

# 炭酸ジメチルおよびアルコール混合燃料を用いたディーゼル機関の排気特性改善に関する研究

金, 美玲 / JIN, Meiling

---

(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. 理工学研究科編

(巻 / Volume)

65

(開始ページ / Start Page)

1

(終了ページ / End Page)

7

(発行年 / Year)

2024-03-24

(URL)

<https://doi.org/10.15002/00030629>

# 炭酸ジメチルおよびアルコール混合燃料を用いたディーゼル機関の排気特性改善に関する研究

## A STUDY OF THE IMPROVEMENT OF EXHAUST CHARACTERISTICS IN DIESEL ENGINES USING DIMETHYL CARBONATE AND ALCOHOL BLENDED FUELS

金美玲

Meiling JIN

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

Diesel engines are widely used due to their excellent thermal efficiency, reliability, and durability. However, measures are necessary to address issues such as nitrogen oxides (NO<sub>x</sub>) and particulate matter (PM) in diesel engine exhaust, which contribute to problems like acid rain and air pollution. On the other hand, securing sustainable energy sources is currently an urgent and imperative task for society. Therefore, this study investigated the effects of fuel properties (mixture ratios) and engine load on combustion products (CO, HC, NO, PM) in diesel engines using dimethyl carbonate (DMC) blended fuels, alcohols (ethanol, 1-butanol, 2-butanol) fuels, and fuels with alcohol additives to DMC fuels.

**Key Words** : Diesel Engine, Addition alcohol, Addition DMC, Blend fuels

### 1. 緒言

近年、環境汚染問題の改善と持続可能なエネルギー資源の確保が非常に重要な課題となっている。ディーゼル機関は優れた熱効率、信頼性、および耐久性を持つため、広く使用されている。しかし、ディーゼル機関の排気ガス中の酸性雨や大気汚染等の問題を引き起こす窒素酸化物 (NO<sub>x</sub>) や粒子状物質 (PM) についての対策が必要である。そこで、欧州連合 (EU) では自動車排出ガス基準案を 2024 年「ユーロ 7」まで強化して来た。日本国内でも「平成 28 年ガス規制」を制定し、排気ガスを厳しく管理している。

他方では、石油系燃料を始めとするエネルギー資源枯渇が近年深刻化しており、持続可能なエネルギー資源の確保は現在社会の喫緊の解決すべき課題である。現在日本国内の一次エネルギー供給は約 8 割が化石燃料に依存しており、石油系燃料への依存度低減が求められている。近年、石油系燃料の代替燃料として、炭酸ジメチル (DMC) が注目されている。炭酸ジメチル (DMC) は酸素含有率が高く、石油系燃料との溶解性が良いので、燃焼の改善が期待される燃料の一種である。また、DMC はメタノールと二酸化炭素を原料として生成することができ、製造過程から二酸化炭素を低減できるエネルギー源である。一方、バイオアルコールはバイオマスからの製造が可能であり、高い気化潜熱効果による NO<sub>x</sub> 低減効果と燃料自体の酸素による PM 低減効果が期待されている燃料である。

そこで、本研究では、炭酸ジメチル (DMC) 混合燃料、バイオアルコール (エタノール、1-ブタノール、2-ブタノール) 燃料、及び炭酸ジメチル燃料にアルコールを添加した燃料を用い、ディーゼル機関の燃焼生成物 (CO, HC, NO, PM) に及ぼす燃料性状 (混合割合) および機関負荷の影響に関する検討を行った。

### 2. 実験装置および実験方法

#### (1) 実験装置

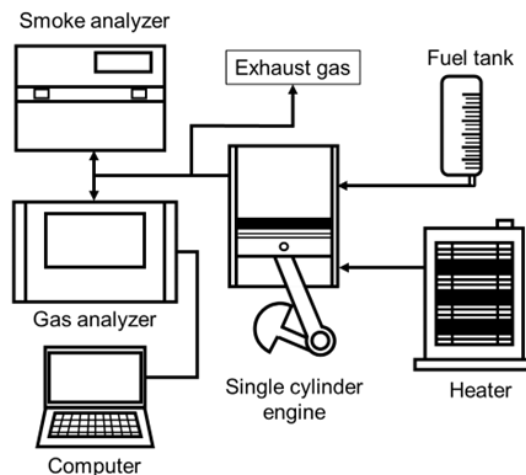


Fig. 1 Experimental devices

本実験に用いられる供試機関は、KIPOR 製空冷式ディーゼル発電機 KED3.3E である。図 1 に実験装置の概略図、表 1 に本供試機関の諸元表をそれぞれ示す。本実験では、吸排気系、冷却系、潤滑系などは標準仕様から変更していない。負荷は、セラミックヒーターを用いて出力を切り替えることで 0W, 300W, 600W, 900W, 1200W, 1500W, 1800W を設定した。排気ガス (CO, HC, NO) の測定には AVL 社製排気ガス分析器 CDS240 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	air-cooling
Number of cylinder	1
Bore × Stroke	78mm×62mm
Displacement	0.296L
Valve system	OHV
Rated output	3.68kW/3000rpm
Voltage (AC)	100V
Current (AC)	28A

## (2) 供試燃料

表 2 に本実験に使用した燃料性状を示す。本研究では燃料として軽油、炭酸ジメチル (DMC), アルコール (エタノール, 1-ブタノール, 2-ブタノール) を用いた。ベース燃料の軽油に、DMC 及びアルコールの添加率を変更することで検討を行った。混合率 ( $W$ ) の定義式は (1) の様に定義する。混合燃料を作製する際の攪拌装置として、アズワン製 RS-1D を使用した。アルコール混合燃料は、軽油に混合割合分のアルコールを加え、1500rpm で 30 分以上攪拌し作製した。一方、炭酸ジメチルとアルコール混合燃

料を作製する際、まず軽油に炭酸ジメチルを加え、1500rpm で 10 分間攪拌し、その後アルコールを加え 1500rpm で 30 分間攪拌した。混合燃料は 5 分間放置し、分離の発生の有無を確認した後に用いられた。また、実験結果の燃料の混合割合の表記については、表 3 に示す。

$$W = \frac{\text{Volume of addition fuel}}{\text{Volume of fuel}} \times 100 [\text{vol.}\%] \quad (1)$$

## 3. 実験結果および考察

### (1) DMC 混合燃料及びアルコール混合燃料の排気特性

本実験では、DMC 混合燃料、アルコール (エタノール, 1-ブタノール, 2-ブタノール) 燃料、軽油を用いた。混合燃料の混合率は 10vol.% と 15vol.% にした。

図 2 と図 3 に各負荷条件に対する CO 及び HC の排出量を示す。本実験範囲内における機関負荷の影響に着目すると、各燃料の CO 及び HC の排出量は、機関負荷の増大に伴ってほぼ単調に減少している。これは、機関負荷が増加すると筒内燃焼温度が高くなり、完全燃焼割合が増加するため、未燃成分である CO と HC の排出量が減少したと考えられる。一方、DMC 混合燃料及びアルコール混合燃料とも、同一機関負荷に対する CO 及び HC の排出量は軽油より増加した。これは DMC 及びアルコールの発熱量が軽油より低いため、DMC またはアルコール添加による燃料自体の発熱量の低下により筒内燃焼温度が低下したためと考えられる。また、アルコール混合割合が一定の場合、燃料性状をパラメータとして比較すると、エタノール混合燃料の CO 及び HC の排出量がブタノール (1-ブタノール, 2-ブタノール) 混合燃料より増加する傾向が確認された。これは、エタノールの発熱量がブタノールより低いためと考えられる。一方、ブタノールにおける異性体の影響に着目すると、1-ブタノール混合燃料の方が全負荷領域において 2-ブタノール混合燃料より HC の排出量が減少した。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いる。

Table 2 Properties of fuels

	Light oil	Ethanol	1-Butanol	2-Butanol	DMC
Composition	-	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> O		C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O <sub>3</sub>
Density @20°C [kg/m <sup>3</sup> ]	822	789	810	808	1079
Oxygen content rate [%]	0	34.8	21.6		53.3
Carbon content rate [%]	86	52.2	64.9		40
Hydrogen content rate [%]	14	13	13.5		6.7
Lower calorific value [MJ/kg]	43.1	26.8	33.1	32.8	21.2
Cetane number	40~55	8	18	-	15.8
Boiling point [°C]	240~350	78	117	100	90
Viscosity @20°C [mPa·s]	2.06	1.20	2.95	3.91	0.63
Kinematic viscosity @20°C [cSt]	2.51	1.52	3.64	4.84	0.58

Table 3 Components of test fuels

Test fuels [vol.%]	Light oil	DMC	Ethanol	1-Butanol	2-Butanol
Light oil	100	0	0	0	0
D10	90	10	0	0	0
D15	85	15	0	0	0
E10	90	0	10	0	0
E15	85	0	15	0	0
E5D5	90	5	5	0	0
E10D5	85	5	10	0	0
1-B10	90	0	0	10	0
1-B15	85	0	0	15	0
1-B5D5	90	5	0	5	0
1-B10D5	85	5	0	10	0
2-B10	90	0	0	0	10
2-B15	85	0	0	0	15
2-B5D5	90	5	0	0	5
2-B10D5	85	5	0	0	10

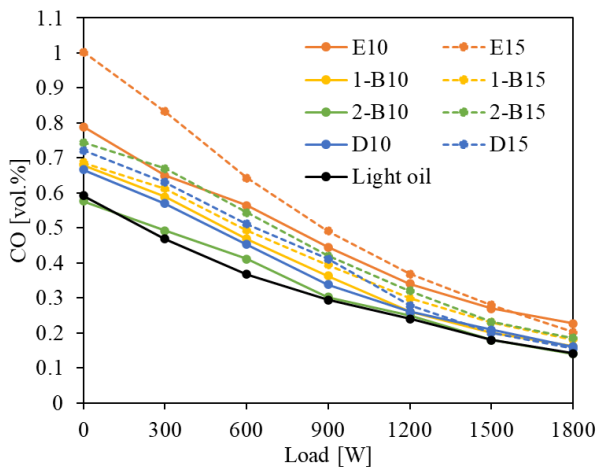


Fig. 2 CO emissions (blended fuels of DMC or alcohol)

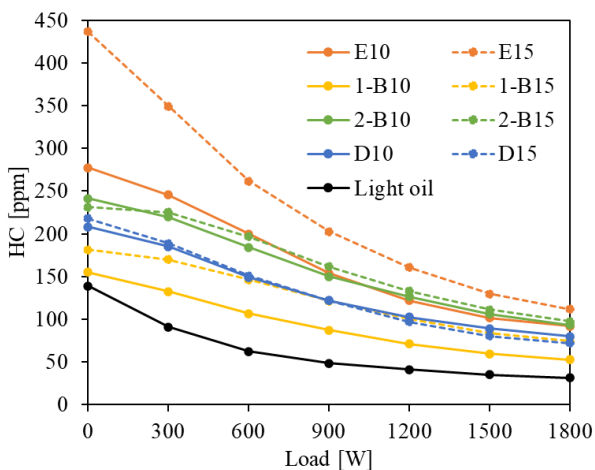


Fig. 3 HC emissions (blended fuels of DMC or alcohol)

図4に1-ブタノールと2-ブタノールの化学構造式を示す。ここで、1-ブタノールは直鎖構造のため着火性が2-ブタノールより優れており、HCの排出量が減少したと推測される。すなわち、着火性増加による着火遅れ期間の短縮に伴って燃料噴射量が減少し、これにより多量の燃料が急速燃焼することから発生する酸素不足が低減し、酸

化せずに排出されるHCが減少したと考えられる。

図5にDMC混合燃料、アルコール混合燃料、軽油のNOの排出量を示す。各燃料のNOの排出量は機関負荷の増加に伴って増加した。これは、機関負荷が増加すると、筒内燃焼温度が増加し、高温領域で生成されるNOの排出量が増加したと考えられる。一方、DMCまたアルコールを添加した場合、全負荷領域においてNOの排出量は、軽油単体燃料と比較して減少している。これは、DMCまたアルコールの添加に伴って、燃料の総発熱量が低下したことにより、燃焼温度が低下したことで、NOの排出量が減少したと考えられる。また、アルコール混合割合15vol.%燃料のNO排出量を、燃料性状をパラメータとして比較すると、1-ブタノールと2-ブタノールより、エタノールを添加した方がNOの排出量が低減している。これは、1-ブタノールと2-ブタノールよりもエタノールの発熱量が低く、燃焼温度低下の影響が顕著に表れたためと思われる。

図6に各燃料のPMの排出量を示す。DMC混合燃料またアルコール混合燃料を用いた場合、PMの排出が低負荷領域(0W~300W)において軽油より減少した。さらに、DMC混合燃料及びアルコール混合燃料の低負荷領域における煤の排出低減効果を確認した。一方、若干の変動は観察されるが、1-ブタノールと2-ブタノールより、エタノールを添加した方がPMの排出量が低減する傾向が観察された。これは、エタノールの含酸素率は1-ブタノールと2-ブタノールより高く、酸素不足で発生する煤が減少したため、PMの排出量が低下したと考えられる。

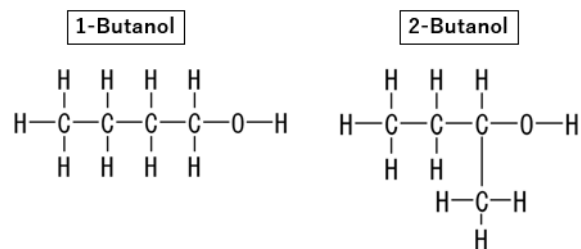


Fig. 4 Structural formula (1-butanol, 2-butanol)

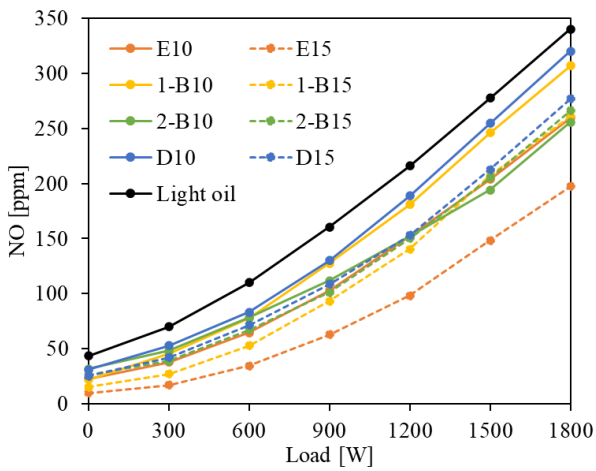


Fig. 5 NO emissions (blended fuels of DMC or alcohol)

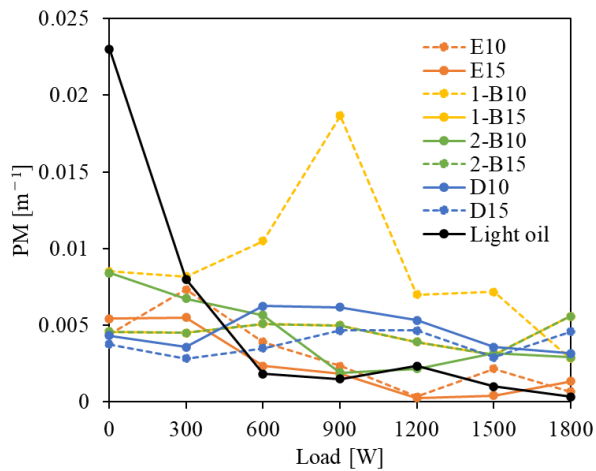


Fig. 6 PM emissions (blended fuels of DMC or alcohol)

## (2) DMC 及びアルコール混合燃料の排気特性

本実験では、DMC 及びアルコール混合燃料を使用した。DMC 及びアルコール混合燃料中の DMC 混合割合は 5vol.% と一定とし、アルコール混合割合は 5vol.% と 10vol.% とした。また、比較する為に、DMC 混合割合 10vol.% と 15vol.% の DMC 混合燃料と軽油の検討も行った。

図 7 と図 8 に DMC 及びアルコール混合燃料の CO 及び HC の排出量をそれぞれ示す。1-ブタノール及び 2-ブタノールとも、ブタノール 10vol.% と DMC5vol.% 混合燃料の方がブタノール 5vol.% と DMC5vol.% 混合燃料より CO 及び HC の排出量が低減した。これは、含酸素燃料であるブタノールの混合割合が増加することで、酸素不足による不完全燃焼が減少するためと考えられる。一方、DMC 混合燃料を用いた場合、CO 及び HC の排出量が DMC とアルコールを混合した燃料と比較して、同程度もしくは減少している。これは、DMC の酸素含有率がアルコールより高いためと考えられる。一方、エタノールと DMC 混合燃料を用いた場合、ブタノール (1-ブタノール、2-ブタノール) と DMC 混合燃料を用いた場合より CO の排出量が増加した。これは、エタノールの発熱量が 1-ブタノール及び 2-ブタノールより低いとみられる。また、燃料性状に着目すると、

E5D5 と E10D5 を比較すると、E10D5 の HC の排出量が増加した。これは、E10D5 の動粘度が E5D5 より低いとみられる。動粘度の低下により燃料噴霧の貫通力が低下するため、噴射ノズル近傍に燃料混合気の過濃領域が生成し、さらに燃焼温度の低下による未燃炭化水素が増加したとみられる。

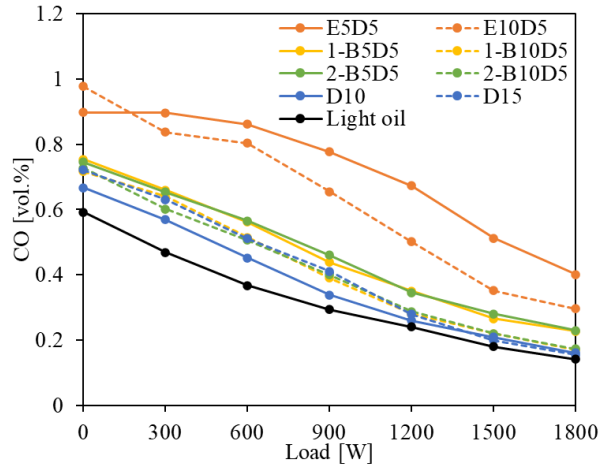


Fig. 7 CO emissions (blended fuels of DMC and alcohol)

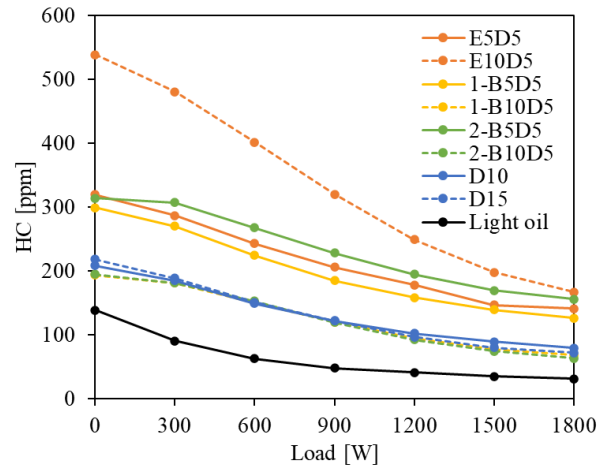


Fig. 8 HC emissions (blended fuels of DMC and alcohol)

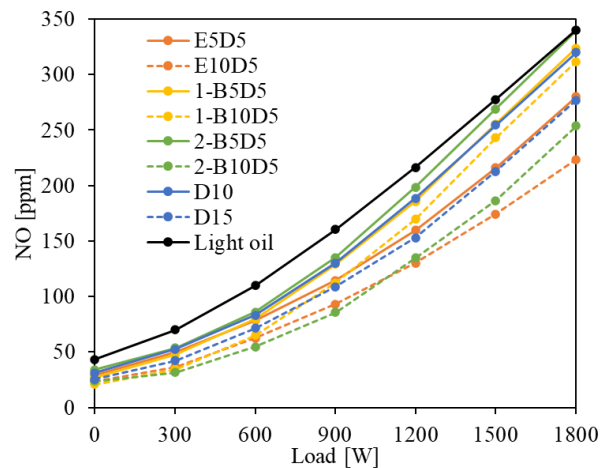


Fig. 9 NO emissions (blended fuels of DMC and alcohol)

図9に各設定負荷におけるDMC及びアルコール混合燃料のNO排出量を示す。アルコール混合割合をパラメータとして比較すると、アルコール10vol.%とDMC5vol.%混合燃料のNOの排出量がアルコール5vol.%とDMC5vol.%混合燃料より低減する。これは、アルコール混合割合が増加すると燃料自体の発熱量が減少し、筒内燃焼温度が低減したためと考えられる。

図10にDMC及びアルコール混合燃料のPMの排出量を示す。エタノールとDMCを混合した燃料のPMの排出量は1-ブタノールもしくは2-ブタノールとDMC混合燃料及びDMC混合燃料より増加する傾向が観察された。これは、エタノールの密度がブタノール及びDMCより低く、エタノールとDMCを混合した燃料の貫通力が他の燃料より低いためと推測される。すなわち、貫通力は燃料液滴の平均質量に比例するため、燃料の密度が低下することで貫通力が低下し、それにより、噴射ノズル近傍に過濃な混合気領域が生成され、比較的低温の低い燃料過濃領域で生成するPMが増加したと考えられる。

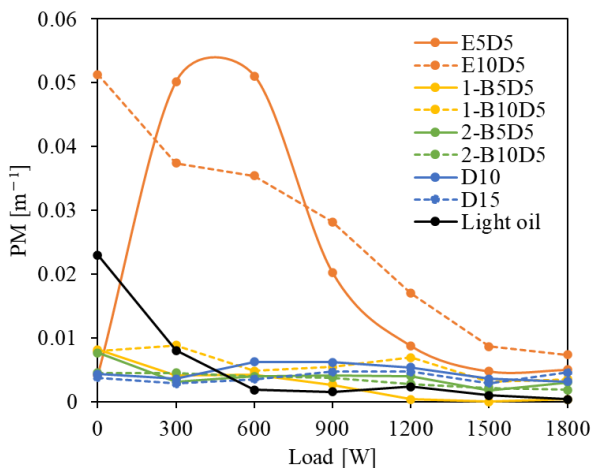


Fig. 10 PM emissions (blended fuels of DMC and alcohol)

### (3) DMC 及びアルコール混合燃料とアルコール混合燃料の比較

図11にエタノール混合燃料とエタノール及びDMC混合燃料のCO, HC, NO, PMの排出量を示す。この図から明らかに、エタノール及びDMC混合燃料であるE5D5の方がエタノール混合燃料であるE10よりCO, HC, NO, PMの排出量が増加する傾向が確認された。また、E10D5を用いた場合もE15と比較すると同傾向が観察された。これは、DMCの沸点がエタノールより高いためと考えられる。明光在らは、多成分燃料の実験から高沸点成分が多く含まれる燃料のほど、噴霧中の燃料高濃度領域の増大を確認している<sup>[5]</sup>。これから、エタノール及びDMC混合燃料を用いた場合、エタノール混合燃料より噴霧の高濃度領域が増大すると推測される。更に、エタノール及びDMC混合燃料の拡散混合がエタノール混合燃料より減少したと考えられる。空気との拡散混合が減少すると、吸入した空気中の

酸素の燃焼割合が低下し、酸素不足による不完全燃焼割合が増加することで、COとHCの排出量が増大したと考えられる。また、拡散混合が減少すると、可燃範囲の混合気が形成されるまでの期間が増加し、物理的な着火遅れ期間が増加する。すなわち、着火遅れ期間の増加が急激な温度上昇を発生させ、そのため、NOの排出量が増加したと考えられる。一方、PMは燃料過濃領域に生成するため、エタノール及びDMC混合燃料のPMの排出量が増加したと推測される。

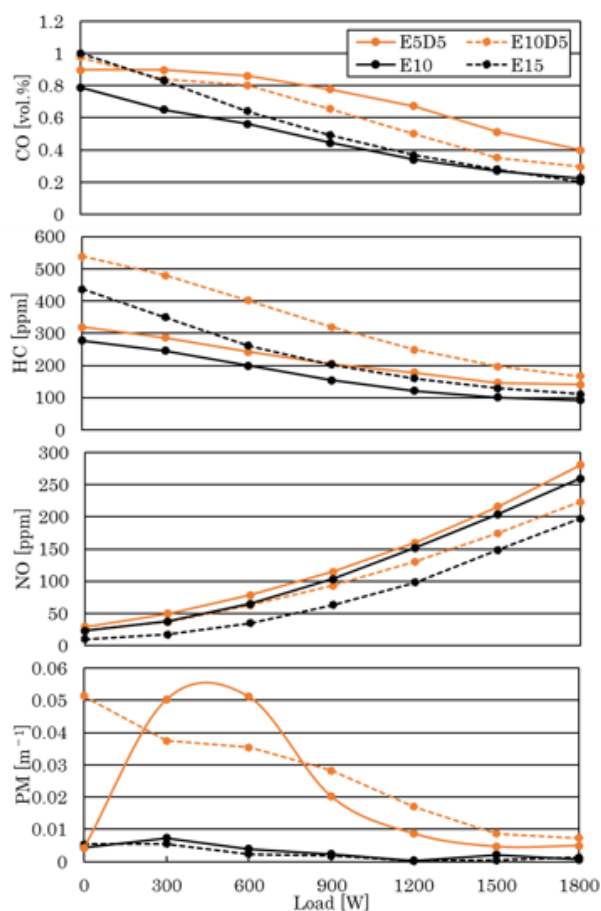


Fig.11 Exhaust emissions (DMC and ethanol)

図12に1-ブタノール混合燃料と1-ブタノール及びDMC混合燃料のCO, HC, NO, PMの排出量を示す。図12から分かるように、1-B5D5のCO及びHCの排出量が1-B10より増加した。DMCの着火性が1-ブタノールより低いため、1-B5D5の着火性は1-B10より低下すると推測される。すなわち、着火性の低下が着火遅れ期間を増加し、多量の燃料の急速燃焼による酸素不足が増加することで、1-B5D5のCO及びHCが増加したと考えられる。一方、1-B10D5のNOの排出量が1-B15より増加した。これは、燃料の着火性低下による着火遅れ期間の増加のためと考えられる。また、1-ブタノール及びDMC混合燃料である1-B5D5の方が1-ブタノール混合燃料である1-B10よりPMの排出量が減少する傾向があった。また、1-B10D5を用いた場合も1-B15よりPMが減少している。これは、DMCの含酸素

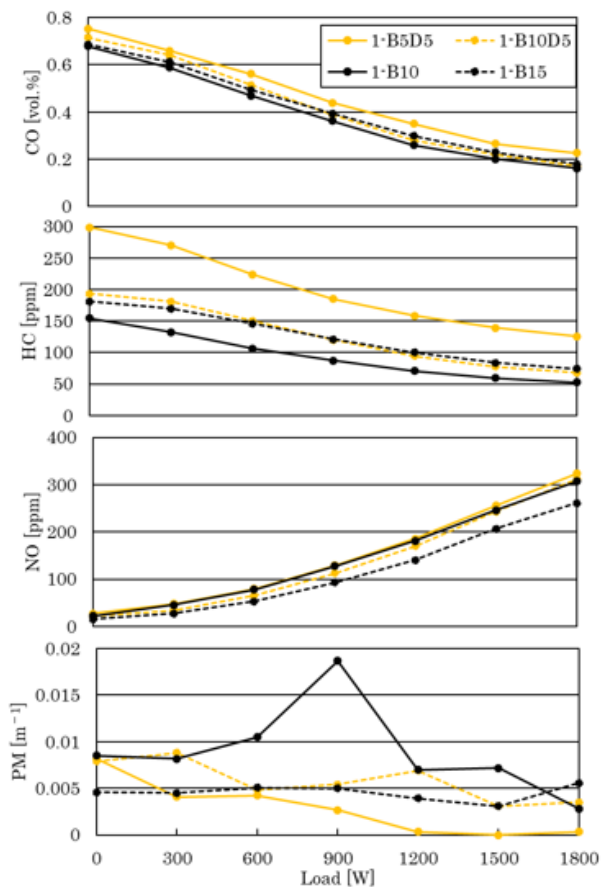


Fig.12 Exhaust emissions (DMC and 1-butanol)

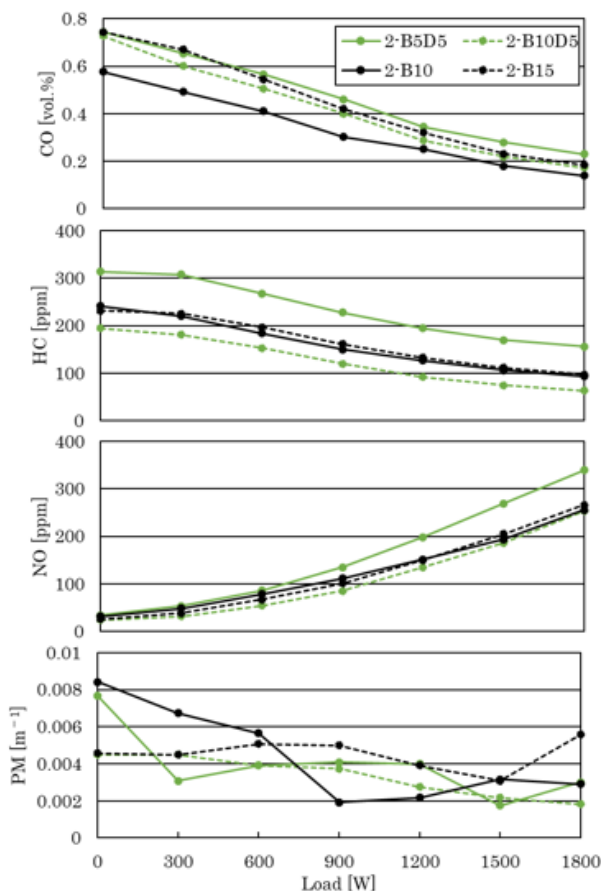


Fig.13 Exhaust emissions (DMC and 2-butanol)

率が1-ブタノールより高いためと考えられる。

図13に2-ブタノール混合燃料と2-ブタノール及びDMC混合燃料のCO, HC, NO, PMの排出量を示す。図13から明らかに、2-B5D5のCOとHCの排出量が2-B10より増加した。これは、DMCの発熱量が2-ブタノールより低いためと考えられる。また、2-B5D5のNOの排出量が2-B10より増加した。これは、DMCの着火性が2-ブタノールより低いためと推測される。一方、2-B10D5と2-B15を比較すると、2-B10D5のHC及びPMの排出量が2-B15より減少する。これは、DMCの酸素率が2-ブタノール高いため、酸素不足による生成するHC及びPMの排出量が低減したと考えられる。

#### 4. 結論

本研究では、炭酸ジメチル (DMC) 混合燃料、バイオアルコール (エタノール, 1-ブタノール, 2-ブタノール) 燃料, 及び炭酸ジメチル燃料にアルコールを添加した燃料を用い、ディーゼル機関の燃焼生成物 (CO, HC, NO, PM) に及ぼす燃料性状 (混合割合) および機関負荷の影響に関する検討を行った。以下に結論を示す。

- (1) 負荷が増加すると、各燃料のCOとHCの排出量が減少し、NOの排出量は増加する。
- (2) アルコール混合燃料もしくはアルコール及びDMC混合燃料を用いた場合、軽油単体燃料よりCOとHCの排出量が増加し、NOの排出量は低減する。
- (3) エタノール混合燃料をブタノール (1-ブタノール, 2-ブタノール) 混合燃料と比較すると、COとHCの排出量が増加し、NOとPMの排出量が減少する傾向がある。
- (4) エタノール及びDMC混合燃料を用いた場合、ブタノール (1-ブタノール, 2-ブタノール) 及びDMC混合燃料よりCO, HC, PMの排出量が増加する。
- (5) エタノール及びDMC混合燃料を用いた場合、エタノール混合燃料よりCO, HC, NO, PMの排出量が増加する。
- (6) ブタノール (1-ブタノール, 2-ブタノール) 及びDMC混合燃料を用いた場合、ブタノール混合燃料と比較すると、PMの低減効果が発生する。

**謝辞:** 本研究の遂行にあたり、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、エネルギー変換研究室の皆様には、本研究の遂行にあたり多大なご助言、ご協力頂きました。ここに感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 河辺隆夫, 井ノ上和憲, 森一磨, 石川友貴, 小橋好充, 柴田元, 小川英之: 含酸素燃料によるディーゼル燃焼の高効率・低エミッション化, 自動車技術会

論文集, 53(6), pp.1160-1165, 2022

- 2) 木下英二, 伏見和代, 笹川裕樹, 尾堂裕之: 2-ブタノール/軽油およびイソブタノール/軽油のディーゼル燃焼特性, 自動車技術会論文集, 44(5), pp.1181-1185, 2013
- 3) 越川翔生, 松村恵理子, 千田二郎: 蒸発場における次世代型バイオディーゼル燃料の噴霧特性に関する研究, 自動車技術会論文集, 52(5), pp.1053-1058,

2021

- 4) 下川舟, 川上忠重: 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, 法政大学大学院理工学研究科修士論文, 2016
- 5) 明光在, 鈴木浩高, 千田二郎, 藤本元: 多成分燃料の噴霧挙動に関する研究 (第2報, 蒸発噴霧における多成分燃料の液相内部構造の解明), 日本機械学会論文集B編, 71(708), pp.2200-2205, 2005