

令和 2 年 6 月 11 日現在

機関番号：17301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06162

研究課題名(和文) レーザープローブによる超音速噴霧液滴の分裂・分散過程の解明

研究課題名(英文) Study of breakup and dispersion processes of droplets in supersonic sprays by laser probe

研究代表者

植木 弘信 (UEKI, Hironobu)

長崎大学・工学研究科・教授

研究者番号：30160154

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)： ノズルへの供給圧力を最高で180MPaに設定し、ベルヌーイ速度が650m/s、マッハ数が1.9の超音速で軽油を大気中に噴射した。噴孔径が0.1mmの噴孔から4～15mm離れた位置の分裂過程にある噴霧液滴の速度とサイズを、マイクロスケールのレーザープローブを有するレーザー2焦点流速計を用いて計測した。

その結果、噴射期間中期の噴霧内部の平均液滴速度が超音速に達する条件で、噴射初期の噴霧先端において測定された液滴の90%以上が亜音速であることが明らかとなった。噴霧先端の液滴サイズが噴射中期に比べて小さいことから、噴霧先端に発生する衝撃波によって液滴の分裂ならびに減速が生じたものと考えられる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

高速噴霧による液体微粒化は、ガスタービン・往復動内燃エンジン等の燃料噴霧、噴霧による塗装・洗浄・冷却、医療用ネブライザ、薄膜生成、パウダー製造等、多くの分野で利用されている。噴射圧の増加による微粒化の促進、ならびに超音速噴霧に生じる衝撃波については多数の研究者により報告がなされてきた。

超音速噴霧における液滴の分裂および分散について、これまで報告が存在せず、本研究によって初めて捉えられた。各分野において要求される噴霧特性を実現するための微粒化モデリングの高精度化に役立つことが期待される。

研究成果の概要(英文)： The supply pressure to the nozzle was 180 MPa at maximum, and the gas oil was injected into the atmosphere at Bernoulli velocity of 650 m / s and Mach number of 1.9, that is, supersonic velocity. A laser-2-focal velocimeter equipped with a microscale laser probe was used to measure the velocity and size of spray droplets in a breakup process 4 to 15 mm away from a 0.1 mm diameter nozzle hole.

As a result, it was clarified that 90% or more of the droplets measured at the tip of the spray at the initial stage of injection were subsonic, under the condition that the average droplet velocity in the spray reached the supersonic velocity in the middle of the injection period. Since the droplet size at the spray tip is smaller than that in the middle of the injection period, it is considered that the shock wave generated at the spray tip caused the droplet to breakup and slow down.

研究分野：熱流体工学

キーワード：混相流 液体微粒化 ウエーバー数 マッハ数

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

高速噴霧による液体微粒化は、ガスタービンや往復動内燃エンジンの燃料噴霧、噴霧による塗装・洗浄・冷却、医療用ネブライザ、薄膜生成、パウダー製造等、多くの分野で利用されている。各分野において、要求される噴霧特性の実現のために微粒化過程の把握ならびにモデリングに関する研究が国内・国外でなされている。噴射圧の増加による微粒化の促進、ならびに超音速噴霧に生じる衝撃波については多数の研究者により報告がなされてきた。微粒化過程の把握には、支配因子である液滴速度、ならびに微粒化の結果である液滴サイズの計測が不可欠である。しかし、微粒化過程においては液滴数密度が高いため計測例はほとんどなく、超音速噴霧の内部構造を調査する研究は世界的になされていない。一方、研究代表者は、マイクロスケールの測定体積を有するレーザー2焦点流速計を用いることによって噴霧内部の高数密度液滴の計測が可能であることを、国内・国外で公表している。

2. 研究の目的

研究代表者は、2つのレーザー光焦点によって形成されるマイクロスケールの測定体積を用いて、高速噴霧における液滴の数密度ならびに個々の液滴の速度・サイズを測定できる世界で唯一のシステムを開発している。本研究では、噴霧の大部分が超音速となる高圧噴射において、噴霧内の近接する2つの微小空間における液滴の速度・サイズおよび数密度の空間相関を明らかにする。さらに、これらの物理量に及ぼすウェーバー数ならびにマッハ数の影響を明らかにして、超音速噴霧内の液滴の分裂および分散の過程を解明する。

3. 研究の方法

(1) レーザー2焦点流速計

L2Fの測定体積を図1に示す。焦点直径 F は約 $3\mu\text{m}$ 、焦点長さ L は約 $20\mu\text{m}$ であり、焦点間距離 S は $20\mu\text{m}$ である。液滴が2つの焦点を通過する際の飛行時間 t_1 、液滴の光散乱時間 t_2 を周波数 700MHz のクロックで計数する。速度は2焦点間距離 S を飛行時間 t_1 で割ることにより求める。

$$u = \frac{S}{t_1} \tag{i}$$

液滴サイズは、2焦点間距離 S と液滴サイズ d_p と焦点サイズ F の比が飛行時間 t_1 と散乱時間 t_2 の比に対応することから次式より求める。

$$d_p = u \cdot t_2 - F \tag{ii}$$

(2) 計測システム

図2はL2Fによる噴霧計測システムを示す。L2Fの光学系では最大出力 100mW 、波長 830nm の半導体レーザーを光源とし、収束レンズとして焦点距離が 8mm 、開口数 0.5 の非球面レンズを採用した。全長 350mm の光学系により2つの焦点における液滴からの後方散乱光を別個のAPD(Avalanche Photodiode)に導いて電気信号に変換した。FPGA(Field Programmable Gate Array)で構成したデジタルカウンタを用い、一対の電気信号パルスから計数した飛行時間および散乱時間をパソコンに保存した。信号処理系の最大データサンプリング周波数は 15MHz である。

噴射圧 P_{inj} を $60\sim 180\text{MPa}$ に設定したコモンレールにより供給される軽油を、噴孔径 D_n が $0.1\sim 0.15\text{mm}$ の多噴孔インジェクタを用いて大気中に噴射周期 3Hz で間欠噴射した。L2Fのデータ取得に同期してインジェクタソレノイドに噴射開始信号を印加してからの経過時間を 6MHz のクロックで計数した。測定位置を表すために噴霧軸方向を z 軸、L2Fのレーザー光軸方向を y 軸、 yz 平面に対して垂直方向を x 軸とした。測定点は $z=4\sim 5\text{mm}$ における噴霧中心($x=0\sim 0.1\text{mm}$)である。各計測におけるデータ数を $20,000\sim 40,000$ 点とした。

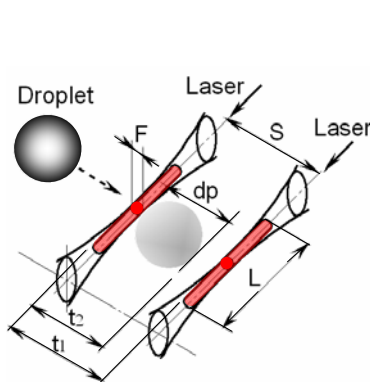


Fig.1 Light probe of L2F

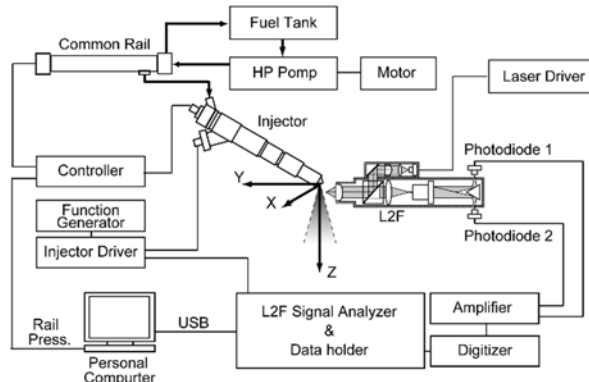


Fig.2 Spray measurement system

4. 研究成果

(1) 液滴のマッハ数

図 3(a)および(b)は、それぞれ噴射の初期および中期の噴霧の画像を示す。噴射圧は 100MPa であり、ベルヌーイ速度は 470m/s、マッハ数 M_{inj} は 1.4 の場合である。噴孔からの距離 $z=4\sim 5$ mm の L2F 計測位置において、初期および中期はそれぞれ噴霧の先端および内部に対応する。この位置において、初期の噴霧の幅が中期の噴霧の幅に比べて広く、噴霧先端に丸みがある。

図 4 は L2F によって計測された液滴のマッハ数であり、横軸は噴射信号からの経過時間 $Time$ である。 $Time \approx 0.4$ ms で液滴が $z=4$ mm に到達しており、液滴のマッハ数は 0~1 の広範囲に広がっている。 $Time \approx 0.9\sim 1.8$ ms が噴射期間の中期であり、液滴のマッハ数は 2 に達している。

図 5 は、噴射の初期(Init)および中期(Mid)において、マッハ数が 1 を超える液滴の割合を示す。横軸は噴射圧からベルヌーイ式で求められるマッハ数 M_{inj} であり、すべてが超音速である。噴射初期では M_{inj} によらずほとんどの液滴が亜音速であった。引用文献①において、 $M_{inj}>1.3$ での衝撃波の発生がシュリーレン法によって確認され、噴霧画像から求められた噴霧先端速度が亜音速であった。本研究の結果はこの文献と整合する。中期すなわち噴霧内部では M_{inj} とともに超音速の液滴が増加する。

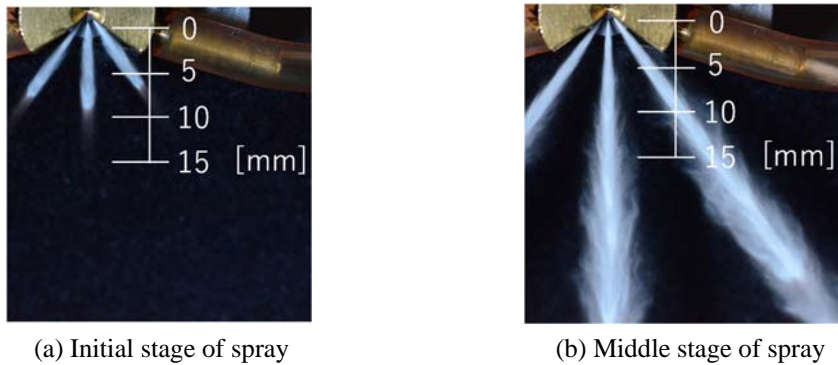


Fig.3 Spray image; $D_n=0.1$ mm、 $M_{inj}=1.4$

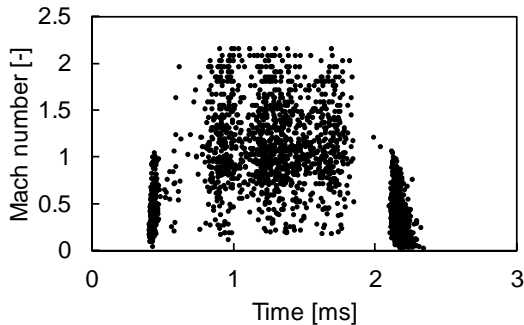


Fig.4 Time variation of droplet Mach number ; $D_n=0.15$ mm, $M_{inj}=1.4$, $z=4$ mm

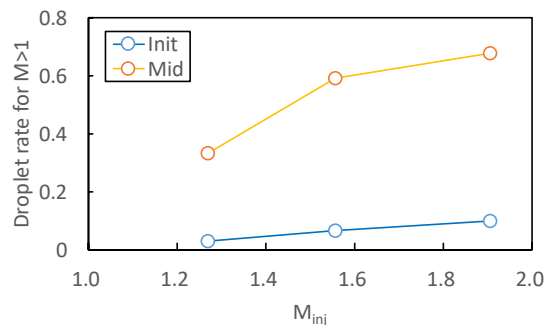


Fig.5 Variation of droplet rate for $M>1$ due to injection Mach number; $D_n=0.1$ mm, $z=5$ mm

(2) 液滴のマッハ数およびサイズの確率密度

図 6(a)は、液滴マッハ数の確率密度であり、 M_{inj} が 1.3 および 1.9 の場合を示す。いずれの M_{inj} においても噴射初期のほとんどの液滴は亜音速である。横軸に 2 つの M_{inj} を $M_{1.3}$ および $M_{1.9}$ で標記しており、噴射中期における液滴マッハ数の最大値がほぼ M_{inj} に近いことがわかる。図 6(b) は、液滴サイズの確率密度である。噴射初期に液滴サイズ確率密度が M_{inj} に依存しないこと、

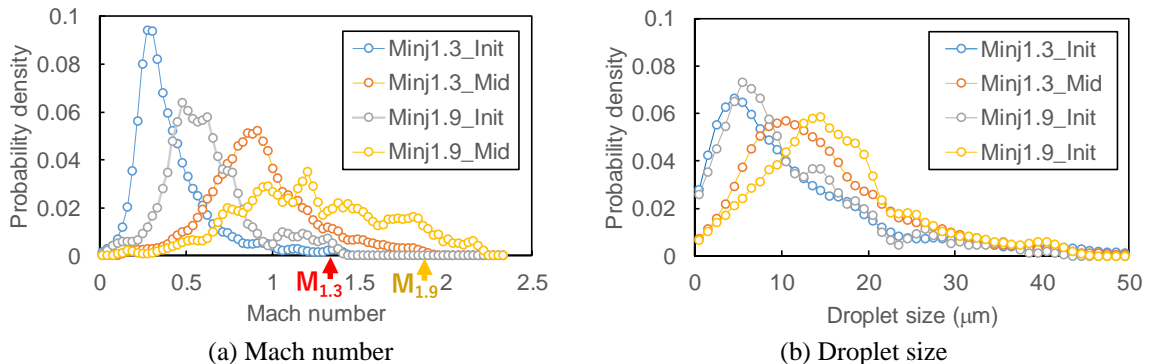


Fig.6 Probability density distribution of droplets Mach number and droplet size; $D_n=0.1$ mm

また、噴射中期に比べて小さいことがわかる。噴射中期の液滴サイズは、 M_{inj} とともに増大している。

以上のことから、超音速で噴射される噴霧の先端の液滴のマッハ数は亜音速であり、噴霧内部の超音速の液滴に比べて小さいことが明らかとなった。噴霧先端に発生する弓形衝撃波によって液滴の分裂ならびに減速が生じたものと考えられる。

<引用文献>

① Weidi Huang, et al., Effect of shock waves on the evolution of high-pressure fuel jets, Applied Energy 159 (2015) 442-448

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計10件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 安心院力也, 駒田佳介, 植木弘信
2. 発表標題 単噴孔および多噴孔のディーゼルノズルの噴孔近傍における噴霧特性
3. 学会等名 2018年自動車技術会学術講演会 秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 岡崎智大, 駒田佳介, 植木弘信
2. 発表標題 ディーゼル噴霧特性に及ぼす噴射量の影響
3. 学会等名 2018年自動車技術会学術講演会 秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 関新一郎, 斎藤学, 駒田佳介, 坂口大作, 植木弘信
2. 発表標題 ディーゼル噴霧特性に及ぼすインジェクタ駆動電流の影響
3. 学会等名 第29回内燃機関シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 秋山宜槻, 駒田佳介, 植木弘信
2. 発表標題 L2Fを用いた非定常噴霧における液滴の分裂と分散の研究
3. 学会等名 第27回微粒化シンポジウム,
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Keisuke Komada, Yamato Naruse, Hironobu Ueki
2. 発表標題 L2F Measurements of Diesel Fuel Spray for Numerical Simulation of Atomization
3. 学会等名 COMODIA2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 今村隆浩、駒田佳介、成瀬大和、宇田川和正、植木弘信
2. 発表標題 L2Fによるディーゼル噴霧噴孔近傍における燃料当量比の評価
3. 学会等名 自動車技術会2017年春季大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 関広太、駒田佳介、成瀬大和、宇田川和正、植木弘信
2. 発表標題 液滴分散モデルの基づくディーゼル燃料噴射ノズル噴孔近傍の噴霧挙動の研究
3. 学会等名 自動車技術会2017年春季大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 秋吉朝喜、駒田佳介、山之内大介、植木弘信
2. 発表標題 ディーゼルノズル噴孔近傍噴霧液滴のウェーバー数の評価
3. 学会等名 自動車技術会2017年秋季大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 大宅一哉、駒田佳介、山之内大介、植木弘信
2. 発表標題 L2Fによるディーゼル噴霧の非軸対称構造の研究
3. 学会等名 自動車技術会2017年秋季大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 関新一郎、斎藤学、駒田佳介、坂口大作、植木弘信
2. 発表標題 L2Fによるディーゼルノズル噴孔近傍の噴霧分散の研究
3. 学会等名 第26回微粒化シンポジウム
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考