。しかし、衝突する頻度として考えると、PFIインジェクタの場合は極めて少なく、それほど液滴の粒径分布に影響を与えないのではないかと考えられる。

4. まとめ

超速度ビデオカメラを用いて実用PFIインジェクタのノズル近傍で起こる液系から液滴への分裂の様子、ならびに液滴同士が衝突する様子の可視化を行った。以下に得られた結果を示す。

- (1) 液系が分裂して液滴が生成する現象が観察できた。この結果より、液系分裂後に生成される液滴径は液系表面に生じる波立ちの波長に比例することがわかった。
- (2) 実用PFIインジェクタが形成する噴霧において、液滴同士が衝突し合体や伸長分離する現象が観察できた。この際の衝突パラメータとウェーバ数の関係は、モデル化された二液滴での衝突により得られた衝突モデルにより整理された領域に非常によくあてはまることがわかった。
- (3) 実用インジェクタが形成する噴霧において液滴同士が衝突する頻度は噴霧中心軸付近では0ではないが非常に少ない。

文 献

- (1) 日本液体微粒化学会編：アトマイゼーション・テクノロジー，森北出版，(2001)
- (2) 水谷幸夫：燃焼工学 第3版，森北出版，(2002)
- (3) Hentschel, W., Optical Diagnostics for Combustion Process Development of Direct-Injection Gasoline Engines, Proc. of the Comb. Inst., 28, (2000), pp.1119-1135.
- (4) Ipp, W., Wagner, V., Krämer, H., Wensing, M., Leipertz, A., Arndt, S., Jain, A.K., Spray Formation of High Pressure Swirl Gasoline Injectors Investigated by Two-Dimensional Mie and LIEF Techniques, SAE Paper No. 1999-01-0498, (1999).
- (5) Ikeda, Y., Hosokawa, S., Sekihara, F., and Nakajima, T., Cycle-resolved PDA Measurement of Size-Classified Spray Structure of Air-Assist Injector, SAE Paper No. 970631, (1997).
- (6) VanDerWege, B.A., and Hochgreb, S., Effects of Fuel Volatility and Operating Conditions on Fuel Sprays in DISI Engines: (2) PDPA Investigation, SAE Paper No. 2000-01-0536, (2000).
- (7) Kubo, M., Sakakida, A., and Iiyama, A., Technique for Analyzing Swirl Injectors of Direct-Injection Gasoline Engines, SAE Paper No. 2001-01-0964, (2001).
- (8) O'Rourke, P.J., and Amsden, A.A., The TAB Method for Numerical Calculation of Spray Droplet Break-up, SAE Paper No. 872089, (1987).
- (9) Chigier, N., and Reitz, R.D., Regimes of Jet Breakup and Breakup Mechanisms, Recent Advances in Spray Combustion: Spray Atomization and Drops Burning Phenomena Volume I, AIAA, Inc., (1996), 109-135.
- (10) Hiroyasu, H., Arai, M., Shimizu, M., Effect of Internal Flow Conditions Inside Injector Nozzles on Jet Breakup Processes, Recent Advances in Spray Combustion: Spray Atomization and Drops Burning Phenomena Volume I, AIAA, Inc., (1996), 173-184.
- (11) Arai, M., Shimizu, M., Hiroyasu, H., Break-up Length and Spray Formation Mechanism of a High Speed Liquid Jet, Proc. of the 4th Int. Conf. on Liquid Atom. and Spray Systems, (1988), 177-184.
- (12) Wierzbna, A., Deformation and Breakup of Liquid Drops in a Gas Stream at Nearly Critical Weber Numbers, Exp. in Fluid, (1993), 9:59-64.

- (13) Estrade J.-P., Carentz, H., Lavergne, G., Biscos, Y., Experimental Investigation of Dynamic Binary Collision of Ethanol Droplets – A Model for Droplet Coalescence and Bouncing, *Int. J. of Heat and Fluid Flow*, 20, 5, (1999), pp.486-491.
- (14) N. Ashgriz, J.Y. Poo, Coalescence and Separation in Binary Collisions of Liquid Drops, *J. of Fluid Mech.*, 221, (1990), pp.183-204.
- (15) 古川諒一, 山中真也, 下坂厚子, 白川善幸, 日高重助: 分子動力学法による液滴微粒子衝突シミュレーション, 第16回微粒化シンポジウム講演論文集 (2007), 367-372.
- (16) Gwon Hyun Ko, Hong Sun Ryou, Modeling of droplet collision-induced breakup process, *Int. J. of Multiphase Flow* 31 (2005), 723-738
- (17) 河原伸幸, 富田栄二, 住田守: スワールインジェクタのノズル近傍における液膜分裂過程の可視化, 微粒化, Vol.16, No.54, pp.24-33, (2007).
- (18) Kawahara, N., Tomita, E., Sumida, M., Microscopic Visualization of Liquid Column Break-up Process in Gasoline PFI Injector, 14th Int. Symp. on Application of Laser Techniques on Fluid Mechanics, Paper No. 11.2.2, in CD-rom, (2008).
- (19) Lord Rayleigh, F.R.S, On the Instability of Jets, *Proceedings of Lond. Math. Soc.*, 10-4, pp.4 (1878)
- (20) Yu Pan, Kazuhiko Suga, Numerical simulation of binary liquid droplet collision, *Phys Fluids*, 17, 8, 082105, (2005)



河原 伸幸
 岡山大学大学院自然科学研究科産業
 創成工学専攻 准教授
 〒700-8530 岡山市北区津島中 3-1-1
 電話: 086-251-8235
 FAX: 086-251-8266
 Mail:kawahara@mech.okayama-u.ac.jp
 略歴: 1997年 神戸大学大学院自然科学研究科生産科学専攻博士後期課程修了, 博士(工学), 主として熱
 流体現象のレーザ計測, 熱機関, 液体燃料の微粒化に関する研究に従事。



富田 栄二
 岡山大学大学院自然科学研究科産業
 創成工学専攻 教授
 〒700-8530 岡山市北区津島中 3-1-1
 電話: 086-251-8049
 FAX: 086-251-8266
 Mail:tomita@mech.okayama-u.ac.jp
 略歴: 1981年 京都大学大学院機械
 工学専攻修士課程修了, 工学博士,
 主として熱機関, 燃焼のレーザ計測, モデリングに関する
 研究に従事。



住田 守
 三菱電機株式会社姫路製作所アクチ
 ュエータ製造部 インジェクタ統括
 〒670-8677 姫路市千代田町 840
 電話: 079-298-9404
 FAX: 079-298-9799
 Mail:Sumida.Mamoru@eb.MitsubishiEl
 cctric.co.jp
 略歴: 1981年 京都大学大学院機械
 工学専攻修士課程修了, 主としてガソ
 リンエンジン用インジェクタの研究開発に従事。