軽油エマルジョンの燃焼および排気特性に関する研究
(第1報, 微粒化状態の影響)Tajul AZRIZAL^{*1}, 岡本 雄弥^{*1}, 瀬尾 健彦^{*2}, 三上 真人^{*2}Study of combustion and emission characteristics of diesel fuel/water emulsion
(1st report, Effects of atomization condition)Tajul AZRIZAL^{*1}, Yuya OKAMOTO^{*1}, Takehiko SEO^{*2} and Masato MIKAMI^{*2}^{*1,*2} Yamaguchi University, Department of Mechanical Engineering
2-16-1 Tokiwadai, Ube-shi, Yamaguchi 755-8611, Japan

Received 10 December 2013

Abstract

Emulsion fuel is regarded as one of the possible fuels for reducing the emissions of pollutants from combustion systems. This study investigated the effect of droplet size on combustion and emission characteristics for both pure diesel and emulsion fuel in preheated ambient air. A burner equipped with a twin fluid atomizer was used to vary Sauter mean droplet diameter (SMD) of spray. Water percentage of 5 and 10 vol% in W/O emulsion fuel was used. Experimental results show that both emulsion fuel had lower EICO₂ than diesel fuel. This result shows combustion efficiency of emulsion fuel was lower than that of diesel fuel. As the preheated ambient air temperature T_{Ambi} was increased to 473 K, combustion efficiency of emulsion fuels was improved. In emulsion fuel combustion, NO emission was lower than pure diesel fuel combustion. The vaporization of water in emulsion fuels reduced local flame temperature and thus reduced the NO formation. Smaller fuel droplet SMD had higher NO emission for pure diesel fuel. However, NO emission had no dependence on fuel droplet SMD for emulsion fuel. Emulsion fuels also had lower flame luminance as compared with diesel fuel alone. This is caused by lower soot emission of emulsion fuels.

Key words : W/O emulsion fuel, Fuel droplet size, Spray combustion, Flame temperature, Pollutant

1. 緒 言

ディーゼルエンジンは内燃機関の中でも高い熱効率を有しているが、燃焼過程において二酸化炭素以外に窒素酸化物 (NO_x)、未燃炭化水素 (HC)、一酸化炭素 (CO)、硫黄酸化物 (SO_x) および粒子状物質 (PM) などの汚染物質を排出する。これらの汚染物質は、環境や生態系に害を及ぼすだけでなく、人間の健康に深刻な脅威となりうる。したがって、汚染物質排出の制御は現代の燃焼システムの設計において重要となっている。

エマルジョン燃料(水谷, 多木, 1981), (Armas, et al, 2005), (Crookes, et al, 1997), (Lif and Holmberg, 2006)は、ディーゼルエンジンの汚染物質の排出を低減できる可能性を持つ燃料の一つとして考えられてきており、中でも W/O(water in oil)型エマルジョン燃料は、燃料液滴中の水が二次微粒化に寄与し、燃焼特性の改善が期待されている。高温場における燃料液滴の蒸発および燃焼中において液滴中に分散した水は熱力学的に準安定な状態で過熱されており、このことが気泡核形成(Wei, et al, 2002), (Avedisian and Andres, 1978), (Watanabe, et al, 2010)につながる。Mikami ら(Mikami and Kojima, 2002)は、混合燃料を用いてマイクロ爆発の発生について調査を行い、微小爆発発生確率の特性を推定する式を導出した。また、その考えに基づきエマルジョン燃料の微小爆発発生確率についての考察も行っている。Nazha ら(Nazha and Crookes, 1985)は、軽油の噴霧火炎において、含水率が 5 vol.%の軽油・

No.13-00769 [DOI: 10.1299/transjsme.2014tep0230]

^{*1} 山口大学大学院理工学研究科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台 2-16-1)^{*2} 正員, 山口大学大学院理工学研究科

E-mail of corresponding author: tseo@yamaguchi-u.ac.jp

水エマルジョン燃料の場合にすすを最大限に削減できると報告している。また、すす濃度のピーク値は約 30 % 減少し、ピークとなる位置がインジェクタの下流方向に移動することが報告されている(Nazha, et al, 1998)。Rhim ら (Rhim and No, 2000)は含水率の違い、界面活性剤の含有率の違いによる軽油・水エマルジョン燃料の噴霧特性について研究を行ない、含水率の増加と共にエマルジョン燃料の密度、動粘度が増加し、動粘度に関しては界面活性剤の含有率の増加と共に増加するが、ザウター平均液滴径は若干減少することが報告されている。以上の研究を始めとしてエマルジョン燃料の燃焼に関する研究が多くなされてきているが、エマルジョン燃料の微粒化状態が燃焼・排気特性に及ぼす影響についての知見は不足している。

本研究では、不完全燃焼成分の再燃焼を促進し燃焼効率を向上させるために高温空気場中に燃料を噴霧し、その噴霧の非燃焼時のザウター平均液滴径および粒度分布の調査を行った。また、燃焼時の火炎挙動の調査および排気ガス成分を測定することで、軽油および含水率の異なる W/O 型エマルジョン燃料の微粒化状態が燃焼・排気特性に与える影響について調査した。

2. 実験装置および実験方法

2・1 エマルジョン燃料

本研究では、軽油および含水率 5 vol%, 10 vol% のエマルジョン燃料を用いた。この燃料は、HLB 値 4.3 の界面活性剤(レオドール SP-O10V, 花王株式会社)を体積割合で 2 % 添加し、規定の体積割合の水を混合し攪拌することにより製作した。攪拌には機械式ホモジナイザー (T10 basic, IKA) を使用した。生成直後のエマルジョン燃料の顕微鏡写真を図 1 に示す。燃料中の分散水滴径は図 1 より約 5~50 μm である。燃料の動粘度は、Oswald 粘度計 (O-7460 シリーズ 100, 蕪木化学)を用いて測定した。

Fig.1 Micrograph of emulsion fuel

2・2 実験装置および実験方法

本研究で使用した実験装置の概略図を図 2 に示す。燃焼器は予混合噴霧バーナ、石英ガラス管およびステンレス管で構成されており、石英ガラス管を通して火炎の挙動が観察できる。図 3 に図 2 の破線で囲まれた予混合噴霧バーナの概略図を示す。バーナは外管と内管で構成されており、内管の先端にパイロットバーナを設置した。燃料の微粒化には外部混合式二流体噴射弁 (1/8 type Spraying Systems Co. Ltd) を用い、噴射ノズル延長管を内管の内部設置することによりパイロットバーナ出口から 18 mm 下方より燃料噴霧を供給した。微粒化空気流量 Q_{Atom} をマスフローコントローラー (SEC-E40MK3 Air, HORIBA) により 2.0~4.0 L/min と変化させることにより、供給する燃料噴霧の液滴径分布を変化させた。その際、補助空気を外径が 12.7 mm の噴射ノズル延長管と内径が 16.7 mm の内管の間より供給し、その流量 Q_{sup} を調節することで噴射ノズル近傍の予混合噴霧流の当量比を $\phi_{\text{SJ}}=6.35$ 一定とした。微粒化空気と補助空気からなる供給空気の流量 $Q_{\text{Jet}}(=Q_{\text{Atom}}+Q_{\text{Sup}})$ は 5.0 L/min 一定とした。供給燃料に含まれる軽油が 3.1 mL/min 一定となるように燃料流量 Q_{F} を調節した。本研究で用いた噴霧はソリッドコーン形状であり、噴霧角 18 deg である。保炎にはパイロットバーナを用いた。パイロットバーナには同心円状に直径 1.2 mm の穴が 16 個配置されており、量論混合比のプロパン-空気予混合気を供給することにより予混合火炎を形

成した. プロパンの供給流量は 150 mL/min であり, 供給される軽油の発熱量の 1/10 程度であった. 周囲空気流量 Q_{Ambi} は 32 L/min で一定とし, 周囲空気流は内管の外周にコイル状に巻いたシースヒーター(VH81-421,

Fig. 2 Schematic of experimental apparatus

Fig. 3 Schematic of premixed spray burner

NAGANO LTD)により温度 $T_{\text{Ambi}}=373 \text{ K}$ および 473 K に予熱され、内径が 81.1 mm の外管と外径が 42.7 mm のパイロットバーナの間から供給された。ヒーターの出力制御には電力調整器(G3PX-220EC-CT10, OMRON)を使用し、加熱された周囲空気流の温度計測および温度制御にはそれぞれシース熱電対(E52-CA35A $\phi=1.6 \text{ NETU}$ 2M, OMRON), デジタル調整計(E5CN-C2T, OMRON) を用いた。熱損失を防ぐために、外管内壁面には断熱材を設置した。加熱された周囲空気により、噴射ノズルに供給された燃料および空気、補助空気、空気-プロパン予混合気加熱されることを防ぐために、内管および空気-プロパン予混合気供給管の周囲には断熱材を設置した。周囲空気を含み総当量比は $\phi_{\text{All}}=0.86$ 一定とした。なお、総当量比には空気-プロパン予混合気を考慮していない。

非燃焼時の予混合噴霧の微粒化特性を定量化するために、パルス発光するフラッシュランプ (NANOLITE KL-L, High-Speed Photo-Systeme) を照射した噴霧をハイスピードカメラ (Phantom Vr.9.0, Vision Research Inc.) を用いて撮影を行ない、各液滴の占める面積と同じ面積を有する等価円の直径として液滴径を求めた。なお、ハイスピードカメラとフラッシュランプを同期させることにより撮影画像にはフラッシュランプの発光時間である 18 ns の現象のみが記録される。各噴霧条件の 300 枚の画像を解析することにより粒度分布およびザウター平均液滴径 (SMD) を得た。パイロットバーナ出口中心軸下流 15 mm の位置を撮影範囲の中心とし、縦横約 $5.5 \text{ mm} \times 5.5 \text{ mm}$ を撮影範囲とした。この時の撮影画像の解像度は $480 \text{ pixel} \times 480 \text{ pixel}$ であり、この時の分解能は $11.5 \mu\text{m}/\text{pix}$ であった。燃焼時の排気ガス特性は、自動車排気ガス分析装置(MEXA-1500D, HORIBA Co. Ltd)を用いてパイロットバーナ出口中心軸下流 1150 mm における一酸化炭素 (CO), 未燃炭化水素 (THC), 二酸化炭素 (CO_2), 一酸化窒素 (NO) の成分測定を行ない、これらを燃料 1 kg 当たりの排出指数 (EICO, EITHC, EICO₂, EINO) に変換して解析を行なった。燃焼室内の燃焼挙動はデジタルカメラ (EXILM EX-F1, Casio) により石英ガラス製の燃焼室を通して撮影を行なった。

Table 1 Test fuels kinematic viscosity at 293 K

Water content	Kinematic viscosity [cSt]
0 vol%	3.66
5 vol%	4.10
10 vol%	4.48

Fig. 4 Dependence of SMD of fuel spray on atomizing air flow rate for different type of fuels at ambient air temperature; (a) $T_{\text{Ambi}}=293 \text{ K}$ and (b) $T_{\text{Ambi}}=473 \text{ K}$.

3. 実験結果および考察

3・1 エマルジョン燃料

周囲温度 293 K における各供試燃料の動粘度を表 1 に示す. 含水率の増加に伴い動粘度は増加した. 図 4(a)に, 予熱無しの周囲空気 ($T_{\text{Ambi}}=293 \text{ K}$) を供給した場合における微粒化空気流量 Q_{Atom} に対する SMD を示す. 微粒化空気流量 Q_{Atom} が増加するにつれ, 各供試燃料の SMD は減少していた. また, 供試燃料の含水率の増加に伴い SMD は増加する傾向が見られた. これは, 供試燃料の動粘度が増加するためである. 図 4(b)に, $T_{\text{Ambi}}=473 \text{ K}$ に予熱した周囲空気を供給した場合における燃料噴霧の SMD を示す. 含水率が 5 vol% のエマルジョン燃料噴霧では, SMD はすべての微粒化空気流量において最も小さかった. 含水率が 10 vol% のエマルジョン燃料噴霧では, 微粒化空気流量が 2.0-3.0 L/min では軽油よりも SMD は小さかったが, 3.5 および 4.0 L/min では同程度となっていた. このように予熱周囲空気中において, 軽油よりも動粘度が高いにもかかわらずエマルジョン燃料噴霧の SMD が小さくなっていた. 図 5 に異なる周囲空気温度における軽油およびエマルジョン燃料噴霧の粒径分布を示す. 微粒化空気流量 Q_{Atom} は 3.0 L/min である. 軽油の場合, 噴霧の粒径は軽油の蒸発のみによって変化するため, その粒径分布は周囲雰囲気温度が高くなるにつれて小粒径側にシフトすると考えられる. しかしながら, 図 5 からは, 50 μm 以上の液滴径の液滴個数はわずかながら減少しているが, 明確な違いは見られなかった. 一方, エマルジョン燃料の場合では, 周囲雰囲気温度が高くなると 20 μm 以下の小さな液滴の個数が減少していることが見て取れる. この理由として, 軽油中の水分が影響を及ぼしており, 高温の予熱周囲空気により液滴表面の水分の蒸発・吹きだし, および, 二次微粒化が起こった可能性が考えられる. また, 大粒径の液滴個数がわずかながら減少しており, これは軽油と同様の傾向であり軽油の蒸発による影響が大きいと考えられる.

3・2 噴霧火炎輝度およびすすの生成特性

図 6 に周囲空気温度 $T_{\text{Ambi}}=473 \text{ K}$ の場合における火炎の画像を示す. ほぼ同じ SMD 条件での比較を行うために, 微粒化空気流量を軽油の場合では 3.0 L/min, エマルジョン燃料の場合では 2.5 L/min とした. これらの微粒化空気流量に対して, 各供試燃料噴霧の SMD は, 軽油, 含水率 5 vol% および 10 vol% エマルジョン燃料ではそれぞれ 52 μm , 53 μm , 54 μm であった. 軽油を用いた場合の火炎に比べ, エマルジョン燃料を用いた場合の火炎では, 高い輝度を持つ領域が狭くなっていることが見て取れる.

Fig. 5 Droplet size distribution of test fuels at $Q_{\text{Atom}}=3.0 \text{ L/min}$ and $T_{\text{Ambi}}=273 \text{ K}$ and 473 K ; (a) water content 0 vol. %, (b) water content 5 vol. % and (c) water content 10 vol. %.

図7に各供試燃料の異なるSMDの噴霧火炎における高い輝度値を持つ領域の変化を示す。本研究では、輝度をグレースケールで表し、輝度値が200から255となる画素数でこの領域を表している。各プロットは各条件30枚の火炎画像より得られた平均値であり、エラーバーで標準偏差を示している。同一液滴径において、含水率が増加するにつれ、高い輝度値を持つ領域は狭くなることが分かった。輝度値の高い領域ではすすからの固体放射により生じる輝炎が見られることから、エマルジョン燃料中に含まれる水分の蒸発潜熱や水蒸気により燃焼温度が低下したことが理由の一つとして考えられる。また、火炎温度の低下によりエマルジョン燃料が十分蒸発燃焼せず、燃焼領域を液相のまま貫通したことですす発生量が少なくなったことやすすが生成されても水性ガス反応(水谷, 2002)によりCOへと変換され、火炎内におけるすす量は軽油を用いた場合より減少したことも原因であると考えられる。

3・3 燃焼および排ガ斯特性

図8-11にそれぞれ各供試燃料噴霧のSMDに対するEICO, EITHC, EICO₂, EINOを示す。それぞれの図において、(a)は周囲空気温度 $T_{\text{Ambi}}=373\text{ K}$, (b)は $T_{\text{Ambi}}=473\text{ K}$ の場合の結果である。エマルジョン燃料の方が軽油に比べてEICO, EITHCは多くなっており、EICO₂, EINOは少なくなっている。これは、エマルジョン燃料中に含ま

Fig. 6 Photographs of spray flame for different type of fuels at $T_{\text{Ambi}}=473\text{ K}$; (a) water content 0 vol. %, (b) water content 5 vol% and (c) water content 10 vol%.

Fig. 7 High luminosity area for different type of fuels at $T_{\text{Ambi}}=473\text{ K}$. Water content 10 vol. % emulsion fuel had the lowest luminosity value among the three test fuel results. Lower combustion efficiency and temperature and water gas shift reaction in emulsion fuels also reduced the soot formation.

Fig. 8 EICO for different type of fuels. Emulsion fuels had higher EICO value caused by lower combustion temperature that leads to more incomplete combustion.

Fig. 9 EITHC for different type of fuels. Higher preheated ambient air $T_{Ambi}=473$ K improved combustion efficiency.

Fig. 10 EICO₂ for different type of fuels. Higher temperature improved the combustion efficiency. Both emulsion fuels had lower EICO₂ than diesel fuel for both $T_{Ambi}=373$ K and $T_{Ambi}=473$ K, possibly due to lower combustion temperature.

Fig. 11 EINO for different type of fuels. Smaller fuel spray SMD increases the flame temperature that leads to higher EINO for diesel fuel. For both emulsion fuels, EINO values are almost identical for all atomizing conditions but significantly lower than diesel fuel EINO value.

れる水の蒸発潜熱および水蒸気の希釈により局所で火炎温度が低下し、不完全燃焼領域が増加したためであると考えられる。さらに、EICO, EITHC の増加に比べ EICO₂ は著しく減少していることから、蒸発が完了せずに燃焼領域を通過したエマルジョン燃料液滴が存在していると考えられる。また、エマルジョン燃料の燃焼時の EICO 増加には水性ガス反応による CO の生成も寄与している可能性も考えられる。エマルジョン燃料の含水率の影響について述べる。周囲空気温度が 473 K の場合においてはエマルジョンの含水率の高いものほど EICO, EITHC が高く EICO₂, EINO は低くなっており、不完全燃焼領域が広がっていると考えられる。一方、周囲空気温度が 373 K の場合ではこの傾向とは異なる傾向が見て取れる。周囲空気温度 373 K は大気圧下での水の飽和温度程度であり、液滴内にある水を考えると飽和温度以下となっている。このことから、液滴内の水の特性によっては液滴外へ放出される水蒸気の量や二次微粒化挙動が周囲空気温度 473 K の場合と異なることが考えられる。その結果周囲空気温度 373 K と 473 K の排ガス特性には異なる傾向が見られたのではないかと考える。

各供試燃料噴霧の SMD の影響に着目する。図 8(a)-11(a)より、軽油の場合では SMD の減少に伴い EICO, EITHC は減少し、EICO₂ および EINO は増加していることが分かった。これは、SMD が小さくなることにより蒸発が促進され、不完全燃焼領域が減少したために EICO, EITHC は減少し、また火炎温度が上昇したために Thermal NO が増加し EINO が増加したと考えられる。含水率 5 vol% および 10 vol% エマルジョン燃料の場合では、共に EICO や EITHC を最小、EICO₂ を最大とする SMD が存在していることが分かった。EINO に関しては SMD に対して変化がほとんどみられなかった。三上ら(三上他, 2005)により考察されているように、SMD が小さい条件では、燃料液滴は短時間で蒸発し局所的には過濃可燃限界を超えていると考えられ、さらに水蒸気やエマルジョン燃料に含まれる水によって火炎温度が下がるために不完全燃焼となり、SMD が小さな場合においても EICO, EITHC が増加したものと考える。一方、SMD が大きい場合、粗大液滴が多く存在し、空間的な燃料濃度の非一様性が増し、それに伴い不完全燃焼領域が多くなり、EICO, EITHC が増加したものと考える。また、SMD が大きい場合には慣性が大きく蒸発に時間を要する粒径の大きな液滴が多く含まれており、火炎を貫通し燃焼に寄与しない液滴が SMD の小さな場合に比べ多く存在する。このことは、含水率 5 vol% において SMD が 38.9 μm と 69.2 μm の場合を比較すると EICO は同程度なのに対して 69.2 μm の場合の EICO₂ は低くなっていることから分かる。

周囲空気温度の影響に着目する。 $T_{\text{Ambi}}=473 \text{ K}$ の条件では全ての供試燃料において、 $T_{\text{Ambi}}=373 \text{ K}$ の条件に比べて EICO, EITHC は減少し、EICO₂ は増加している。一方、EINO については、軽油の場合では増加しているにもかかわらず、エマルジョン燃料では含水率 5 vol% および 10 vol% 共にほとんど変化がみられなかった。周囲空気温度が上昇すれば液滴の蒸発および燃焼は促進されるために、軽油の場合では火炎温度が上昇し Thermal NO が

増加したものであると考えられる。一方エマルジョン燃料の場合では、 $T_{\text{Ambi}}=373\text{ K}$ の条件と比べて排出量にはそれほど変化は見られなかった。これらのことは、周囲空気温度を上昇させることによって NO の排出量を増やすことなくエマルジョン燃料の燃焼効率を向上させることが可能であることを意味している。

4. 結 語

軽油および含水率の異なるエマルジョン燃料の噴霧燃焼において、高温空気中での非燃焼時のザウター平均液滴径 (SMD) および粒度分布の調査、燃焼時の火炎挙動の調査および排気ガス成分測定を行うことで、燃料の微粒化状態が燃焼・排気特性に与える影響を調べた。本研究で得られた知見を以下に示す。

1. 予熱周囲空気中においては、軽油よりも動粘度が高いにもかかわらずエマルジョン燃料噴霧の SMD が小さくなった。これは、高温の予熱周囲空気により液滴表面の水分の蒸発・吹きだし、および、二次微粒化が起こったためと考えられる。
2. エマルジョン燃料を用いた場合では火炎輝度が低下しており、燃焼効率が落ちることによる噴霧火炎中のすす生成量の減少や、水分の蒸発潜熱や水蒸気による燃焼温度の低下が考えられる。また、すすが生成されても水性ガス反応により CO へと変換され、火炎内におけるすす量は軽油を用いた場合より減少すると考えられる。
3. エマルジョン燃料を用いた場合には軽油を用いた場合より EICO および EITHC が高くなる傾向があるが、周囲空気温度を高くすることにより燃焼効率が向上し、EICO および EITHC を低減できる。また、EINO に関しては、エマルジョン燃料を用いた場合の方が低くなっており、同様の傾向が周囲空気温度を高くした場合にも見られた。さらに軽油の場合は燃料噴霧の SMD の減少に伴い EINO は増加していることに対し、エマルジョン燃料の場合には液滴径への依存性が見られなかった。

文 献

- Armas, O., Ballesteros, R., Martos, F.J. and Agudelo, J.R., Characterization of light duty diesel engine pollutant emissions using water-emulsified fuel, *Fuel*, Vol. 84, No. 7-8 (2005), pp. 1011-1018.
- Avedisian, C. T. and Andres, R. P., Bubble nucleation in superheated liquid-liquid emulsions, *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol. 64, No. 3 (1978), pp. 438-453.
- Crookes, R.J., Kiannejad, F. and Nazha, M. A. A., Systematic assessment of combustion characteristics of biofuel and emulsion with water for use as diesel engine fuels, *Energy Conversion Management*, Vol. 38, No. 15-17 (1997), pp. 1785-1795.
- Lif, A. and Holmberg, K., Water-in-diesel emulsions and related systems, *Advances in Colloid and Interface Science*, Vol. 123-126 (2006), pp. 231-239.
- Mikami, M. and Kojima, N., An experimental and modelling study on stochastic aspects of microexplosion of binary-fuel droplets, *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 29, No. 1 (2002), pp. 551-559.
- 三上真人, 山本和浩, 中本圭太, 森上修, 小嶋直哉, 正デカンを用いた部分予混合噴霧流の燃焼特性, *日本機械学会論文集 B 編*, Vol. 71, No. 701 (2005), pp. 344-350.
- 水谷幸夫, 多木昭雄, 水乳化燃料噴霧の燃焼・排出特性と燃焼機構, *日本機械学会論文集 B 編*, Vol. 47, No. 424, (1981), pp. 2379-2385.
- 水谷幸夫, 燃焼工学 第3版(2002), pp. 19-20, 森北出版株式会社.
- Nazha, M. A. A. and Crookes, R. J., Effect of water content on pollutant formation in a burning spray of water-in-diesel fuel emulsion, 20th Symposium (International) on Combustion, Vol. 20, No. 1 (1985), pp. 2001-2010.
- Nazha, M. A. A., Rajakaruna, H. and Crookes, R. J., Soot and gaseous species formation in a water-in-liquid fuel emulsion spray-a mathematical approach, *Energy Conversion Management*, Vol. 39, No. 16-18 (1998), pp. 1981-1989.
- Rhim, J.-H. and No, S.-Y., Spray characteristics of water/oil emulsified fuel, *Proceedings of 8th ICLASS* (2000), pp. 52-59.
- Watanabe, H., Suzuki, Y., Harada, T., Matsushita, Y., Aoki, H. and Miura, T., An experimental investigation of the breakup characteristics of secondary atomization of emulsified fuel droplet, *Energy*, Vol. 35, No. 2 (2010), pp. 806-813.
- Wei, B. F., Ling, Y. H., Wang, L. and Fan, H. M., A unified model for the micro-explosion of emulsified droplets of oil and water, *Fuel Processing Technology*, Vol. 79, No. 2 (2002), pp. 107-119.

References

- Armas, O., Ballesteros, R., Martos, F.J. and Agudelo, J.R., Characterization of light duty diesel engine pollutant emissions using water-emulsified fuel, *Fuel*, Vol. 84, No. 7-8 (2005), pp. 1011-1018.
- Avedisian, C. T. and Andres, R. P., Bubble nucleation in superheated liquid-liquid emulsions, *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol. 64, No. 3 (1978), pp. 438-453.
- Crookes, R.J., Kiannejad, F. and Nazha, M. A. A., Systematic assessment of combustion characteristics of biofuels and emulsions with water for use as diesel engine fuels, *Energy Conversion and Management*, Vol. 38, No. 15-17 (1997), pp. 1785-1795.
- Lif, A. and Holmberg, K., Water-in-diesel emulsions and related systems, *Advances in Colloid and Interface Science*, Vol. 123-126 (2006), pp. 231-239.
- Mikami, M. and Kojima, N., An experimental and modeling study on stochastic aspects of microexplosion of binary-fuel droplets, *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 29, No. 1 (2002), pp. 551-559.
- Mikami, M., Yamamoto, K., Nakamoto, K., Moriue, O. and Kojima, N., Combustion characteristics of partially premixed n-decane spray jets, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol. 29, No. 1 (2002), pp. 551-559 (in Japanese).
- Mizutani, Y. and Taki, A., Burning and emission characteristics and combustion mechanisms of water-in-oil-emulsion sprays: 1st report, properties of emulsions and their burning and emission characteristics, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol.47, No.424 (1981), pp.2379-2385 (in Japanese).
- Mizutani, Y., *Combustion Engineering* (2002), pp.19-20, Morikita Publishing Co. (in Japanese).
- Nazha, M. A. A. and Crookes, R. J., Effect of water content on pollutant formation in a burning spray of water-in-diesel fuel emulsion, *20th Symposium (International) on Combustion*, Vol. 20, No. 1 (1985), pp. 2001-2010.
- Nazha, M. A. A., Rajakaruna, H. and Crookes, R. J., Soot and gaseous species formation in a water-in-liquid fuel emulsion spray-a mathematical approach, *Energy Conversion and Management*, Vol. 39, No. 16-18 (1998), pp. 1981-1989.
- Rhim, J-H. and No, S-Y., Spray characteristics of water/oil emulsified fuel, *Proceedings of 8th ICLASS* (2000), pp. 52-59.
- Watanabe, H., Suzuki, Y., Harada, T., Matsushita, Y., Aoki, H. and Miura, T., An experimental investigation of the breakup characteristics of secondary atomization of emulsified fuel droplet, *Energy*, Vol. 35, No. 2 (2010), pp. 806-813.
- Wei, B. F., Ling, Y. H., Wang, L. and Fan, H. M., A unified model for the micro-explosion of emulsified droplets of oil and water, *Fuel Processing Technology*, Vol. 79, No. 2 (2002), pp. 107-119.