

中国技術振興センター殿

廃プラスチック分解油の深度脱塩素・脱臭素精製触媒

および油化プロセスの実用化

ディーゼル発電機特性試験

試験結果報告書

平成 14 年 11 月 8 日

アースリサイクル株式会社

目次

1. 概要	1
2. 本試験の背景と目的	1
3. 試験の内容	1
3. 1 発電試験装置	1
3. 2 発電試験の内容	3
1) 始動試験	3
2) 発電機出力特性試験	3
3) 燃料消費量測定	4
4) 排ガス分析	4
5) ディーゼルエンジンの分解点検	4
4. 燃料油の性状調査	4
5. 試験結果	10
5. 1 始動試験	10
5. 2 発電機出力特性試験	11
5. 3 燃料消費量測定	14
5. 4 排ガス分析	15
5. 5 ディーゼルエンジンの分解点検	16
6. 廃プラスチック分解油の評価と今後の課題	17
6. 1 分解油の評価	17
6. 2 今後の検討課題	19
引用文献	20
添付資料	
資料1 負荷試験データ	
資料2 排ガス分析データ	
資料3 ディーゼルエンジンの開放点検写真	

ディーゼル発電機特性試験

1. 概要

経済産業省地域新生コンソーシアム研究開発事業「廃プラスチック分解油の深度脱塩素・脱臭素精製触媒および油化プロセスの実用化」で開発する小型油化装置から生成された廃プラスチックの分解油（以下分解油と略す）をディーゼルエンジン発電機の燃料として使用し、各種発電試験を実施したので、分解油のディーゼル発電機用燃料としての評価を含め試験結果を報告する。

2. 試験の背景と目的

廃プラスチックを熱分解して燃料油に転換する廃プラスチックの処理プロセスもしくはリサイクルの方法は既にいくつかの実施例¹⁻³⁾があるが、生産された分解油の多くはボイラ燃料として利用され、油の価格としてはC重油並みの評価となっている。しかるにこの廃プラスチックを分解して得られる燃料油をディーゼル発電機の燃料として利用できればその評価がA重油もしくは軽油並に向上する可能性がある。

このことは上記プロジェクトで開発中の地域分散型油化装置の経済性向上につながる。また廃プラスチック分解油のディーゼル発電機の燃料としての使用実績はほとんど報告されていない。

3. 試験の内容

3. 1 発電試験装置

試験には西芝電機製の非常用ディーゼル発電装置（NPF 3M-45WRKN）を使用した。

1) 発電装置

表1にディーゼルエンジン発電試験装置の仕様を、図1にフロー図を示す。

エンジンはヤンマーディーゼル(株)製で4サイクル水冷、4気筒、発電機は西芝電機(株)製で出力43KVAのものである。

なお燃料消費量 50 liter/h 以下のディーゼルエンジンは大気汚染防止法に基づく排ガス規制の対象外である。

表1 ディーゼ発電機の仕様

ディーゼルエンジン		交流発電機	
形式	4TN82TL-RGH	形式	NTAKL-SEK
排気量	1.816L	出力	43KVA (80%)
出力	41.2KW (56PS)	周波数	60Hz
内径 × 行程	82 × 86	極数	2
メーカー	ヤンマーディーゼル(株)	メーカー	西芝電機(株)
方式	4サイクル水冷	電圧	220V
シリンダー数	4	回転数	3600min ⁻¹
燃料消費量	11L/H MAX	相数	3

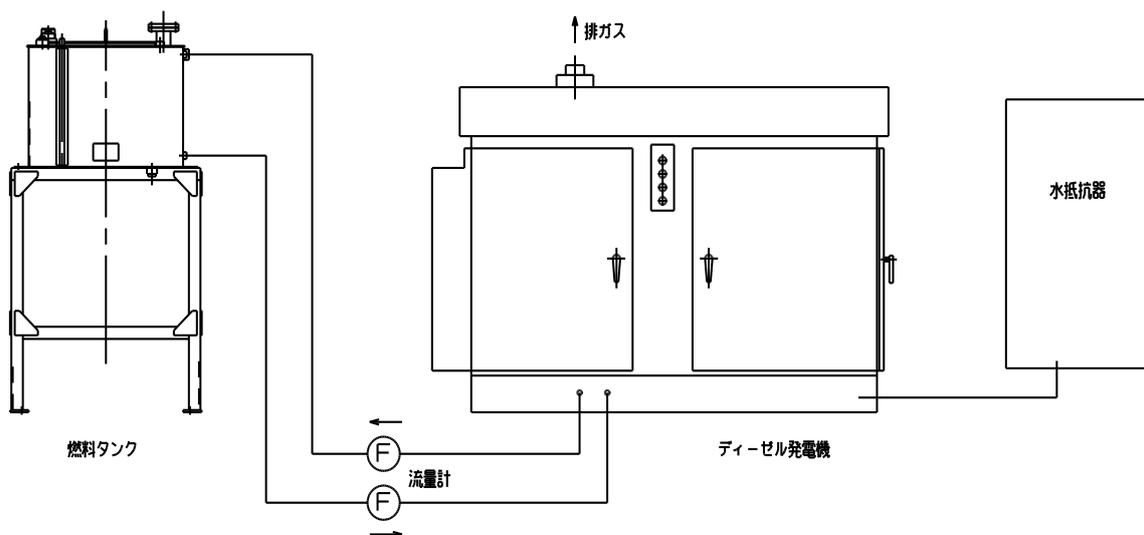


図1 試験装置のフロー図

2) 液体抵抗器：0～400kW（水抵抗）

3) 流量測定：台秤 IUCHI製

秤量 0～20kg（0級）

（燃料使用量（重量）を秤により実測）

4) 使用計器

三相電力計：横河電機製 形式 2042（0.5級）

目盛 0～120W

交流電圧計：横河電機製 形式 2017（0.5級）

目盛 300/150/75/30V

交流電流計：横河電機製 形式 2013（0.5級）

目盛 25/5A（0.5級）

周波数計：横河電機製 形式 2038（0.2級）

目盛 45～65Hz

3.2 発電試験の内容

1) 始動試験

分解油と軽油の混合燃料を用いてエンジンの無負荷運転を行い、正常に運転できることを確認する。実施した分解油と軽油の混合比を表2に示す。

表2 燃料油の混合比

分解油 [%]	軽油 [%]
100	0
75	25
50	50
25	75

2) 発電機出力特性試験

正常に運転できることが確認された分解油混合燃料を用いて試験装置を運転

し、発電機出力特性を調べる。その際、発電機出力を定格の 50、75、100%に変化させ、そのときの電流、電圧、交流周波数のデータを得る。

3) 燃料消費量測定

分解油と軽油の混合燃料油を用いて定格負荷の 50、75、100%運転時の燃料消費量の測定を行う。また軽油使用時のデータと比較する。

4) 排ガス分析

分解油 50 : 軽油 50 の燃料について定格運転時のディーゼルエンジン排ガスに含まれる以下の成分について分析を行う。

CO、NO_x、炭化水素、HC 1

5) ディーゼルエンジンの分解点検

一連の試験終了後、ディーゼルエンジンをオーバーホールし、各部の汚れ具合と磨耗、腐食の有無を調査する。

4. 燃料油の性状調査

ディーゼル発電機の燃料油として廃プラスチックの分解油 2 種ならびに市販の軽油を試験に供した。

- ① 分解油 A : 我孫子市の分別プラスチックを本プロジェクトの小型油化装置により熱分解して得られた分解油
- ② 分解油 B : モデルプラスチック (3P+HIPS·Br) を本プロジェクトの小型油化装置により熱分解して得られた分解油
- ③ 軽油 : 市販軽油 (出光石油製)

表 2 に分解油 A、B ならびに軽油の分析結果をまとめてを示す。また表 3 および図 2 に蒸留試験の結果を、図 3 に NP グラムの測定結果を示す。以下これらの分析結果に基づいて軽油と分解油 A、B の違いについて述べる。

- 1) 比重は、分解油 A、B とともに軽油より大きい。比重が大きくなるとセタン価は小さくなる傾向にあるが、これは分解油中にポリスチレン由来の芳香

族成分が軽油より多く含まれることに相応する。分解油のセタン価は低いことが予測される。

- 2) 燃料油の粘度は、ディーゼルエンジンにとって重要な物性である。高過ぎると噴霧時の微粒化が不十分となり、着火遅れの原因となる。一方、低過ぎると噴射ポンプとか噴射ノズルの潤滑性が損なわれ、焼き付きとか磨耗の原因になる。分解油 A、B の粘度は許容範囲と思われる。
- 3) 発熱量は、軽油 > 分解油 B > 分解油 A の順に大きい。これは燃料消費量に関連してくる。
- 4) 残留炭素はノズルの詰まりとかシリンダー内にカーボンが付着する原因となる。分解油は残留炭素が多くトラブルが生じる可能性がある。
- 5) 水分、流動点は適当である。
- 6) 分解油 A の塩素分、窒素分が多いが、有害物質の発生に結びつくかどうかは今後の検討課題と思われる。
- 7) セタン指数は比重と蒸留性状から計算されるが、軽油のセタン指数が 58.0 であるのに対し、分解油 A、B のセタン指数はそれぞれ 28.7、30.9 と約 1/2 である。本試験で使用する規模のディーゼルエンジンが必要とするセタン指数は通常 50~60 とされるので、分解油 100%での正常な運転は困難が予測される。
- 8) 図 2 の NP グラムからも軽油と分解油では沸点分布に大きな違いが見られ、分解油単味でのディーゼルエンジンの運転は難しいことが想像できる。

以上の考察から、分解油をディーゼルエンジンの燃料として使用する際には軽油と混合して用いるのが適当と判断される。また排ガス中の有害成分を測定し、許容範囲以下であるかどうかを確認する必要がある。

表2 供試燃料油の分析結果

項目	分析方法	単位	分解油A	分解油B	軽油
比重 (15/4°C)	JIS K2249	—	0.875	0.853	0.830
動粘度	JIS K2283	cSt at 30°C	1.24	1.35	3.87
発熱量	JIS K2279	kJ/kg	41660	42400	46010
残留炭素	JIS K2270	%	0.58	0.1	0.01 未満
水分	JIS K2275	%	0.05 未満	0.05 未満	0.05 未満
流動点	JIS K2269	°C	-15.0	-2.5	-5.0
塩素分	燃焼後イオンクロマト	mg/kg	150.0	20 未満	20 未満
窒素分	化学発光法	%	0.174	20未満	0.002 未満
セタン指数	JIS法	—	28.7	30.9	58.0
蒸留試験	JIS K2254		表3、図2参照	表3、図2参照	表3、図2参照
NPグラム	ガスクロマトグラフ		図3参照	図3参照	図3参照

表3 燃料油の蒸留試験結果

	単位	分解油A	分解油B	軽油
初留点	℃	95.0	90.5	169.5
5%留出温度	℃	117.0	110.5	191.0
10%留出温度	℃	123.0	121.5	208.0
20%留出温度	℃	132.5	132.5	235.5
30%留出温度	℃	138.0	139.5	260.5
40%留出温度	℃	147.0	153.0	276.5
50%留出温度	℃	161	172	289.5
60%留出温度	℃	181.5	203.0	300.0
70%留出温度	℃	222.0	247.0	311.5
80%留出温度	℃	276.5	293.0	327.0
90%留出温度	℃	342.0	354.0	346.5
95%留出温度	℃	378.0	384.0	361.5
終点	℃	378.0	387.0	370.0
全留出量	容量%	97.0	97.0	99.0
残油量	容量%	3.0	3.0	1.0
減失量	容量%	0.0	0.0	.0.0

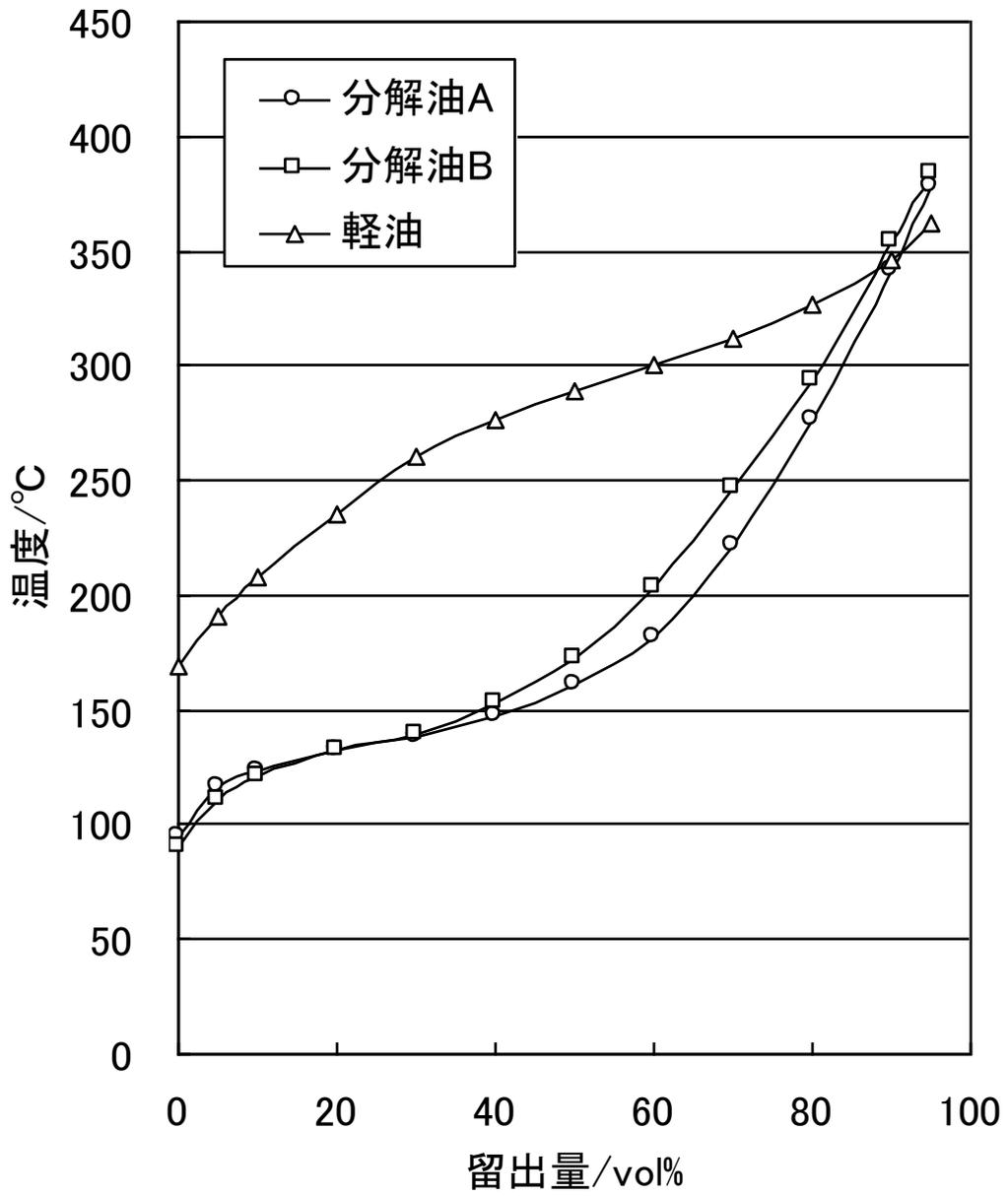


図2 燃料油の蒸留曲線

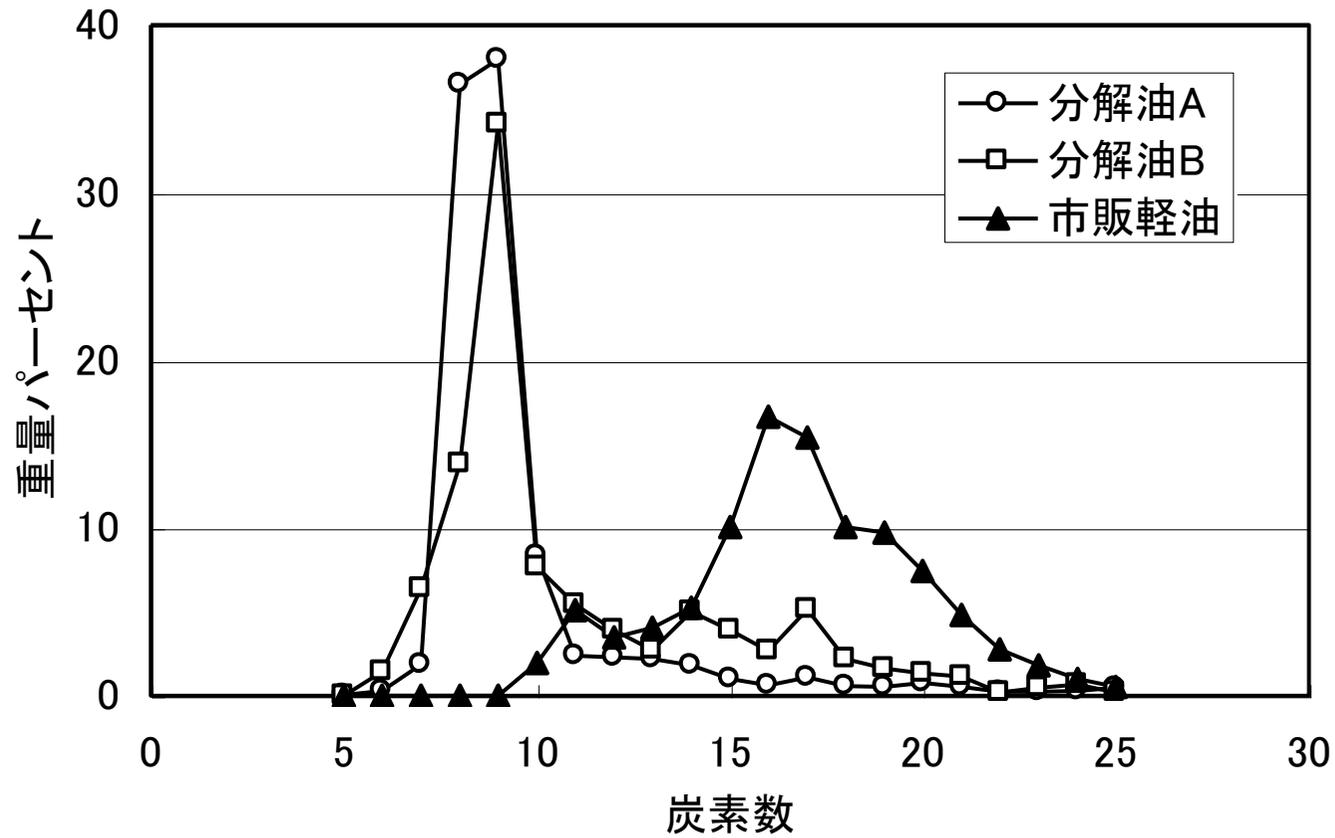


図3 供試燃料油のNPグラム

5. 試験結果

5. 1 始動試験

1) 分解油Aの場合 (分解油：軽油)

25 : 75の場合 ; 始動時黒煙が出るがすぐに収まり、白煙となる。

エンジンを暖まってくると、白煙はかなり減る。

50 : 50の場合 ; 始動時黒煙が出るがすぐに収まり、青白い煙がでた。

エンジンを暖まってくると白煙となり、量もかなり減った。またにおいも少しあった。

75 : 25の場合 ; 始動時黒煙が出るがすぐに収まり、青白い煙がでた。

エンジンを暖まってくると白煙となり、量もかなり減った。またにおいも少しあり、目もチカチカする感じであった。

100 : 0の場合 ; エンジンが激しく振動し、大量の黒煙を発生してバックファイアーを起こしたので、緊急にエンジンを停止させた。

2) 分解油Bの場合 (分解油：軽油)

25 : 75の場合 ; 始動時黒煙が出るがすぐに収まり、白煙となる。

エンジンを暖まってくると、わずかに白煙がでる。

50 : 50の場合 ; 始動時黒煙が出るがすぐに収まり、やや青白い煙がでた。

エンジンを暖まってくると白煙となり、わずかとなる。また、においもわずかにあった。

75 : 25の場合 ; 始動時黒煙が出るがすぐに収まり、やや青白い煙がでた。

エンジンを暖まってくると白煙となり、わずかとなる。またにおいもわずかにあるが、目はチカチカしない。

100 : 0の場合 ; エンジンが激しく振動し、大量の黒煙を発生していわゆるバックファイアーを起こしたので、緊急にエンジンを停止させた。なおバックファイアーは、分解油Aより烈しかった。

分解油 100%を除けば、時間経過とともにディーゼルエンジン特有の排ガスのにおい、色は薄れ正常に近づいた。表 4 に始動試験の判断結果をまとめて示す。分解油 75%での成功例は従来報告されていない。

表 4 始動試験の結果

分解油 [%]	軽油 [%]	分解油A	分解油B
100	0	X	X
75	25	○	○
50	50	○	○
25	75	○	○

5. 2 発電機出力特性試験

出力特性試験（負荷試験）の主要な結果を表 5 に示す。なお負荷試験の詳細は資料 1 として巻末に添付する。

表 5 に示すように、始動試験で運転が可能であった組成の燃料油についてはいずれも負荷率 100%（発電出力が 34.4kw）の運転が可能であった。しかし、当初予想していなかった燃料フィルターの目詰まりによる出力低下が生じ、運転を中断せざるを得ないケースがあった。以下は負荷試験中に生じた目詰まり現象を記述したものである。

1) 軽油 100%（9月25日）

負荷率 50%、75%、100%共に正常に負荷が掛かり、今回のエンジンのベースとなるデータが得られた。

負荷率 100%で、34.4 kWの負荷、その時の周波数 59.2 Hz がひとつの基準となる。

2) 分解油 A 25%、軽油 75%（9月26日）

負荷率50%、75%は正常に掛かったが、100%の負荷を掛けようとしたところ、周波数がすぐに下がってしまい、90.7% (31.2 kW) までしか負荷が掛けられなかった。そこでエンジンを一度停止させ、燃料フィルターを点検したところ、燃料カスが大量に付着していたので、軽油で洗浄後、再度100%の負荷を掛けたところ、今度は正常に負荷が掛かった。

3) 分解油A 50%、軽油50% (9月27日)

燃料フィルターを新品に交換し、運転を開始した。負荷率50%、75%は正常に掛かったが、100%の負荷を掛けようとしたところ、また周波数がすぐに下がってしまい、エンジンが止まりそうになった。結果的には94.2% (32.4 kW) しか掛けられなかった。

4) 分解油B 25%、軽油75% (9月27日)

燃料フィルターを洗浄後、運転を開始した。負荷率50%、75%は正常に掛かったが、100%の負荷を掛けようとしたところ、やはり周波数がすぐに下がってしまい、エンジンが止まりそうになった。結果的には94.2% (32.4 kW) しか掛けられなかった。

5) 分解油B 50%、軽油50% (9月28日)

燃料フィルターを洗浄し、今度はエンジンの油水分離器も分解したところ、燃料カスがここにも大量に付着していた。そこで、今回は油水分離器も軽油で洗浄し、運転を開始したところ、負荷率50%、75%、100% (34.4 kW) 共に正常に負荷が掛かり、周波数も下がることはなかった。

6) 分解油A 75%、軽油25%および分解油B 75%、軽油25%

(9月28日)

上記は、今回の試験では当初始動確認だけであったが、燃料フィルター洗浄と油水分離器の洗浄を実施したので、念のため100%負荷を掛けてみたところ、10～15分程度だが、どちらも100% (34.4 kW) 負荷は掛けられた。

表5 定格運転時における発電性能試験結果

燃料油組成	発電出力	電流	電圧	周波数	燃料消費量	排ガス中の濃度		
						O2(%)	CO(ppm)	NOX(ppm)
%	kW	A	V	Hz	kg/h			
軽油100	34.4	90	220	59.3	9.36	11.2	314	713
軽油75:分解油A25	34.4	90	220	59.2	9.55			
軽油50:分解油A50	34.4	90	220	59.2	9.70	11.2	280	810
軽油25:分解油A75	34.4	90	220	59.3	9.94			
軽油75:分解油B25	34.4	90	220	59.2	9.45			
軽油50:分解油B50	34.4	90	220	59.2	9.60	11.2	294	778
軽油25:分解油B75	34.4	90	220	59.3	9.75			

5. 3 燃料消費量測定

燃料消費量の測定は燃料タンクを台秤の上に乗せ、その重量減少量から算出した。負荷率 100% の場合の平均燃料消費量を表 5 に示した。分解油 A > 分解油 B > 軽油の順に消費量が多くなっているが、当然のことながら発熱量の大きい燃料ほど消費量は少ない。

図 4 に軽油に対する分解油の混合割合を変化させた場合の燃料消費量を示す。また図 5 に負荷率を変化させた場合の燃料消費量の変化をプロットする。いずれも分解油 A の消費量が分解油 B より多い結果となった。

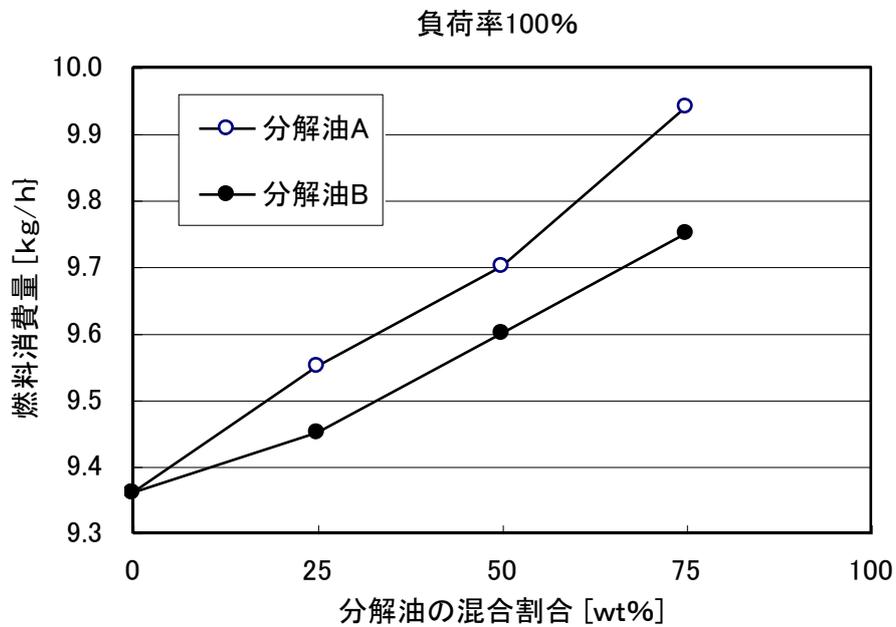


図 4 分解油の混合割合 vs. 燃料消費量

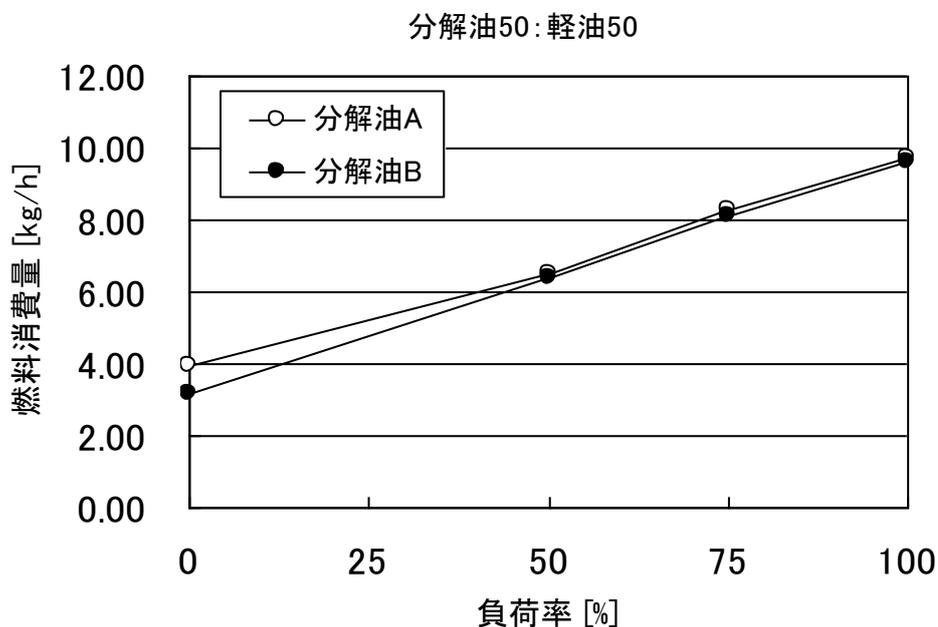


図 5 負荷率 vs. 燃料消費量

5. 4 排ガス分析

排ガス分析の結果をまとめて表 6 に示す。なお排ガス分析の結果の詳細は巻末に資料 2 として添付した。

表 6 排ガスの分析結果

燃料油組成	排ガス中の濃度(負荷率 100%)				
	O2(%)	CO(ppm)	NOX(ppm)	HCl(mg/m ³)	炭化水素(ppm)
軽油100	11.2	314	713	2	31
軽油50:分解油A50	11.2	280	810	2 以下	41
軽油50:分解油B50	11.2	294	778	2	45

5. 5 ディーゼルエンジンの分解点検（資料3参照）

全試験時間約 20 時間と比較的短時間の運転ではあったが、試験後ディーゼルエンジンの開放内部調査を実施した。その後、掃除・復旧試運転も施行。

1) シリンダヘッド取り外し調査

燃焼面カーボン付着状況調査・確認及び燃焼生成物サンプル(茶褐色の堆積物)採取。カーボン付着状況は全気筒同様であった。写真 1,2 参照。

2) FO 弁取り外し調査及び噴射テスト

ノズルチップ先端のカーボン付着はほとんど見られなかった。

FO 弁噴射テストを行ったところ、設定圧力 200 kg/cm²前後の数値を全気筒同様に示し、圧力低下が見られず噴射状況も良好であった。

3) 過給器タービン羽根側取外し調査

カーボン付着はあまりなかった。カーボンの色は、普通。

4) ピストン抜出し調査

ピストン頭部に茶褐色の燃焼生成物が全気筒付着していた。またリング溝にもカーボンが付着していたが色ならびに付着状況は普通であった。

5) 掃除・復旧試運転の内容と状況

FO フィルター、防錆剤、LO 新替。エンジン復旧後、LO・FO・清水通し、漏れ確認後、試運転した。エンジンは良好に動作した。

一般的な所見として、試験運転時間が短期間であるため、カーボンによる各部品への影響(材質の磨耗、腐食等)は、調査判断が出来ないと思われる。分解油の燃焼状態の把握および良好な燃焼を得るために必要な事項を以下に列挙する。

- 各部の温度及び圧力等の計測と適正化
- FO 弁の噴射圧力及び FO 弁ノズルチップの選定(噴孔径、噴孔数、噴射角度)
- ピストン頭部の形状(スワールの発生の仕方、燃焼に影響)
- FO ポンプ突き始め角度の最適化
- 長期間にわたる運転試験

エンジン開放時の写真を巻末に資料3として添付する。

6. 廃プラスチック分解油の評価と今後の課題

6. 1 分解油の評価

ディーゼルエンジンの燃料として重要な性質は粘度と着火性（セタン価）である。このうち粘度は燃料噴射弁から燃料が噴射された際の微粒化に関わり、着火性は霧化されてから自然着火が起きるまでの時間、すなわち着火遅れに関わる。本試験で使用したディーゼルエンジンは小型で高速回転のディーゼルエンジンの範疇に入るが、この小型高速ディーゼルエンジンの場合、燃料の着火遅れが大きいとエンジンの回転数が上がりず効率が悪くなる。極端な場合にはディーゼルノックと呼ばれるミスファイアした燃料・空気混合気が排気管で着火し爆発現象を呈することがある。一般にいわれているディーゼルエンジンと燃料の関係を表 7 に示す。

表 7 ディーゼルエンジンの分類と必要なセタン価

分類	エンジン回転数	用途	燃料	必要なセタン価
高速ディーゼル	1000rpm以上	自動車、小型発電機	軽油	50～60
中速ディーゼル	400～1000rpm	船舶、鉄道機関車	A重油	35～55
低速ディーゼル	400以下	大型船舶、大型発電機	B、C重油	15～45

本試験で使用したディーゼルエンジンの回転数は 3600rpm であるので表 7 の分類では高速ディーゼルに属し、必要なセタン価は 50～60 である。また分解油 A、B のセタン指数（ここではセタン価とセタン指数を同等に扱う）はそれぞれ 28.7 と 30.9 であるので低速ディーゼル用、B、C 重油並の評価となる。

一方、本試験の実績では分解油 75：軽油 25 の混合燃料までディーゼルエンジンの運転は可能であった。ここで、ちなみにセタン価に加成性が成り立つと仮定して、各混合油のセタン指数を試算してみる。試算結果を表 8 に示す。本試験で使用したディーゼルエンジンは高速ディーゼルに属するので、表 8 によれば分解油 25：軽油 75 の混合油までが使用可能と判定される。

表 8 加成性を仮定して求めた混合油のセタン指数

軽油 [%]	分解油 [%]	セタン指数	
		分解油A	分解油B
100	0	58.0	58.0
75	25	50.7	51.2
50	50	43.4	44.5
25	75	36.0	37.7
0	100	28.7	30.9

しかしながら本試験の実績では分解油 75：軽油 25 のケースも運転可能であった。このことはディーゼルエンジン側に着火遅れの許容範囲があるのと、混合油の着火遅れは着火遅れの小さい成分があると全体の着火性がよくなる、すなわち見かけ上セタン価が大きくなるためと考えられる。しかしその場合でもディーゼルエンジン内の燃焼はだらだらとした燃焼となりエンジンの出力低下は免れない。

一般にエンジン側が要求する仕様に満たない燃料油や不純物を含んだ低質燃料油を用いると、以下のような障害が起こるとされる。

- 1) ピストンリング、シリンダーライナーの磨耗増加
- 2) 低負荷運転時の燃焼不良、シリンダー内での異常圧力上昇
- 3) 燃料フィルターの目詰まり
- 4) 過給機の性能低下
- 5) 排ガス中の有害成分の濃度が増加

今回の試験では、分解油 75：軽油 25 の燃料油でもディーゼルエンジンを運転することが可能であるという従来にない実績を得る一方、問題点もある程度明確になってきた。

以下にそれら問題点と廃プラスチックの分解油をディーゼル発電用燃料として用いる際の評価を列挙する。

- 1) 分解油 A に懸濁している PET 由来と思われる微粒子がディーゼルエンジンの燃料フィルターに目詰まりを生じさせ、燃料不足による出力低下をきたした。このことは今回の発電試験を遂行する上でのもっとも大きなトラブルであった。分解油中の微粒子は十分除去される必要がある。
- 2) プラスチックの分解油は軽油より燃料消費量が多い。図 4 を参照すると、分解油 A 50 : 軽油 50 の混合油で 3.6%、分解油 B50 : 軽油 50 の混合油で 2.6% 軽油より燃料消費量が多くなっている。このことは分解油の発熱量が軽油より小さいこととも対応しており、分解油を使う以上避けられないことと判断される。
- 3) 燃焼排ガス中の有害成分濃度は軽油のそれと同程度である。分解油 A には 150ppm 程度の塩素が含まれるが、排ガス中の塩化水素濃度は 2ppm 以下と少なく軽油と比較しても同程度と判断される。また排ガス中のダイオキシン濃度は十分低いと考えられる。

6. 2 今後の課題

廃プラスチックの分解油をディーゼル発電用燃料として本格的に用いるためには今後さらに以下の課題を解決することが必要である。

- 1) 分解油に懸濁している PET 由来と思われる微粒子の除去方法の確立
- 2) 長時間運転にともなうピストンリング、シリンダーライナーの磨耗および各部の腐食の定量評価

以上

謝辞：本発電試験を遂行する上で多大なるご協力をしていただいた西芝エンジニアリング(株)の皆様にご心より御礼申し上げます。

引用文献

- 1) 村田勝英、化学工学、**61**、26 (1997)
- 2) 梶光雄、日本エネルギー学会誌、**75**、778 (1996)
- 3) 梶光雄、プラスチックスエージ、**47**、54 (2001)

添付資料

資料1：負荷試験データ

資料2：排ガス分析データ

資料3：ディーゼルエンジンの開放点検写真