

### 多成分アルコール混合燃料を用いた小型 ディーゼル機関の燃焼特性

下川, 舟 / SHIMOKAWA, Shu

---

(出版者 / Publisher)

法政大学大学院理工学・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)

58

(開始ページ / Start Page)

1

(終了ページ / End Page)

6

(発行年 / Year)

2017-03-31

(URL)

<https://doi.org/10.15002/00014115>

# 多成分アルコール混合燃料を用いた小型ディーゼル機関の 燃焼特性

COMBUSTION CHARACTERISTICS BY USING MULTICOMPONENT ALCOHOL BLENDED FUELS FOR THE  
SMALL DIESEL ENGINE

下川舟

Shu SHIMOKAWA

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

In the late years, environmental problems and oil depletion have become more serious, so it is now necessarily to reduce the environmental pollutant on an international scale and the dependence on fuels of the origin of petroleum. With such a trend, bio alcohol fuel has been expected as substitution of petroleum fuels. Being that it is produced by plants, it has become sustainable fuel. Based on diversification of fuels, the demands of diesel engine can be expected to expand from now on, because of adopting compression ignition system.

This experiment has been carried out to examine the combustion characteristics for small diesel engine by using the ethanol and butanol (1-butanol, 2-butanol and iso-butanol) for bio alcohol fuel. Furthermore, DGM and DMC are used for a comparison experiment with bio alcohol fuel.

The main results are as follows; 1) CO emissions increase by using low ignitability butanol under the low engine load. 2) NOx emissions by using low ignitability fuels decrease than that of light oil under all engine loads. 3) NOx and PM emissions decrease than that of light oil with increasing mixed rate, and CO emissions are almost same value at any alcohol mixed fuels. 4) The effects of the fuel ignitability are different among the each engine loads.

**Key Words** : Diesel engine, Bio fuel, Cetane number, Oxygen content

## 1. 結論

近年、環境問題の深刻化に伴い、地球規模での環境汚染物質低減が求められている。また、石油枯渇危機の問題を受け、石油系燃料への依存度低減が求められている。石油系燃料の代替燃料として、バイオマスからの製造が可能であり、持続的な生産が見込めるバイオアルコール燃料が注目されている。<sup>[1]</sup> その中で、圧縮着火方式を採用するディーゼル機関は、燃料許容範囲が広く、今後多様化すると考えられる燃料事情を踏まえ、その需要は更に拡大していくと考えられる。さらに、アルコール混合燃料を用いることで、高い気化潜熱による NOx 低減効果が確認されているが、低混合割合での結果であり、高混合割合における燃焼特性は未解明な部分が多い。<sup>[2]</sup>

これらの観点から、本研究ではバイオアルコール燃料であるエタノール、及びブタノール(1-ブタノール、2-ブタノール、iso-ブタノール)、またアルコール燃料との比較実験として、着火性の高いジエチレングリコールジメチルエーテル(以下 DGM)、および含酸素割合の高い炭酸ジメチル(以下 DMC)を軽油との混合燃料として用い、小

型ディーゼル機関の機関負荷率におけるアルコール混合割合が機関特性に及ぼす影響について検討を行った。

## 2. 実験装置および実験方法

本研究では供試機関として、ヤンマー社製 TF70V-E 横型水冷 4 サイクルディーゼルエンジンをを用いた。Table 1 に本供試機関の諸元、Fig.1 に本実験装置の概略をそれぞれ示す。本実験では吸排気系、燃料供給系、冷却方式、潤滑系は標準仕様から変更していない。

本研究で使用した燃料性状を Table 2 に示す。アルコール燃料の添加率  $W$  は式 (1) のように定義する。

$$W = \frac{\text{Volume of Alcohol}}{\text{Volume of Based Fuel} + \text{Volume of Alcohol}} \times 100(\%) \quad (1)$$

軽油とアルコールを攪拌機を用いて 30 分間攪拌を行い、界面活性剤として 1-オクタノールを 2vol% 添加した。本実験では、動力計として東京メータ株式会社製 EA10-L 空冷渦流電気動力計を用いて、機関負荷率を 100, 110, 75, 50, 25% とし、それに対応する動力計制動荷重を加えた。機関

性能の測定には、東京メータ株式会社製 DWE-8/10R 内燃機関性能総合試験装置を用いた。排気ガス測定には AVL 社製 Di-com4000 を、PM 測定にはヤナコ計測社製オパシメータを使用し、機関を十分に暖気運転した後、排気管から排出された排気ガスの一部を測定装置に導入し計測した。

Table 1 Engine specifications

Engine type	4stroke cycle diesel engine
Combustion system	Direct injection
Cooling system	Water-cooling
Number of cylinder	1
Bore×Stroke	78mm×80mm
Displacement	0.382L
Valve system	OHV
Injection pressure	11.8MPa
Compression ratio	21.4
Rated output	4.8kW/2600rpm
Maximum output	5.5kW/2600rpm

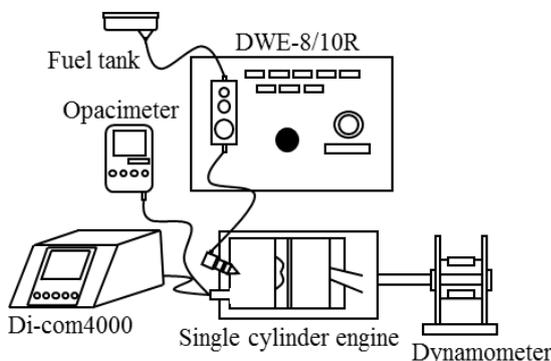


Fig. 1 Experimental devices

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 バイオアルコールを用いた燃焼特性

本実験では軽油、及びバイオアルコール（エタノール、及び1-ブタノール）を使用し、アルコール混合割合は20%一定とした。

Fig. 2 に各燃料における機関負荷率が機関特性に及ぼす影響を示す。NOx 排出量に関しては、軽油と比較してブタノールでは機関負荷率 25, 50%の低負荷域において、エタノールでは全負荷域において著しく低減した。一般に着火遅れ期間の長期化により、熱発生ピークが高い急峻な燃焼になると考えられているが、ディーゼル燃焼において、NOx 生成は当量比の依存性が強く、 $\phi=1$  付近でピークが発生する。低負荷域においては着火遅れ期間の

長期化により予混合化が促進し、当量比  $\phi < 1$  の均一な燃焼により NOx 排出量が低減したものと考えられる。<sup>[3]</sup> ブタノール混合燃料を用いた場合、CO 排出量及び燃料消費率は軽油を用いた場合と比較して全負荷域において同程度となった。一方、エタノール混合燃料を用いた場合、機関負荷率 25%の低負荷域においては著しく増大した。低負荷域では筒内温度が低く、着火性の影響が大きいと考えられる。着火性の低いエタノールを用いた場合、燃焼期間の遅角化により、出力の低下を招き、それを補うために軽油やブタノールと比較しても多量の燃料を消費することにより、液体燃料の気化潜熱による筒内温度の低下に伴う不完全燃焼により未燃分である CO 排出量が増大したものと考えられる。Fig. 3 に各燃料のセタン価と機関負荷率における排気ガス温度を示す。高負荷域では全燃料において同程度の排気ガス温度を示すのに対して、低負荷域では低着火性のアルコール燃料ほど排気ガス温度が高いことが分かる。着火遅れ期間の長期化により燃焼期間が遅角化し、排気温度の上昇を招いたものと考えられる。Fig. 4 に機関負荷率における正味熱効率 ( $\eta_e$ )、排気損失 ( $\eta_g$ )、及び冷却損失 ( $\eta_w$ ) を示す。低負荷域ではエタノール混合燃料を用いた場合、冷却損失の著しい低下が見られた。このことから着火遅れ期間の長期化による筒内温度の低下が考えられる。

圧縮自着火方式を用いるディーゼル機関において、着火性は重要な指標であるため、着火性が高く発熱量も高いブタノールが適していることが分かる。これらのことから、ブタノール異性体の影響についても検討を加える。

#### 3.2 ブタノールにおける異性体の影響

本実験ではバイオマスからの製造が可能な 1-ブタノール、iso-ブタノール、及びそれらとの比較検討のために 2-ブタノールを使用し、機関負荷率を 25%と 100%に設定した。Fig. 5 にブタノール混合割合が機関特性に及ぼす影響を示す。ここで、(a)は機関負荷率 100%、(b)は機関負荷率 25%の場合を、それぞれ示す。

機関負荷率 25%の低負荷域において、使用燃料により混合割合の増加に伴う機関特性の大きな変化が見られた。2-ブタノール、及び iso-ブタノールを用いた場合、CO 排出量は混合割合の増加に伴い増大した。一般に、炭化水素は直鎖のものほど着火性が優れ、側鎖性が増すほど着火性は低くなると考えられており、アルコールに関しても同様の傾向が見られると考えられるため、本実験では 1-ブ

Table 2 Properties of fuels

	Light oil	Ethanol	1-Butanol	2-Butanol	Iso-Butanol	DGM	DMC
Composition	-	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> O			C <sub>6</sub> H <sub>14</sub> O <sub>3</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O <sub>3</sub>
Density[kg/m <sup>3</sup> ]	822	789	810	806	802	948	1079
Oxygen content rate[%]	0	34.8	21.6			35.8	53.3
Carbon content rate[%]	86	52.2	64.9			53.7	40
Hydrogen content rate[%]	14	13	13.5			10.4	6.7
Lower calorific value[MJ/kg]	43.1	26.8	33.1	32.8	32.959	30.2	21.2
Cetane number	40~55	8	18	-	-	65	15.8
Boiling point[°C]	250	78	117	98.5	108	162	90

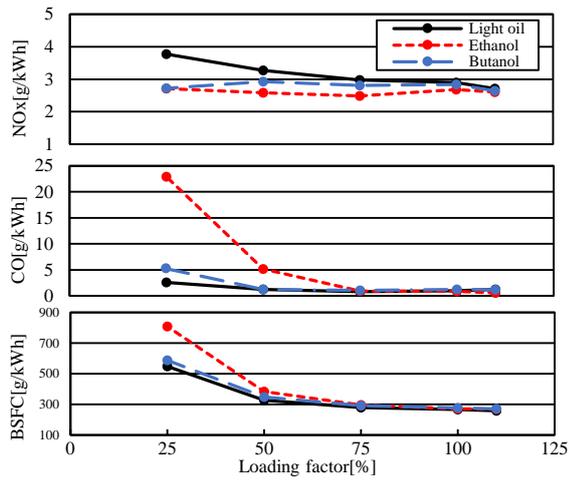


Fig. 2 Exhaust emissions and brake specific fuel consumption with Bio fuels (mixed rate 20%) and light oil for different engine loads.

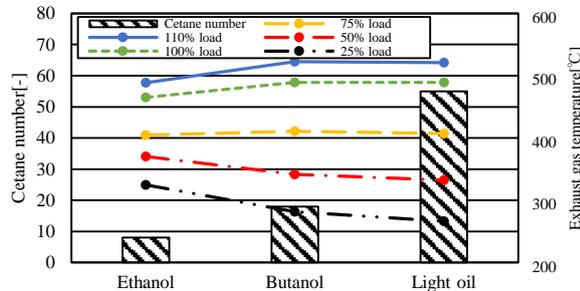


Fig. 3 Exhaust gas temperature with alcohol fuels (mixed rate 20%) and light oil for different engine loads.

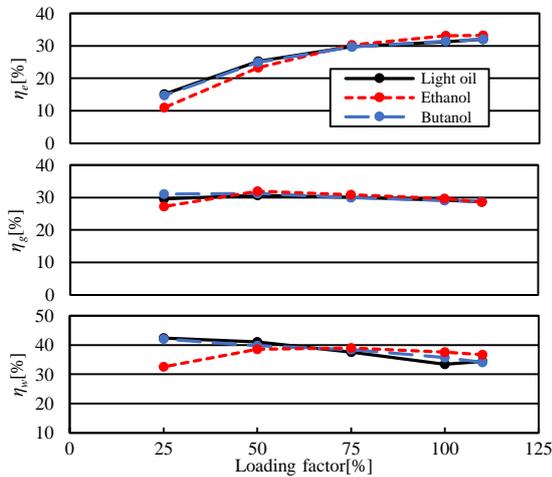


Fig. 4 Factors of engine output with bio alcohol fuels (mixed rate 20%) and light oil for different engine loads.

タノール>2-ブタノール>iso-ブタノールの順で着火性が優れると考えられる。着火遅れは周囲ガス温度による影響を受けるため、混合割合の増加によって気化潜熱により筒内温度が低下し、着火遅れが顕著になったことが、燃焼温度低下による未燃分増大に繋がったと考えられる。<sup>[4]</sup> PM 排出濃度についても同様に、着火性の低い2-ブタノール及び iso-ブタノールにおいて、混合割合 40%を境に排出

濃度は増加した。一方で、機関負荷率 100%の高負荷域では混合割合の増加により PM 排出濃度は減少した。高負荷域では筒内温度が十分に高く、本実験範囲内においてはアルコール混合による着火性低下の影響が少なく、燃料中の含酸素による PM 抑制効果が得られたものと考えられる。<sup>[5]</sup> 燃料消費率も同様に、低負荷域では混合割合の増加に伴いその差が顕著にあらわれることから、着火遅れ期間の長期化による出力の低下から、燃料噴射率が增大していることが分かる。

ブタノール異性体による実験結果を踏まえ、更に燃料性状が機関特性に及ぼす影響を検討するために、多成分アルコール混合燃料を用いて実験を行った。

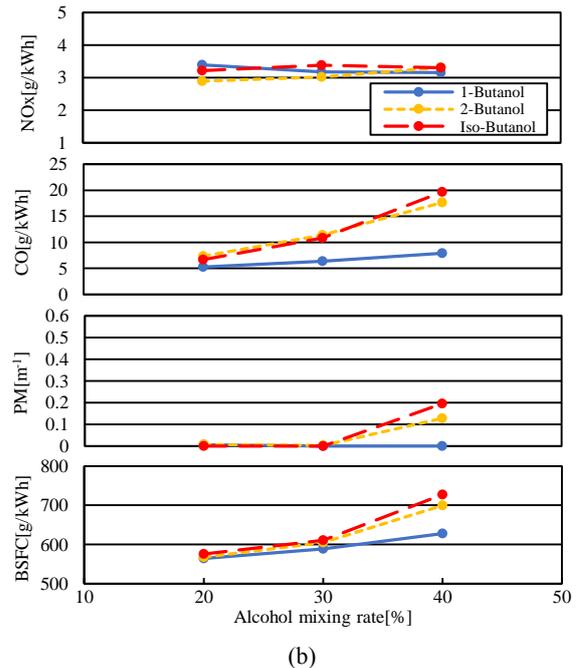
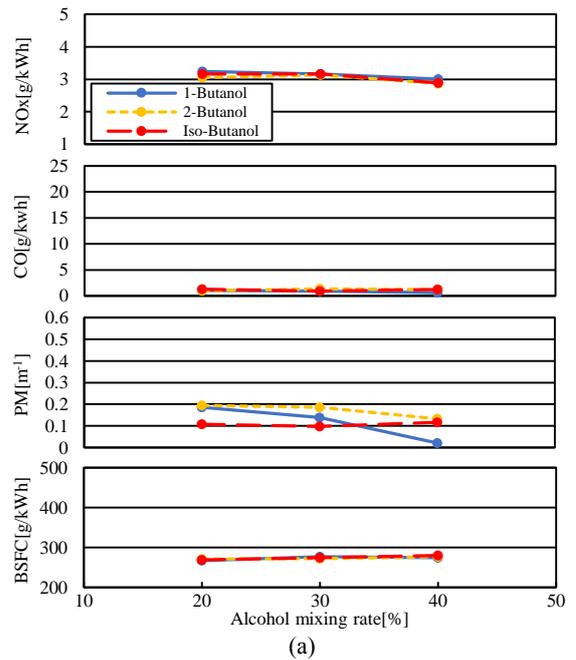


Fig. 5 Exhaust emissions and brake specific fuel consumption by alcohol mixing rate on 100% (a), and 25% (b) loads.

### 3.3 多成分アルコールを用いた燃焼特性

#### 3.3.1 機関負荷率による影響

本実験ではベース燃料として軽油、バイオアルコールとして1-ブタノール、それらとの比較検討のために DGM 及び DMC を用いて実験を行った。アルコール混合割合は20%一定とした。Fig. 6 に機関負荷率が機関特性に及ぼす影響を示す。DMC20%混合燃料を用いた場合、機関負荷率25%の低負荷域においては正常燃焼運転が困難であったことを明記しておく。

NOx 排出量は、着火性の低いブタノール、及び DMC 混合燃料を用いた場合、負荷率 25、50%の低負荷域では軽油と比較して NOx 排出量は著しく減少した。低負荷域では、着火遅れ期間の長期化に伴い、出力低下を補うために燃料消費率が增大し、気化潜熱による筒内温度の低下が NOx 生成を抑制した原因であると考えられる。高負荷域においては、使用燃料による NOx 排出量の大きな変化は見られず、燃料性状が NOx 生成に及ぼす影響は小さいと考えられる。ここで、Fig. 7 に機関負荷率における排気ガス温度を示す。低着火性燃料を用いた場合、低負荷域ほど排気ガス温度が高いことが分かる。このことから、低着火性燃料では着火遅れ期間の長期化により、燃焼期間が遅角化していることが考えられる。Fig.6 に示す PM 排出濃度に関しては、高負荷域においてはいずれのアルコール混合燃料においても軽油を用いた場合と比較して PM 排出濃度は減少した。燃料中の含酸素による燃焼促進効果により PM 生成が抑制されたためであると考えられる。燃料消費率は燃料の低位発熱量に依存して全負荷率において増加傾向にあり、低負荷域ほどその差は顕著になる。CO 排出量に関しては、本実験範囲内では、排出量に大きな変化は見られなかった。Fig.8 に機関負荷率における機関出力特性を示す。低負荷域において、低着火性燃料を用いることで、冷却損失割合は低下しており、このことから低負荷域において着火遅れ期間の長期化による筒内温度の低下が確認できる。一方、着火性の高い DGM を用いた場合、低負荷域においても軽油を用いた場合と同程度であった。

本実験より、アルコール混合燃料を用いた場合、低負荷域ほど着火性が機関特性に及ぼす影響は大きく、高負荷域においてはその影響はほとんど見られなかった。

#### 3.3.2 高負荷域（機関負荷率 100%）におけるアルコール混合割合による影響

高負荷域において、燃料性状が機関特性に及ぼす影響を検討するため、機関負荷率を 100%一定とし、実験を行った。Fig.9 にアルコール混合割合が機関特性に及ぼす影響を示す。ここで、アルコール混合割合 0%とは軽油単体を用いた場合を示す。

全燃料において、混合割合の増加に伴い NOx 排出量は低減した。Fig.10 に混合燃料の低位発熱量に対する NOx 排出量を示す。NOx 排出量は低位発熱量が低いものほど低減し、高いものほど増大している。低位発熱量が低いほど燃

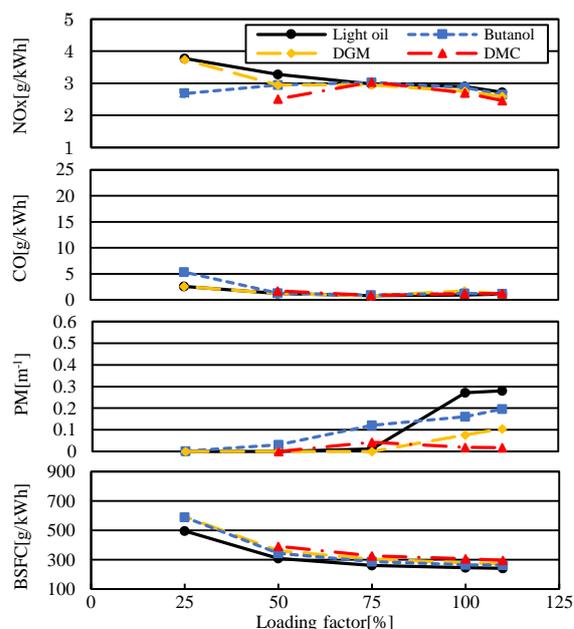


Fig. 6 Exhaust emissions and brake specific fuel consumptions with alcohol fuels (mixed rate 20%) and light oil for different engine loads.

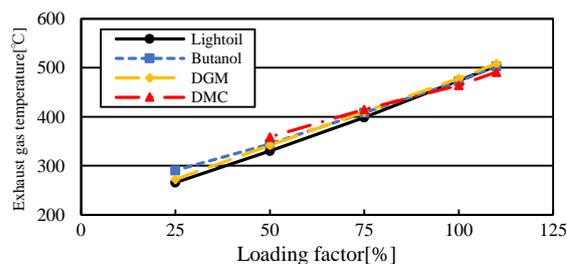


Fig. 7 Exhaust gas temperature with alcohol fuels (mixed rate 20%) and light oil for different engine loads.

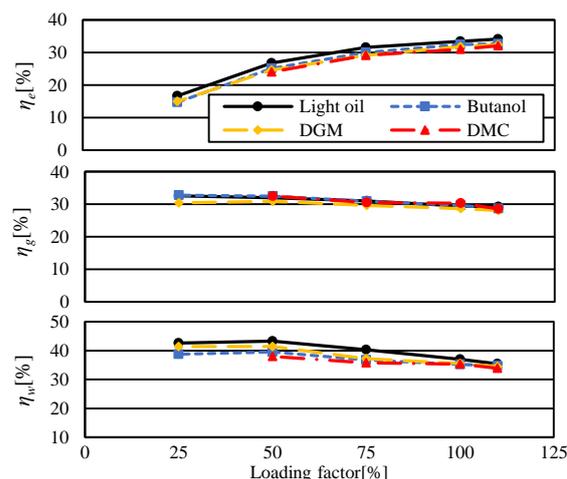


Fig. 8 Factors of engine output with alcohol fuels (mixed rate 20%) and light oil for different engine loads.

料消費率は高く、液体燃料の気化潜熱による筒内温度の低下によって NOx 生成が抑制されたと考えられる。一方、Fig.9 に示す CO 排出量に関しては、混合割合の増加に伴う CO 排出量の増大は見られなかった。高負荷域では、低負荷域と比較して筒内温度が十分に高く、アルコール混

合割合の増加による筒内温度の低下が着火性低下に及ぼす影響は低いと考えられる。Fig. 11 にアルコール混合割合における排気ガス温度を示す。使用燃料、及び混合割合の増加に伴う排気ガス温度の上昇などは見られなかった。このことから、高負荷域においては、アルコール混合割合の増加に伴う着火遅れ期間の長期化は見られなかったものと考えられる。Fig. 12 にアルコール混合割合による機関出力特性を示す。使用燃料、混合割合によらず同程度の値を示しており、これらのことから高負荷域においては、燃料の着火性が機関特性に及ぼす影響は小さいと考えられる。今後、各機関負荷率において、アルコール混合割合の増加に伴う着火遅れ期間の変化については詳細な検討が必要である。Fig.9 に示す PM 排出濃度についても、Fig. 5 の低負荷域で見られたような混合割合の増加に伴う PM 排出濃度の増大は見られず、混合割合の増加に伴い PM 排出濃度は低減した。Fig. 13 に燃料中の含酸素割合における PM 排出濃度を示す。使用燃料によらず含酸素割合の増加に伴い PM 排出濃度は低減していることから、燃料中の含酸素による燃焼促進効果によって PM 生成が抑制されたと考えられる。燃料消費率は、混合割合の増加に伴い増加傾向にあるが、これは混合割合の増加に伴う発熱量の低下によるものである。

本実験結果より、ディーゼル機関において重要な指標とされる着火性に関して、高負荷域においては、高い混合割合においても使用燃料による機関特性への影響は同傾向を示しており、着火性が機関特性におよぼす影響は小さいと考えられる。一方で、低負荷域では、着火性が機関特性に及ぼす影響は大きいことが分かった。低着火性のアルコール燃料の使用に向けた今後の課題として、低負荷域における燃焼生成物の低減と、高い混合割合での安定運転範囲の拡大が挙げられる。

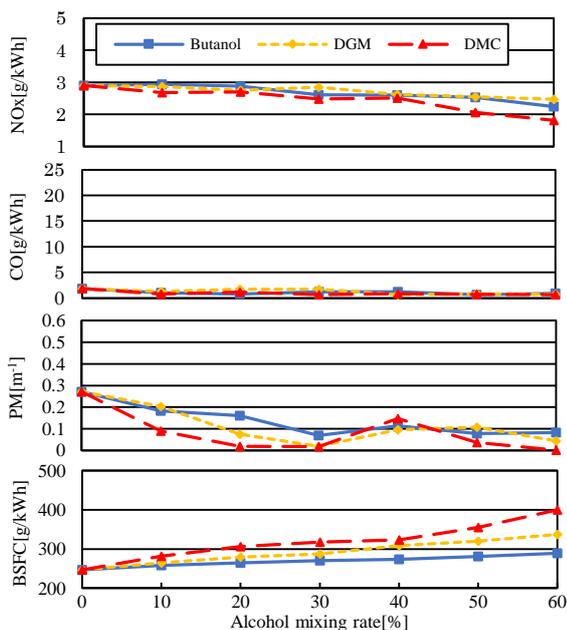


Fig. 9 Exhaust emissions and brake specific fuel consumption by the alcohol mixing rate on 100% engine load.

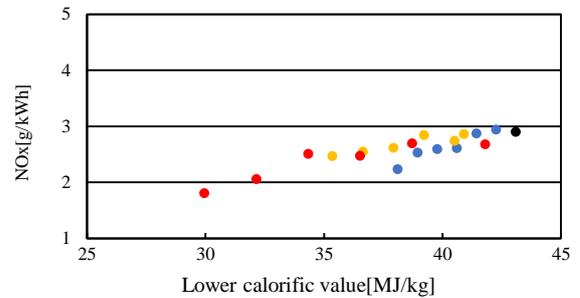


Fig. 10 NOx emissions by lower calorific value on 100% engine load.

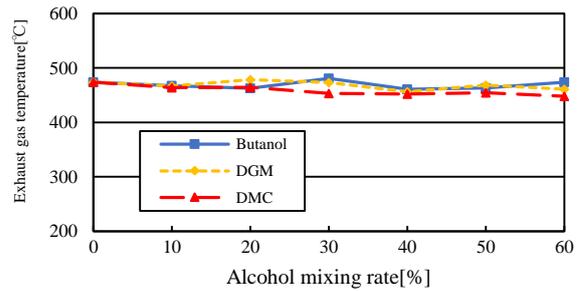


Fig. 11 Exhaust gas temperature by alcohol mixing rate on 100% engine load.

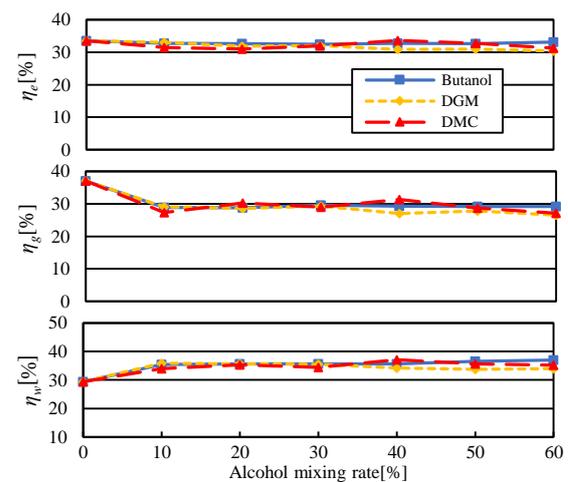


Fig. 12 Factors of engine output by alcohol mixing rate on 100% engine load.

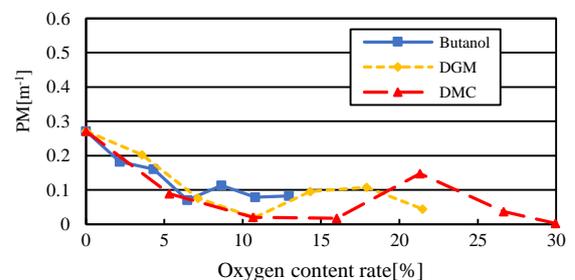


Fig. 13 PM emissions by oxygen content rate on 100% engine load.

#### 4. 結論

多成分アルコール混合燃料を用いた小型ディーゼル機関の燃焼特性に関する検討を行った，得られた結果を以下に示す．

- (1) 低負荷域において着火性の低いブタノールほど CO 排出量は増大する．
- (2) 全負荷域において，低着火性アルコール混合燃料を用いた場合，NO<sub>x</sub> 排出量は軽油と比較して同程度もしくは減少する．
- (3) 高負荷域において，アルコール混合燃料を用いることで軽油を用いた場合と比較して NO<sub>x</sub> 排出量，及び PM 排出濃度は混合割合の増加に伴い低減する．また，CO 排出量は使用燃料によらず同程度である．
- (4) 燃焼特性に及ぼす着火性の影響は機関負荷により差異が発生する．

謝辞：本研究を行うに当たり御指導，御鞭撻いただきました，川上忠重教授に深く感謝し，お礼申し上げます．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，日本自動車の皆様にも深く感謝いたします．

#### 参考文献

- [1] 大聖泰弘, 2008, バイオエタノール最前線 改訂版, 工業調査会, p267
- [2] 下川舟, 川上忠重, 2016, 多成分アルコール混合燃料を用いた小型ディーゼル機関の性能改善について, 日本機械学会関東支部第 22 期総会講演論文集, No.702
- [3] 齊藤弘順ら他 2 名, 2004, 直噴ディーゼル機関におけるアルコールの圧縮自着火・噴霧燃焼特性, 日本機械学会論文集(B編) 70 巻 694 号, 日本機械学会, p204-211
- [4] M.J.Pilling, 1997, Low-temperature combustion and autoignition, Elsevier, p794
- [5] 新井紀男, 1997, 燃焼生成物の発生と抑制技術, 株式会社テクノシステム, p571