

低温下における建設施工の 環境負荷低減に関する検討

ー積雪寒冷地におけるバイオディーゼル燃料の適応性調査ー

独) 土木研究所寒地土木研究所 寒地技術推進室道央支所 ○ 平 伴 齊
寒地機械技術チーム 国島 英樹
寒地技術推進室道北支所 上野 仁士

近年地球温暖化防止対策の一環として、バイオディーゼル燃料が世界的に注目されており、建設機械などへの使用促進が望まれている。

しかし、バイオディーゼル燃料は、軽油と比較した場合、低温下における実用性や使用時における出力特性などについて、まだ未知数な点がある。

そこで、除雪機械などの建設機械などにバイオディーゼル燃料を使用し、低温下における機関始動性や出力測定、排出ガス測定試験を実施した。その結果、低温下における実用性や少なくとも回送、低負荷作業時には、問題無く使用可能であることが確認された。

キーワード：環境 バイオディーゼル リサイクル CO₂

1. まえがき

我が国では、京都議定書において2012年までに温室効果ガスを1990年比6%削減することとしているが、2008年度の温室効果ガス国内総排出量(環境省発表速報値)は、対前年比で6.2%減少しているものの、いまだに基準年比を1.9%上回っている現状にあり、排出量削減はより一層の取り組みを求められている。

CO₂削減のために、化石燃料の使用量削減は必須であり、化石燃料の代替燃料としてバイオディーゼル燃料は極めて有効であるため、トラックや重機械系車両への適用が期待されているが、理論上軽油よりも出力が低下することから、高負荷運転を行う建設施工での使用の際にどう影響するのかはまだ未知な部分である。

燃料自体も新しい製法等で性状等が改良されていく傾向が見られるが、ここでは、重機械系車両などへの適用性を検証するため、現在のバイオディーゼル燃料における出力特性調査を重点に検討を行った。

2. バイオディーゼル燃料について

バイオディーゼル燃料は、植物油を原料として製造されたディーゼル機関用燃料であり、カーボンニュートラルの概念により温室効果ガス(CO₂)排出量がゼロカウントであることから地球温暖化防止対策として極めて有効な燃料である。イメージを図-1に示す。

現在、バイオディーゼル燃料は、さまざまな研究開発や取り組みが行われている。



図-1 カーボンニュートラル

(1) バイオディーゼル燃料の種類

バイオディーゼル燃料は、第1世代のFAME(脂肪酸メチルエステル)が現在の主流であり、第2世代のBHD(水素化処理バイオディーゼル)、第3世代のFT合成BTLの研究が進められている。将来の推移予測を図-2に示す。

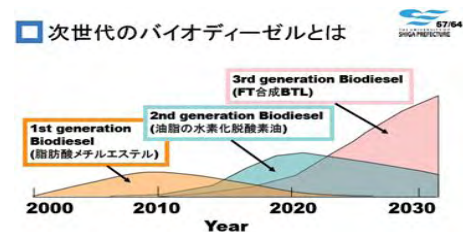


図-2 バイオディーゼル燃料推移予測¹⁾

FAMEは植物油を軽油に近い性状のメチルエステルに化学変化させて精製されるもので、表-1に示すように分子構造が軽油と違うため酸化安定性や低温特性など

が軽油と異なる。

表-1 分子式

軽油	FAME
$C_{15}H_{32} \sim C_{17}H_{36}$ (混合)	R_1COOCH_3 R_2COOCH_3 R_3COOCH_3 (R:炭化水素基)

しかし、FAMEは軽油と混合して使用されることがあり、FAMEの混合率により「B_x(xはFAMEの質量%数値。B5、B20、B100等)」と呼ばれる。

また、平成21年に「揮発油等の品質の確保等に関する法律」が改正され、公道を走行する自動車に混合して使用する場合は、「B5」での使用のみになっている。

また、5%を超えて混合された燃料は、研究目的のみで申請により使用が認められることとなった。軽油を混合しない「B100」で使用する場合は、法的な拘束はないが、機械的不具合が懸念されるため適切な機械管理をするよう国土交通省で指導している。²⁾

なお、販売又は、自己使用目的にて継続的に軽油と混合する場合は、経済産業局に「特定加工業者」として登録する必要がある。現段階では、北海道内ではB5等軽油混合燃料の販売業者はまだ無く、一般では事実上B100のみが購入可能である。

第2世代のBHDは、石油精製の水素化脱硫技術により精製されるもので、軽油と同様の分子構造・性状となる。

現在は、大手石油業者と自動車メーカーで研究されており、平成20年には東京都のバスで実証実験が行われた。

精製時には、水素を多く消費するため、低コストかつ大量に確保することが今後の課題となる。

第3世代のFT合成BTLは、バイオマスをガス化し、一酸化炭素と水素から触媒を用いて軽油に相当する液体炭化水素を合成する技術で、現在は実用化に向けて研究が進められている。

なお、本論文において特に断りがない場合、「バイオディーゼル燃料」はFAME・B100を指すものとする。

(2) バイオディーゼル燃料における原材料

海外諸国におけるバイオディーゼル燃料の原材料は、パーム油や菜種油などの食用植物油や食用に適さない植物から採取される非食用植物油が主流である。

しかし、植物油脂原料の大多数を輸入に頼る日本では、これらを用いるとコスト高となるため、廃食油を原料としているものが主流である。

3. 積雪寒冷地における適応性調査

バイオディーゼル燃料は、様々な長所がある反面、軽油と比較して劣る点もある。

一つは、バイオディーゼル燃料は、軽油と比較すると流動性が悪く、機関始動性が劣る点である。

特に低温になると流動性の低下が顕著となるため、低温下での使用に当たっては問題の発生が考えられる。

また、表-2に示すように燃料固有の発熱量が軽油より低い、という点も重機械系での使用に当たっては問題となる可能性がある。これは、式(1)に示すとおり、燃料発熱量と正味馬力は正比例しており、理論上では機関出力が低下するため、通常の走行よりも高出力を要求される重機械系の作業には支障を来す恐れがある。

表-2 燃料発熱量³⁾

項目	軽油	バイオディーゼル燃料
発熱量(kcal/kg)	10,600	9,000

$$N_e = H_u \cdot B \cdot \eta_e / 632 \quad (1) \quad 4)$$

N_e : 正味馬力 (HP)

H_u : 燃料の発熱量 (kcal)

B : 燃料消費量 (kg/h)

η_e : 熱効率

また、上記式から、燃料消費量と正味馬力も正比例していることがわかる。よって、出力を得るために燃料供給を多くする操作が行われ、結果として燃料消費量が悪化することも懸念される。

そこで、これらについて検討するため、製造会社が異なる3社のバイオディーゼル燃料により、各種調査試験を行った。その項目を下記に示す。

●機関始動性及び燃料温度計測試験

①除雪トラック、ドーザによる計測

●出力特性調査試験

①使用者に対するヒアリング調査

②除雪トラック、ドーザによる加速試験

③乗用車クラス車両による馬力・トルク計測試験

④除雪ドーザによる牽引力試験

●燃料消費量調査試験

①除雪トラック、ドーザによる計測

●排気ガス計測試験

①除雪トラック、ドーザ、乗用車クラス車両による計測

また、各試験に用いた試験車両及び各諸元を表-3に示す。

表-3 各試験車両・諸元

項目	除雪トラック	除雪ドーザ	乗用車クラス
写真			
車両総重量	18750kg	13660kg	2720kg
排気量	16990cc	6500cc	2800cc
出力	355ps	160ps	125ps
使用試験	<ul style="list-style-type: none"> ・機開始動性 ・出力特性調査② ・排気ガス計測① ・燃料消費量① 	<ul style="list-style-type: none"> ・機開始動性 ・出力特性調査②④ ・排気ガス計測① ・燃料消費量① 	<ul style="list-style-type: none"> ・乗用車クラス車両による馬力・トルク計測 ・排気ガス計測①

4. 除雪トラック、ドーザによる機開始動性及び燃料温度計測試験

(1) 機開始動性試験

低温時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行った。結果を表-4に示す。

除雪ドーザでは、ほぼ同程度の結果であったが、除雪トラックでは、気温条件が違うものの、バイオディーゼル燃料の方が軽油に比較して4秒程度遅い結果となった。

表-4 始動性試験

	除雪ドーザ		除雪トラック	
	軽油	バイオディーゼル燃料	軽油	バイオディーゼル燃料
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

(2) 燃料温度計測試験

除雪車両は低温下で作業を行うため、外気の影響で燃料温度が下がり、最悪はフィルターなどの目詰まりでエンジンストールを起こす可能性がある。

エンジン始動後の燃料温度の変化を調査するため、除雪トラックを用いた30分間走行時における燃料温度計測試験を行った。その結果を図-3に示す。

図-3より、気温がほぼ一定なのに対して、時間経過と共に燃料温度が上昇していることが確認された。

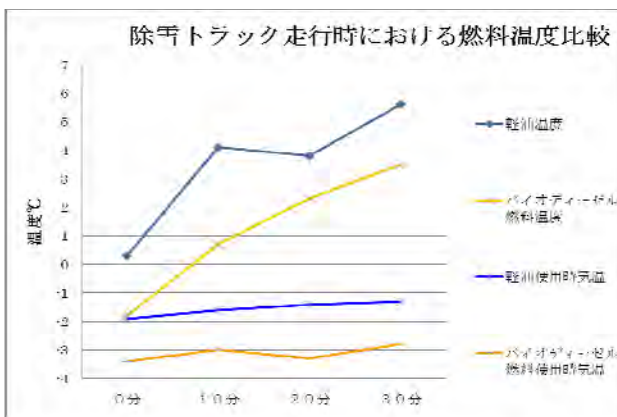


図-3 燃料温度比較

5. 出力特性調査試験

(1) 使用者に対するヒアリング調査

バイオディーゼル燃料は、すでに建設機械や路線バス等で利用されている事例があり、その使用者に対して、バイオディーゼル燃料に対する出力特性の変化に関する聞き取り調査を行った。その結果を図-4に示す。

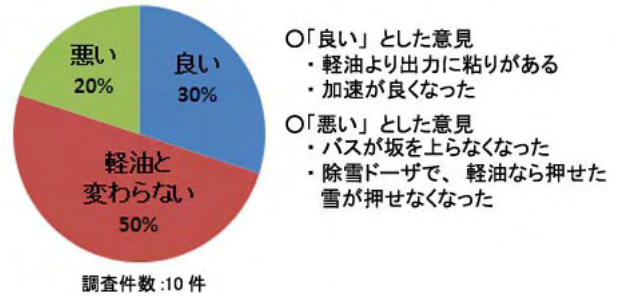


図-4 バイオディーゼル出力聞き取り結果

この結果、半数が「軽油と変わらない」との意見であり、「良い」を含めると80%が出力特性について軽油に劣っていないと感じていることが解った。

(2) 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、軽油とバイオディーゼル燃料を用いて追い越し加速試験を実施した。スタート地点より加速を開始した車両が、設定速度に達した基点より、そこから70m走行した地点までの速度を計測し比較検証した。

試験方法を図-5に、除雪トラック及び除雪ドーザの試験結果をそれぞれ図-6と図-7を示す。

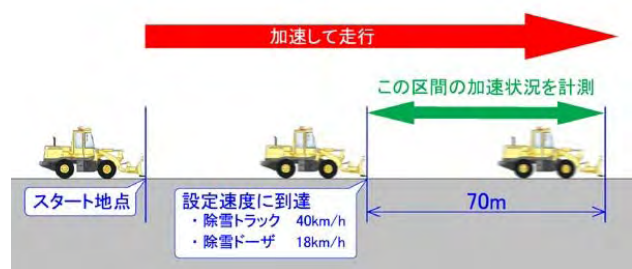


図-5 加速試験方法

70m地点速度について、除雪ドーザでは、軽油使用時約21.4km/hに対しバイオディーゼル燃料3種の平均値が約23.7km/hと10%上昇していることが確認された。

一方、除雪トラックでは、軽油使用時48.2km/hに対し、バイオディーゼル燃料は、3種とも軽油使用時とほぼ同等であった。

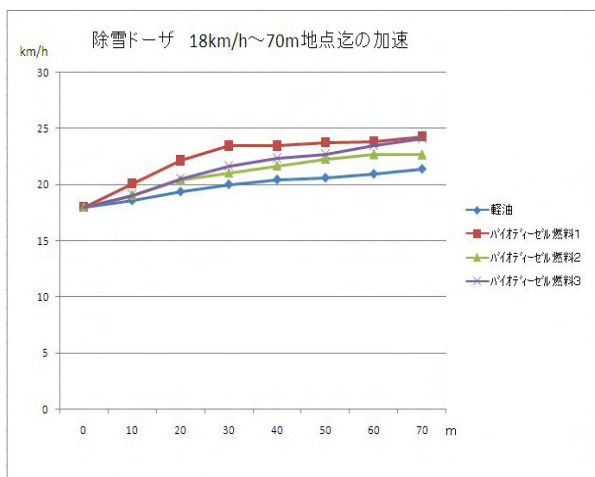


図-6 除雪ドーザ加速試験結果

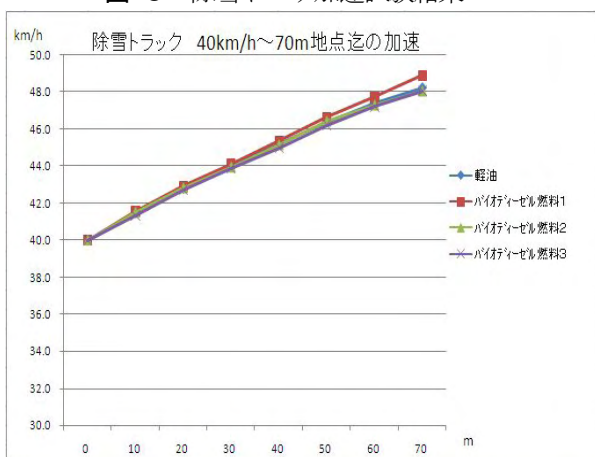


図-7 除雪トラック加速試験結果

(3) 乗用車クラス車両による馬力・トルク計測試験

実際の機関出力の数値比較のため、軽油と2種類のバイオディーゼル燃料を用いた馬力・トルク計測試験を行った。

試験では、道内に民間保有の大型車用シャシーダイナモメータが無かったため、乗用車クラス車両による機関出力を計測した。

計測状況を写真-1、馬力・トルク曲線を図-8に示す。



写真-1 シャシーダイナモメータによる馬力・トルク計測状況

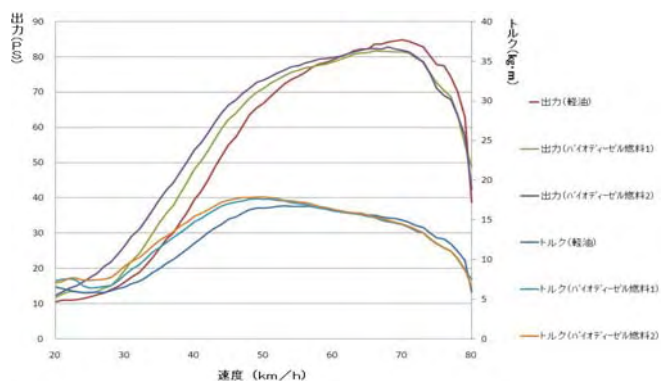


図-8 馬力・トルク曲線

この結果、30 km/h時における最大出力は、軽油16.1 ps (11.84 kw) に対し、バイオディーゼル燃料は、26.5 ps (19.5 kw) と6割程度高くなったことが確認された。

50 km/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、その後の最大馬力はバイオディーゼル燃料が82.9 ps (61.0 kw) に対し、軽油が84.9 ps (62.4 kw) と2.4%軽油が上回る結果となった。

(4) 除雪ドーザによる牽引力試験

除雪作業等の高負荷作業時を想定し、軽油と2種類のバイオディーゼル燃料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、ロードセルを挟み、除雪ドーザにて牽引力計測を行った。

試験概要図を図-9に、結果を表-5に示す。



図-9 牽引力試験概要図

表-5 牽引力試験結果

項目	軽油	バイオディーゼル燃料 1	バイオディーゼル燃料 2
牽引力 (kN)	72.385	73.111	73.690
軽油比増減率	—	101.0%	101.8%

試験条件：エンジン回転数2300rpm 2速ホールド

この結果、バイオディーゼル燃料使用のいずれも、軽油に対して、牽引力が1%程度向上していることが確認された。

6. 燃料消費量調査試験

(1) 除雪トラック、除雪ドーザによる構内走行試験

軽油及び3種類のバイオディーゼル燃料使用時の燃料消費量について調査を行った。

試験では、除雪ドーザ及び除雪トラックにて試験コースを30分程度走行させた後に燃料の差分を計測した。

試験結果を表-6に示す。

表-6 燃料消費量試験結果

項目	除雪ドーザ		除雪トラック	
	軽油	バイオディーゼル燃料	軽油	バイオディーゼル燃料
燃料消費量(L)	9.78	11.2	9.78	10.75
走行距離(km)	9.09	8.63	12.08	12.09
燃料消費率(L/km)	1.08	1.30	0.81	0.89
軽油比増減率	-	120.6%	-	109.8%

以上のように、除雪ドーザではバイオディーゼル燃料が軽油に比べ20%、除雪トラックでは10%程度多く消費した結果となった。

7. 排出ガス計測試験

(1) 除雪トラック、ドーザ、乗用車クラス車両による計測

機関内の燃焼状況を確認するため、先に記した除雪トラック、ドーザによる加速試験と同日に、軽油とバイオディーゼル燃料それぞれの排出ガス成分分析を行った。測定結果を表-7に示す。

また、乗用車クラスにおける粒子状物質（PM）についてバイオディーゼル燃料と軽油の計測試験を行った。

測定結果を表-8に、測定状況を写真-2に示す。

表-7 除雪車両排出ガス測定結果

除雪ドーザ排出ガス測定結果(30分走行後)

	軽油	バイオディーゼル燃料	増減
CO (Vol%)	0.02	0.01	-0.01
CO ₂ (Vol%)	5.59	5.68	0.09
O ₂ (Vol%)	13.96	13.9	-0.06
NO (ppm)	727.83	707.75	-20.08

除雪トラック排出ガス測定結果(30分走行後)

	軽油	バイオディーゼル燃料	増減
CO (Vol%)	0.06	0.01	-0.05
CO ₂ (Vol%)	4	4.28	0.28
O ₂ (Vol%)	15.89	15.87	-0.02
NO (ppm)	290.92	317.2	26.28

除雪ドーザ及び除雪トラックともに酸素（O₂）はほぼ同程度で、一酸化炭素（CO）は減少し、二酸化炭素（CO₂）は各車両ともに増加した。

窒素化合物（NO）は除雪トラックでは増加傾向にあ

り、除雪ドーザは減少傾向となっている。

また、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、どの程度の影響が出るのかを調査するためにオパシメータを用いて測定した。

表-8より、軽油の測定値が2.620m⁻¹に対し、バイオディーゼル燃料の測定値は1.777と33.7%減少しており、バイオディーゼル燃料を使用した方がクリーンな値が出る事が確認された。

表-8 粒子状物質測定結果

(光吸収係数：m⁻¹)

	1回目	2回目	平均
軽油	2.401	2.839	2.620
バイオディーゼル燃料	1.790	1.765	1.777

平均増減率 33.7%減



写真-2 PM測定状況

8. 考察

低温下での機関始動性は、除雪トラックにおいて若干の低下が確認されたが、除雪ドーザでは、差異が無いことから、今後より多くのデータによる検証が必要と思われる。

機関始動後の燃料温度については、燃料タンクより供給され燃焼に使用されなかった燃料が、機関の熱により加温されて再び燃料タンクに戻るため、全体的に上昇する。また、試験結果より走行中であっても外気によるタンク内燃料温度低下は見られなかったことから、低温下の使用に関しては問題が無いと考える。

出力特性では、バイオディーゼル燃料を使用した車両について、ピークパワーを必要としない一般的走行や除雪車の回送時に必要な低中速域（回転）まで軽油と同程度以上の出力が得られることが確認された。

しかし、馬力・トルク計測結果の高回転域時のピークパワーでは軽油に劣るが、除雪ドーザによる牽引力試験では軽油に勝るなど、相反する結果も確認された。乗用車クラス車両では、高回転域では軽油の出力が上回っているが僅差であり、ほぼ同等とみることができる。

使用者に対するヒアリング結果でも良い・変わらない・悪いと三様の意見が挙げられている。

馬力・トルク計測結果のピークパワーが低下する原因は、燃料の発熱量の低さがそのまま反映されたものと判断できる。

高負荷運転にもかかわらず、出力が向上または同等であった理由としては、下記の2点が考えられる。

①バイオディーゼル燃料は含酸素燃料であり、軽油よりも不完全燃焼の発生が少ない。

②バイオディーゼル燃料の潤滑性能及び黒煙発生の抑制効果によりエネルギー変換効率が高い。⁵⁾

①については、先の表-1に示したとおり、バイオディーゼル燃料には分子構造上軽油にはない酸素原子が存在するため燃焼しやすい点から推測される。そして、出力試験と同時にを行った排出ガス成分分析の結果において、軽油の方が一酸化炭素が多く二酸化炭素が少ないことから、バイオディーゼル燃料の方が完全燃焼の度合いが高いと判断できる。

なお、バイオディーゼル燃料の方が二酸化炭素が多い結果となっているが、カーボンニュートラルのため、先に記したようにCO₂排出量には影響しないことを付記する。

②については、燃料消費量調査試験では燃料消費量が増加しており、その際のオペレータからの「加速は軽油と比べ変わらないか、むしろ良い」という所見から、噴射ポンプの潤滑性能向上により燃料供給がスムーズになり、結果として出力が向上したことが伺える。

ただし、オペレータの所見については、高出力を得ようとアクセル開度を大きくするなど燃料供給を多くする運転を行った可能性もあり、定量的に明らかにするにはより多くの事例について調査する必要がある。

乗用車クラス車両でのPM測定結果では、バイオディーゼル燃料は軽油より33.7%低減されていることから、黒煙発生抑制効果を実証され、このことからエネルギー変換効率が高い燃料であることが裏付けられる。

これらのことから、車両にバイオディーゼル燃料を使用した場合の出力については、向上する場合と低下する場合があるが、どのような場合に向上あるいは低下するかは機関内の燃焼状況が影響し、それは機関形式の違いや個体差使用状況等に依存するものなので、一概に断定できるものではない。

以上より、高負荷の作業を要求される重機械系に「バイオディーゼル燃料を使用する場合」は、事前に試験的に給油し、その機械及び各々の使用状況では出力がどう変化するかを確認してから判断すべきと考える。

また、試験結果より建設機械等にバイオディーゼル燃料を使った場合、燃料消費量が増加することが分ったが、燃料の低位発熱量は分子構造に起因するため、現状では改善の余地がない。

環境への配慮の一例として、燃料消費量試験時の燃料

消費量結果から杉の木年間吸収量を試算したところ、下記の結果が得られた。

$$33.60 \times 2.6444 \text{ kg/l} = 88.85 \text{ kg}$$

杉の木50年生年間CO₂吸収量 14kg

$$88.85 \div 14 \approx 6.3 \text{ 本分}$$

試験期間が、わずか2日間であっても、杉の木の年間吸収量6.3本分に相当するため、今後除雪車両や工事等に導入が拡大されていけば、更にCO₂削減に貢献するものと考えられる。

9. あとがき

本研究により、バイオディーゼル燃料による除雪車への適応性について、少なくとも回送や低負荷作業時には問題なく使用できるものと確認された。

重機械系での高負荷作業に使用する際は、実使用前に事前に給油対象機械で試用し出力変化を確認することが望ましい。

なお、今回の調査結果はいずれも数台での検証や短期間の試験結果であり、また車両の個体差による影響も考えられるため、今後より多くの車両についても調査を行う必要がある。

また、建設機械へのバイオディーゼル燃料の使用は、燃料消費量が増加する場合があることから、軽油価格の動向によっては、施工コストの増大が懸念される。よって、環境配慮に対する投資として許容される社会情勢も、バイオディーゼル燃料利用促進の鍵となるものとする。

謝辞：調査・試験に当たって、滋賀県立大学山根教授、札幌建設運送株式会社ならびにバイオディーゼル製造各社の多大なるご協力をいただきました。改めて感謝の意を表します。

参考文献

- 1) バイオディーゼル燃料の現状と課題
滋賀県立大学工学部 山根浩二
(平成20年9月7日 秋田／菜の花フォーラム2008講演資料)
- 2) 「高濃度バイオディーゼル燃料等の使用による車両不具合等防止のためのガイドライン」
国土交通省
- 3) 改訂版 バイオディーゼル・ハンドブック
～地球温暖化の防止と循環型社会の形成に向けて～
編纂：池上 詢
- 4) 第2次改著 内燃機関講義
長尾不二夫
- 5) バイオディーゼルのすべて
編著者：坂 志朗 (株)アイピーシー)