

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 13 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560233

研究課題名(和文)高周波スプリット噴射による噴霧制御技術の開発

研究課題名(英文)Development of Spray Control Technology by High-Frequency Split Injection

研究代表者

西田 恵哉(Nishida, Keiya)

広島大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：90156076

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円、(間接経費) 1,260,000円

研究成果の概要(和文)：スプリット高圧噴射，すなわちスプリット噴射1段目の噴射開始から2段目の噴射終了までの期間を単段噴射と同一とし，さらに総噴射量が単段噴射と同一になるよう噴射圧力を高めた噴射による噴霧と火炎の特性を実験的に調べた．燃料として軽油を使用した．

1段目と2段目の噴射休止期間を長くすると，噴射圧力の増大による噴霧先端到達距離の増大を抑えることができる．また噴霧角と導入霧囲気質量は増大し，燃料と霧囲気の混合が促進される．さらに火炎中の積算KL値(全すす量)が小さく，平均火炎温度が低くなる．スプリット高圧噴射によるすすとNOxの同時低減の可能性が示唆された．

研究成果の概要(英文)：Spray and combustion characteristics of Splitting High-Pressure Injection (SHPI) were experimentally investigated. SHPI is the split injection in which the period from the start of the first injection to the end of the second injection and the total injection amount are adjusted to the same as the single stage injection. Diesel fuel was used as a test fuel.

As the interval (no injection period) between the 1st and 2nd injections is increased, an increase in the spray tip penetration due to the higher injection pressure of SHPI can be avoided. The spray angle and the mass of ambient gas entrained are increased, that indicates that the mixing of the fuel and ambient gas is enhanced. The integrated KL factor (total soot amount) in the flame and the mean flame temperature are both decreased. It is demonstrated the possibility of the simultaneous reduction of soot and NOx by Splitting High-Pressure Injection (SHPI).

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・熱工学

キーワード：燃焼 燃料噴射

1. 研究開始当初の背景

(1) ディーゼル機関から排出される窒素酸化物と微粒子を低減するためには、噴射開始から着火までの限られた時間内に燃料噴霧内にできるだけ多くの空気を取り込み、これによって液相燃料の蒸発を促進、さらに蒸発した燃料と空気の混合を促進して高濃度の混合気の発生を抑え、希薄で均一な濃度分布の混合気を形成する必要がある。このためには混合気形成の第一段階である噴霧への空気導入を活発化させることが重要で、液相燃料の蒸発速度に影響を及ぼす液滴直径とともに、空気導入が混合気形成を左右する噴霧特性と言える。

(2) 一方、噴霧の貫徹力(先端到達距離)は噴霧への空気導入を間接的に表す特性値であると同時に、燃焼室内の空気の存在する空間に燃料を運ぶ能力を表し、貫徹力が大きいほど噴霧への空気導入が大きくなると考えられる。しかし噴霧貫徹力が過度に大きいとピストンキャピティ壁面との衝突による液膜や過濃混合気の形成、すす排出、熱損失増大などが懸念される。

2. 研究の目的

(1) 本研究では、総噴射期間一定で燃料噴射を時間的に分割し、同一噴射量の単段噴射に比べて噴射圧力を増大させる一方、噴射休止期間の挿入により噴霧貫徹力の増大を抑制させることを試みた。このような噴射をスプリット高圧噴射と呼ぶことにする。

(2) 単段噴射と分割噴射の燃料噴霧の発達と着火、燃焼過程を高速度カラービデオカメラで撮影し、噴霧直接撮影画像から噴霧先端到達距離を測定した。さらに噴霧火炎カラー画像の二色法解析により火炎温度とすすの生成について調べ、これら噴霧特性と火炎特性に及ぼす分割噴射の影響について調査した。

(3) 単段噴射と分割噴射の燃料噴霧の混合気形成過程を詳細に把握するために、LIF-PIV計測を用いて、噴霧周囲の気体流動に及ぼす分割噴射の影響を調査した。

3. 研究の方法

(1) 噴霧と燃焼の高速度ビデオカメラ観察

図1に定容容器及び計測システムの配置図を示す。雰囲気条件は必要なガス成分に調整した高圧ガスボンベを用いて、必要な圧力となるように調整する。常温場非蒸発噴霧の計測では光源としてXeランプを用いて噴霧液滴からの散乱光を高速度ビデオカメラで撮影する。燃焼噴霧の計測ではカルタン線ヒーターにより雰囲気温度を実機エンジンの圧縮上死点温度同等にまで高め、噴霧の自着火及びその後の燃焼による自発光を高速度ビデオカラーカメラで撮影する。インジェクターにはピエゾ素子駆動の単孔ノズルタイプを用いる。容器へのインジェクター取り付け

部には冷却水通路を設けており、容器内の温度の影響がインジェクター本体へ及ばないようにしている。

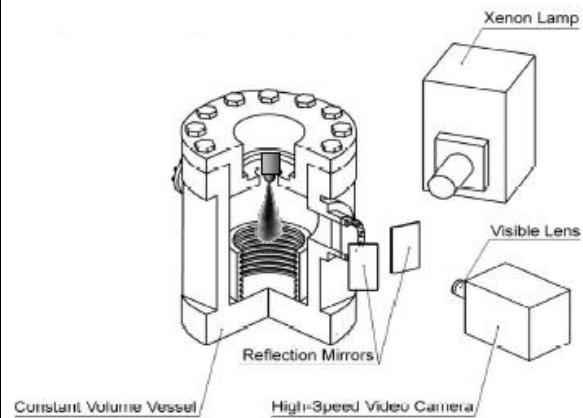


図1 噴霧と燃焼の高速度ビデオカメラ観察

(2) 噴霧周囲の雰囲気流動計測

図2に定容容器及びLIF-PIV計測システムの配置図を示す。雰囲気条件は必要なガス成分に調整した高圧ガスボンベを用いて、必要な圧力となるように調整する。光源にはNd:YAGレーザを使用し、レーザヘッドにより発振されたビームは、ガイドアームにより、シリンダリカルレンズに導かれ、厚さ約1mmのシート光(波長532nm)が容器上部に取り付けられたインジェクターの中心に照射される。Nd:YAGレーザから発振されたシート光が容器内のトレーサー粒子に照射されることで、トレーサー粒子が蛍光する。その蛍光をCCDカメラで撮影し、その画像をPIV解析することで、雰囲気流動を計測した。

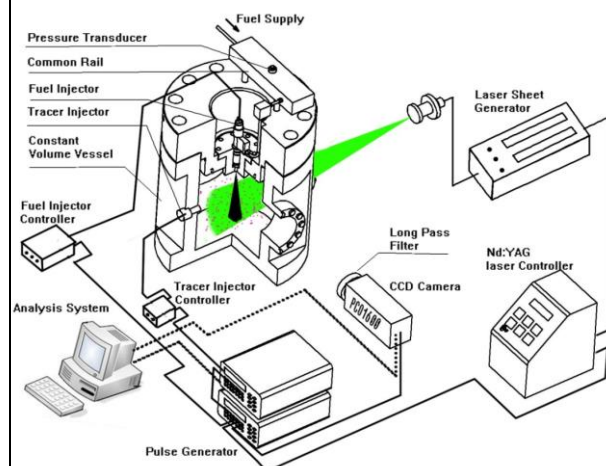


図2 LIF-PIV法による雰囲気流動計測

(3) 実験条件

表1に容器の雰囲気条件と燃料噴射の実験条件を示す。非蒸発噴霧条件では、高温場の燃焼噴霧条件と同じ雰囲気密度における噴霧液滴の挙動だけを観察できる。燃焼噴霧条件の雰囲気圧力と温度は実機エンジンの中・高負荷拡散型燃焼領域を想定したものである。ガス成分については非蒸発噴霧撮影で

は窒素とし、燃焼噴霧撮影では EGR 無を想定した O₂ 濃度 21% の条件とした。噴射条件として、噴射量 4.2mg は実機エンジンの中・高負荷拡散型燃焼領域での多孔ノズルでの噴射の一噴孔当たりの噴射量に相当する。

表 1 実験条件

Fuel	JIS #2 Diesel fuel			
Nozzle hole diameter: do [mm]	Φ0.111			
Nozzle hole number	1			
Injection quantity: Q _{inj} [mg]	4.2			
Injection duration [ms]	1.76			
Injection pressure: P _{inj} [MPa]	100	120	145	160
Injection Interval [ms]		0.03	0.18	0.3

	Non-vaporization spray	Combustion spray
Ambient temperature T _{amb} [K]	300	900
Ambient pressure P _{amb} [MPa]	1.5	4.6
Ambient gas component	N ₂	N ₂ :79% O ₂ :21%
Ambient density [kg/m ³]	≒18	≒18

4. 研究成果

(1) 噴射率

本研究では高圧噴射を保ちながら噴霧先端到達距離を制御するためにスプリット高圧噴射を用いた。図 3 に噴射率計測の結果を示す。分割噴射では噴射圧力を 120, 145, 160MPa と変化させて、噴射量と噴射期間が同一になるように噴射率計によってインターバルを求めた。

この噴射率計測結果から得られた噴射インターバルを実験条件とし、今後の計測においてはこの噴射パターンで実験を行うこととする。

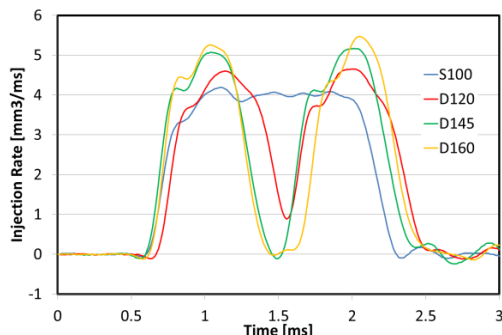


図 3 噴射率

(2) 噴霧先端到達距離, 導入雰囲気質量

図 4 に非蒸発噴霧画像から求めた噴霧先端到達距離を示す。分割噴射 D160-0.3 (Double Stage Injection, 噴射圧力 160MPa, インターバル 0.3ms) は、噴射インターバルの効果により貫徹力が抑制され 1.8ms 以降、到達距離が S100 (Single Stage Injection, 噴射圧力 100MPa) とほぼ同一になっている。

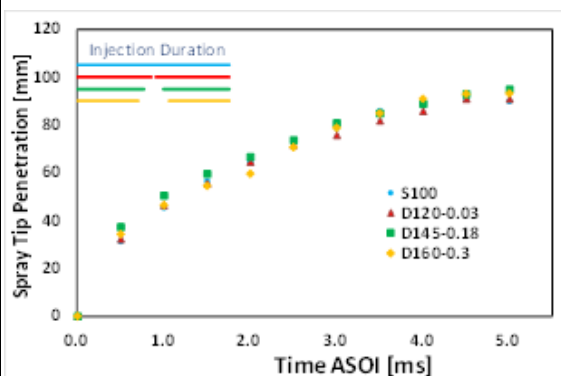


図 4 噴霧先端到達距離

図 5 に噴霧体積から求めた雰囲気質量を示す。D160-0.3 は噴射インターバル以降で雰囲気質量が増大し、S100 より大きくなる。分割噴射の場合、噴射インターバル期間中は噴霧先端の到達が続く一方、噴霧後端の到達は小さく、噴霧体積が増大する。また噴射の遮断により噴霧後端への雰囲気導入が増大するため、噴霧内の雰囲気質量が単段噴射より大きくなったと思われる。

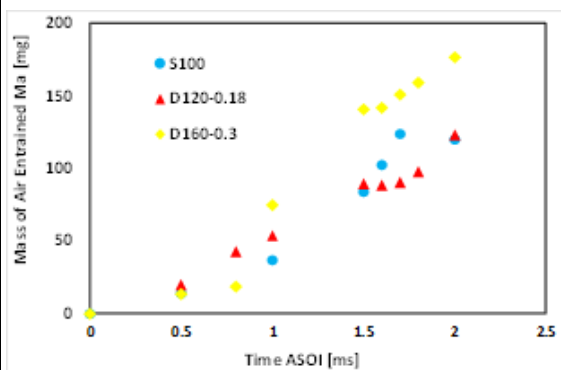


図 5 導入雰囲気質量

(3) 噴霧周囲の雰囲気流動

図 6 に LIF-PIV 計測により求めた噴射終了時の噴霧周囲の雰囲気流動の速度ベクトル分布を示す。基準とした単段噴射と、インターバル期間が最も長い D160-0.3 噴射条件を示している。この図から、スプリット高圧噴射によって、噴霧上流部での噴霧軸方向への流速ベクトルは大きくなっていることがわかる。

高圧噴射によって雰囲気導入の促進された要因は、高噴射圧力で噴射された噴霧は、噴霧の流速が、基準とした 100MPa 単段噴射よりも早くなる。これによって、容器内雰囲気と噴霧との間に、圧力差が生じる。この圧力差が大きくなるほど、雰囲気から噴霧軸方向への流速は大きくなる。この結果、噴霧内には多くの雰囲気を取り込まれたと考えられる。

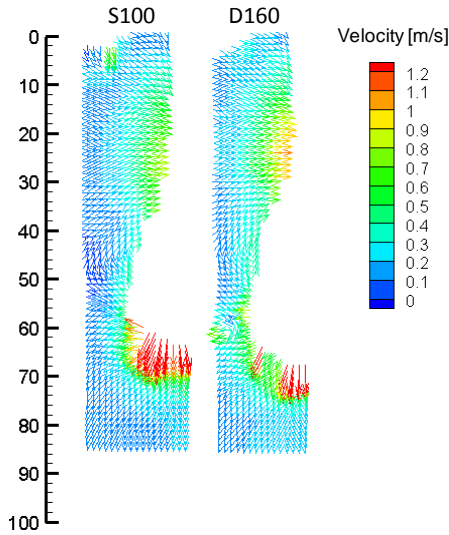


図6 霧囲気流動の速度ベクトル分布

噴射終了時の噴霧上流部（噴霧先端到達距離の2分の1の位置まで）の噴霧への導入霧囲気速度（噴霧境界面に対して法線方向）をLIF-PIV計測から求めた。測定結果をノズルからの距離に対して表したものが図7である。スプリット高圧噴射にし、噴霧方向への流速ベクトルが増加するにつれて、噴霧側面の法線方向流速が増加していく様子がわかる。

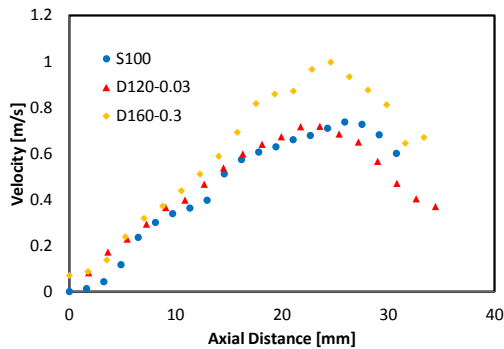


図7 噴霧への霧囲気流速

図8はノズルから噴霧上流部(噴霧先端到達距離の2分の1の距離までの噴霧境界からの導入霧囲気流量をLIF-PIV計測から算出し、それを噴射開始後からの時間ごとに表した図である。スプリット高圧噴射にし、噴霧方向への流速ベクトルが増加するにつれて、霧囲気導入量が増加していく様子がわかる。

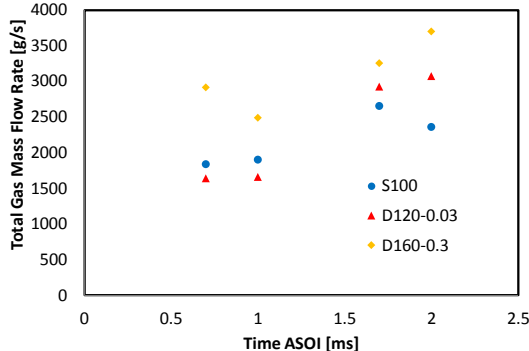


図8 噴霧上流部の霧囲気導入量

(4) 火炎特性

噴霧を空气中で燃焼させ二色法解析によって火炎特性を調べた。図9に噴射開始後2.0msにおけるKL分布を示す。図9のKL分布から、単段噴射においては、噴霧先端部分にKL値の高い領域が分布する。分割噴射条件においては、単段噴射と比較して、KL値の高い領域が幅広く分布する。噴射間隔が長くなる条件ほど、KL値の高い領域が火炎先端部分以外にも分布することが分かる。

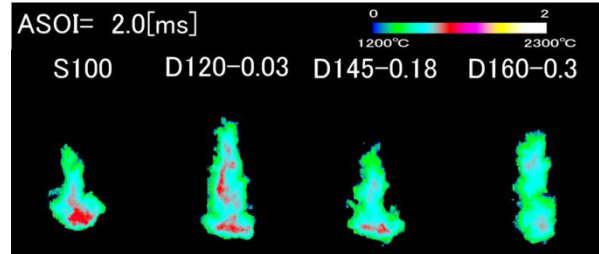


図9 火炎のKL値分布

図10に平均火炎温度の時間履歴を示す。図10から、近接した分割噴射では、単段噴射と比較して火炎温度に大きな差はない。噴射間隔をあけると、火炎温度最大値は低下し、D145-0.18・D160-0.3条件においては、一段目の噴射と二段目の噴射とのインターバル時期に火炎温度が低下する。これは一回当たりの噴射量の低下に加えて低温新気との混合が促進されたためだと考えられる。

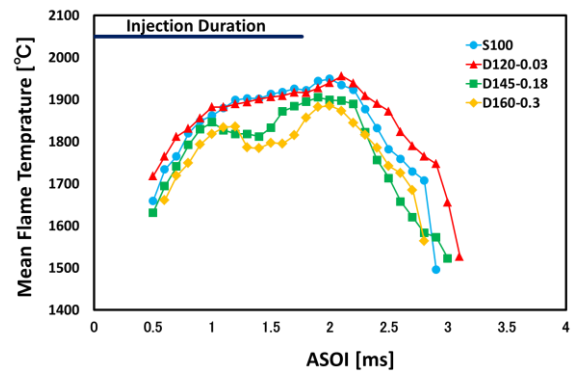


図10 平均火炎温度の時間変化

図11に積算KL値結果の時間履歴を示す。図11から噴射間隔が長くなり、噴射圧が高いほど、KL値の最大値は低下する。単段噴射と比較し、KL値のピークは遅くなる。これは、高圧噴射による微粒化の促進と噴霧の分割による霧囲気導入効果の二点が要因となり、すす抑制ができていると考えられる。またD120-0.03条件のように近接した噴射間隔の条件では、単段噴射と比較して、すすは悪化する。これは噴射間隔が近接したことで、二段目の噴霧の混合気形成が不十分な間に一段目の噴霧火炎に衝突することで起こる冷却作用によるものだと考えられる。このことから分割噴射のインターバルには最適な間隔が存在することが示唆される。

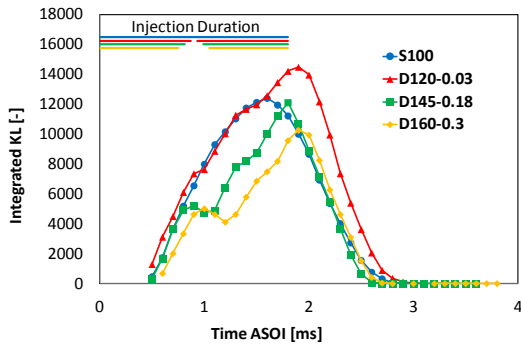


図 11 火炎の積算 KL 値

(5) 考察

次に燃焼噴霧観察から得られた結果を考察する。単段噴射の場合は噴射圧力が高くなっても、すすの発生自体の抑制効果はあるものの、噴霧の先端部分でのすすの発生が多くなる傾向は同じであると考えられる。つまり、この噴霧先端部分でのすすの発生が抑制されることは、噴射圧力を高くしたためではなく、分割噴射の適用により噴霧先端での燃料を集中を抑制できたためだと推測できる。そのため、D160-0.3 噴射条件では噴霧上流においても KL 値の高い領域が存在していることが図 9 からわかる。

次に、高圧噴射による効果である。これは、高圧噴射によって、噴霧内により多くの空気を取り込むことができるため、結果として噴霧内当量比を低くすることができる。このため、KL 値の発生を抑制できているものと考えられる。また、霧囲気の導入が活発になるということは、火炎に比べて低温の新気が噴霧内に多く取り込まれるため、噴霧火炎温度も低下すると考えられる。

(6) 結論

本研究では、総噴射期間一定で燃料噴射を時間的に分割し、同一噴射量の単段噴射に比べて噴射圧力を増大させる一方、噴射休止期間の挿入により噴霧貫徹力の増大を抑制させることを試み、非蒸発噴霧観察、霧囲気流動観察、燃焼噴霧観察から、得られた知見を以下に示す。

- ① 噴霧特性
 - ・分割噴射によって高噴射圧力の噴射においても噴霧先端到達距離の制御が可能である。
 - ・高圧で噴射することによって霧囲気導入が多くなる。
- ② 霧囲気導入特性
 - ・高圧噴射によって、噴霧上流部での周囲空気の取り込みが促進される。
- ③ 火炎特性
 - ・高圧噴射＋分割噴射の組み合わせによってすす発生の抑制と火炎温度の低下の確認できた。
 - ・近接した分割噴射においては、すすの発生は悪化する。
 - ・すすの発生が抑制できた要因として、分割噴射によって、一段当たりの噴射量を減少

させることで、噴霧先端部分での燃料集中を抑制できたこと、また同時に高圧噴射にすることで、噴霧上流部での周囲空気の取り込みが促進される。これにより、噴霧内当量比が減少し、KL 値の発生(すすの発生)を抑制することができたと考えられる。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 2 件)

- ① Kuichun LI, Masaaki IDO, Youichi OGATA, Keiya NISHIDA, Baolu SHI, Daisuke SHIMO, Effect of Spray/Wall Interaction on Diesel Combustion and Soot Formation in Two-Dimensional Piston Cavity, SAE International Journal of Engines, 査読有, Vol.6, No.4, 2013, 2061-2071. DOI:10.4271/2013-32-9021
- ② Jingyu ZU, Keiya NISHIDA, Olawole Abiola KUTI, Seoksu MOON, Quantitative Analysis of Fuel Spray - Ambient Gas Interaction by Means of LIF-PIV Technique, Atomization and Sprays, 査読有, Vol.21, 2011, 447-465. DOI:10.1615/AtomizSpr.2011003894

[学会発表] (計 2 件)

- ① Kuichun LI, Takeru MATSUO, Masaki IDO, Keiya NISHIDA, Youichi OGATA, Baolu SHI, Effects of Wall Impingement on Diesel Spray Characteristics, the 16th Annual Conference on the Institute of Liquid Atomization and Spray Systems - Asia, December 18-19, 2013, Nagasaki Univ. (Nagasaki)
- ② 西田恵哉, 燃料噴射の時間的分割がディーゼル噴霧と火炎の特性に及ぼす影響, 自動車技術会 2013 年春季学術講演会, 2013 年 5 月 22 日-5 月 24 日, パシフィコ横浜 (横浜市)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

西田 恵哉 (NISHIDA, Keiya)
 広島大学・大学院工学研究院・教授
 研究者番号： 90156076