

〔論文〕

蒸留 BDF を用いた気液混合燃料および水エマルジョン燃料の燃焼特性

立道 悟^{*1}・高山 敦好^{*2}・笹山 魁斗^{*1}

Combustion Characteristics of Air Mixture Fuel and Water Emulsified Fuel Using Distilled BDF

Satoru TATEMICH^{*1}, Atsuyoshi TAKAYAMA^{*2} and Kaito SASAYAMA^{*1}

Abstract

Biodiesel fuel (BDF), which is generated from edible waste oils and vegetable oils, is expected to improve environmental problems since it uses subsidies. However, the use of BDF has been decreasing since the introduction of the common rail system in internal combustion engines. The common rail system is capable of high-pressure spraying via an electronic control, but it simultaneously causes fuel deterioration and engine trouble, such as deposits on the nozzle tips and supply pumps. In this study, the negative effects of the common rail system are reduced by using distilled BDF, with greater fuel combustion achieved by using a water-emulsified fuel-air mixture. This BDF-air mixture can reduce the NO_x concentration to the same levels achieved when using light oil. Furthermore, the water-emulsified BDF can reduce the NO_x concentration by 55.5% compared to light oil, and improve the fuel consumption by 12.7% compared to BDF.

Key Words : Diesel Engine, Biodiesel Fuel (BDF), Air Mixture Fuel, Water Emulsified Fuel,

1. 緒 言

ディーゼルエンジンは、CO₂排出量が少なく、熱効率が高いことで安定してトルクを得られることから近年普及が進んでいる。現在では、環境規制に対応するために様々な低減技術が自動車に搭載されている。前処理技術は、排気の一部を再び吸気に混合させ酸素割合を下げることで急激な燃焼を抑える EGR (Exhaust Gas Recirculation)、低硫黄燃料とすることで SO_x の低減を可能とする LSO、LGO 燃料、水エマルジョン燃料やバイオ燃料などの代替燃料が挙げられる。後処理技術では NO_x 浄化を目的とした SCR (Selective Catalytic Reduction)、粒子状物質を滴し取り軽減させる DPF (Diesel Particulate Filter) などが現在主流となっている。しかし、環境規制が度々強化されており、2009年に施行されたポスト新長期規制では、前回の新長期規制より NO_x と PM の排出量を約40~65%に削減することが義務付けられ、さらなる低減技術の開発が急務となっている⁽¹⁾。

バイオディーゼル (Bio Diesel Fuel) は、菜種油や廃食用油などをメチルエステル化して製造されたディーゼルエンジン用のバイオ燃料である。地球温暖化対策が緊急の課題となる中、BDF はバイオエタノールと並び化石燃料の代替燃料として期待されており、カーボンニュートラルである⁽²⁾。BDF は廃食用油や植物油由来のため環境に優しく補助金の活用もあって広く普及したが、内燃機関にコモンレールシステムが登場して以来その利用は減少傾向にある。現在のディーゼル機関は、制御面でコモンレールが開発されたことにより、従来の機械式噴射に比べ高圧噴射となり PM の低減、多段噴射による NO_x の低減が期待できる⁽³⁾。しかし、BDF に含まれる FAME や残グリセリンが燃料噴射弁を詰まらせる原因となり⁽⁴⁾、コモンレール搭載のディーゼル機関においては BDF 燃料単体での利用は認められていない。

本研究は、コモンレール搭載のディーゼル機関を対象とし、蒸留 BDF および蒸留 BDF - 気液混合燃料、蒸留 BDF - 水エマルジョン燃料の燃焼特性を明らかとする。蒸留 BDF は燃料の性状が飛躍的に向上し、コモンレールにおいて

^{*1} エネルギーシステム工学専攻、^{*2} 機械システム工学科
令和元年10月31日受理

も対応可能なものであるが、不純物が完全に除去できたとは言えず、かつ軽油に比べ燃焼性の悪化が見受けられる⁽⁵⁾。また、蒸留によるコストも大幅に増加する。気液混合燃料化することでPMの発生を抑制し、かつNOx濃度の低減を可能とすることでその優位性を期待するものである⁽⁶⁾。また、水エマルジョン燃料化することで燃費が改善し、そのコストの補填を期待するものである⁽⁷⁾。

2. 実験概要

2・1 気液混合燃料

図1に気液混合燃料の構造を示す。気液混合燃料とは、燃料の中に気体を混入させた燃料である。燃料中に微細な気体が混入していることで気体が燃焼室で周囲の空気を取り込みながら膨張し、同時に燃料を微細化しながら予混合が促進される。これらから予混合の促進による燃焼性の改善と空気の膨張行程により着火遅れが生じることからサーマルNOxの低減が可能となる。よって、トレードオフの問題となるNOxとPMが同時に低減できるものと期待できる。混合手法としては、高圧ポンプに加圧溶解攪拌型のミキサを組み合わせ、燃料中にUFBを生成させることが可能である。NIKUNI製25NED07Z渦流タービンポンプの入り口直前で空気を混入し、渦流タービンポンプの出口に加圧溶解攪拌型ミキサを設置することで空気と燃料を混合させる。その後、1MPaの高圧でミキサを通過させることでナノ領域の気体を燃料に混入させた。

2・2 水エマルジョン燃料

水エマルジョン燃料は、燃料油中に水が混入した油中水滴型を対象とした。燃焼室では、燃料油中の水が水蒸気として膨張し、周囲の空気を取り込みながら燃料をさらに微細化できる。これは、燃料と空気の予混合が促進されるものであり、燃焼性が飛躍的に向上し、PMの低減と同時に燃費が向上する。また、水の蒸発期間に伴い着火遅れが発生し、燃焼の短期間化と燃焼温度の低下によりNOx濃度が低減できる。また、水エマルジョン燃料の生成は水の微細攪拌が必要となる。水はナノオーダーまで微細化されており、微細化された水は周囲に陰イオンを伴い、同時にラジカルが形成されるものと推測する。これは、BDFをさらに分解できる可能性があるといえる。また、同時にBDFが微細攪拌されることからこれらの相乗効果を期待するものである。

2・3 UFB水について

ファインバブル(FB: Fine Bubble)水とは、マイクロバブル(MB: Micro Bubble)やウルトラファインバブル(UFB: Ultra-Fine Bubble)などの微細気泡が水中に溶け込んだものの総称のことであり、気泡径が数10μmから100μm以下のものをMB、MBよりも微小で気泡径が1μm未満のものをUFBと呼ぶ。旧称はナノバブル(NB: Nano Bubble)であり、国際標準規格(ISO)化成立に伴い、名称が変更された。MB水は、気泡の浮力作用を用いた排水処理や水質浄化技術として利用されており実用化されている⁽⁸⁾。また、混入気体を変えることで様々な効果を得ることができるため、漁業⁽⁹⁾や農業⁽¹⁰⁾など様々な分野で用いられている。一方、UFB水に溶け込んだ気泡は微細なため目視で確認することができず、浮力も無視できるほど小さい。また、気泡表面は負の帯電特性を持つため、UFB同士は反発しあい結合が生じにくく、プラス電荷を帯びた汚れを吸着する作用があり、長時間の水中に保存される特徴がある。図2に空気UFB水の計測結果を示す。UFB水は100nmをピークとした一本山の形状が特に安定的であると考えられる。

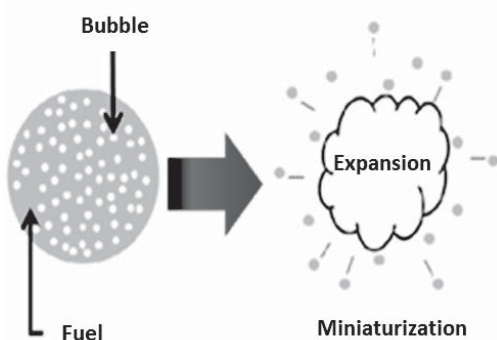


Fig. 1 Air Mixture Fuel

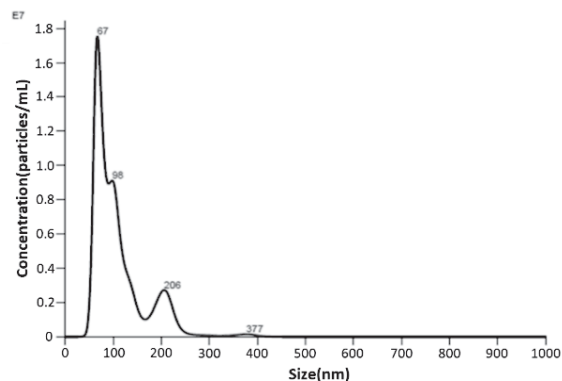


Fig. 2 UFB Water

2・4 コモンレール

高圧噴射による燃料の微細化によって燃料と空気との混合が促進されるので PM を低減できる。また、多段噴射によって、急激な圧力上昇ならびに温度上昇を抑えることができるので NO_x を低減できる。本実験ではサプライポンプで燃料をコモンレールに高圧で加圧する際、エンジン回転速度と負荷より設定された圧力となるようにサプライポンプからの燃料供給量を ECS からの信号によりコントロールする。コモンレールで加圧された燃料はインジェクタに送られ、ECS からの信号により最適な噴射時期にシリンダ内への噴射が行われる。

2・5 実験装置および実験条件

図 3 に実験装置、表 1 に供試機関の概要を示す。供試機関はマツダ製 RF-CDT 直接噴射式 4 サイクルディーゼルエンジンである。シリンダ数が 4、ボアとストローク値が 86mm×86mm のスクエア型、圧縮比が 16.7、定格出力が 3500 rpm 時に 63.2kW、最大トルクが 2000rpm 時に 178N・m、排気量が 1998cc でコモンレールシステムを採用している。コモンレールシステムの制御は、表 2 に示す IRS 製 ECS を採用した。ECS は、任意の噴射時期、噴射回数、噴射圧力でインジェクタの制御を行えるものである。排ガス中の汚染物質濃度は、testo 製 testo350 にて計測し、燃料消費率はキーエンス製 ss001 コリオリ流量計を用いた。エンジンのシリンダ筒内圧は、シチズンファイナデバイス製 CAS-15K 筒内圧力計を採用し、司測研チャージアンプ、デジタルオシロスコープを用いて計測した。小野測器のクランク角センサと

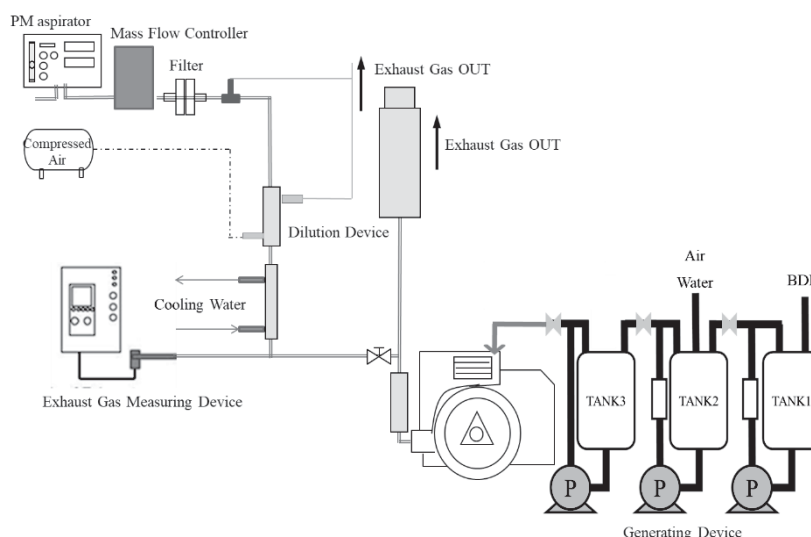


Fig. 3 Experimental Device

Table 1 Engine Spec

Name	RF-CDT	Max Power	63.2kw/3500rpm
Engine System	Direct-injection Four-stroke	Max Torque	178N・m/2000rpm
Cylinder Number	4	Displacement	1998cc
Bore×Stroke	86mm×86mm	Injector System	Common Rail
Compression Ratio	16.7		

Table 2 ECS Spec

Name	Engine Control System	After Injection	MI~40°
Pilot Injection	40°~MI	Rail Pressure	30MPa~160MPa
Main Injection	ATDC-40° ~40°	Pilot Injection Time	200μs~600μs
Pilot Injection	40°~MI		

同期し、YOKOGAWA 製燃焼解析システムにより、シリンダ筒内圧力及び熱発生率を解析した。実験条件は、回転数が2000rpm、図示平均有効圧が0.87MPa（動力計負荷率50%、機械効率87%）、噴射制御が ATDC-3°, -24° の多段噴射で固定した。EGR 率は 0 %、コモンレール圧力は100MPa とする。

気液混合燃料の生成は、燃料 5 L に対し空気を1.0L/min 混入し、圧力が0.6MPa、攪拌時間が10min の条件とした。攪拌装置は、加圧溶解攪拌型ミキサを採用した。燃料生成後の性状分析は、Malvern 製 Nanosight LM20 を採用し、燃料油中の粒子径及び粒子個数を計測した。水エマルジョン燃料の生成は、BDF に対して加水率10%および20%とし、圧力が0.5MPa、攪拌時間が 5 min の条件とした。攪拌装置は、気液混合燃料と同様である。燃料生成後の性状分析は顕微鏡にて粒径を測定した。これは、松電舎製 E 8 T 2 を用い、接眼レンズ10倍、対物レンズ100倍、すなわち1000倍で計測した。この画像データを用いて、旭化成エンジニアリング製A像くんにより粒径分析を行う。

3. 実験結果

3・1 BDF—気液混合燃料および水エマルジョン燃料の性状

図 4 に気液混合燃料の性状を示す。(a)が軽油、(b)が気液混合燃料である。軽油における粒径分布をみると 1 μm にピークが出ており、燃料油中に含まれる不純物等が含まれていることが分かる。気液混合燃料の粒径分布は、100nm 付近にピークが確認でき、軽油と比較するとナノ領域の気泡が大量に混入していることがわかる。図 5 に(a)BDF および(b) BDF—水エマルジョン燃料の顕微鏡画像データを示す。画像からも分かるように燃料油中に微細気泡が混入していることが見て取れる。また、混入している微細気泡はほぼ均一なサイズであることから、BDF による水エマルジョン燃料の生成に成功したものと考えられる。

3・2 燃焼結果—気液混合燃料

図 6 (a)にシリンダ筒内圧力および熱発生率の実験結果を示す。蒸留 BDF 及び気液混合燃料は、軽油と同様にシリンダ筒内圧が緩やかな曲線を示しており、正常な燃焼が確認できた。しかしながら、筒内圧が減少していることから燃焼性の悪化（燃費の悪化）が考えられる。熱発生率については、パイロット噴射では減少しているが、メイン噴射ではわずかに上昇していることが確認できる。

図 6 (b)に排ガス中汚染物質濃度の実験結果を示す。BDF—気液混合燃料と BDF 単体を比較すると、BDF に比べ NO_x 濃度が約3.9%低減、燃料消費率が約2.6%改善された。また BDF—気液混合燃料と軽油を比較すると、軽油に比べ NO_x 濃度が約0.59%低減、燃料消費率が約11.8%悪化となった。燃料消費率については、軽油に比べ改善することができなかったが、NO_x 濃度は気液混合燃料化することで軽油と同等の排出量まで低減することが可能であった。

3・3 燃焼結果—水エマルジョン燃料

図 7 (a)にシリンダ筒内圧力および熱発生率の実験結果を示す。シリンダ筒内圧力は、気液混合燃料と同様に正常な燃焼が確認できた。また、蒸留 BDF を水エマルジョン化することで着火遅れを確認することができた。爆発後の燃焼も

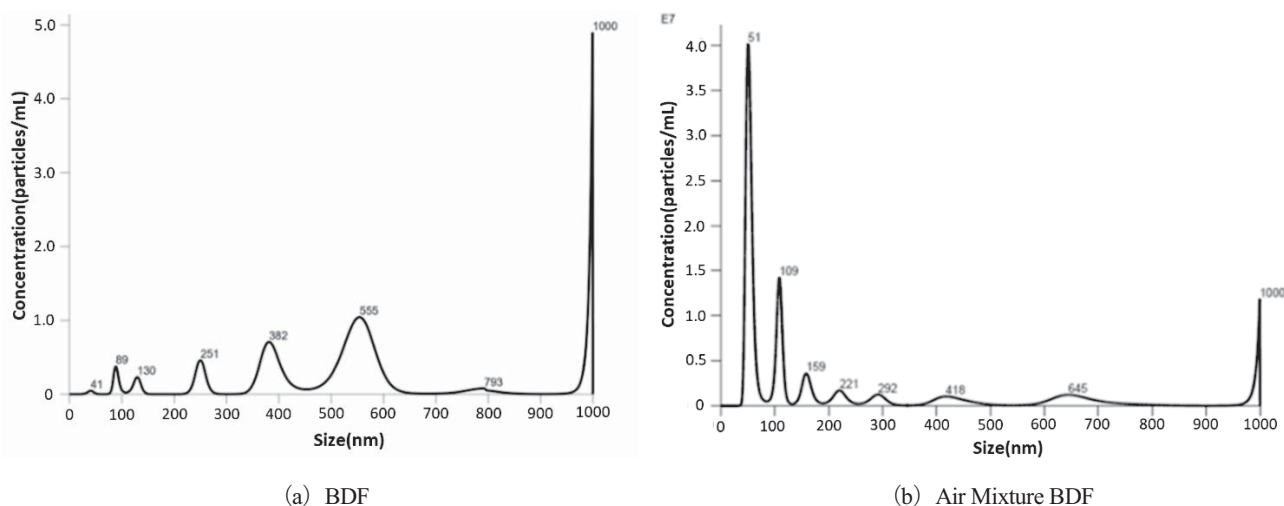
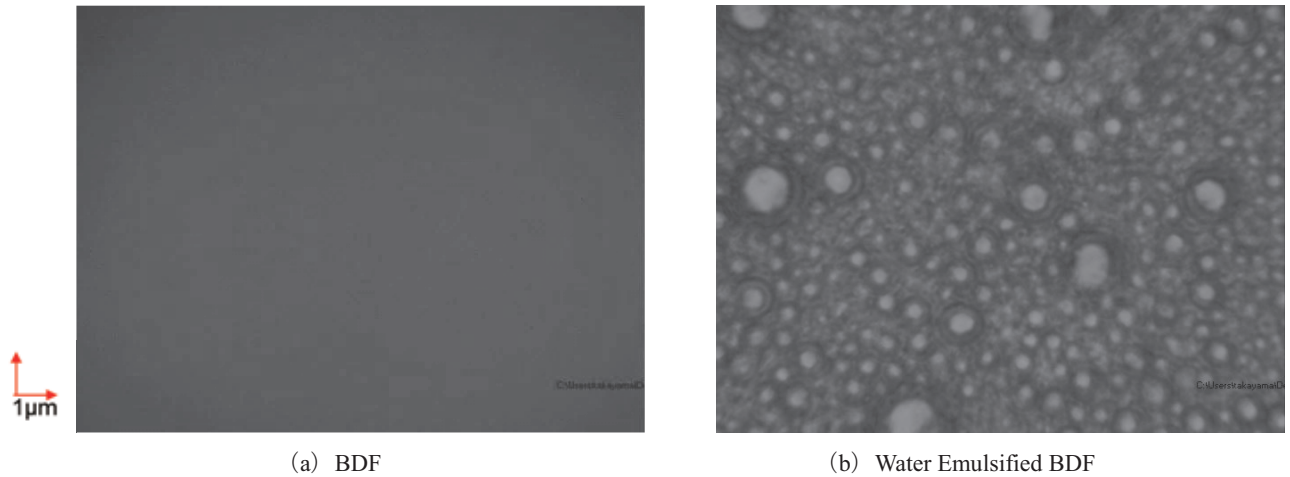


Fig. 4 Properties of Air Mixture Fuel

軽油と比較すると短期間化されていることから、エマルジョン燃料の優位性を得ることができた。熱発生率については、軽油と比較するとパイロット噴射時に増加し、メイン噴射時に減少していることが分かる。

図 7 (b) に排ガス中汚染物質濃度の実験結果を示す。BDF-水エマルジョン燃料と BDF 単体を比較すると、BDF に比べ加水率10%の場合 NO_x 濃度が約38.5%低減、燃料消費率が約1.5%悪化、加水率20%の場合 NO_x 濃度が約57%低減、燃料消費率が約12.7%改善された。また BDF-水エマルジョン燃料と軽油を比較すると、軽油に比べ加水率10%



(a) BDF

(b) Water Emulsified BDF

Fig. 5 Properties of Water Emulsified BDF

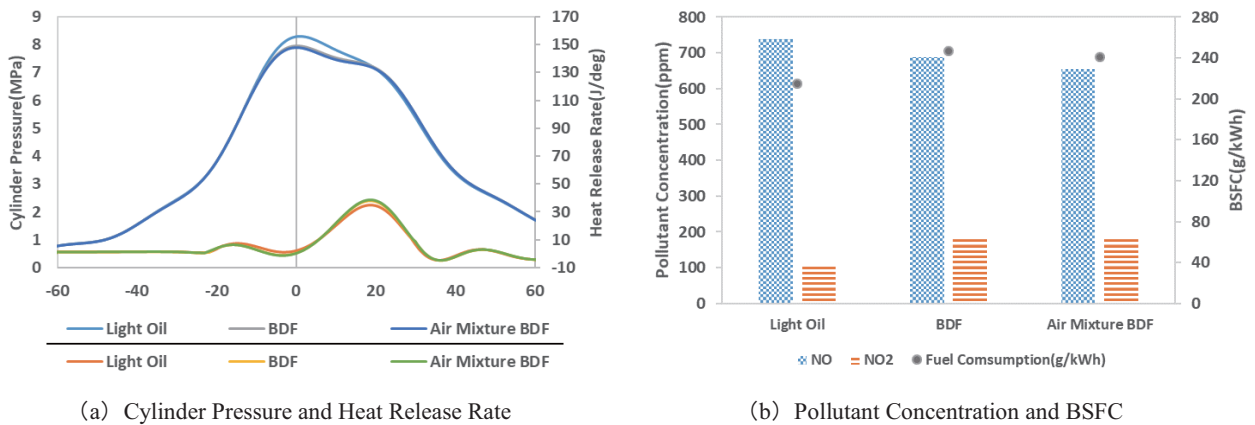


Fig. 6 Air Mixture BDF

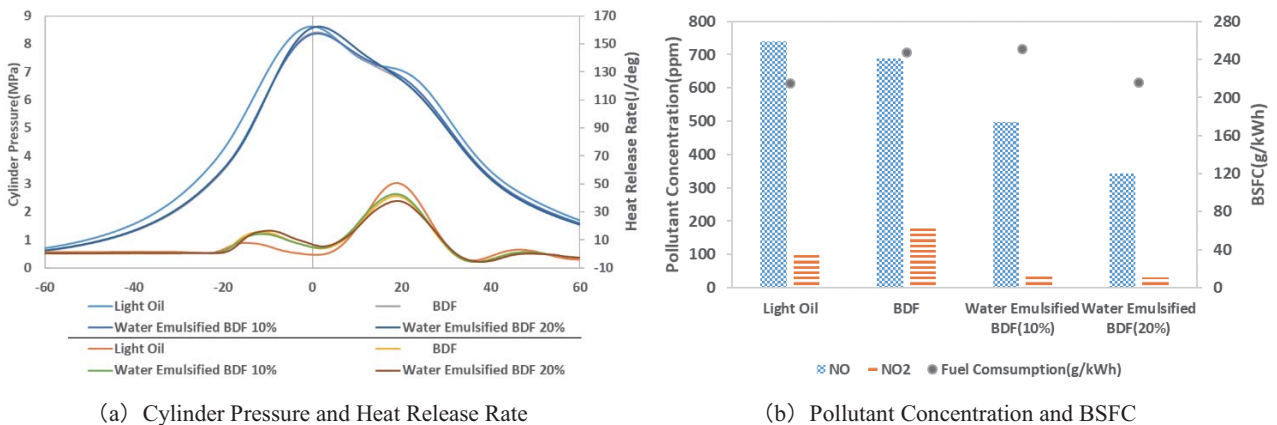


Fig. 7 Water Emulsified BDF

の場合 NO_x 濃度が約36.4%低減、燃料消費率が約16.5%悪化、加水率20%の場合 NO_x 濃度が約55.5%低減、燃料消費率がほぼ同等となった。加水率10%に比べ20%では NO_x 濃度および燃料消費率が大きく低減、改善されたことから水エマルジョンによる燃焼性の向上が確認できる。また、気液混合燃料に比べ NO_x 濃度の低減効果が大きく、燃料消費率も軽油と同等の結果を得ることができた。

4. 考 察

BDF をコモンレールに適合できたのは、蒸留処理を行うことで燃料の性状を飛躍的に向上できたからだと推測する。蒸留 BDF を気液混合燃料化することで、軽油と同等まで NO_x 濃度を低減することができたのは、燃料中の微細気泡が膨張する過程で着火遅れが生じ、また燃焼室で燃料が微細化されることで燃焼性が向上したからだと推測する。燃料消費率は、蒸留 BDF を気液混合燃料とすることで燃料消費率を改善できていることから気液混合燃料の優位性が得られたものといえる。

蒸留 BDF-水エマルジョン燃料とすることで、軽油と同等の燃焼が可能である。これは蒸留 BDF を水エマルジョン化することで燃料油中に起因するラジカルやイオンにより、炭化水素系の物質変換が活発となることも要因の一つであると考えられる。これらにより燃焼性が飛躍的に向上したものと推測する。また、水エマルジョン燃料化することで蒸留 BDF よりも約12.7%燃費が改善でき、蒸留のコスト補填が可能である。

5. 結 語

1. 蒸留 BDF によるディーゼルエンジンの燃焼に成功した。
2. 蒸留 BDF-気液混合燃料の生成に成功した。
3. 気液混合燃料とすることで、NO_x 濃度を軽油並みに低減することが可能である。
4. 蒸留 BDF は、シリンダ筒内圧が緩やかな曲線を描けており、最適な燃焼を行うことが可能である。
5. 蒸留 BDF-水エマルジョン燃料は、加水率20%の場合 BDF と比較して、NO_x の大幅な低減と燃料消費率の改善を達成できた。
6. 水エマルジョン燃料とすることで蒸留 BDF よりも約12.7%燃費が向上でき、蒸留のコスト補填が可能である。

文 献

- (1) 森雄一, “自動車における排出ガス規制動向と計測技術について”, 日本燃焼学会誌, Vol. 58, No. 184 (2016), pp. 65-72.
- (2) 岡田正史, “バイオディーゼル燃料の製造方法と利用の現状”, 日本マリンエンジニアリング学会誌, Vol. 47, No. 1 (2012), pp. 45-50.
- (3) 田中泰, 永田耕治, “ディーゼルエンジン用1800bar コモンレールシステムの開発”, 自動車技術会誌, Vol. 58, No. 4 (2004), pp. 19-24.
- (4) 北崎真人, “コージェネレーション機関におけるバイオディーゼル燃料の使用 -廃食油バイオディーゼルの利用技術開発”, 日本マリンエンジニアリング学会誌, Vol. 47, No. 1 (2012), pp. 71-76.
- (5) 吉本康文, 木下英二, “植物油燃料のエンジン適用技術-バイオディーゼル燃料について”, 日本機械学会誌, Vol. 51, No. 156 (2009), pp121-128.
- (6) 中武靖仁, “超微細気泡混入軽油によるディーゼル機関の環境負荷低減”, 日本マリンエンジニアリング学会誌, Vol. 46, No. 6 (2011), pp75-80.
- (7) 島田一孝, “水技術(水エマルジョン, 水噴射, 吸気加湿等)による NO_x 低減技術”, マリンエンジニアリング学会誌, Vol. 46, No. 6 (2011), pp831-836.
- (8) 寺坂宏一, 水室昭三, 安藤景太, 秦隆志, “ファインバブル入門” (2016), pp133-139, 日刊工業出版.
- (9) 堤裕昭, “沿岸海面養殖漁業へのマイクロバブル発生装置の利用と将来的展望”, 日本海水学会誌, Vol. 64, No. 1(2010), pp31-38.
- (10) 小木曾 凡芳, 大石 貴行, 鈴木 祥広, “マイクロバブルによるナイルデルタの農業用排水の水質浄化”, 環境技術学会誌, Vol. 44, No. 4 (2015), pp220-227.

〔論文〕

低融点合金の濡れ性と液体ナトリウムへの適応

内木場凌太*¹・澁谷 秀雄*¹・小林 洋平*²・斉藤 淳一*³

Wettability of low-melting alloys and its application to liquid sodium

Ryota UCHIKOBA*¹, Hideo SHIBUTANI*¹, Yohei KOBAYASHI*² and Jun-ichi SAITO*³

Abstract

Liquid sodium has a good heat transfer characteristic, making it a favorable material in the practical development of heat transfer media. The demand for liquid sodium to address various energy problems, such as high-performance storage batteries for renewable energy and high-efficiency production technologies for next generation energy saving devices, has recently grown, with the wettability of liquid sodium being an important characteristic for developing these innovative technologies. However, the chemical activation of liquid sodium to oxide and hygroscopic moisture is very sensitive, requiring special equipment and know-how to ensure safe handling. Therefore, this study is designed to obtain a basic knowledge of the wettability characteristic of liquid sodium, the wettability of low-melting alloys, and its application to liquid sodium. Here the wettability of a low-melting alloy onto a brass substrate exhibits a repellent effect, such that the contact angle increases with the surface roughness, yielding a specific roughness with a high contact angle. This trend between the contact angle and surface roughness is also observed in the heat transfer from liquid sodium to stainless steel.

Key Words : Wettability, low-melting alloy, liquid sodium, surface roughness, energy problem

1. 緒 言

液体ナトリウムやカリウムは優れた伝熱流動性を有することから、熱媒体技術への実用を目指した研究開発が長年行われてきた^{(1),(2)}。これらの成果を基に、発電をしながら消費した以上の燃料を新たに生成できる「夢の原子炉」と期待された高速増殖炉の冷却材として長年にわたり研究開発が進められてきたが、実用化に向けた原型炉である「もんじゅ」は1995年にナトリウム漏洩火災事故を起こし、2016年に廃炉が決定した。このため、現在は廃炉に必要な技術開発が急務である。

一方、2011年の東日本大震災以降、エネルギー問題を解決するべく液体金属を用いた革新的技術の研究開発が行われている。例えば、環境に優しい再生可能エネルギーの大量導入に向けて余剰電力備蓄にリチウムやナトリウムを電解質とするアルカリ金属2次電池の研究開発が進められている⁽³⁾。また、温室効果ガスCO₂排出量削減に向けて次世代省電力パワーデバイスとして窒化ガリウム系半導体が有望視されており⁽⁴⁾、近年ではこれの低欠陥・大口径基板製造技術としてナトリウムフラックスを使った単結晶育成技術の研究開発が進められている⁽⁵⁾。

液体ナトリウムは機器表面との界面での熱の移動や電気の伝導を利用する機会が多く、性能向上には接触状態を示す「濡れ性」が非常に重要な因子の一つである。更に機器の保守や廃棄といった技術においても、安全性向上や作業効率向上のために「濡れ性」を理解しておくことが必要である。これまでに液体ナトリウムの表面張力に関する研究は多数見られる⁽⁶⁾が、接触角に関する研究はE.N.Hodkinら⁽⁷⁾やB.Longsonら⁽⁸⁾による報告程度しか見当たらない上、これらは40～50年前の研究である。この間、酸素や水素といったナトリウム中の不純物を10ppm程度まで純化できるなど、純化技術も進化している。

現在の日本が抱えるエネルギー問題を解決していく上で液体ナトリウムの利用は不可欠であり、最新の技術で濡れ性

*¹ 機械システム工学科, *² 舞鶴工業高等専門学校

*³ 日本原子力研究開発機構,
令和元年10月31日受理

を理解するとともに用途に応じて濡れ性を制御することができれば、機器設計の改善による安全性向上、高効率化、低コスト化が可能であると考えられる。

2. 研究の目的

ナトリウムの融点は約98℃と比較的低い温度だが、酸素や湿分とは化学的に活性であるため、大気中では酸化反応や水との反応により潮解を生じる。また、それらの反応により、特性が変化する。このため、液体ナトリウムを安全に取り扱うには設備だけでなくノウハウも必要であり、これが可能な研究機関は限定的である。

そこで本研究では、液体ナトリウムの濡れ性の理解に必要な基礎的知見をより簡易に得ることを目的として、取扱いが容易な低融点金属の濡れ性を調査し、液体ナトリウムへの適応の可能性について検討した。

3. 実験方法

本研究では、低融点金属として融点が333KであるBi系共晶型低融点合金：(株)大阪アサヒメタル工場製U-60[®]を用いて、表面粗さの異なる基板上での静的な濡れ性を調査した。

3・1 予備実験

本実験を実施するに際して、予備実験として、同一基板上で異なる質量のU-60を大気雰囲気下で加熱し、液滴を側面より観察した。その結果を図1に示す。



Fig.1 Appearance of droplets in atmosphere.

図中の左から右へ向かうにつれてU-60の質量は増えていく。これより、半球形状を示したのは左のもののみで、真ん中と右のものは扁平していることがわかる。これは、自重の影響が顕著に表れていると考えられる。また、液滴形状が左右対称でないことや表面が黒く変色するといったことも見られた。これは、大気によって液滴表面が冷却されて薄膜を形成したことや酸化したことが原因だと考えられる。これらの結果より、大気雰囲気中での実験は困難だと判断し、水中で実験を行うこととした。

3・2 実験装置

図2に水中での濡れ性測定に用いた実験装置を示す。ヒータの上に設置した水槽の内部に表面粗さの異なる基板をセットする。そして、約0.1gに切断した固体状態のU-60を基板の上に置いた後、約363Kに加熱した水を水槽に静かに注ぐ。そして、基板付近にセットした熱電対で水温の変化を測定しながら、基板と同じ高さに設置したカメラで溶解しているU-60の様子を側面から撮影した。なお、実験中は常にヒータで水槽を加熱することにより、水温の低下速度ができるだけ緩やかになるようにした。



Fig.2 Experimental setup of wettability measurements in hot water

3・3 基板の作製方法

本研究では基板の表面粗さを切削加工によって変化させるため、基板材料には切削特性に優れる黄銅を用いた。液体ナトリウムが用いられる機器の材料にはステンレスが用いられているが、実際の機器の表面粗さについては不明である。一般的に市販されているステンレス配管内の面粗度は $4.5\mu\text{mRz}$ 程度⁽¹⁰⁾であることから、本研究ではこの値を基準として $2.0\mu\text{mRz}\sim 8.0\mu\text{mRz}$ の範囲で粗い面と滑らかな面を持つ基板を数種類用意した。

基板の加工は（株）静岡鐵工所製超小型マシニングセンタ DT-30を用い、工具を1方向に送って切削した後、それとは直角方向に工具を一定ピッチで移動させて再度切削するプレーナー加工で黄銅試料の上面を全面切削した。工具は $\phi 6\text{mm}$ ボールエンドミル、切込量 0.1mm 一定、送りピッチを（1）式で示される理論表面粗さ⁽¹¹⁾より算出される値を用いて基板の表面粗さを変化させた。これを5回繰り返して基板上部を合計 0.5mm 切削した。

$$\text{Rz}_{\text{th}} = \frac{f^2}{8 \times r} \times 1000 \quad (1)$$

Rz_{th} ：理論表面粗さ μm

f ：送りピッチ mm

r ：工具ノーズ半径 mm

表1に本研究で設定した①～⑤の理論表面粗さ Rz_{th} と加工後に測定した最大高さ粗さ Rz_{meas} を示す。理論値と実測値との間に若干の誤差は見られるが、設定した範囲内に収まっていることがわかる。

Table 1 Theoretical surface roughness and measurement surface roughness

	①	②	③	④	⑤
Theoretical surface roughness $\text{Rz}_{\text{th}} \mu\text{m}$	0.67	3.27	6.34	8.44	10.42
Measurements surface roughness $\text{Rz}_{\text{meas}} \mu\text{m}$	2.73	3.52	4.23	5.97	7.20

4. 実験結果

図3に実験中の液滴の一例を示す。全ての実験において図に示すようなほぼ左右対称の液滴が見られた。

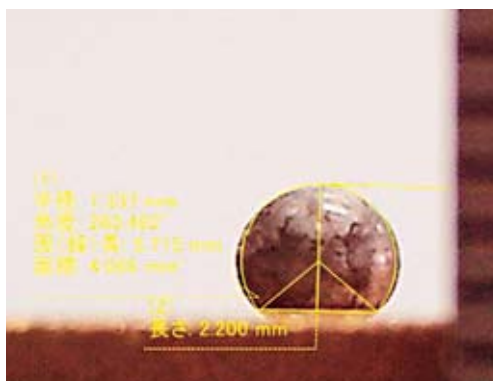


Fig.3 Appearance of droplet in water

図4に接触角に及ぼす表面粗さの影響を示す。表面粗さが①から②の粗さになるとき、すべての水温で接触角が急激に上昇している。そこから表面粗さが粗くなるにつれ、348Kと343Kと338Kの水温時はU字を描くように接触角が変化し、333Kの時は接触角が減少方向に変化している。その中でも一番水温が高い348Kでは、その変化が顕著に表れている。

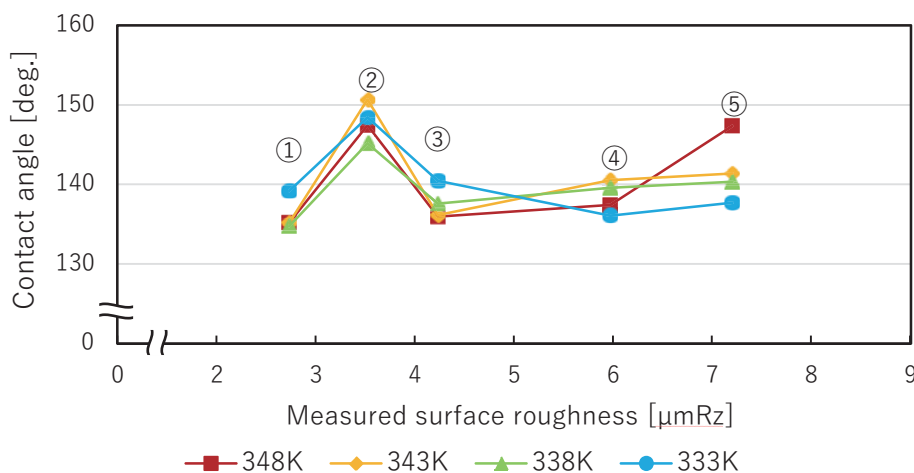


Fig.4 Effect of surface roughness on the contact angle of U-60

5. 考 察

5・1 U-60の濡れ性に及ぼす表面粗さの影響

濡れ性と表面粗さの関係を示すものとして、(2)式で示される Wenzel の式⁽¹²⁾がある。これは、平滑面において接触角 $\theta > 90^\circ$ である場合、表面が粗くなるにつれて接触角は大きくなる。反対に接触角 $\theta < 90^\circ$ の場合は表面が粗くなるにつれて接触角が小さくなることを示している。粗さなどによる微小な凹凸がある面では、平滑面の場合に比べて実質的な表面積が大きいため、濡れに伴う表面エネルギーの変化が強調される。すなわち、粗面にすると撥水面はより撥水的に、疎水面はより疎水的に作用することを意味している。

本実験では、図4の②を除くと、粗さが大きくなると接触角が大きくなる傾向を示しており、黄銅基板に対してU-60は撥水面として作用していると考えられる。

$$\cos\theta' = \frac{r(\gamma_{sv}-\gamma_{sl})}{\gamma_{lv}} = r\cos\theta \quad (2)$$

θ : 平滑面での接触角 deg.

θ' : 粗い面での接触角 deg.

r : 見かけの表面積に対する実際の表面積の比 (1以上の値をとる)

γ_{sv} : 個体—気体間の単位面積当たりの自由エネルギー J/m²

γ_{sl} : 個体—液体間の単位面積当たりの自由エネルギー J/m²

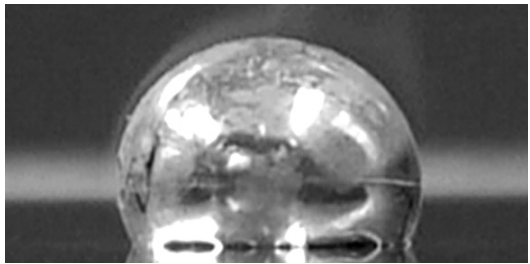
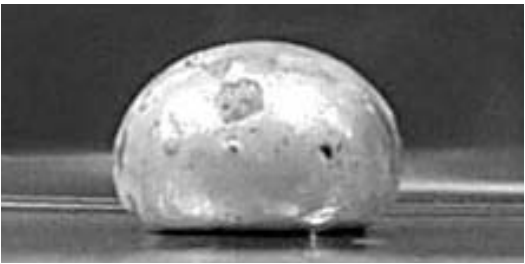
γ_{lv} : 液体—気体間の単位面積当たりの自由エネルギー J/m²

一方, ①から②, ②から③の間で粗さの変化量はわずか0.8 μ mRz程度にも関わらず, 接触角は10°~15°も変化する特異な現象が見られた. 表面粗さは機械部品の気密・密着特性, 摩擦・摩耗・潤滑特性, 強度特性などに影響することは知られている. この特異現象を利用すれば, それらをほとんど変化させることなく, 濡れ性のみを大きく変化させることが可能となるかもしれない. 現時点でこの特異現象の原因はわかっておらず, 今後更なる調査が必要である.

5・2 液体ナトリウムの濡れ性との相関

表2にステンレス基板に対する液体ナトリウムの接触角⁽¹³⁾を示す.

Table 2 Contact angle of liquid sodium to stainless steel

		
Surface condition	Smooth surface with oxide	Roughness surface with oxide
Contact angle	115 deg.	135 deg.

ステンレス基板に対して液体ナトリウムは定性的ではあるが撥水面として作用することがわかっている. これは, 本実験で行った黄銅基板に対するU-60と同様の傾向を示しており, 液体ナトリウムの濡れ性を簡易的には低融点合金U-60を用いた黄銅基板で評価できる可能性を有していると考えられる. 今後, 表面粗さの異なるステンレス基板を用いた液体ナトリウムの濡れ性実験を行い, この相関を定量的に調査する必要がある.

6. 結 語

本研究では, 液体ナトリウムの濡れ性の理解に必要な基礎的知見をより簡易に得ることを目的として, 融点が333Kの低融点金属を用いて, 水中で表面粗さの異なる黄銅基板に対する接触角を測定し, 静的濡れ性を調査した. また, その結果とステンレス基板に対する液体ナトリウムの濡れ性と比較し, その相関を検討した. その結果, 以下のことがわかった.

1. 黄銅基板は撥水性を示し, 表面粗さが3.52mmRzの場合を除き, Wenzelの式に従い, 粗さの値が大きくなるにつれてより撥水的になる.
2. 表面粗さが3.52mmRzの場合のみ接触角が急激に大きくなる特異な現象が見られた.
3. 上記の特異現象が見られた点付近では表面粗さがわずか0.8 μ mRz変化しただけで, 接触角は10°~15°も変化した. 一般的に, 表面粗さは機械部品の気密・密着特性, 摩擦・摩耗・潤滑特性, 強度特性などに影響することは知られている. この特異現象を利用すれば, それらをほとんど変化させることなく, 濡れ性のみ大きく変化させることが可能になるかもしれない. 今後更なる詳細な調査が必要である.

文 献

- (1) 鈴木正, 鉄と鋼, 11, 1991-2002 (1989)
- (2) 鈴木正, 野田哲治, 防食技術, 24, 593-604 (1975)
- (3) 藪内直明, 電子情報通信学会大会講演論文集, Vol. 2018 総合大会 Page.ROMBUNNO.CT-2-2 (2018. 03. 06)
- (4) Yamane et al, Chem Master, Vol.9 No.2 Page.413-416 (1997.02)
- (5) 低炭素社会の実現に向けた技術および経済・社会の定量的シナリオに基づくイノベーション政策立案のための提案書・技術開発編・GaN系半導体デバイスの技術開発課題とその新しい応用の展望 (Vol. 2), <https://www.jst.go.jp/lcs/pdf/fy2017-pp-11.pdf>, (2018. 02)
- (6) 例えば, J.H.Goldman, Surface tension of sodium, Journal of Nuclear Materials, 126, pp.86-88 (1984).
- (7) E.N.Hodkin, D.A.Mortimer et al., The wetting of some ferrous materials by sodium, Liquid Alkali Metals, pp.167-170, BNES (1973).
- (8) B.Longson and J.Prescott, Some experiment on the wetting of stainless steel, nickel and iron in liquid sodium, Liquid Alkali Metals, pp.171-176, BNES (1973).
- (9) <https://www.osaka-asahi.com/toriatsukaisyouhin/t1.html>, 2019.10.30
- (10) 萬商株式会社『各種資料』萬商株式会社, p. 96.
- (11) 平井三友 他, 機械工作法, pp. 87-89, コロナ社, 2013
- (12) 中島章, 化学の要点シリーズ12 固体表面の濡れ性—超親水性から超撥水性まで—, p. 55-p. 57, 共立出版株式会社, (2014)
- (13) 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構, 夏季学生インターンシップ報告書, 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構, p. 1-p. 2, (2018)