

研究論文

バイオディーゼル燃料製造のための 油脂資源の現状と展望

Current Situations and Prospects of Oil/Fat Resources for Biodiesel Production

今原裕章* ・ 南英治** ・ 服部亮****
Hiroaki Imahara Eiji Minami Makoto Hattori
村上洋司***** ・ 松井信彰***** ・ 坂志朗***
Hiroshi Murakami Nobuaki Matsui Shiro Saka

(原稿受付日2006年7月31日, 受理日2006年10月20日)

Abstract

Biodiesel is an alternative for fossil diesel that is produced by transesterification of oils/fats with methanol. For further dissemination, waste oils/fats should be efficiently utilized especially in Japan. In this study, therefore, estimation was made on the amount of waste oils/fats emerged annually in Japan. Concurrently, waste oils/fats were collected from several sites and subjected to the analyses such as acid value, water content, peroxide value, iodine value and fatty acid composition for evaluating as a feedstock of biodiesel. Based on these lines of information, it was found that dark oil containing a high content of fatty acids and used cooking oil remain useful for biodiesel production. A set of analyses showed that dark oil can be converted into biodiesel only with non-catalytic method such as supercritical methanol method, whereas used cooking oils can be available with alkali-catalyzed method. From these findings, it was clarified that waste oils/fats can be efficiently utilized as well as virgin ones.

1. 序論

地球環境問題や化石資源の枯渇が懸念される中、化石燃料の代替としてバイオエタノールやバイオディーゼル燃料が注目されている。2003年5月からは「揮発油等の品質の確保等に関する法律（品質確保法）」の改訂により^{1), 2)}、ガソリンにエタノールを3%まで混合できるようになった。我が国で使用される全てのガソリンにバイオエタノールを3%混合すれば、京都議定書において約1%のCO₂排出量の削減が期待される。

一方、バイオディーゼル燃料(以下BDF)については2006年7月現在、公的規格や法律が依然として未整備である。このため、早くからBDFの利用を推進してきた京都市では、独自に品質規格(京都スタンダード)を定めて運用してきた³⁾。

しかしながら、BDFの普及のためには国レベルでの規格や法律の整備が不可欠である。現在、経済産業省では、軽油に5%までBDFを混合することを想定した品質確保法の改訂を検討中である⁴⁾。

BDF(脂肪酸メチルエステル)は、油脂の主成分であるトリグリセリドのエステル交換反応により得られる軽油代替燃料であり、理論的には1Lの油脂からほぼ1LのBDFを製造できる。仮に、我が国で使用される全ての軽油にBDFを5%混合(B5)すれば、京都議定書においてCO₂排出量を約0.35%削減できる計算になる。ただし、我が国での軽油販売量は年間で約4,000万kLにも及ぶため⁵⁾、これには約200万kLの油脂が必要となる。農林水産省の統計によれば、我が国では食用として年間約250万トン(油脂の比重を0.9とすれば約278万kLに相当)の油脂が使用されているが、このうち約87%を海外からの輸入に依存している(平成16年ベース)⁶⁾。このように、油脂資源に乏しい我が国では、未使用のバージン油脂だけではなく、家庭廃油などの廃油脂にも目を向ける必要がある。

しかしながら、廃油脂は種々雑多であり、油脂の種類や排出源、排出時期によりその性状は大きく異なる。例えば、製油工場からの残渣油(ダーク油)の場合、油脂精製プロ

*京都大学大学院エネルギー科学研究科

エネルギー社会・環境科学専攻博士課程学生

** / / 博士研究員
*** / / 教授

E-mail: saka@energy.kyoto-u.ac.jp

〒606-8501 京都市左京区吉田本町

**** 豊田通商(株)事業開発部部長補

***** / / 課長職

***** / / 主事

〒450-8575 名古屋市中区区名駅4-9-8 センチュリー豊田ビル

Pacificchem2005, ハワイ (15-21 December, 2005) にて発表

セスの脱酸工程から排出されるため、遊離脂肪酸が主成分となる。一方で、外食産業や一般家庭からの廃食用油の場合、揚げ物などとして使用する際に水分が混入し、さらに高温に晒されることで油脂の一部が加水分解を受け、遊離脂肪酸含有量がやや増加する。

廃油脂中に含まれるこれらの水や遊離脂肪酸は、BDF製造過程において悪影響を及ぼす。特に、商用的に採用されているアルカリ触媒法では、遊離脂肪酸からアルカリセッケンが生成するため、BDF収率が低下する。アルカリセッケンがたとえ少量でも、BDF精製工程においてエマルジョン化を引き起こす可能性がある。さらに、原料中の水分は触媒機能の低下を招くため、反応前に除去する必要がある。したがって、廃油脂からBDFを製造する場合には、原料中の水分や遊離脂肪酸含有量を予め把握しておく必要がある。

一方、原料油脂の脂肪酸組成も重要な情報である。油脂には常温で液体（油）や固体のもの（脂）があるが、この性質は油脂の脂肪酸組成によって決まる。一般に、不飽和脂肪酸の組成が高い油脂では常温で液体となるが、飽和脂肪酸の組成が高い場合には融点が増し、常温で固体となる。一方、不飽和脂肪酸組成の高い油脂は酸化による劣化を受けやすいが、飽和脂肪酸組成の高い油脂では酸化安定性が良い。

これらの油脂の性質はBDFに変換しても受け継がれるため、冬季の寒冷地での使用を考える場合、不飽和脂肪酸組成の高い油脂の方が原料として適している。しかしながら、不飽和度が高すぎると酸化安定性を損なうため、燃料製造時や長期保存時の劣化に注意する必要がある。このため、BDFの脂肪酸組成には適度なバランスが必要である。

以上のように、我が国においてBDFの普及を目指すためには、①廃油脂発生状況とその資源量、および②廃油脂の種類と性状（不純物や脂肪酸組成などの情報）に関する基礎的な情報が不可欠である。そこで本研究では、まず統計資料やヒアリング調査を基に、我が国で年間に発生している廃油脂の資源量を推定した。また、様々な廃油脂発生サイトから廃油脂検体を実際に採取し、性状調査を行った。さらに、これらの調査・研究結果を基に、我が国における廃油脂からのBDF生産の可能性について考察した。

2. 廃油脂発生量の推定および性状評価の方法

2.1 廃油脂発生量の推定方法

廃油脂の種類としては、製油工場から排出されるダーク油、加工油脂業（マーガリンおよびショートニングなど）からの加工油脂廃油、食品製造業（菓子、即席麺および水産練製品など）からの食品製造廃油、さらには外食産業（レストランおよびファーストフード店など）からの業務系廃油および一般家庭からの家庭廃油が挙げられる。

これらの各発生サイトから1年間に排出される廃油脂量を、(財)日本エネルギー経済研究所による既存調査⁷⁾および最新の農林水産省統計「我が国の油脂事情」⁸⁾を基に推定した。さらに、本研究で調査したダーク油の推定発生量を加え、我が国全体の廃油脂発生量とした。

なお、我が国の油脂全体の消費量は年間で約300万トンであるが、内訳は食用が約250万トン、非食用が45万トン、輸出用が5万トンである⁹⁾。このうち、輸出用については我が国での廃油とならないため本論文では除外した。また、非食用としては主に工業用途（潤滑油等）が挙げられるが、これらから生ずる廃油は本来の油脂性状から著しく乖離しているため、BDF原料として対象外とした。

2.2 廃油脂の性状評価方法

上記の各発生サイトから実際に採取した廃油脂試料について、水分、酸価、過酸化値、ヨウ素価および脂肪酸組成を分析した。図1に採取した廃油脂の外観を示す。本研究では、ダーク油、加工油脂廃油、業務系廃油および家庭廃油など、計51検体の廃油脂検体を採取・分析した。ただし、守秘義務の観点から、本論文では各発生サイトにおいて平均的な性状を持つ検体の結果のみを社名等を伏せて記載した。

なお、水分は基準油脂分析法2.1.3.4（カールフィッシャー法）、酸価は同2.3.1（中和滴定）、過酸化値は同2.5.2.1（酢酸・イソオクタン法）、ヨウ素価は同2.3.4.1（ウィイス・シクロヘキサン法）、脂肪酸組成は同2.4.2.1（ガスクロマトグラフィー分析法）に従ってそれぞれ評価した⁸⁾。



図1 様々な発生サイトから回収した廃油脂の外観（回収時期：平成16年9月～平成17年3月）

表1 廃油の発生率

発生サイト	廃油の種類	発生量 (g/人・年)	廃油率 (%)	戻り率 (%)
製油業	ダーク油	—	1.7	—
加工油脂業 ⁷⁾	加工油脂廃油	—	—	5
食品製造業 ⁷⁾	食品製造廃油	—	10	—
外食産業 ⁷⁾	業務系廃油	—	30	—
一般家庭 ⁷⁾	家庭廃油	950	40	—

注) 家庭からの廃油の発生量および廃油率は、それぞれ異なる見方から推定されたものであり、両者の数値は一致しない。

表2 食用廃油の供給量と廃食用油の発生量

廃油脂の種類	油脂供給量*1 (万 t/年)	1人1年当たり (g/人・年)		廃油発生量 (万 t/年)
		供給量*2	廃油	
ダーク油	(180*3)	—	230	3
加工油脂廃油	43	3,300	170	2
食品製造廃油	84	6,500	650	8
業務系廃油	126*4	5,000	1,500	20
家庭廃油		4,700	950~1,900	12~24
合計	253	19,500	3,500~4,450	45~57

- * 1 供給量は文献⁶⁾
- * 2 我が国の人口を1億3千万人と仮定
- * 3 国内の植物油生産量
- * 4 単体油の家庭用比率は全供給量の48%と仮定

3. 結果および考察

3.1 我が国の廃油脂発生量の推定

先述のように、廃油脂は主に製油業、加工油脂業、食品製造業、外食産業および一般家庭から発生する。製油工場においては、油脂は脱ガム・脱酸・脱色・脱臭の諸工程を経て製造されるが、このうち脱酸工程で排出される廃棄物（アルカリ油滓）がダーク油のもとになる。複数の製油業者に対するヒアリング調査によれば、我が国の製油業における油脂の生産量は年間約180万トンであり、これに伴い排出されるアルカリ油滓は年間約12万トンと見積られる。このアルカリ油滓中に存在する脂質成分（BDFの原料になり得る）量を考慮すると、結局、180万トンの油脂生産に伴い排出されるダーク油量は油脂生産量の1.7%に相当し、約3万トンと推定した。

一方、(財)日本エネルギー経済研究所の調査⁷⁾では、加工油脂業、食品製造業、外食産業および家庭からの廃油脂の発生率を表1のように推定している。加工油脂業（マーガリンなど）では、製造工程における廃油の発生はほとんどないと考えられるが、商品の一部が賞味期限切れなどで戻される場合（商品の5%）があり、これが廃油の回収ルートに回されている。また、油脂食品製造業、外食産業および家庭からの廃油脂は、それぞれ使用油脂量の10%、30%

および40%程度であると見積もられている。ここではこの数値を最新の統計データ（平成16年ベース）に当てはめ、我が国の廃油脂発生量を推定した。結果を表2に示す。

これによれば、我が国での年間の廃油脂発生量は計45~57万トンであり、うち一般家庭からの廃油は12~24万トンと推定された。一般家庭からの廃油脂はその大部分が一般ごみとして廃棄されているものと考えられる。一方、家庭廃油以外の廃油脂は計33万トンである。廃油脂回収業者の推計⁷⁾によれば、これらのうち約90%（ダーク油の3万トンを除く）が飼料や工業用途に利用されていると見積もられている。従って、有効利用されずに廃棄されている廃油脂は残りの約3万トンであり、これにダーク油および一般家庭からの廃油脂を加えると、結局、我が国で利用可能な廃油脂量は年間18~30万トンと推定される。以上、我が国における廃油脂の発生状況をまとめると図2のようになる。

なお、この30万トンの廃油脂からは約33万kL（30万トン）のBDFが製造できる。これは我が国の軽油販売量4,000万kLの約0.8%程度に相当するが、この量は決して小さくなく、これらの回収・有効利用が望まれる。

3.2 各種廃油脂の性状調査

上述の発生サイトから採取した各種廃油脂の水分、酸価、

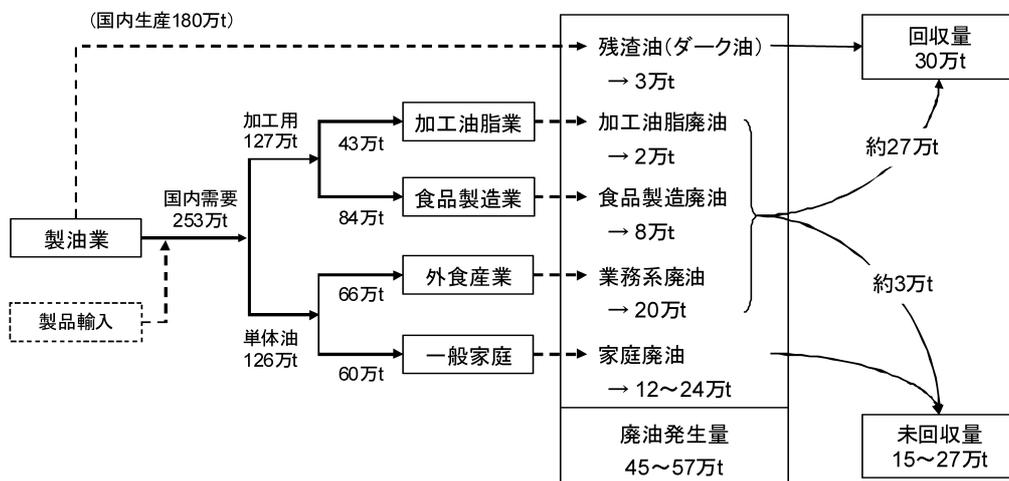


図2 我が国の廃油脂の種類と年間発生量の推定（平成16年ベース）

表3 採取した各種廃油脂試料の性状調査結果

試料名	水分 (%)	酸価 (mg/g)	過酸化物価	ヨウ素価 (g/100g)
ダーク油 A	1.94	131	—	179
ダーク油 B	0.87	153	—	115
ダーク油 C	0.68	192	—	58
加工油脂廃油	0.12	0.64	<0.5	63
業務系廃油 A	0.50	4.26	0.75	69
業務系廃油 B	0.079	6.30	27	106
業務系廃油 C	0.032	6.54	<0.5	103
家庭廃油 A	0.10	0.23	2.8	115
家庭廃油 B	0.046	2.22	1.9	111
家庭廃油 C	0.12	0.63	5.1	98

過酸化物価およびヨウ素価の評価結果を表3に示す。

まず、製油業からのダーク油はいずれも水分および酸価が高い値を示している。酸価の値が130~190であることから、これらの遊離脂肪酸含有量は65~95%程度であると推定される。したがって、これらの廃油脂にはアルカリ触媒法は適用できず、超臨界メタノール法^{9), 10)}などの新規技術の実用化が待たれるところである。

一方、加工油脂業からの廃油脂は水分、酸価ともに低い値を示している(表3)。さらに、過酸化物価が低いことから酸化劣化もしていないと考えられ、未使用精製油脂と同様、良質なBDF原料として用いることが可能である。ただし、この試料はショートニングの原料(豚脂やパーム油など)のためヨウ素価が63と低く、この廃油を原料としたBDFでは酸化安定性が高い反面、低温流動性は悪いものと思われる。

業務系廃油や家庭廃油については、いずれも揚げ物油、てんぷら油などとして使用されていると思われるが、酸価および過酸化物価は前者の方が高い傾向にあった。これは、外食産業では一般家庭よりも油の使用回数が多い傾向にあるためと推察される。酸価の値からは業務系廃油、家庭廃油のいずれもアルカリ触媒法が適用可能と推定されるが、前者については酸・アルカリ触媒法の方がより無難と言える¹¹⁾。

3.3 各種廃油脂類の脂肪酸組成

表4に採取した廃油脂の脂肪酸組成を示す。ダーク油Aは、魚油精製過程で発生したものであり、エイコサペンタエン酸(C_{20:5})やドコサヘキサエン酸(C_{22:6})といった多価不飽和脂肪酸を含んでいる。このため、ダーク油AをBDF原料として用いるには、水素化などにより不飽和度を下げる必要がある。ただし、魚油には多価不飽和脂肪酸が含まれる一方、飽和脂肪酸も多く含まれているため、不飽和度を下げた場合には低温特性の悪化が懸念される。従って、魚油由来の廃油脂をBDFとして利用するのは必ずしも得策ではなく、より付加価値の高い多価不飽和脂肪酸資源としての利用が望ましいと考えられる。

ダーク油Bは菜種油精製過程で発生したものであり、不飽和脂肪酸、とりわけオレイン酸(C_{18:1})の割合が高い。このため、低温流動性および酸化安定性に優れており、BDFの原料として好ましい。また、ダーク油Cおよび食品製造業廃油はパーム油由来のものであり、飽和脂肪酸、とりわけパルミチン酸(C_{16:0})の割合が高い。このため、これらの廃油脂原料から得られるBDFは、酸化安定性には優れていると考えられるが、低温流動性が悪く、寒冷地での使用は困難である。したがって、これらの廃油を原料とする場合、他の油脂との混合などにより飽和度を下げる工夫が必要となる。

業務系廃油および家庭廃油は、菜種油や大豆油などの混合油である場合が多い。飽和脂肪酸含量は、精製菜種油と比較すると若干高いが、低温流動性への影響はほとんど無いと考えられる。しかしながら、酸化安定性についてはリノール酸(C_{18:2})の増加に従い悪化するため、抗酸化剤の添加を検討する必要がある。

以上のように、廃油脂の性状は多様であり、一様な性状の原料を安定して入手することは容易ではない。しかしながら、原料油脂の性状がBDFの品質に与える影響は大きく、今後も実態調査や回収現場での簡易モニタリングなどが重要になるとと思われる。

表4 採取した各種廃油脂試料の脂肪酸組成

試料名	脂肪酸組成 (wt%)									
	C _{16:0}	C _{16:1}	C _{18:0}	C _{18:1}	C _{18:2}	C _{18:3}	C _{20:1}	C _{20:5}	C _{22:6}	他
ダーク油 A	15.5	5.4	3.3	14.3	1.5	1.0	5.9	10.5	14.8	27.8
ダーク油 B	8.3	-	2.9	58.1	22.1	8.5	-	-	-	0.1
ダーク油 C	45.6	0.2	4.2	38.0	9.7	0.4	-	-	-	1.9
加工油脂廃油	39.1	0.7	6.7	41.4	9.1	0.2	0.3	-	-	2.5
業務系廃油 A	19.4	0.6	6.9	63.5	4.4	0.2	0.3	-	-	4.7
業務系廃油 B	5.8	0.3	2.3	60.1	21.8	7.3	1.2	-	-	1.2
業務系廃油 C	14.0	0.9	4.8	30.8	44.3	3.9	0.4	-	-	0.9
家庭廃油 A	12.5	0.2	3.6	25.5	51.3	5.9	0.3	-	-	0.7
家庭廃油 B	12.6	0.1	5.0	27.4	48.7	5.1	0.3	-	-	0.8
家庭廃油 C	5.8	0.3	2.0	57.1	26.5	6.4	0.9	-	-	1.0

4. 今後のBDF事業化の展望

本調査で明らかなように、廃油脂は種々雑多である。しかしながら、BDF事業化のためには、量、質および価格の変動が少なく、効率的な集荷が可能な廃油脂の選択が望ましい。このような条件に合う廃油脂として、ダーク油が注目される。ダーク油は油脂精製に伴って排出されるため、集約化傾向にある製油工場において安定的な供給が期待され、また安価に入手できる可能性が高く、さらには排出者自身がその有効利用に高い関心を持っている。

ダーク油は遊離脂肪酸含有量が高く、既存のアルカリ触媒法ではBDFに転換できない。このような高い脂肪酸含有量の廃油脂をBDFに転換する技術として、現在のところ超臨界メタノール法が実用化に近いものとして挙げられる。

ダーク油は全国49ヶ所の食用製油工場にて年間3万トン発生しているが、生産規模の大きな工場では年間3,500トン程度のダーク油を集約して確保することが可能である。これに加え、各工場近隣の廃油排出企業、一般家庭および回収業者から年間1,500トンの廃油脂を確保することができれば、年間5,000トン規模のBDF製造プラントを想定することが可能となり、地域分散型BDF製造工場とは異なる形態をとることが可能となる。なお、この1,500トンの量は廃油脂を原料としてBDF製造を行っている京都市の実績でもあり、実現可能な値である。

図2に示す我が国の廃油脂の年間発生量の推定より、未回収量は15~27万トンである。仮に、これらがすべてBDF製造に利用できるとしても、同程度のBDFが得られるのみである。一方、現在経済産業省で検討中の軽油に5%までBDFを混合する場合、200万kL(質量換算180万トン)のBDFが必要となるが、最大27万トン程度の未回収廃油脂では原料として不十分である。このような状況のもと、将来的には我が国だけではなく、東南アジアの豊かな油脂資源にも目を向ける必要があると思われる。例えば、アブラヤシ(*Elaeis guineensis*)からのパーム油は大豆油に次ぐ生産量を誇り、近年マレーシアやインドネシアでそのプランテーションが拡大している。また、ナンヨウアブラギリ(*Jatropha curcas*)、スナバコノキ(*Hura crepitans*)、ミフクラギ(*Cerbera manghas*)などの種子にも油脂が豊富に含まれている。後

者の3種については毒性があるため、食用と競合することなくBDF原料として期待できる。

結局、我が国でBDFの普及を目指すには、我が国で排出される廃油脂を使いこなすとともに、東南アジアでの油脂資源を考慮した原料の確保を進めていくことが重要である。そのため、本研究のような廃油脂性状の実態調査は今後も重要であると思われる。また、将来的には、東南アジアの各種油脂資源にも目を向け、その性状を明らかにし、BDF原料としての可能性を明らかにしなければならない。

5. 謝辞

本研究は京都大学21世紀COEプログラム「環境調和型エネルギーの研究教育拠点形成」およびNEDO「バイオマスエネルギー高効率転換技術開発」による研究助成をベースに行われたものであり、ご助成に対し深く感謝の意を表します。

参考文献

- 揮発油等の品質の確保等に関する法律(昭和五十一年十一月二十五日法律第八十八号) - 最終改正(平成一六年四月二一日法律第三六号), (2004年4月).
- 揮発油等の品質の確保等に関する法律施行規則(昭和五十二年五月十七日通商産業省令第二十四号) - 最終改正(平成一七年三月八日経済産業省令第一五号), (2005年3月).
- バイオディーゼル燃料化事業技術検討会;平成14年度バイオディーゼル燃料化事業技術検討会報告書,京都市環境局,京都,(2003),40-50.
- 資源エネルギー庁;第6回石油部会燃料政策小委員会規格検討ワーキンググループ議事録(平成17年2月8日),資源エネルギー庁,東京,(2005).
- 経済産業省経済産業政策局;資源・エネルギー統計年報,(2004),52-55.
- 農林水産省食品産業振興課;我が国の油脂事情,(2005),78-97.
- 財団法人エネルギー経済研究所;植物廃油の石油代替エネルギーとしての再生可能性調査,(1994),6-11.
- 日本油化学会;基準油脂分析試験法,(1996).
- Saka, S., Kusdiana, D.; Biodiesel fuel from rapeseed oil as prepared in supercritical methanol, *Fuel*, 80 (2001), 225-231.
- Kusdiana, D., Saka, S.; Two-step preparation for catalyst-free biodiesel fuel production, *Appl. Biochem. Biotechnol.*, 115 (2004), 781-791.
- Boocock, D. G. B.; Biodiesel fuel from waste fats and oils - a process for converting fatty acids and triglycerides, *Proc. Kyoto Univ. Int. Symp. on Post-Petrofuels in the 21st century*, (2002), 171-177.