

第4章 分析

第1節 本事業にかかるBDFの環境負荷削減効果測定について

本事業における廃食油(WFO: Wasted Food Oil)のBDF化による環境負荷低減効果について評価を三重大学工学部丸山助教授に行っていた。なお、比較対象とする軽油については長期にわたる実稼動プラントデータに基づく試算であるのに対し、BDFに関しては期間的(約一年間)、地域的(津市・松阪市・伊勢市等)に限定された実証に基づく試算であること、また下記の環境負荷評価範囲内で行ったことに留意が必要である。

2005.02.10

BDF (Bio-Diesel Fuel) による環境負荷削減効果

1. 環境負荷評価範囲

環境負荷を評価する際には、その評価範囲を明確にすることが重要である。ここでは、BDF環境負荷評価範囲を図1のようにおいた。すなわち、

- (a) 廃食油回収段階では、回収に使用される車輛から排出されるCO₂を対象とした。
- (b) 廃食油再生段階では、再生に必要な電力、メタノールの投入及び粗製グリセリンの生産を対象とした。
- (c) BDF配送段階では、配送に使用される車輛から排出されるCO₂を対象とした。
- (d) BDF使用段階では、再生されたBDFから回収・配送に使用された量を引き去った残量が燃料として使用できるものと考え、一般的なディーゼル乗用車に使用した場合に排出されるCO₂を対象とした。

廃食油はもともと植物から製造されており、CO₂循環の観点から見れば、燃料燃焼時のCO₂排出は無いものとも考えることもできる。また、BDFを軽油の代替燃料として使用すれば、石油資源枯渇の観点からも環境負荷低減に有効である。更に、廃食油を河川等へ廃棄することによる環境負荷を低減させる効果もある。すなわち、BDF再燃料化の有効性について、本評価範囲では廃棄物(廃食油)を資源として再利用するためのエネルギー、投入物および排出物による環境負荷をカウントしているため、厳しい評価基準となっている。なお、BDF燃焼によるCO₂以外の排出物による環境負荷については、触媒等による除去(低濃度化)が可能であり、その技術による効果が大きいため評価に加えていない。

また、BDF燃料の有効性を比較検討するため、製品相当量の軽油を自動車燃料として使用した場合のCO₂排出量を算出する。

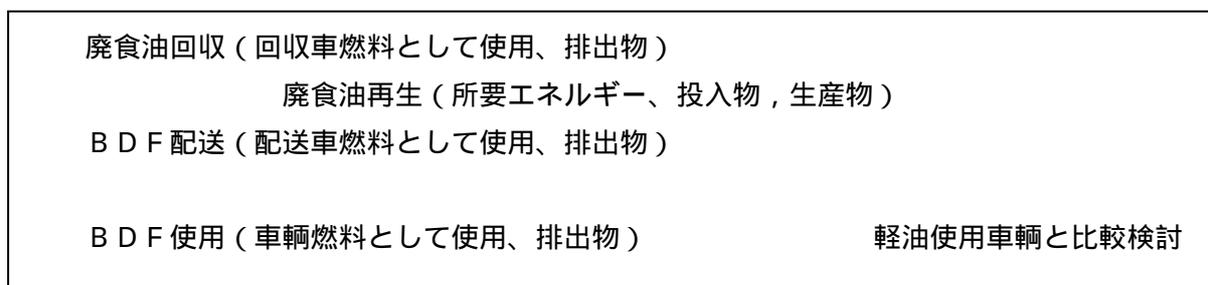


図1 BDF評価フロー

2. 諸データ

対象期間： 2003年12月～2004年11月（12ヶ月）

廃食油回収量： 9,888(L-WFO)、824(L-WFO/month)

廃食油処理消費電力量： 0.133(kWh/L-WFO)

廃食油回収車輦：

普通貨物車（排気量：2,140 cc）平均燃費 15.3 (km/L-BDF)、走行距離 60 (km/month)

燃料使用量：60/15.3 = 3.9 (L-BDF/month)

2トントラック（排気量：3,569 cc）平均燃費 7.3 (km/L-BDF)、走行距離 60(km/month)

燃料使用量：60/7.3 = 8.2 (L-BDF/month)

B D F 配送車輦：

2トントラック（排気量：3,569 cc）平均燃費 7.3 (km/L-BDF)、走行距離 105(km/month)

燃料使用量：105/7.3 = 14.4 (L-BDF/month)

B D F - CO₂ 排出量（走行燃費 13.8 (km/L-BDF) 普通貨物車）⁽¹⁾： 195.1 × 10⁻³ (kg-CO₂/km)

B D F 密度⁽¹⁾： 890 (kg/m³-BDF)

B D F 発熱量⁽¹⁾： 39.9 (MJ/kg-BDF)

軽油密度⁽¹⁾： 828 (kg/m³-DF)

軽油発熱量⁽¹⁾： 45.0 (MJ/kg-DF)

メタノールの密度： 785 (kg/m³)

メタノール生成 CO₂ 排出係数⁽²⁾： 1.50(kg-CO₂/kg-CH₃OH)

組成グリセリン密度： 1260 (kg/m³)

グリセリン生成 CO₂ 排出係数⁽²⁾： 1.99 (kg-CO₂/kg- C₃H₅(OH)₃)

3. 廃食油 (WFO: Wasted Food Oil) 回収段階の環境負荷算出

廃食油回収のために使用される車輦からの CO₂ 排出量を算出する。

- ・使用車輦：普通貨物車からの CO₂ 排出量

1ヶ月の走行による CO₂ 排出量は、走行燃費 13.8 (km/L-BDF) 時の CO₂ 排出量が 195.1 × 10⁻³ (kg-CO₂/km) であることを考慮し、

$$60(\text{km/month}) \times 195.1 \times 10^{-3} (\text{kg-CO}_2/\text{km}) \times (13.8/15.3) = 10.6 (\text{kg-CO}_2/\text{month}) \quad (1)$$

となる。

- ・使用車輦：2トントラックからの CO₂ 排出量

普通貨物車の算出と同様に行うと、

$$60 (\text{km/month}) \times 195.1 \times 10^{-3} (\text{kg-CO}_2/\text{km}) \times (13.8/7.3) = 22.1 (\text{kg-CO}_2/\text{month}) \quad (2)$$

となる。

- ・回収時の CO₂ 排出量

廃油回収時の CO₂ 排出量は、(1)、(2)より

$$10.6 + 22.1 = 32.7 (\text{kg-CO}_2/\text{month}) \quad (3)$$

と算出される。

4. WFO BDF再生段階の環境負荷算出

廃食用油再生のための投入物，排出物による CO₂ 排出量を算出する。

< Input >

・ B D F 生産量

WFO の 90% が B D F となる。したがって，1 ヶ月あたりの平均 B D F 生産量は、
 $824 \text{ (L-WFO/month)} \times 0.90 = 742 \text{ (L-BDF/month)}$

となる。

・ 所要電力量

1 ヶ月あたりの消費電力量は，再生時の実測値より

$$0.133 \text{ (kWh/L-WFO)} \times 824 \text{ (L-WFO/month)} = 110 \text{ (kWh/month)}$$

となる。

したがって電力の CO₂ 排出係数を 0.602 (kg-CO₂/kWh) とすると，1 ヶ月あたりの CO₂ 排出量は、

$$110 \text{ (kWh/month)} \times 0.602 \text{ (kg-CO}_2\text{/kWh)} = 66.2 \text{ (kg-CO}_2\text{/month)} \quad (4)$$

となる。

・ メタノール(CH₃OH)投入量

1 (L-BDF) の再生には 1/0.90 (L-WFO) が必要、また、1 (L-WFO) 再生に 0.18 (L-CH₃OH) が必要より、1 (L-BDF) 再生に必要なメタノールは、

$$(1/0.90) \text{ (L-WFO/L-BDF)} \times 0.18 \text{ (L-CH}_3\text{OH/L-WFO)} = 0.20 \text{ (L-CH}_3\text{OH/L-BDF)}$$

となる。メタノール投入による環境負荷は、メタノール生成に伴う CO₂ 排出係数が 1.50 (kg-CO₂/kg-CH₃OH)⁽²⁾ であることより、(メタノールの密度 $\rho_{\text{CH}_3\text{OH}} = 785 \text{ (kg/m}^3\text{)}$)

$$1.50 \text{ (kg-CO}_2\text{/kg-CH}_3\text{OH)} = 1.50 \times 0.785 = 1.18 \text{ (kg-CO}_2\text{/L-CH}_3\text{OH)}$$

となる。したがって、B D F 1 (L) あたりの CO₂ 排出量は、

$$0.20 \text{ (L-CH}_3\text{OH/L-BDF)} \times 1.18 \text{ (kg-CO}_2\text{/L-CH}_3\text{OH)} = 0.236 \text{ (kg-CO}_2\text{/L-BDF)}$$

となり、1 ヶ月当たりの CO₂ 排出量は、

$$0.236 \text{ (kg-CO}_2\text{/L-BDF)} \times 742 \text{ (L-BDF/month)} = 175 \text{ (kg-CO}_2\text{/month)} \quad (5)$$

となる。

< output >

・ 粗製グリセリン

WFO の 90% が B D F となることより，B D F 1 (L) あたり

$$0.200 \text{ (kg-C}_3\text{H}_5\text{(OH)}_3\text{/L-WFO)} \times (1/0.90) \text{ (L-WFO/L-BDF)} = 0.222 \text{ (kg-C}_3\text{H}_5\text{(OH)}_3\text{/L-BDF)}$$

の組成グリセリンを生成する。(グリセリンの密度 $\rho_{\text{C}_3\text{H}_5\text{(OH)}_3} = 1260 \text{ (kg/m}^3\text{)}$) 現在、粗製グリセリンを燃焼させているが、これを製品として扱い一般的な手法でこれの製造する時に排出される CO₂ が削減されると考えると、(グリセリン生成に伴う CO₂ 排出係数 = 1.99 (kg-CO₂/kg- C₃H₅(OH)₃))

$$0.222 \text{ (kg-C}_3\text{H}_5\text{(OH)}_3\text{/L-BDF)} \times 1.99 \text{ (kg-CO}_2\text{/kg-C}_3\text{H}_5\text{(OH)}_3\text{)} = 0.442 \text{ (kg-CO}_2\text{/L-BDF)}$$

の環境負荷低減効果があるとみなすことができる。

したがって、1 ヶ月あたりでは、

環境連携三重の環事業

$$0.442 \text{ (kg-CO}_2\text{/L-BDF)} \times 742 \text{ (L-BDF/month)} = 328 \text{ (kg-CO}_2\text{/month)} \quad (6)$$

のCO₂排出量削減効果がある。

・再生時のCO₂排出量

廃食油再生段階のCO₂排出量は、(4)-(6)より

$$66.2 + 175 - 328 = -262 \text{ (kg-CO}_2\text{/month)} \quad (7)$$

と算出される。

5. B D F 配送段階の環境負荷算出

B D F 配送段階についても廃食油回収段階と同様に考え、走行距離のみが異なる。

・使用車輛：2トントラック

$$105 \text{ (km/month)} \times 195.1 \times 10^{-3} \text{ (kg-CO}_2\text{/km)} \times (13.8/7.3) = 38.7 \text{ (kg-CO}_2\text{/month)} \quad (8)$$

と算出される。

6. B D F 使用段階の環境負荷算出

生成したB D Fに関して、W F O回収ならびにB D F配送に使用した残量を自動車等の車輛燃料として使用できるものと考え、その際に排出するCO₂を算出する。

・回収・配送段階の消費B D F：

$$\text{回収時消費：} 3.9 + 8.2 = 12.1 \text{ (L-BDF/month)}$$

$$\text{配送時消費：} \quad \quad \quad 14.4 \text{ (L-BDF/month)}$$

$$\text{計} \quad \quad \quad 26.5 \text{ (L-BDF/month)}$$

$$\text{残量：} 742 - 26.5 = 715 \text{ (L-BDF/month)} \quad (9)$$

・残量B D Fの使用

残量715 (L-BDF/month)が、走行燃費13.8 (km/L-BDF)の普通貨物車の燃料として燃焼したとすると、

$$13.8 \text{ (km/L-BDF)} \times 195.1 \times 10^{-3} \text{ (kg-CO}_2\text{/km)} = 2.7 \text{ (kg-CO}_2\text{/L-BDF)}$$

より、CO₂排出量は

$$715 \text{ (L-BDF/month)} \times 2.7 \text{ (kg-CO}_2\text{/L-BDF)} = 1.93 \times 10^3 \text{ (kg-CO}_2\text{/month)} \quad (10)$$

を得る。

1ヶ月当たりの総CO₂排出量は、(3)、(7)、(8)、(10)より

$$\text{回収段階：} \quad 32.7$$

$$\text{再生段階：} \quad -262$$

$$\text{配送段階：} \quad 38.7$$

$$\text{使用段階：} \quad 1.93 \times 10^3$$

$$\text{計} \quad \quad 1.73 \times 10^3 \text{ (kg-CO}_2\text{/month)} \quad (11)$$

と算出される。

7. 軽油使用による環境負荷算出

比較のため、正味生成される B D F (715 (L-BDF/month)) の代わりに、走行燃費 13.8 (km/L-BDF) の普通貨物車の燃料として軽油を使用した場合の環境負荷を算出する。

・発熱量による換算

B D F と軽油では発熱量が異なるため、未換算では軽油が不利となる。実際にも B D F の方が若干燃費が劣る。このために発熱量を用いて換算する。(密度: $\rho_{BDF} = 890$ (kg/m³),

$$\rho_{DF} = 828$$
 (kg/m³)

$$\text{B D F の発熱量: } 39.9 \text{ (MJ/kg-BDF)} = 35.5 \text{ (MJ/L-BDF)}$$

$$\text{軽油の発熱量: } 45.0 \text{ (MJ/kg-DF)} = 37.3 \text{ (MJ/L-DF)}$$

より、715(L-BDF/month)は、 $715 \times (35.5/37.3) = 681$ (L-DF/month)に相当する。

・軽油の CO₂ 排出量

平均走行燃費 13.8 (km/L-BDF)に類似の車輛として、平均速度 40 (km/h)のディーゼル乗用車の走行燃費を 13.3 (km/L-DF)と仮定し、その時の CO₂ 排出係数を 214.7 (g-CO₂/km)とすれば⁽³⁾、

$$13.3(\text{km/L-DF}) \times 0.2147 \text{ (kg-CO}_2\text{/km)} = 2.86 \text{ (kg-CO}_2\text{/L-DF)}$$

と近似できる。これより、

$$681 \text{ (L-DF/month)} \times 2.86 \text{ (kg-CO}_2\text{/L-DF)} = 1.95 \times 10^3 \text{ (kg-CO}_2\text{/month)} \quad (12)$$

と算出される。

8. まとめ

(11)、(12)より $1.95 \times 10^3 - 1.73 \times 10^3 = 0.22 \times 10^3$ (kg-CO₂/month) (約 - 11%) の削減効果が期待できる。しかしながら、とくに軽油使用の車輛の走行燃費は荷重に依存するため、より詳細な比較のためには、同車輛に軽油を使用したときの諸データを要する。

1 の評価範囲でも記したが、本評価は廃食油の再生利用に関して厳しい評価基準となっている。しかしながら、約 11%の CO₂ 排出量削減効果があることには大きな意義がある。

参考資料

(1) 実測値 .

(2) <http://www.nims.go.jp/ecomaterial/>

(3) 大城温, 松下雅行, 並河良治, 大西博文, 自動車走行時の燃料消費率と二酸化炭素排出係数, 土木技術資料, Vol.43, No.11, pp.50-55, 2001 .

第2節 BDFの性状分析について

本実証事業に使用しているBDFの性状分析を豊田通商株式会社の協力を得て行った。

分析にあたっては、「平成10年度 廃食用油高度利用検討推進事業 研究成果報告書/財団法人政策科学研究所」等先進事例を参考に下記の試験項目で分析を行った。

なお、BDFについては、原料となる廃食用油の質によりその性状が大きく変わるため、コマツ三重が平成17年2月に行った分析結果についても後述する。

(1) 油脂性状分析/試験項目

「平成10年度 廃食用油高度利用検討推進事業 研究成果報告書/財団法人政策科学研究所」等先進事例を参考に油脂性状調査の試験項目を決定した。(表1)

表1 油脂の試験項目

分析項目	定義	試験方法
脂肪酸組成		ガスクロマトグラフ法
酸価	油脂1gに含まれている遊離脂肪酸を中和するのに要する水酸化カリウムのmg数	基準油脂分析試験法
ヨウ素価	油脂にハロゲンを作用させ、吸収されるハロゲンの量をヨウ素に換算し、油脂100gに対するg数で表したもの	WIJS法
けん化価	油脂1gを完全にけん化するのに要する水酸化カリウムのmg数	基準油脂分析試験法
水分	油脂中の水分含有量の百分率。	過熱乾燥法
夾雑物	油脂を石油エーテルに溶解した場合の不溶解残分の百分率	基準油脂分析試験法
曇り点	油脂を冷却した時に油脂が曇り始める温度	基準油脂分析試験法

注1. 基準油脂分析試験法(日本油化学会編)によった。

注2. 脂肪酸は、炭素数:二重結合で示している。例えば18:3は、炭素数が18で二重結合(不飽和結合)数が3の脂肪酸(リノレン酸)であることを示している。(n-3)は、多価不飽和脂肪酸のうち、最初に存在する二重結合がn-2の炭素とn-3の炭素の間に存在するn-3系であること、(n-6)は、最初に存在する二重結合がn-5の炭素とn-6の炭素の間に存在するn-6系であることを示している。脂肪酸の種類については表2に示す。

表2 代表的な脂肪酸の種類

脂肪酸の種類	炭素数: 二重結合数	脂肪酸の種類	炭素数: 重結合数
カブロン酸	6:0	モロクチン酸	18:4
カプリル酸	8:0	アラキジン酸	20:0
カプリン酸	10:0	エイコセン酸	20:1
ラウリン酸	12:0	アラキドン酸	20:4
ミリスチン酸	14:0	エイコサペンタエン酸	20:5
パルミチン酸	16:0	ベヘニン酸	22:0
パルミトレイン酸	16:1	エルカ酸	22:1
ステアリン酸	18:0	ドコサペンタエン酸	22:5
オレイン酸	18:1	ドコサヘキサエン酸	22:6
リノール酸	18:2	リグノセリン酸	24:0
リノレン酸	18:3	セラコレン酸	24:1

環境連携三重の環事業

(2) 油脂性状分析/調査結果

表3 廃食用油（三重県）実測値/バージン油脂との比較

分析試験項目	廃食用油（三重県）	菜種油	大豆油	パーム油
脂肪酸組成				
12:0				0.4%
14:0	0.1%			1.0%
16:0	9.9%	4.3%	10.7%	39.5%
16:1	0.3%	0.2%		0.2%
18:0	3.3%	1.9%	3.2%	4.1%
18:1	39.2%	61.5%	25.0%	43.2%
18:2	38.9%	20.6%	53.3%	10.6%
18:3(n-3)	5.7%	8.3%	5.4%	0.2%
20:0	0.4%	0.5%	0.4%	0.4%
20:1	0.6%	1.1%	0.2%	0.2%
22:0	0.3%	0.2%	0.4%	
24:0	0.2%	0.1%	0.2%	
24:1		0.2%		
未同定	1.1%	1.1%	1.2%	0.2%
酸 価	1.77	0.06	0.05	0.06
ヨウ素価	120	110	132	57.1
けん化価	193	187	191	196
水 分	0.18%以下	0.01%以下	0.01%以下	0.01%以下
夾雑物	0.01%以下	0.01%以下	0.01%以下	0.01%以下
曇り点	-7.5 以下	-10 以下	-8.7	データなし

(3) 脂肪酸メチルエステル性状調査

上記の油脂性状分析に用いた油脂4種について、アルカリ触媒法を用いて脂肪酸メチルエステル化を行った場合に、得られるそれぞれの脂肪酸メチルエステルの性状が一般にどのようなものなのか調査した。調査項目は「平成10年度 廃食用油高度利用検討推進事業 研究成果報告書/財団法人政策科学研究所」等先進例を参考にした（表4）。

表4 脂肪酸メチルエステルの試験項目

分析項目	試験方法
酸 価	基準油脂分析試験法
メタノール含有量	ガスクロマトグラフ法
ヨウ素価	基準油脂分析試験法
メチルエステル化率	ガスクロマトグラフ法
モノグリセリド ジグリセリド トリグリセリド	ガスクロマトグラフ法
全グリセリン量	基準油脂分析試験法
リン含有量	基準油脂分析試験法
セッケン含有量	基準油脂分析試験法

(4) 脂肪酸メチルエステル性状確認/調査結果

表5 廃食用油メチルエステル(三重県)実測値/バージン油脂との比較

分析試験項目	廃食用油 メチルエステル	菜種油脂肪酸 メチルエステル	大豆油脂肪酸 メチルエステル	パーム油脂肪酸 メチルエステル
酸 価	0.54	0.30 mg-KOH/g	0.30 mg-KOH/g	0.20 mg-KOH/g
メタノール含有量	12ppm	0.02 %	0.02 %	0.02 %
ヨウ素価	116	< 103	< 132	< 45
メチルエステル化率	86.2%	99.5%	99.5%	99.5%
モノグリセリン	0.52%	0.5%	0.3%	0.2%
ジグリセリン	1.0%	< 0.1%	< 0.1%	< 0.1%
トリグリセリン	4.8%	< 0.05%	< 0.05%	< 0.1%
遊離グリセリン	検出せず (0.1%検出限界)	< 0.01%	< 0.01%	< 0.02%
全グリセリン量	0.7%	0.12%	0.12%	0.16%
リン含有量	未測定	< 5 mg/kg	< 3 mg/kg	< 8 mg/kg
セッケン含有量	343mg/kg	< 5 mg/kg	< 5 mg/kg	< 5 mg/kg

表6 廃食用油メチルエステル実測値(三重県)/ドイツ規格、EU規格、京都暫定規格案との比較

分析試験項目	廃食用油 メチルエステル 実測値	DIN51606	EN14214	京都 暫定規格案
酸 価	0.54 mg-KOH/g	< 0.5 mg-KOH/g	< 0.5 mg-KOH/g	< 0.5 mg-KOH/g
メタノール含有量	0.0012%	< 0.3%	< 0.2%	< 0.2 %
ヨウ素価	116 gr iodine/100gr	< 115 gr iodine/100gr	< 120 gr iodine/100gr	< 120 gr iodine/100gr
メチルエステル化率	86.2%	> 96.5%	> 96.5%	> 98%
モノグリセリン	0.52%	< 0.8%	< 0.8%	0.8%
ジグリセリン	1.0%	< 0.4%	< 0.2%	< 0.2%
トリグリセリン	4.8%	< 0.4%	< 0.2%	< 0.2%
遊離グリセリン	検出せず (0.1%検出限界)	< 0.02%	< 0.02%	< 0.02%
全グリセリン量	0.7%	< 0.25%	< 0.25%	< 0.25%
リン含有量	未測定	< 10 mg/kg	< 10 mg/kg	< 8 mg/kg
セッケン含有量	343mg/kg	< 5 mg/kg	< 5 mg/kg	< 5 mg/kg

以上

環境連携三重の環事業

(参考)

コマツ三重 B D F の純度分析について

1. 分析者

株式会社ダイヤ分析センター四日市分析事業所

2. 目的

簡易分析で純度が高い結果が得られた試料について、正規の規格試験に従って純度を確認する。

3. 試料

モデル B D F

廃サラダ油 A 由来

(なたね油、大豆油を主体とした事業所(居酒屋)からの排出油)

廃サラダ油 D (濾過) 由来

(大豆油を主体とした事業所(社員食堂)からの排出油を濾過した油)

4. 評価項目および結果

項目	分析結果		備考：分析法
	廃サラダ油 A	廃サラダ油 D	
モノグリセリド	0.20%	0.44%	A S T M D6584
ジグリセリド	0.22%	0.35%	A S T M D6584
トリグリセリド	0.12%	0.18%	A S T M D6584
遊離グリセリン	0.005%	0.001%	A S T M D6584
全グリセリン	0.09%	0.18%	A S T M D6584
N a + K	5 p p m以下	5 p p m以下	J I S K2262