

### 小型ディーゼル機関の燃焼特性に及ぼす燃料 性状の影響：特にアルコールエマルジョン 燃料について

IMAI, Hiroki / 今井, 広貴

---

(出版者 / Publisher)

法政大学大学院理工学研究科

(雑誌名 / Journal or Publication Title)

法政大学大学院紀要. 理工学・工学研究科編

(巻 / Volume)

61

(開始ページ / Start Page)

1

(終了ページ / End Page)

5

(発行年 / Year)

2020-03-24

(URL)

<https://doi.org/10.15002/00022739>

# 小型ディーゼル機関の燃焼特性に及ぼす 燃料性状の影響 —特にアルコールエマルジョン燃料について—

EFFECTS OF FUEL PROPERTIES ON COMBUSTION CHARACTERISTICS  
FOR SMALL DIESEL ENGINE  
—ESPECIALLY ON ALCOHOL EMULSION FUEL—

今井広貴  
Hiroki IMAI  
指導教員 川上忠重

法政大学大学院理工学研究科機械工学専攻修士課程

Nowadays, biomass fuels become a subject which is extensively concerned from the view points of the aggravation of the greenhouse effect, acid rain, other environmental problems and the depletion of oil resources. From the point of this view, this experiment has been carried out to examine the influence of combustion characteristics and exhaust emissions for small diesel engine by using six types of fuel, which consist of different pure ethanol and butanol volume percentages (10vol.%, 20vol.%), with 3 vol.% surfactant at 20vol.% and 10vol.% aqueous alcohol (ethanol: 65 vol.% or butanol:65vol%, water: 35vol.%). The combustion behaviors, such as burning pressures, heat release rates and emissions (NO<sub>x</sub>, Smoke, HC) and fuel consumption are observed. The main conclusions are as follows: 1) NO<sub>x</sub> and Smoke can be reduced simultaneously by using diesel fuel-alcohol mixed fuel and water emulsion fuel. 2) HC emission decreased by using diesel - butanol mixed water emulsion fuel. 3) The maximum heat release rate is increased by using diesel - alcohol mixed fuel and water emulsion fuel. 4) The heat release stability of diesel - butanol mixed fuel and water emulsion fuel are higher than that of ethanol addition fuels.

**Key Words:** heat engine, combustion analysis, alternative fuel, butanol, ethanol, emissions gas, fuel economy, heat release rate, emulsion fuel

## 1. 緒言

近年、大気汚染の発生は、人類と環境に著しい影響を及ぼしており、特にディーゼル車から排出される黒煙に含まれる微粒子(PM)が、肺や気管等への吸入により健康に害を及ぼすことが中国を始めとし問題視されている。また、排気ガス中に含まれるCO<sub>2</sub>は、地球温暖化やオゾン層破壊、酸性雨等の環境問題にも影響を与えることが知られており、世界では、マクロン政権下のフランスのニコラ・ユロ環境大臣が、2040年にガソリンエンジン、ディーゼルエンジンを搭載したクルマの販売を終了させるというプランを発表した。ただし、現行ではPHEVへのシフトには、インフラ整備を含めて多くの解決しなければならない課題も多く、化石燃料への依存は今後も継続することが予想され、その燃焼生成物の低減は課題の1つである。さらに、化石燃料の枯渇問題もあり、代替燃料としてバイオ燃料が注目されている。[1]著者らの先行研究において[2]、軽油にエタノール及び水を添加した場合、燃焼改善効果が確認された。そこで本研究では、軽油に他のアルコール系燃料で

あるブタノール及び水を添加した場合の小型ディーゼル機関の排気特性に及ぼすブタノール添加割合及び水の含水率等の影響について検討し[3]、さらにエタノール添加燃料との比較を行った。

## 2. 実験方法

### 2.1 実験装置及び測定方法

本実験に用いた供試機関はKIPOR社製KDE2.0Eディーゼルエンジン発電機である(Fig.1)。エンジンの諸元はTable 1に示す。実験の概略図はFig.2に示す。実験は通常燃料である2号軽油を使用し、供試機関を無負荷状態で十分に暖機運転を行い、その後、測定する燃料に切り替えて10分ほど運転し、各設定負荷に調整し測定を開始した。負荷の設定にはグリーンウッド社製遠赤外線ヒーターGEH-100Nを用いて出力を切り替えることで測定し、排気ガスの測定にはAVL社製Di-Com 4000を、スモークの測定には、株式会社イヤサカ製光透過式黒煙測定器オパン

メータ ALTAs - 5100D を使用した。各条件において 10 回ずつ測定を行った。燃料消費時間は、メスシリンダーを用いて、各負荷条件において測定し、測定は 5ml の燃料消費時間をストップウォッチと目視で 10 回行った。熱発生率の算出には、機関燃焼室壁に取りつけられたピエゾ型圧力変換器からの圧力履歴及びオムロン社製の EE - SX670 フォト・マイクロセンサで上死点位置がモニタリング出来るように設定し、これらのデータから P-θ 線図を図示することにより算出した。計算には、熱力学第一法則より導出した式(1)を用いた。排気ガス及び燃料消費時間、熱発生率の検討は、先と同様に算術平均値を用いた。

$$\frac{dQ}{d\theta} = \frac{V}{k-1} \frac{dP}{d\theta} - \frac{kPAr \sin \theta}{k-1} \left( 1 + \frac{\cos \theta}{\sqrt{\lambda^2 - \sin^2 \theta}} \right) \quad (1)$$

## 2. 2 混合燃料

Table 2 に、本研究で使用した燃料の燃料性状を示す。Table 3 には、作成した混合燃料の燃料性状を示す。エタノール添加率 10vol.% は E10 と示す。なお、エタノール添加率 20vol.% は混合促進のために 1-オクタノールを 3vol.% 添加し作成した。また、エマルジョン燃料については軽油とエタノールの混合燃料と蒸留水の混合を促すために乳化剤として、ソルビタンモノオレートを 3vol.% 添加し作成した。ブタノールエマルジョンについても同様である。また、エタノールエマルジョンであれば WEF(E) (Water Emulsion Fuel Ethanol) と示す。



Fig.1 KIPOR KDE2.0E

Table 2 Fuel property

Fuel property	Diesel	Ethanol	Butanol
Chemical equation	C <sub>n</sub> H <sub>2n+2</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> O
Cetane number	56	8	18
Lower heating value [MJ/kg]	43.1	26.8	33.1
Density [g/ml]	0.832	0.790	0.81
Boiling point [°C]	190~350	78	117
Latent heat of evaporation [kJ/kg]	250	840	585
Oxygen content [wt%]	0	34.8	21.6
Sulfur [wt%]	0.001	-	-

Table 1 Engine Specifications

Engine type	KM170F-A 4stroke diesel engine
Combustion system	Direct injection
Cooling system	air-cooling
Number of cylinder	1
Bore×Stroke	70mm×55mm
Displacement	0. 211L
Valve system	OHV
Compression ratio	20
Rated output	2. 5kW/3000rpm
Fuel type	Diesel

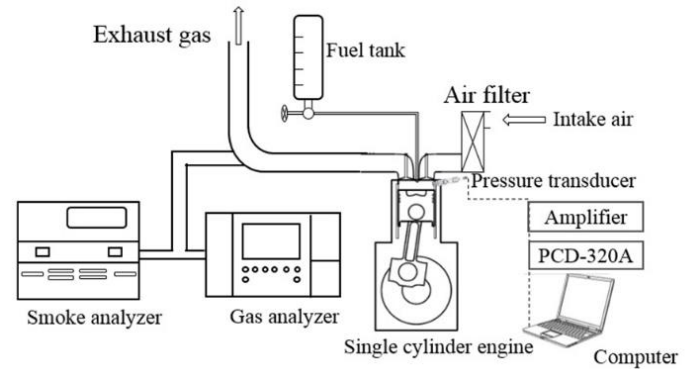


Fig.2 Experimental Device

混合燃料のベース燃料は軽油を用いて、アルコール燃料の添加率  $W$  は以下の式(2)のように定義する。

$$W[\%] = \frac{\text{Volume of Alcohol}}{\text{Volume of fuel}} \times 100 \quad (2)$$

Table 3 Blended fuel property

Test fuels	Diesel	E10	E20	WEF(E)	B10	B20	WEF(B)
Diesel [vol.%]	100	90	77	87	90	80	87
Ethanol [vol.%]	-	10	20	6.5	-	-	-
Butanol [vol.%]	-	-	-	-	10	20	6.5
Water [vol.%]	-	-	-	3.5	-	-	3.5
1-octanol [vol.%]	-	-	3	-	-	-	-
Sorbitan monooleate[vol.%]	-	-	-	3	-	-	3
Lower heating value[MJ/kg]	43.1	41.5	38.5	39.6	42.1	41.1	40.6
Cetane number	56.0	51.2	44.7	49.9	52.2	48.4	49.9
Oxygen content[wt.%]	0	3.5	7.0	2.3	2.2	4.3	1.4

### 3. 実験結果

#### 3.1 燃焼生成物について

Fig.3にNO<sub>x</sub>の排出量を示す. エタノール及びブタノールを添加した場合, 全負荷領域においてNO<sub>x</sub>の排出量は, 軽油単体と比較して減少している. これは, 各混合燃料の発熱量が軽油より低く, また, 気化潜熱に伴い, 火炎温度及び最高燃焼温度の減少により, サーマルNO<sub>x</sub>排出量が低下したと考えられる. また, 本装置は発電用であるため, 容積効率の低下も火炎温度の減少に起因していると考えられる. ブタノールの方が体積当たりの発熱量がエタノールと比べて30%程度高いため, 燃焼温度はブタノール混合燃料の方が増大し, そのため, NO<sub>x</sub>の排出量がエタノール混合燃料より多く排出したと考えられる. WEF(B)については全負荷領域においてNO<sub>x</sub>排出量が著しく低下している. これは各混合燃料の中でWEF(B)は, 酸素含有量が1番低いため, 窒素と反応する酸素量が減少したことに起因すると考えられる.

Fig.4にSmokeの排出量を示す. Smokeについては, 含酸素燃料であるアルコール系燃料を添加したことにより, 酸素不足で発生するSmokeが減少したため, Smokeの排出量が低下したと考えられる. さらに, 水エマルジョン燃料を用いることで, 燃料霧化の影響及び, ミクロ爆発による燃料の微粒化現象による, 液滴粒径の減少に伴う燃焼期間が短縮されたことにより, 他の燃料と比較して, 酸化反応が著しく促進し, Smokeの排出量が減少したと考えられる. また, WEF(B)はゼロレベルのSmokeの排出量が実現されている. WEF(B)を用いた場合には, 燃料中の酸素含有率は減少するが, 水添加により酸化反応が促進されたためと考えられるが, 水添加割合の影響について検討が必要である. ここで, B20は, B10よりも酸素含有率が高いにもかかわらず低負荷領域において, B10と比較して増加している. これは, Fig.5のHCの排出量が低負荷時に増加し

ていることおよび, Fig.7の熱発生率がB10と比較して低下していることに起因する. 以上より, NO<sub>x</sub>及びSmokeの排出量は, アルコール添加及び水添加により著しく低減することが可能である[4].

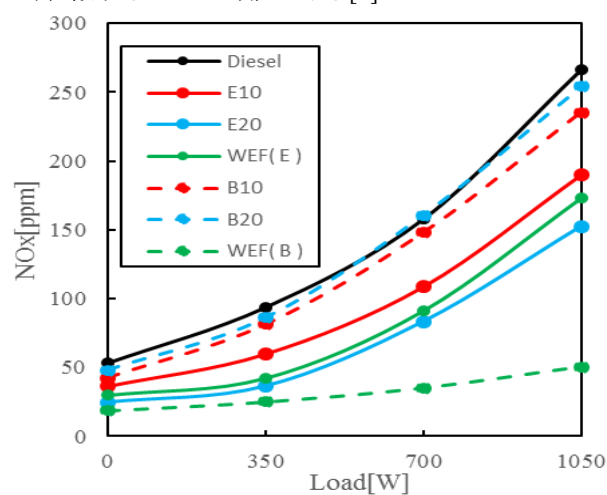
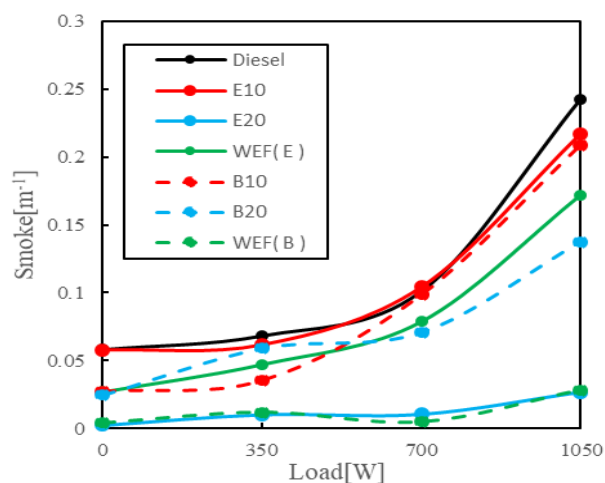
Fig.3 NO<sub>x</sub> emission

Fig.4 Smoke emission

Fig.5にHCの排出量を示す。HCについては、各負荷条件において軽油と比較して、HC排出量の増加が確認された。これはアルコールを添加したことにより発熱量が低下し、燃焼温度が減少したため不完全燃焼割合が増加したためと考えられる。ここで、WEF(E)を用いた場合、全負荷領域において、HCの排出量は他の混合燃料と比較して増加している、これは、燃料の発熱量がE20を除き低下したことにより、HCの排出量が増加していると考えられる。E20より排出量が増加した要因としては、WEF(E)は、水の混合により、他の燃料と比較して、炭素と反応する水素が増加したことにより、HCの排出量が増大したと考えられる。WEF(B)は、上記の要因も含め、ほぼ上死点で燃焼が開始され、燃焼効率及び容積効率の増加により、HCの排出量が各混合燃料と比較して低減したと考えられるが、僅かな含酸素成分の違いにより、HC濃度の低減が実現されており、より詳細な検討が必要である。

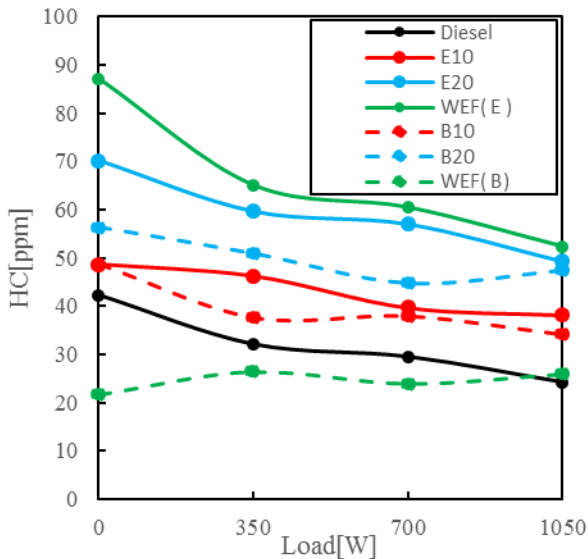


Fig.5 HC emission

### 3. 2 熱発生率について

Fig.6にエタノール混合燃料を燃焼させた際のクランクアングル毎の熱発生率を示す。エタノール混合燃料を用いることでセタン価の低下による着火遅れ期間が増大したことにより予混合化が促進され、それに伴って燃焼期間が一部、短縮したことにより、軽油と比較して最大熱発生率が増大したと考えられる。さらに、エマルジョン燃料を用いた場合、燃料の微粒化及びマイクロ爆発による燃焼改善効果により、軽油単体及びE10と比較して最大熱発生率が上昇したと考えられる。ここで、高負荷領域においては、E20及びWEF(E)燃料は、着火遅れは同程度であるが、最大熱発生率はWEF(E)の方が増加している。これは、エタノール添加及び水添加に伴い、燃料粘度の低下から可燃混合気の形成が促進されたためと考えられる。また、セタン価の低下による着火遅れ期間の増大により、軽油単体及びE20と比べ、

より混合が促進され、最大熱発生率が増大したと考えられる。一方、E20の低負荷領域では着火遅れ期間の増加に伴い予混合期間が増大し、また、酸素含有率が高いため、最大熱発生率がWEF(E)と同程度となっている。これは、先の煤の発生が著しく低減していることに起因すると考えられるが、検討課題の1つである。

Fig.7にブタノール混合燃料を燃焼させた際のクランクアングル毎の熱発生率を示す。ブタノールについてはエタノールと比べて燃焼期間が短縮されることで、熱損失割合が減少し、そのため、無負荷及び高負荷条件において、最大熱発生率がほぼ一定となっている。これは、エタノール添加よりもブタノール添加の方が、本研究範囲内では熱発生に関する安定性が高いことを示唆している。これは、先と同様にブタノールの発熱量がエタノールよりも高いことに起因するものと考えられる。

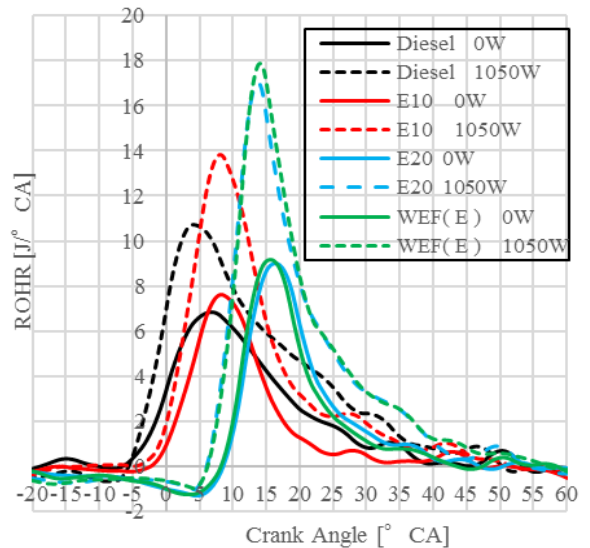


Fig.6 Rate of heat release (Ethanol)

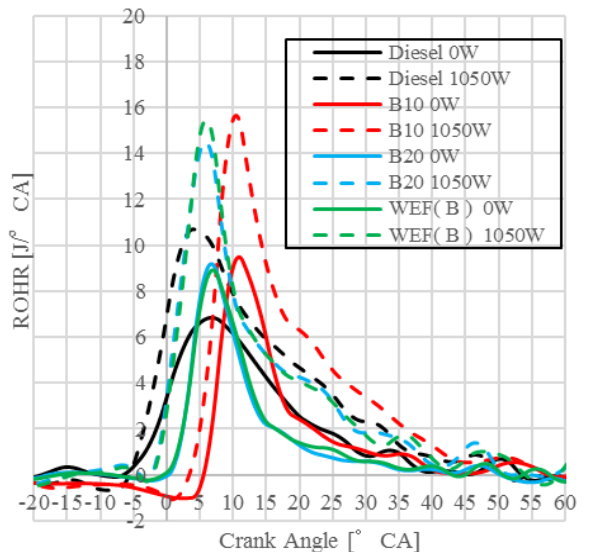


Fig.7 Rate of heat release (Butanol)

### 3. 3 燃料消費率について

Fig.8, 9 にアルコール添加及びエマルジョン化による燃料消費率に及ぼす影響を検討するために、各混合燃料の燃料消費率を、それぞれ示す。この図から明らかなように、エタノールおよびブタノール添加においては、低負荷時(350W)を除いて、軽油と比較して著しい燃料消費率の増加は確認されていない。すなわち、小型ディーゼル機関を用いた場合には、中・高負荷領域においてアルコール添加による実用性の可能性が確認された。さらに、両燃料のエマルジョン化燃料に着目すると、ほぼ、軽油と同程度の燃料消費率である。今回の実験では、僅かな水添加の影響について考察を行ったが、より、高い含水率でのエマルジョン燃料についても、詳細に検討を行う予定である。

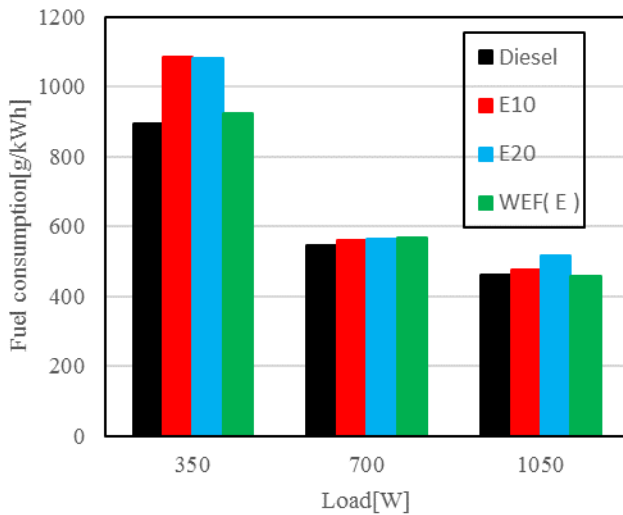


Fig.8 Fuel consumption (Ethanol)

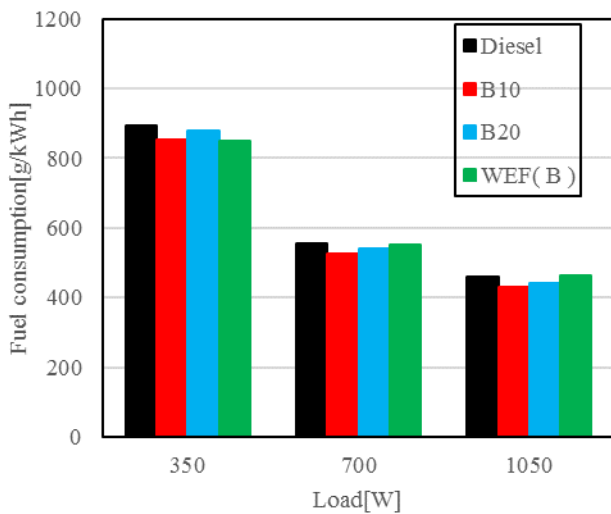


Fig.9 Fuel consumption (Butanol)

### 4. 結言

本研究では、軽油にアルコール燃料を添加および水エマルジョン化した場合の小型ディーゼル機関の燃焼特性に及ぼすアルコール添加割合及び水の含水率等の影響について検討を行った。以下に結果を示す。

1. 軽油-アルコール混合燃料及び水エマルジョン燃料を用いることにより、NO<sub>x</sub> 及び Smoke の同時低減が可能である。
2. 軽油-ブタノール水エマルジョン燃料を用いることにより、HC 排出量は減少する。
3. 軽油-アルコール混合燃料及び水エマルジョン燃料を用いることにより、最大熱発生率は増加する。
4. 軽油-ブタノール混合燃料及び水エマルジョン燃料の熱発生安定性は、エタノールを添加した場合よりも増加する。

### 謝辞

本研究を行うにあたり、終始ご指導、ご鞭撻していただきました川上忠重教授に心から深く感謝し、御礼申し上げます。また、研究活動にご協力いただいたエネルギー変換工学研究室の皆様にも深く感謝いたします。最後に、同研究を行っていた学部四年生の堀野広樹氏にも心から感謝申し上げます。

### 参考文献

- 1) 加藤 信夫, 2009, バイオ燃料と食・農・環境
- 2) 劉 一陽, 川上 忠重, 山梨講演会論文集, No.404, pp.81-82, 2017
- 3) Flowers,D., Aceves,S., and Frias,J., 2007, "Improving Ethanol Life Cycle Energy Efficiency by Direct Utilization of Wet Ethanol in HCCI Engines", SAE Technical Paper 2007-01-1867
- 4) 段 智久, 日本マリンエンジニアリング学会誌, 第 51 巻, 第 3 号, pp.49-56,2016