

27. 積雪寒冷地における建設施工のバイオディーゼル燃料適合性調査

(独)土木研究所寒地土木研究所 ○ 平 伴 齊

(独)土木研究所寒地土木研究所 片野 浩司

(独)土木研究所寒地土木研究所 山口 和哉

1. はじめに

現代社会は、18世紀後半に始まった産業革命により発展し、物質面で豊かな生活をもたらした。これは、原油など大量な化石エネルギーの消費によって今日まで支えられてきている。

20世紀後半に入り、大量生産などによってエネルギー需要がますます加速するなか、大量のCO₂などの温室効果ガス排出が一因とされる地球規模での環境破壊が除々に進行し、国レベルでの対策が実施されている。

しかし近年、化石エネルギーを大量に必要とする自動車を始めとする運輸部門の温室効果ガス排出量は増加傾向にあるため、化石燃料を使用せず、CO₂などの温室効果ガスを排出しないクリーンエネルギーや再生可能エネルギーの活用検討が必要となっている。

このような状況から、次期エネルギー候補の一つとして、バイオマスエネルギーが注目されている。バイオマスエネルギーは、カーボンニュートラルとされ、温室効果はゼロカウントであるが、積雪寒冷地におけるバイオディーゼル燃料使用時の出力や始動性などの知見が十分ではない。

そこで、本調査では、代替燃料としてのバイオディーゼル燃料について、1台当たりの排気量の多い除雪車などの大型車両や乗用車を用いて冬期適合性調査を行い、積雪寒冷地における活用について検証した。

2. 積雪寒冷地におけるバイオディーゼル燃料導入

2.1 バイオディーゼル燃料

バイオディーゼル燃料とは、植物・動物油脂を原材料として精製された燃料であり、軽油の代替燃料として使用されている。

国内のバイオディーゼル燃料は、植物油・動物油を原料とし、家庭や事業者より排出された天ぷら油などの廃油を回収し、バイオディーゼル燃料工場で精製されている。このため、一定の材料で

はなく、色や材料の品質が異なっている。

精製方法は数多く存在するが、図-1に示す「アルカリ触媒法」が最も普及している。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、廃食油から流動性低下などの原因となるグリセリンを取り除き、油脂を脂肪酸メチルエステルという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。

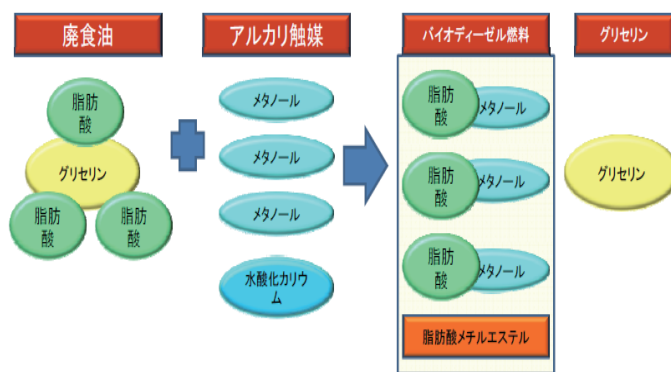


図-1 アルカリ触媒法（油脂のエステル反応）

2.2 バイオディーゼル燃料生産量

2009年世界のバイオディーゼル燃料の生産量は1662万kl¹⁾であるが、我が国の生産量は、0.86万kl²⁾と少ない。

海外では、菜種・パーム・ナンヨウアブラキリなどを栽培しバイオディーゼル燃料として精製している。

しかし、日本のバイオディーゼルは、家庭や事業者より排出された天ぷら油などの廃油を回収後、バイオディーゼル燃料工場で精製されているものがほとんどである。

日本は廃油を用いるため生産量には限界がある。そのため、海外と精製量の違いが発生している。

2.3 調査方針

低温下でのバイオディーゼル燃料使用時には、流動性が悪化し、燃料フィルタなどの目詰まりに

よって、機関が始動不可能となる可能性がある。一方、除雪作業は深夜の作業がほとんどであり、低温下の始動や低温下での高負荷作業を繰り返す行うため、バイオディーゼル燃料使用時には悪条件となる。

本調査では、これらの問題に対して実際にバイオディーゼル燃料100%を除雪車などに用いた各種測定試験を行った。試験に使用した車両及びその諸元を表-1に示す。

表-2は、JIS軽油特3号と実際に使用したバイオディーゼル燃料を比較した結果である。

なお、JISK2390 はバイオディーゼル燃料を軽油に5%混合することを前提したものであり、濃度混合する場合の品質を保証する規格ではない。

表-1 諸元表

	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	18750kg	23520kg	13660kg	2720kg
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
測定試験	・加速試験	・排出ガス計測試験 ・機関始動性試験 ・燃料消費量計測試験	・加速試験 ・牽引力試験	・出力・トルク計測試験

表-2 燃料比較表

分析項目	単位	JIS K2390	バイオディーゼル燃料	JIS 軽油 特3号
エステル分	質量%	96.5以上	92.8	—
密度 (15℃)	g/cm ³	0.860-0.900	0.8834	0.86以下
動粘度 (40℃)	mm ² /s	3.5-5.0	4.576	1.7以上(30℃)
引火点 (PMCC)	℃	120以上	163	45以上
硫黄分	質量%	0.0010以下	0.0003未満	0.001以下
残留炭素分 (10%残油)	質量%	0.3以下	0.39	—
セタン価	—	51.0以上	58.8	45以上
水分	mg/kg	500以下	850	—
酸価	mgKOH/g	0.5以下	0.2	—
メタノール	質量%	0.2以下	0.01	—
モノグリセライド	質量%	0.8以下	0.412	—
ジグリセライド	質量%	0.2以下	0.136	—
トリグリセライド	質量%	0.2以下	0.058	—
遊離グリセリン	質量%	0.02以下	0.005未満	—
全グリセリン	質量%	0.25以下	0.131	—

- ① 動粘度は測定温度が異なるが、2.5 倍以上バイオディーゼル燃料が高い。低温時には軽油より硬くなるためエンジンの始動性が劣る
- ② バイオディーゼルの引火点が軽油の3.6倍高く常温で揮発しにくい

2.4 加速試験

バイオディーゼル燃料を除雪車などに使用すると低出力などが原因により作業遅延が発生し、交通渋滞の原因になるおそれがある。そのため、走行時における出力特性調査として、軽油とバイオディーゼル燃料を用いた加速試験(表-3、写真-1)を実施し、基本特性の検証を行った。

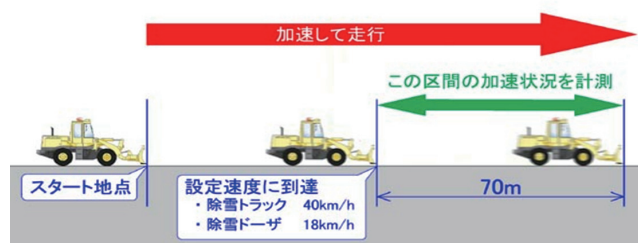
試験方法は、図-2 のとおり追越加速を想定し、スタート地点より加速を開始した車両が任意の設定速度に達した地点より 70m 走行後地点までの速度・時間を計測し、加速度を算出した。

表-3 計測条件

車両	除雪ドーザ	除雪トラック
登録年度	H3	H5
試験日	12月16日	12月17日
気温	-1.3℃	5.6℃
路面状況	圧雪アイスバーン	ウエット
タイヤ	スパイク	スタッドレス
試験項目	時速18km～ 70m地点までの 追越し加速時間	時速40km～ 70m地点までの 追越し加速時間



写真-1 加速試験



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

a : 加速度 (m/s^2)

V : 70m 地点速度 (km/h)

V_0 : 0m 地点速度 (km/h)

t : 0m～70m に要した時間 (s)

図-2 加速試験方法

図-3 から、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を確認した。

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、バイオディーゼル燃料は、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 70 m 地点速度は、軽油使用時約 21.4km/h に対し、バイオディーゼル燃料の 70m 地点速度が約 1～3km/h 上昇していることを確認した。

バイオディーゼル燃料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できる。

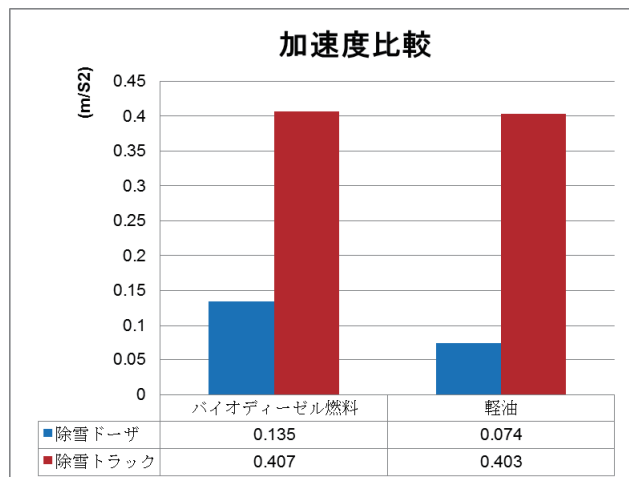


図-3 加速度比較

2.5 出力・トルク計測試験

実際の機関出力を確認するため、軽油とバイオディーゼル燃料を用いた出力・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なかったため、乗用車による機関出力を計測した（写真-2、図-4）。

この結果、30km/h 時における最大出力は、軽油 16.1PS（11.8kW）に対し、バイオディーゼル燃料の平均出力は、23.1PS（17.0kW）と 4 割程度高くなったことを確認した。



写真-2 出力・トルク計測

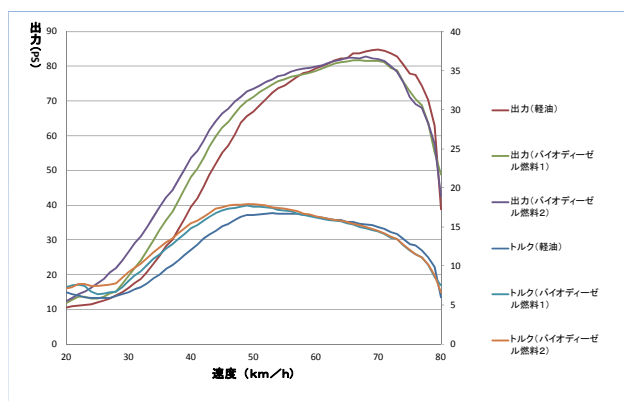


図-4 出力・トルク曲線

また、50km/h 台後半までは、バイオディーゼル燃料が軽油よりも高い値を示すが、その後の最大出力はバイオディーゼルの平均が 82.4PS（60.6kW）に対し、軽油が 84.9PS（62.4kW）と 3% 下回る結果となった。

2.6 牽引力試験

除雪作業時における出力を確認するため、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、軽油とバイオディーゼル燃料を用いて牽引力試験を行った（写真-3）。

計測方法は、図-5 のとおり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。

図-6 より、バイオディーゼル燃料は軽油に対して、牽引力が 1～2% 高い数値を示した。

バイオディーゼル燃料の出力は、軽油と比較し、同等であるといえる。



写真-3 牽引力試験



図-5 牽引力試験概要図

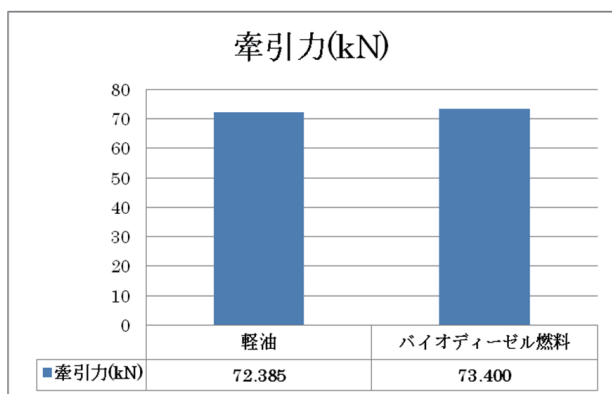


図-6 牽引力試験結果

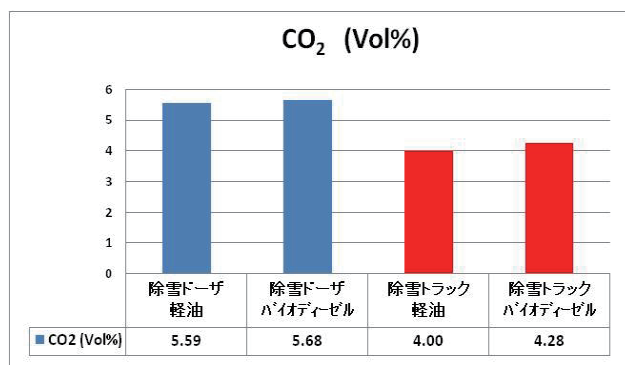


図-8 排出ガス CO₂ 計測結果

2.7 排出ガス計測試験

除雪トラックと除雪ドーザの排出ガスが環境に及ぼす影響や機関燃焼状況を確認するため、バイオディーゼル燃料における排出ガスを計測し成分分析を行った（写真-4）。

その結果、軽油と比較し以下のことが分かった。

- ① 除雪トラック、除雪ドーザとも一酸化炭素（CO）は減少する（図-7）。
- ② 二酸化炭素（CO₂）は若干増加する（図-8）。
- ③ 酸素（O₂）は若干減少する。
- ④ ①～③によりバイオディーゼル燃料が軽油よりも効率良く燃焼している。
- ⑤ 一酸化窒素（NO）は、除雪ドーザでは若干減少するが、除雪トラックでは増加する。これは、機械の個体差が影響していることが考えられる（図-9）。



写真-4 排出ガス計測

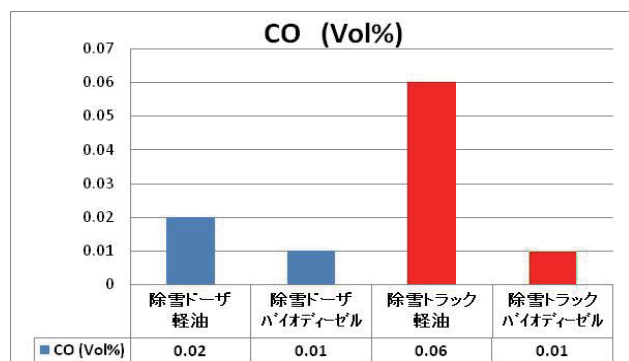


図-7 排出ガス CO 計測結果

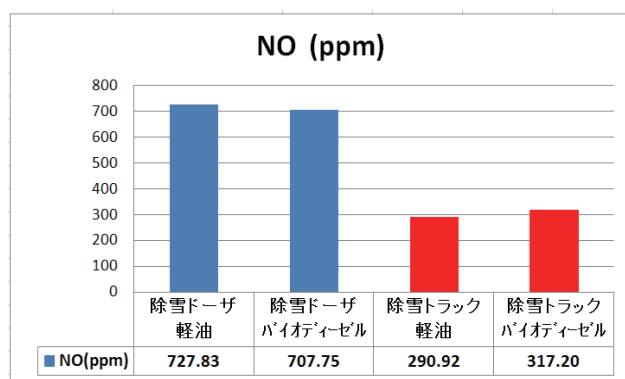


図-9 排出ガス NO 計測結果

さらに、酸性雨や光化学スモッグの原因となる粒子状物質（PM）について、どの程度影響が出るのかを調査するため、除雪トラックによる測定試験を行った（写真-5）。

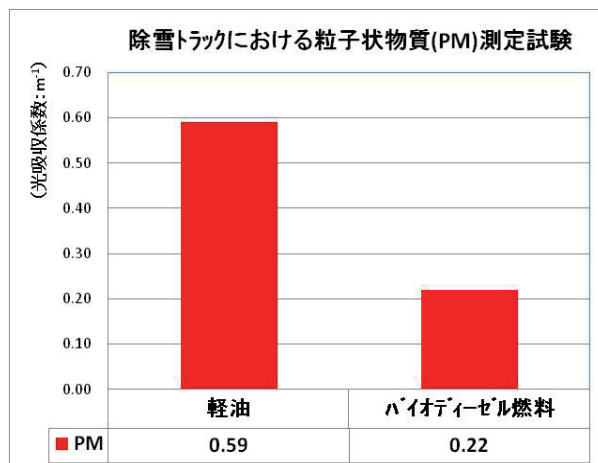


図-10 粒子状物質（PM）測定試験結果



写真-5 粒子状物質（PM）測定試験

図-10 から、除雪トラックの光吸収係数は、軽油が 0.59 m^{-1} の値を示したが、バイオディーゼル燃料は 0.22 m^{-1} であり、バイオディーゼル燃料を使用した方が軽油より 63%程度クリーンな値であることが分かった。

バイオディーゼル燃料使用時における排出ガス成分は、含酸素燃料であることから軽油よりも完全燃焼しやすいため、 CO_2 の排出量は若干増加するが、バイオディーゼル燃料が動植物の廃油を原料としていることからカーボンニュートラルである。

粒子状物質(PM)も減少することからクリーンな燃料であるといえる。

2.8 機関始動性試験（低温特性）

低温下における始動性を確認するため、除雪トラックの始動時間計測を行い、軽油とバイオディーゼル燃料の評価を行った。試験方法は、セルモータ始動時より計測を開始し、機関が完全始動するまでの時間を計測した。

表-4 から、バイオディーゼル燃料は、気温が 5.4°C 高い条件であったが、軽油と同等の始動性であるといえる。また、バイオディーゼル燃料は機関始動が 1 秒を切っており、 -2.1°C の気温ではエンジン始動には支障がない。

しかし今回の試験では、 -2.1°C 以下の気温になることがなかったため、実作業における始動性は不明である。そこで厳冬期の始動性試験を実施した。

表-4 機関始動時間

油種	軽油	バイオディーゼル燃料
外気温	-7.5°C	-2.1°C
1回目(s)	0.66	0.66
2回目(s)	0.60	0.56

平成 22 年及び 23 年の冬期に機関始動が可能であるかを確認した。結果を表-5 に示す。外気温は、 0°C 以下となる気温が続いていたが、バイオディーゼル燃料の温度は外気温よりも 6°C まで高くなっていた。通常の外気温は、 $-7\sim 0^\circ\text{C}$ にて推移していたが、平成 22 年 2 月 4 日は気温が -14.7°C となり、セルモータの回転は確認できたものの機関の始動は不可能であった。この際、燃料フィルタを車体より取り外したところ、写真-6 のとおり燃料フィルタには、ヘドロ状の白いグリセライドが表面に付着しており、これが抵抗となって目詰まりを起こしたと想定される。

また、燃料タンク内の燃料（写真-7 左）を抜き取り、常温にて保存していた同燃料（写真-7 右）と比較した結果、透明度が低下していた。その時、燃料温度は -10°C であり、バイオディーゼル燃料内の物質が結晶化して透明度や流動性が低下することが分かった。

燃料配管は金属製であり、確認はできなかったが、バイオディーゼル燃料が燃料フィルタや燃料配管などで目詰まりを起こし、エンジン内まで到達不可能となったため、機関始動不能となったものと考えられる。これらの対策として、特に低温が見込まれる時期は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を用いて燃料をなるべく冷やさない対策が必要である。

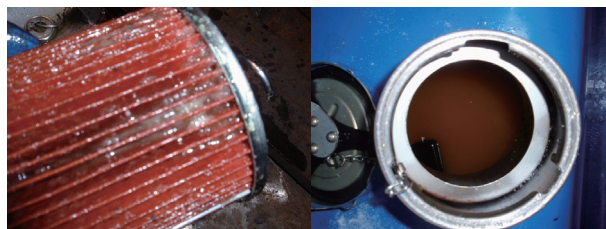


写真-6 機関始動不能時の燃料フィルタの状態

表-5 始動性（バイオディーゼル燃料）

試験日	外気温	燃料温度	始動性
平成22年			
2月1日	-3	-1	◎
2月2日	-7	-3	◎
2月4日	-14.7	-10	×
2月7日	-4	0	◎
2月8日	0	3	◎
2月13日	-5	1	◎
2月16日	-6	0	◎
2月19日	-4	0	◎
3月1日	-2	1	◎
平成23年			
1月31日	-6.4	-6.2	◎
2月1日	-5.2	-1.4	◎
2月7日	-1.5	-1.8	◎
2月10日	-2.4	-2.7	◎
3月14日	3.9	1.9	◎



写真-7 機関始動不能時の燃料の状態

2.9 長期使用時における燃料消費量計測試験

除雪作業時は、機関が高負荷運転になることが

多く、バイオディーゼル燃料は軽油よりも発熱量が低いことから、燃料消費量が増加することが考えられる。そこで、実際の除雪作業時において軽油及びバイオディーゼル燃料を使用した場合の燃料消費量について比較を行った。

試験では、除雪トラックに流量計を2個設置し、供給側と戻り側の差分量を消費量として比較した(写真-8)。

表-6 から、除雪作業には、降雪量や作業条件など作業負荷の違いがあるが、軽油と比較しバイオディーゼル燃料における平均燃費(km/ℓ)は、28%悪化した。その原因は、バイオディーゼル燃料特有の潤滑性向上効果によって、エンジン気筒内に軽油よりも多量の燃料が供給されたことが考えられる。また、出力を補うためにオペレータがアクセルをより多く踏み込んだことも考えられる。

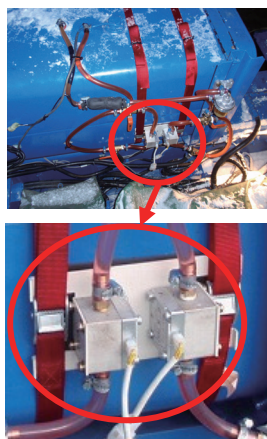


写真-8 流量計

表-6 燃料消費量

油種	走行距離(km)	消費量(ℓ)	平均燃費(km/ℓ)
軽油	740.2	832	0.89
バイオディーゼル燃料	665.2	1,039	0.64

2.10 バイオディーゼル燃料における地域モデル

バイオディーゼル燃料の精製には、廃食油を確保することが重要である。地域生産モデル例として、A市における廃食油の生産量を表-7 に示す。A市の人口は35万人であり、年間プラント生産能力は407,700ℓあるが、実年間生産量は、348,509ℓと約85%程度である。理由として、廃食油の確保は、人口や飲食店などの事業者数に比例するため、プラント生産能力よりも原料である廃食油量に影響を受けるからである。バイオディーゼル燃料の精製には、このような問題があるが、地域におけるモデル事業として、学校・家庭・事業者と連携し、さらに廃食油回収など地域モデル事業に向けた取り組みが必要となる。

また、A市の国道を除雪するには45台の除雪車が必要であり、全台数をバイオディーゼル燃料にて走行するには、524,400ℓ程度が必要であるが、実年間生産量を上回ることや、保管期間の問題から全ての除雪車に使用できない。ただし、実年間生産量分の年間のCO₂削減量は、 $348,509\ell \times 2.62(\text{kg}/\ell \text{ CO}_2) = 913,093\text{kg} \div 913 \text{ t}$ となる。

表-7 A市におけるバイオディーゼル燃料の生産モデル

項目	数量
A市人口 (人)	350,000
A市面積 (km ²)	747
A市を走る除雪車両台数(必要数)	45
除雪車バイオディーゼル燃料必要数 (ℓ)	524,400
プラント生産量能力 (ℓ)	407,700
実年間生産量 (ℓ)	348,509

このような取り組みを行うことによって地球温暖化対策に貢献することが可能となり、地域に存在するエネルギーの有効活用となる。

3. まとめ

バイオディーゼル燃料を積雪寒冷地に使用した場合、以下のことが分かった。

- ① 加速性能は軽油と比較し同等以上である。
- ② 牽引力は軽油と比較し同等である。
- ③ 排出ガス中の粒子状物質(PM)は60%程度減少する。
- ④ 使用燃料性状にもよるが、燃料温度が-10℃以上の始動には問題がない
- ⑤ 燃料温度が-10℃以下になるときは、燃料タンク加温装置や車庫保管など燃料を冷やさない処置が必要である。
- ⑥ 燃料消費量は軽油に対し28%増加する。

導入コストなどの問題はあがあるが、地球環境負荷が少ないクリーンな自然エネルギーやバイオマスエネルギーなどの再生可能エネルギーの地域導入が進めば地球温暖化の一因となっている温室効果ガス削減に寄与できるものと考えられる。

参考文献

- 1) 小泉 達治:第3部ブラジルのバイオディーゼル混合率引き上げが世界大豆・大豆製品需要に与える影響
<http://www.maff.go.jp/primaff/koho/seika/project/pdf/juky3-17.pdf>
- 2) バイオマスオフィス HP
http://www.asiabiomass.jp/topics/1107_02.html
- 3) 平伴斉、国島英樹、長瀬禎:「バイオディーゼル燃料の除雪車等適応性検討」、寒地土木研究所月報 2011年1月号
- 4) 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