

報告

廃食用油メチルエステルを燃料としたディーゼル自動車の排出ガス特性

中澤 誠, 鷺山享志, 鈴木正明, 長谷川敦子  
(大気環境部)

Note

Exhaust Emissions of Waste Plant Oil Methyl ester as Diesel Fuel

Makoto NAKAZAWA, Takashi SAGIYAMA, Masaaki SUZUKI, Atsuko HASEGAWA  
(Air Quality Division)

キーワード：廃食用油, メチルエステル, ディーゼル自動車, 排出ガス

1. はじめに

国内における天ぷら油等廃食用油の発生量は、年間40万トン程度と推測されている<sup>1)</sup>。この内、外食産業や事業所等から発生する量は20万トン程度とされ、大部分が回収され家畜の飼料や石鹼の原料等に再利用されている。しかし、近年、国内における廃食用油の需要は海外からの安い油脂や製品の輸入量が増加するのに伴い、減少傾向にあるといわれている。また、家庭から発生する廃食用油の量はおよそ20万トン程度と推測されているが、そのほとんどが回収されず、ごみとして焼却されたり、あるいは生活雑排水中に捨てられ水質汚濁等環境汚染の原因となっている。

従って、今後、外食産業や一般家庭から発生する廃食用油を回収、再資源化を推進していくために、従来の用途に加え新たな用途を開発する必要がある。また、その再資源化が安定して継続されるためには、開発される製品は付加価値が高いことが一つの条件となり、その用途としてはディーゼル車の燃料としての利用が有望とされている<sup>2)</sup>。

植物油をディーゼルエンジンの燃料として利用するための研究は、海外で古くから行われており、植物油の高粘度等の問題点を解決するために植物油をメチルエステル化処理して使用する方法<sup>3), 4)</sup>が検討され、このメチルエステルの製造プラントは、現在、フランス、ドイツ等の欧州諸国や米国において建設されている<sup>5)</sup>。

日本では、このような未使用の植物油をディーゼル車の燃料とする動きは見られないが、廃食用油を同様にメチルエステル化処理した燃料（以下、「エステル燃料」という）を使用する研究が始められている。

一方、都市域においては自動車排出ガス、特にディーゼル車による大気汚染の改善が大きな課題となっていることから、エステル燃料を使用する車両についても、既存のディーゼル車よりもその排出ガス性状が劣

らないこと、あるいはより低公害性を有することが必要になってくるものと考えられる。

しかし、エステル燃料を実車に使用した時の排出ガス性状については測定例が少なく、実態はほとんど明らかにされていない。

そこで、本稿では、エステル燃料をディーゼル車に使用したときの排出ガス特性について実験した結果を報告する。

2. 実験方法

2.1 試験燃料及び供試車両

試験に用いたエステル燃料は、コダマ油化工業株式会社製の廃食用油から製造されたエステル燃料であり、その性状を表1に示す。また、比較のために市販軽油についても試験を行った。

表1 メチルエステル燃料の性状

密度	(g/cm <sup>3</sup> )	0.8917
引火点	(°C)	150
動粘度	(mm <sup>2</sup> /s)	6.154
流動点	(°C)	-2.5
目詰まり点	(°C)	-7
10%残留炭素分	(%)	2.25
セタン指数		49.8
元素組織	(wt %)	
炭素		74.9
水素		11.4
酸素		13.9
硫黄分	(ppm)	10
蒸留性状	(°C)	
初留点		231.0
5%		327.5
10%		329.0
20%		332.5
30%		334.0
40%		335.0
50%		335.5
60%		336.5
70%		336.5
80%		337.0
90%		—
終点		—

試験車両は、副室式ディーゼル車1台と直接噴射式ディーゼル車2台であり、表2にその主要諸元を示す。

なお、試験のためのエンジン等の調整は行わなかった。

表2 試験車両主要諸元

項目	A車	B車	C車	
通称名	いすゞエルフ	日産アトラス	トヨタダイナ	
型式	KAD41	U-SG2H41	U-BU66	
車両重量 (kg)	1440	2140	2040	
車両総重量 (kg)	3105	4305	4205	
乗車定員 (人)	3	3	3	
最大積載量 (kg)	1500	2000	2000	
既走行距離 (km)	20069	47779	27612	
エンジン	型式	C190	FD42	14B
	総排気量 (cc)	1951	4214	3660
	燃焼室形式	副室式	直接噴射式	直接噴射式
	圧縮比	20.0	18.2	18.0
	最大出力 (ps/rpm)	62/4400	125/3200	115/3400
	最大トルク (kgm/rpm)	12.5/2200	3.05/2000	27.0/1800
	過給機	なし	なし	なし

## 2.2 排出ガスの採取、分析方法

排出ガスの採取、分析方法は「ディーゼル自動車10・15モード排出ガス測定技術基準」に準じて行った。すなわち、試験車両をシャシダイナモメータ（明電舎製直流型）上で走行させたときの排出ガスを定容量採取装置（堀場CVS-9300T）に導入し、その希釈された排出ガスを連続分析計（堀場MEXA-9400D）を用いて、窒素酸化物（NO<sub>x</sub>）は化学発光法、炭化水素（HC）は加熱式水素炎イオン化検出法、一酸化炭素（CO）と二酸化炭素（CO<sub>2</sub>）は非分散赤外線吸収法により測定して排出量を求めた。粒子状物質（PM）は希釈トンネルを用い石英ろ紙（PALLFLEX TX40HI-20-WW 直径47mm）に採取した後、重量法により排出量を求めた。

また、ホルムアルデヒドはSep-Pak DNPHカートリッジに捕集した後、ガスクロマトグラフ法（ヒューレットパッカード 5890SERIES II）により分析した。黒煙濃度は、無負荷急加速時におけるテールパイプ出口部の濃度を、ろ紙反射法（スモークメータ；ジーゼル機器 DSM-10B）により測定した。

燃料消費率は、「ガソリン自動車10・15モード燃料消費試験方法（TRIAS-5-3-1991）」のカーボンバランス法に準じて、次式により求めた。なお、ここで、燃料の比重は軽油が0.835、エステル燃料が0.890、燃料中の炭素の重量割合は軽油が0.866、エステル燃料が0.750、また、排出ガス中炭化水素の炭素の重量割合は、軽油、エステル燃料とも0.866の値を用いた。

$$\text{軽油 } F = 1000 (0.429 \times \text{COmass} + 0.866 \times \text{HCmass} + 0.273 \times \text{CO}_2\text{mass}) / 723$$

$$\text{エステル燃料 } F = 1000 (0.429 \times \text{COmass} + 0.866 \times$$

$$\text{HCmass} + 0.273 \times \text{CO}_2\text{mass}) / 668$$

F：燃料消費率 (cc/km)

COmass：COの排出量 (g/km)

HCmass：HCの排出量 (g/km)

CO<sub>2</sub>mass：CO<sub>2</sub>の排出量 (g/km)

## 2.3 試験走行状態及び積載条件

排出ガスの測定は、定常状態（アイドリング、20、40、60、80km/h）と10・15モード、M-15モードのモード走行について行った。これら走行状態の試験は、いずれもエンジン暖機後に行う試験であるが、一部実験においてはエンジン冷機時の試験であるcoldアイドリング（10分間平均値）とcold M-15モードについても行った。表3に10・15モードとM-15モードの概要を示す。

表3 10・15モード、M-15モードの概要

項目	10・15モード	M-15モード
平均車速 (km/h)	22.7	15.0
最高車速 (km/h)	70	40
走行距離 (km)	4.165	0.563×3
走行時間 (sec)	660	135×3
暖機方法	40km/h	60km/h

試験時の車両の積載条件は、各車両とも最大積載量の1/2積載状態とし、シャシダイナモメータの等価慣性重量は、A車は2300kg、B車とC車は3000kgに設定した。また、M-15モードについては全積載状態においても測定を行った。

## 3. 結果及び考察

表4にエステル燃料使用時と比較のために測定した軽油使用時のA車、B車、C車の汚染物質排出量及び燃料消費率を示す。

エステル燃料の使用によって汚染物質の排出が増減した割合を、次式により変化率として求めた。

$$\text{変化率 (\%)} = 100 (\text{エステル燃料排出量} - \text{軽油排出量}) / \text{軽油排出量}$$

図1にNO<sub>x</sub>、HC、CO、CO<sub>2</sub>排出量及び燃料消費率の変化率の例を、図2に黒煙濃度と粒子状物質排出量の変化率を、図3にホルムアルデヒド排出量の変化率を示す。

### 3.1 窒素酸化物 (NO<sub>x</sub>)

エステル燃料のNO<sub>x</sub>排出量は、軽油使用時の排出量と比較すると、A車とC車では軽油よりも若干多く、B車では若干少ない傾向を示していた。例えば、M-15

表4 エステル燃料等使用時の汚染物質排出量と燃料消費率

項目	走行モード*	A 車		B 車		C 車	
		軽油	エステル	軽油	エステル	軽油	エステル
NOx (g/km)	アイドリング	0.124	0.106	0.332	0.315	0.406	0.401
	20km/h	1.58	1.79	2.31	2.58	2.53	2.48
	40km/h	0.67	0.96	1.75	1.62	1.85	1.89
	60km/h	0.92	1.08	1.62	1.46	1.65	1.64
	80km/h	1.01	1.19	1.71	1.73	1.59	2.06
	10・15モード	1.12	1.18	3.00	2.71	3.10	3.28
	M-15モード	1.27	1.35	3.61	3.42	3.66	4.06
	M-15モード (全積載)	1.33	1.38	3.81	3.65	—	—
	cold M-15モード	1.37	1.42	3.90	3.59	—	—
HC (g/km)	アイドリング	0.017	0.012	0.173	0.056	0.129	0.045
	20km/h	0.24	0.14	3.73	1.96	1.86	1.68
	40km/h	0.10	0.05	0.90	0.46	0.57	0.32
	60km/h	0.39	0.07	0.65	0.36	0.55	0.42
	80km/h	1.00	0.12	0.93	0.63	0.57	0.37
	10・15モード	0.51	0.35	0.93	0.41	0.53	0.41
	M-15モード	0.52	0.35	1.17	0.50	0.82	0.43
	M-15モード (全積載)	0.55	0.44	1.28	0.40	—	—
	cold M-15モード	0.64	0.37	1.28	0.72	—	—
CO (g/km)	アイドリング	0.198	0.234	0.381	0.456	0.381	0.623
	20km/h	1.84	1.45	7.27	4.70	3.96	5.74
	40km/h	0.59	0.34	1.31	1.10	1.29	1.76
	60km/h	0.59	0.33	1.11	0.76	1.19	1.45
	80km/h	0.76	0.42	1.91	0.96	1.36	1.33
	10・15モード	1.16	1.07	1.39	1.21	1.44	1.80
	M-15モード	1.40	1.32	1.87	1.66	1.82	2.34
	M-15モード (全積載)	1.51	1.46	1.90	1.50	—	—
	cold M-15モード	2.22	2.58	4.73	5.51	—	—
CO <sub>2</sub> (g/km)	アイドリング	24.6	24.2	32.9	32.5	32.9	34.7
	20km/h	319	335	444	485	429	439
	40km/h	159	174	188	210	206	210
	60km/h	188	199	199	218	224	200
	80km/h	236	269	254	276	249	255
	10・15モード	293	317	313	290	296	313
	M-15モード	335	345	343	352	349	345
	M-15モード (全積載)	375	393	369	354	—	—
	cold M-15モード	409	422	435	451	—	—
PM (g/km)	アイドリング	0.024	0.014	0.022	0.063	0.017	0.029
	20km/h	0.24	0.19	0.94	2.22	0.45	1.76
	40km/h	0.13	0.07	0.20	0.74	0.16	0.55
	60km/h	0.22	0.14	0.20	0.56	0.26	0.77
	80km/h	0.37	0.16	0.30	0.72	0.24	0.50
	10・15モード	0.29	0.37	0.15	0.55	0.22	0.51
	M-15モード	0.31	0.41	0.24	0.66	0.27	0.63
	M-15モード (全積載)	0.33	0.48	0.31	0.60	—	—
	cold M-15モード	—	—	—	—	—	—
HCHO (mg/km)	cold-アイドリング	6.32	11.7	—	—	—	—
	アイドリング	4.17	3.59	—	—	—	—
	40km/h	13.0	10.5	—	—	—	—
	80km/h	10.7	6.9	—	—	—	—
	M-15モード	67.6	44.3	—	—	—	—
黒煙 (%)	無負荷急加速	13.3	8.5	24.0	10.0	33.0	20.5
燃費 (cc/km)	アイドリング	9.4	10.1	12.9	13.6	12.8	14.6
	20km/h	122	138	176	204	167	185
	40km/h	61	71	73	87	79	87
	60km/h	72	82	77	90	86	83
	80km/h	91	110	98	114	96	106
	10・15モード	112	131	120	120	113	130
	M-15モード	128	142	132	146	134	143
	M-15モード (全積載)	143	162	142	146	—	—
	cold M-15モード	—	—	—	—	—	—

\*アイドリング時の単位：NOx, HC, CO, CO<sub>2</sub>及びPMはg/min、HCHOはmg/min、燃費はcc/min

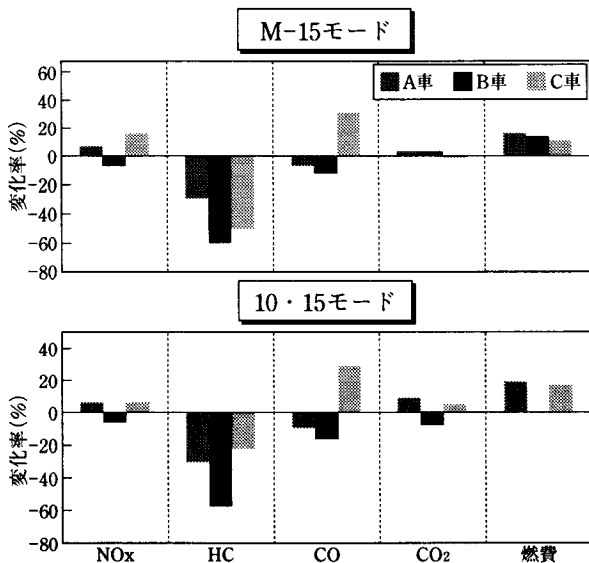


図1 エステル燃料使用時のNOx排出量の変化率

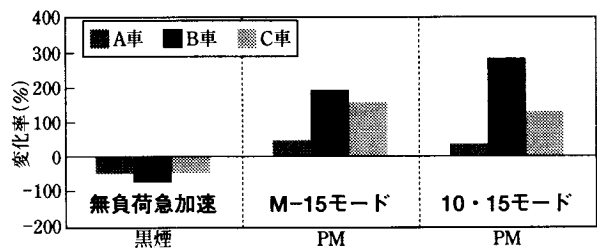


図2 エステル燃料使用時の黒煙濃度と粒子状物質 (PM) 排出量の変化率

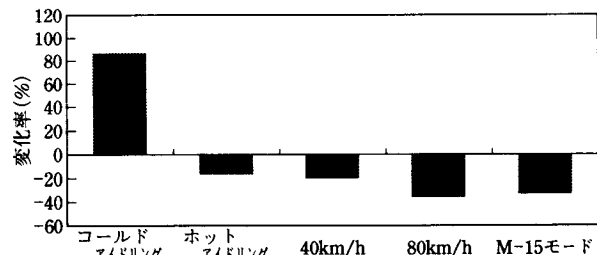


図3 エステル燃料使用時のホルムアルデヒド排出量の変化率

モードにおける変化率は、A車が6%、B車が-5%、C車が11%であり、エステル燃料と軽油とでは大きな相違は認められなかった。

藤原<sup>6)</sup>による廃食用油のエステル燃料をエンジンダイナモメータに用いた実験や、Salvatore alfusoら<sup>7)</sup>による菜種油のメチルエステルをディーゼル自動車に用いた実験では、NO<sub>x</sub>の排出はエステル燃料の方が軽油よりもやや多く、その増加はエンジンの高負荷時に大きい傾向があることを報告している。

本稿の実験では、走行状態は都市内の平均的な走行状態を想定し、そのエンジン負荷は、平坦道路を荷物が最大積載量の1/2状態で走行する比較的低負荷の状態を試験を行ったが、エステル燃料からのNO<sub>x</sub>排出量は軽油よりもやや高めの傾向がみられ、藤原の結果と類似した結果が得られた。しかし、B車のようにエステル燃料の方が軽油よりも若干少ない車両もみられ、車両による相違もあった。

なお、積載状態の相違による排出量の変化を表4のM-15モードについてみると、A車、B車とも全積載時の排出量は1/2積載時よりも若干多かったが、その増加は軽油の同条件における排出量の増加と大きな相違はみられなかった。

### 3.2 炭化水素 (HC)

エステル燃料からのHC排出量は、いずれの車両もほぼ全ての走行状態において軽油よりも少なく、軽油に対する変化率は、M-15モードにおいてA車が-33%、B車が-57%、C車が-35%であった。この低減率は、今回測定した汚染物質の中では黒煙とともに大きかったが、HCが低減した理由としては、エステル燃料がその分子内に酸素を有する含酸素化合物であることに起因していると考えられる。しかしながら、エステル燃料は高沸点成分を軽油よりも多く含むことから、分析計の配管等にHCの一部が吸着されていることも考えられ、分析方法について検討する必要がある。

### 3.3 一酸化炭素 (CO)

CO排出量は、A車、B車では、アイドリングとcold M-15モードを除いた走行状態においては軽油よりも若干少なかった。C車では逆に軽油よりもやや多い傾向がみられた。M-15モードにおける変化率は、A車が-6%、B車が-11%、C車が29%であり、エステル燃料使用時におけるCOの排出は、車両によって減少する車両と増加する車両がみられ、一定の傾向は認められなかった。

### 3.4 二酸化炭素 (CO<sub>2</sub>)

CO<sub>2</sub>排出量は、いずれの車両もエステル燃料と軽油とにおいて大きな相違はみられなかったが、概してエステル燃料の方が高い値を示していた。

M-15モードにおける変化率は、A車が3%、B車が3%、C車が-1%であった。

### 3.5 粒子状物質 (PM)

エステル燃料のPM排出量は、A車では、10・15モード、M-15モード等のモード走行時では軽油よりも多く、40km/h等の定常走行時には軽油よりも少なかった。これに対し、B車、C車では、いずれの走行状態においてもエステル燃料の方が軽油よりも多かった。M-15モードにおける変化率は、A車が32%、B車が175%、C車が133%で、いずれの車両も軽油よりも多く、特にB車、C車における排出量の増加が大きかった。

このように、エステル燃料からの粒子状物質が軽油に比べ多かった原因としては、エステル燃料がエンジン内に噴霧されたときに、表1に示したようにエステル燃料の粘度が高いため微細な粒子になりにくいこと、高沸点成分が多いため気化しにくいことが影響して、燃料の一部が燃焼されずに排出され、これが粒子状物質として測定されていることが推測される。

試験車両のA車は副室式エンジン、B車、C車は直接噴射式エンジンであるが、一般に直接噴射式エンジンは副室式エンジンに比べ燃料性状の影響を受けやすいといわれており、本実験においても直接噴射式のB車、C車が燃料性状の変化の影響をより大きく受けたものと考えられる。

### 3.6 黒煙

エステル燃料の無負荷急加速時における黒煙濃度は、いずれの車両も軽油よりも低く、その変化率はA車が-36%、B車が-58%、C車が-38%であった。

上述したように粒子状物質の排出量はエステル燃料の方が軽油よりも多かったのに対し、この黒煙濃度は少ないという相反した結果が得られたが、これは両者の測定法が異なることに起因していると考えられる。すなわち黒煙濃度はろ紙の黒色度を光反射法で測定するため、黒色の粒子 (dry soot) が主に測定されるのに対し、粒子状物質はdry sootから未燃の燃料や分解生成物等の可溶性有機成分 (SOF) までフィルター上に捕集された全てが測定されているためと考えられる。

エステル燃料からの黒煙濃度が軽油に比べ低かった原因としては、エステル燃料が含酸素化合物であり、エステル燃料の粒子が着火された場合には燃料中の酸

素によって黒煙粒子の生成が抑制されていることが推測される<sup>8)</sup>。

### 3.7 ホルムアルデヒド (HCHO)

ホルムアルデヒド排出量をA車(副室式エンジン)について測定した結果、エンジンが冷えている状態で試験を行うcoldアイドリング(10分間平均値)では、その値はエステル燃料の方が軽油よりも多かった。しかし、エンジンが十分に暖機された状態で試験を開始する通常の走行状態においては、エステル燃料からの排出量は軽油よりも少なかった。

なお、藤原<sup>6)</sup>は副室式エンジンにおけるホルムアルデヒドの排出は、エステル燃料の方が軽油に比べ多い傾向があったことを報告していることから、その排出傾向は同種の副室式エンジンでも車両によって相違することが示唆され、さらに詳細な調査の必要性が考えられた。

### 3.8 燃料消費率

エステル燃料の燃料消費率(走行距離1km当たりの燃料消費量)は、いずれの車両も軽油よりもやや大きかった。軽油に対する変化率は、M-15モードにおいてA車が11%、B車が10%、C車が7%であった。

軽油とエステル燃料の発熱量(低位)はそれぞれ約43100J/gと約37210J/gであり<sup>9)</sup>、エステル燃料における燃料消費率の増加分は発熱量の低下分(13.7%)にほぼ相当していた。

## 4. まとめ

廃食用油のメチルエステル燃料を副室式と直接噴射式エンジンのディーゼル自動車に使用した時の排出ガス特性を測定した結果、次のことが明らかになった。

- (1) メチルエステル燃料を使用した時の排出ガスは、黒煙濃度と炭化水素排出量は軽油使用時よりも低かった。
- (2) 窒素酸化物、一酸化炭素及び二酸化炭素の排出量は軽油使用時の排出量と大きな相違はみられなかったが、窒素酸化物と二酸化炭素については軽油よりも僅かに高い傾向にあり、また、一酸化炭素については一定の傾向は認められなかった。
- (3) ホルムアルデヒドはエンジンが暖機されていない状態では軽油よりも多かったが、エンジン暖機時には軽油よりも少なかった。

- (4) 粒子状物質は軽油よりも多く、特にその傾向は直接噴射式エンジンの車両において顕著であった。

以上のように、植物油燃料であるメチルエステル燃料の排出ガスは、化石燃料である軽油の排出ガスに比べ、粒子状物質を除いては大きな相違はみられなかった。粒子状物質については、今後、その低減方法を検討する必要があるが、これは既存の技術で対応が可能と考えられる。

エステル燃料の実用化にあたっては、まだ多方面からの検討が必要であるが、排出ガスの面からは、エステル燃料は実用化の可能性が高い燃料と考えられる。

## 5. 謝辞

本実験にあたって、(財)政策科学研究所が実施している「廃食用油需要開拓推進事業」において作製されたエステル燃料及び性状分析結果を当研究所から提供いただきました。ここに感謝申し上げます。また、実験を進めるにあたって、御助言、御教授をいただきました北海道自動車短期大学の村山正教授、北海道工業大学の藤原康博教授、日本石油株式会社中央技術研究所の関本正則氏、神奈川県環境部大気保全課の皆様にお礼申し上げます。

### 参考文献

- 1) 油脂、47(3)、(1994)。
- 2) 政策科学研究所：平成6年度廃食用油需要開拓緊急推進事業研究成果報告書(1995)。
- 3) G. H. Pischinger, R. W. Siekmann, A. M. Falcon: Proc 19 Int FISITA Congr, 39.1-39.6 (1982)。
- 4) John Einfalt, Carroll E. Goering: TRANSACTION of the ASAE, 70-74 (1985)。
- 5) INFORM, Vol. 7, No. 8, 801-815 (Aug. 1996)。
- 6) 藤原康博：廃食用油リサイクルセミナー、15-20 (1996)。
- 7) Salvatore Alfuso: SAE paper 932801 (1993)。
- 8) 村山 正：廃食用油リサイクルセミナー、1-6 (1996)。
- 9) 中澤 誠：第36回大気環境学会年会講演要旨集、349 (1995)。