

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 4月26日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2010～2012

課題番号：22360318

研究課題名（和文）噴霧燃焼時の環境汚染物質低減を目指した超高压パルス噴霧特性の解明

研究課題名（英文） Analysis of Ultra-high Pressure Pulse Spray Characteristics for Reducing Environmental Pollutants in Spray Combustion

研究代表者

青木 秀之 (AOKI HIDEYUKI)

東北大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：40241533

研究成果の概要（和文）：超高压パルス噴霧の噴霧特性について実験と数値解析を実施し、その特性を解明した。ハイスピードビデオカメラを利用して噴霧の貫通力と分散特性を画像処理手法により定量化した。数値解析については、乱流モデルとして $k-\epsilon$ 2 方程式モデルと LES を用いた非定常噴霧流解析手法を確立し、その比較により LES の有用性を示した。また最新の液滴分裂モデルにより、微粒化特性を良好に推算可能であることを示した。さらに噴霧燃焼実験により特定の噴霧条件で低 NO_x 燃焼を実現できることを確認した。

研究成果の概要（英文）：An experiment and numerical simulation were carried out to understand the ultra-high pressure pulse spray characteristics. The spray characteristics such as penetration and dispersion were measured by imaging method which was obtained by high-speed video camera. The unsteady-state two-phase turbulent flow calculation method, $k-\epsilon$ model and Large Eddy Simulation (LED) are applied to the pulse spray field and a superior results were obtained by using LES. The spray combustion experiment was carried out and a low-NO_x combustion was confirmed under certain pulse spray condition.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	4,100,000	1,230,000	5,330,000
2011年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2012年度	1,100,000	330,000	1,430,000
年度			
年度			
総計	6,200,000	1,860,000	8,060,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：プロセス工学・化工物性・移動操作・単位操作

キーワード：化学工学、環境技術、省エネルギー、微粒化

1. 研究開始当初の背景

液体燃料の噴霧燃焼によるエネルギー利用にあたり、さらなる環境負荷の低減が望まれている。従来の燃焼効率の向上手法や、環境汚染物質低減の手法は十分に検討され、一定の効果を発揮している。一方、超高压微粒化手法がディーゼルエンジンで実用されている。この超高压微粒化を定置型燃焼器に適

用した場合に、どのような現象が見られ、環境負荷低減の観点で有効かどうかを学術的に解明することは、さらなる燃焼効率の向上や環境負荷低減を図る上で有用と考えた。

2. 研究の目的

超高压パルス噴霧を実現するための燃料噴射装置を利用し、現象解明のための実験装

置ならびに数値解析を援用することで、以下の研究項目に取り組んだ。

- (1) 低粘度・高粘度液体燃料の超高压噴霧現象の解明
- (2) LES による計算高速化の達成
- (3) 超高压噴霧時の微粒化モデルと噴霧流解析モデルの提案
- (4) 超高压噴霧で形成される噴霧流構造の解明

3. 研究の方法

2. における研究項目について、それぞれ以下の方法により研究を実施した。

- (1) 軽油を燃料とした場合における噴霧粒径分布や噴霧流の貫通力や分散特性を PDPA およびハイスピードビデオカメラで定量化した。

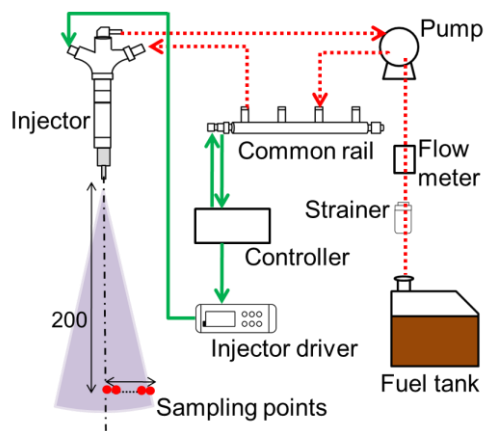


図1 超高压パルス噴霧実験装置の模式図

- (2) 噴霧流の乱流モデル計算の高速化を実現するために、非圧縮流体の圧力速度結合解法である MAC 系解法と SIMPLE 系解法による噴霧流解析を実施し、計算時間について比較検討した。

- (3) 微粒化モデルを用いた数値解析をパルス噴霧に対して実施し、その予測精度を検証した。

- (4) (2)と(3)で確立した手法を用いて、噴霧流の構造を解明した。さらに現有の燃焼炉を用いて、パルス噴霧時の燃焼特性を実験的に検討した。

4. 研究成果

以下に各研究項目ごとの成果の一例を示す。

- (1) ハイスピードビデオカメラにより取得した画像をもとに、輝度値による二値化処理を行い、噴霧領域を定量化した。図2に輝度値データから得られた噴霧領域の一例を示す。この方法で取得したデータをもとに、噴霧幅の経時変化を求めた結果を図3に示す。噴霧圧力の増加とともに、気相の乱流拡散が促進されることがわかる。

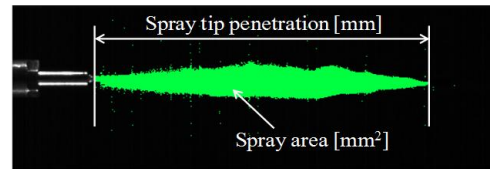


図2 実験により取得した噴霧領域の一例

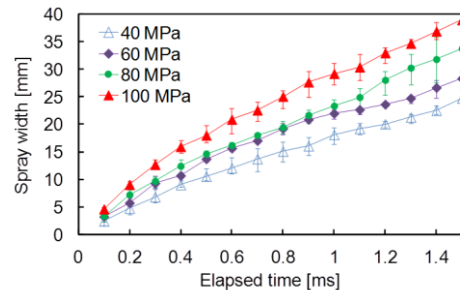


図3 噴霧圧力を変化させて測定した噴霧幅の経時変化

本データをもとに、(3)における噴霧流解析モデルの提案を行った。

- (2) 図4に示す解析領域において、乱流モデルとして $k-\epsilon$ 2 方程式モデル、微粒化モデルに KH-TAB モデルを用いた数値計算を SMAC および SIMPLE で実施した。計算速度は、SMAC が SIMPLE と比較して噴射圧 80MPa の場合で最大 2 倍、40MPa の場合で最大 1.87 倍高速であり、噴霧流解析を行う場合の圧力速度結合解法には SMAC を用いるのが有利であることが示された。

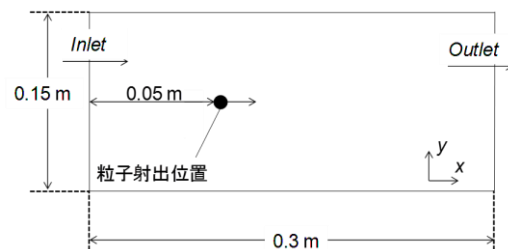


図4 噴霧流解析領域の模式図(2次元直交座標系)

- (3) 微粒化モデルとして一般的な KHRT モデルおよび TAB モデル、本研究で提案する KHTAB モデルを使用し、実験値との比較により、モデル精度を検証した。KHTAB モデルでは図5に示すノズル先端から分裂長さまでの一次分裂に KH モデルを、分裂長さ以降の二次分裂に TAB モデルを使用するもので、それぞれの分裂様式を考慮可能なモデルとなっている。表1にノズル下流 200mm における噴霧流束、表2に同位置におけるザウター平均粒径(SMD)の実験値と各モデルによる計算値を示す。これらの結果から、噴霧の分散性と SMD をともに良好に推算可能なモデルは KHTAB モデルであることが示された。

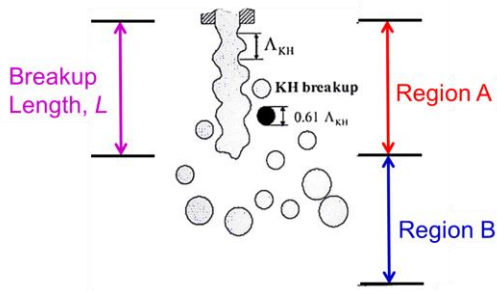


図5 微粒化モデルの概念

表1 噴霧流束の実験値と計算値の比較

Flux [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$]				
Exp.	TAB	KHRT	KH-TAB	
4.350	34.51	4.753	6.692	

表2 SMDの実験値と計算値の比較

SMD [μm]				
Exp.	TAB	KHRT	KH-TAB	
20.0	14.3	39.5	18.7	

(4) 液柱の分裂を考慮した噴霧流解析を図4に示した解析領域(ただし3次元)において、表3および表4の条件で実施した。

表3 噴霧流の解析条件

Fuel flow rate	[l/min]	0.1
Injection pressure	[MPa]	40
Injection time	[ms]	1.34
Nozzle diameter	[mm]	0.21
Spray angle	[degree]	10
Oscillation frequency	[Hz]	200
Initial air velocity	[m/s]	0.1
Droplet velocity	[m/s]	198

表4 噴霧流の解析スキーム

Discretization method	Finite volume method
Discretization scheme	
Coupling scheme	SMAC
Turbulence model	LES, $k-\epsilon$
Breakup model	KH-TAB
Phase coupling model	PSI-CELL

複数回噴射時の、解析により得られる渦度と噴霧実験により取得した輝度値の比較を噴射後32msおよび35msについて示す。観察結果によれば、噴霧の枝分かれ状の分散や噴霧流の蛇行が観察された。LESによる解析結果は噴霧の非定常性や蛇行を再現しているが、 $k-\epsilon$ 2方程式モデルでは渦を再現できな

い。従って超高圧派する噴霧流解析を実施する際には、LESを使用する必要があることがわかった。また、図6に、噴射圧力を変化させた場合のノズル下流200mmにおける渦度の絶対値の経時変化を示す。噴射圧力の増大とともに、早期に乱流場を形成すること、渦度の時間変化が大きいことから、粒子の初速度の増加により、それによって誘起される気相の乱流拡散が促進されることが示された。

本燃料噴射系を用いて、現有の試験炉において噴霧燃焼実験を実施し、火炎温度やNOx濃度を測定し、超高圧パルス噴霧による効果を検証した。

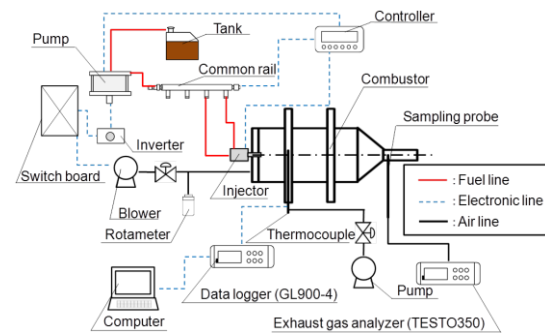


図6 噴霧燃焼実験装置の概略図

表5 噴霧燃焼の実験条件

Fuel	Diesel Fuel				
Fuel flow rate	[l/min]	0.05			
Injection pressure	[MPa]	20	40	60	80
Injection time	[ms]	1.34	0.7	0.56	0.32
Oscillation frequency	[Hz]	200			
Air ratio	[-]	1.2			
Nozzle diameter	[mm]	0.21			

燃料には軽油を用い、温度測定にはB型熱電対を内蔵したサクシオンパイロメータを用いた。表5に噴霧燃焼実験条件を示す。温度の測定はノズル下流308~683mmに位置する4点で、NOx濃度の測定は燃焼炉出口で行った。

図7に噴射圧力を変化させた場合の火炎温度の軸方向分布を示す。図より、噴射圧力の増大とともに上流側で火炎温度は増加した。研究成果(1)-(4)から考察すると、燃料の噴射速度が増大し、噴霧の半径方向への分散および空気との混合が促進することで、上流部での燃料の多くが盛んに燃焼したと考えられる。その下流部では、火炎温度の噴射圧力による差異が減少することから、いずれの噴射条件においても、軸方向距離408mmよりも上流部で燃焼が完了していると考えられる。

図8に噴射圧力を変化させた場合の排ガス中のNOx濃度の変化を示す。噴射圧力の減少に伴いNOx濃度は増加した。これは燃料と空気の混合割合により形成される混合気の当

量比が変化するため、プロンプト NO_x の生成量が増えたためと考えられる。これらの挙動を数値解析で再現するためには、噴霧燃焼の非定常性や空間的な温度・濃度分布を再現することが要求される。従って高速かつ高精度な LES による二相流数値解析手法の開発の重要性が示唆された。

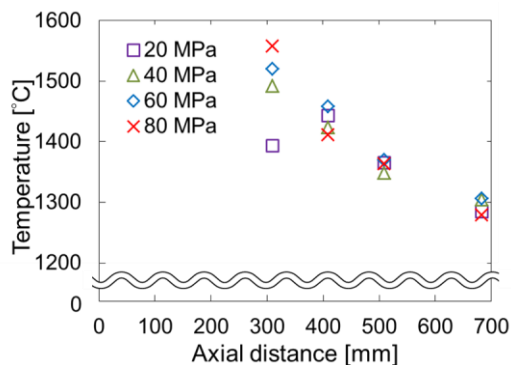


図7 火炎温度の軸方向温度分布

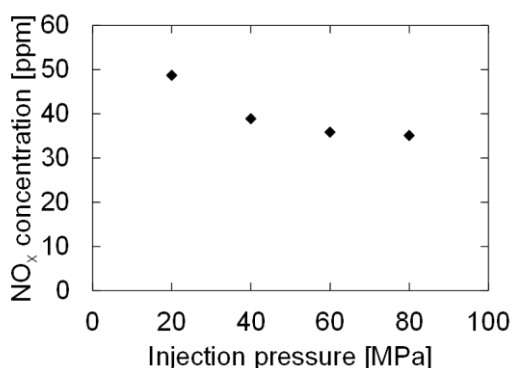


図8 排出 NO_x 濃度の噴射圧依存性

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 0 件)

[学会発表] (計 13 件)

- [1] 佐川龍一, 横井智記, 児島芳徳, 齋藤泰洋, 青木秀之, 庄子正和, 噴射圧力が高圧パルス噴霧の燃焼開始時における温度応答に及ぼす影響, 化学工学会第 78 年会, 東京, 3 月 17-19 日 (2013) [口頭・査読なし]
- [2] 佐川龍一, 横井智記, 児島芳徳, 齋藤泰洋, 青木秀之, 庄子正和, 高圧パルス噴霧燃焼器における噴射初期の燃焼特性, 宮城化学工学懇話会第 12 回先端研究発表会, 仙台, 3 月 7 日 (2013) [口頭・査読なし]
- [3] 横井智記, 佐川龍一, 齋藤泰洋, 青木秀之, 庄子正和, 噴射圧力が超高圧パルス噴霧の燃焼特性に及ぼす影響に関

する実験的検討, 第 15 回化学工学会学生発表会(米沢大会), 米沢, 3 月 2 日 (2013) [口頭・査読なし]

- [4] Ryuichi Sagawa, Yokoi Satoki, Yoshinori Kojima, Yasuhiro Saito and Hideyuki Aoki, Effect of Injection Interval on Flow Characteristics of High Pressure Pulse Sprays, 9th International Conference on Flow Dynamics, Sendai, Japan, September 19-21 (2012) [ポスター・査読なし]
- [5] R. Sagawa, Y. Kojima, Y. Saito and H. Aoki, Comparison of Breakup Models for Large Space in High Pressure Pulse Sprays, the 9th international conference on heat transfer, fluid mechanics and thermodynamics, Malta, July 16-18 (2012) [口頭・査読あり]
- [6] 佐川龍一, 児島芳徳, 齋藤泰洋, 青木秀之, 噴射圧力が高圧パルス噴霧流の流動特性に及ぼす影響, 化学工学会第 77 年会, 東京, 3 月 19-21 日 (2012) [口頭・査読なし]
- [7] 佐川龍一, 児島芳徳, 齋藤泰洋, 青木秀之, 大気圧下における高圧パルス噴霧流の分散特性に関する検討, 第 10 回宮城化学工学懇話会先端研究発表会, 仙台, 3 月 8 日 (2012) [口頭・査読なし]
- [8] Ryuichi Sagawa, Yoshinori Kojima, Yasuhiro Saito, Masakazu Shoji, Hideyuki Aoki and Takatoshi Miura, Effect of Oscillation Frequency on High Pressure Pulse Spray, 8th International Conference on Flow Dynamics, Sendai, Japan, November 9-11 (2011) [ポスター・査読なし]
- [9] 児島芳徳, 佐川龍一, 齋藤泰洋, 松下洋介, 青木秀之, 三浦隆利, 閉空間自然対流を対象とした SMAC および非定常 SIMPLE における密度補正に関する検討, 化学工学会第 43 回秋季大会, 名古屋, 9 月 14-16 日 (2011) [口頭・査読なし]
- [10] 児島芳徳, 佐川龍一, 齋藤泰洋, 松下洋介, 青木秀之, 三浦隆利, 密度補正による閉空間内自然対流の数値解析, 第 9 回宮城化学工学懇話会先端研究発表会, 仙台, 9 月 12 日 (2011) [口頭・査読なし]
- [11] 佐川龍一, 児島芳徳, 金井鉄也, 齋藤泰洋, 庄子正和, 青木秀之, 三浦隆利, 高圧パルス噴霧の輝度値による濃淡の評価, 第 11 回日本伝熱学会学生発表会, 仙台, 5 月 6 日 (2011) [口頭・査読なし]
- [12] 佐川龍一, 鎌田美志, 児島芳徳, 庄子正和, 青木秀之, 三浦隆利, 噴射圧力が超高圧パルス噴霧の噴霧特性に及ぼす影響に関する実験的検討, 第 13 回化

学工学会学生発表会(秋田大会), 秋田,
3月5日(2011)

- [13] 児島芳徳, 鎌田美志, 齋藤泰洋, 新山
智史, 佐川龍一, 庄子正和, 松下洋介,
青木秀之, 三浦隆利, ハイスピードカ
メラによる超高压パルス噴霧における
非定常流動の観察, 第48回燃焼シンポ
ジウム, 福岡, 12月1-3日(2010)

[その他]

ホームページ等

<http://www.che.tohoku.ac.jp/~tranpo/index-j.html>

受賞歴

- [1] 特別賞, 第12回宮城化学工学懇話会先
端研究発表会, 3月7日(2013)
[2] 優秀賞, 第15回化学工学会学生発表会,
3月2日(2013)
[3] OUTSTANDING PAPER AWARD, 9th
International Conference on Heat
Transfer, Fluid Mechanics and
Thermodynamics, July 18(2012)
[4] 最優秀発表賞, 第10回宮城化学工学懇
話会先端研究発表会, 3月8日(2012)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

青木 秀之 (AOKI HIDEYUKI)
東北大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号: 40241533

(2) 研究分担者

()

研究者番号:

(3) 連携研究者

()

研究者番号: