

R-01-2012

YIES Research Report

山梨県環境科学研究所研究報告書

第 29 号

重点化研究

「廃食油を用いた廃棄ウレタンのリサイクルに関する研究」

平成 24 年度

山梨県環境科学研究所

は じ め に

廃プラスチック類の中でもポリウレタン廃棄物は、重量的にも容積的にも大きなウェイトを占めており、その処理とリサイクル方法の確立が急務となっている。国内におけるウレタンの総生産量は30万トン／年に達しており、廃棄されるウレタンのほとんどは破碎後に埋立て処分され、有効活用されていないのが現状である。

平成12年に制定された循環型社会形成推進基本法は、ポリウレタンフォームを含む家電や自動車、建設廃材などのリサイクルを求めている。さらに、平成13年より施行されている特定家庭用機器再商品化法（家電リサイクル法）は、電気冷蔵庫の断熱材ウレタンのリサイクルを義務付けている。続いて平成17年に自動車リサイクル法が施行され、プラスチックのリサイクルによるASR（自動車シュレッダーダスト）の低減化が求められている。従って、ケミカルリサイクル、マテリアルリサイクル、サーマルリサイクルなどの技術を駆使しながら、ウレタンの再利用方法を確立していく必要がある。

ウレタンの大部分は熱硬化性樹脂であり、リサイクルできない樹脂と分類されているが、その樹脂構造は多種多様のポリオールとイソシアネートの組み合わせでできているため、他の熱硬化性樹脂には見られない温度変化による状態変化を示す。従って、熱分解反応を利用して、これをリサイクルする新手法を開発できる可能性がある。このような状況を踏まえ、本重点化研究ではウレタンを廃食油（使用済み天ぷら油）中で液相熱分解して、新規ディーゼル燃料を作成する手法を開発した。

今後、ポリウレタンの回収方法確立やリサイクル品の用途・市場開発などの課題が解決されれば、今回報告書としてとりまとめた研究成果が、「資源循環型社会の実現」を目的の一つとして平成17年に策定された「山梨県環境基本計画」の実行のために活用されていくであろう。

山梨県環境科学研究所

所 長 荒 牧 重 雄

目 次

はじめに

概要編

I プロジェクト研究の概要

I-1	研究テーマおよび研究期間	1
I-2	研究体制	1
I-3	研究目的	1
I-4	研究成果の概要	1
	1) 混合燃料の物性とディーゼルエンジンへの適合性	1
	2) 混合燃料のディーゼル発電への適合性	4
	3) まとめ	6
I-5	研究成果の発表状況	6
I-6	謝辞	7

本 編

II 研究成果報告

II-1	研究目的	8
II-2	実験方法	8
	1) 実験試料	8
	2) ウレタン分解油の作成	8
	3) 混合燃料の作成	9
	4) 混合燃料の物性	10
	a) 粘度	10
	b) 発熱量	10
	c) 燃焼可視化	10
	5) 混合燃料のディーゼルエンジンへの適合性	11
	a) 燃料消費量	11
	b) 排ガス分析	11
	c) 発電性能	11
II-3	研究成果	12
	1) 混合燃料の物性とディーゼルエンジンへの適合性	12

a) 軽油またはエタノールを添加した混合燃料	12
b) 灯油を添加した混合燃料	15
2) 混合燃料のディーゼル発電への適合性	16
a) 軽油を添加した混合燃料	16
b) 灯油を添加した混合燃料	16
Ⅱ-4 まとめ	18

概要編

I プロジェクト研究の概要

I-1 研究テーマおよび研究期間

研究テーマ名：

「廃食油を用いた廃棄ウレタンのリサイクルに関する研究」

研究期間：平成21年4月～平成24年3月（3ヵ年）

I-2 研究体制

山梨県環境科学研究所

研究代表者：

山梨県環境科学研究所 環境資源学研究室
非常勤嘱託 上野 良平¹⁾

所内研究参加者：

山梨県環境科学研究所 環境資源学研究室
非常勤嘱託 森 智和
非常勤嘱託 吾郷 健一²⁾

所外共同研究者：

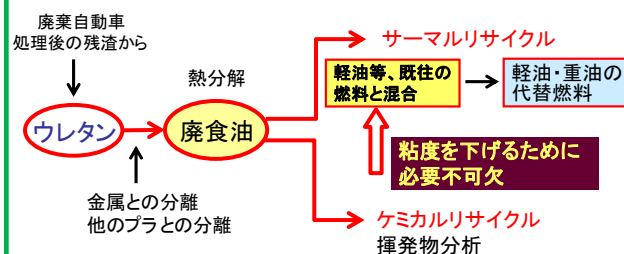
工学院大学工学部
准教授 佐藤 貞雄
関東学院大学人間環境学部
教授 佐野慶一郎

¹⁾ 平成22年度より在籍、²⁾ 平成21年度代表者

I-3 研究目的

軟質ポリウレタンフォーム(ウレタン)は、自動車のシートや内装、寝具、梱包材、空調用フィルター、吸音材、制振材などに多用されており、国内におけるウレタンの総生産量は約30万トン/年に達している。一方、廃棄されるウレタンのほとんどは、破碎後に埋め立て処分されるが、重量に対する容量が大きいと、埋立て処分地の確保が問題となっている。またウレタンは、焼却後の残留物が多いことから焼却処分も難しい。従って、廃棄ウレタンのリサイクルが望まれるが、決め手となる手法が開発されていない。ウレタンの樹脂構造は多種多様のポリオールとイソシアネートの組み合わせでできているため、他の熱硬化性樹脂には見られない温度変化による状態変化を示す。従って、熱分解反応を利用して、これをリサイクルする新手法を開発できる可能性がある。例えば、ウレタンを廃食油中で液相熱分解すれば、新規ディーゼル燃料を得られる可能性がある。(図I-1)。

目的： 廃棄ウレタンを廃食油中で分解して、リサイクル燃料とする。



図I-1 本研究で提案する廃棄ウレタンのリサイクル方法

しかし、ウレタンを廃食油中で熱分解して得られる分解油は粘度が高いため、燃料を霧化して燃焼を行なうディーゼルエンジンの性質上、分解油単独では、燃料としての使用が困難である。すなわち、エンジン燃料として使用するためには、その粘度を低下させる必要がある。

本研究では、分解油の粘度を下げることを目的として、これに燃料助剤（以下、添加剤と呼ぶ）を加えた混合燃料を作成した。添加剤として、軽油、エタノール、または灯油の使用を試みた。これらの添加剤を分解油に加えることで得られる混合燃料を、物性面、ディーゼルエンジン適合性、ならびにディーゼル発電性能の点から評価することを目的とした。

I-4 研究成果の概要

1) 混合燃料の物性とディーゼルエンジンへの適合性

表I-1に、実験で使用した試料とその略称を示す。ウレタンはエーテル系の軟質ポリウレタンフォームを、廃食油は使用済み菜種油を指す。

本研究では、はじめに軽油またはエタノールを添加した混合燃料を作成し、その物性とエンジン適合性を調べた。320℃に加熱した廃食油中で、ウレタンを熱分解して分解油を作成した。分解に供するウレタンの量は、廃食油：ウレタンの重量比が7：3または6：4になるよう

表 I-1 実験試料と略称

FPF はFlexible Polyurethane Form を、RO はRapeseed Oil を、DO はDiesel Oil を、EtOH はEthanol を、KE はKerosene をそれぞれ略したものである。

試料名	略称	メーカー
ウレタン	FPF	株式会社イノアックコーポレーション
廃食油	RO	日清オイリオグループ株式会社
軽油	DO	出光興産株式会社
エタノール	EtOH	今津薬品工業株式会社
灯油	KE	出光興産株式会社

に設定した。これらの混合物を熱分解して得た分解油について、ここでは前者を PO_{30} 、後者を PO_{40} と呼ぶ。分解油の原料（ウレタンと廃食油）ならびに、軽油とエタノールをそれぞれ単独で燃焼させたときの発熱量を図 I-2 に示す。上記の方法で作成した分解油（廃食油：ウレタンの重量比が 7 : 3）の発熱量は、廃食油と同程度であった。すなわち、作成した分解油の発熱量は、元のウレタンの約 1.3 倍まで上昇した。従って、ウレタンを分解油にすることは、発熱量の点で意義がある。

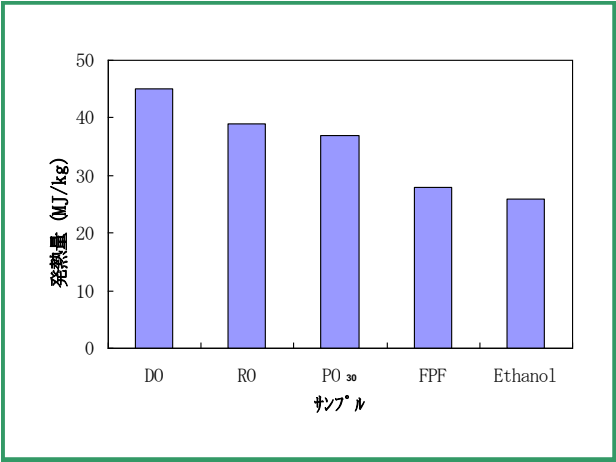


図 I-2 実験材料の発熱量

DO は軽油を、RO は廃食油を、PO は分解油を、FPF はウレタンを、それぞれ略したものである。

添加剤として、一般的なディーゼル燃料である軽油、または植物由来であるエタノールを、分解油に加えて作



図 I-3 分解油(ウレタン 30wt%: PO_{30})と軽油を、重量比 8 : 2、6 : 4、4 : 6、または 2 : 8 で混合して作成した燃料

表 I-2 作成した混合燃料の組成

PO_{30} は分解油（廃食油：ウレタンの重量比が 7 : 3 で熱分解したもの）、DO は軽油、EtOH はエタノールの略称である。

混合比率 (wt%)			略称
PO_{30}	DO	EtOH	
85	15		$PO_{30}85/DO15$
80	20		$PO_{30}80/DO20$
50	50		$PO_{30}50/DO50$
40	60		$PO_{30}40/DO60$
30	70		$PO_{30}30/DO70$
20	80		$PO_{30}20/DO80$
95		5	$PO_{30}95/EtOH5$
90		10	$PO_{30}90/EtOH10$
85		15	$PO_{30}85/EtOH15$
75		25	$PO_{30}75/EtOH25$
70		30	$PO_{30}70/EtOH30$

成した混合燃料の写真を図 I-3 に、組成を表 I-2 にそれぞれ示す。

図 I-4 に示すように、分解油に添加する軽油またはエタノールの混合割合を上げると、作成した混合燃料の粘度は低下した。発熱量は、分解油に軽油を添加した場合、その混合割合を増やすと高くなったが、エタノール

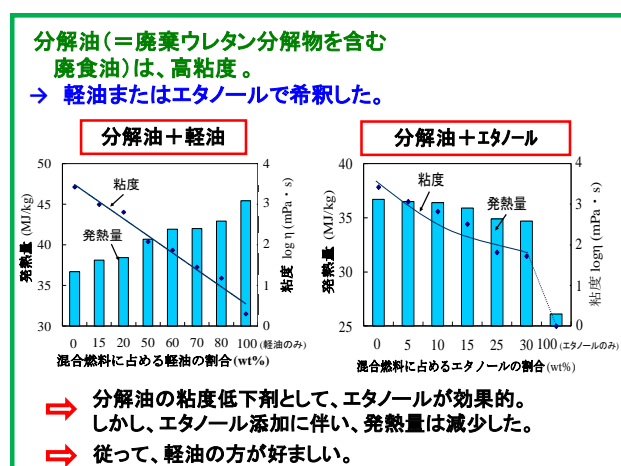


図 I-4 分解油(ウレタン 30wt% : PO₃₀)に、軽油またはエタノールを添加して作成した混合燃料の粘度と発熱量

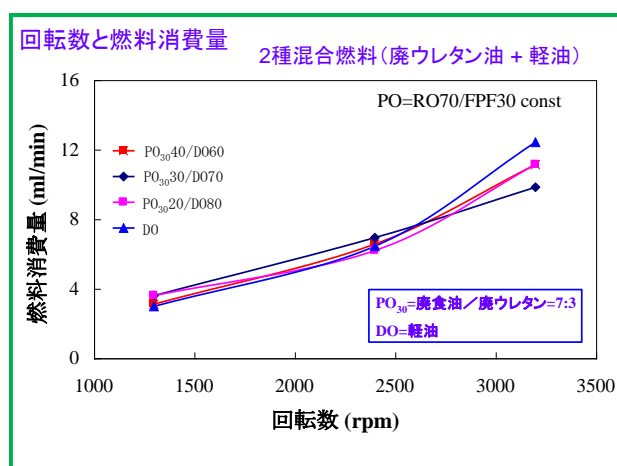


図 I-5 分解油(ウレタン 30wt% : PO₃₀)に軽油を添加して作成した混合燃料を用いてディーゼルエンジンを運転した際の、エンジン回転数と燃料消費量の関係
混合燃料の略称と組成は、表 I-2 に記載した。

を添加した場合は逆に低下した。このことから、エタノールは分解油の粘度低下に効果があるが、燃料として発熱量を低下させてしまうため、ディーゼルエンジン用の混合燃料を作るための添加剤として、適当ではないと考えられた。

次に、混合燃料を用いてディーゼルエンジンを運転した際の、エンジン回転数と燃料消費量の関係を調べた。分解油に軽油を添加したものをを用いた結果を図 I-5 に

示す。本実験では、熱分解によってウレタンから分解油を得る時に使用する廃食油とウレタンの重量比を 7 : 3 とした。この分解油に軽油を添加して作成した混合燃料でエンジンの運転を行うと、エンジン回転数が 1300 ~ 2400rpm で燃料消費量は、軽油単独で同じエンジンを運転した場合とほぼ同等であったが、高回転側の 3200rpm では、軽油単独に比較して燃料消費量が 1.5 ~ 3.0 mL/min 減少した。この僅差の減少に有意差があるか結論することはできないが、少なくとも分解油と軽油からなる混合燃料は、既往の燃料である軽油に比較してほぼ同等の燃料消費性能をもつことはわかる。なお、分解油にエタノールを添加して作成した混合燃料で同様にディーゼルエンジンを運転すると、エンジン回転数が 3200rpm でエンジンは運転不良を起こし停止した。以上の結果から、分解油に軽油を添加して作成した混合燃料は、ディーゼルエンジンの運転に使用できるが、エタノールを添加した混合燃料は使用できないと考えられた。

軽油を添加した混合燃料を用いてディーゼルエンジンを運転した際の、着火および消火性能を調べた(図 I-6)。着火遅れ期間、後燃え期間ともに、添加剤である軽油を含まない分解油で最も長く、純粋な軽油で最も短かった。軽油に分解油を加え、混合燃料としたことによって、約 1 ~ 2ms の着火遅れおよび 1 ~ 1.7ms の後燃え期間延長が観察された。しかし、これらの遅れは実用上問題ないレベルであった。

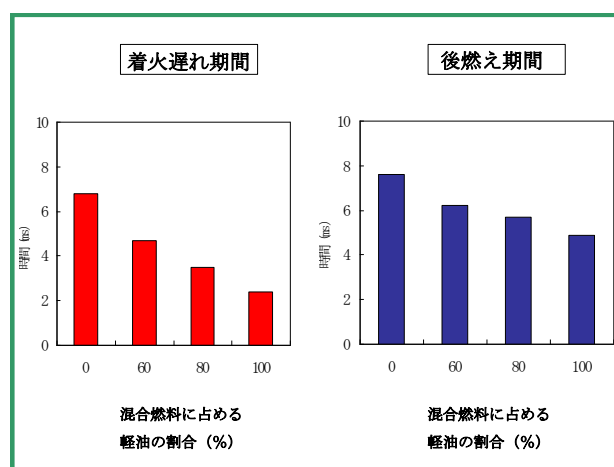


図 I-6 混合燃料に占める軽油の割合と、エンジン着火遅れまたは後燃え期間との関係

表 I-3 分解油作成時における熱分解条件

熱分解反応の触媒として、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ を 0.3wt% の濃度になるよう廃食油に加えた。ウレタンを 30wt% または 40wt% 含む分解油を、それぞれ PO_{30} 、 PO_{40} と呼ぶ。

条 件	PO_{40}	PO_{30}
熱分解温度 (°C)	290	320
ウレタンの混合比率 (wt%)	40	30
分解できず残存したウレタンの比率 (wt%)	3.5	1.1
触媒濃度 (wt%)	0.3	0.3

また、軽油を 70-80wt% 混合した混合燃料の排ガス中に含まれる有害物質濃度は、 NO_x 、CO、L-HC の各項目で、軽油単独と同等であり、問題が認められなかった。

続いて、灯油を添加した混合燃料の物性とエンジン適合性を調べた。低粘度で高発熱量をもつ灯油は、混合燃料を作成する際の添加剤として期待できる。まず、廃食油中に触媒として水酸化カルシウム ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) を 0.3wt% 添加した状態でウレタンの熱分解を行い、2 種類の分解油を得た (熱分解条件を表 I-3 に記載)。続いて、作成した分解油に灯油を添加して混合燃料を作成、その粘度と発熱量を測定した。

なお $\text{Ca}(\text{OH})_2$ は、液相中の物質をイオン化することで、多様な化学反応を触媒する。本研究では $\text{Ca}(\text{OH})_2$ を、廃食油中におけるウレタンの熱分解を促進するために用いた。 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ は、前述の軽油を添加した混合燃料のベースとなる分解油作成時に用いてもよいが、実施していない。

ウレタンを 30wt% または 40wt% 含む分解油 (PO_{30} または PO_{40}) を作成する際、廃食油中で熱分解しきれずに沈殿したウレタン残渣に着目すると、 PO_{40} は PO_{30} に比べて分解効率が悪い (表 I-3)。

これらの分解油をベースに作成した混合燃料の粘度を図 I-7 に示す。軽油単独の粘度は約 2.1 (mPa・s) であり、混合燃料にはこれとほぼ同等の粘度が求められる。ここでは、混合燃料をつぎのように略する。

PO_{30}/KE (PO_{40}/KE) とは、30 (40) wt% のウレタンを含む分解油 (PO) に対して灯油 (KE) を添加したものを示す。混合燃料の粘度は、灯油の重量比が増加するにつれて減少した。具体的には、 PO_{30}/KE および PO_{40}/KE が示す粘

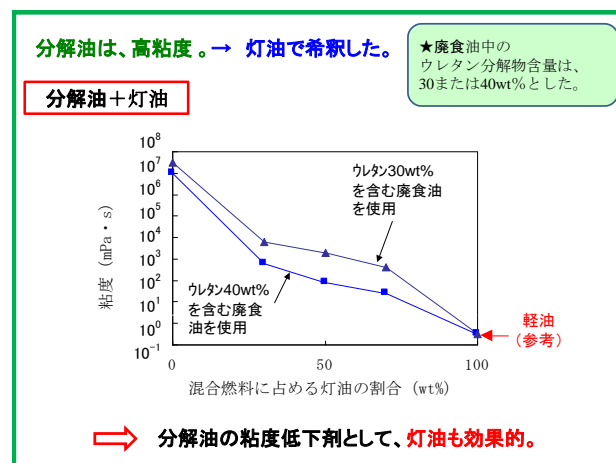


図 I-7 分解油 (ウレタンを 30wt% または 40wt% を含む) をベースとして作成した混合燃料に含まれる灯油の重量比と、作成した混合燃料がもつ粘度の関係

度は、KE の添加量が 30-70% の範囲で、元の分解油の 10% 未満のレベルにまで低下して、ディーゼルエンジンの運転に支障がない値に到達することが明らかになった。

分解油に灯油を添加して作成した混合燃料の発熱量を図 I-8 に示す。混合燃料の発熱量は、その中に占める灯油の重量比率に応じて上昇し、灯油混合率を 50% 以上とすれば、純粋な灯油 (軽油) がもつ発熱量の 95 (94) % 以上に到達した。なお、混合燃料のベースとなる分解油に含まれるウレタンの含有率の違いに関わらず (30wt% と 40wt%)、完成した混合燃料の発熱量へ及ぼす影響はほとんど認められなかった。

2) 混合燃料のディーゼル発電への適合性

はじめに、軽油を添加した混合燃料を用いてディーゼル発電性能を評価した。軽油を 60-80wt% 添加した混合燃料を用いて発電機を運転すると、消費した燃料の体積あたりで、軽油単独で運転した時の 95.5-95.9% の電力量が得られた (図 I-9 右側: 図 I-9 左側の積算電力量/燃料消費量で、時間あたりに得られる電力量を比較できる)。この僅差の減少に有意差があるか結論することはできないが、軽油を含む混合燃料は、既往の燃料である軽油に比較して同等の発電性能をもつことはわかる。

また、軽油を 70-80wt% 混合した混合燃料は、排ガス中の有害物質濃度の点でも、軽油と近い測定結果となった

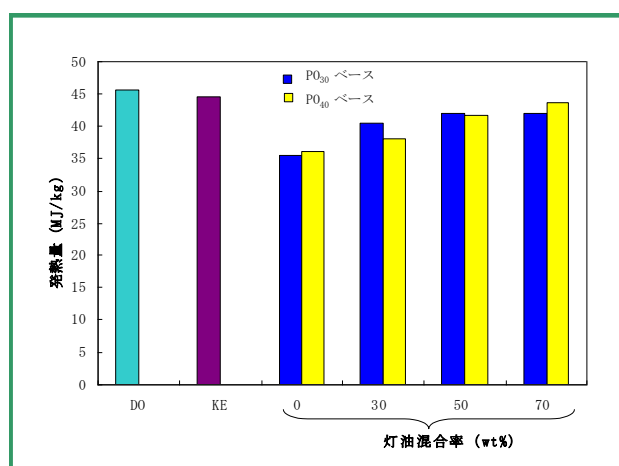


図 I-8 ウレタンを 30wt%含む分解油 (PO₃₀) または 40wt%含む分解油 (PO₄₀) に、灯油を添加した混合燃料の発熱量

参考として、軽油 (DO) 単独および灯油 (KE) 単独の発熱量を、左側 2 本の棒グラフに示した。

ため、リサイクル効率を考慮して軽油を混合燃料作成のための添加剤として使用することは意義があると考えられた。現在、ディーゼル燃料の排気ガスに対する規制は、環境汚染防止の観点からきわめて厳しくなっている。そのため、分解油をベースとした混合燃料を用いてディーゼルエンジンを駆動した際に発生する排気ガス中に含まれる有害成分の濃度を調べることは、発電性能の測定と同様に重要である。

前述のように、エタノールを添加剤として加えた混合燃料でディーゼルエンジンを駆動すると、エンジンの運転不良を招いたので、本研究ではこの燃料の発電性能を調べなかった。しかし、リサイクル燃料としての意義を鑑みると、植物の光合成に由来する (バイオ) エタノールを有効な粘度低下剤として使いながらも、混合燃料の発熱量を低下させない手法の検討が必要である。

次に、灯油を添加した混合燃料を用いてディーゼル発電機を運転した際、発生する電力量、燃焼排ガス成分、および燃料消費量の測定を行った。この実験で使った混合燃料 (分解油 + 灯油) の組成は、灯油の体積比で 30, 50, または 70%とした。

まず、ディーゼル発電機を用いて、灯油を添加した混合燃料を燃焼させた際に発生する電力量を測定した (対

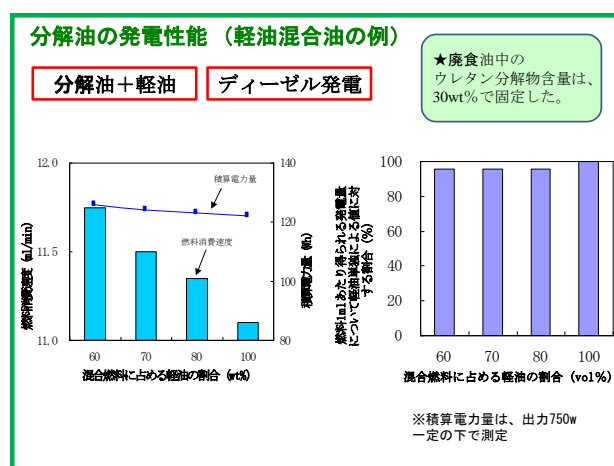


図 I-9 分解油 (PO₃₀: ウレタンを 30wt%含む) に軽油を添加して作成した混合燃料の発電性能

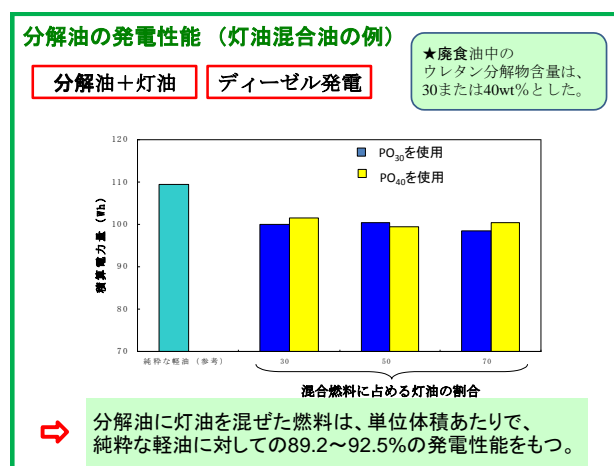


図 I-10 分解油 (PO₃₀ または PO₄₀: ウレタンを 30wt% または 40wt%含む) をベースとして作成した混合燃料に含まれる灯油の体積比と、作成された混合燃料 1mL が、ディーゼル発電時に発生した積算電力量の関係

照実験として軽油単独で発電を行い、同様に発生電力量を測定した。その結果、単位体積あたりの発電量は軽油に比べて 7.5~10.8%低くなった。しかし、単位重量あたりでは、混合燃料は軽油と同等の電力量を発生したことを付記する。なお、混合燃料のベースとなる分解油に含まれるウレタンの重量比を 40%としても、30%の場合と比較して積算電力量にほとんど差は認められなかった (図 I-10)。

灯油を含む混合燃料を用いて発電機を運転した際に発

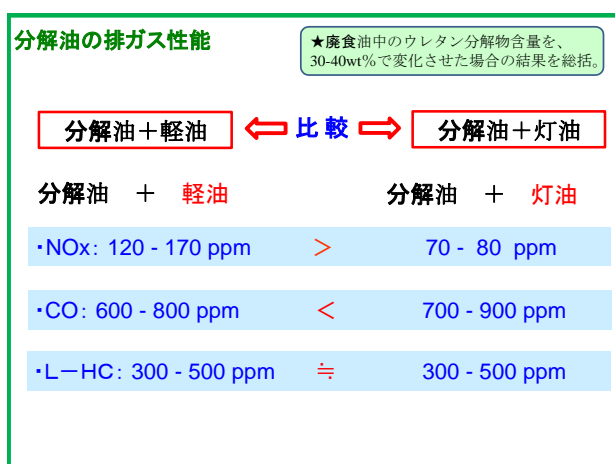


図 I - 1 1 混合燃料の排ガス性能

生する排気ガス中の有害成分を、軽油を含む混合燃料で同様に運転した場合のそれと比較した（図 I - 1 1）。

NOx 濃度は、添加剤として灯油を用いた方が、軽油を用いた場合より低かった。一方で CO 濃度と L-HC 濃度は、用いた添加剤の種類に関わらず、同レベルであった。SOx は何れの混合燃料においても検出されなかった。

ディーゼルエンジンを軽油で運転した時の排ガスに含まれる物質のうち、排出量が多く問題視されるものは NOx である。灯油を含む混合燃料で運転した際の排ガス中 NOx 濃度は、燃料中に含まれる灯油の重量比に関わらず、軽油単独で運転した場合の排ガス中濃度に近いか、または低い値を示した（図 I - 1 2）。また、その濃度は、混合燃料に占める灯油の重量比率が上がるに従って低下した。排ガス中 NOx 濃度は、特に PO₃₀/KE70 混合燃料（燃料の略称は図 I - 1 2 の説明文を参照）において低かった。

このように、灯油を含む混合燃料の発電能力（積算電力量）は、単位体積あたりでは軽油単独に比べてやや低いが、ウレタンを 30 または 40wt% 含む分解油は、添加剤として灯油を添加することで、ディーゼル燃料として適用が可能である。特に PO₃₀/KE70 は、既往のディーゼル燃料である軽油に比べて、排ガス中 NOx 濃度が低いので、軽油の代替燃料として期待される。

3) まとめ

- ・ウレタンを廃食油中で熱分解して得た分解油に、軽油

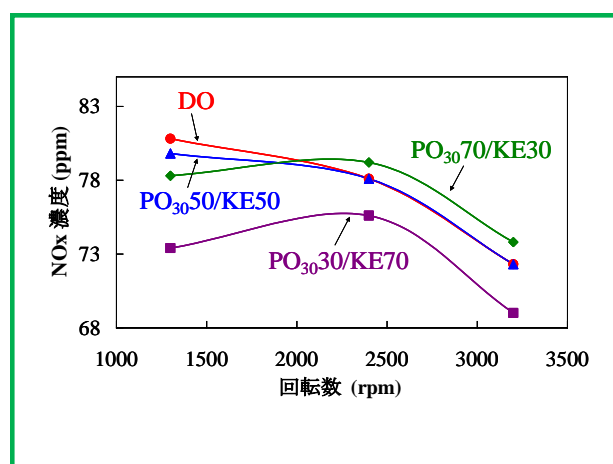


図 I - 1 2 分解油と灯油の混合比がディーゼル発電機排ガス中の NOx 濃度に及ぼす影響

PO₃₀, ウレタンを 30wt% 含む分解油; ■ PO₃₀/KE70, ウレタンを 30wt% 含む分解油と、灯油を 3 : 7 の重量比で混合した燃料; ▲ PO₃₀/KE50, ウレタンを 30wt% 含む分解油と、灯油を 5 : 5 の重量比で混合した燃料; ◆ PO₃₀/KE30, ウレタンを 30wt% 含む分解油と、灯油を 7 : 3 の重量比で混合した燃料; ● DO, 軽油単独（対照実験）

または灯油を添加して作成した混合燃料は、純粋な軽油または灯油と同等の発熱量と粘度をもち、ディーゼル燃料として使用できた。

- ・これらの混合燃料を用いてディーゼルエンジンを運転すると、排出ガス中に SOx は検出されず、L-HC, CO, NOx も低濃度で検出されたに過ぎなかった。

- ・これらの混合燃料は、ディーゼル発電にも使用できた。

- ・本研究で提案する混合燃料を使用すれば、廃棄ウレタンのリサイクルを通して化石燃料の使用量を削減できると考えられる。

I - 5 研究成果の発表状況

(A) 出版物

- 1) 秋元一成、相田裕士、高橋拓也、佐藤貞雄、佐野慶一郎、森智和、吾郷健一（2010）菜種油中熱分解に

による廃棄ポリウレタンフォームのリサイクルに関する研究. 工学院大学研究報告 108:1-5.

- 2) 秋元一成、高橋拓也、佐藤貞雄、佐野慶一郎、森智和、吾郷健一 (2010) 廃棄ポリウレタンフォーム熱分解油のディーゼル燃料への応用. 工学院大学研究報告 109 : 1-4.

(B) 学会発表

- 1) 秋元一成、相田裕士、佐藤貞雄、佐野慶一郎、森智和、吾郷健一 (2009) 廃棄ポリウレタンフォームの菜種油中熱分解によるディーゼル燃料開発. 第20回プラスチック成型加工学会年次大会、東京、平成21年6月.
- 2) 秋元一成、相田裕士、佐藤貞雄、佐野慶一郎、森智和、吾郷健一 (2009) 廃棄ポリウレタンフォーム熱分解油のリサイクルに関する研究. 第17回プラスチック成型加工学会秋季大会、長崎、平成21年11月.
- 3) 秋元一成、高橋拓也、佐藤貞雄、佐野慶一郎、森智和、吾郷健一 (2010) 液相熱分解による廃棄ポリウレタンフォームのリサイクルに関する研究. 第21回プラスチック成型加工学会年次大会、東京、平成22年6月.
- 4) 秋元一成、佐藤貞雄、佐野慶一郎、森智和、吾郷健一 (2010) 廃棄ポリウレタンフォーム熱分解油のエンジン内燃焼排ガスに関する研究. 第18回プラスチック成型加工学会秋季大会、神戸、平成22年11月.

(c) 講演等

- 1) 上野良平 (2011) 未来のエネルギー. 平成24年度 社団法人山梨科学アカデミー・未来の科学者訪問セミナー. 甲州市、平成23年11月.
- 2) 上野良平、森智和、佐藤貞雄、佐野慶一郎 (2012) 廃食油を用いた廃棄ウレタンのリサイクルに関する研究. 平成24年度 やまなし産学官連携研究交流事業・研究成果発表会. 甲府市、平成24年9月.
- 3) 上野良平、森智和、佐藤貞雄、佐野慶一郎 (2012) 廃食天ぷら油を使って廃棄ウレタンをリサイクルする. 平成24年度 山梨県環境科学研究所・研究発表会. 甲府市、平成24年11月.

I-6 謝辞

ウレタン分解油をベースとした混合燃料の物性とエンジン適合性を実験的に検証するにあたり、分解油作成装置とディーゼルエンジンの移送・組み立て等に尽力を頂いた、工学院大学大学院・機械工学専攻および関東学院大学工学部・機械工学科の皆様へ深く感謝します。

本編

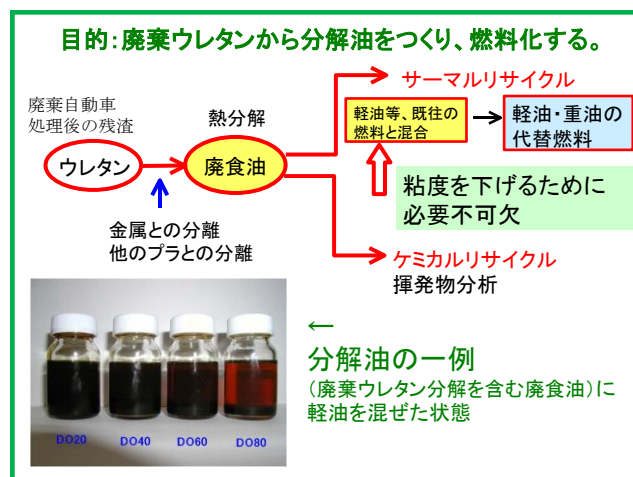
Ⅱ 研究成果報告

Ⅱ-1 研究目的

軟質ポリウレタンフォーム(ウレタン)は、自動車のシートや内装、空調用フィルター、寝具、包装材などに多用されており、国内におけるウレタンの総生産量は約30万トン/年に達している。一方、廃棄されるウレタンのほとんどは、破碎後に埋め立て処分されるが、容量がかさ増するため、埋立て処分地の確保が問題となっている。また廃棄ウレタンは、焼却後の残留物が多いことに加えて、高い燃焼温度を必要とすることから焼却処分も難しく、廃棄ウレタンのほとんどは有効活用されていない。このように、処分に問題を抱えるウレタンであるからこそ、そのリサイクル方法の確立が求められている。ウレタンの樹脂構造は多種多様のポリオールとイソシアネートの組み合わせでできているため、他の熱硬化性樹脂には見られない温度変化による状態変化を示す。従って、熱分解反応を利用して、これをリサイクルする新手法を開発できる可能性がある。例えば、ウレタンを廃食油中で熱分解すれば、新規ディーゼル燃料を得られる可能性がある。(図Ⅱ-1)。ところが、ウレタンを廃食油中で熱分解して得られる分解油は粘度が高く、そのままではディーゼル燃料として使用できない。エンジンを駆動するためには、その粘度を低下させる必要がある。そのため、分解油をディーゼル燃料として使用する際に使用する粘度低下剤の選定が重要である。

本研究では、分解油の粘度を下げることを目的として、これに燃料助剤(以下、添加剤と呼ぶ)を加えた混合燃料を作成した。添加剤として、軽油、エタノール、または灯油の使用を試みた。これらの添加剤を分解油に加えることで得られる混合燃料を、物性面、ディーゼルエンジン適合性、ならびにディーゼル発電性能の点から評価することを目的とした。これらの評価項目が重要である理由を以下に示す。

- ・粘度：粘度が高いと、燃料の噴霧が困難になり、エンジンを運転できない。
- ・発熱量：発熱量が低いと燃料として機能しない。



図Ⅱ-1 本研究で提案する廃棄ウレタンのリサイクル方法と、作成した分解油の一例

- ・着火・消火性能：既往の燃料と同様のレスポンスが求められる。
- ・燃料消費量：いわゆる「燃費」に優れる必要がある。
- ・排ガス：クリーンな排ガスが求められる。
- ・ディーゼル発電性能：自動車燃料以外への応用性。

Ⅱ-2 実験方法

1) 実験試料

表Ⅱ-1と図Ⅱ-2～4に、実験で使用した試料とその略称を示す。これらの略称は、本稿「Ⅱ-3 研究成果」の図表中で使用する。本研究でウレタンはエーテル系の軟質ポリウレタンフォームを、廃食油は揚げ物の調理に用いた使用済み菜種油(トリグリセリド)を指す。

2) ウレタン分解油の作成

分解油の作成は、ウレタン熱分解槽、活性炭脱臭設備、およびスクラバー脱臭設備(全て日清プラントエンジニアリング株式会社製)を組み合わせたウレタン分解装置(図Ⅱ-5)を用いて行った。ウレタンの熱分解温度は廃食油の発火点を考慮して290または320℃とした。廃食油を熱分解槽に入れて加熱した後、1cm角程度に細断したウレタンを入れて攪拌した。

分解促進剤(触媒)を使用する場合は、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ を廃食油に対して0.3wt%添加した。本研究では作成した分解油をP0と略することがある。

表Ⅱ－１ 実験試料と略称

FPF はFlexible Polyurethane Form を、RO はRapeseed Oil を、DO はDiesel Oil を、EtOH はEthanol を、KE はKerosene をそれぞれ略したものである。

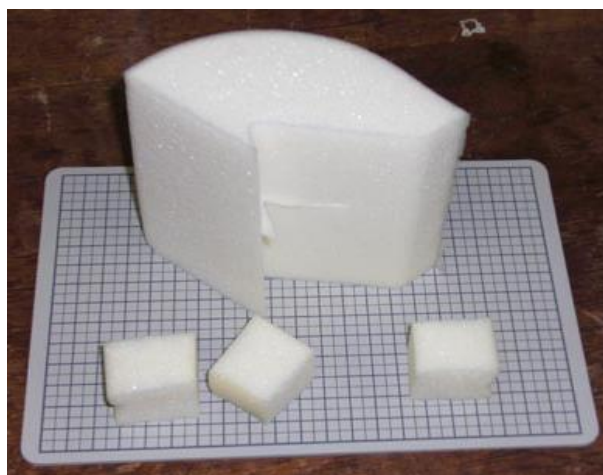
試料名	略称	メーカー
ウレタン	FPF	株式会社イノアックコーポレーション
廃食油	RO	日清オイリオグループ株式会社
軽油	DO	出光興産株式会社
エタノール	EtOH	今津薬品工業株式会社
灯油	KE	出光興産株式会社



図Ⅱ－２ 実験に使用した軽油 (DO)、廃食油 (RO)、およびエタノール (EtOH)



図Ⅱ－３ 廃食油 (RO)と灯油 (KE)



図Ⅱ－４ 熱分解に用いたウレタン



図Ⅱ－５ ウレタン分解装置

3) 混合燃料の作成

前述のように、得られた分解油は非常に粘度が高いため、燃料を霧化して燃焼を行なうディーゼルエンジンの性質上、これを燃料として単独で使用することは不可能である（予備実験による結果）。そこで、この分解油を添加剤と混合することで粘度の低下を図った。添加剤には一般的なディーゼル燃料である軽油、バイオ燃料として知られるエタノール、または軽油に比べて引火点と粘度が低い灯油を用いた。軽油またはエタノールを添加剤として用いた混合燃料の組成を、本稿Ⅱ－３ 研究成果「項目１：混合燃料の物性とディーゼルエンジンへの適合性」の表Ⅱ－２に記載した。また、灯油を添加したものについては、混合燃料に占める割合が 30, 50, または 70wt% になるよう、分解油にこれを加えた。

4) 混合燃料の物性

a) 粘度

分解油をベースとした混合燃料をディーゼル燃料として用いる場合、燃料の粘度は、エンジン燃焼室内における燃料の霧化および噴射ポンプの潤滑作用に影響を及ぼすため、軽油と同様の値が求められる。

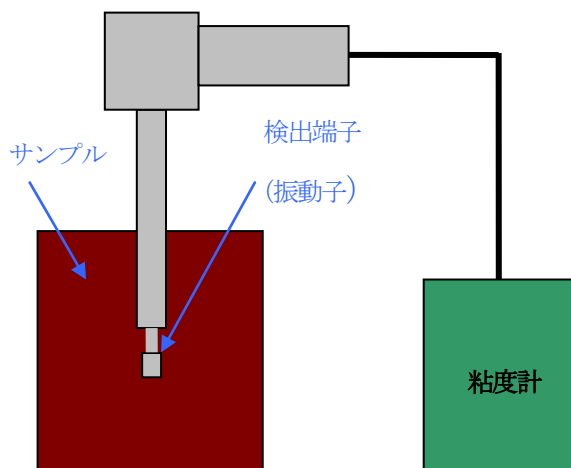
燃料の粘度測定に用いた装置は、図Ⅱ－6に示すCBCマテリアルズ株式会社製の振動式粘度計 VM-10A で、測定原理を図Ⅱ－7に示す。測定は、サンプル液中に検出端子を浸漬して振動させ、振動子と油試料間のせん断力を感知して粘度へ換算することで行われる。用いた粘度計の粘度測定範囲は10～5000 mPa・sである。

b) 発熱量

混合燃料の発熱量測定は、図Ⅱ－8に示す株式会社島津

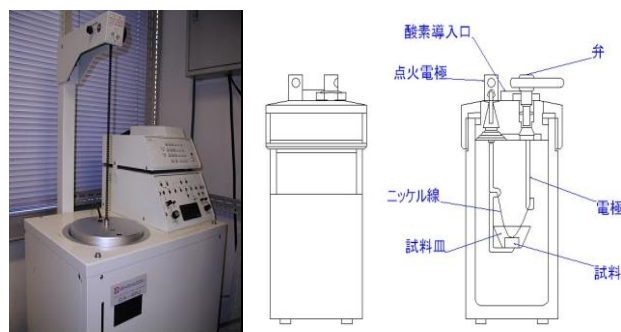


図Ⅱ－6 粘度計 (VM-10A)



図Ⅱ－7 粘度計の測定原理

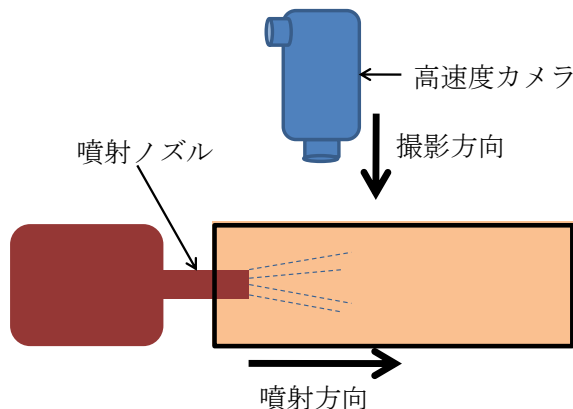
製作所製の燃研式自動ボンベ熱量計 CA-4PJ を用いて行った。ここでは、ボンベ中で高圧酸素を用いて試料を完全燃焼させ、発生した熱を一定量の水に吸収させることで、上昇した水温から試料の燃焼熱を算出した。具体的には、試料皿に試料を入れ、ニッケル線を電極と試料に絡めるように設置する。その後、ボンベの蓋を閉じ、ボンベ内に 2.5～3Mpa の圧縮酸素を注入して弁を閉め、点火電極にプラグをつけて熱量計内に装填して燃焼発熱量を測定した。



図Ⅱ－8 自動ボンベ熱量計 (CA-4PJ) と測定原理

c) 燃焼可視化

エンジン室内における燃料の燃焼状態を観察するため、燃焼可視化試験を行った。図Ⅱ－9に実験装置概要を示す。高温室内に燃料を噴霧し、その燃焼状態を高速度カメラにより撮影した。試験は燃料が噴霧されてから着火するまでの着火遅れ期間と、噴霧を止めてから燃焼が完了するまでの後燃え期間の2点で行った。燃焼実験は、燃料噴射時燃焼温度 45℃、燃焼時室内温度 375℃、燃料噴射ノズル径 0.02mm、酸素濃度 21%の条件で行った。



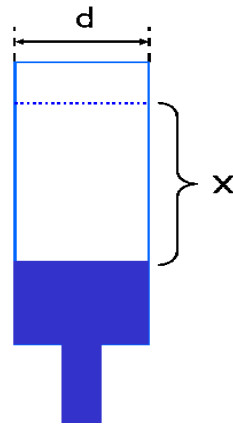
図Ⅱ－9 燃焼可視化の実験装置概要

5) 混合燃料のディーゼルエンジンへの適合性

図Ⅱ－１０に示す単気筒ディーゼルエンジン（ロビンジン DY41DS、富士重工株式会社）を用いて、混合燃料による運転実験を行った。その際、燃料消費量の測定と排ガス成分の分析を行った。



図Ⅱ－１０ 混合燃料を用いた運転実験を行ったディーゼルエンジン (DY41DS)



図Ⅱ－１１ 燃料消費量測定用プールとその概略図

a) 燃料消費量

混合燃料の運転効率を検討するため、異なる 3 種類の回転数 (1300, 2400, 3200rpm) で運転したときの燃料消費量を測定した。ディーゼルエンジンは、3000 回転以上で馬力とトルクが落ち込むため 3200rpm を上限とした。図Ⅱ－１１は、使用した燃料プールとその概略図である。測定方法はプールに取り付けた目盛りで液面の減少を読み取り、以下の計算式(1)、(2)を用いて燃料消費量を求めた。

$$A = \frac{\pi d^2}{4} \quad (1)$$

$$F = \frac{A \times X}{T} \times \frac{1}{1000} \quad (2)$$

d : プール内径 (mm)

A : プール内断面積 (mm^2)

X : 液面の減少距離 (mm)

T : 計測時間 (min)

F : 消費量 (ml/min)

b) 排ガス分析

混合燃料をディーゼルエンジンの燃料として使用した際、図Ⅱ－１２と図Ⅱ－１３に示すガステック株式会社製のガス検知管と気体採取器、及び図Ⅱ－１４に示す株式会社テスト製 TEST0335 燃焼排ガス分析計を用いて排ガスの測定を行った。

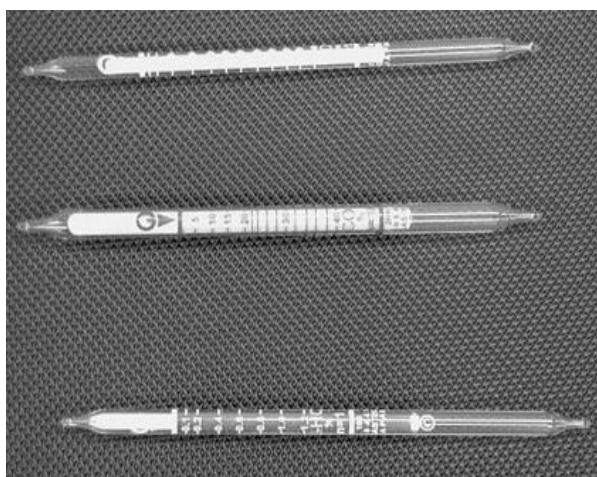
前出のディーゼルエンジン(DY41DS)を異なる 3 種類の回転数 (1300, 2400, 3200rpm) で運転して、それぞれの運転条件下で発生した排ガスを、以下に示す方法で採取し、分析に供した。

エンジンとマフラーの接続部付近からテドラーバッグを用いて排ガスを採取した後、これをガス検知管に取り込み、排ガスに含まれる有害物質の濃度を、検知管の目盛りから読み取ることで測定した。当該検知管で濃度を測定した物質は、一酸化炭素 (CO)、二酸化炭素 (CO_2)、低級炭化水素 (L-HC)、および窒素酸化物 (NO_x) である。

また、TEST0335 燃焼排ガス分析計のセンサを直接排気口に差込み、排ガスに含まれる有害物質濃度を測定した。この排ガス分析計で濃度を測定した物質は、硫黄酸化物 (SO_x) である。

c) 発電性能

ディーゼル燃料は主に自動車の燃料として使用されるのが一般的であるが、発電機にも使用されている。本研究で作成した混合燃料を、ディーゼル代替燃料として使用した場合の発電性能を、富士重工株式会社製の発電機 SGD4500 (図Ⅱ－１５) を用いて評価した。具体的には、



図Ⅱ－１２ ガス検知管（CO, CO₂ and L-HC 用）



図Ⅱ－１５ ディーゼル発電機（SGD4500）

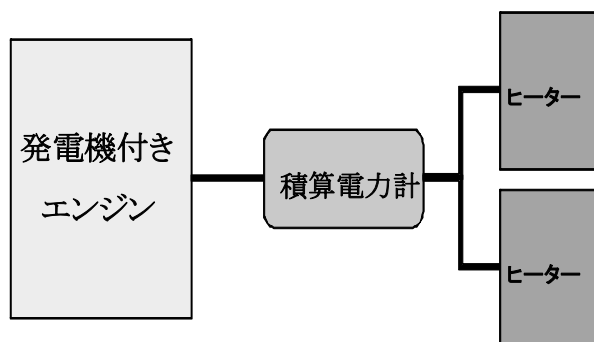


図Ⅱ－１３ ガス採取器とテドラーバッグ



図Ⅱ－１４ 燃焼排ガス分析計（TEST0335）

各混合燃料を用いて、発電機の運転を行い、その際に生み出された電力でヒーターを可動する。ヒーターは、発電機にバランスの良い負荷を与えるため、2 台を並列に繋



図Ⅱ－１６ 発電性能の評価方法

いで使用した。発電能力は、エンジンとヒーターの間に接続した電力計を用いて、電力と積算電力量を測定した（図Ⅱ－１６）。また、その際の燃料消費量を測定することで各混合燃料の発電性能を評価した。

Ⅱ－３ 研究成果

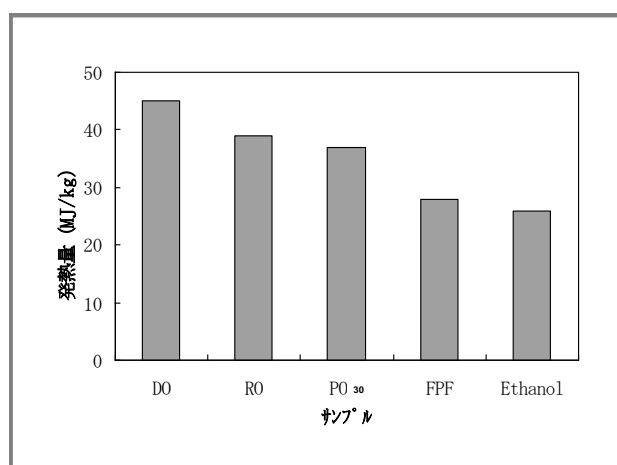
１）混合燃料の物性とディーゼルエンジンへの適合性

a) 軽油またはエタノールを添加した混合燃料
前述のように、320℃に加熱した廃食油中で、ウレタンを熱分解して分解油を作成した。分解に供するウレタンの量は、廃食油：ウレタンの重量比が 7：3 または 6：4 になるように設定した。これらの混合物を熱分解して得た分解油について、ここでは前者を P0₃₀、後者を P0₄₀ と呼ぶ。分解油の例を図Ⅱ－１７に示す。また、分解油はその原材料であるウレタンに比較して発熱量が高くな

る必要がある。すなわち、高い発熱量が得られなければ、ウレタンをそのまま焼却すればよいという結論になってしまう。分解油の原料（ウレタンと廃食油）ならびに、軽油とエタノールをそれぞれ単独で燃焼させたときの発熱量を図Ⅱ－１８に示す。上記の方法で作成した分解油（廃食油：ウレタンの重量比が７：３）の発熱量は、元のウレタンの約１．３倍まで上昇した。従って、ウレタンを分解油にすることは、発熱量の点で意義がある。このようにして作成した分解油は粘度が高く、燃料を霧化して燃焼を行なうディーゼルエンジンの性質上、分解油単



図Ⅱ－１７ 分解油



図Ⅱ－１８ 実験材料の発熱量

DOは軽油を、ROは廃食油を、POは分解油を、FPFはウレタンを、それぞれ略したものである。

独では、燃料としての使用が不可能であったため、この分解油を添加剤と混合することで粘度の低下を試みた。添加剤として、一般的なディーゼル燃料である軽油、または植物由来であるエタノールを、分解油に加えて作成した混合燃料の組成を表Ⅱ－２に示す。

図Ⅱ－１９に示すように、分解油に添加する軽油またはエタノールの混合割合を上げると、作成した混合燃料の粘度は低下した。発熱量は、分解油に軽油を添加した場合、その混合割合を増やすと高くなったが、エタノールを添加した場合は逆に低下した。このことから、エタノールは分解油の粘度低下に効果があるが、燃料として基本的な性能である発熱量を低下させてしまうため、ディーゼルエンジンの運転に適した混合燃料を作るための添加剤として、適当ではないと考えられた。

次に、作成した混合燃料を用いてディーゼルエンジンを運転した際のエンジン回転数と燃料消費量の関係について、分解油に軽油を添加したものをを用いた結果を図Ⅱ－２０に、分解油にエタノールを添加したものをを用いた結果を図Ⅱ－２１に示す。

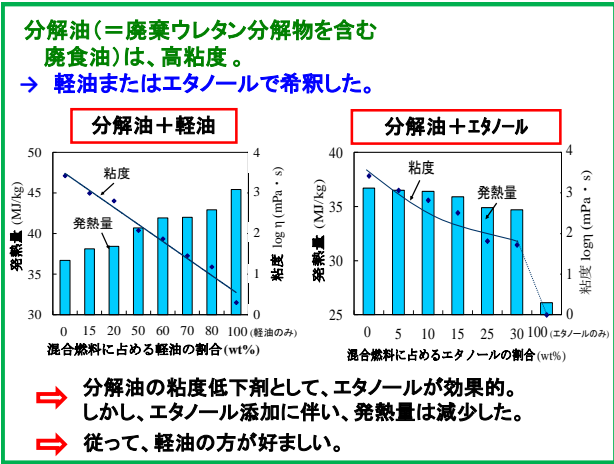
本実験では、分解に供するウレタンの量は、廃食油：ウレタンの重量比が７：３となるよう混合して熱分解した分解油を使用した。この分解油に軽油を添加して作成した混合燃料でエンジンの運転を行うと、エンジン回転数が１３００～２４００rpmで燃料消費量は、軽油単独で同じエンジンを運転した場合とほぼ同等であったが、高回転側の３２００rpmでは、軽油単独に比較して燃料消費量が１．５～３．０mL/min減少した（図Ⅱ－２０）。この僅差の減少に有意差があるか結論することはできないが、少なくとも分解油と軽油からなる混合燃料は、既往の燃料である軽油に比較してほぼ同等の燃料消費性能をもつことはわかる。

一方、分解油にエタノールを添加して作成した混合燃料でエンジン運転した結果をみると、分解油に対するエタノールの添加割合の違いに関わらず、エンジン回転数が１３００～２４００rpmで燃料消費量は、軽油単独で同じエンジンを運転した場合に比べ、１．７～３．２mL/min高かった（燃費が悪い）。さらに、エンジン回転数を３２００rpmへ上げると、エンジンは運転不良を起こし停止した（図Ⅱ－２１）。

表Ⅱ－２ 作成した混合燃料の組成

PO₃₀ は分解油（廃食油：ウレタンの重量比が 7 : 3 で熱分解したもの）、DO は軽油、EtOH はエタノールの略称である。

混合比率 (wt%)			略称
PO ₃₀	DO	EtOH	
85	15		PO ₃₀ 85/DO15
80	20		PO ₃₀ 80/DO20
50	50		PO ₃₀ 50/DO50
40	60		PO ₃₀ 40/DO60
30	70		PO ₃₀ 30/DO70
20	80		PO ₃₀ 20/DO80
95		5	PO ₃₀ 95/EtOH5
90		10	PO ₃₀ 90/EtOH10
85		15	PO ₃₀ 85/EtOH15
75		25	PO ₃₀ 75/EtOH25
70		30	PO ₃₀ 70/EtOH30

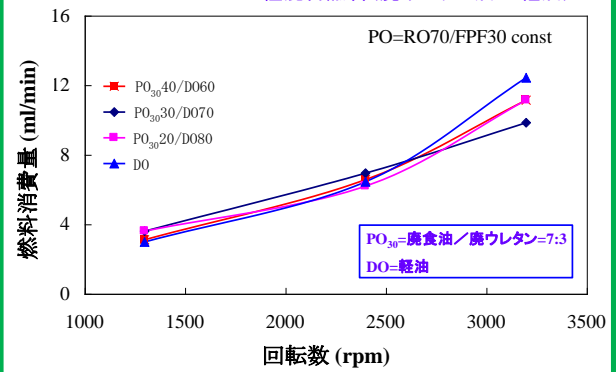


図Ⅱ－１９ 分解油（ウレタン 30wt% : PO₃₀）に、軽油またはエタノールを添加して作成した混合燃料の粘度と発熱量

以上の結果から、分解油に軽油を添加して作成した混合燃料は、ディーゼルエンジンの運転に使用できるが、エタノールを添加した混合燃料は使用できないと考えられた。

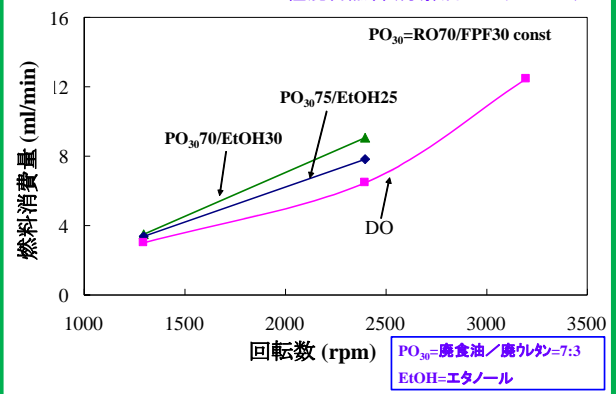
さらに、作成した混合燃料を用いてディーゼルエンジンを運転した際の、着火および消火性能について検討した結果を、図Ⅱ－２２および図Ⅱ－２３に示す。

回転数と燃料消費量 2種混合燃料（廃ウレタン油＋軽油）



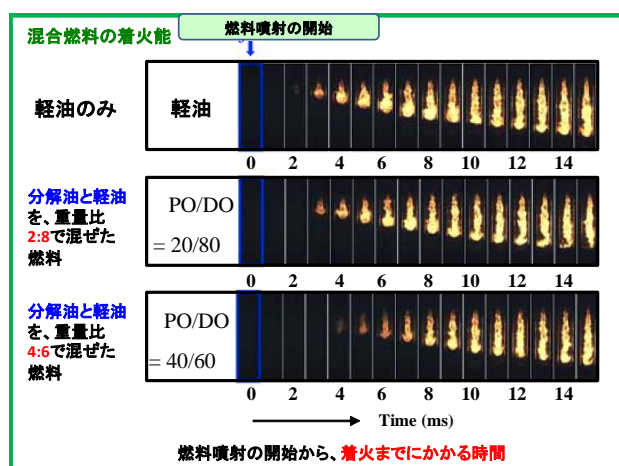
図Ⅱ－２０ 分解油（ウレタン 30wt% : PO₃₀）に軽油を添加して作成した混合燃料を用いてディーゼルエンジンを運転した際の、エンジン回転数と燃料消費量の関係
混合燃料の略称と組成は、表Ⅱ－２に記載した。

回転数と燃料消費量 2種混合燃料（分解油＋エタノール）

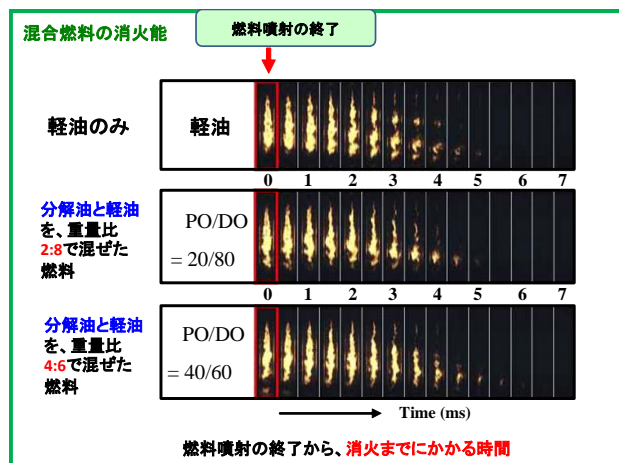


図Ⅱ－２１ 分解油（ウレタン 30wt% : PO₃₀）にエタノールを添加して作成した混合燃料を用いてディーゼルエンジンを運転した際の、エンジン回転数と燃料消費量の関係
混合燃料の略称と組成は、表Ⅱ－２に記載した。

着火遅れ期間、後燃え期間ともに、添加剤である軽油を含まない分解油で最も長く、純粋な軽油で最も短かった。軽油に分解油を加え、混合燃料としたことによって、約 1～2ms の着火遅れおよび 1～1.7ms の後燃え期間延長が観察された。すなわち、いずれも実用上問題のないレベルの遅れにとどまった。



図Ⅱ－２２ 混合燃料の着火性能（軽油のみを用いた場合との比較）



図Ⅱ－２３ 混合燃料の消火性能（軽油のみを用いた場合との比較）

また、軽油を 70－80wt% 混合した混合燃料の排ガス中の有害物質濃度は、 NO_x 、 CO 、 L-HC の各項目で、軽油単独と同等であり、問題が認められなかった（ SO_x は未検出）。

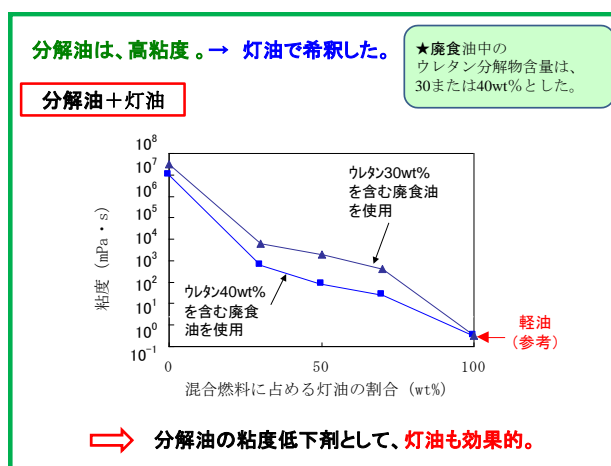
b) 灯油を添加した混合燃料

廃食油中に分解促進剤（触媒＝熱分解反応を速める試薬）として水酸化カルシウム（ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ）を 0.3wt% 添加した状態でウレタンの熱分解を行い、2 種類の分解油を作成した。熱分解は、表Ⅱ－３に記す条件で行った。前述のように、分解油はセタン価が低く、高粘度のため直接ディーゼル燃料として使用できない。そこで、低粘度で高発熱量をもつ灯油を添加した混合燃料を作成して、その粘

表Ⅱ－３ 分解油作成時における熱分解条件

熱分解反応の触媒として、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ を 0.3wt% の濃度になるよう廃食油に加えた。ウレタンを 30wt% または 40wt% 含む分解油を、それぞれ PO_{30} 、 PO_{40} と呼ぶ。

略称	PO_{40}	PO_{30}
熱分解温度（℃）	290	320
ウレタンの混合比率（wt%）	40	30
分解できず残存したウレタンの比率（wt%）	3.5	1.1
触媒濃度（wt%）	0.3	0.3



図Ⅱ－２４ 分解油 PO_{30} または PO_{40} （ウレタンを 30wt% または 40wt% を含む）をベースとして作成した混合燃料に含まれる灯油の重量比と、作成した混合燃料がもつ粘度の関係

度と発熱量を測定した。

$\text{Ca}(\text{OH})_2$ は、液相中の物質をイオン化することで、多様な化学反応を促進するアルカリ性の個体触媒である。本研究では $\text{Ca}(\text{OH})_2$ を、廃食油中におけるウレタンの液相熱分解を促進するために用いた。 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ は、前述の軽油またはエタノールを添加した混合燃料のベースとなる分解油作成時にも使用を試みる価値があるが、実施していない。

軽油単独の粘度は約 2.1 (mPa·s) である。粘度はエンジン室内への燃料供給や噴霧特性に影響を与えるため、混合燃料にはこれに近い粘度が求められる。作成した 2 種類の分解油の粘度をみると、ウレタンの分解量 40wt% の分解油（ PO_{40} ）は、分解量 30wt% のそれ（ PO_{30} ）に比べ、低い値を示した。しかし、表Ⅱ－３に示すように PO_{40} は残渣量が多く、分解効率が悪い（ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ を加えない条件での分

解油作成は行っていない)。

これらの分解油をベースに作成した混合燃料の粘度を図Ⅱ－２４に示す。軽油単独の粘度は約 $2.1(\text{mPa}\cdot\text{s})$ であり、混合燃料にはこれとほぼ同等の粘度が求められる。混合燃料の粘度は、灯油の重量比が増加するにつれて減少し、混合燃料のベースとなった分解油に含まれるウレタンの重量比(30wt%または40wt%)に関わらず、灯油の添加量が30～70%の範囲で、元の分解油に比して100～90%の粘度低下を認め、ディーゼルエンジンの運転に支障がないレベルに到達することが明らかになった。

分解油に灯油を添加して作成した、混合燃料の発熱量を図Ⅱ－２５に示す。比較のため、分解油に軽油を添加して作成した混合燃料の発熱量を図Ⅱ－２６に示す。混合燃料の発熱量は添加剤の種類(灯油または軽油)に関わらず、完成した混合燃料に占めるこれら添加剤の重量割合の増加に応じて上昇した。いずれの混合燃料も、その中に含まれる灯油または軽油の重量割合を70wt%まで上げれば、純粋な灯油または軽油と同レベルの発熱量が得られることもわかった。

また、混合燃料のベースとなる分解油に含まれるウレタンの含有率の違いに関わらず(30wt%と40wt%)、完成した混合燃料の発熱量へ及ぼす影響はほとんど認められなかった(図Ⅱ－２５、図Ⅱ－２６)。

2) 混合燃料のディーゼル発電への適合性

a) 軽油を添加した混合燃料

次に、軽油を添加した混合燃料を用いてディーゼル発電性能を評価した。軽油を添加した混合燃料を用いてディーゼル発電性能を評価した。軽油を60～80wt%含む混合燃料を用いて発電機を運転すると、消費した燃料の体積あたりで、軽油単独で運転した時の95.5～95.9%の電力量が得られた(図Ⅱ－２７右側： 図Ⅱ－２７左側の積算電力量／燃料消費量で、時間あたりに得られる電力量を比較できる)。この僅差の減少に有意差があるか結論できないが、軽油を含む混合燃料は、既往の燃料である軽油に比較して同等の発電性能をもつことはわかる。

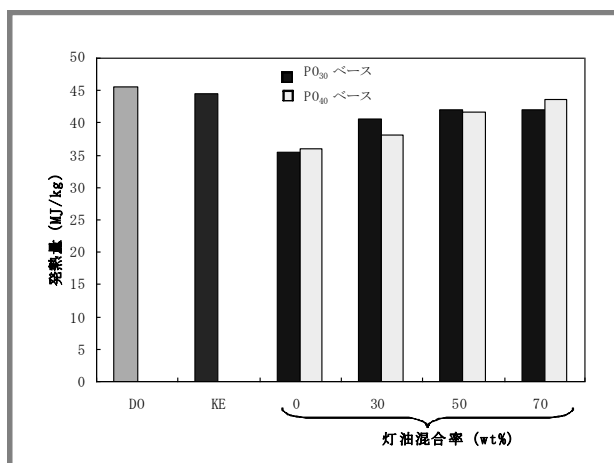
また、軽油を70～80wt%混合した混合燃料は、燃料消費量および排ガス中の有害物質濃度の点でも、軽油と近い測定結果となったため、リサイクル効率を考慮して軽油

を混合燃料作成のための添加剤として使用することは意義があると考えられた。現在、ディーゼル燃料の排気ガスに対する規制は、環境汚染防止の観点からきわめて厳しくなっている。そのため、分解油をベースとした混合燃料を用いてディーゼルエンジンを駆動した際に発生する排気ガス中に含まれる有害成分の測定を行うことは、発電性能の測定と同様に重要である。

エタノールを添加剤として加えた混合燃料については、発熱量の点で問題があったので(分解油にエタノールを添加すると、発熱量が低下してしまう：図Ⅱ－１９)、本研究ではディーゼル発電時における、その燃料特性を調べなかった。しかし、リサイクル燃料としての意義を鑑みると、植物の光合成に由来する(バイオ)エタノールを添加剤として使用することが望ましい。従って、エタノールを有効な粘度低下剤として使いつつ、混合燃料の発熱量を低下させない手法の検討が必要である。

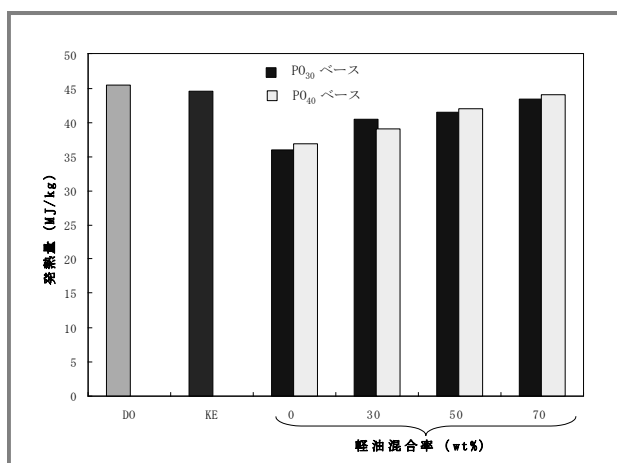
b) 灯油を添加した混合燃料

実際にディーゼル発電機を運転した際、燃焼排ガス成分、燃料消費量、および燃料消費量に対する発電量の測定を行った。この実験で使用した混合燃料(分解油+灯油)の組成は、灯油の体積比で30, 50, 70%とした。対照実験として、軽油単独を燃料に用いて同じ発電機を運転、



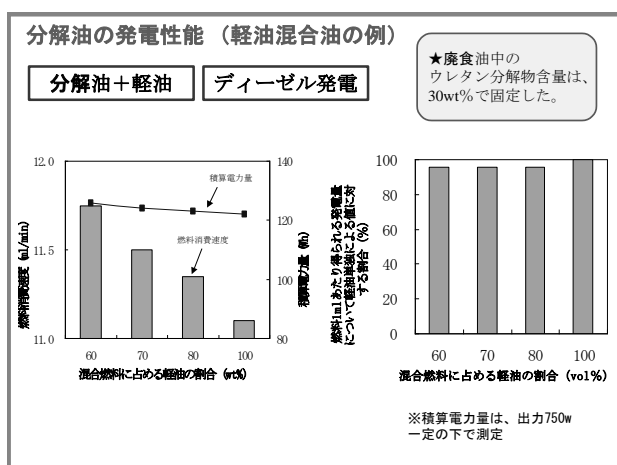
図Ⅱ－２５ ウレタンを30wt%含む分解油(PO₃₀)または40wt%含む分解油(PO₄₀)に、灯油を添加した混合燃料の発熱量

参考として、軽油(DO)単独および灯油(KE)単独の発熱量を、左側2本の棒グラフに示した。



図Ⅱ－２６ ウレタンを30wt%含む分解油 (PO₃₀) または40wt%含む分解油 (PO₄₀) に、軽油を添加した混合燃料の発熱量

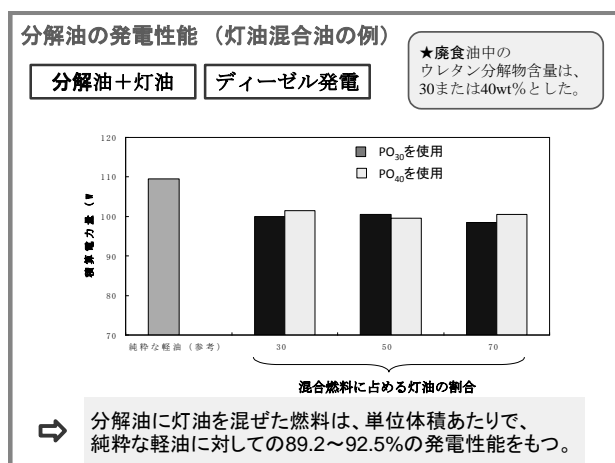
参考として、軽油 (D0) 単独および灯油 (KE) 単独の発熱量を、左側2本の棒グラフに示した。



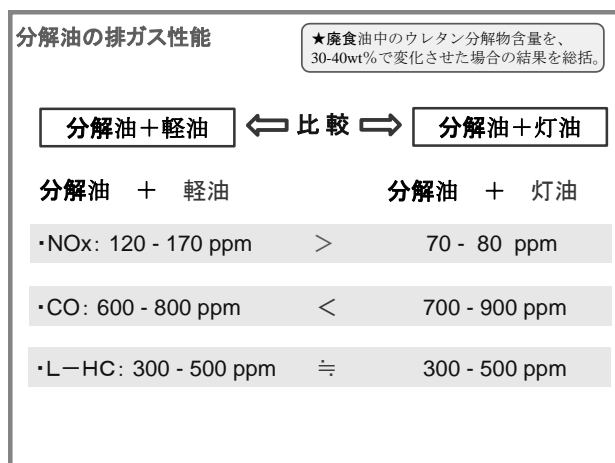
図Ⅱ－２７ 分解油 (PO₃₀: ウレタンを30wt%含む) に軽油を添加して作成した混合燃料の発電性能

その時の発電量を調べた。その結果、単位体積あたりの発電量は軽油に比べてやや (7.5~10.8%) 低くなった。しかし、単位重量あたりでは、混合燃料は軽油と同等の電力量を発生したことを付記する。なお、使用した混合燃料のベースとなる分解油に含まれるウレタンの重量比は40%であっても、30%の場合と比較して積算電力量にほとんど差は認められなかった (図Ⅱ－２８)。

次に、灯油を含む混合燃料を用いて発電機を運転した際に発生する排気ガス中の有害成分を、軽油を含む混合



図Ⅱ－２８ ウレタンを30wt%含む分解油 (PO₃₀) または40wt%含む分解油 (PO₄₀) をベースとして作成した混合燃料に含まれる灯油の体積比と、作成された混合燃料1mLが、ディーゼル発電時に発生した積算電力量の関係

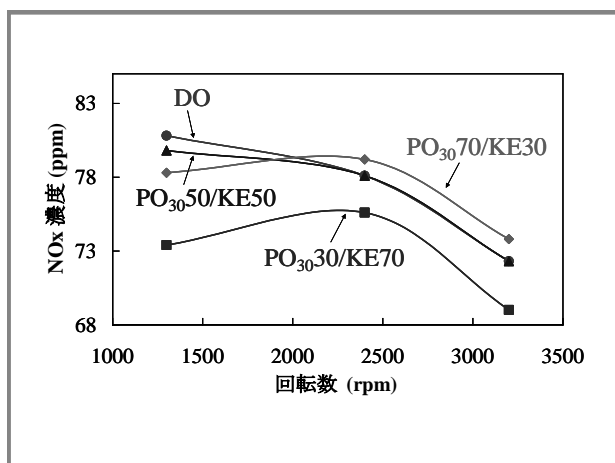


図Ⅱ－２９ 混合燃料の排ガス性能

燃料で同様に運転した場合のそれと比較した (図Ⅱ－２９)。NOx 濃度は、混合燃料の添加剤として灯油を用いた方が、軽油を用いた場合より低かった。

一方で CO 濃度と L-HC 濃度は、いずれの燃料を用いても、軽油単独で運転した場合と同レベルであった。SOx は、何れの混合燃料においても検出されなかった。

既往の燃料 (軽油単独) で運転するディーゼルエンジンの排ガスに含まれる物質で、ガソリンエンジンのそれに比較して排出量が多い物質として問題視されるものは NOx である。NOx 濃度は PO₃₀30~70/KE 混合燃料 (略称の定義は図Ⅱ－３０の説明文を参照) において、軽油単独の NOx 濃度に近い値、または軽油よりも低い値を示した



図Ⅱ－３０ 分解油と灯油の混合比がディーゼルエンジン排ガス中のNOx 濃度に及ぼす影響

PO₃₀, ウレタンを 30wt%含む分解油; ■ PO₃₀/KE70, ウレタンを 30wt%含む分解油と、灯油を 3 : 7 の重量比で混合した燃料; ▲ PO₃₀/KE50, ウレタンを 30wt%含む分解油と、灯油を 5 : 5 の重量比で混合した燃料; ◆ PO₃₀/KE30, ウレタンを 30wt%含む分解油と、灯油を 7 : 3 の重量比で混合した燃料; ● DO, 軽油単独 (対照実験)

(図Ⅱ－３０)。NOx 濃度は、混合燃料に占める灯油の重量比率が上がるに従って、低下する傾向がみられた。排ガス中 NOx 濃度は、特に PO₃₀/KE70 混合燃料で最も低かった。

このように、灯油を添加した混合燃料の発電能力 (積算電力量) は、単位体積あたりでは軽油単独に比べてやや低い。しかし、灯油混合燃料 (PO₃₀/KE30 を除く) の排ガス中に含まれる NOx 濃度は、軽油単独のそれより低い。従って灯油混合燃料は、比較的クリーンな排ガス性能をもつリサイクル燃料として期待される。

Ⅱ－４ まとめ

廃棄ウレタンの一部は、接着プレス成型という手法により、クッション材へ生まれ変わっている。すなわち、粉碎したウレタンに、同じくウレタン系の接着樹脂を塗布して鋳型に入れ、加熱硬化させて成形される。しかし、冒頭で述べたように、このような例外を除けば埋め立て処分され、ほとんどリサイクルされていない。

本研究で実証したように、ウレタンを廃食油中で熱分解して得た分解油は、これを軽油または灯油と混合することで、ディーゼル燃料として使用可能である。一方、分解油に添加剤としてエタノールを加えて作成した混合燃料では、添加前の分解油に比較して発熱量が低下して、エンジン運転不良が発生するので、現時点では使用できないことがわかった。

分解油に軽油または灯油を添加した混合燃料を用いてディーゼルエンジンを運転した場合、排出ガス中に SOx は検出されなかった。また、その他の有害物質 (L-HC, CO, NOx) も、70-900ppm と低濃度で検出されたに過ぎなかった。また、ディーゼル発電実験の結果も、これらの混合燃料が、軽油に代わるリサイクル燃料として使用できることを示唆した。作成した混合燃料を用いて、軽油と同等の積算電力量を得るためには、燃料消費量が増大することが分かったが (単位重量当りでは、同レベルの消費量)、本研究で提案する混合燃料を使用すれば、既往のディーゼル燃料である軽油の使用量を大幅に削減できる点は評価できる。

以上の結果から、廃棄ウレタンを廃食油中で熱分解して得られた分解油は、これを軽油または灯油と混合することで、自動車のディーゼル燃料、またはディーゼル発電用燃料として使用可能である。本研究で確立した技術を応用すれば、廃棄ウレタンのリサイクルを通して化石燃料の使用量を削減できる可能性がある。

ところで、液体燃料の需要が存在することはさておき、エネルギー収支の点から、廃棄ウレタンをエンジン燃料としてリサイクルすることは有効な手段であろうか。すなわち、ウレタンを焼却して直接熱源として利用した方がエネルギーを生むのではないかという疑問が存在する。これに関連して本研究では、分解油の有効性を発熱量の点から調べた。軟質ポリウレタンを燃焼させた場合の発熱量 (28 MJ/kg) を基準 (1.00) とすると、生産量が多い主要プラスチック類の発熱量 (相対値) は、ポリエチレン=1.65、ABS 樹脂=1.37、ポリアクリロニトリル=1.20、ナイロン=1.14、ポリ塩化ビニル=0.72 である。このようにウレタンは、直接これを燃焼させた場合、(ポリ塩化ビニルを除く) 他の主要プラスチック類より、得られる発熱量が低い。しかし、廃食油中でウレタ

ンを熱分解することで得た分解油は、元のウレタンの1.32～1.46倍の発熱量をもっていた。これは前述の主要プラスチック中2～3番手の値に相当する。従って、少なくとも発熱量の点から、ウレタンを分解油に変換することは価値があるといえる（ウレタン熱分解に使うエネルギーが低ければ）。この結果に加えて、「液体燃料の必要性」と「ウレタンは焼却炉へ一度に大量に投入できない（かさ張るので）という問題」を加味すれば、本研究で得られた結果は、「新しいリサイクル燃料の開発」に貢献するものであると考えられる。

今後は、ウレタンを直接燃焼させて熱源として用いる代わりに、その分解油を液体燃料としてリサイクルするという本研究の手法について、得られるエネルギーに対する環境影響とコストの面から、その優位性を検討する必要がある。

なお、本研究の成果をウレタンのリサイクルへ応用するために、解決しなければならない点として、廃ウレタン油の原料となる廃食油回収コストの低減がある。

これについて、バイオディーゼル燃料生産を目的とした廃食油回収の現状を見ると、山梨生活協同組合では、商品宅配時に各家庭から廃食油を回収することで、回収コストをゼロに抑えている。回収した廃食油（バイオディーゼル）の需要が多い月は、利益が見込めるという。当該組合の例では、回収した廃食油を精製するプラントへの初期投資が、コスト上の問題となっている。この点を解決するために、プラント建設に対して自治体の助成が必要となろう。また、東京の事業所・住宅密集地では、廃食油の回収と販売事業が民間企業として成り立っている例もある。廃棄ウレタンの回収も、ルートセールスが立ち寄る事業所で行えば、廃棄ウレタン分解油の予想価格＝プラント建設費＋熱分解に必要なエネルギーのコストとなろう。

現在、回収・精製した廃食油は、配送用トラックのバイオディーゼル燃料として使われている。しかし、近年では電気自動車の台頭により需要が減少しているため、農業用トラクター燃料としての使用を呼び掛けるなど、消費先の拡大が求められている。同様に、本研究で開発した廃棄ウレタン分解油をベースとした混合燃料についても、その用途・市場開発の問題を解決する必要がある。