

# 低温下における建設施工の環境負荷に関する検討 —積雪寒冷地におけるバイオディーゼル燃料の適用性調査 (その2) —

(独) 土木研究所寒地土木研究所 寒地機械技術チーム ○ 平 伴齊  
国島 英樹  
長瀬 禎

近年、軽油に変わるディーゼルエンジンの燃料として、バイオディーゼル燃料が注目されている。この燃料は、植物由来の燃料であることから、カーボンニュートラルとされており、更にPM（粒子状物質）などの排出が少ないクリーンエネルギーであるが、寒冷地における低温特性や出力特性など不明な点が多い。

本報告では、除雪車両などにバイオディーゼル燃料を使用し、低温特性や出力特性などの調査を実施したので、その結果を報告するものである。

キーワード：環境、バイオディーゼル、リサイクル、CO<sub>2</sub>

## 1. はじめに

2009年9月ニューヨークにて開かれた国連気候変動サミットにおいて、日本は「2020年までに温室効果ガスを1990年比で25%削減する。」旨を表明した。

また、この目標に向け、政府は「あらゆる政策を総動員して実現を目指す。」意向であるが、更に地球温暖化抑制や低炭素化社会実現に向けた技術革新が必要である。

こうした背景により、CO<sub>2</sub>排出量を抑制する手段として化石燃料を使用しないバイオディーゼル燃料が世界的に注目されている。

しかし、バイオディーゼル燃料の基本特性や出力特性、積雪寒冷地などにおける適応性について、未知な部分が多いため普及促進に至っていない。

そこで、積雪寒冷地での普及を図るためのマニュアル整備を目的として、バイオディーゼル燃料使用時における除雪車等の出力特性や冬期間使用における影響について調査検討を行った。

## 2. バイオディーゼル燃料の基本特性について

国内のバイオディーゼル燃料は、植物油・動物油などの廃油を主な原料として精製されている。精製は、図-1に示す「アルカリ触媒法」によって軽油に近い性状に精製する方法が、最も普及している。

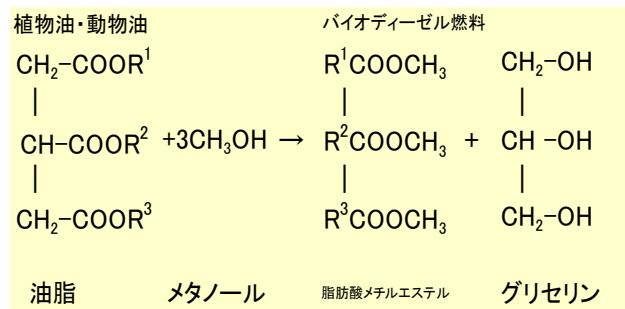


図-1 アルカリ触媒法（油脂のエステル反応）

アルカリ触媒法とは、メタノールなどのアルコール類を触媒として反応させることによって、原料油脂より流動性低下などの原因となるグリセリンを取除き、油脂を脂肪酸メチルエステル (Fatty Acid Methyl Ester) の頭文字を取って FAME、以下 FAME) と呼ばれる燃料に変換することで、ディーゼル機関用の燃料として使用可能となる。

FAME には、以下に示す長所・短所がある。

### (1) FAME の長所

①FAME 燃料の主原料は、菜種、大豆、オリーブ等の植物油や動物油脂の廃油であるため、生育過程にてCO<sub>2</sub>を吸収していることになる。よって、これらを燃焼しCO<sub>2</sub>を排出しても、元は植物が吸収したCO<sub>2</sub>であることからカーボンニュートラルであり、CO<sub>2</sub>の排出量にカウントされない。

②元々廃棄物を原料としているため、リサイクル促進につながり循環型社会の形成に寄与できる。

③毒性が少なく、生分解性を有しているため、環境に調和することが可能である。

④大部分のディーゼル機関に改造を加えず使用可能である。<sup>1)</sup>

⑤軽油に比べ、含酸素燃料であるため着火性に優れ、完全燃焼しやすい。

⑥軽油よりも硫黄分が少ないため、喘息や酸性雨の原因物質である硫黄酸化物(SO<sub>x</sub>)を削減できる。<sup>1)</sup>

⑦エステル化した FAME は、潤滑油として使用される程潤滑性が良い。そのため、軽油より潤滑性が向上する。

⑧販売価格は、軽油と同程度又は若干安く販売されている。

## (2) FAME の短所

①FAME は、改正揮発油品質法（以下、品質法）、道路運送車両法、オフロード法、地方税法などの適用を受ける。品質法では、軽油に対して5%を超えての混合ができない。（但し、100%使用については規制が無い）

②軽油に FAME を5%以上混合する場合には、燃料フィルターの目詰まりや燃料ホースの膨張による漏れなどが起きる可能性がある。

③DPF(Diesel Particulate Filter) などの触媒を有する車両は、目詰まりを起こすため使用できない可能性が高い。

④主原料が廃食油であるため、一定の品質確保や安定した原材料の確保が難しい。

⑤主原料が植物油・動物油であるため、酸化しやすい。

⑥低温時には、流動性が悪く、最悪の場合にはエンジン始動不能となる。

⑦低温時における始動性や機関出力などの機械特性が異なる。

## 3. 除雪車等における出力特性

除雪車等における低温下での FAME 使用時には、流動性が悪く、軽油よりも低出力になる可能性があることから、FAME の基本性能把握のため、FAME100(B100)を除雪車等に使用し、軽油との比較試験を行った。

なお、各試験に使用した車両諸元を表-1に示す。

表-1 各種試験車両・諸元

	除雪トラック1	除雪トラック2	除雪ドーザ	乗用車
写真				
車両総重量	18,750kg	23,520kg	13,660kg	2,720kg
総排気量	16.99L	21.20L	6.48L	2.83L
長さ	1198cm	1000cm	780cm	461cm
幅	330cm	330cm	370cm	169cm
高さ	339cm	345cm	348cm	199cm
エンジンタイプ	Diesel	Diesel	Diesel	Diesel
初年度登録	1993	1994	1991	1995
Max. Power	261kW	308kW	118kW	92kW
使用試験	・加速試験 ・始動性試験	・粒子状物質測定試験 ・燃料温度計測試験 ・燃料消費量計測試験	・加速試験 ・始動性試験 ・牽引力試験	・乗用車クラスによる馬力・トルク計測

### (1) 除雪トラック・ドーザによる加速試験

走行時における出力特性調査として、軽油と道内バイオディーゼル燃料製造会社3社のFAMEを用いた追い越し加速試験を実施し、FAMEにおける基本特性の検証を行った。

試験方法は、追い越し加速を想定し、スタート地点より加速を開始した車両が、任意の設定速度に達した地点より70m走行後地点までの速度・時間を計測し、加速度を算出した。

試験方法を図-2、算定式を(1a)、試験結果を図-3に示す。

図-3より、除雪トラックの加速度は変わらないが、除雪ドーザの加速度は軽油よりも若干上回っていることが確認された。

また、除雪トラックの70m地点速度では、軽油使用時48.2km/hに対し、FAMEは、3種ともに軽油使用時とほぼ同等の速度であった。

一方、除雪ドーザの70m地点速度は、軽油使用時約21.4km/hに対し、FAME3種の70m地点速度が約1~3km/h上昇していることが確認された。

よって、FAME 使用時における加速性能は、軽油と比較し、同等以上であると判断される。

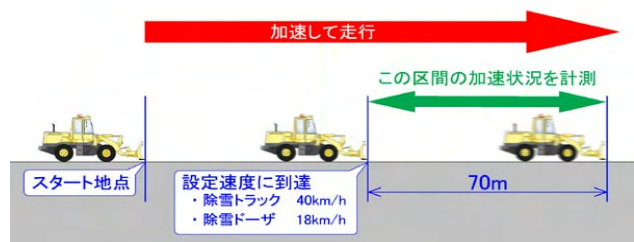


図-2 加速試験方法

$$a = (V - V_0) / t \quad (1a)$$

a : 加速度 (m/s<sup>2</sup>)

V : 70m 地点速度 (km/h)

V<sub>0</sub> : 0m 地点速度 (km/h)

t : 70m 地点に到達した時間 (s)

れる。



写真-1 出力・トルク計測状況

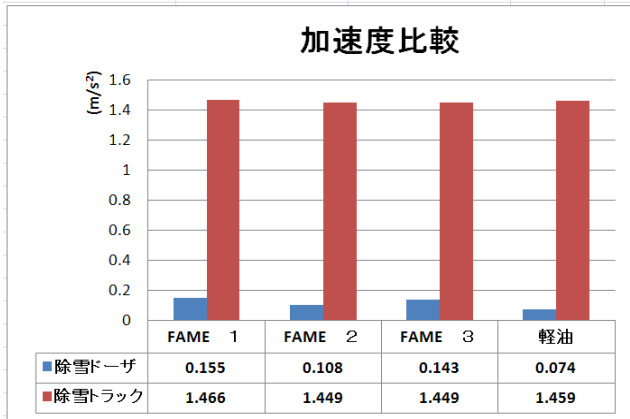


図-3 加速度

### (2) 乗用車クラス車両による出力・トルク計測試験

前述の加速試験では、軽油よりもFAMEの加速が同等以上になることが確認されたが、数値による実際の機関出力が不明である。

このため、軽油と2社のFAMEを用いた出力・トルク計測試験を行った。

機関出力は、道内に大型車対応シャシーダイナモメータが無かったため、乗用車クラスによる機関出力を計測した。計測状況を写真-1、出力・トルク曲線を図-4に示す。

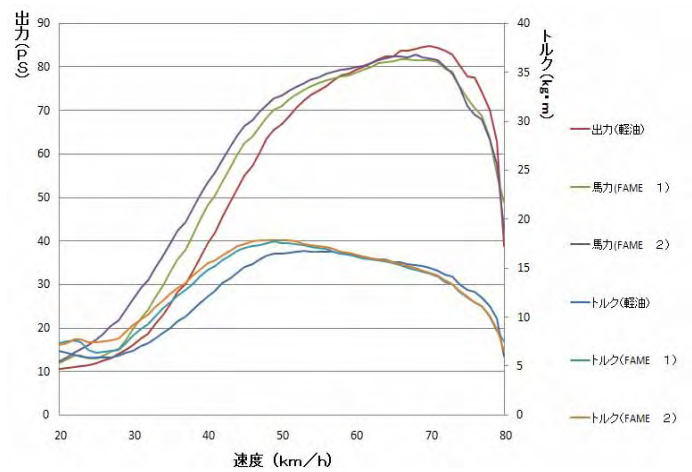


図-4 出力・トルク曲線

この結果、30km/h時における最大出力は、軽油11.8kW(16.1ps)に対し、FAME 1、FAME 2の平均出力は、17.0kW(23.1ps)と4割程度高くなったことが確認された。

また、50km/h台後半までは、FAME 1、FAME 2が軽油よりも高い値を示すが、その後の最大出力はFAME 1、FAME 2の平均が60.6kW(82.4ps)に対し、軽油が62.4kW(84.9ps)と3%軽油が上回る結果となった。

出力が向上する原因として、FAMEは廃食油をメチルエステル化した燃料であり、金属表面にエステル基が吸着し、潤滑性が向上する特性があるため<sup>2)</sup>と推測される。

さらに、図-4、表-2より、FAME特有の潤滑性によって噴射ポンプやノズルの噴射量が多くなる中回転域までは、軽油よりも立ち上がりが早くなるが、最大出力では発熱量の多い軽油が勝ることが考えら

表-2 燃料発熱量<sup>3)</sup>

項目	軽油	FAME
発熱量(kcal/kg)	10,600	9,000

### (3) 除雪ドーザによる牽引力試験

実際の除雪作業時における最大出力の影響について高負荷作業時を想定し、軽油及び2種のFAMEを用いて牽引力試験を行った。

計測方法は、地面に固定されたアンカーにワイヤーロープを掛け、ロードセルを介して、除雪ドーザにて牽引力計測を行った。試験概要図を図-5に、結果を図-6に示す。

図-6より、FAME 2、FAME 3はいずれも、軽油に対して、牽引力が1~2%高い数値を示した。

原因として、前項にて記したように、噴射ポンプ内やノズルの燃料ラインが、燃料によって潤滑されるため、潤滑性が向上して燃料噴射量が増加し、わ

ずかではあるが、出力が向上したものと考えられる。



図-5 牽引力試験概要図

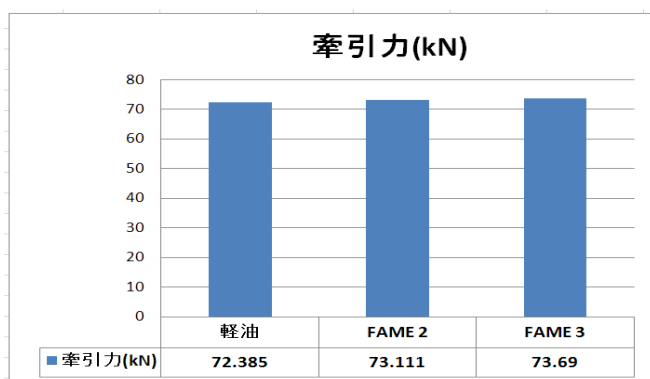


図-6 牽引力試験結果

#### (4) 粒子状物質 (PM) 測定試験

除雪トラックにおける排出ガスが環境に対する影響を確認するため、FAME 及び軽油を用いた粒子状物質 (PM: 黒鉛) 測定を行った。結果を図-7 に示す。

計測試験は、表-1 の除雪トラック 2 を対象とし、オパシメータを用いて、軽油との比較測定を行った。

光吸収係数が規定値  $2.76\text{m}^{-1}$  に対して軽油が約 20% の値を示したが、FAME は約 8% であり、FAME を使用した方が軽油より 12% 程度クリーンな値であることがわかった。

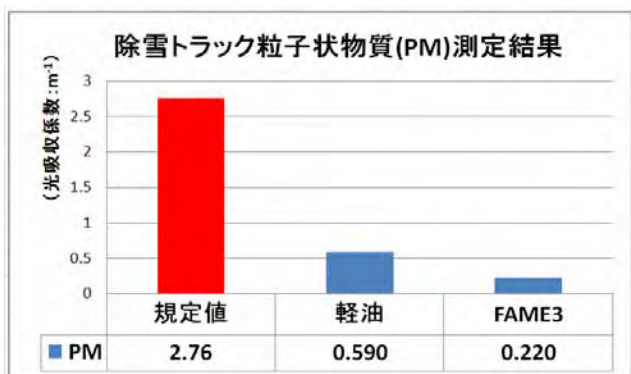


図-7 オパシメータによる排出ガス計測結果

#### 4. 積雪寒冷地における適応性試験について

FAME は、低温下における使用について、軽油と比較し低温流動性が悪い点や機開始動性が劣るなどいくつかの劣勢点がある。

特に燃料温度の低下とともに流動性の低下が顕著となるため、低温下での使用にあたっては、燃料フィルターの目詰まりなどの不具合が考えられる。

そこで、FAME を低温下で長期的に使用した場合における機械的影響、温度特性、燃料消費量を測定するため、以下の試験を行った。

1. 機開始動性試験
2. 気温及び燃料温度計測試験
3. 長期使用時における燃料消費量計測試験

##### (1) 機開始動性試験

低温下における始動性を確認するため、ストップウォッチ手動計測による始動性試験を 3 回計測し平均値を算出した。結果を表-3 に示す。

除雪ドーザでは、ほぼ同程度の計測時間であったが、表-1 の除雪トラック 1 では、気温条件が違うものの、FAME 2 の方が軽油に比較して 4 秒程度始動が遅れる結果となった。

また、表-1 の除雪トラック 2 に FAME 2 を給油し、試験前に機開始動を試みたが、平成 22 年 2 月 4 日外気温  $-14.7^{\circ}\text{C}$  時に一度始動不可能となった。

この時、燃料及び燃料フィルターの確認を行った結果を写真-2、3 に示す。

燃料フィルターは、ヘドロ状の白いグリセリンが溝に付着し、目詰まりとなっていたため、燃料タンク内の燃料 (写真-3 左) を抽出し、常温にて保存していた同燃料 (写真-3 右) と比較した結果、透明度が失われていた。

この時のタンク内燃料温度は  $-10^{\circ}\text{C}$  であり、FAME 2 内の物質が結晶化して透明度や流動性が失われることがわかった。

結果として、FAME 2 が燃料フィルターなどで目詰まりを起こし、エンジン内まで到達できなくなるため、機開始動不可能となったものである。これらの対策法として、車両を車庫にて保管することや、燃料タンクの加温装置など何らかの対策が必要である。

表-3 始動性試験

	除雪ドーザ		除雪トラック1	
	軽油	FAME2	軽油	FAME2
外気温(°C)	-1.3	-1.6	0.5	-1.6
始動時間(SEC)	1.6	1.5	2.8	6.9



写真-2 始動不能時の燃料フィルター及び燃料(FAME2)の状態



写真-3 温度による燃料(FAME2)の状態変化

## (2) 曇り点確認試験

前述にて、FAME2を使用した除雪トラックの燃料温度が $-10^{\circ}\text{C}$ にてエンジン始動不可能であることが解ったが、燃料タンク内であるため、実際の曇り点温度（以下曇り点）が不明である。そこで、この燃料（FAME2）を採取し、冷凍庫にて $1^{\circ}\text{C}$ ずつ冷却を行った結果、完全に燃料が曇る燃料温度（以下曇り点）が $-6.5^{\circ}\text{C}$ であった。変状があった温度変化の写真写真-4、5に示す。

曇り点確認試験マイナス方向の $0^{\circ}\text{C}$ では、透明であったが、温度低下とともに白濁し、 $-6.5^{\circ}\text{C}$ では、完全に曇っていることが確認された。

また、曇り点確認試験プラス方向では、燃料温度上昇とともに上層より次第に透明になっており、完全に曇りが消える燃料温度は、 $+0.5^{\circ}\text{C}$ であった。

よって、燃料の性状にもよるが、燃料温度が $-5^{\circ}\text{C}$ 以下に冷却された燃料は、曇り点が発生し、燃料フィルターの目詰まりなどの原因となる。

さらに一度冷却され、完全に曇り点に達した燃料は、燃料温度が上昇しても曇り点に戻りにくいため、 $-5^{\circ}\text{C}$ 以下の燃料温度になる時には十分な対策が必要である。



$0^{\circ}\text{C}$      $-3.0^{\circ}\text{C}$      $-5.0^{\circ}\text{C}$      $-6.0^{\circ}\text{C}$      $-6.5^{\circ}\text{C}$

写真-4 曇り点確認試験（マイナス方向）



$-7.0^{\circ}\text{C}$      $-5.0^{\circ}\text{C}$      $-3.0^{\circ}\text{C}$      $+0.5^{\circ}\text{C}$

写真-5 曇り点確認試験（プラス方向）

## (3) 燃料温度計測試験

積雪寒冷地にて FAME を使用する際には、機関始動後であっても、冷気に曝されている。このことで、燃料が結晶化し、エンジンストールを発生する可能性があるため、実作業時における外気温及び、燃料温度計測確認試験を行った。図-8に結果を示す。

気温がほぼ一定であるのに対して、燃料温度は、時間の経過とともに上昇していることが確認された。

エンジンの構造において、燃料はタンクよりエンジン内へポンプにて圧送られ、使用されなかった余剰燃料がタンク内へ戻る構造である。エンジン熱を吸収した余剰燃料により、タンク内の燃料温度が上昇するため、機関始動後は外気温による影響がほとんどないことが確認された。

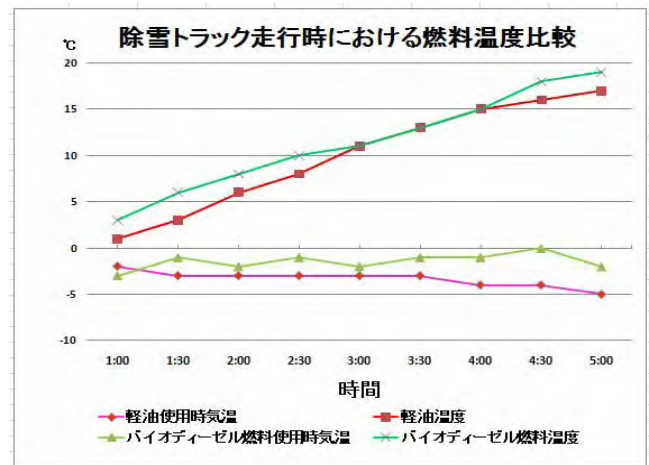


図-8 外気温と燃料温度の比較

#### (4) 長期使用時における燃料消費量計測試験

FAME は、軽油よりも発熱量が低く、燃料消費量が増す可能性があるため、実際の除雪作業時における軽油及び FAME を使用した場合の燃料消費量について調査を行った。

試験では、表-1 の除雪トラック 2 に流量計を設置し、冬期積雪期間に FAME を約 2 ヶ月間、軽油を約 1 ヶ月間使用した平均燃費 (km/ℓ) を比較した。流量計を写真-6 に燃料消費量の比較を表-4 に示す。

1 日当たりの降雪量や作業内容などの違いがあるが、FAME における平均燃費 (km/ℓ) は、28%悪化していることが確認された。

また、機関始動後、エンジン熱を吸収した FAME は、作業時間の経過とともに流動性が向上し、FAME 特有の潤滑性向上効果によって、エンジン筒内に軽油よりも多量の燃料が供給されることが想定される。

このことも、燃料消費量が悪化する要因となっていることが考えられる。

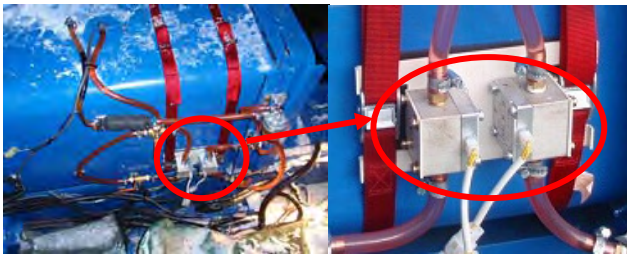


写真-6 流量計

表-4 燃料消費量

	走行距離(km)	消費量(ℓ)	平均燃費(km/ℓ)
軽油	740.2	832	0.89
FAME	665.2	1039	0.64

#### 5. CO<sub>2</sub>削減効果について

FAME は、本来カーボンニュートラルとされており CO<sub>2</sub> 量を排出量を削減できる燃料である。

表-4 より、除雪トラック 2 について、FAME を 1 シーズン通して使用することを想定した、トータルの CO<sub>2</sub> 量は、軽油使用により排出される CO<sub>2</sub> 量が削減量

に相当することから以下のとおりとなる。

① FAME を軽油に置き換えた場合の換算値

$$665.2 \div 0.89 = 747\ell$$

② 1 シーズン通しての CO<sub>2</sub> 換算値

軽油の使用量=832ℓ

軽油 CO<sub>2</sub> 排出係数 2.6kg CO<sub>2</sub> / ℓ

$$(832+747)\ell \times 2.6\text{kg CO}_2 / \ell = 4105\text{kg}$$

上記の削減量 4105kg は、北海道民 1 人当たりの 1 年間に排出する CO<sub>2</sub> 量が約 3 t<sup>3)</sup> とされていることから、その約 1.4 倍の削減量に相当するものである。

#### 6. まとめ

今回の試験結果より、除雪車等に FAME を使用した場合の低温特性や出力特性として以下のことがわかった。

① 車両動力性能は、軽油に比べ遜色が無い

② 二酸化炭素排出量削減効果と合わせ、粒子状物質 (PM) を大幅に削減可能な燃料であり、クリーンエネルギーである。

③ 気温が -5℃ 以下にて使用する場合には、低温流動性が悪化するため、車庫内保管や燃料タンクを加熱するなど何らかの対策が必要である。

④ 燃料発熱量が低いため、軽油と比較し、燃料消費量は悪化する。

今後は、燃料精製技術の向上などによる低温特性向上によって、より多くのバイオディーゼル燃料が普及することに期待したい。

謝辞：調査・試験を行うにあたり、札幌開発建設部・札幌建設運送株式会社・バイオディーゼル製造各社にご協力いただきました。ここに記して厚くお礼申し上げます。

#### 参考文献

- 1) 池上 詢：改訂版 バイオディーゼル・ハンドブック 日報出版 (株) pp.7-8
- 2) 坂 志朗：バイオディーゼルのすべて アイピーシー pp.218
- 3) 環境省新地方公共団体実行計画策定マニュアル等改訂第 2 回検討会、室田委員資料、pp.13