

## 《論文》

直接燃焼型コージェネレーションによる  
廃食用油のエネルギー高効率利用

共生システム理工学類 (物質・エネルギー学系) 佐藤 理夫

## 概要

わが国では、年間約200万トンの食用油が消費され、うち40万トンが廃食用油となっている。この廃食用油をエネルギー資源として有効活用することは、廃棄物の適正処理と二酸化炭素排出抑制の両面で環境に優しい技術である。事業所内に設置し、電気と熱を同時に供給するコージェネレーションが、総合効率を向上させ省エネにつながる技術として注目されている。コージェネレーションにおいて廃食用油を効率的に燃焼させるため、技術的な問題点を検討した。軽油や重油と比べ高い粘度を持つ廃食用油を、ディーゼルエンジンで安定燃焼させるため、油に水を添加して用いるエマルジョン燃料技術がある。エマルジョンの基礎的なデータを蓄積すると共に、燃焼時のエネルギーと物質収支のモデル計算を行った。水の蒸発潜熱に相当する発熱量低下があるものの、水の蒸発による体積膨張の効果が発熱量低下を上回り、エンジン出力が向上することが、計算により明らかとなった。

## 1. はじめに

地球温暖化の主因となっている二酸化炭素の排出量を抑制するため、再生可能エネルギーであるバイオマスの活用が求められている。バイオマスは大気中の二酸化炭素を吸収し固定したものであるため、燃焼した際に発生する二酸化炭素は吸収量と等しい（カーボンニュートラル）と見なされている。バイオマスが持つエネルギーの活用のみならず、バイオマスを核とした産業の育成、循環型社会形成、農山漁村活性化等を含んだ、「バイオマス・ニッポン総合戦略」が、平成14年12月に閣議決定された。平成18年3月には、これまでのバイオマスの利活用状況や平成17年2月の京都議定書発効等の、戦略策定後の情勢の変化を踏まえた見直しが行われている。「バイオマス・ニッポン総合戦略」の資料より、わが国での主なバイオマス資源の量を表1にまとめた。バイオマスは広く薄く存在するために、収集にコストがかかる。汚泥や糞尿など含水率

が高いものが多く、単位重量あたりの発熱量が低いのみならず、輸送に多大なエネルギーを要する。使いやすいエネルギー源とするためには、発電して電気エネルギーとするか、液体やガス燃料に変換することが必要である。このようなエネルギーの高品位化に要するコストが、実用化のネックとなっている。

わが国では食用油を年間約200万トン消費している。そのうち40万トン程度が廃食用油として排出されている。食品加工業などの事業所から排出されるものを中心に資源化されているものもあるが、廃食用油は有望なバイオマスエネルギー資源の一つである。食用油は発熱量が極めて高く、39.8MJ/kgの発熱が得られる。これは重油(42.7MJ/kg)と同等である。デンプンなどの炭水化物は水分をまったく含まない状態で16.7MJ/kg、十分に乾燥させた木材は14.4MJ/kg程度の発熱量を持つ。発熱量で換算すると、廃食用油40万トンは、乾燥した木材110万トンに匹敵する。食用油は液体燃料として用いることができる。固体である木材と比べ、燃料輸送や燃焼設備への供給が容易であるという利点も有している。

表1：わが国におけるバイオマス量

バイオマス・ニッポン総合戦略(平成14年12月および平成18年4月)資料より

種別	発生量(万トン/年)		備考
	2002年	2005年	
家畜排泄物	9,100	8,900	
農作物非食用部	1,300	1,300	
食品廃棄物	1,900	2,200	
紙(非回収分)	1,400	—	
製紙廃液(黒液)	1,400	—	乾燥重量
下水汚泥	7,600	7,500	濃縮汚泥として
し尿汚泥	3,200	—	濃縮汚泥として
製材工場等残材	610	500	
建設発生木材	480	460	
間伐材・林地残材	390	370	

## 2. コージェネレーションについて

電気と熱を同時に供給する設備をコージェネレーションと称する。電力会社が有する大型の火力あるい

は原子力発電所では、発電時の排熱を河川や海に捨てている。温水などの熱の需要がある事業所にコージェネレーションを設置すると、発電に伴い発生する排熱を温水として有効に利用することができる。電力会社から電気を購入し、温水供給用に燃料を燃やすパターンと比べ、コージェネレーションの導入により総合効率は向上し、一次エネルギー源の消費を削減することができる。コージェネレーションにバイオマス由来の燃料を用いることにより、さらなる二酸化炭素排出抑制が可能となる。

コージェネレーションの中心となるのが発電システムである。発電の規模や用いる燃料により、ガスタービン、ガスエンジン、ディーゼルエンジン等に発電機を接続して用いられている。最近では燃料電池を用いて、小規模でも高い発電効率を得る技術が開発されてきており、家庭用や小規模事業所用として期待されている。

ディーゼルエンジンは内燃機関の中では熱を動力に変換する効率が高く、分散型発電の規模であっても、30-40%の発電効率を得ることができる。排気ガスが高温であるため、高い温度の温水を得ることもできる。ディーゼルエンジンは、圧縮されて高温となった空気のなかに燃料を噴射して、着火・爆発させることにより出力を得ている。燃料ポンプで噴霧でき、シリンダ内の温度で着火するものであれば、多様な燃料を用いることができる。トラックなどの輸送機器用や、トラクターなどの農業機器用として、完成度の高いエンジンが量産されている。これをコージェネレーションに用いるエンジンとして転用することにより、開発コストを低減することができる。汎用のエンジンであれば、運転開始後に必要となるメンテナンスや、各種部品の調達も容易である。このような原理的・実用的な利点を有することより、筆者は北芝電機株式会社と共同で、ディーゼルエンジンを用いたコージェネレーションにおいて廃食用油を燃料とする技術の研究開発を行っている。

コージェネレーションの概略を図1に示す。重油と廃食用油を混合して燃料とする方式は、既に実用の域に達している。北芝電機は福島市内の事業所に、発電出力190kWのコージェネレーション実証機（エンジンは三菱自動車製）と、発電出力30kWの試験機（エンジンは三菱自動車製）を有している。筆者は、2007年に、連続定格出力3kWの空冷ディーゼルエンジン（ヤンマーディーゼル製）をバイオマス燃料の試験研究用に導入した。

### 3. BDF (Bio Diesel Fuel) の得失

廃食用油を自動車燃料として使用するために、化学的な処理を加えることが幅広く行われている。化学処理して製造された燃料をBDF (Bio Diesel Fuel) と呼んでいる。自治体やNPO法人が中心となり、休耕田や耕作放棄地にナタネ等の油脂作物の作付けを奨励し、得られた油を地域で消費して廃食用油を回収し、BDFを製造してゴミ収集車などの燃料にするといった取り組みがなされている。このような廃食用油の利用方法は、自動車燃料が廃棄物から製造されていることをアピールできるため、啓蒙活動として優れたものである。また、BDF100%を燃料として用いる場合には軽油引取税が課税されないので、軽油を燃料とする場合と比べて経済的なメリットが生じる場合もある。

二酸化炭素排出抑制を考えた場合には、軽油をバイオマスで置き換えることも、重油を置き換えることも、効果は同じである。1リットルの廃食用油を用いて、より多くの石油資源を置き換えることができる技術が優れたものであると考える。このような観点から、BDFを考察したい。

食用油は3個の脂肪酸とグリセリンが結合したものである。BDFを製造する際には、副原料としてメタノールを必要とし、水酸化ナトリウムなどのアルカリを触媒として用いている。反応後は脂肪酸メチルエステルとグリセリンとなるが、脂肪酸メチルエステルはBDFとして利用され、グリセリンは廃棄物となる。

劣化した油は吸湿性があるため、水分の混入は避けられない。実際、本研究で測定した廃食用油には、1kg中に1.5~2.0gの水分が混入していた。水分が食用油中に混入していると、アルカリを加えた際に加水分解が生じて、油脂は石鹸となる。このため、廃食用油からBDFを製造する際には、廃食用油を加熱脱水する工程が必要である。脱水後に油中に残ってしまった水分やアルカリが吸湿した水分に相当する石鹸分が形

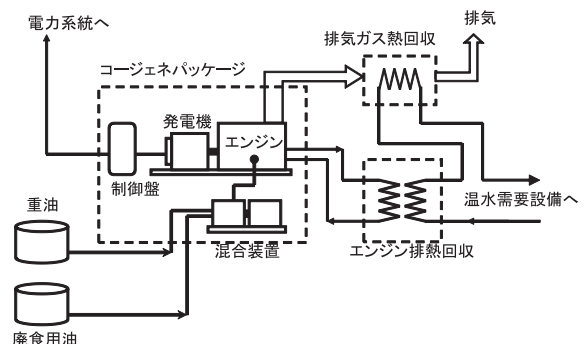


図1：コージェネレーションシステムの概略図

成されて、排水中に流出する。水1gにつき18g程度の石鹸が形成されるため、微量な水分であっても影響は大きい。

食用油は揚げ物など高温での使用中に一部が加水分解して、遊離脂肪酸が生じている。遊離脂肪酸の量は酸価（脂肪酸を中和するために必要な水酸化カリウムの量を指標とする）として測定され、食用油の劣化の指標とされている。惣菜加工において油脂の交換の目安となっている酸価：2.5では、食用油中の脂肪酸の約1.5%が遊離している。BDF製造においては、遊離脂肪酸はエステル化されず、アルカリと中和反応して石鹸分となる。

グリセリンが廃棄されること、脱水などにエネルギーを要すること、遊離脂肪酸や水分が関与して副生した石鹸分は燃料とならないこと、などがBDF製造におけるエネルギー損失である。原料となる廃食用油の状態や作成条件によって異なるが、BDFの持つエネルギーは廃食用油の持つエネルギーの85%程度と試算されている。これに加えて、洗浄工程から排出されるアルカリや石鹸分を含んだ排水の処理にエネルギーを要する。

廃食用油に化学的処理を加えず、直接燃焼させることができれば、廃食用油の持つエネルギーを全て使用することが可能である。可能な限り副原料を用いず、排水などの廃棄物を出さない手法で廃食用油を燃焼させることに研究の方向を定めている。

#### 4. ディーゼル燃料としての食用油の問題

ディーゼル燃料として食用油を用いることの問題点は、粘度の高さである。食用油は軽油や重油と比べて、常温での粘度が一桁高い。そのため、配管やノズルを通過させるために必要な動力が大きくなる。燃料ポンプにかかる負荷が大きくなり、充分な量の燃料がエンジンに供給されない結果を招く。粘度の高い液体は、霧状に噴霧することが困難である。ディーゼルエンジンでは、高温高压となったシリンダ内に燃料を噴霧することによって燃焼させて出力を得ている。燃料が霧状にならないと、完全燃焼せず、未燃焼分がエンジン内部に蓄積することとなる。このような制約から、食用油100%をそのままディーゼル燃料とすることは困難である。図1に示したコージェネレーション実証機では、重油と廃食用油を混合することで、安定した燃料供給を行っている。その際の廃食用油の混合比率は50%が上限であった。

燃料供給の基礎データを蓄積するため、回転子型粘度計を用い、食用油や重油の粘度を測定した。回転子型粘度計とは、一定温度に保った食用油などのサンプル中でコマ状の測定子を一定速度で回転させ、測定子にかかるトルクを計測することによって粘度を測定するものである。これにより、様々な食用油や燃料の粘度を測定した。重油と代表的な食用油の粘度を図2に示す。家庭用サラダ油は、大豆油とナタネ油をブレンドしたものであり、スーパーマーケット等で安価で販売しているものである。業務用大豆油は18L缶で購入したもので、食堂などで多く使われているものである。図より食用油の粘度はA重油の10倍以上であることがわかる。高温では粘度は低下するが、食用油の粘度は40℃まで加熱しても、10℃のA重油の粘度の5倍程度である。加熱して粘度を下げた燃料として供給する方式も検討されているため、粘度の温度依存性を把握しておくことは重要である。

コメ油を用いた食品加工業からの廃食用油をコージェネレーション実証機で用いる場合、廃食用油50%混合では安定しないという運転例がある。コメ油の粘度を図2に図示したが、他の食用油と比べ高いものであった。燃焼が安定しないことは、コメ油の粘度が高いことが主因であると考えられる。

室温で固体となる獣脂が揚げ物調理中に混入することが想定される。獣脂の混入の影響を調べるため、サラダ油にラードを混ぜて粘度を測定した。100gの家庭用サラダ油に、5g、10g、20gのラードを混ぜた場合、20℃での粘度は64.3、65.0、66.4mPasとなり、ラード添加による大きな変化は見られなかった。

廃食用油は元の油種が不明である上、使用状況や交換頻度により劣化の度合いも異なっている。入手した廃食用油の粘度は、20℃で75~80mPas程度であり、

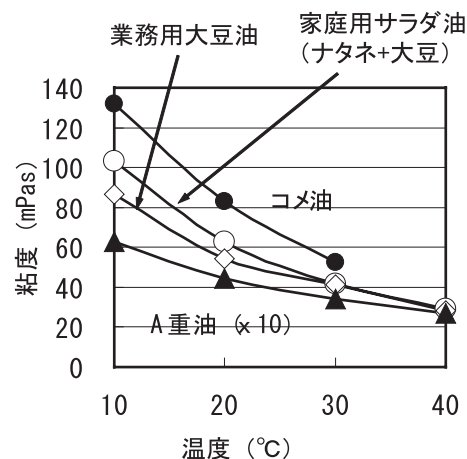


図2：食用油および重油の粘度の温度依存性

新品の大豆油と比べると大きい値となっていた。食用油の劣化は、加水分解と酸化であると考えられる。加水分解で生じて酸価として計測される遊離脂肪酸は、カルボキシル基を持ち、他の分子と水素結合することができる。また酸化生成物も水素結合や架橋しやすい官能基を持つことが推測される。そのため、食用油は劣化により実効的な分子サイズが大きくなり、粘度が上昇するものと考えている。

## 5. エマルジョン燃料について

食用油をディーゼル燃料として使用する技術のひとつに、水/油エマルジョン化がある。油に界面活性剤と水を加えて乳化して、燃料とするものである。食用油50%・水50%としたエマルジョン燃料を、ボイラーやディーゼルエンジンを搭載した自動車で使用した実証例が存在する。燃料に水を加えることは、感覚的にマイナスとなる行為であるためか、実証例はいくつかあるものの、体系的な研究がなされているとは言いがたい。

エマルジョン燃料がディーゼルエンジンで安定燃焼する理由として、次の2点が挙げられる。水添加による粘度低下と、シリンダ内での突沸による燃料分散効果である。水の粘度は20℃で1.0mPas程度であり、食用油と比べて小さい。エマルジョンの粘度は食用油よりも小さくなるのが期待される。燃料供給に密接に関わるため、粘度のデータを蓄積した。ディーゼルエンジンでは圧縮され高温となったシリンダ内に燃料を噴射する。エマルジョンに含まれる水滴はシリンダ内で突沸し、周囲の油を分散させる。分散した油が着火し、安定して燃焼するといわれている。この効果は、高温高压化で生じるため、エンジンや燃焼の専門家と協力しての解析が必要である。

エマルジョンの作成には、界面活性剤が必要である。燃料として使用するため、金属イオンや硫黄などの元素を含むものは用いることができない。そのため、非イオン系界面活性剤（ポリオキシエチレンアルキルエーテル）と食品用乳化剤（ポリグリセリンエステル、ショ糖脂肪酸エステル、ソルビタン脂肪酸エステル）を用いることとした。今回の実験条件範囲では、界面活性剤の種類による差は、ほとんど確認できなかった。

ガラスビーカーに食用油・水・界面活性剤を入れ、マグネチックスターラーで攪拌してエマルジョンを作

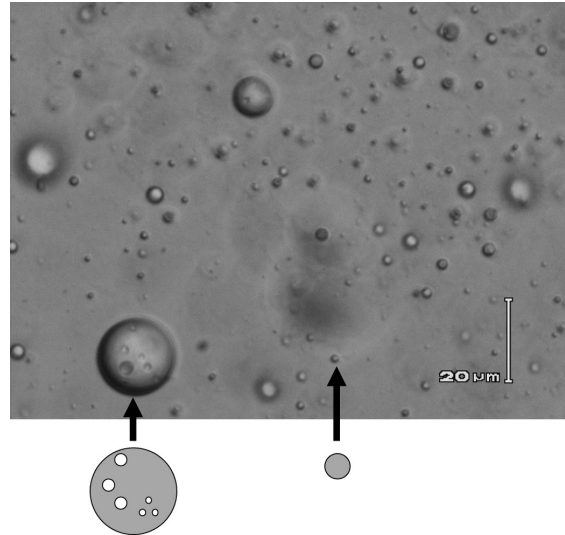


図3：家庭用サラダ油と水のエマルジョンの光学顕微鏡像  
図中の模式図は、小さな粒は油滴であること（右側）、油滴中に水滴を含むものがあること（左側）を表している。

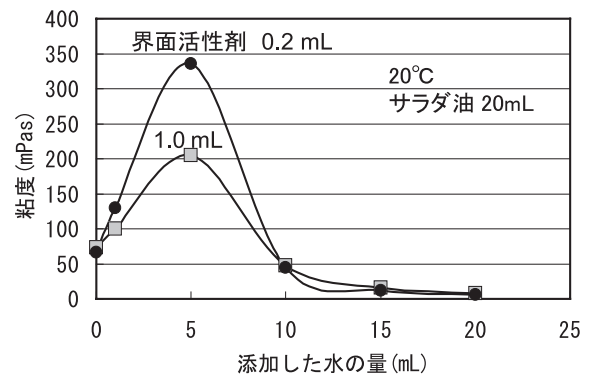


図4：家庭用サラダ油と水のエマルジョンの粘度の水添加量依存性

成した。1分程度の攪拌で、均一に見える白濁したエマルジョンとなる。界面活性剤の量は食用油の0.2%～5%の範囲で変化させた。また、回転数や攪拌時間を変化させ、データを蓄積している。作成したエマルジョンの光学顕微鏡写真を図3に示す。水と油が50%ずつのエマルジョンを窪みのあるスライドグラスに滴下して観察したものである。小さな油滴が分散していることがわかる。大きな油滴の内部に、小さな水滴が存在するのも、明瞭に観察できた。油滴中の水滴は、突沸した際に油を分散する効果が高いと考えられる。攪拌方法や攪拌時間により、油滴の大きさは変化した。保管中や観察中に、水が多い層と油の多い層に分離していき、大きな油滴は合体するなどの変化も見られた。ディーゼルエンジンでの燃焼試験を行う際には、エマルジョン燃料を安定して保管する方法も重要である。

エマルジョン燃料の粘度の水添加量依存性を図4に

示す。粘度は単調に減少するわけではなく、水の添加量が少ない領域で極大値を持つ。油中の水滴が硬い粒のように振る舞い、流れを阻害するためである。このようなデータの蓄積は、実用の際に重要となってくる。

## 6. 水の添加がエンジン出力に与える効果

燃料に水を添加することがエンジン出力にどのような影響を与えるかを概観するため、物質とエネルギーの収支をモデル計算した。食用油の元素組成を代表的なもので仮定し、燃焼に必要な酸素量を求めた。1リットルの食用油に水を添加して燃焼させる場合の、燃焼時の発熱量・発生ガス量・燃料噴射に必要な動力を計算した。

ディーゼルエンジンでは、吸気・圧縮・爆発（膨張）・排気の4つの工程がある。このうち吸気と圧縮の工程は、水添加の有無に関わらず同じ量の空気を圧縮するので必要な仕事量は同一である。排気の工程では、機械的摩擦損失とガスの流れの抵抗に相当する仕事を必要とする。これも水添加の有無に関わらず、ほぼ同一とみなすことができる。燃焼後のシリンダ内の圧力の差がエンジン出力を決定する。理想気体であれば、圧力は絶対温度と分子数に比例する。

エマルジョン燃料の発熱量、燃焼により発生するガス量およびエンジンから排出されるガス量の計算結果を表2にまとめた。結果は、食用油1リットルあたりに換算して比較している。ガス量は、標準状態（0℃、大気圧）での量で表している。発生ガス中の水蒸気の持つ潜熱は利用できないため、食用油の発熱量から水の蒸発に必要な熱を差し引いたものが、エマルジョン燃料の発熱量となる。水の添加に伴って、発熱量は低下する。

一方、添加した水が蒸発して水蒸気となるため、発生するガス量は増加する。水蒸気のうちの一部は、食用油の燃焼により生じる水蒸気である。ディーゼルエ

ンジンの動作時に吸気・圧縮される空気は、燃料の燃焼に必要な最低空気量の2倍程度である。そのため排気ガス中には10%程度の酸素が含まれている。この酸素濃度を計測して、エンジンの負荷の指標とすることが一般的に行われている。酸素濃度が低いほど、燃料供給量が多く、高い負荷での運転である。食用油のみを燃焼させたときの排出ガスの酸素濃度が8,10,12%となるように空気の量を設定して、水を添加した場合の排出ガス量を計算した。この場合の排出ガス量が、爆発工程で膨張するガス量となる。

排出ガス中酸素濃度が8~10%となる高負荷の場合には、発熱量の減少率より排出ガスの増加率が大きいことがわかる。温度低下による圧力減少より、ガス量増加による圧力上昇が上回ることを示す結果でありエンジン出力の向上を示唆している。低負荷では、発熱量の減少効果の方が大きく、出力向上は期待できない。コージェネレーションでは、エンジンは高負荷とし、多くの電力を得るように運転している。エマルジョン燃料の使用により高負荷時における出力が増加することは、コージェネレーションに適している。

燃料の噴射には動力を必要とする。燃料供給に必要な動力を試算し、表3に示した。水の添加に伴い供給する体積が増加するので、必要な動力は増加する。この動力は燃料の発熱量に比べて3桁小さい値であり、エマルジョン燃料供給における必要動力の増加はコージェネレーション全体の効率に影響を与えるものではない。

どの程度の水添加が最適であるかは、今後の課題である。水が多すぎる場合には燃焼温度が低下するため、限界量を超えると着火しなくなることが想定される。排出ガス中に多量の水蒸気が含まれるようになるため、エンジンの下流側で結露などの問題を生じること考えられる。エンジンの各工程や周辺機器のより詳しいモデリングや、実験的な検証が必要である。

表2：水／油エマルジョン燃料の発熱量および燃焼後排出ガス量

油量 L	水量 L	水比率 %	発熱量		燃焼後の発生ガス量		燃焼後の排出ガス量			排出ガス増加率		
			MJ/L-油	減少率 %	(CO <sub>2</sub> +H <sub>2</sub> O) Nm <sup>3</sup> /L-油	うち水蒸気 Nm <sup>3</sup> /L-油	酸素8% Nm <sup>3</sup> /L-油	酸素10% Nm <sup>3</sup> /L-油	酸素12% Nm <sup>3</sup> /L-油	酸素8% %	酸素10% %	酸素12% %
1	0.0	0	34.684	0.00	2.507	1.172	15.306	18.094	22.116	0.00	0.00	0.00
1	0.111	10	34.433	-0.72	2.645	1.310	15.444	18.232	22.254	0.90	0.76	0.63
1	0.250	20	34.119	-1.63	2.818	1.483	15.617	18.405	22.427	2.03	1.72	1.41
1	0.429	30	33.715	-2.79	3.040	1.705	15.840	18.628	22.650	3.49	2.95	2.41
1	0.667	40	33.177	-4.34	3.337	2.002	16.136	18.924	22.946	5.42	4.59	3.75
1	1.000	50	32.424	-6.52	3.752	2.417	16.551	19.339	23.361	8.14	6.88	5.63
1	1.500	60	31.294	-9.77	4.375	3.040	17.174	19.962	23.984	12.21	10.32	8.45
1	2.333	70	29.411	-15.20	5.413	4.078	18.212	21.000	25.022	18.99	16.06	13.14
1	4.000	80	25.644	-26.06	7.488	6.153	20.288	23.076	27.098	32.55	27.53	22.53

表3：エマルジョン燃料を供給する際に必要となる動力

油量 L	水量 L	水比率 %	燃料供給量 L	発熱量 MJ/L-油	ポンプ動力		
					15MPa MJ/L-油	20MPa MJ/L-油	25MPa MJ/L-油
1	0.0	0	1.00	34.684	0.0150	0.0200	0.0250
1	0.111	10	1.11	34.433	0.0167	0.0222	0.0278
1	0.250	20	1.25	34.119	0.0188	0.0250	0.0313
1	0.429	30	1.43	33.715	0.0214	0.0286	0.0357
1	0.667	40	1.67	33.177	0.0250	0.0333	0.0417
1	1.000	50	2.00	32.424	0.0300	0.0400	0.0500
1	1.500	60	2.50	31.294	0.0375	0.0500	0.0625
1	2.333	70	3.33	29.411	0.0500	0.0667	0.0833
1	4.000	80	5.00	25.644	0.0750	0.1000	0.1250

## まとめ

廃食用油をコージェネレーション等の高効率機器においてエネルギー資源として有効活用することは、廃棄物の適正処理と二酸化炭素排出抑制の両面で環境に優しい技術である。コージェネレーション設備において廃食用油を効率的に燃焼させるため、技術的な問題点を検討した。燃料を安定してエンジン内に噴射することが、安定燃焼させるために必要である。各種の食用油の粘度のデータを蓄積し、実証機などで得られた結果と併せて考察した。

廃食用油をディーゼルエンジンで安定燃焼させる技術の一つとして、油に水を添加して用いるエマルジョン燃料技術がある。エマルジョン燃料の基礎的なデータを蓄積すると共に、燃焼時のエネルギーと物質収支のモデル計算を行った。水の添加により、蒸発潜熱に相当する発熱量低下があるものの、水の蒸発による体積膨張の効果が発熱量低下を上回り、エンジン出力が向上することが、計算により明らかとなった。

今後は、試験研究用の小型ディーゼルエンジンを用いてエマルジョン燃料などの燃焼試験を行う。また、廃食用油からの固形不純物除去や、効率的な熱回収技術などの周辺技術の検討を進めていく。

## 謝辞

本研究の一部は、福島大学奨励的研究予算「プロジェクト研究推進経費」の補助により実施致しました。本研究の実施にあたり、北芝電機株式会社 太田昌弘様・誉田浩司様・伊東圭二様に、実証機等で得られた貴重な情報と、有益な討論の時間を頂きました。実験データの取得には、穴澤由香教務補佐員の協力を得ました。ここに感謝の意を表します。

## 参考文献

本論文を執筆するに当たり、下記の資料・書籍等を参考にした。本論文に掲載した成果の一部は、学会で報告している。

- (1)「バイオマス・ニッポン総合戦略」(平成14年12月・閣議決定、平成18年3月・改定)  
平成18年に改定されたものは、農林水産省 HP で入手できる。  
<http://www.maff.go.jp/biomass/>
- (2)2005-2006資源エネルギー年鑑 通産資料出版会 (2005)
- (3)鯨島正浩 他:「バイオ液体燃料」 エヌ・ティ・イー・エス (2007)
- (4)北芝電機:「環境配慮型コージェネレーション」ホームページおよび技術資料  
<http://www.kitashiba.co.jp/seihin/kankyo/co-gener.html>
- (5)西日本テクノ:「エマルジョン燃焼システム概要」ホームページおよび技術資料  
<http://www.wj-techno.co.jp/>
- (6)佐藤、太田、誉田:「廃食用油直接燃焼型コージェネレーションシステム」  
第53回応用物理学関係連合講演会 (2006年3月)
- (7)佐藤、太田、誉田:「カーボンニュートラルを目指した廃食用油直接燃焼型コージェネレーション」  
第54回応用物理学関係連合講演会 (2007年3月)