# 特集 食品由来廃棄物の再資源化技術に寄与する化学工学

環境問題を解決する1つの言葉、「もったいない」を具現化する技術開発は、化学工学分野における研究開発の大きな仕事である。

本特集では「食品由来の廃棄物から有用資源の回収・エネルギー化」、これらの技術に対して「化学工学」がどのように貢献しているか、最新の研究・技術内容について事例を紹介していただく。

(編集担当:田中孝国) †

# 都市油田の活用 ~食品卸業を中心とした廃食用油の燃料化~

## 佐藤 理夫

## 1. 都市油田からの廃食油活用システム

筆者は製造プロセスや地域における資源やエネルギーの 循環を解析することを専門としており、何を作るかにはこ だわらないスタイルで活動している。大学に着任後は、ま ずはなんでも相談できる「ふくしまのホームドクター」とな るように心がけている。

2008年,福島市で大正時代から食品卸業を営む(株)岩見の岩見政弘社長(現会長)より,廃食用油からBDF (Bio Diesel Fuel)を製造する方法についての相談を受けた。(株)岩見では1回に100リットルの廃食用油を処理できる製造装置を既に購入しており、「売った油には最後まで責任を持ち、環境に優しい行動をしたい」と強い意志を伝えてきた。強アルカリやメタノールなどの危険要素を説明し、いろいろと打ち合わせた結果、製造装置を大学に設置して実証試験をおこなうこととした。2009年には福島市の研究開発助成を受けることもでき、地元企業との楽しい取り組みが更に加速した。

食品卸業を中心とした廃食用油活用システムを**図1**に示す。この図は2010年の福島市産業交流フェアに出展した

Bio Diesel Fuel Demonstrated by Food Wholesale Company

Michio SATO(正会員)

1987年 東京大学大学院工学系研究科化学工

学専攻博士課程修了 工学博士 福島大学共生システム理工学類 教

. 在 福島 授

連絡先;〒960-1296 福島市金谷川1 E-mail msato@sss.fukushima-u.ac.jp

2018年10月29日受理

際に掲出したポスターである。食品加工工場からは、均質で大量の廃食用油が一度に得られる。これに対し、都市に点在するスーパーや飲食店で発生する廃食用油は、一箇所での発生量が少ないため、回収されずに処分されていることが多かった。都市の油田は活用されていなかったのである。都市油田を渡り歩く食品卸会社が食材配達と同時に廃食用油を回収(有価で引き取り)することにより、追加的な稼

# とが多かった。都市の油田は活用されていなかったのである。都市油田を渡り歩く食品卸会社が食材配達と同時に廃食用油を回収(有価で引き取り)することにより、追加的な移 「完食油とBDFの流れ 今まで回収されなかった 小口の廃食油を回収

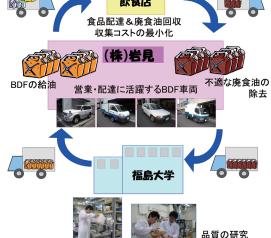


図1 食品卸を拠点とした廃食用油活用の実証試験

† Tanaka, T.

BDFの精製

平成29,30年度化工誌編集委員(2号特集主査) 小山工業高等専門学校物質工学科 動やコストを要することなく廃食用油が集まってくる。これをBDFとして使用することにより、食品卸会社には配送車両から排出される二酸化炭素量の削減、飲食店には廃食油処分に要するコスト削減、そして環境に優しい活動のネットワークが地域に構築されるというメリットが生まれる。

廃食用油のBDF化には、実績の多いアルカリ触媒法を採用した。脱水した廃食用油を加温し、水酸化カリウムとメタノールを加えてエステル交換反応をおこない、脂肪酸メチルエステル(BDFとなる)と副生するグリセリン(脂肪酸カリウムを含む)を分離し、温水で洗浄した後に乾燥するものである。

大学ではBDF製造法についての実証的研究をおこなうと同時に、様々な廃食用油が得られるといった特徴を活かした研究をおこなった。研究用に $100 \sim 200 \text{ mL}$ と1 L程度の2種のBDF試作設備を用意し、100 Lの製造装置と併せて使用した。エステル交換反応は60℃で1時間、温水洗浄は2回おこなうことを標準とした。製造装置では加熱乾燥したBDFが冷めるまでに時間を要するため、製造は1日1回に限られた。BDF製造量は廃食用油の回収量により変動したが、月に $800 \sim 1,500 \text{ L}$ であった。

大学で製造したBDFは配送車両で使用し、燃費や走行感覚を記録した。燃料に起因する車両トラブルはなく、冬季に加速が少々悪い程度で使用感に問題はなかった。軽油と比べてBDFは発熱量が低いためにkm/Lで表記する燃費が下がることを予想したが、予想に反して燃費は向上した。自分達で作った燃料は大事にするという、運転者の意識向上があったものと考えている。

## 2. 顔の見える廃食用油から得られた成果

(株)岩見は福島市を中心に、県内各地の飲食店などに食材を配達している。回収用のポリタンクを配布しておき、廃食用油は冷ましたフライヤーから直接回収される。そのため、廃食用油に水分が含まれることはなく、脱水工程を省略することができ、BDF製造時間が短縮し消費エネル





室温

くもり点付近 析出物発生

流動点以下 凝固

図2 低温でのBDFの性状

ギーが低減した。ポリタンクには廃食用油の発生源の情報が付されて運ばれてくる。店舗名・回収日・大豆油か菜種油かといった元の油の情報・フライヤーの機種・何を揚げているのか等,多くのことが判っている『顔の見える廃食用油』である。

BDFの課題のひとつが、厳冬期の対策である。図2に低温でのBDFの様子を示す。析出物が見られる温度をくもり点、固形化してしまう温度を流動点と称している。燃料温度がくもり点以下となると、析出物が燃料フィルター等に詰まってエンジンへの燃料供給が不安定となる。流動点以下では燃料供給は途絶えてしまい、エンジンは起動しない。車両は冷え込む早朝に屋外に置かれていることも多いため、最低気温が氷点下の日が続く福島では厳冬期の対策は必須である。

様々な食用油から試作したBDFのくもり点と流動点を 図3に示す。植物油は業務用に市販しているもの、鶏油は 福島県内の食肉加工場で廃棄されている内臓脂肪塊から加 熱採取したものである。飽和脂肪酸・一価および多価不飽 和脂肪酸の含有量も併せて示している。これは、食品成分 表の油脂の脂肪酸組成表から集計したものである。パルチ ミン酸やステアリン酸といった飽和脂肪酸の量と流動点と は良い相関がある。一価不飽和脂肪酸のオレイン酸や二価 不飽和脂肪酸のリノール酸が多い油種ほど、流動点やくも り点が低くなっている。植物性ながら飽和脂肪酸が多い パーム油は要注意であり、実際にパーム油と大豆油を混合 して使用している店舗からの廃食油で製造したBDFの流 動点は大豆BDFよりも高かった。牛脂やラードは、分子 量が大きいステアリン酸の含有量が鶏油よりも多いため、 鶏油BDFよりも更に流動点が高い。余談であるが、研究 室のパーティーに岩見様がフォアグラを差し入れてくだ さったことがある。フォアグラを焼いた際に出た脂でフォ アグラBDFを試作したところ、流動点がどの油種よりも 高く、最悪のBDFであった。

廃食用油から製造したBDFの特性が未使用油と同等で

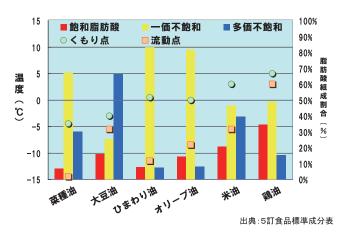


図3 様々の油から製造したBDFのくもり点・流動点・脂肪酸組成

あるか、気になるところである。購入した植物油を単独で使用している店舗からの廃食用油で製造したBDFを、未使用油BDFと比較した結果を表1に示す。廃食用油BDFのくもり点・流動点は、未使用油BDFよりも高くなっており、特性は悪化している。ヨウ素価を併せて示した。ヨウ素価とは、脂肪酸中の二重結合がヨウ素を消費することを測定し、不飽和度を指標化するものである。大豆油には二価不飽和脂肪酸のリノール酸が多いため、ヨウ素価が大きい。菜種油も大豆油も、店舗での使用によりヨウ素価が減少しており、不飽和脂肪酸が変質していることが判る。飽和脂肪酸の比率が上がることのみならず、不飽和脂肪酸が酸化あるいは架橋してできた生成物が増えることが、流動点の上昇の原因と考えられる。

冬期安定性に優れたBDFが製造できる廃食用油は、菜種油で、動物性油脂が混入せず、使い込んでいないものである。「菜種油で天麩羅をカラッと揚げる店舗」が良く、「大豆油とラードでとんかつ」は好ましくない。実証試験では、菜種油由来の廃食用油のみを厳冬期に使用した(保管した大豆廃食用油等は、春以降に使用)。菜種油を値引き販売することで飲食店でのフライヤーの油交換頻度を上げ、菜種廃食用油の回収量を増やす等、食品卸ならではの工夫もおこなったそうである。

冬期安定性を向上させるため、析出しやすい成分の除去を試みた。くもり点付近の低温で静置して、析出物を除去するという簡単な手法である。研究室で低温恒温機を用いておこなった結果を表2に示す。上澄みBDFは全体量の8割程度得られた。上澄みBDFでは飽和脂肪酸が減少しており、流動点の低下も確認できた。車両を用いた実証では、BDFが入ったポリタンクを冷え込む場所で保管し、上澄みBDFのみを車両に給油するという方法をとった。静置時間が長く低温を何回も経験するためか、析出物中の飽和

表1 飲食店での食用油使用によるBDFの特性変化

	くもり点(℃)	流動点(℃)	ヨウ素価
菜種未使用油	- 4.5	- 14.5	112
菜種廃食用油	- 4.0	- 7.0	106
大豆未使用油	- 3.0	- 5.5	138
大豆廃食用油	- 1.0	- 4.5	120

表2 低温析出法によるBDFの脂肪酸組成変化

脂肪酸組成			冷却後		
		大豆BDF	( − 2.5℃	24時間)	
			上澄み液	析出物	
パルチミン酸	飽和	14.5	10.5	17.5	
ステアリン酸	飽和	1.1	0.6	1.3	
オレイン酸	一価不飽和	26.4	27.2	24.9	
リノール酸	二価不飽和	53.3	56.5	51.7	
リノレン酸	三価不飽和	4.5	5.1	4.7	

脂肪酸濃度は実験室でのものよりも高くなった。その結果として、給油できる上澄みBDFの量は多くなった。分離した析出物も脂肪酸メチルエステルであるため、春以降に製造したBDFに混ぜて消費することが可能であった。

とんでもない顔を見せる廃食用油もあった。ドーナツ等の甘いものを揚げた油は、製造時にBDFと廃グリセリンとの分離が悪く、洗浄水が白濁するとともに油水界面にクリーム状の乳化層ができるなどしたため、BDFの収率が低下した。ドーナツ生地に含まれる乳化剤の混入や、糖と油脂とが縮合して界面活性を持つ物質ができていることを推定し、解乳化を試みて収率を向上させることに成功した。

スーパーの厨房のグリーストラップに溜まった油が持ち込まれたことがある。強い腐敗臭と酸臭を放ち、処分に困っているとのことであった。遊離脂肪酸の量が通常の廃食用油と比べて一桁以上高く、アルカリ触媒を中和してしまうためにBDF製造には工夫が必要であった。消石灰(水酸化カルシウム)を混合して遊離脂肪酸を石鹸カスとして固形化し、混入している細かい固形分とともに除去することにより、油分の多くをBDFとすることができた。悪臭はアルカリを添加したことで大幅に緩和されるという効果もあった。

### 3. 東日本大震災直後の福島で活躍したBDF

2010年の初冬,BDFの製造法については研究ネタがつきてきたために製造装置を学外(筆者の自宅敷地内の作業小屋)に移設し、大学での研究は試作設備でおこなうのみとした。同時期に、筆者もディーゼルエンジン搭載のライトバンを中古で購入し、BDFユーザーの仲間入りをした(図4)。その数ヵ月後の2011年3月11日に東日本大震災が発生し、福島の地に甚大な被害をもたらした。

地震の数日後、岩見孝之社長からBDF製造は可能かと問い合わせる電話があった。製造装置は被害を免れ、原料の廃食用油や薬品類は在庫していた。停電は一日で解消していたが、断水は続いていた。(株)岩見の方々が井戸水を運んでくれることとなり、節水レシピを作成してBDF製造を再開した。

当時は東北自動車道を始め主要道路が寸断し、東北の殆どの地域で物流が止まっていた。ガソリン・軽油も例外ではなく、入手が極めて困難となり、スタンドには長蛇の列ができていた。更に追い討ちをかけたのが福島第一原子力発電所の事故である。放射線量が高いために物流各社が福島県内への車両の乗り入れを自粛したのである。

食品卸業は食材を配るのが仕事である。配るためには車両が動かなくてはならない。ガソリン車は直ぐに燃料が底をつき、車庫に眠ることとなった。その時にBDFで走る配送車両が活躍し、在庫していた食材を病院や福祉施設な



自動車槍	杳 証	平成	30 a 4 a 2 a	福島運輸支局長
自動車整錄音号又は車両番号	量錄年月日/交付年月日 初度登錄年月	自動車の程別	用途 自家用・事業用の別	事体の形状
編集 400 5 6143 単	平成 22 x 10 a 21 a 17 x 2 a 名	小型乗車定員	貨物 自家用 パ 最大積載量	シ [021] 
トBタ 車 <b>安</b> 事	9 [194	] 2[5]A	450[ 250]ix	1080% 1640[ 1605]。 新軸葉 軟後軸蓋 後新軸蓋 後 極重
NLP51-0008126	原動機の型式	430m 程序末景文目文明形力		650m 一 一
KP-NLP51V	IND	1. 36	軽油	11480 0001
所有者の氏名又は名称 佐藤 理夫				
所有者の住所				[07500 1115 016]
使用者の氏名又は名称・**				
使用者の住用***				
使用の本拠の位置				
有効期間の油でする日 平成 31 4 4 8 6 m				
2			ード] 22-0014 事項] <u>(1) バイオデ</u>	4 ィーゼル100%燃料併用

図4 BDFで走行していた筆者のライトバン (「バイオディーゼル 100%燃料併用|と車検証に記載している)

どに届け続けたのである。普段のお客様である飲食店の料理人達は、避難所などで炊き出しボランティアをおこなっていた。そこに食材を届けたのもBDF車両である。(株)岩見が発注した食材は福島市まで届けてもらえず、県外まで取りに行く必要があった。この時にもBDF車両が活躍した。筆者も燃料残量を気にすることなく、ライトバンで様々な仕事にあたることができた。燃料のありがたさが沁みた。

## 4. 廃食用油活用の現状と課題

実証試験は順調に実施でき、東日本大震災からの復興に 貢献することもできたBDFであるが、現在は製造を休止 している。走行距離の多さからBDF車両は次々と寿命を 迎え、車両更新が必要となった。ディーゼルエンジンを搭 載している小型トラックは殆ど販売されておらず、BDF が使える車両がなくなってしまったのである。

クリーンディーゼルと呼ばれるコモンレール式ディーゼ

ルエンジンとBDFとは相性が悪い。コモンレール式エンジンでは、細かい制御をおこない、超高圧で燃料を噴射している。いくら高品質のBDFを製造したとしても、粘度や引火点等の物性は軽油と異なるため、安定した使用は難しい。筆者のライトバンはコモンレール式であるがBDF100%で走行することができていた。走行距離が多くなかったのでトラブルにならなかったと思われるが、BDFの未燃焼分がエンジンオイルに混入していることが判るなど、トラブルの種があることは実感していた。

BDFの使用先がなくなっていくことに、多くの団体や市町村が悩んでいる。筆者が環境アドバイザーを務める福島県須賀川市では、一般市民からの廃食用油回収も推進し、公用車やゴミ収集車にBDFを用いてきたが、現在は使用中のBDF車両の老朽化とBDF使用可能な新型車が無いことに悩んでいる。環境に優しい活動としてきた廃食用油回収を止めたくないため、廃食用油の新たな用途を模索している。軽油にBDFを5%混合して、クリーンディーゼル車を含めた一般のディーゼルエンジン搭載車両でB5燃料として使用することが可能である。しかしながら、一般ユーザーに対して品質保証する責任やBDF混合分への軽油引取税の納税義務などが課せられるなど、小規模分散型の事業者には敷居が高い。

再生可能エネルギー固定価格買取制度(FIT制度)を活用し、廃食用油で発電をしようとする試みもある。現在の買取価格(一般廃棄物・その他バイオマスを燃料とする発電)の17円/kWhではBDFを製造するコストが賄えないため、廃食用油をそのまま発電機で使用することになるであろう。

廃食用油は、飲食店や小規模店舗、更には一般家庭にまで広く存在する、超分散型の資源である。排水に混ざって 地域環境を汚すことなく、油脂資源やエネルギー源として 活用されて地球環境保護に貢献することを願っている。

謝辞 実証的研究を共に実施した岩見政弘会長・岩見孝之 社長・(株)岩見の皆様と、廃食用油と格闘して有益な成果 を残してくれた佐藤研究室あぶら組の卒業生諸君に、感謝 いたします。