

博士論文

廃植物油混合燃料を用いるエネルギー変換システム
の環境負荷に関する研究

(Environmental assessment for biomass-
composite-fuels with waste vegetable oil
concerning energy conversion systems)

平成 31 年 3 月

三重大学大学院生物資源学研究科

CHO MANSU

目次

第1章 緒言.....	1
第2章 小型ディーゼルエンジンの廃植物油混合燃料によるエンジン駆動および環境特性に関する基礎研究.....	3
2.1 要約.....	3
2.2 概要.....	4
2.3 実験装置及び方法.....	7
2.4 結果及び考察.....	10
2.5 第2章のまとめ.....	15
第3章 廃植物油混焼小型ディーゼルエンジンの排気ガスに関する健康リスク評価とライフサイクルアセスメント.....	15
3.1 要約.....	16
3.2 概要.....	17
3.3 実験装置及び方法.....	18
3.4 健康リスク評価およびその結果.....	22
3.4.1 分析の方法.....	24
3.4.2 健康リスク評価手法詳細.....	25
3.4.2.1 有害性確認(Hazard Identification).....	26
3.4.2.2 用量-反応評価(Dose-Response Assessment).....	28
3.4.2.3 暴露評価(exposure assessment).....	29
3.4.2.4 リスク判定(risk characterization).....	30
3.4.3 健康リスク評価実験.....	31
3.4.4 健康リスク評価結果.....	38
3.5 ライフサイクルアセスメントおよびその結果.....	40

3.5.1	ライフサイクルアセスメントの範囲	40
3.5.2	各工程のインベントリ分析	41
3.5.2.1	混合燃料製造のための工場建物建設	41
3.5.2.2	精製設備の製造	43
3.5.3	インベントリ分析結果	44
3.5.3.1	影響評価	44
3.6	廃植物油混焼小型ディーゼルエンジンの LCA 統合化による費用便益分析	49
3.7	廃植物油混焼小型ディーゼルエンジンの Risk Assessment 健康費用便益分析 (VOCs について)	50
3.8	3章のまとめ	55
3.8.1	健康リスク評価による発癌率	55
3.8.2	燃料使用におけるライフサイクルアセスメント	55
3.8.3	廃植物油混焼小型ディーゼルエンジンの LCA 費用便益分析	55
3.8.4	廃植物油混焼小型ディーゼルエンジンの健康費用便益分析	56
第4章	固形廃植物油を混合したボイラー用代替燃料の環境負荷	57
4.1	要約	57
4.2	概要	58
4.3	実験装置及び方法	59
4.3.1	実験装置概要	59
4.3.2	排気ガス計測装置	62
4.3.3	実験データの分析法と燃焼稼働状態計測結果	62
4.3.3.1	ボイラー燃焼稼働状態計測結果	64
4.3.3.2	ボイラー効率計算結果	67
4.3.4	ライフサイクルアセスメント	67
4.3.4.1	代替燃料製造のための工場建物建設	70
4.3.4.2	精製設備の製造	71
4.3.4.3	代替燃料製造工程	72
4.3.4.4	燃焼工程	73
4.3.5	インベントリ分析結果	73
4.5	各評価の結果に関する考察	75
4.5.2	健康リスク評価の結果の考察	77

4.6 第4章のまとめ.....	82
4.6.1 ボイラー燃焼稼働実験.....	82
4.6.2 ライフサイクルアセスメント.....	82
4.6.3 健康リスク評価.....	82
第5章 結言.....	83
(1) この研究について.....	83
(2) 廃植物油混焼小型ディーゼルエンジンの排気ガスに関する 健康リスク評価とライフサイ クルアセスメント.....	83
(3) 固形廃植物油を混合したボイラー用代替燃料の環境負荷.....	84
参考文献.....	86
謝辞.....	94

第1章 緒言

本研究は、軽油に廃植物油を混合した燃料を用いる小型ディーゼルエンジンの駆動と、A重油に固形廃植物油を混合した代替燃料を用いるボイラーの運用において、排気ガスの健康リスクと温室効果ガスの排出量を環境負荷として計算し、それぞれ健康リスク評価 (Risk Assessment : RA) とライフサイクルアセスメント (Life Cycle Assessment : LCA) を実施し、それらの評価結果から現在の産業を維持するうえで必要とされるエネルギー変換システムの環境負荷の最小化について指針を得ようとするものである。

ここで小型ディーゼルエンジンに供試する廃植物油混合燃料は、少量の添加剤のもとに廃植物油を軽油と混合するもので、複雑な精製過程をもちエステル化を必要とするバイオディーゼルとは異なり、生成過程が単純であるため、ディーゼルエンジンやボイラーを利用するサイトにおいて燃料を混合することを可能とする特徴を持つ。

その機能、効果と環境負荷を確認するため、本研究ではまず、(1)小型ディーゼルエンジンに対して、既存の軽油に少量の添加剤のもとに廃植物油を15%混合させた混合燃料を用い、長時間のエンジン駆動実験を行い、その駆動特性と排気ガスの成分を調べ、このような成立過程をもつ燃料が実用的に燃料として使用できるかを検証する。

(2)さらに、廃植物油の混合割合を変化させたディーゼル燃料を構成し、廃植物油の混合割合別に、排気ガスのVOCs成分の濃度を分析し、これに対し健康リスクアセスメントを実施し、発癌率を計算して従来のディーゼル燃料と比較評価することにより、廃植物油混合燃料の健康影響に関する情報を提供する。

また、実際にディーゼルエンジンの排気ガスで排出される温室効果ガスの量を計算し、温室効果ガス排出量に関するライフサイクルアセスメントを実施し、GWP(Global-Warming Potential)を用いて廃

植物油混合バイオディーゼル燃料と既存ディーゼルエンジン燃料の結果を比較評価する。

次に、

(3)A 重油に固形廃植物油を 20%混合した燃料を用いたボイラーの運用実験を行い、上記と同様なライフサイクルアセスメントと健康リスク評価を行い、温室効果ガス環境負荷を計算する。また、ボイラー効率を計算することにより廃植物油の混合による性能面への影響を調べ、さらにボイラーに使用する燃料の廃植物油の割合を高めることができるかどうか、その可能性について検討する。

これら健康リスク評価および地球温暖化を範囲とするライフサイクルアセスメントの結果に、さらに費用便益分析の手法を適用し、社会コストの算定についても試みる。

本研究を通じ、軽油と A 重油に廃植物油という廃棄物をリユース添加して製造するバイオ燃料が、ディーゼルエンジンやボイラーといった現在主流の熱機関に対し実用的に利用可能かどうか確認し、その効果および環境負荷を実証的に評価する。

なお、本研究で使用した廃植物油は、食品工場にててんぷら油として利用したのち廃棄されるなたね油であり、固形廃植物油は同じ廃植物油が貯留段階にて固形化したもので、基本的に同じなたね油の廃棄物である。

第2章 小型ディーゼルエンジンの廃植物油混合燃料によるエンジン駆動および環境特性に関する基礎研究

2.1 要約

本研究は、軽油と廃植物油を混合する廃植物油混合燃料を用い、エンジンの出力トルクを計測し、さらに排気ガスの成分を分析することにより、その駆動特性および環境特性を検証しようとするものである。供試した廃植物油混合燃料は、少量の添加剤のもとに廃植物油を軽油と混合したもので、複雑な精製過程を必用としない混合燃料である。廃植物油の軽油との混合割合を15% (WC015) とし、これを用いて4時間の連続駆動実験を行い、その結果を従来の軽油 (WC00) のデータと比較した。エンジン駆動特性に関しては、エンジン回転速度、出力トルク、および燃料消費率を計測した。また、排気ガスに関しては、温度、 O_2 、 CO_2 、NO および NO_2 について統計分析を行った。

その結果、エンジン回転速度 3600 [rpm] における WC00 のエンジン出力を 100% とすると、同じ回転速度において、WC015 は 65.6% のトルクが計測された。いずれの燃料でも、トルクに対し、排気ガスの O_2 濃度と温度はそれぞれ負の相関を示し、 CO_2 と NO 濃度は正の相関を示した。

Keywords : Diesel Engine, Waste Cooking Oil, Torque, Brake Power, Exhaust Gas

2.2 概要

人類は過去一世紀以上、エネルギー効率が良く、エネルギー消費量の少ない製品を開発し続けてきた。しかし現在、地球規模の気候変動問題が顕在化し、さらにエネルギー効率が高く、環境負荷の小さな動力源を確保する必要性に迫られている。

従来の研究においても、植物油あるいは廃植物油を利用した燃料を新しいエネルギーとして位置づけ、さまざまな取り組みがなされてきた。しかし新しい植物油を専用に用いる代替燃料の多くは、凝固点が高いことや、狭小生産国においては費用対効果が低いことが問題点として指摘されている[1, 2]。また、食品と同じ圃場や栽培法を用いる農業生産物から油を採取する植物油は、人や動物が食べる食糧や飼料と競合して様々な経済的な問題を引き起こしている。特に食糧が乏しい途上国が存在する現状において、農産物を資源化することに対し、人道問題として問題点を指摘する研究もある[3]。さらに、植物油の資源化の研究が進むことによって、生産される作物の価格が高騰し、費用対効果が小さくなるので、研究段階から商用化段階までにますます多くの時間がかかってしまうものと予想されている[4]。

そこで最近、一度食品加工などに使用されて使命を終えた廃植物油を利用する研究が活発に行われており、せっけんの製造や燃料の製造などが模索されている。廃植物油は熱量が高く、エネルギー含有量が高いので、効果的に用いれば化石燃料の代替エネルギーとして利用することができ、これによりさらに廃植物油の廃棄処理の負担も軽減させることができることが報告されている[5]。特に、従来の方法による廃植物油の廃棄処理は、水質に深刻な影響を与えると報告されている[6]。植物油は 2009 年現在、世界で 144162 kt が生産されており、人口平 1 人当たり 1 年に平均 11.5 kg 消費されており、熱量に換算すると 1 日に 1159 J (277Kcal) が消費されている[7]。例えば韓国の場合 1000 kt あまりの植物油が消費され、約 200 kt の廃植物油が発生していると推算できるが、回収されてリサイクルされるのはそのうち 80~100 kt と 40%に過ぎない。残りの廃植物油は一般的な廃棄物として処理される。廃植物油 20 ml が、適切な処理を行わずに下水溝を通じて廃棄された場合、BOD を 5ppm に希釈するために必要な水の量は、20 万倍の 4000 L 必要とされる。特

に、植物油の使用量が多いアジア諸国では、植物油の処理方法に対する考察が急務である。また、廃植物油の熱量は 1L 当たり 33.3-35.7 MJ なので、その有効利用も重要な課題となっている[8]。

以下に、廃植物油の利用に関する先行研究の例を示す。

Dorado, et al. [9]らは、EN 14105 を満たす、廃棄オリーブ油を用いてエンジンの駆動実験を行った。廃棄オリーブ油による排気ガスは、普通のディーゼル燃料を用いた場合に比べ、CO は 58.9%、CO₂ は 7.4%、NO は 37.5%、SO₂ は 57.7%減少した。また NO₂ は 81%、燃料消費率は 8.6%増加した。

Cardone, et al. [10] は、エンジン回転速度を等しくする条件において Brassica carinata を用いたバイオディーゼル燃料について調べた。その結果、バイオディーゼル燃料はディーゼル燃料に比べ、5%以内のトルクの差異が見られ、燃料消費率の増加は 10% 以内であり、NO_x の排出は若干増加した。

Utlu and Kocak [11]の研究によれば、回転速度一定の条件において、廃棄フライ油を使ったエンジン駆動実験を行った結果、ディーゼル燃料に比べ、エンジントルクと NO_x はほぼ同等、また CO は 17%程度低下し、燃料消費率および CO₂ はそれぞれ 14 %および 8 % 程度高かった。

Ghobadian, et al. [12]の研究によれば、軽油に廃植物油が 0~50%含まれたバイオディーゼルを用い、エンジン駆動実験を行い、そのデータを用いて人工ニューラルネットワークにより諸特性を評価する手法を開発した。その結果、エンジン出力およびトルクに関し、廃棄植物油と軽油の差は有意でないことが示された。

Di, et al. [13]の研究によれば、軽油とバイオディーゼルの排気ガスに関し、CO および NO_x の濃度の差異は、20% 以内と報告された。

Cetinkaya, et al. [14]の研究によれば、軽油に比べ、廃植物油によるエンジンの燃焼では、トルク、エンジン出力および排気ガス温度において、いずれも 10% 程度以内の低下が報告された。

総合して見ると、廃植物油を利用した燃料は、既存の軽油を燃料とした場合と同じように用いることができるが、燃料の種類によってやはり駆動および環境性能は変化する。

本研究は、既存の軽油に少量の添加剤のもとに廃植物油を 15% 混合させた混合燃料を用い、長時間のエンジン駆動実験を行い、その駆動特性と排気ガスの成分を調べ、軽油を燃料とする場合との相違を検証することにその目的を置く。このタイプの混合燃料は、エス

テル化を必要とするバイオディーゼルとは異なり，生成過程が単純であるため，エンジンを利用するサイトで燃料を混合することを可能とする特徴を持っており，少量の添加剤を付加することにより廃植物油と軽油が分離することもなかった。

2.3 実験装置及び方法

エンジン駆動実験装置は、Fig. 1 に示すように、ディーゼルエンジン、動力計及び排気ガス計測機器からなる。供試エンジンは Yanmar Co. の L-A type series L40ASS, また動力計は Toyodenki Co. の A-S Motor MB302/5-BD である。それらの主要諸元を Table 1 および Table 2 に示す。供試した燃料は、WC00 および WC015 である。これら燃料の主要諸元を Table 3 に示す。

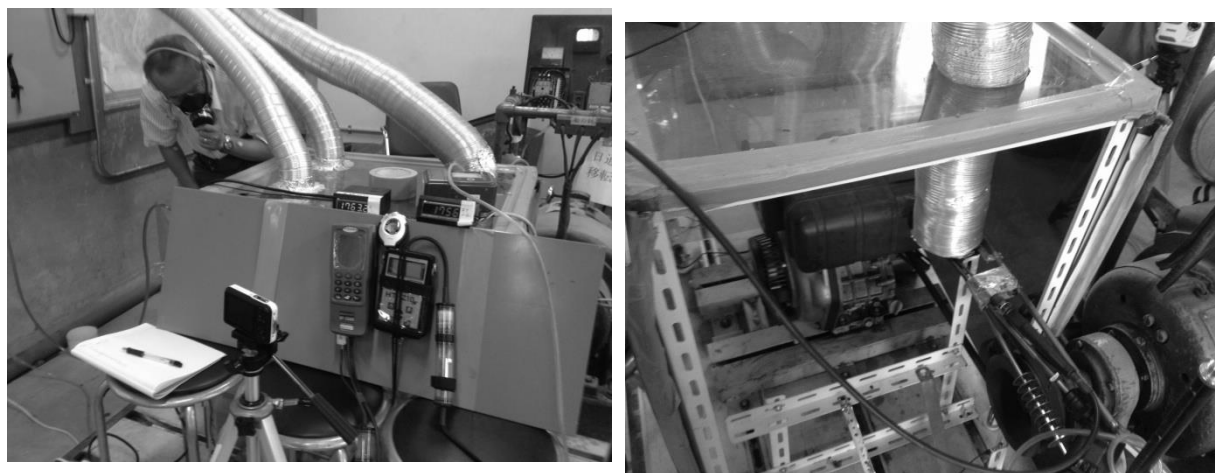


Fig. 1 Diesel engine, dynamometer and exhaust measurement system

Table 1 Specifications of the diesel engine

Properties		Units	Remarks
Name			Yanmar Co. air cooling type diesel engine L-A type series L40ASS
Engine Type			Vertical type air cooling 4 cycle diesel engine
Fuel system			Direct injection type
Number of cylinder			1
Internal diameter of cylinder		mm	68
Stroke of cylinder		mm	55
Total stroke volume of cylinder		l	0.199
Brake power	Maximum	kW	3.1
	Continuous rating	kW	2.8
Output Shaft	Rated speed	rpm	Cam shaft : 1,800 , Crankshaft : 3,600
	Fuel		
	Injection pressure	MPa	19.6
	Fuel oil of application		JIS 2 light oil
	Fuel tank capacity	l	2.5
Lubricating	Lubricating system		Lubrication trochoid pump
	Apply lubricant		SAW 10W 30, CC Level above

Table 2 Specifications of the dynamometer

Properties		Unit	Remarks
Name			Toyodenki Co. A-S motor Dynamometer
Type			Three-phase shunt wound motor (MB302/5-BD)
Output		kW	0.185-3.7
Rev. speed		rpm	150-3000
Current		A	15
Voltage		V	220
Frequency		Hz	60
Secondary current		A	27
Commutator direction brush			8×16×32-24
Rating	Consecutively	rpm	1000-3000
	1 hour		150-998

Table 3 Ingredients of fuels

	Ratio of Light oil (%)	Ratio of Waste cooking oil (%)	Ratio of Additives (%)	Density (g/cm ³)
Light oil : WCO0	100	0	0	0.86
Mixed fuel of waste cooking oil: WCO15	84	15	1	0.84

実験室内の温度と相対湿度は、それぞれ 28 度および 70 % であった。実験に先立ちエンジンを 30 分間暖機運転し、その後、エンジン駆動実験を 90 分間行い、その間に、エンジン駆動特性と排気ガスの成分を計測機器により計測した。データサンプリングの間隔は 1 分間に 1 回とした。供試エンジンは回転速度設定器を備えるので、その設定値を最大とし、クランクシャフトにおける回転速度が定格回転速度 3600 [rpm] をほぼ維持するように動力計の負荷を手動で調節し、そのときのエンジン回転速度を回転数表示器 TDP-3321A-E (Coco Research Co.) により、またエンジン発生トルクを上記動力計により計測した。排気ガスの温度、O₂、CO₂、NO、NO₂ および NO_x の計測には、HT-2300 (HODAKA Co.) を用いた。

各燃料の燃焼実験は 90 分間計測継続したが、エンジンの回転速度は若干変動した。しかし、下記に示すように、その変化は微小であったため、いずれの燃料においても、エンジン回転速度が 3600 [rpm] に対して正規分布しているとの仮定の下に、T 検定を実施して、計測

した動力特性，および排気ガス特性の算術平均値の差異の有意性について確認した。

そのほかの計測データについては，それらの概要と傾向を知り，さらなる統計分析のための仮説を設定するために，まず燃料の種類を通して全体の記述統計を求め，それを元に 2 変量相関関係を調べ，仮説の設定を行った。

なお，動力計により計測さトルク (Nm) を用い，軸出力 (Brake power kW) を計算する式には，

$$\text{Brake power(kW)} = \frac{\text{Torque} \times 2\pi \times \text{Revolutions(RPM)}}{1000 \times 60} \quad (1)$$

を用いた。

データ分析に関しては，IBM SPSS V22 を用い，各気体濃度，および温度を含む排気ガスデータに関する統計的分析を行った。気体濃度，および温度の相関を検証するために二変量相関分析法を採用した。

Table 4 Descriptive statistics for total sets of experiments

Variable List	M.	S.D.	MIN.	MAX.
Crank shaft rpm	3603.6	2.0	3597.6	3608.0
TEMP. (°C)	137.6	6.0	123.6	147.9
O₂ (%)	18.6	0.3	18.0	18.7
CO₂ (%)	1.8	0.2	1.7	2.1
NO (ppm)	38.3	5.5	28	51
NO₂ (ppm)	7.8	4.4	4	19
NO_x (ppm)	46.1	9.4	33	68
Torque (Nm)	3.56	0.71	2.59	5.17
Brake Power (kW)	1.35	0.27	0.98	1.95

Table 5 Bivariate correlation coefficients for the whole experimental variables

	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.
1. rpm	1								
2. Exhaust TEMP.		1							
3. O₂			1						
4. CO₂				1					
5. NO					1				
6. NO₂						1			
7. NO_x							1		
8. Torque								1	
9. Brake Power									1

** : p<0.05, * : p<0.1

2.4 結果及び考察

Table 4 に、2つの燃料を通した各計測値全体の平均値、標準偏差、および最小値、最大値を示す。各変数を比較評価するために、2つの燃料全体の計測値について二変量相関分析を利用して Pearson correlation coefficient の値を求めると Table 5 のようになる。

各燃料の排気ガス中の O_2 濃度については、 CO_2 、 NO_x 、トルク、および軸出力、およびトルクと負の相関関係があり、ディーゼルエンジンの動力と O_2 濃度に関連が深いことが確認できた。次に、排気ガス成分中の CO_2 濃度は、 NO_x 、軸出力、およびトルクと正の相関関係を示すことが確認された。これは O_2 を消費して CO_2 及び NO_x が発生し、エネルギー変換の結果軸出力、およびトルクが発生することにより説明することができる。また、排気ガス成分中の NO_x 濃度は、 NO 、 NO_2 などの物質の合計なので、 CO_2 濃度と正の相関を示すものと考えられる。

この結果では、統制変数として用いる エンジン回転速度 [rpm] は、他の変数との間で何の相関も見出せなかった。

これらの記述統計の結果により、さらなる統計解析のために、次の a. から c. 段階までの仮説を設定し、それぞれのパラメータの相関関係を分析し、回帰式を導出する。仮説の設定は以下のとおりである。

- a. WC00 と WC015 を燃料とするエンジンの駆動トルクに差異がある。
- b. WC00 と WC015 を燃料とするエンジンの排気ガス成分に差異がある。
- c. WC00 と WC015 を燃料とするエンジンでは、それぞれトルクに対する排気ガス成分の変化に相関関係がある。

まとめると、WC00 と WC015 を燃料とするエンジンの燃焼において、トルクおよび排気ガス各成分にどのような相違があるのかを調べるための仮説となる。

各燃料を燃焼させた実験のエンジンの回転数については、統制変数として、定格回転数 3600 [rpm] としたがデータ処理の結果、平均値と標準偏差は WC00 ($3,603.9 \pm 2.9$)、および WC015 ($3,603.6 \pm 1.6$) となった。ただし、T 検定により『それぞれの燃料グループ間の回転数データに差がある』とする帰無仮説は 5%水準の有意差の範囲に入

らなかったので($p=0.321$), 各データ群におけるエンジン回転数には差がなかったものとしてデータ処理を行った.

次に, 得られた計測値を燃料別にボックスプロット図で示すと Fig. 2 のようになる. 各燃料の排気ガスの温度($^{\circ}\text{C}$)の平均値と標準偏差は, それぞれ WC00(126.9 ± 1.9), および WC015(140.5 ± 1.6)と, WC00 に比べ, WC015 の排気ガス温度は 10.7%増加したことが分かった. この結果を T 検定した結果, 『燃料の種類により, 排気ガスの温度差がない』とする帰無仮説が棄却され, さらに事後検定の結果, それぞれが区別されることが分かった($p=0.000$).

同様に, 各燃料の排気ガス中の O_2 (%)濃度の平均値と標準偏差は, それぞれ WC00(18.0 ± 0.0), および WC015(18.7 ± 0.0)となり, WC00 に比べ WC015 は 3.9%増加することが分かった($p=0.000$).

各燃料の排気ガス中の CO_2 (%)濃度の平均値と標準偏差は, それぞれ WC00(2.1 ± 0.0), および WC015(1.7 ± 0.0)となり, WC00 に比べ WC015 は 19.1%減少することが分かった($p=0.000$).

各燃料の排気ガス中の NO (ppm)濃度の平均値と標準偏差は, それぞれ WC00(47.5 ± 1.9), および WC015(36.2 ± 3.5)となり, WC00 に比べ WC015 は 23.8%減少することが分かった($p=0.000$).

各燃料の排気ガス中の NO_2 (ppm)濃度の平均値と標準偏差は, それぞれ WC00(16.9 ± 1.0), および WC015(5.7 ± 0.6)となり, WC00 に比べ WC015 は 66.3%減少することが分かった($p=0.000$).

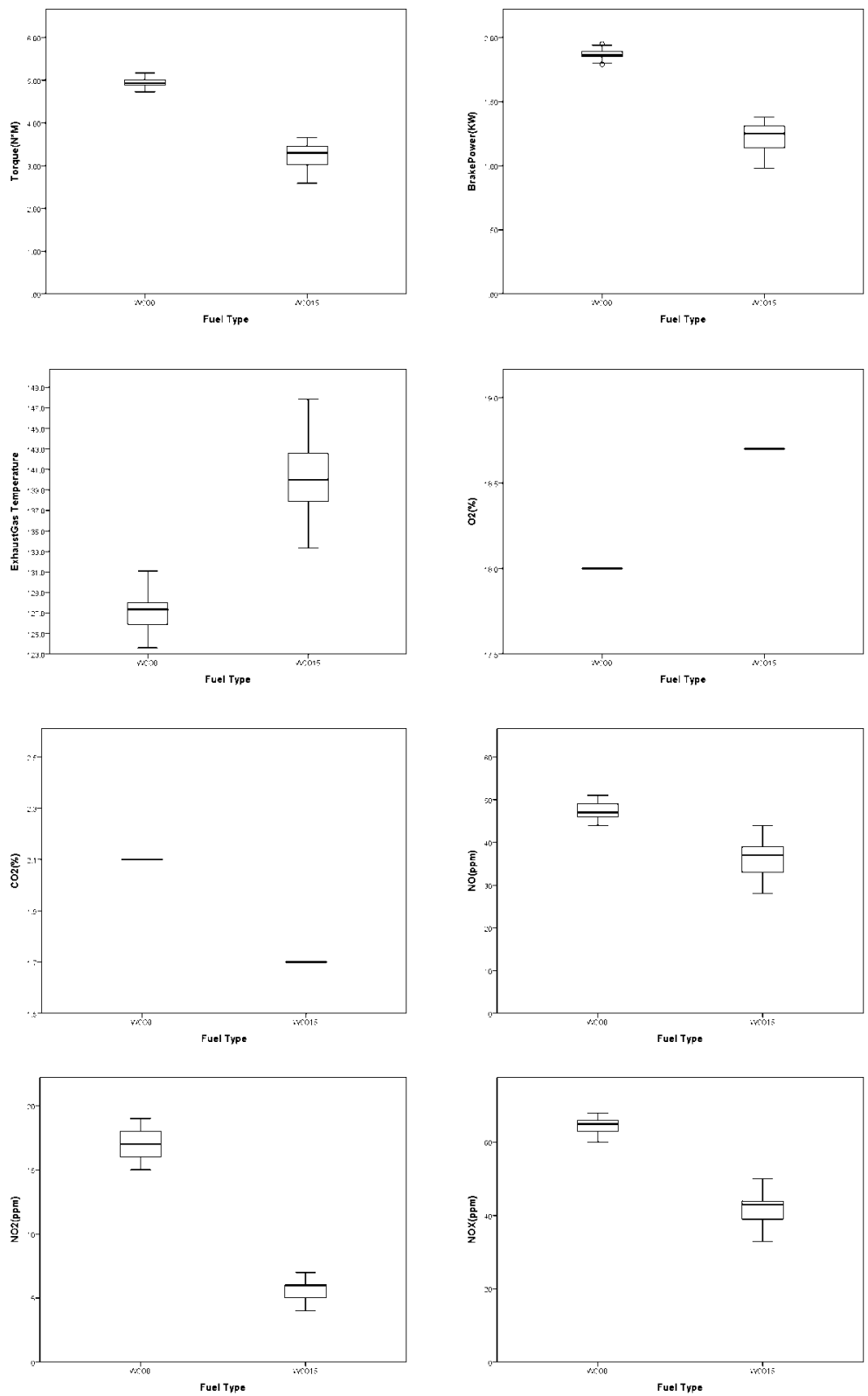


Fig. 2 Box plot diagrams of driving and exhaust characteristics

各燃料の排気ガス中の NO_x (ppm) 濃度の平均値と標準偏差は、それぞれ WCO0 (64.4±2.0), および WCO15 (41.9±3.6) となり、WCO0 に比べ WCO15 は 34.9%減少することが分かった (p=0.000).

各燃料による燃焼実験におけるエンジン トルク (Nm) の平均値と標準偏差は、WCO0 (48.5±0.9), および WCO15 (31.8±2.7) となり、WCO0 に比べ WCO15 は 65.6%減少することが分かった (p=0.000).

さらに各燃料による燃焼実験におけるエンジン軸出力 (KW) の平均値と標準偏差は、WCO0 (0.93±0.02), および WCO15 (0.61±0.05) となり、WCO0 に比べ WCO15 は 65.6%減少することが分かった (p=0.000).

次に、燃料ごとに、線形回帰分析を行い、トルクと各変数の相関関係を調べたところ、Table 6 のようになった。トルクと排気ガス成分の関係を示す散布図[11]を、Fig. 3 に示す。

全体的に、エンジン回転速度をほぼ一定に保った本実験の状況において、トルクは NO, NO_x と正の相関を示すことが確認され、先行研究とも一致した[7]。本研究ではさらに、NO および NO_x とともに、トルクとの相関関係は、WCO0 の方が WCO15 よりも強いことが分かった。なお、一般的に自動車エンジンから排出される NO_x は、エンジン単体の状態において、空燃比によって左右される基準的な排気ガスの

Table 6 Regression analyses of the exhaust elements to torque

DV.		WCO0			
IV.	C	B	β	R ²	
TEMP	113.500	2.722	0.135	0.018	
O ₂	18.7	0	1.000**	1.000**	
CO ₂	2.1	0	1.000**	1.000**	
NO	-46.396	19.000	0.975**	0.951	
NO ₂	20.344	-0.707	-0.066	0.004	
NO _x	-26.052	18.293	0.865**	0.749	
DV.		WCO15			
IV.	C	B	β	R ²	
TEMP	135.445	1.454	0.124*	0.015	
O ₂	18.0	0	1.000**	1.000**	
CO ₂	1.7	0	1.000**	1.000**	
NO	6.749	9.081	0.694**	0.481	
NO ₂	4.984	0.228	0.109**	0.012	
NO _x	11.733	9.309	0.693**	0.480	

** : p<0.05, * : p<0.1

IV.: Independent Variable, DV.: Dependent Variable
WCO: Waste Cooking Oil, TEMP: Temperature, C: Constant,
B: Unstandardized partial regression coefficient
β: Standardized regression coefficient
R²: R squared

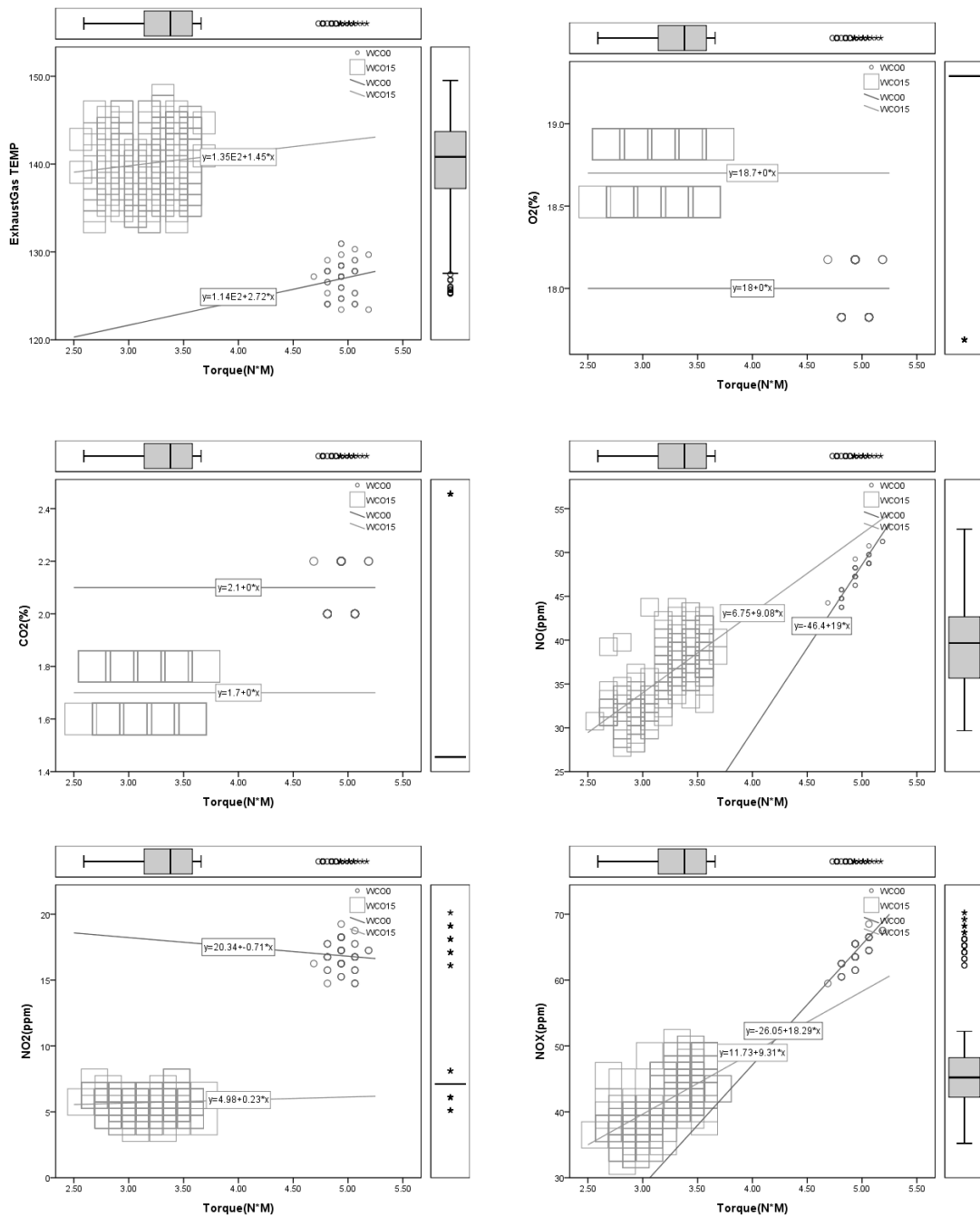


Fig. 3 Scatter plot diagrams for the exhaust characteristics versus torque output

成分であると見られている[2-4]. なお、一般に、ディーゼルエンジンの排気ガス中の NO_x 濃度は、完全燃焼すると多くなる傾向が指摘されている[8-10]. Fig. 2(d) によると、WC00の方がWC015よりエンジン出力が高く、また排気ガス成分中の O₂濃度が低いので、WC00の燃焼の方が完全燃焼に近いことが推測される[5, 6].

今回の実験結果を総合的に判断すると、本研究で使用した廃植物油混合燃料は、Fig. 2 (b) に示されるように軸出力が低下するが、従来の軽油と同様に燃料として用いることはでき、排気ガスの特性などは、ほぼ通常のエンジンと同様の傾向を示すことが分かった。

本実験で供試した WC015 の特徴としては、廃植物油を 15% 程度混合させる場合、特にエンジン側の改造を必用としないことが挙げられ、再生可能成分を含む燃料の利用の中でも、初期導入費用が大きくなならない利点がある。したがって、ディーゼルエンジンの需要の中で、低出力であることが許容される低コスト志向の親環境的需要に対応させることができるものと考えられる。さらにその詳細な得失は、廃植物油の廃棄問題も含めた総合的な政策の議論の中で考えられるべきである。特にその詳細な環境適合性に関しては、環境ライフサイクルアセスメントや健康リスク評価を実施してその検討結果を待つ必要がある。

2.5 第2章のまとめ

本研究は、特別に改造していない一般ディーゼルエンジンに廃植物油混合燃料を供給して燃焼させ、エンジン駆動特性と基本的な排気ガス特性を計測し、その結果に二変量相関分析を実施し、諸量の相関関係を調べたものである。その結果、エンジン回転速度をほぼ一定に保った本実験の状況において、トルクは NO, NO_x と正の相関を示すこと、さらに、NO および NO_x とともに、トルクとの相関関係は、WC00の方が WC015 よりも強いことが分かった。また、WC00の方が WC015 よりエンジン出力が高く、さらに排気ガス成分中の O₂ 濃度が低いので、WC00 の燃焼の方が完全燃焼に近いことが推測された。

本実験で供試した WC015 の特徴としては、廃植物油を 15% 程度混合させる場合、特にエンジン側の改造を必用としないことが挙げられ、ディーゼルエンジンの需要の中で、低出力であることが許容される低コスト志向の親環境的需要に対応させることができるものと考えられる。さらにその詳細な得失は、廃植物油の廃棄問題も含めた総合的な政策の議論の中で考えられるべきである。

第3章 廃植物油混焼小型ディーゼルエンジンの排気ガスに関

する健康リスク評価とライフサイクルアセスメント

3.1 要約

本研究では、既存の軽油（WC00）と廃植物油の混合燃料である WC010、WC015 および WC020 を燃料として小型ディーゼルエンジンの燃焼実験を行い、その排気ガスに関する健康リスク評価（Risk Assessment）を、また各燃料の使用による地球温暖化への影響を調べるライフサイクルアセスメント（Life Cycle Assessment）を実施した。実験時、エンジンはカム軸の発生トルクを 12 [Nm] で一定とするように維持して回転させた。健康リスク評価は、各燃料の排気ガスの VOCs 成分の濃度を計測・分析し、評価を実施して作業員の発癌率を計算した。VOCs（揮発性有機化合物）は、有機化合物を使用したときの揮発ガスとして、それぞれの化合物の融点以上の温度で発生するガスである。VOCs の分析には GC-MS を用い、濃度分析を行った。発癌率の計算には、計測した各成分の濃度を用い、EPA（United States Environmental Protection Agency）による Risk Assessment の手法を用いた。

その結果、TVOCs の濃度は 軽油(Light oil: WC00) は 310.16, WC010 は 219.17, WC015 は 450.95 および WC020 は 613.29 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] となり、WC010 が最も少なかった。発癌物質による生涯暴露健康リスク評価の結果、発癌率（50 年間暴露）は軽油(WC00)が 4.46E-04, WC010 は 3.62E-04, WC015 は 9.79E-04 および WC020 は 1.91E-03 となった。

次に、この実験で得られた駆動トルクなどのデータから、出力当たりの温室効果ガスのインベントリー分析を行い、燃料の使用に関するライフサイクルアセスメントを実施した。

その結果、トルク一定の条件下、エンジンを一定時間駆動する場合、軽油が発生エネルギーと等価の仕事をする廃植物油混合燃料によるカーボンニュートラルによる GWP 削減率は、WC010, WC015 および WC020 の順に、軽油に対し、およそ 10%, 13% および 16% の削減となることが分かった。さらに、廃植物油混焼小型ディーゼルエンジンの LCA 費用便益分析も行って比較した。

Keywords : Risk Assessment, Waste Cooking Oil(WCO), VOCs, Exhaust Gas, Carcinogenic

3.2 概要

日本や韓国などの輸出主導型産業国の多くは石油が産出されないため、その供給源をほとんど輸入に依存している[5]。さらに石油はその消費に比べ、資源の枯渇が早く進み、その供給量にも限界がある。このような理由により、バイオ燃料は石油を代替するエネルギー源として大きく脚光を浴びている。Pike 研究所によれば 2022年には 2,800億ドルのバイオ燃料市場が形成されると予測される[6]。バイオ燃料の中で、バイオディーゼルは既存ディーゼルエンジンをそのまま使うことができる[7-9]。したがってこれを用いることにより、石油消費量の節減を図ることができ、更にカーボンニュートラルの原理を用いれば GHGs (Green House Gases) の削減を目指すこともできるとして注目されている。

全世界的な植物油の生産量 153,802千トン/年に対し、パーム油が 36.3%、大豆油が 27.5%、菜種油が 15.8%、ひまわり油が 8.9%、およびそれ以外の植物油が 11.5%を占めている[10]。特に日本の場合には、菜種油 (Rapeseed oil) 42.7%、パーム油 (Palm oil) 22.6%、大豆油 (Soybean oil) 15.7%、およびそれ以外の植物油が19%を占めている[11]。これら作物の栽培には、多くの労力と土地の面積を必要とする。特に日本と韓国は栽培面積が狭く、また農業の労働力費が高いので、これら植物油を生産するには多額の費用が必要となり、その結果バイオディーゼルを実用化しにくい[12-14]。

これに対し、食品の調理に使用された後の廃植物油を、バイオディーゼルに変換して有効利用することは、植物を育てたり廃植物油を処理するための費用を節減し、またそれにより発生する環境負荷を抑制することが同時に期待できる有効な方法と考えられている。

しかし一般に、廃棄されるはずの廃植物油の場合、その燃焼に対する健康リスク評価はまだ行われていない。

そこで本研究では、少量の添加剤のもとに廃植物油を軽油と混合し、複雑な精製過程を必用としない混合燃料である、廃植物油の混合率がそれぞれ10%のWC010、15%のWC015および20%のWC020の燃焼排気ガスについて、健康リスク評価を行う。

さらに、それぞれの燃料による燃焼実験の発生トルクなどのデータから、温室効果ガスのインベントリー分析を行い、燃料の使用に関するライフサイクルアセスメントを実施する。

3.3 実験装置及び方法

Fig.1 に示したように、エンジン駆動実験装置は、ディーゼルエンジン、動力計及び排気ガス計測装置により構成されている。供試エンジンは Yanmar Co. の L-A type series L40ASS, また動力計は Toyodenki Co. の A-S Motor MB302/5-BD である。本エンジンは、

Table 7 Specifications of the diesel engine

Yanmar company air cooling type diesel engine L-A type series L40ASS				
Organization name		Unit	L40ASS	
Type			Vertical type air cooling 4 cycle diesel engine	
Fuel system			Direct injection type	
Number of cylinder			1	
Internal diameter		mm	68	
Stroke		mm	55	
Total stroke volume		l	0.199	
Output	Max	kW	3.1	
	Continuous rating	kW	2.8	
Output Shaft	Rated speed	rpm	Cam shaft : 1,800 Crankshaft : 3,600	
Fuel	Injection pressure	MPa	19.6	
	Fuel oil of application		JIS 2 light oil	
	Fuel tank capacity	l	2.5	
Lubricating	Lubricating system		Lubrication trochoid pump	
	Apply lubricant		SAW 10W 30, CC Level above	
	Lubricating oil volume	Total volume	1	0.8
		Available volume		0.25
Starting system			Recoil starting	
Cooling system			Forced cooling	

カム軸から動力を取り出すタイプで，カム軸の回転速度はクランク軸のそのの 2 倍である．供試エンジンと動力計の主要諸元を Table 7 及び Table 8 に示す．比較実験の対象とする燃料は，軽油 WCO0，WCO10，WCO15，及び WCO20 の 4 種類である．これら燃料の主要諸元を Table 9 および 10 に示す．

Table 8 Specifications of the dynamometer

Properties		Unit	Remarks
Name			Toyodenki Co. A-S motor Dynamometer
Type			Three-phase shunt wound motor (MB302/5-BD)
Output		kW	0.185-3.7
Rev. speed		r.p.m.	150-3000
Current		A	15
Voltage		V	220
Frequency		Hz	60
Secondary current		A	27
Commutator direction brush			8×16×32-24
Rating	Consecutively		1000-3000
	1 hour	r.p.m.	150-998

Table 9 Type of fuel and ingredient ratio of fuel

	Ratio of Light oil (%)	Ratio of Waste cooking oil (%)	Ratio of Waste Additives (%)	Density(g/cm ³)
Light oil: WCO0	100	0	0	0.86
10% Waste Vegetable oil: WCO10	89	10	1	0.8445
15% Waste Vegetable oil: WCO15	84	15	1	0.8396
20% Waste Vegetable oil: WCO20	79	20	1	0.8346

Table 10 Ingredients of fuels

List	Unit	WCO0	WCO10	WCO15	WCO20	Reference
Density (15°C)	g/cm ³	0.86	0.84	0.84	0.83	JIS K2249
Kinetic viscosity (40°C)	mm ² /S	1.7	3	3.74	5	JIS K2283
10%Residual carbon of residual oil (always pressure method)	Mass%	0.1	1.6	1.9	2.2	JIS K2270
Cetane index	—	45	47	50	53	JIS K2280
Sulfur content	Mass%	0.001	0.001	0.001	0.001	JIS K2541
Flash point(Pensky Martens closed method) °C		45	50	56	60	JIS K2265-3
Moisture	mg/kg	495	486	483	480	JIS K2275
Sulfated ash	Mass%	0.01	0.01	0.01	0.01	JIS K2272
Solid impurities	mg/kg	13.1	13.5	13.9	14.2	EN 12662
Copper plate corrosion (50°C, 3h))		1	1	1	1	JIS K2513
Oxidative stability	—	0	0	0	0	EN14112
Acid value	mgKOH/g	0.12	1.9	2.3	2.5	JIS K0070
Iodine value	—	0	15.4	20.6	24.2	JIS K0070
Fatty acid methyl esters	Mass%	0	0	0	0	
Linolenic acid methyl ester	Mass%	0	0	0	0	EN 14103
Polyunsaturated fatty acid methyl ester	Mass%	0	0	0	0	
Monoglyceride	Mass%	0.1	0.1	0.1	0.1	
Diglycerides	Mass%	0.1	0.1	0.1	0.1	
Triglyceride	Mass%	0.01	0.1	0.1	0.1	EN 14105
Free glycerol	Mass%	0	0	0	0	
All glycerin	Mass%	0	0	0	0	
Methanol	Mass%	0.01	0.03	0.06	0.09	EN 14110
Metal (Na)	mg/kg	0	0	0	0	EN 14538
Metal (K)	mg/kg	0	0	0	0	EN 14538
Metal (Ca)	mg/kg	0	0	0	0	EN 14538
Metal (Mg)	mg/kg	0	0	0	0	EN 14538
Phosphorus	mg/kg	0	0	0	0	EN 14107
Pour point	°C	-30	-23	-18	-15	JIS K2269
Clogging point	°C	-19	-13	-10	-7	JIS K2288
Distillation characteristics 90% distillation temperature	°C	330	343	351	367	JIS K2254

実験室内の温度と相対湿度は、それぞれ 28℃ 及び 70 % であった。実験に先立ってエンジンを 10 分間ウォーミングアップし、その後、エンジン駆動実験を 20 分間実施した。エンジン駆動実験においては、エンジン回転速度、および出力トルクを計測しつつ排気ガスを捕集し、その後 GC-MS により VOCs 成分を計測した。

排気ガスの捕集法は、air pump と接続した Vacuum Box(model : VOC sample set VOC-1 type, Sibata Co.) を用いる”減圧による捕集法”とした。Air pump には Personal Pump(model : MP-Σ300N QC-10N, Sibata Co.) を用いたが、ポンプの設定流量は 0.5 l/min とし、10 l の排気ガスを Tedlar bag(model : 080100-10, Sibata Co.) に捕集した。なお、捕集されたガスは 1 時間以内に成分を分析した(Fig. 5)。

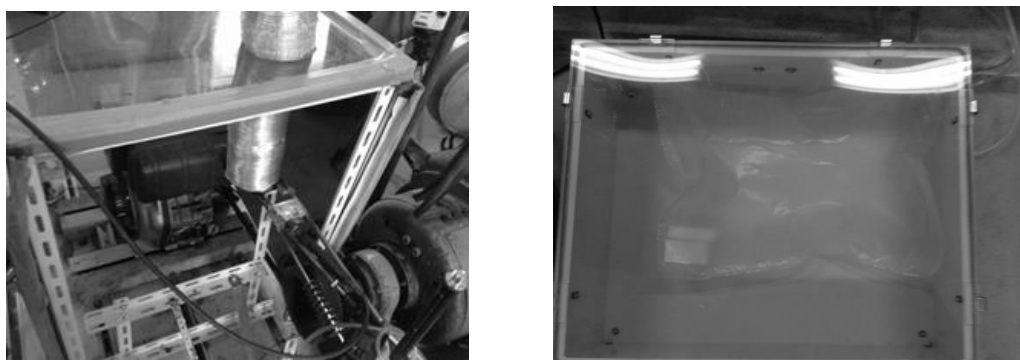


Fig. 5 Diesel engine exhaust gas measurement and experimental

エンジン調速機 (engine governor) の設定ポジションは最大位置に固定し、駆動実験の間、エンジンのトルク負荷が 12 [Nm] となるように、動力計の負荷を手動で調節し、対応するエンジンカム軸の回転速度を計測した。エンジンカム軸の回転速度は回転表示器 TDP-3321A-E (Coco Research Co.) によって表示し、30 秒に一回ずつ、デジタル写真機 RZ18 (Pentax Co.) により記録し、後の解析に用いた。

3.4 健康リスク評価およびその結果

WHO(World Health Organization) 傘下の IARC(International Agency for Research on Cancer)は、ディーゼルエンジンの排気ガスを2A等級(Group 2A: probably carcinogenic to humans)から、1等級(Group 1: carcinogenic to humans)の発癌物質として (2012. June. 12.) , 危険性を上方に修正した(以下の囲み).

Health Effects, Principal effect(s) of exposure to each substance, listed by OSHA Health Code and Health Effects. Health codes are used in determining if a violation of an air contaminant standard is serious or other-than-serious, based on guidelines in the Field Operations Manual, OSHA Instruction CPL 2.45B, chapter IV. All Health Codes and Health Effects are scheduled to be reviewed and updated under contract. For some chemicals, additional toxicology information has been added from other sources.

Abbreviations for this information includes: SKIN IRR = Skin irritation; SKIN ABS = Skin Absorption; INGES ACUTE = Ingestion Acute; and INGES CHRONIC = Ingestion Chronic.

IARC, carcinogenic classification as indicated by International Agency for Research on Cancer (IARC), IARC Monographs on the Evaluation of the Carcinogenic Risk to Humans. Data includes chemicals covered through Volume 88.

Group 1: The agent (mixture) is carcinogenic to humans.

The exposure circumstance entails exposures that are carcinogenic to humans.

Group 2

Group 2A: The agent (mixture) is probably carcinogenic to humans.

The exposure circumstance entails exposures that are probably carcinogenic to humans.

Group 2B: The agent (mixture) is possibly carcinogenic to humans.

The exposure circumstance entails exposures that are possibly carcinogenic to humans.

Group 3: The agent (mixture or exposure circumstance) is not classifiable as to its carcinogenicity to humans.

Group 4: The agent (mixture) is probably not carcinogenic to humans.

. Agents classified by the IARC monographs volumes

バイオディーゼルの排気ガスについても、IARCにより指定された発癌物質が測定された場合、その濃度を用いて健康リスク評価 (Risk Assessment) と呼ばれる Health Impact Assessment (HIA) を実行する必要がある [15].

一般に “Risk” は, “Hazard” という単語より具体的かつ定量的に計算して表現することを要求する. 本来, Risk Assessmentは環境ストレスを対象として評価することであり, 食品, 経済, 機械, 保安など多様な分野において使われる手法である. ” Risk” モデルは不確実性を有する内容を予測することにその目的を置いており, ISO (International Organization for Standardization) 31000によって規定されている [16].

保健分野では, 1956年, 英国の環境関連法である “Clean Air Act (United Kingdom)” が制定されて以来, 環境災害が1959年日本の “Minamata Bay” で起きたような事例について, 環境的な観点から予測, 評価したり, 疫学調査をするための方法が考察されてきた [1]. 具体的には, 1975年 “Quantitative Risk Assessment for Community Exposure to Vinyl Chloride” の文献を最初として, ” 特定の場所” の健康影響評価を行う Risk Assessment が導入され, WHO (World Health Organization) が定量的かつ定性的評価を原則としてこの方法を採択し, 今日まで研究が続けられている [17]. EPAはさらにこの分野の Risk Assessment の概念と詳細な計算方法を示した. 本研究では, 今後 “Risk Assessment” を, このEPAにより規定された用語の意味において用いる [18].

Gamo et al. (2003) の研究によれば, ディーゼルエンジンの排気ガスは日本の12大環境汚染の中で一番深刻であるとされ, これを定量的に Loss of Life Expectancy (LLE; days) 指標により示した. 同時に, DEP (Diesel Exhaust Particles) による期待寿命は, 生涯期待寿命より 4.6%減少すると推測したが, これはSPM (Suspended Particle Matter) の測定結果によるものであり, 排気ガスのガス状汚染物質に対しては考察されていない [19].

本研究は廃植物油混合ディーゼル燃料に関し, 廃植物油の混合割合別に, 排気ガスのVOCs成分の濃度を分析し, これを基に Risk Assessmentを実施し, 発癌率を計算して従来のディーゼル燃料と比較評価することにより, 廃植物油混合燃料の健康影響に関する情報を提供する.

3.4.1 分析の方法

化学分析には GC-TOF を利用した(model : 7890A, Agilent Technologies Co.(GC) / model : AccuTOF GCv JMS-T100GCV, JEOL Co. (TOF: Time-of-flight mass spectrometry)).

Table 11 に分析器機の設定条件を示す. GC の Column の規格は Non-Polar タイプ, 長さ 60 m, 直径 0.320 mm, film 1.00 μm (DB-5MS 123-5563, Agilent Technologies Co.)である. キャリブレーションに用いた標準試薬は “50 component indoor air standard” の” 10 $\mu\text{g}/\text{m}\ell$ in MeOH:H₂O(95:5)” (model : 4M9148-U, SUPELCO Co.)である. Internal standard method を利用するために内部標準物質である Carbon Disulfide (CS₂) を用い, 事前に calibration curve を作成した. 各サンプルの濃度は, それぞれ GC-TOF により出力された面積を用い, 希釈割合を考慮して定量した.

本研究では, GC の入力段階における資料の抽出には, ” Solid-Phase Micro Extraction (SPME) fiber(model : SPME manual holder, SUPELCO Co.) “を利用し, Tedlar bag に捕集した排気ガスから揮発成分を直接吸着して用いた.

本研究で用いたのは, Non-polar タイプ SPME fiber “model : CAR/PDMS (Carboxen®/Polydimethylsiloxane) 85 μm ” (SUPELCO Co.)である. この fiber は molecular weight(MW) 30~225 の Non-polar 揮発性試料を分析することが容易であるとされる.

本研究では VOCs 分析をするために EPA method TO-14 を利用して分析した. Internal standard method によって CS₂ は 1, 2, 5, 10 and 20ppbv を tedlar bag に入れて検出限界を (Limited Of Detection, LOD) 設定して検量線を作成した結果 relative standard deviation (RSD) R² 0.983 となった. 各サンプルが捕集された tedlar bag に CS₂ の 100ppb を入れ, 温度 40 °C で 20 分間 SPME fiber に吸着させた後, GC/TOF Septum に注入し分析した.

エンジンの燃焼実験は, 各燃料による排気ガス排出に対する比較評価のために, カム軸における軸出力トルクを 12 [Nm] で固定し, カム軸の回転速度 [r. p. m.], カム軸の軸出力 (Brake Power) [kW], 燃料消費量 [ℓ/min] を計測し, 記述統計を算出した.

Table 11 Experimental Conditions of the GC-MS System for the Analysis of VOC

GC-MS system(Model: GCMS (Agilent Technologies 7890A (GC), JEOL AccuTOF GCv JMS-T100GCV (MS))
a. Temperature GC Injector 220°C
Oven initial 35°C (5 min holding)
Oven ramping rate 3°C per min for 35-140°C
Oven ramping rate 120°C per min for 140-290°C
Oven ramping rate 290°C (5 min holding)
b. Flow rate Column (N2) 1.5(mL/min) splitless method
c. TIC Scan range : 29-280m/z

3.4.2 健康リスク評価手法詳細

分析段階で計算された個別 VOCs のデータを用い、EPA/630/R-03/003 F 法に準拠する IRIS(Integrated Risk Information System) Database を利用して Risk Assessment を行った。

IRIS の情報がない物質に対しては

Occupational Safety and Health Administration(OSHA) のデータを参考に、健康リスクを算出する。

このような手法により、軽油 (WC00) , WC010, WC015 及び WC020 の各混合燃料の発癌率と健康リスクを計算し、比較する。

Risk assessment を行うためには NRC (National Research Council) によって考案された

- 1) 有害性確認(hazard identification),
- 2) 用量-反応評価(dose-response assessment),
- 3) 暴露評価(exposure assessment),
- 4) リスク判定(risk characterization)

の 4 段階の手順を用いるのが一般的である (NCR, 1983) .

以下にその計算手法を示す (2009 Status Report: Advances in Inhalation Dosimetry of Gases and Vapors with Portal of Entry Effects in the Upper Respiratory Tract/<https://cfpub.epa.gov/ncea/risk/recordisplay.cfm?deid=212131>) 。

3.4.2.1 有害性確認(Hazard Identification)

有害性確認は，疫学資料 (epidemiological study)，毒性資料 (toxicological study)，人体を対象にした人為的実験資料 (controlled human experiments)，in vivo および in vitro 実験資料，物理化学的性質に関する資料などを基にした発癌および非発癌物質に対する有害性確認の基本資料を利用する。

本研究においては，OSHA で指定された病気の名称をコード別に分別して Table 12 を作成して用いた。

多くの有害影響の中で一番低い用量，すなわち LOAEL (Lowest Observed Adverse-Effect Level) は，の値は OSHA の資料を引用，検討して作成した。

Table 12 Health effects due to chemical exposure Code of OSHA

CODE	HEALTH EFFECTS
HE1	Cancer---Currently regulated by OSHA as carcinogen
HE2	Chronic (Cumulative) Toxicity---Known or Suspected animal or human carcinogen, mutagen (except Code HE1 chemicals)
HE3	Chronic (Cumulative) Toxicity---Long-term organ toxicity other than nervous, respiratory, hematologic or reproductive
HE4	Acute Toxicity---Short-term high risk effects
HE5	Reproductive Hazards---Teratogenesis or other reproductive impairment
HE6	Nervous System Disturbances---Cholinesterase inhibition
HE7	Nervous System Disturbances---Nervous system effects other than narcosis
HE8	Nervous System Disturbances---Narcosis
HE9	Respiratory Effects Other Than Irritation---Respiratory sensitization (asthma or other)
HE10	Respiratory Effects Other Than Irritation---Cumulative lung damage
HE11	Respiratory Effects---Acute lung damage/edema or other
HE12	Hematologic (Blood) Disturbances---Anemias
HE13	Hematologic (Blood) Disturbances---Methemoglobinemia
HE14	Irritation-Eyes, Nose, Throat, Skin---Marked
HE15	Irritation-Eyes, Nose, Throat, Skin---Moderate
HE16	Irritation-Eyes, Nose, Throat, Skin---Mild
HE17	Asphyxiants, Anoxiants
HE18	Explosive, Flammable, Safety (No adverse effects encountered when good housekeeping practices are followed)
HE19	Generally Low Risk Health Effects---Nuisance particulates, vapors or gases
HE20	Generally Low Risk Health Effects---Odor

3.4.2.2 用量-反応評価(Dose-Response Assessment)

本研究では table 13 に記載した条件に基づいて基準暴露量の算定を行った。

$$RfD = \frac{LOAEL}{UF \times MF}$$

ここで、

RfD : Reference Dose (mg/kg/day)

LOAEL : Lowest Observed Adverse-Effect Level (mg/kg/day)

UF : Uncertainty Factor (***)

MF : Modifying Factor (***)

Table 13 The choice of experimental animals for the reference category

Classification	1 rating	2 rating	3 rating	reference
Acute toxicity (Inhalation)	Rat	Mouse	Rabbit/Dog/Monkey/etc.	Selection of laboratory animals by the reference(OECD TG 404, 2002)
Acute toxicity (sclerite)	Rat/Rabbit	Guinea pig	Mouse etc.	
skin stimulation	Rabbit	Rat / Guinea pig	Mouse/Artificial skin/etc.	
Eye damage	Rabbit	Cow cornea	Chicken/etc.	
Mutagenic	Rat	Mouse	etc.	
Carcinogenicity	Rat	Mouse	Hamster/etc.	
Reproductive Toxicity	Rat	Mouse	Rabbit/etc.	
Target Organ Toxicity	Rat	Mouse	Rabbit/etc.	

3.4.2.3 暴露評価(exposure assessment)

用量-反応評価から化学物質の単位濃度の暴露に関し人体に影響するリスクを算出する。

暴露評価においては、時間加重平均(time weighted average)として、以下に示す生涯一日平均暴露量(lifetime average daily dose, LADD: mg/kg/day)が多く用いられる。

$$LADD = \frac{C \times IR \times ET \times EF \times ED}{BW \times LT}$$

ここで、

LADD : Lifetime Average Daily Dose (mg/kg/day)

C : Concentration (mg/m³)

IR : Inhalation Rate (m³/day)

ET : Exposure Time (day)

EF : Exposure Factor

ED : Exposure Duration (day)

BW : Body Weight (kg/mg)

LT : Life Time (life expectancy)

吸収分解率が不明な物質は人体に暴露した量を100%吸収されると仮定した。本研究では table 14 に記載の条件に基づいて LADD を計算した。

Table 14 Environmental conditions for health risk assessment

Qualification	Value	Reference
Adult respiratory rate	1.25 m ³ /h	US. EPA
Weight (Male)	65.7 kg (Average weight of Economic active population)	Statistics Bureau of Japan, 2014
Exposing time	8hours/1day	US. OSHA
Exposed for several days	261day/1year (Possible business day, such as holiday)	Statistics Bureau of Japan, 2014
Annual exposed (Male)	79.64 (Life expectancy) - 18 (Minors age) = 59.64 years (Legal working age economic activity)	Statistics Bureau of Japan, 2014

3.4.2.4 リスク判定(risk characterization)

リスク判定は、発癌物質のリスクは個人リスク(individual risk)または人口集団リスク(population risk)で表す。

生涯個人リスクは個人が対象物質に暴露した結果、発癌影響を受ける超過確率をいうが、これは期待寿命の間暴露すると仮定した時の個人の生涯最大のリスクである。

実際には、汚染物質の人体暴露を計測し、さらに次式により、発癌性物質の暴露によるリスク判定を行い、許容リスク(de minimis risk)として無視できる 10^{-6} を超過した場合、超過発癌性リスクとする。

$$ELCR = EC \times URF$$

ここで、

ELCR : Excess Lifetime Cancer Risk(mg/kg/day)

EC : Chronic Daily Exposure Concentration (mg/kg/day)

URF : Unit Risk Factor(例えば, EPA IRIS DB) (***)

非発癌性物質の暴露によるリスク判定は、次式に示す暴露評価の生涯一日平均暴露量(LADD)と用量-反応評価の基準暴露量(RfD)の比HIで表す。

$$HI = \frac{LADD}{RfD \times MF}$$

ここで、

HI : Hazard Index

LADD : Lifetime Average Daily Dose(mg/kg/day)

RfD : Reference Dose(mg/kg/day)

MF : Modifying Factor(***)

HI が '1' を超過する場合には有害影響が発生する可能性があることを、また '1' 以下の場合には有害影響が発生する可能性がないことを示している。

本研究ではリスク評価として、たとえば工場などで、小型ディーゼルエンジン付きの発電機の近くで常時作業をしている労働者のリス

クについて評価する。現実には排気環境についてよく考えられている場合が多いが、ここでは核燃料の比較を目的とすることから、まったく排気環境が整っていない状況を基準として算定した。

3.4.3 健康リスク評価実験

エンジンの燃焼実験では、各燃料による排気ガス排出に対する比較評価のために、カム軸における軸出力トルクを 12 [Nm] で固定し、カム軸の回転速度 [rpm]，カム軸の軸出力 (Brake Power) [kW]，燃料消費量 [ℓ/min] を計測し、記述統計を算出した。

実験ではカム軸に V ベルトで接続されたダイナモメータの回転速度を変化させて軸出力を変化させたが、結果的に各燃料種類別の回転速度は、軽油は $3,545 \pm 3$, WC010 は $3,532 \pm 9$, WC015 は $3,529 \pm 10$, および WC020 は $3,515 \pm 23$ [rpm] となった。また軸出力は軽油は 2.21 ± 0.02 , WC010 は 2.20 ± 0.01 , WC015 は 2.20 ± 0.01 , WC020 は 2.19 ± 0.00 [kW] となった。さらに燃料消費量は軽油は 14.0 ± 0.1 , WC010 は 14.0 ± 0.2 , WC015 は 14.3 ± 0.2 , および WC020 は 14.6 ± 0.3 [mℓ/min] となった (Fig. 6)。

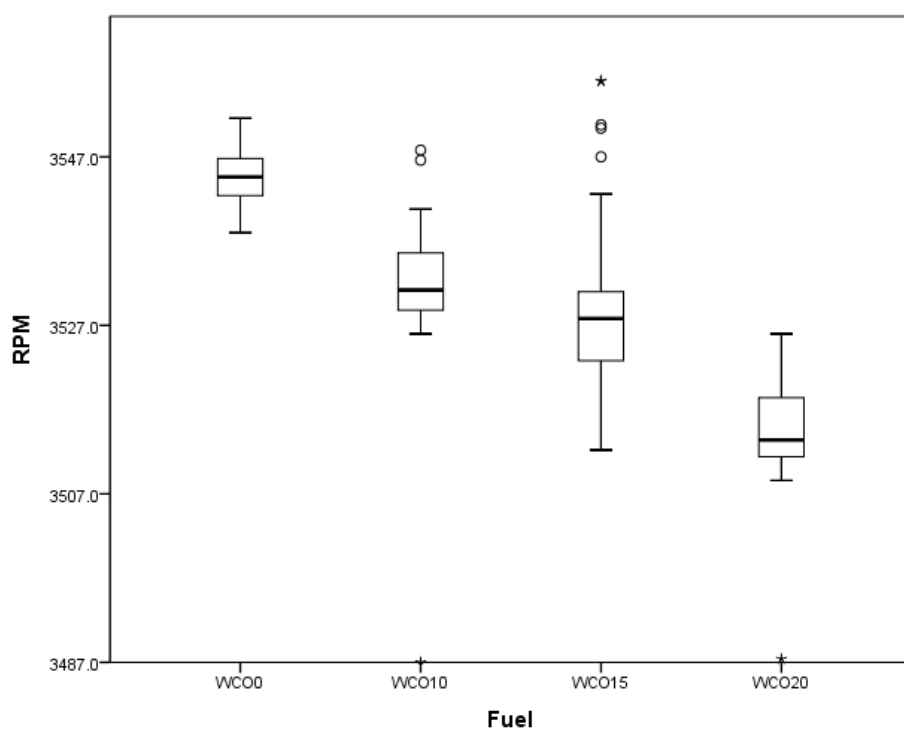


Fig. 6 According to the type of fuel the engine RPM

データ計測後、等しい条件で実験が遂行されたかどうかを確認するために、各燃料別に収集されたデータに一元配置分散分析 (ANOVA test) を適用して統計分析を実施した。

次に、各燃料種類 (以下、各グループと称する) 別に同一条件が確保されているかどうか、ANOVA 検定により調べた。

まず、各グループ間のカム軸回転速度に相違が無いという帰無仮説に対する ANOVA 検定の結果は $p=0.000$ となったので、事後検定を実施した。事後検定では Sheffe test を実施したが、WC010 と WC015 の組み合わせを除いた他のグループ間では $p=0.000$ となったので、WC010 と WC015 の組み合わせ以外の各燃料種類別グループ間の回転速度には差があったことが確認された。WC010 と WC015 の組み合わせの場合には $p=0.469$ となり、回転速度の差を確認することはできなかった。

次に、各グループ間における軸出力 (Brake Power) に相違が無いという帰無仮説に対す ANOVA 検定の結果、 $p=1.000$ となったので、軸出力 (Brake Power) に関しては、燃料種類による区別がないことが示された。

軽油と WC010 の場合、エンジン出力はほぼ等しかったが、WC015、および WC020 では定格エンジン回転速度を維持できず、低下する現象が確認された。特に、WC020 ではカム軸トルクが 12 [Nm] に達しなかったため、定格エンジン回転数の 3600 [rpm] の設定ができず、定格エンジン回転速度より低い回転速度で実験を続行した。

各燃料種類 (軽油, WC010, WC015, WC020) に対する個別 VOCs に関する濃度の試料と、それによる健康リスク評価値を Table 15~22 に示す。本表においては、各燃料種類別の個別 VOCs において、検出された発癌物質と非発癌物質について、労働者が排気ガスに暴露して労働する勤続期間における発癌率を計算した。労働者としては、満 18 歳以上の男性を想定した。

Table 15 は、軽油を燃料として本研究の小型ディーゼルエンジンを使用している作業場内における、労働者の VOCs 暴露による発癌率に関する健康リスク評価値を示す。発癌率は労働期間 1 年の場合 $8.91E-06$ 、および 50 年の場合 $4.46E-04$ となる。軽油の排気ガスからは、IARC 基準発癌物質の Benzene (Cas No. 71-43-2, Group 1) と Ethylbenzene (Cas No. 100-41-4, Group 2B) の 2 種類が検出された。

Table 15 Risk assessment of small engine exhaust(Fuel : WCO 0, Carcinogen)

	CAS Number	Name	IARC Group	Health Effect (HE Code)	molecular weight	Concentration ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Exposure period(years)									
							1	3	5	10	15	20	30	40	50	
1	71-43-2	Benzene	1	1,4,7,8,12,14	78.1	12.67	6.22E-06	1.87E-05	3.11E-05	6.22E-05	9.34E-05	1.24E-04	1.87E-04	2.49E-04	3.11E-04	
2	100-41-4	Ethylbenzene	2B	3,7,8,11,15	106.2	5.47	2.69E-06	8.06E-06	1.34E-05	2.69E-05	4.03E-05	5.37E-05	8.06E-05	1.07E-04	1.34E-04	
		Total Carcinogen risk					8.91E-06	2.67E-05	4.46E-05	8.91E-05	1.34E-04	1.78E-04	2.67E-04	3.56E-04	4.46E-04	

Table 16 は、軽油の排気ガス中の非発癌物質に関する健康リスク評価値について、最も管理が必要な物質から順にリストアップしたものである。

Table 16 Risk assessment of small engine exhaust(Fuel : WCO 0, Non-Carcinogen)

	CAS Number	Name	IARC Group	Health Effect (HE Code)	molecular weight	Concentration ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Exposure period(years)									
							1	3	5	10	15	20	30	40	50	
1	95-63-6	1,2,4-Trimethylbenzene		7,9,11,12,15	120.2	3.33	8.33E-10	2.50E-09	4.17E-09	8.33E-09	1.25E-08	1.67E-08	2.50E-08	3.33E-08	4.17E-08	
2	629-59-4	Tetradecane			198.39	16.33	6.06E-10	1.82E-09	3.03E-09	6.06E-09	9.09E-09	1.21E-08	1.82E-08	2.42E-08	3.03E-08	
3	629-62-9	Pentadecane			212.41	133.90	3.54E-10	1.06E-09	1.77E-09	3.54E-09	5.31E-09	7.08E-09	1.06E-08	1.42E-08	1.77E-08	
4	108-88-3	Toluene	3	5,7,15	92.1	17.39	3.35E-10	1.01E-09	1.68E-09	3.35E-09	5.03E-09	6.71E-09	1.01E-08	1.34E-08	1.68E-08	
5	106-42-3	p-Xylene	3	3,4,7,8,12,15	106.2	14.39	3.16E-10	9.48E-10	1.58E-09	3.16E-09	4.74E-09	6.32E-09	9.48E-09	1.26E-08	1.58E-08	
6	108-67-8	Mesitylene		7,9,11,12,15	120.2	1.16	3.09E-10	9.28E-10	1.55E-09	3.09E-09	4.64E-09	6.19E-09	9.28E-09	1.24E-08	1.55E-08	
7	108-38-3	o-Xylene	3	3,4,7,8,12,15	106.2	8.00	2.11E-10	6.34E-10	1.06E-09	2.11E-09	3.17E-09	4.23E-09	6.34E-09	8.45E-09	1.06E-08	
8	124-18-5	Decane		8	142.28	23.25	1.99E-10	5.96E-10	9.94E-10	1.99E-09	2.98E-09	3.98E-09	5.96E-09	7.95E-09	9.94E-09	
9	629-50-5	Tridecane			184.36	1.88	1.71E-10	5.12E-10	8.53E-10	1.71E-09	2.56E-09	3.41E-09	5.12E-09	6.82E-09	8.53E-09	
10	111-84-2	Nonane		8,16	128.3	10.11	1.52E-10	4.55E-10	7.58E-10	1.52E-09	2.28E-09	3.03E-09	4.55E-09	6.07E-09	7.58E-09	
11	138-86-3	Limonene		3,16	136.234	1.47	1.35E-10	4.06E-10	6.77E-10	1.35E-09	2.03E-09	2.71E-09	4.06E-09	5.42E-09	6.77E-09	
12	95-47-6	m-Xylene	3	3,4,7,8,12,15	106.2	3.18	1.33E-10	4.00E-10	6.67E-10	1.33E-09	2.00E-09	2.67E-09	4.00E-09	5.33E-09	6.67E-09	
13	112-40-3	Dodecane			170.33	4.48	1.25E-10	3.74E-10	6.23E-10	1.25E-09	1.87E-09	2.49E-09	3.74E-09	4.99E-09	6.23E-09	
14	629-73-2	n-Hexadecane			224.43	21.14	5.27E-11	1.58E-10	2.64E-10	5.27E-10	7.91E-10	1.05E-09	1.58E-09	2.11E-09	2.64E-09	
15	1120-21-4	Undecane			156.35	6.51	4.33E-11	1.30E-10	2.17E-10	4.33E-10	6.50E-10	8.67E-10	1.30E-09	1.73E-09	2.17E-09	
16	110-54-3	Hexane		7,8,16	86.2	1.09	2.88E-08	8.63E-08	1.44E-07	2.88E-07	4.31E-07	5.75E-07	8.63E-07	1.15E-06	1.44E-06	
17	111-65-9	Octane		8,11,16	114.2	2.90	2.56E-11	7.69E-11	1.28E-10	2.56E-10	3.84E-10	5.13E-10	7.69E-10	1.03E-09	1.28E-09	
18	112-31-2	Decanal			156.27	1.12	1.65E-11	4.94E-11	8.24E-11	1.65E-10	2.47E-10	3.30E-10	4.94E-10	6.59E-10	8.24E-10	
19	78-93-3	2-Butanone		7,8,16	72.1	2.71	9.59E-09	2.88E-08	4.79E-08	9.59E-08	1.44E-07	1.92E-07	2.88E-07	3.84E-07	4.79E-07	
20	611-14-3	4-Ethyltoluene			120.19	5.79	4.22E-12	1.27E-11	2.11E-11	4.22E-11	6.33E-11	8.44E-11	1.27E-10	1.69E-10	2.11E-10	
21	620-14-4	2-Ethyltoluene			120.19	5.84	1.42E-12	4.27E-12	7.11E-12	1.42E-11	2.13E-11	2.85E-11	4.27E-11	5.69E-11	7.11E-11	
22	622-96-8	3-Ethyltoluene			120.19	0.68	5.22E-13	1.57E-12	2.61E-12	5.22E-12	7.84E-12	1.04E-11	1.57E-11	2.09E-11	2.61E-11	

Table 17 は、WCO10 を燃料として本研究の小型ディーゼルエンジンを使用している作業場内における、労働者の VOCs 暴露による発

癌率に関する健康リスク評価値を示す。発癌率は労働期間 1 年の場合 7.23E-06, および 50 年の場合 3.62E-04 となる。WC010 の排気ガスからは, IARC 基準発癌物質の Tetrachloroethylene (Cas No. 127-18-4, Group 2A), Benzene (Cas No. 71-43-2, Group 1), Styrene (Cas No. 100-42-5, Group 2B), Ethylbenzene (Cas No. 100-41-4, Group 2B), 1,4-Dichlorobenzene (Cas No. 106-46-7, Group 2B), Dichloromethane (Cas No. 75-09-2, Group 2B), および Dibromochloromethane (Cas No. 124-48-1, Group 2B) の 7 種類が検出された。

Table 17 Risk assessment of small engine exhaust(Fuel : WC010, Carcinogen)

	CAS Number	Name	IARC Group	Health Effect (HE Code)	molecular weight	Concentration ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Exposure period(years)									
							1	3	5	10	15	20	30	40	50	
1	127-18-4	Tetrachloroethylene	2A	3,7,16	165.8	8.32	2.53E-06	7.58E-06	1.26E-05	2.53E-05	3.79E-05	5.06E-05	7.58E-05	1.01E-04	1.26E-04	
2	71-43-2	Benzene	1	1,4,7,8,12,14	78.1	7.26	4.06E-06	1.22E-05	2.03E-05	4.06E-05	6.08E-05	8.11E-05	1.22E-04	1.62E-04	2.03E-04	
3	100-42-5	Styrene	2B	2,7,8,11,15	104.2	18.92	2.91E-07	8.74E-07	1.46E-06	2.91E-06	4.37E-06	5.82E-06	8.74E-06	1.16E-05	1.46E-05	
4	100-41-4	Ethylbenzene	2B	3,7,8,11,15	106.2	6.35	9.56E-08	2.87E-07	4.78E-07	9.56E-07	1.43E-06	1.91E-06	2.87E-06	3.82E-06	4.78E-06	
5	106-46-7	1,4-Dichlorobenzene	2B	3,7	147	11.99	1.57E-11	4.72E-11	7.86E-11	1.57E-10	2.36E-10	3.14E-10	4.72E-10	6.29E-10	7.86E-10	
6	75-12-2	Dichloromethane	2B	1,3,4,7,8,14,17	84.9	9.36	2.60E-07	7.80E-07	1.30E-06	2.60E-06	3.90E-06	5.20E-06	7.80E-06	1.04E-05	1.30E-05	
7	124-48-1	Dibromochloromethane	2B		208.28	1.80	7.82E-13	2.35E-12	3.91E-12	7.82E-12	1.17E-11	1.56E-11	2.35E-11	3.13E-11	3.91E-11	
		Total Carcinogen risk					7.23E-06	2.17E-05	3.62E-05	7.23E-05	1.08E-04	1.45E-04	2.17E-04	2.89E-04	3.62E-04	

Table 18 は, WC010 に関する非発癌物質の健康リスク評価値について, 最も管理が必要な物質から順にリストアップしたものである。

Table 18 Risk assessment of small engine exhaust(Fuel : WCO10, Non-Carcinogen)

	CAS Number	Name	IARC Group	Health Effect (HE Code)	molecular weight	Concentration ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Exposure period(years)								
							1	3	5	10	15	20	30	40	50
1	526-73-8	1,2,3-Trimethylbenzene		7,9,11,12,15	120.2	37.87	4.33E-09	1.30E-08	2.17E-08	4.33E-08	6.50E-08	8.67E-08	1.30E-07	1.73E-07	2.17E-07
2	138-86-3	Limonene		3,16	136.234	11.99	1.35E-09	4.06E-09	6.77E-09	1.35E-08	2.03E-08	2.71E-08	4.06E-08	5.42E-08	6.77E-08
3	108-67-8	Mesitylene		7,9,11,12,15	120.2	5.77	8.79E-10	2.64E-09	4.39E-09	8.79E-09	1.32E-08	1.76E-08	2.64E-08	3.52E-08	4.39E-08
4	95-63-6	1,2,4-Trimethylbenzene		7,9,11,12,15	120.2	3.21	6.55E-10	1.97E-09	3.28E-09	6.55E-09	9.83E-09	1.31E-08	1.97E-08	2.62E-08	3.28E-08
5	106-42-3	p-Xylene	3	3,4,7,8,12,15	106.2	14.23	5.55E-10	1.67E-09	2.78E-09	5.55E-09	8.33E-09	1.11E-08	1.67E-08	2.22E-08	2.78E-08
6	108-88-3	Toluene	3	5,7,15	92.1	19.88	4.21E-10	1.26E-09	2.10E-09	4.21E-09	6.31E-09	8.42E-09	1.26E-08	1.68E-08	2.10E-08
7	108-38-3	m-Xylene	3	3,4,7,8,12,15	106.2	7.70	3.06E-10	9.19E-10	1.53E-09	3.06E-09	4.59E-09	6.13E-09	9.19E-09	1.23E-08	1.53E-08
8	95-47-6	o-Xylene	3	3,4,7,8,12,15	106.2	4.76	1.70E-10	5.09E-10	8.48E-10	1.70E-09	2.54E-09	3.39E-09	5.09E-09	6.78E-09	8.48E-09
9	67-64-1	Acetone		7,8,12,16	58.1	12.23	1.40E-10	4.21E-10	7.01E-10	1.40E-09	2.10E-09	2.81E-09	4.21E-09	5.61E-09	7.01E-09
10	112-40-3	Dodecane			170.33	2.58	1.10E-10	3.30E-10	5.50E-10	1.10E-09	1.65E-09	2.20E-09	3.30E-09	4.40E-09	5.50E-09
11	629-59-4	Tetradecane			198.39	1.17	1.09E-10	3.26E-10	5.43E-10	1.09E-09	1.63E-09	2.17E-09	3.26E-09	4.35E-09	5.43E-09
12	111-84-2	Nonane		8,16	128.3	2.81	6.40E-11	1.92E-10	3.20E-10	6.40E-10	9.59E-10	1.28E-09	1.92E-09	2.56E-09	3.20E-09
13	629-50-5	Tridecane			184.36	0.08	5.66E-11	1.70E-10	2.83E-10	5.66E-10	8.48E-10	1.13E-09	1.70E-09	2.26E-09	2.83E-09
14	1120-21-4	Undecane			156.35	8.61	5.44E-11	1.63E-10	2.72E-10	5.44E-10	8.15E-10	1.09E-09	1.63E-09	2.17E-09	2.72E-09
15	111-65-9	Octane		8,11,16	114.2	4.57	4.49E-11	1.35E-10	2.25E-10	4.49E-10	6.74E-10	8.99E-10	1.35E-09	1.80E-09	2.25E-09
16	112-31-2	Decanal			156.27	1.37	2.28E-11	6.85E-11	1.14E-10	2.28E-10	3.42E-10	4.56E-10	6.85E-10	9.13E-10	1.14E-09
17	629-62-9	Pentadecane			212.41	2.53	1.96E-11	5.87E-11	9.78E-11	1.96E-10	2.93E-10	3.91E-10	5.87E-10	7.82E-10	9.78E-10
18	124-18-5	Decane		8,16	142.28	0.26	1.43E-11	4.29E-11	7.15E-11	1.43E-10	2.14E-10	2.86E-10	4.29E-10	5.72E-10	7.15E-10
19	629-73-2	n-Hexadecane			224.43	0.86	5.52E-12	1.65E-11	2.76E-11	5.52E-11	8.27E-11	1.10E-10	1.65E-10	2.21E-10	2.76E-10
20	622-96-8	4-Ethyltoluene			120.19	4.23	5.51E-12	1.65E-11	2.76E-11	5.51E-11	8.27E-11	1.10E-10	1.65E-10	2.20E-10	2.76E-10
21	620-14-4	3-Ethyltoluene			120.19	7.44	2.59E-12	7.76E-12	1.29E-11	2.59E-11	3.88E-11	5.17E-11	7.76E-11	1.03E-10	1.29E-10
22	611-14-3	2-Ethyltoluene			120.19	0.98	8.55E-13	2.56E-12	4.27E-12	8.55E-12	1.28E-11	1.71E-11	2.56E-11	3.42E-11	4.27E-11

Table 19 は、WCO15 を燃料として本研究の小型ディーゼルエンジンを使用している作業場内における、労働者の VOCs 暴露による発癌率に関する健康リスク評価値を示す。発癌率は労働期間 1 年の場合 $1.96\text{E}-05$ 、および 50 年の場合 $9.79\text{E}-04$ となる。WCO15 の排気ガスからは、IARC 基準発癌物質の Benzene (Cas No. 71-43-2, Group 1), Styrene (Cas No. 100-42-5, Group 2B), Ethylbenzene (Cas No. 100-41-4, Group 2B), 1,4-Dichlorobenzene (Cas No. 106-46-7, Group 2B), および Dibromochloromethane (Cas No. 124-48-1, Group 2B) の 5 種類が検出された。

Table 19 Risk assessment of small engine exhaust(Fuel : WCO15, Carcinogen)

	CAS Number	Name	IARC Group	Health Effect (HE Code)	molecular weight	Concentration ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Exposure period(years)									
							1	3	5	10	15	20	30	40	50	
1	71-43-2	Benzene	1	1,4,7,8,12,14	78.1	57.71	1.90E-05	5.71E-05	9.51E-05	1.90E-04	2.85E-04	3.80E-04	5.71E-04	7.61E-04	9.51E-04	
2	100-42-5	Styrene	2B	2,7,8,11,15	104.2	47.95	4.37E-07	1.31E-06	2.19E-06	4.37E-06	6.56E-06	8.74E-06	1.31E-05	1.75E-05	2.19E-05	
3	100-41-4	Ethylbenzene	2B	3,7,8,11,15	106.2	11.51	1.31E-07	3.92E-07	6.54E-07	1.31E-06	1.96E-06	2.62E-06	3.92E-06	5.23E-06	6.54E-06	
4	106-46-7	1,4-Dichlorobenzene	2B	3,7	147	2.46	5.95E-12	1.78E-11	2.97E-11	5.95E-11	8.92E-11	1.19E-10	1.78E-10	2.38E-10	2.97E-10	
5	124-48-1	Dibromochloromethane	2B		208.28	1.98	6.90E-13	2.07E-12	3.45E-12	6.90E-12	1.03E-11	1.38E-11	2.07E-11	2.76E-11	3.45E-11	
		Total Carcinogen risk					1.96E-05	5.88E-05	9.79E-05	1.96E-04	2.94E-04	3.92E-04	5.88E-04	7.83E-04	9.79E-04	

Table 20 は、WCO15 に関する非発癌物質の健康リスク評価値について、最も管理が必要な物質から順にリストアップしたものである。

Table 20 Risk assessment of small engine exhaust(Fuel : WCO15, Non-Carcinogen)

	CAS Number	Name	IARC Group	Health Effect (HE Code)	molecular weight	Concentration ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Exposure period(years)									
							1	3	5	10	15	20	30	40	50	
1	95-63-6	1,2,4-Trimethylbenzene		7,9,11,12,15	120.2	24.51	2.62E-09	7.87E-09	1.31E-08	2.62E-08	3.94E-08	5.25E-08	7.87E-08	1.05E-07	1.31E-07	
2	127-91-3	β -Pinene		11	136.24	12.65	2.05E-09	6.15E-09	1.02E-08	2.05E-08	3.07E-08	4.10E-08	6.15E-08	8.19E-08	1.02E-07	
3	108-88-3	Toluene	3	5,7,15	92.1	45.87	6.74E-10	2.02E-09	3.37E-09	6.74E-09	1.01E-08	1.35E-08	2.02E-08	2.70E-08	3.37E-08	
4	629-59-4	Tetradecane			198.39	7.98	5.84E-10	1.75E-09	2.92E-09	5.84E-09	8.76E-09	1.17E-08	1.75E-08	2.34E-08	2.92E-08	
5	526-73-8	1,2,3-Trimethylbenzene		7,9,11,12,15	120.2	0.97	4.70E-10	1.41E-09	2.35E-09	4.70E-09	7.06E-09	9.41E-09	1.41E-08	1.88E-08	2.35E-08	
6	629-62-9	Pentadecane			212.41	117.35	4.60E-10	1.38E-09	2.30E-09	4.60E-09	6.90E-09	9.21E-09	1.38E-08	1.84E-08	2.30E-08	
7	106-42-3	p-Xylene	3	3,4,7,8,12,15	106.2	21.42	3.47E-10	1.04E-09	1.74E-09	3.47E-09	5.21E-09	6.94E-09	1.04E-08	1.39E-08	1.74E-08	
8	108-67-8	Mesitylene		7,9,11,12,15	120.2	1.85	3.02E-10	9.06E-10	1.51E-09	3.02E-09	4.53E-09	6.04E-09	9.06E-09	1.21E-08	1.51E-08	
9	108-38-3	m-Xylene	3	3,4,7,8,12,15	106.2	11.81	2.98E-10	8.94E-10	1.49E-09	2.98E-09	4.47E-09	5.96E-09	8.94E-09	1.19E-08	1.49E-08	
10	108-11-7	2,4-Dimethylpentane			100.21	13.76	1.52E-10	4.56E-10	7.60E-10	1.52E-09	2.28E-09	3.04E-09	4.56E-09	6.08E-09	7.60E-09	
11	95-47-6	o-Xylene	3	3,4,7,8,12,15	106.2	2.40	1.29E-10	3.87E-10	6.44E-10	1.29E-09	1.93E-09	2.58E-09	3.87E-09	5.16E-09	6.44E-09	
12	111-84-2	Nonane		8,16	128.3	4.37	1.19E-10	3.56E-10	5.94E-10	1.19E-09	1.78E-09	2.38E-09	3.56E-09	4.75E-09	5.94E-09	
13	629-73-2	n-Hexadecane			224.43	18.06	8.89E-11	2.67E-10	4.45E-10	8.89E-10	1.33E-09	1.78E-09	2.67E-09	3.56E-09	4.45E-09	
14	142-82-5	Heptane		7,8,16	100.2	9.72	8.72E-11	2.62E-10	4.36E-10	8.72E-10	1.31E-09	1.74E-09	2.62E-09	3.49E-09	4.36E-09	
15	111-65-9	Octane		8,11,16	114.2	14.40	7.84E-11	2.35E-10	3.92E-10	7.84E-10	1.18E-09	1.57E-09	2.35E-09	3.14E-09	3.92E-09	
16	78-93-3	2-Butanone		7,8,16	72.1	4.37	1.99E-08	5.98E-08	9.97E-08	1.99E-07	2.99E-07	3.99E-07	5.98E-07	7.97E-07	9.97E-07	
17	71-23-8	1-Propanol		7,8,16	60.1	8.83	6.55E-12	1.97E-11	3.28E-11	6.55E-11	9.83E-11	1.31E-10	1.97E-10	2.62E-10	3.28E-10	
18	622-96-8	4-Ethyltoluene			120.19	3.38	2.79E-12	8.36E-12	1.39E-11	2.79E-11	4.18E-11	5.57E-11	8.36E-11	1.11E-10	1.39E-10	
19	620-14-4	3-Ethyltoluene			120.19	4.98	1.19E-12	3.56E-12	5.94E-12	1.19E-11	1.78E-11	2.38E-11	3.56E-11	4.75E-11	5.94E-11	
20	611-14-3	2-Ethyltoluene			120.19	0.68	3.64E-13	1.09E-12	1.82E-12	3.64E-12	5.45E-12	7.27E-12	1.09E-11	1.45E-11	1.82E-11	

Table 21 は、WCO20 を燃料として本研究の小型ディーゼルエンジンを使用している作業場内における、労働者の VOCs 暴露による発癌率に関する健康リスク評価値を示す。発癌率は労働期間 1 年の場合 $3.83E-05$ 、および 50 年の場合 $1.91E-03$ となる。WCO20 の排気ガスからは、IARC 基準発癌物質の Benzene (Cas No. 71-43-2, Group 1), 1,4-Dichlorobenzene (Cas No. 106-46-7, Group 2B), Ethylbenzene (Cas No. 100-41-4, Group 2B), 2-Propanol (Cas No. 67-63-0, Group 1), および 1,2-Dichloroethane (Cas No. 1107-06-2, Group 2B) の 5 種類が検出された。

Table 21 Risk assessment of small engine exhaust(Fuel : WCO20, Carcinogen)

	CAS Number	Name	IARC Group	Health Effect (HE Code)	molecular weight	Concentration ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Exposure period(years)								
							1	3	5	10	15	20	30	40	50
1	71-43-2	Benzene	1	1,4,7,8,12,14	78.1	42.89	2.11E-05	6.32E-05	1.05E-04	2.11E-04	3.16E-04	4.22E-04	6.32E-04	8.43E-04	1.05E-03
2	106-46-7	1,4-Dichlorobenzene	2B	3,7	147	16.33	8.03E-06	2.41E-05	4.01E-05	8.03E-05	1.20E-04	1.61E-04	2.41E-04	3.21E-04	4.01E-04
3	100-41-4	Ethylbenzene	2B	3,7,8,11,15	106.2	9.52	4.68E-06	1.40E-05	2.34E-05	4.68E-05	7.02E-05	9.36E-05	1.40E-04	1.87E-04	2.34E-04
4	67-63-0	2-Propanol	1	7,8,16	60.1	5.70	2.80E-06	8.40E-06	1.40E-05	2.80E-05	4.20E-05	5.60E-05	8.40E-05	1.12E-04	1.40E-04
5	107-09-2	1,2-Dichloroethane	2B	3,7,15	99	3.40	1.67E-06	5.02E-06	8.37E-06	1.67E-05	2.51E-05	3.35E-05	5.02E-05	6.69E-05	8.37E-05
		Total Carcinogen risk					3.83E-05	1.15E-04	1.91E-04	3.83E-04	5.74E-04	7.65E-04	1.15E-03	1.53E-03	1.91E-03

Table 22 は、WCO20 に関する非発癌物質の健康リスク評価値について、最も管理が必要な物質から順にリストアップしたものである。

Table 22 Risk assessment of small engine exhaust(Fuel : WCO20, Non-Carcinogen)

	CAS Number	Name	IARC Group	Health Effect (HE Code)	molecular weight	Concentration ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Exposure period(years)								
							1	3	5	10	15	20	30	40	50
1	629-59-4	Tetradecane			198.39	141.98	2.33E-06	6.98E-06	1.16E-05	2.33E-05	3.49E-05	4.65E-05	6.98E-05	9.30E-05	1.16E-04
2	629-50-5	Tridecane			184.36	99.52	1.63E-06	4.89E-06	8.15E-06	1.63E-05	2.45E-05	3.26E-05	4.89E-05	6.52E-05	8.15E-05
3	108-88-3	Toluene	3	5,7,15	92.1	63.00	1.03E-06	3.10E-06	5.16E-06	1.03E-05	1.55E-05	2.06E-05	3.10E-05	4.13E-05	5.16E-05
4	629-73-2	n-Hexadecane			224.43	48.50	7.95E-07	2.38E-06	3.97E-06	7.95E-06	1.19E-05	1.59E-05	2.38E-05	3.18E-05	3.97E-05
5	124-18-5	Decane		8,16	142.28	33.75	5.53E-07	1.66E-06	2.76E-06	5.53E-06	8.29E-06	1.11E-05	1.66E-05	2.21E-05	2.76E-05
6	629-62-9	Pentadecane			212.41	28.22	4.62E-07	1.39E-06	2.31E-06	4.62E-06	6.93E-06	9.25E-06	1.39E-05	1.85E-05	2.31E-05
7	111-84-2	Nonane		8,16	128.3	23.79	3.90E-07	1.17E-06	1.95E-06	3.90E-06	5.84E-06	7.79E-06	1.17E-05	1.56E-05	1.95E-05
8	106-42-3	p-Xylene	3	3,4,7,8,12,15	106.2	17.74	2.91E-07	8.72E-07	1.45E-06	2.91E-06	4.36E-06	5.81E-06	8.72E-06	1.16E-05	1.45E-05
9	108-38-3	m-Xylene	3	3,4,7,8,12,15	106.2	11.53	1.89E-07	5.67E-07	9.44E-07	1.89E-06	2.83E-06	3.78E-06	5.67E-06	7.55E-06	9.44E-06
10	1120-21-4	Undecane			136.234	9.14	1.50E-07	4.49E-07	7.49E-07	1.50E-06	2.25E-06	3.00E-06	4.49E-06	5.99E-06	7.49E-06
11	620-14-4	3-Ethyltoluene			120.19	9.08	1.49E-07	4.46E-07	7.44E-07	1.49E-06	2.23E-06	2.98E-06	4.46E-06	5.95E-06	7.44E-06
12	95-47-6	o-Xylene	3	3,4,7,8,12,15	106.2	8.83	1.45E-07	4.34E-07	7.23E-07	1.45E-06	2.17E-06	2.89E-06	4.34E-06	5.79E-06	7.23E-06
13	95-63-6	1,2,4-Trimethylbenzene		7,9,11,12,15	120.2	7.90	1.29E-07	3.88E-07	6.47E-07	1.29E-06	1.94E-06	2.59E-06	3.88E-06	5.18E-06	6.47E-06
14	108-67-8	Mesitylene		7,9,11,12,15	120.2	6.81	1.12E-07	3.35E-07	5.58E-07	1.12E-06	1.67E-06	2.23E-06	3.35E-06	4.46E-06	5.58E-06
15	622-96-8	4-Ethyltoluene			120.19	6.18	1.01E-07	3.04E-07	5.06E-07	1.01E-06	1.52E-06	2.02E-06	3.04E-06	4.05E-06	5.06E-06
16	78-93-3	2-Butanone		7,8,16	72.1	5.20	8.51E-08	2.55E-07	4.26E-07	8.51E-07	1.28E-06	1.70E-06	2.55E-06	3.40E-06	4.26E-06
17	611-14-3	2-Ethyltoluene			120.19	4.70	7.70E-08	2.31E-07	3.85E-07	7.70E-07	1.16E-06	1.54E-06	2.31E-06	3.08E-06	3.85E-06
18	111-65-9	Octane		8,11,16	114.2	4.10	6.72E-08	2.02E-07	3.36E-07	6.72E-07	1.01E-06	1.34E-06	2.02E-06	2.69E-06	3.36E-06
19	112-40-3	Dodecane			170.33	2.79	4.58E-08	1.37E-07	2.29E-07	4.58E-07	6.87E-07	9.16E-07	1.37E-06	1.83E-06	2.29E-06
20	112-31-2	Decanal			156.27	2.13	3.49E-08	1.05E-07	1.74E-07	3.49E-07	5.23E-07	6.97E-07	1.05E-06	1.39E-06	1.74E-06
21	526-73-8	1,2,3-Trimethylbenzene		7,9,11,12,15	120.2	0.57	9.41E-09	2.82E-08	4.71E-08	9.41E-08	1.41E-07	1.88E-07	2.82E-07	3.76E-07	4.71E-07

3.4.4 健康リスク評価結果

以上をまとめると、Total VOCs (TVOCs) 濃度は 軽油(WCO0)は 310.16, WCO10は 219.17, WCO15は 450.95, および WCO20は 613.29 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] であり、WCO10が最も少なかったが、発癌物質による健康リスク評価値(50年間暴露)についても軽油(WCO0)は 4.46E-04, WCO10は 3.62E-04, WCO15は 9.79E-04 および WCO20は 1.91E-03 のように、WCO10が最も少なかった。

しかしこれらのデータは、小型ディーゼルエンジンから直接排出される排気ガスが、直接労働者に暴露したと仮定したものである。近

年は小型エンジンを使う工場、あるいは除草作業、農作業、特殊車両による作業などにおいて、排気ガスに対する健康リスク及び作業環境の改善に対して多くの投資が必要とされている。従って、労働者に対する排気ガスの直接的な暴露は少なくなってきたと予想される。しかし、まだ国によっては換気施設がない工場や排気口に工夫がされていない農業機械、特に、小型 tractor 及び除草機など、直接的な暴露が存在するものもある。実際にこれらの作業環境における肺癌発病率は他の一般労働者より高く現われる。

従って、世界的には排気ガスに対する対策及び研究がさらに必要であるといえる。その場合、本研究で調べた方法を応用して、例えば本研究の WC010 のように健康リスク評価値の低い燃料を選択して使用することが望ましい。

本研究では WC010 が軽油より健康リスク評価値が低かった。これにより、バイオ燃料の使用は資源及び環境保護のために必要であるのみならず、健康・保健学的にも有用であることが分かる。

しかし Waste Cooking Oil を本来の燃料、すなわち 軽油 と混焼する場合、混合割合を正しく調整しなければ、エンジンの力学的特性を損なうのみならず、健康・保健学的にも逆効果が現れる場合がある。本研究では WC015 と WC020 では、むしろ 軽油 より健康リスク評価値が高くなった。よって適正な混合割合に対するさらなる研究が必要であると考えられる。他の研究者の論文では、軽油より WC010 が環境的に良い結果を与える事例が多く報告されている。本研究では、WCO と 軽油の混合割合の最適値を調べるには至らなかったが、WC010 の排気ガスにおいて VOCs 物質が少なく、また発癌物質も少ないことが確認できた。

個別 VOCs の場合、Total VOCs のように各事例ごとに比較することが容易ではないという事情もあるが、アメリカ、日本、韓国、ヨーロッパの作業場室内環境基準を適用する場合、本研究の WC020 の排気ガスが最大限に労働者に影響する場合、Total VOCs の基準である $500 \mu\text{g}/\text{m}^3$ を超過している。換気施設が不十分な場合、排気ガスの VOCs 濃度が高い場合は、VOCs の施設への沈着などの危険性も考えられ、健康上の危険を惹起させることが予想される。

ディーゼルエンジンの排気口が運転席の前方にある農業用トラクタの場合、運転者が直接的に排気ガスに暴露する可能性が高く、排気システムや運転席の改善など対応が急がれる。密閉されている工場の換気設備に対しては、吸気及び排気設備に対する正確な余裕率の

計算など、適切な設計がなされなければならない。また施設の運用面では、VOCs を含む排気ガスが適切に排気されるように、管理者を置いて持続的にモニタリングを行うと同時に、労働者に対する継続的な教育が必要であると判断される。

3.5 ライフサイクルアセスメントおよびその結果

3.5.1 ライフサイクルアセスメントの範囲

実験結果をもとに、地球温暖化係数（GWP : Global Warming Potential）を用いて、ライフサイクルアセスメント（LCA）による温室効果ガス排出量の比較を行った。対象とする範囲は、軽油の製造、および各燃料の燃焼までとする。なお軽油の精製所から代替燃料精製工場までの輸送工程、エンジン製造工程は対象外とした。使用するエンジンは、三重大学構内のテストベンチにおいて小型ディーゼルエンジンにあるものとする。LCA に対する比較評価に対する研究流れ図は Fig. 7 に示す。

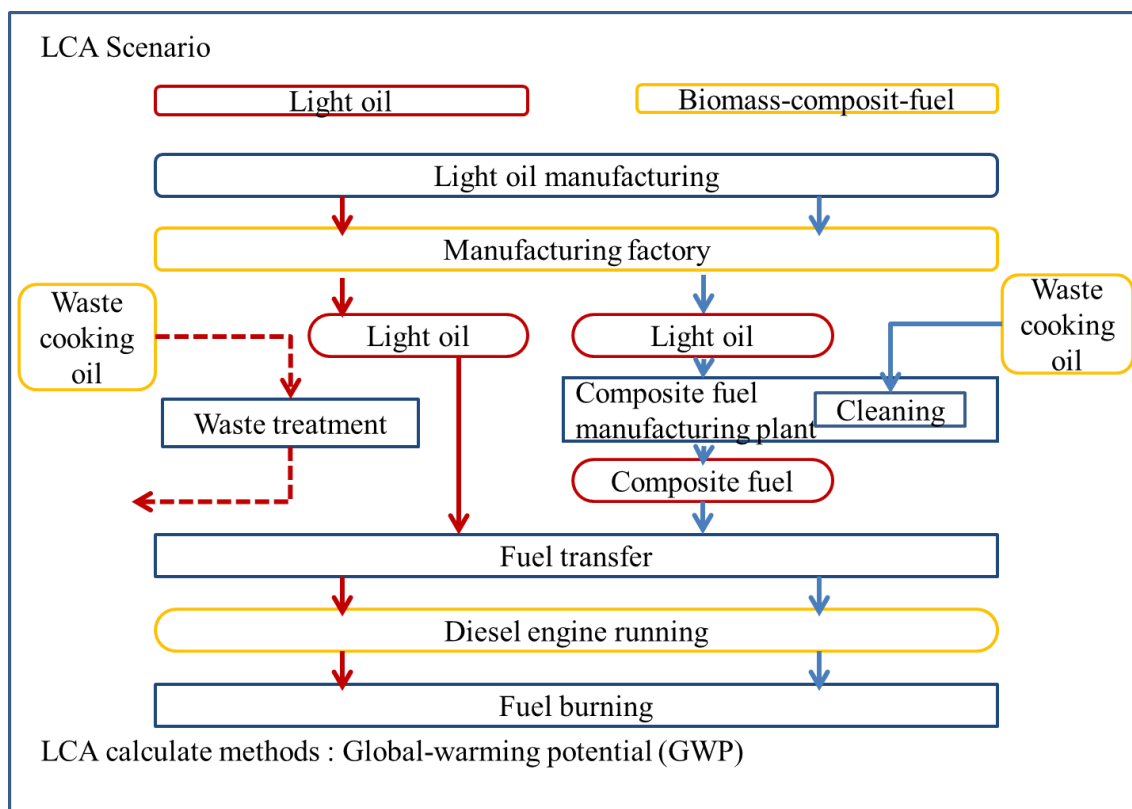


Fig. 7 Main evaluation step in LCA evaluation

ここで、MILCAによる日本版被害算定方式の、本研究に関連する地球温暖化に関するインベントリデータを列挙すると、Table 23 のようになる。なお、インベントリ項目は、CO₂、CH₄、N₂O、SO_x、NO_x など124種類とする。例えば、軽油1ℓの製造工程においては、CO₂を2.11E-01kg 排出することを示している。

Table 23 Inventory data of Japan Calculation Standards

	CO ₂ [Kg]	CH ₄ [Kg]	N ₂ O [Kg]	SO _x [Kg]	NO _x [Kg]
Light Oil (Manufacture :ℓ)	2.11E-01	3.16E-03	4.69E-05	1.41E-04	2.44E-04
Light Oil (Manufacture :ℓ)	2.84E+00	3.17E-03	4.71E-05	1.42E-04	1.01E-03
Waste Cooking Oil (Manufacture :ℓ)	—	5.19E-07	9.09E-06	—	—
Power generation, power (Use:KWh)	5.36E-01	1.95E-04	4.60E-05	5.72E-05	1.98E-04

3.5.2 各工程のインベントリ分析

3.5.2.1 混合燃料製造のための工場建物建設

算定には、日本建築学会の床面積当たりの建築物の用途別、構造別環境負荷原単位を利用し、聞き取りおよび実測調査によって得られた目的プラントの立て替え周期と延床面積に対応する環境負荷原単位を乗じることにより、建築物建設に係る環境負荷量を求めた。算定に用いる建築設備の延床面積当たり年平均ライフサイクル環境負荷

物質排出量を、「建物のLCA指針-温暖化・資源消費・廃棄物対策のための評価ツール 2-」（日本建築学会）などにより算出する。求められた環境負荷を、プラントの年間生産量で除することにより、混合燃料1KL当たりの環境負荷量を求める。廃植物油混合燃料製造工場の規模は以下の通りである。

- ・工場延床面積：229.04 m²
- ・工場立替周期：20年
- ・年間混合燃料生産量：日間生産量30kl/日×月間稼働日数20日×12か月=7200kl/年

Table 24 Total floor area banner year average life cycle environmental impact substances emissions of factory (Environmental load /year・m²) [Architectural Institute of Japan, 1995]

		Consumption	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	SO _x	NO _x
Fuel	Burning material	L	kg	kg	kg	kg	Kg
WCO0	Light oil	1	2.84E+00	3.17E-03	4.69E-05	1.41E-04	2.44E-04
	Light oil	0.9	2.55E+00	2.86E-03	4.22E-05	1.27E-04	2.19E-04
WCO10	Waste cooking oil	0.1	0	5.19E-08	9.08E-07	0	0
	Total	1	2.55E+00	2.856E-03	4.308E-05	1.27E-04	2.19E-04
	Light oil	0.85	2.41E+00	2.697E-03	3.983E-05	1.20E-04	2.07E-04
WCO15	Waste cooking oil	0.15	0	7.79E-08	1.36E-06	0	0
	Total	1	2.41E+00	2.70E-03	4.12E-05	1.20E-04	2.07E-04
	Light oil	0.8	2.27E+00	2.54E-03	3.75E-05	1.13E-04	1.95E-04
WCO20	Waste cooking oil	0.2	0	1.04E-07	1.82E-06	0	0
	Total	1	2.27E+00	2.54E-03	3.93E-05	1.13E-04	1.95E-04

次に Table 24 から当該実験室の規模にあてはめる値として、立替周期 35 年，規模 1000m² 未満の値を用いる。工場建物の年間環境負荷量と廃植物油燃料 1kℓ 当たりの環境負荷量を計算する。

3.5.2.2 精製設備の製造

廃植物油混合燃料精製（製造）に関する設備を製造するための環境負荷は、産業連関表より、設備価格の環境負荷原単位を掛けることで算出する。聞き取り調査により、当該総設備費用は 17431346 円、償却年数は 7 年、年間廃植物油混合燃料生産量は 7200kℓ であった。これにより混合燃料精製 1kℓ 当たりの環境負荷を Table 25 に示す。

Table 25 When building a mixed fuel fabrication plant buildings, emissions quantity of producing of biomass-composite-fuel per 1 L during the environmental load

Alternative Fuel Production (KL)	Total ground space (m ²)	Factory scale (m ²)	Energy (MJ)	CO ₂ (kg)	SO ₂ (kg)	NO ₂ (kg)
		1000m ² Under	2.54E+02	1.58E+01	2.71E+01	4.36E+01
7200	229.04		5.82E+04	3.62E+03	6.21E+03	9.99E+03
1			8.08E+00	5.03E-01	8.62E-01	1.39E+00
0.001(1L)			8.08E-03	5.03E-04	8.62E-04	1.39E-03

3.5.3 インベントリ分析結果

各工程の環境負荷を合計し、各燃料の 1ℓ 当たりの環境負荷を算出すると、Table 26 のようになる。

Table 26 Biomass-composite-fuel per 1 L of environmental impact substances emitted during production estimates in the refinery

biomass-composite-fuel (kL)	Depreciation (Year)	Energy (MJ)	CO ₂ (kg)	SO _x (kg)	NO _x (kg)	Power Consumption(kWh)
50400	7	4.59E+04	2.69E+03	2.93E+00	4.97E+00	8.92E+04
1		8.00E+05	4.70E+04	5.10E+01	8.67E+01	1.77E+00
0.001(1L)		1.59E+01	9.32E-01	1.01E-03	1.72E-03	1.77E-03
		1.59E-02	9.32E-04	1.01E-06	1.72E-06	1.77E-03

3.5.3.1 影響評価

本研究の影響評価は GWP により行う。地球温暖化係数（GWP: Global Warming Potential）は CH₄ や N₂O などの CO₂ 以外の温室効果ガス 1kg の温室効果が、CO₂ 1kg の何倍の温室効果があるかを表すものである。各温室効果ガスの GWP 値を Table 27 に示す。なお、Table 27 は IPCC 第二次報告書による GWP 値を利用する。

また、Table 28 で算出したインベントリ分析により、各燃料の GWP を算出したものを Table 29 に示す。

Table 27 Environmentally hazardous substances emissions per 10 light oil and waste cooking oil fuel

		Consumption	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	SO _x	NO _x
Fuel	Stage	ℓ	kg	kg	kg	kg	kg
WCO 0	Manufacturing segment order	1	2.110E-01	3.156E-03	4.686E-05	1.410E-04	2.435E-04
	Combustion stage		2.836E+00	3.173E-03	4.686E-05	1.410E-04	2.435E-04
	Total		3.047E+00	6.329E-03	9.372E-05	2.820E-04	4.870E-04
WCO 10	Manufacturing buildings	1	5.030E-04	–	–	8.620E-04	1.390E-03
	Manufacturing Equipment		9.320E-04	–	–	1.010E-06	1.720E-06
	Manufacturing segment order		1.908E-01	2.841E-03	4.226E-05	1.270E-04	2.195E-04
	Combustion stage		2.552E+00	2.856E-03	4.308E-05	1.269E-04	2.192E-04
	Total		2.745E+00	5.696E-03	8.534E-05	1.117E-03	1.830E-03
	Manufacturing buildings		5.030E-04	–	–	8.620E-04	1.390E-03
WCO 15	Manufacturing buildings	1	5.030E-04	–	–	8.620E-04	1.390E-03
	Manufacturing		9.320E-04	–	–	1.010E-06	1.720E-06

	Equipment						
	Manufacturing segment order		1.803E-01	2.683E-03	3.991E-05	1.200E-04	2.073E-04
	Combustion stage		2.411E+00	2.697E-03	4.119E-05	1.199E-04	2.070E-04
	Total		2.592E+00	5.380E-03	8.111E-05	1.103E-03	1.806E-03
WCO 20	Manufacturing buildings	1	5.030E-04	-	-	8.620E-04	1.390E-03
	Manufacturing Equipment		9.320E-04	-	-	1.010E-06	1.720E-06
	Manufacturing segment order		1.697E-01	2.525E-03	3.757E-05	1.129E-04	1.952E-04
	Combustion stage		2.269E+00	2.539E-03	3.930E-05	1.128E-04	1.948E-04
	Total		2.440E+00	5.064E-03	7.687E-05	1.089E-03	1.782E-03

Table 28 LCA of greenhouse gas emissions and GWP

Types of Greenhouse Gas		Emission Sources	Global Warming Potential (GWP)
Carbon Dioxide(CO ₂)		Fossil fuel, unspecified	1
		Fossil fuel, metro area	
		Creature	
Methane(CH ₄)		Fossil Fuel	21
		Causes not output	
Nitrous oxide(N ₂ O)		Unspecific	310
		Metro area	
Hydro fluoro carbons (HFCs)	HFC-23	-	11,700
	HFC-32	-	650
	HFC-41	-	150
	HFC-43-10mee	-	1,300
	HFC-125	-	2,800
	HFC-134	-	1,000
	HFC-134a	-	1,300
	HFC-143	-	300
	HFC-143a	-	3,800
	HFC-152a	-	140
	HFC-227ea	-	2,900
	HFC-236fa	-	6,300
	HFC-245ca	-	560
Per fluoro carbons (PFCs)	PFC-14	-	6,500
	PFC-116	-	9,200
	PFC-218	-	7,000
	PFC-31-10	-	7,000
	PFC-c318	-	8,700
	PFC-41-12	-	7,500
	PFC-51-14	-	7,400
Sulfur Hexafluoride(SF ₆)		-	23,900

Table 29 GWP per each fuel 1l

	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	GWP
WCO0	3.047E+00	6.329E-03	9.372E-05	3.209E+00
WCO10	2.745E+00	5.696E-03	8.534E-05	2.891E+00
WCO15	2.592E+00	5.380E-03	8.111E-05	2.730E+00
WCO20	2.440E+00	5.064E-03	7.687E-05	2.570E+00

CH₄ および N₂O の温暖化係数がそれぞれ 21 および 310 であることを考慮すると、軽油および各廃植物油混合燃料を 1l 使用する場合の GWP (Global Warming Potential) は、軽油 : 3.209, および WCO10 : 2.891, WCO15 : 2.730, WCO20 : 2.570 となる。

(1) 本研究ではエンジントルク一定の条件下、20 分間駆動した軽油と同じエネルギー量を発生する時の各廃植物油混合燃料の燃料消費量を算出し、さらに、各廃植物油混合燃料の GWP および GWP 削減率 (カーボンニュートラル考慮) を算出すると、Table 30 のようになる。

これによると、今回試験を行った各燃料を用いることにより、実質的に GWP を WCO20 の場合 16%, WCO10 の場合でも 10%削減することができる。

以上の結果から、廃植物油混合燃料は軽油よりも温室効果ガスの排出の抑制を促進するものと考えられる。

Table 30 Fuel consumption rate and GWP of each fuel when that occurs the same amount of energy as light oil(GWP / 20 minutes)

	Energy generated [MJ]	Fuel consumption [ℓ/20 minutes]	Fuel GWP with the same energy as WCO0	GWP reduction rate due to carbon neutral [%]
WCO0	2.581	0.28	8.99E-01	—
WCO10	2.573	0.28	8.12E-01	-10%
WCO15	2.571	0.286	7.84E-01	-13%
WCO20	2.56	0.292	7.57E-01	-16%

3.6 廃植物油混焼小型ディーゼルエンジンの LCA 統合化による費用

便益分析

LCA の統合化は、被害評価結果を単一指標化する。地球温暖化や人間健康など特定の影響領域に対する潜在的影響量を評価する特性化と、様々な環境影響を統合して単一指標を得る統合化のための手法である。

本研究は環境影響を単一指標で表現するため、インベントリ分析の解析結果に基づいて、MILCA データベースの統合化計算機能を使用し、軽油および廃植物油混合燃料 1 ℓによる小型ディーゼルエンジン駆動のライフサイクル環境負荷を経済的コストにより計算し、その結果を統一指標である円で示す (Table 31)。

さらに、当該小型ディーゼルエンジンが軽油により 20 分間駆動されている間に発生するエネルギーと等価のエネルギーを、各廃植物油混合燃料が発生すると考えられる燃料のライフサイクル環境負荷を、やはり経済的コスト円により算出した (Table 32)。

以上の結果から、小型ディーゼルエンジンを軽油で 20 分間駆動したときと同じエネルギー量を発生する各廃植物油混合燃料による当該エンジンの駆動において、経済コストは、WCO20 の時最も少なく、WCO10 でも WCO0 と比較しておよそ 9.5%少ないことがわかった。

Table 31 Lifecycle social costs calculated with integration function of MILCA for fuels /10

	Fuel [ℓ]	Social cost [Yen/ℓ]
WCO0	1	0.9
WCO10	1	0.81
WCO15	1	0.765
WCO20	1	0.72

Table 32 Lifecycle social costs for fuels /2.581MJ and reduction rates

	Energy generated [MJ]	Fuel consumption [ℓ/2.581MJ]	Fuel consumption [ℓ/2.581MJ]	Social cost [Yen]	Reduction rate
WCO0	2.581	0.28	0.280	0.252	-
WCO10	2.573	0.28	0.281	0.228	-0.097
WCO15	2.571	0.286	0.287	0.220	-0.128
WCO20	2.56	0.292	0.294	0.212	-0.159

3.7 廃植物油混焼小型ディーゼルエンジンの Risk Assessment 健

康費用便益分析（VOCs について）

統計データは、日本の総務省統計局の e-stat における 2010 年を基準とした人口と、「第 13 表医科診療医療費，入院－入院外・年齢階級・傷病分類・年次別」（厚生労働省資料引用する，国立がん研究センターがん対策情報センター 2010 年資料）を利用して WHO で管理している ICD-code（International Classification of Diseases）の C33-34 肺癌 気管，気管支及び肺の悪性新生物資料を検索・利用した。

次に，肺癌の罹患率に対する患者数を把握してその費用を算出するために，国立がん研究センターがん対策情報センターの資料を引

用した。それぞれその資料によると、2010年日本の総人口は128070千名であり、肺癌罹患率は118.29/100000人であった。さらに2010年の肺癌発病者に使用された国費は4236億円であり、一人当たりでは7,153,891円であった。

これをそれぞれ燃料の種類別排気ガスによって発生されるVOCsの影響による肺癌発病率による費用を算出した結果をTable 33～36に示す。

廃食油混合燃料を使用した時の便益を計算した。想定される事業場は、労働者が1000人いる工場を基準とし、その肺癌に対する便益を調べた。

費用便益は1000人の工場内において、小型ディーゼルエンジンの排気ガスに1年から50年間継続して、毎日平均8時間露出したと仮定した。祝日及び休日などは、総務省統計局のデータを利用して計算に用いた。

排気ガス中のVOCsに関し、上記の条件で1000人が1年間勤務したと仮定した場合、WC00の場合、肺癌の病院治療費用は63744円であった。これに対し、WC10の費用は51733円であり、B/C ratio (便益/費用比:費用便益比)は1.23だった。これはWC10はWC00より23%の病院治療費用が少ない結果となることを示す。これらの金額は、排気環境の整っていない工場における勤務者1人あたりの統計的な金額である(以下同様)。

同様にWC15の費用は140114円であり、B/C ratioは0.45およびWC20の費用は273689円であり、B/C ratioは0.23であった。これはWC15、WC20の場合、WC00よりも病院治療コストが多く発生していることを示す。

WC10の場合VOCsの濃度が相対的にWC00より低かったことから費用便益比が高かった。しかしWC15及びWC20の場合燃料を使う度に便益が損害と作用している。

今後は廃植物油を使わずにそのまま廃棄した場合の2次的な環境問題まで考慮する総合的な費用便益分析が必要となると考えられる。

Table 33 Cost-Benefit of small engine exhaust(Fuel : WCO 0, Carcinogen(VOCs))

CAS No.	Name	RA(Duration of exposure, Unit:year)								
		1	3	5	10	15	20	30	40	50
71-43-2	Benzene	6.22E-06	1.87E-05	3.11E-05	6.22E-05	9.34E-05	1.24E-04	1.87E-04	2.49E-04	3.11E-04
100-41-4	Ethylbenzene	2.69E-06	8.06E-06	1.34E-05	2.69E-05	4.03E-05	5.37E-05	8.06E-05	1.07E-04	1.34E-04
Total Carcinogen risk		8.91E-06	2.67E-05	4.46E-05	8.91E-05	1.34E-04	1.78E-04	2.67E-04	3.56E-04	4.46E-04
Treatment of lung cancer morbidity (per person) (Unit:Yen)		7.15E+06	7.15E+06	7.15E+06	7.15E+06	7.15E+06	7.15E+06	7.15E+06	7.15E+06	7.15E+06
Cost (Unit:Yen)		6.37E+04	1.91E+05	3.19E+05	6.37E+05	9.59E+05	1.27E+06	1.91E+06	2.55E+06	3.19E+06
WCO0 Cost (Unit:Yen)		63741	191009	319064	637412	958621	1273393	1910089	2546785	3190635
Benefit (Unit:Yen)		0	0	0	0	0	0	0	0	0
B/C Ratio		1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

Table 34 Cost-Benefit of small engine exhaust(Fuel : WCO 10, Carcinogen(VOCs))

CAS No.	Name	RA(Duration of exposure, Unit:year)								
		1	3	5	10	15	20	30	40	50
71-43-2	Benzene	1.90E-05	5.71E-05	9.51E-05	1.90E-04	2.85E-04	3.80E-04	5.71E-04	7.61E-04	9.51E-04
100-42-5	Styrene	4.37E-07	1.31E-06	2.19E-06	4.37E-06	6.56E-06	8.74E-06	1.31E-05	1.75E-05	2.19E-05
100-41-4	Ethylbenzene	1.31E-07	3.92E-07	6.54E-07	1.31E-06	1.96E-06	2.62E-06	3.92E-06	5.23E-06	6.54E-06
106-46-7	1,4-Dichlorobenzene	5.95E-12	1.78E-11	2.97E-11	5.95E-11	8.92E-11	1.19E-10	1.78E-10	2.38E-10	2.97E-10
124-48-1	Dibromochloromethane	6.90E-13	2.07E-12	3.45E-12	6.90E-12	1.03E-11	1.38E-11	2.07E-11	2.76E-11	3.45E-11
Total Carcinogen risk		1.96E-05	5.88E-05	9.79E-05	1.96E-04	2.94E-04	3.92E-04	5.88E-04	7.83E-04	9.79E-04
Treatment of lung cancer morbidity (per person) (Unit:Yen)		7153891	7153891	7153891	7153891	7153891	7153891	7153891	7153891	7153891
Cost (Unit:Yen)		140114	420343	700572	1401145	2101717	2802290	4203435	5604580	7005725
WCO0 Cost (Unit:Yen)		63741	191009	319064	637412	958621	1273393	1910089	2546785	3190635
Benefit (Unit:Yen)		-76373	-229335	-381509	-763733	-1143096	-1528897	-2293346	-3057795	-3815089
B/C		0.45	0.45	0.46	0.45	0.46	0.45	0.45	0.45	0.46

Table 35 Cost-Benefit of small engine exhaust(Fuel : WCO 15, Carcinogen(VOCs))

CAS No.	Name	RA(Duration of exposure, Unit:year)								
		1	3	5	10	15	20	30	40	50
71-43-2	Benzene	1.90E-05	5.71E-05	9.51E-05	1.90E-04	2.85E-04	3.80E-04	5.71E-04	7.61E-04	9.51E-04
100-42-5	Styrene	4.37E-07	1.31E-06	2.19E-06	4.37E-06	6.56E-06	8.74E-06	1.31E-05	1.75E-05	2.19E-05
100-41-4	Ethylbenzene	1.31E-07	3.92E-07	6.54E-07	1.31E-06	1.96E-06	2.62E-06	3.92E-06	5.23E-06	6.54E-06
106-46-7	1,4-Dichlorobenzene	5.95E-12	1.78E-11	2.97E-11	5.95E-11	8.92E-11	1.19E-10	1.78E-10	2.38E-10	2.97E-10
124-48-1	Dibromochloromethane	6.90E-13	2.07E-12	3.45E-12	6.90E-12	1.03E-11	1.38E-11	2.07E-11	2.76E-11	3.45E-11
Total Carcinogen risk		1.96E-05	5.88E-05	9.79E-05	1.96E-04	2.94E-04	3.92E-04	5.88E-04	7.83E-04	9.79E-04
Treatment of lung cancer morbidity (per person) (Unit:Yen)		7153891	7153891	7153891	7153891	7153891	7153891	7153891	7153891	7153891
Cost (Unit:Yen)		140114	420343	700572	1401145	2101717	2802290	4203435	5604580	7005725
WCO0 Cost (Unit:Yen)		63741	191009	319064	637412	958621	1273393	1910089	2546785	3190635
Benefit (Unit:Yen)		-76373	-229335	-381509	-763733	-1143096	-1528897	-2293346	-3057795	-3815089
B/C		0.45	0.45	0.46	0.45	0.46	0.45	0.45	0.45	0.46

Table 36 Cost-Benefit of small engine exhaust(Fuel : WCO 20, Carcinogen(VOCs))

CAS No.	Name	RA(Duration of exposure, Unit:year)								
		1	3	5	10	15	20	30	40	50
71-43-2	Benzene	2.11E-05	6.32E-05	1.05E-04	2.11E-04	3.16E-04	4.22E-04	6.32E-04	8.43E-04	1.05E-03
106-46-7	1,4-Dichlorobenzene	8.03E-06	2.41E-05	4.01E-05	8.03E-05	1.20E-04	1.61E-04	2.41E-04	3.21E-04	4.01E-04
100-41-4	Ethylbenzene	4.68E-06	1.40E-05	2.34E-05	4.68E-05	7.02E-05	9.36E-05	1.40E-04	1.87E-04	2.34E-04
67-63-0	2-Propanol	2.80E-06	8.40E-06	1.40E-05	2.80E-05	4.20E-05	5.60E-05	8.40E-05	1.12E-04	1.40E-04
107-06-2	1,2-Dichloroethane	1.67E-06	5.02E-06	8.37E-06	1.67E-05	2.51E-05	3.35E-05	5.02E-05	6.69E-05	8.37E-05
Total Carcinogen risk		3.83E-05	1.15E-04	1.91E-04	3.83E-04	5.74E-04	7.65E-04	1.15E-03	1.53E-03	1.91E-03
Treatment of lung cancer morbidity (per person) (Unit:Yen)		7153891	7153891	7153891	7153891	7153891	7153891	7153891	7153891	7153891
Cost(Unit:Yen)		273689	821067	1368445	2736890	4105335	5473780	8210670	10947560	13684450
WCO0 Cost(Unit:Yen)		63741	191009	319064	637412	958621	1273393	1910089	2546785	3190635
Benefit(Unit:Yen)		-209948	-630058	-1049381	-2099478	-3146714	-4200388	-6300581	-8400775	-10493815
B/C		0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23

3.8 3章のまとめ

本研究は、既存の軽油と廃植物油を異なる割合にて混合して作成した3種類の混合燃料を小型ディーゼルエンジンにより燃焼し、その排気ガスのVOCsの濃度を計測・分析し、健康リスク評価を、また動力データなどからライフサイクルアセスメントを実施し、次のような結果を得た。

3.8.1 健康リスク評価による発癌率

排気ガスのTVOCs濃度に関しては、軽油(WC00)は310.16, WC010は219.17, WC015は450.95およびWC020は613.29 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]となり、WC010が一番少なかった。発癌物質による健康リスク評価値(50年間暴露)は軽油(WC00)は4.46E-04, WC010は3.62E-04, WC015は9.79E-04およびWC020は1.91E-03となり、やはりWC010の健康リスク評価値が最も小さい結果となった。

3.8.2 燃料使用におけるライフサイクルアセスメント

駆動トルクを一定とする条件下、対象小型ディーゼルエンジンを20分間駆動し、軽油燃料による発生エネルギーと等価の仕事をする廃植物油混合燃料におけるカーボンニュートラルによるGWP削減率を計算した。その結果、WC010, WC015 および WC020 の順に、軽油に対し、およそ10%, 13% および 16% の削減となることが分かった。

3.8.3 廃植物油混焼小型ディーゼルエンジンのLCA費用便益分析

軽油を燃料とする小型ディーゼルエンジンが20分の駆動で得ることができる2.581[MJ]のエネルギーを得るための、地球温暖化に対する社会経なコストは、WC00は0.252円, WC010は0.228円, WC015は0.22円およびWC020は0.212円となり、エンジン駆動面で

も安定していた WC010 を用いるときでも、約 9.7%の地球温暖化に対する社会コストを節減できることが分かった。

3.8.4 廃植物油混焼小型ディーゼルエンジンの健康費用便益分析

VOCs が存在する現場に1年間勤務したと仮説を設定した場合 WC00 基準で肺癌の病院治療費用は 63744 円であった（この金額は、排気環境の整っていない工場における勤務者 1 人あたりの統計的な金額であり、以下同様）。

）。同様に WC010 の場合は 51733 円であり B/C ratio は 1.23, WC015 の場合は 140114 円であり B/C ratio は 0.45, さらに WC020 の場合は 273689 円であり, B/C ratio は 0.23 であった。

第4章 固形廃植物油を混合したボイラー用代替燃料の環境負荷

4.1 要約

本研究では、ボイラー実体試験を通し、固形廃植物油を20%混合したボイラー用代替燃料(以下代替燃料と表記し、表中などでの略称はNEFとする)の実用性と環境負荷を明らかにすることを目的とする。

固形廃植物油とA重油を混合したボイラー用代替燃料は、固形廃植物油そのものが熱量を有しており、従来のボイラー燃料に比べてコスト削減が可能であることから、良質なエネルギー燃料の供給源とみなせる。更に、固形廃植物油は植物由来であることから、カーボンニュートラルとして扱え、環境保全に配慮した燃料であると言える。これをリサイクル利用できればコスト削減、環境負荷低減の両立が期待できる。

環境負荷評価として、代替燃料製造施設の建設と製造、さらに代替燃料を燃焼させたときの温室効果ガス排出量に関するライフサイクルアセスメントを実施し、A重油の燃料としての使用と比較した。

その結果、代替燃料はA重油と比較してGWP(Global Warming Potential)を10.7%削減できる。なお、廃植物油の混合によりボイラー効率が低下していないことが示されており、現在の20%から更に廃植物油の割合を高めることができる可能性が高いことが分かった。

健康リスクについては、まず自動計測機器を用いてTVOCsなどを実地に調べた。その結果、発癌物質については代替燃料がA重油に比べて9.27%低くなることが確認された。一方、定置化学分析機による個別VOCsの計測においては、代替燃料の方がA重油よりも発癌危険度が低いと解釈することができた。

本研究では、このように、ボイラー用代替燃料の環境負荷を含めた実用性について確認するとともに、その使用段階に対し、健康リスク評価手法を導入することができた。

Keywords : NEF Oil, Waste Cooking Oil, Risk Assessment, Exhaust Gas, Life Cycle Assessment

4.2 概要

固形廃植物油とA重油を混合したボイラー用代替燃料は、固形廃植物油そのものが熱量を有しており、従来のボイラー燃料に比べてコスト削減が可能であることから、良質なエネルギー燃料の供給源とみなせる。更に、固形廃植物油は植物性であることから、カーボンニュートラルとして扱え、環境保全に配慮した燃料であると言える。

本研究は、一般または産業廃棄物として扱われていた固形廃植物油を、重油に混合してリサイクルし、A重油に代替できるかどうか可能性を調べるために、ボイラーの代替燃料としての実用燃焼実験を行う。

さらにこれに伴い、代替燃料の製造及び供給時の温室効果ガス排出量に関するライフサイクルアセスメント(Life Cycle Assessment:LCA)と、排気ガスによる二次的環境汚染の確認を行うために、健康リスク評価(Risk Assessment:RA)を実施し、従来のA重油によるボイラー排気ガスと比較評価を行う。

4.3 実験装置及び方法

4.3.1 実験装置概要

ボイラー2台を使用してボイラー実機試験を行った。対象とする試験油は、①固形廃植物油20%使用代替燃料(以下代替燃料)、②100%A重油、の2種である。②は比較材として用いる。また、ボイラー実機試験のボイラー対象部位は、伝熱管、燃料噴射ノズル、燃焼室底部、の3ヶ所である。

また、代替燃料のボイラー効率を見るため、燃料の流量と温度、水蒸気の流量と温度といったデータを計測・導出する。

測実験用ボイラーの管路と計測項目の概要を Fig. 8 に示す。NEF を燃料とするボイラーと A 重油を燃料とするボイラーは同じ形式、すなわちサムソン(株)の貫流型蒸気ボイラーTU-200S であり、周辺管路や計測項目も全く同じである。各ボイラーの主要な計測項目は、アナログデータは給水温度(CH1)、燃料温度(CH2)、蒸気温度(CH3)、排気温度(CH4)であり、パルスデータは給水流量積算(給水積算:Pulse1)、燃料流量積算(燃料積算:Pulse2)、排水流量積算(排水積算:Pulse3)である。

発生する蒸気は純水となるため、給水配管中に水道水中の不純物が溜まる。そのため、定期的にブローを行うため水を使用する。この部分の流量も測定できるようにしてある。

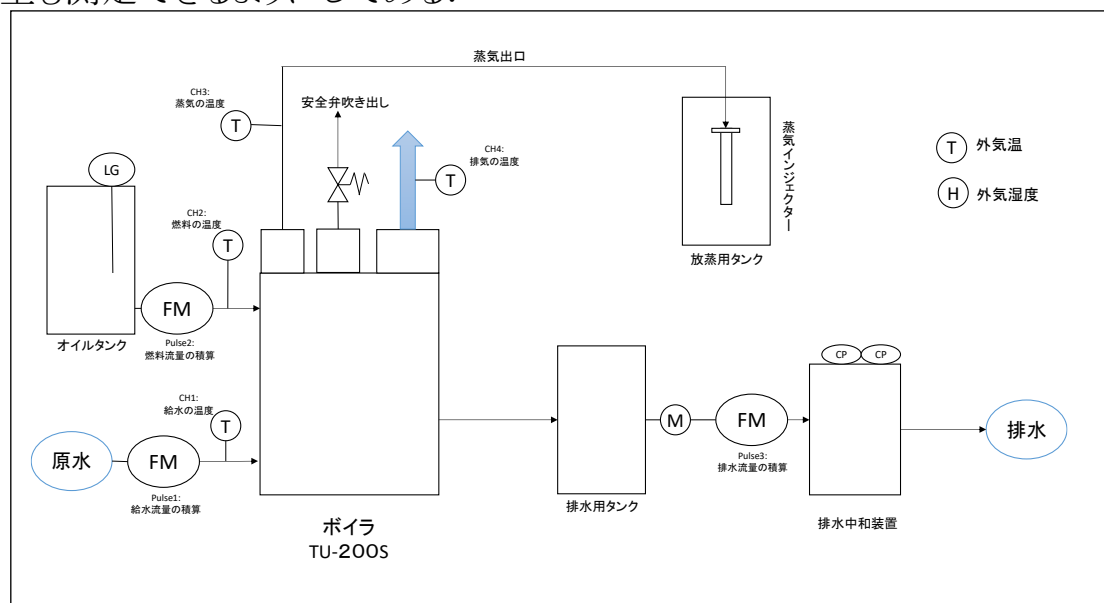


Fig. 8 Steam boiler system

Fig. 9 にボイラー装置外観を示す. 貫流式蒸気ボイラー1号機, 2号機(いずれもサムソン(株)製, 燃油量 14.10/h)を用いる(A重油用を1号機, 代替燃料用を2号機と称する).

いずれの負荷も, Fig. 10 に示す様に, 水を溜めた水槽の中にスチームサイレンサーを設置し, これを通してスチームを流す方式を取った.

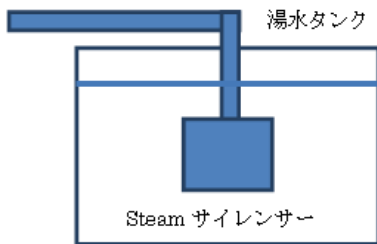


Fig. 10 Steam load



Fig. 9 Boliler

<p>NEF Purification Storage Tank</p>	<p>2 boilers measured</p>	<p>Water and fuel supply device</p>
<p>Exhaust pipe</p>	<p>Steam Condenser</p>	<p>Data measurement system</p>

Fig. 11 Experiment Facility

Fig. 11 に実験施設全体を, また Table 37 に供試ボイラー実機の諸元を示す.

Table 37 Through-flow type boiler specification (both Unit 1 and Unit 2)

TU-2006 は TU-200S の詳細機種番号

項目	TU-2006	
ボイラ種別	簡易ボイラ	
最高圧力	0.98MPa	
概算蒸発量	200kg/h	
総発生熱量	125kw	
ボイラ効率	87%	
伝熱面積	3.89m ²	
保有水量	53ℓ	
バーナ形式	強制押込通風・圧力噴霧式	
燃焼制御方式	ON-OFF制御	
給水制御方式	ON-OFF制御	
点火方式	ACスパーク点火	
乾燥重量	370kg	
運転時重量	425kg	
外形寸法	幅	935mm
	奥行	773mm
	高さ	1,640mm
燃料消費量	灯油	14.9ℓ/h
	A重油	14.1ℓ/h
使用電源	AC200V 3Φ (50/60Hz)	
設備電源	灯油	1.00kw
	A重油	1.05kw
内訳	逆風機モーター	0.4kw
	給水ポンプモーター	0.4kw
	ノズルヒーター(A01)	0.05kw
	燃料計	0.2kw
電源引込線径	2mm	
電源遮断器容量	20A	
接続口径	給水入口	15A G1/2
	燃料入口	8A R1/4
	蒸気出口	25A Rc1
	安全弁吹出口	20A Rc3/4
	ブロー口	25A Rc1
	給水タンクオーバー口	20A Rc3/4
	空気取入口	15A Rc1/2
	薬注入口	15A Rc1/2
排気筒	Φ200	

4.3.2 排気ガス計測装置

本研究では、実験用 A 重油と NEF 燃料をそれぞれ専用に燃焼させるために2つのボイラーを用い、排気ガスもこれらのボイラーから直接捕集した(Fig. 12).







		
SOx, NOx, CO ₂ , O ₂ Measurement	Measurement of exhaust gas	CO Measurement
		
SPM Measurement	TVOCs Measurement	Wind Speed Measurement

Fig. 12 Boiler exhaust gas measurement device

なお、排気ガスの捕集実験をするための天候条件として、湿度 90%以上、および 10% 以下の日は計測しない。風速は平均 2m/s 以上にある日は避けて計測する。自動計測機器は必ず安定化させるためにセッティング時間を設けた後に測定し、キャリブレーション(補正作業)を適宜実施した。

各燃料に対して軽油と廃植物油の割合による燃料の品質、効率、汚染物質などを比較評価するためにそれぞれ実験を通じて統計分析を実施した。

4.3.3 実験データの分析法と燃焼稼働状態計測結果

以下にボイラー効率を算定するための式を記述する.

本研究で使用した蒸気ボイラーの場合

$$\eta = D(h_2 - h_1) / (F \cdot H_1) \times 100 \quad \dots(1 \text{ 式})$$

ただし,

η ;ボイラー効率, D :蒸気発生量 (kg/h)

h_2 :発生蒸気の比エンタルピ° (kJ/kg)

h_1 :給水の比エンタルピ° (kJ/kg)

F :燃料使用量 (kg/h)

H_1 :燃料の低発熱量 (kJ/kg)

(1 式)を求めるために, 各項目を以下のように求める.

$D = (\text{給水流量(容量)} \times \text{給水比重}) / \text{試験時間 } h$

$F = \text{燃料使用量(容量)} \times \text{計測時の比重} / \text{試験時間 } h$

A 重油のとき, $H_1 = 41990$ (kJ/kg) および比重 = 0.8890,

NEF のとき, $H_1 = 40880$ (kJ/kg) および比重 = 0.8741

以下に各設備の測定対象項目と, その測定方法を示す.

a 蒸気温度(°C) b 給水温度(°C) c 排気温度 (°C)

d 外気温(°C) e 燃料流量(ℓ/h) f 給水流量(ℓ/h)

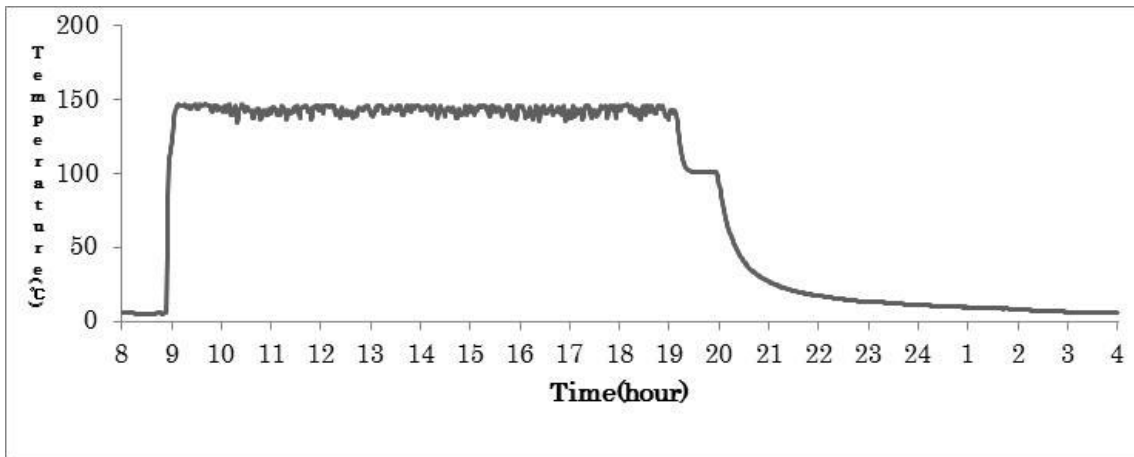
g 実験時の燃料比重(kg/ ℓ) h 蒸気圧力(MPa)

a, b, c および d は T 型熱電対を対象部位に設置し, データロガーにより温度データとしてを取り込む. e, f はボイラー経路内に設置した容積流量計にロジックケーブルを接続し, 稼働時に発せられるパルス信号をデータロガーにより取り込む. g などの燃料特性は外注により計測する. h に関しては実験前にボイラーで設定した蒸気圧力の値を使用する. なお, サンプルング周期に関しては 10 秒 1 計測とし, 実験時間については, ボイラーの着火から定常状態に至った後の 8 時間程度までを目安とした.

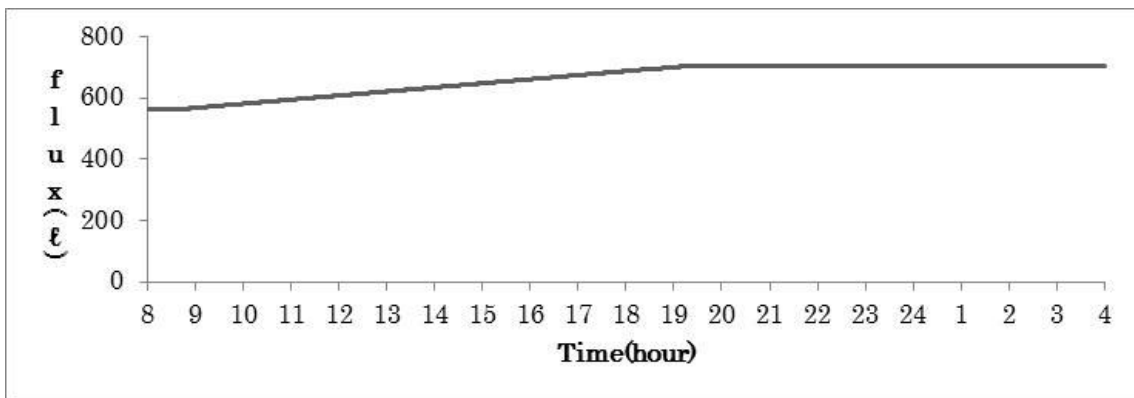
濃度, 温度, および相対湿度を含む気体のデータについては, 統計的分析は, IBM SPSS V22 を介して収集されたデータに行われた.

4.3.3.1 ボイラー燃焼稼働状態計測結果

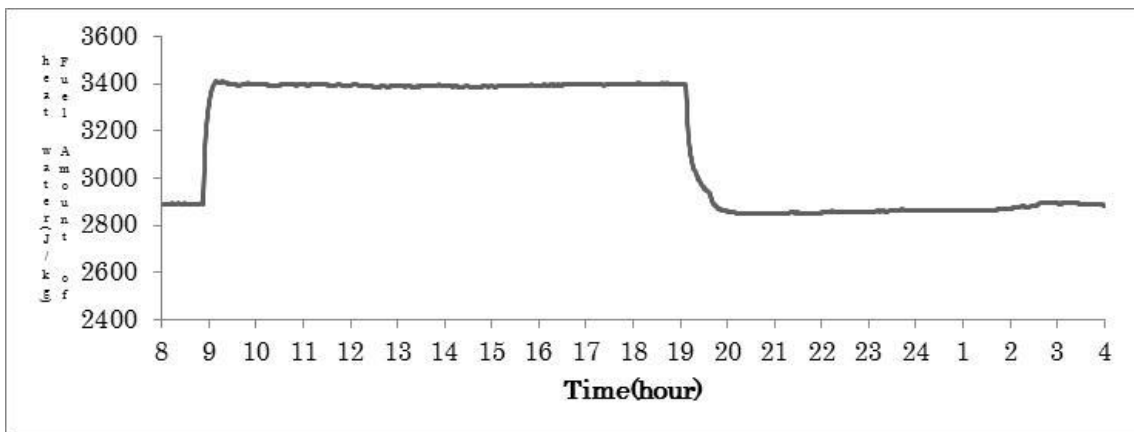
2012 年 10 月の燃焼試験開始以来, すべての実験の燃焼過程のデータを記録・保存している. Fig. 13 および 14 に, それぞれ 2012 年 12 月 19 日の実験における代替燃料(バイオマス混合燃料)と A 重油の実験結果概要を示す. このように, 10 時から 18 時ごろまで, 安定したほぼ一定の燃焼状態が得られている.



(a) 蒸気温度 [°C]

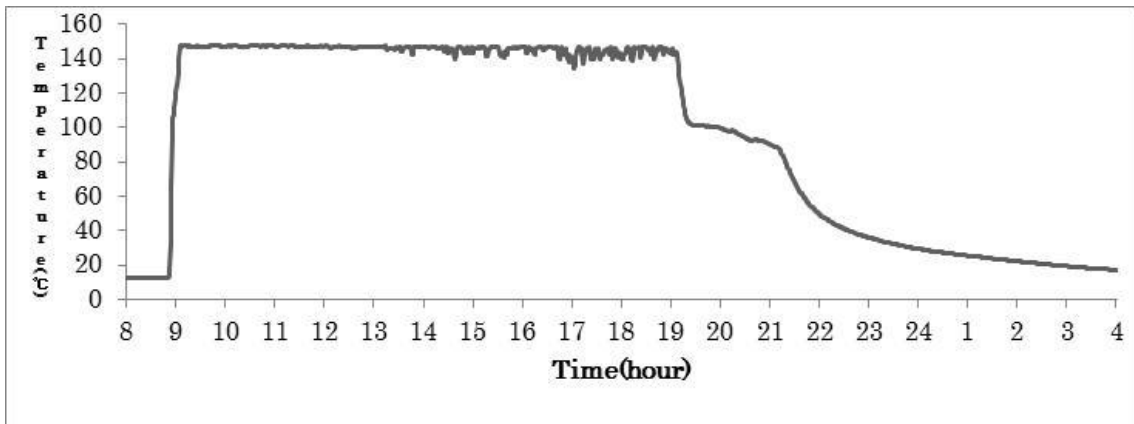


(b) 燃料積算 [ℓ]

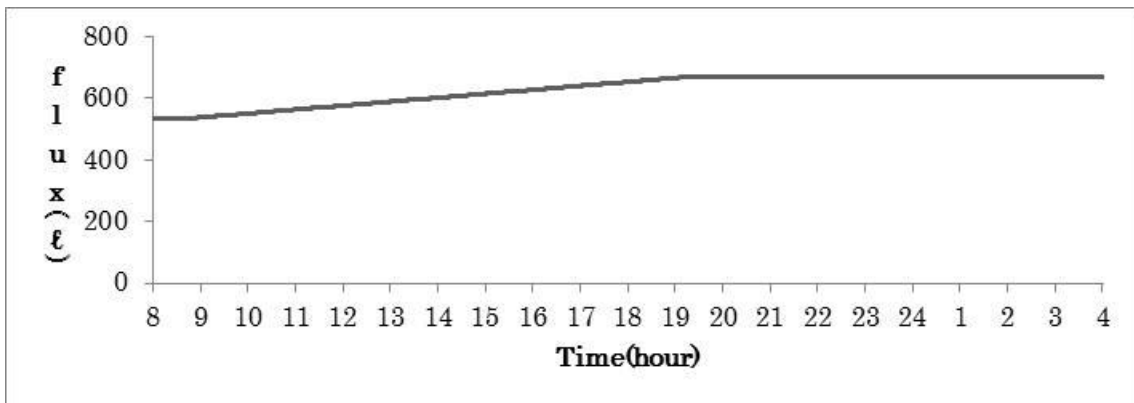


(c) 燃料熱量 (給水 1 kg 当たり) [J/kg]

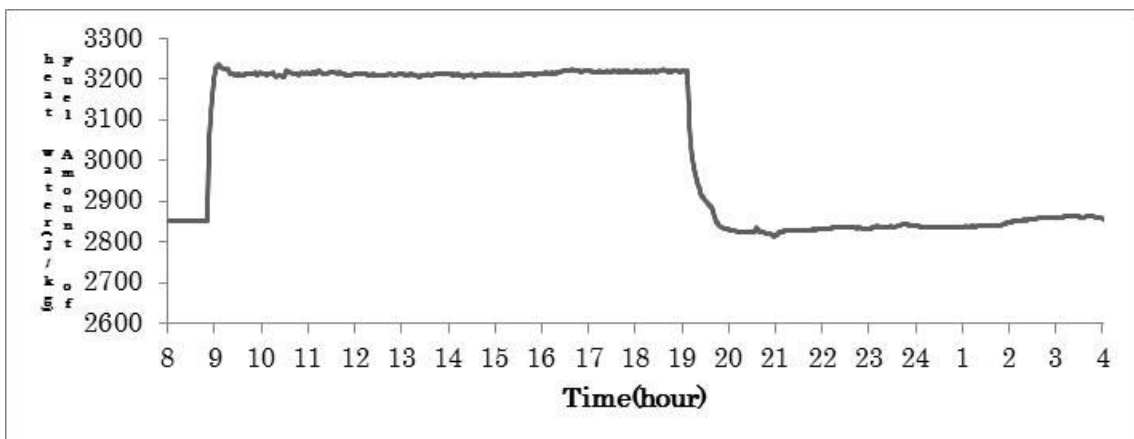
Fig. 13 December 19, 2012 Boiler combustion test (NEF)



(a) 蒸気温度 [°C]



(b) 燃料積算 [ℓ]



(c) 燃料熱量 (給水 1 kg 当たり) [J/kg]

Fig. 14 December 19, 2012 Boiler combustion test (A heavy oil)

4.3.3.2 ボイラー効率計算結果

NEF 燃料および A 重油いずれも、基本的に 10 時から 18 時までデータを計測するが、これらのデータから、最も安定している 14 時から 15 時までのボイラー効率を計算すると、全期間を通じて平均値はそれぞれ 84.97% (NEF 燃料) および 82.21% (A 重油)、標準偏差はそれぞれ 3.55% (NEF 燃料) および 2.68% (A 重油) となった (Table 38)。

Table 38 Boiler efficiency calculation result (whole period average)

代替燃料 (NEF)	平均値	84.97
	標準偏差	3.55
A 重油燃料	平均値	82.21
	標準偏差	2.68

この表より、今後ボイラー効率の平均値は代替燃料 (NEF) : 84.97% および A 重油 : 82.21% とする。特に、代替燃料のボイラー効率が、A 重油燃料のボイラー効率を若干上回っているように見えるが、これはデータの精度等を考えると、両者がほぼ同等であると考えらるべきである。

このように、ボイラー効率は両燃料においてほぼ等しいことが分かったが、代替燃料の低発熱量が A 重油のその約 94.6% (容積ベース) あるいは 97.2% (質量ベース) であることを考えると、同じ熱量を与える場合、代替燃料は A 重油に比較して容積ベースで約 5.4% 増しの燃料を必要とする。この点に着目した環境負荷の比較は、LCA による環境評価において考察する。

4.3.4 ライフサイクルアセスメント

実験結果をもとに、地球温暖化係数 (GWP: Global Warming Potential) を用いて、ライフサイクルアセスメント (LCA) による温室効果ガス排出量の比較を行う。対象とする範囲は、A 重油の製造、混合 NEF 燃料の製造、お

よび各燃料の燃焼までとする。なお A 重油の精製所から代替燃料精製工場までの輸送工程，ボイラー製造工程およびボイラー室の建設工程は対象外とした。使用するボイラーは，代替燃料を製造する場所（三重県伊賀市）にあるものとする。

Fig. 15 に LCA 評価における主な評価ステップを示す。Step1 の目的・調査範囲の設定では，システム境界と機能単位，評価する環境負荷を決め，評価の目的を明らかにする。Step2 のインベントリ分析では，決定されたシステム境界内の製品のライフサイクルにおいて，エネルギーや材料などがどれだけ投入され，また，排気ガスや廃棄物がどれだけ放出されたかを分析する。Step3 の影響評価では，様々な環境負荷（二酸化炭素などの温室効果ガス，窒素酸化物などの大気汚染物質，油などの水質汚濁物質）を環境影響に換算するが，本研究では地球温暖化に対する評価を行うことを評価の範囲とする。

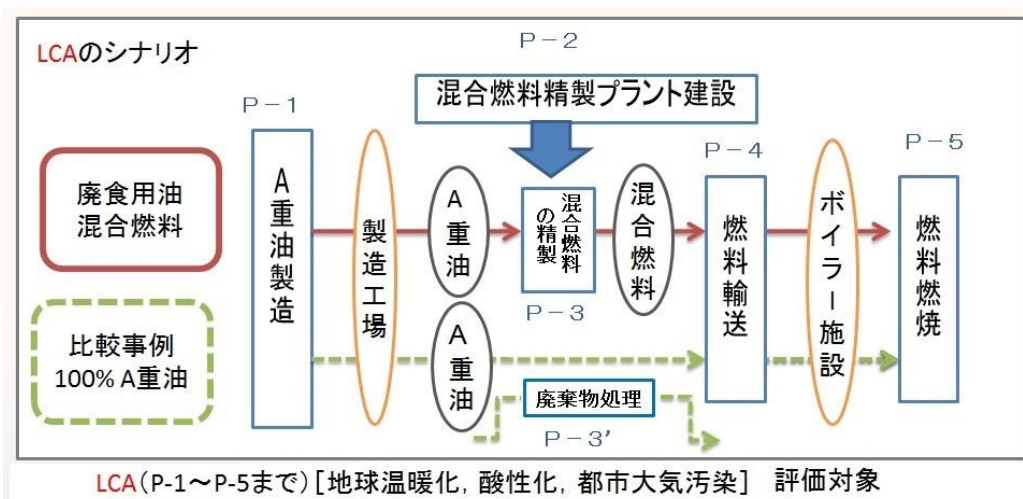


Fig. 15 Main evaluation steps in LCA evaluation

ここで，JEMAIによる日本版被害算定方式の，本研究に関連するインベントリデータを列挙すると，Table 39 のようになる。なお，インベントリ項目は，CO₂，CH₄，N₂O，SO_x，NO_x の 5 種類とする。例えば，A 重油 1kL の製造工程においては，CO₂ を 276kg 排出することを示している。

Table 39 Inventory data (Japan Accounting Standard Inventory Data)

	CO ₂ (kg)	CH ₄ (kg)	N ₂ O (kg)	Sox (kg)	NO _x (kg)
A 重油 (製造:kL)	276	3	0.049	0.26	0.36
A 重油 (燃焼:kL)	2838	3.18	0.047	0.25	1.04
植物油 (燃焼:kL)	-	12	3	0.27	2
電力 (使用:kWh)	0.546	1.9E-04	5.6E-05	5.7E-05	2.1E-04

年間 NEF 燃料生産量: 日間生産量 30kl/日 × 月間稼働日数 20 日 × 12 か月 = 7200kl/年

Average annual life cycle environmental load emissions per extended floor area of the factory

(Environmental load /year・m²) [Japanese Society of Architecture, 1995]

4.3.4.1 代替燃料製造のための工場建物建設

Table 40 Plant area ratio for substitute fuel production Amount of environmental impact generated

立て替え周期(年)	規模	エネルギー	CO ₂	SO ₂	NO ₂
		MJ	kg-CO ₂	g-SO ₂	g-NO ₂
35	全規模	1.69×10^2	1.03×10^1	1.86×10^1	2.84×10^1
	1000m ² 未満	2.54×10^2	1.58×10^1	2.71×10^1	4.36×10^1
	1000m ² 以上	1.50×10^2	9.12	1.63×10^1	2.52×10^1
	3000m ² 以上	1.68×10^2	1.02×10^1	1.83×10^1	2.78×10^1
	5000m ² 以上	1.84×10^2	1.11×10^1	2.03×10^1	3.08×10^1
	10000m ² 以上	9.41×10^1	5.69	1.03×10^1	1.56×10^1
50	全規模	1.77×10^2	1.07×10^1	1.95×10^1	2.96×10^1
	1000m ² 未満	2.66×10^2	1.65×10^1	2.85×10^1	4.56×10^1
	1000m ² 以上	1.57×10^2	9.53	1.72×10^1	2.64×10^1
	3000m ² 以上	1.75×10^2	1.06×10^1	1.92×10^1	2.91×10^1
	5000m ² 以上	1.92×10^2	1.16×10^1	2.13×10^1	3.22×10^1
	10000m ² 以上	9.84×10^1	5.95	1.09×10^1	1.63×10^1
100	全規模	1.71×10^2	1.04×10^1	1.88×10^1	2.85×10^1
	1000m ² 未満	2.43×10^2	1.60×10^1	2.74×10^1	4.18×10^1
	1000m ² 以上	1.43×10^2	9.23	1.66×10^1	2.42×10^1
	3000m ² 以上	1.60×10^2	1.03×10^1	1.85×10^1	2.66×10^1
	5000m ² 以上	1.76×10^2	1.12×10^1	2.05×10^1	2.95×10^1
	10000m ² 以上	9.00×10^1	5.76	1.05×10^1	1.49×10^1

算定には、日本建築学会の床面積当たりの建築物の用途別、構造別環境負荷原単位を利用し、聞き取りおよび実測調査によって得られた目的プラントの立て替え周期と延床面積に対応する環境負荷原単位を乗じることにより、建築物建設に係る環境負荷量を求めた。

算定に用いる建築設備の延床面積当たり年平均ライフサイクル環境負荷物質排出量を、Table 40 に示す。

求められた環境負荷を、プラントの年間生産量で除することにより、NEF燃料1kL 当たりの環境負荷量を求める。

NEF 燃料製造工場の規模は以下の通りである。

- 工場延床面積: 229.04 m²
- 工場立替周期: 20 年

・年間 NEF 燃料生産量: 日間生産量 30kl/日 × 月間稼働日数 20 日 × 12 か月 = 7200kl/年

上表から当該工場の規模にあてはめる値として、立替周期 35 年、規模 1000m² 未満の値を用いる。工場建物の年間環境負荷量と NEF 燃料 1kl 当たりの環境負荷量を Table 41 に示す。

Table 41 Emissions of environmental pollutants per kilometer of NEF fuel in factory construction work

Alternative fuel production	Total Floor Area	Factory Area	Energy	CO ₂	SO ₂	NO ₂
KL	m ²	m ²	MJ	kg-CO ₂	kg-SO ₂	kg-NO ₂
	1	1,000m ²	2.54E+02	1.58E+01	2.71E+01	4.36E+01
7200	229.04		5.82E+04	3.62E+03	6.21E+03	9.99E+03
1			8.08E+00	5.03E-01	8.62E-01	1.39E+00

4.3.4.2 精製設備の製造

NEF 燃料精製(製造)に関する設備を製造するための環境負荷は、産業連関表より、設備価格の環境負荷原単位を掛けることで算出する。聞き取り調査により、当該総設備費用は 17431346 円、償却年数は 7 年、年間 NEF 燃料生産量は 7200kl であった。これにより NEF 燃料精製 1kl 当たりの環境負荷を Table 42 に示す。

Table 42 Emissions of environmentally hazardous substances related to refining equipment production per 1 kL of alternative fuel (NEF)

生涯代替燃料生産量(kL)	償却年数	価格(円)	エネルギー	CO ₂	SOX	NOX	SPM
			MJ	kg	kg	kg	kg
		1,000,000	4.59×10^4	2.69×10^3	2.93	4.97	5.14×10^{-1}
50400	7	17,431,346	8.00×10^5	4.70×10^4	5.10×10^1	8.67×10^1	8.96
1			1.59×10^1	9.32×10^{-1}	1.01×10^{-3}	1.72×10^{-3}	1.78×10^{-4}

4.3.4.3 代替燃料製造工程

代替燃料(NEF)燃料製造工程における環境負荷は、聞き取り調査により電力の消費量を把握した後、JEMAI データベースを使用し、燃料 1kL 当たりの環境負荷を算定する。

A 重油 1kL の製造工程における環境負荷は、既出の Table 39 の JEMAI データベースを使用し求める。聞き取り調査によって得られた NEF1kL 精製時に消費する電力は、1.77kWh であった。この情報から JEMAI データベースの電力の環境負荷を用いて精製時の環境負荷を算出する (Table 43)。これらのデータを用いて計算した、NEF 燃料 1kL の製造(A 重油 80%の製造と精製時の電力)時の環境負荷を Table 44 に示す。なお、NEF 燃料に含まれる A 重油の割合は 79%であるが、添加剤の1%は A 重油と同質と考える。

Table 43 Alternative Fuel (NEF) 1 kL Emissions of environmentally hazardous

電力	NEF 精製量	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	SO _x	NO _x
kWh	kL	kg	Kg	Kg	kg	kg
1.77	1	0.96	3.4 E-04	9.9E-05	1.0 E-04	3.7 E-04

Table 44 Alternative fuel (NEF) 1kL (A heavy oil 0.8kL + electricity) Emissions of environmentally hazardous substances in production

NEF 製造量	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	SO _x	NO _x
kL	kg	kg	Kg	kg	kg
1	221.76	2.40	0.03	0.21	0.28

4.3.4.4 燃焼工程

A 重油および NEF 燃料各 1kL 当たりの燃焼工程における環境負荷を JEMAI データベースを使用して算出する (Table 45). 添加剤は, A 重油の値を用いて計算する.

Table 45 Emissions of environmentally hazardous substances in the combustion process

		消費量	CO2	CH4	N2O	SOx	NOx
燃料	燃焼物	kL	kg	kg	kg	kg	kg
A 重油	A 重油	1	2837.84	3.18	0.04	0.25	1.04
NEF	A 重油	0.8	2270.27	2.55	0.03	0.20	0.83
	廃植物油	0.2	-	2.4	0.6	5.54E-02	0.4
	合計	1	2270.27	4.95	0.63	0.25	1.29

4.3.5 インベントリ分析結果

各工程の環境負荷を合計し, 各燃料の 1kL 当たりの環境負荷を算出すると, Table 46 のようになる.

Table 46 Emissions of environmentally hazardous substances per 1 kL of A heavy oil and NEF fuel

		消費量	CO2	CH4	N2O	SOx	NOx
燃料	段階	kL	kg	kg	kg	kg	kg
A 重油	製造段階	1	276	3	0.04	0.26	0.36
	燃焼段階		2837.84	3.18	0.04	0.25	1.04
	合計		3113.84	6.18	0.09	0.51	1.40
NEF	製造建物	1	0.50			0.86	1.39
	製造設備		0.932			1.01E-03	1.72E-03
	製造段階		221.7	2.4	0.039	0.21	0.288
	燃焼段階		2270.27	4.95	0.63	0.25	1.23
	合計		2493.40	7.35	0.67	1.33	2.91

4.4 健康リスク評価に関する計測について

排気ガスによる健康被害に対するリスクを評価するために、排気ガスのサンプリングを行い、その化学成分を分析することにより、排気ガスに含まれている成分を特定し、EPAの基準によるリスク評価を行う。排気ガスに関連する健康リスク評価(RA)のためにはCOの計測が不可欠であり、Hodaka (HT-1210)社のCO計測器を用いた。SOx等の計測のためにはHodaka (HT-2300)社のガス濃度計測器を用いた。またトータルVOCを計測するために、Figaro (FTVR-02)社のTotal VOC計測器を用いた。

次に、定置型化学分析器により個別VOCs(揮発性有機化合物: Volatile Organic Compounds)成分を特定し、定量するために、ミニポンプを利用した排気ガスの捕集機器を用いた。

4.5 各評価の結果に関する考察

4.5.1 ライフサイクルアセスメントの結果に関する考察

この固形廃食用油の混合割合を、20%から30%、40%に増加させれば、温室効果ガス排出量の低減率を15%レベルに持つて行くことは可能と考えられる。

CH₄ および N₂O の温暖化係数がそれぞれ 21 および 310 であることを考慮すると、A 重油および NEF 燃料を 1kL 使用する場合の GWP (Global Warming Potential) は、それぞれ 3274, および 2858 となる。

さらにボイラー効率 (Table 47) , および A 重油と NEF 燃料の低発熱量がそれぞれ 37340 (kJ/l) および 35332 (kJ/l) であることを考慮して、Table 48 のような表が作成できる。

Table 47 Boiler efficiencies

NEF 燃料	平均値	84.97
	標準偏差	3.55
A 重油燃料	平均値	82.21
	標準偏差	2.68

Table 48 Amount of NEF fuel equivalent to 1 kℓ of A heavy oil and GWP reduction rate

		Amount of fuel (kℓ)	GWP	GWP Reduction rate (%)
A heavy oil	Basic amount	1	3273	
NEF	Basic amount	1	2857	
	An amount having a true calorific value equivalent to 1 kℓ of A heavy oil	1.05		
	A The amount of work equivalent to 1 kℓ of A heavy oil	1.02	2922	10.74

これによると、今回試験を行った NEF 燃料を用いることにより、実質的に A 重油と比較して GWP を 10.7%削減できることが分かる。

なお、Table 47 は、廃植物油の混合によりボイラー効率を低下していないことを示しており、現在の 20%から更に廃植物油の割合を高めることができる可能性が高い。低発熱量の低下を防ぐような廃植物油を選択することにより混合比を高めた次のステージの NEF 燃料はさらに温暖化効果ガスの排出の抑制を促進するものと考えられる。

既に実施した廃食用油混合燃料のボイラー実証試験で得られた結果では(平成 21 年度ものづくり中小企業製品開発等支援補助金)、温水ボイラー、蒸気ボイラーともに、廃食用油混合燃料の温室効果ガスの排出量は、A 重油に比べ 29~31%の削減率を示した。

本研究事業では、固形廃食用油を用いており、廃食用油に比べ品質性状面で劣ると見なされ、30%の削減率は期待できず、当面の目標値として 15%以上を掲げた。しかし、実験結果は、10.7%で、目標の 15%に対し 7 割程度となった。

温室効果ガス排出量は、固形廃食用油の混合割合と大きく関係するものであり、今回は混合燃料のボイラー効率をできるだけ高

くしたいとの思いから、固形廃食用油の混合割合を低めの20%（常用割合：20～40%）に設定した経緯がある。実際、ボイラー効率率はTable 47 に示す様に、固形廃食用油混合燃料で84.97%，A重油82.21%とほぼ同等の値を得ている（Fig. 16， Table 49）。

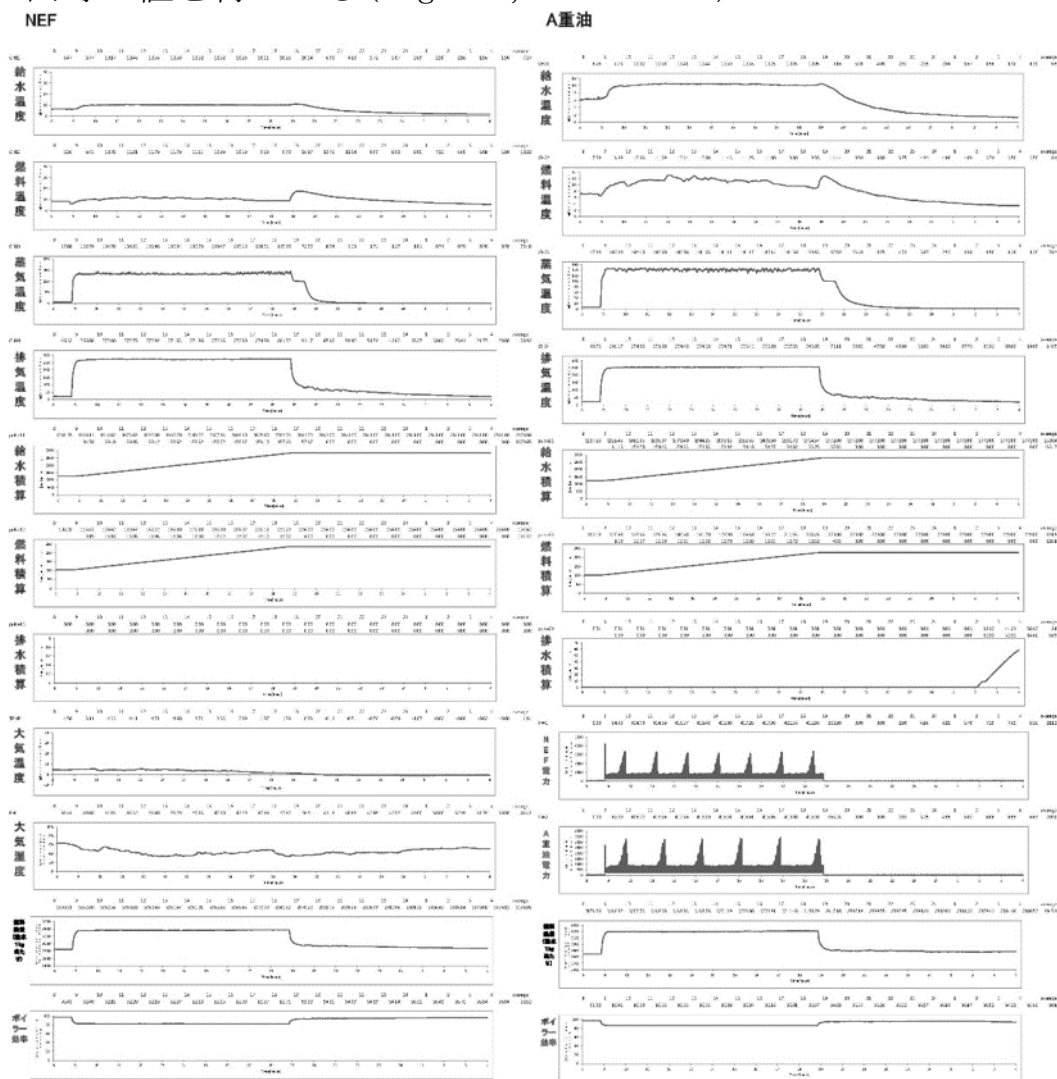


Fig. 16 Measurement graph of boiler efficiency calculation

4.5.2 健康リスク評価の結果の考察

自動計測機器により記録されるデータは PPM の単位であり，これを健康リスク評価の定量的な計算に用いるためには，[質量/体積]の単位への換算が必要となり，この分野では通常 [ppm 値]×24.45/分子量 の単位 (mg/m³) に変換する。

Table 49 Concentration of environmental contaminants of exhaust gas detected by automatic measurement

No.	Chemical Material	Mole Weight	結果(PPM)		単位換算 (mg/m ³)	
			A 重油	NEF	A 重油	NEF
1	Temperature	-	216.9 °C	233.3 °C	-	
2	Oxygen	16.00	53285	53571	81431	81868
3	Carbon Dioxide	44.01	117571	101142	65317	56190
4	Nitrogen monoxide	30.01	62	88	51	72
5	Nitrogen dioxide	46.01	26	24	14	13
6	NOx	-	89	113	-	
7	Sulfur dioxide	64.07	312	286	119	109
8	Outdoor	-	13 °C			
9	Carbon monoxide	28.01	30	23	27	20
10	TVOCs (BTEX)	78.11	306	267	96	84
11	SPM	-	0.851	0.850	851	850

Table 50 は、ボイラーを使う作業者に対応する、アメリカ産業安全保健管理国 (OSHA) の規制値である。一般に、これに対応するデータがない場合 NIOSH (産業安全保健研究所) 傘下の CDC (疾病管理本部) のデータベースを利用する。米国機関にデータがない場合 ACGIH (産業、衛生、保健協会) の研究結果を利用する。

Table 50 Institutional health risk concentration information on environmental pollutants of exhaust gas detected by automatic measuring equipment

CAS NO.	Chemical Material	OSHA	NIOSH	ACGIH	IARC Group	IRIS Rfc
		PEL (mg/m ³)	REL (mg/m ³)	TLV (mg/m ³)		
7782-44-7	Oxygen	>127600	>127600	>127600	-	
124-38-9	Carbon Dioxide	54000	54000	54000	-	15.26
10102-43-9	Nitrogen monoxide	30	30	30	-	0.01
10102-44-0	Nitrogen dioxide	9	1.8	0.38	-	0.00
7446-09-05	Sulfur dioxide	13	5	0.65	3	0.01
630-08-0	Carbon monoxide	55	40	29	-	0.02
-	TVOCs (BTEX)	1500	1500	1500	1	0.03
-	SPM	2500	2500	2500	1	63.58

Table 51 は，EPA のリスクアセスメント手法 (<http://www.epa.gov/risk/dose-response.htm>) に自動計測機器により検出された排気ガスの環境汚染物質を適用した健康リスク評価の結果である。但し，TVOCs は分子量が測定できないので，最も危険な Benzen の濃度であると仮定して最大危険値を計算している。

これは，標準体重 65.7 k g の大人が，一日に 8 時間ずつ，会社の出勤日から祝日などの非稼働日の日数を除いた日々に，それぞれの排気ガスを 1 年，3 年，5 年，10 年，15 年，20 年，30 年，40 年，および 50 年間，直接吸い続ける状況における発癌率で示される。計算結果の 1 例は，50 年間排気ガスを直接吸った場合，A 重

油、NEF 燃料のいずれの場合も、100 人に 40 人の割合で発癌する危険性のあることを示している。

排気ガスを直接吸うということは実際にはあり得ない状況であるが、実際の作業環境でのリスクというよりは、A 重油と NEF のリスクの比較を行うため、このような数値を算出した。実際は、これらの排気ガスがボイラーの排気口から排出された後、大気中に拡散していく過程で大幅に希釈され、その希釈された排気ガスをボイラーの近く(例えば 10m)の作業員や比較的離れた場所(例えば 100m)の住民が吸引するので発癌率は大きく低減する。

本研究の結果として、発癌物質による発癌率に関し、NEF による排気ガスは A 重油による排気ガスに比べ 9.27%小さい結果となった。また、非発癌物質による発癌リスク(参考値)に関しては、NEF による排気ガスは A 重油による排気ガスに比べ、5.90%高い結果となった。

しかし今回の分析は、健康リスク評価の手法の確立に重点を置いたため、検体の数が少なく、結果も単純平均による比較であり、T 検定では信頼範囲区間に該当しなかったため、有意差があるとは言えない。今後はさらに検体の数を増やし、追実験を行う必要がある。

Table 51 Evaluation of health risk of exhaust gas detected by automatic measuring equipment

Chemical Material		A 重油 暴露期間								
		1 年	3 年	5 年	10 年	15 年	20 年	30 年	40 年	50 年
TVOCs (BTEX)		2.04 E-03	6.13 E-03	1.02 E-02	2.04 E-02	3.06 E-02	4.08 E-02	6.13 E-02	8.17 E-02	1.02 E-01
SPM		8.56 E-06	2.57 E-05	4.28 E-05	8.56 E-05	1.28 E-04	1.71 E-04	2.57 E-04	3.42 E-04	4.28 E-04
Sulfur dioxide		6.91 E-03	2.07 E-02	3.45 E-02	6.91 E-02	1.04 E-01	1.38 E-01	2.07 E-01	2.76 E-01	3.45 E-01
Carbon Dioxide		2.74 E-03	8.21 E-03	1.37 E-02	2.74 E-02	4.10 E-02	5.47 E-02	8.21 E-02	1.09 E-01	1.37 E-01
Nitrogen monoxide		3.85 E-03	1.16 E-02	1.93 E-02	3.85 E-02	5.78 E-02	7.71 E-02	1.16 E-01	1.54 E-01	1.93 E-01
Nitrogen dioxide		3.51 E-03	1.05 E-02	1.76 E-02	3.51 E-02	5.27 E-02	7.02 E-02	1.05 E-01	1.40 E-01	1.76 E-01
Carbon monoxide		1.10 E-03	3.31 E-03	5.51 E-03	1.10 E-02	1.65 E-02	2.21 E-02	3.31 E-02	4.41 E-02	5.51 E-02
Cancer		8.96 E-03	2.69 E-02	4.48 E-02	8.96 E-02	1.34 E-01	1.79 E-01	2.69 E-01	3.58E-01	4.48 E-01
Non-Cancer		1.12 E-02	3.36 E-02	5.60 E-02	1.12 E-01	1.68 E-01	2.24 E-01	3.36 E-01	4.48 E-01	5.60 E-01
Chemical Material		NEF 暴露期間								
		1 年	3 年	5 年	10 年	15 年	20 年	30 年	40 年	50 年
TVOCs (BTEX)		1.79 E-03	5.36 E-03	8.93 E-03	1.79 E-02	2.68 E-02	3.57 E-02	5.36 E-02	7.15 E-02	8.93 E-02
SPM		8.55 E-06	2.57 E-05	4.28 E-05	8.55 E-05	1.28 E-04	1.71 E-04	2.57 E-04	3.42 E-04	4.28 E-04
Sulfur dioxide		6.33 E-03	1.90 E-02	3.17 E-02	6.33 E-02	9.50 E-02	1.27 E-01	1.90 E-01	2.53 E-01	3.17 E-01
Carbon Dioxide		2.35 E-03	7.06 E-03	1.18 E-02	2.35 E-02	3.53 E-02	4.71 E-02	7.06 E-02	9.42 E-02	1.18 E-01
Nitrogen monoxide		5.46 E-03	1.64 E-02	2.73 E-02	5.46 E-02	8.19 E-02	1.09 E-01	1.64 E-01	2.18 E-01	2.73 E-01
Nitrogen dioxide		3.22 E-03	9.67 E-03	1.61 E-02	3.22 E-02	4.84 E-02	6.45 E-02	9.67 E-02	1.29 E-01	1.61 E-01
Carbon monoxide		8.26 E-04	2.48 E-03	4.13 E-03	8.26 E-03	1.24 E-02	1.65 E-02	2.48 E-02	3.30 E-02	4.13 E-02
Cancer		8.13 E-03	2.44 E-02	4.06 E-02	8.13 E-02	1.22 E-01	1.63 E-01	2.44 E-01	3.25 E-01	4.06 E-01
Non-Cancer		1.19 E-02	3.56 E-02	5.93 E-02	1.19 E-01	1.78 E-01	2.37 E-01	3.56 E-01	4.75 E-01	5.93 E-01
Comparison (A 重油-NEF)/A 重油	Cancer	9.27%								
	Non-Cancer (参考值)	-5.90%								

4.6 第4章のまとめ

4.6.1 ボイラー燃焼稼働実験

代替燃料 (NEF) を燃料とする場合のボイラー効率は 84.97%で、A 重油の 82.21%とほぼ同等の値が得られた。このことから、代替燃料 (NEF) はボイラー燃料として十分に使用可能であることが分かった。

4.6.2 ライフサイクルアセスメント

代替燃料 (NEF) の使用は A 重油と比較して GWP (Global Warming Potential) を 10.7%削減できる。なお、廃植物油の混合によりボイラー効率が低下していないので、現在の 20%から更に廃植物油の割合を高めることができる可能性が高い。

4.6.3 健康リスク評価

健康リスクについて TVOCs などを実地に調べた結果、非発癌物質による発病リスク (参考値) に関しては、代替燃料 (NEF) による排気ガスは A 重油による排気ガスに比べ、5.90% 高い結果となったが、逆に発癌物質については代替燃料 (NEF) が A 重油に比べて 9.27% 低くなった。

第5章 結言

(1) この研究について

本研究は、軽油に廃植物油を混合した燃料を用いる小型ディーゼルエンジンの駆動と、A重油に固形廃植物油を混合した代替燃料を用いるボイラーの運用において、排気ガスの健康リスク評価と、温室効果ガスの排出に関するライフサイクルアセスメントを実施し、現在の産業を維持するうえで必要とされるエネルギー変換システムにこれらの代替燃料が実用可能であるかどうか確認しようとするものである。

実証実験とその考察を中心とする研究の結果、次のことが分かった。

(2) 廃植物油混焼小型ディーゼルエンジンの排気ガスに関する健康リスク評価とライフサイクルアセスメント

2.1 健康リスク評価による発癌率

本研究で基準とする 2.511MJ のエネルギーを発生させるにあたり、各燃料の排気ガスの TVOCs 濃度に関しては、軽油(WC00)は 310.16, WC010 は 219.17, WC015 は 450.95 および WC020 は 613.29 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] となり、WC010 が一番少なかった。発癌物質による健康リスク評価値(50年間暴露)は軽油(WC00)の $4.46\text{E}-04$ に対して WC010 は $3.62\text{E}-04$ となり、やはり WC010 の健康リスク評価値が最も小さい結果となった。

2.2 燃料使用におけるライフサイクルアセスメント

トルクを一定に制御する条件下、小型ディーゼルエンジンを 20 分間駆動し、軽油が発生エネルギーと等価の仕事をする廃植物油混合燃料のカーボンニュートラルによる GWP 削減率を計算した。その結果、WC010, WC015 および WC020 の順に、軽油に対し、GWP の値でおよそ 10%, 13% および 16% の削減率となることが分かった。

2.3 廃植物油混焼小型ディーゼルエンジンの LCA 費用便益分析

地球温暖化に対する経済的な被害額は、2.511MJ のエネルギーを

発生させるにあたり，WC00 は 0.252 円，WC010 は 0.228 円，WC015 は 0.22 円および WC020 は 0.212 円となり，エンジン駆動面でも安定していた WC010 を用いるときでも，約 9.7%の社会コストを節減できることが分かった。

2.4 廃植物油混焼小型ディーゼルエンジンの健康費用便益分析

VOCs が存在する現場に 1 年間勤務したと仮説を設定した場合 WC00 基準で肺癌の病院治療費用は 63744 円であった（排気環境の整っていない工場における勤務者 1 人あたりの統計的な金額である）。同様に WC010 の場合は 51733 円であり B/C ratio は 1.23 であった。

なお，供試した廃植物油混合燃料は，少量の添加剤のもとに廃植物油を軽油と混合するもので，複雑なエステル化を必要とせず，エンジンやボイラーを利用するサイトで燃料を混合することなど使用条件を選べば，精製過程が単純であるためいくつかの長所を持つ。

(3) 固形廃植物油を混合したボイラー用代替燃料の環境負荷

3.1 ライフサイクルアセスメント

代替燃料（NEF）の使用は A 重油と比較して GWP を 10.7%削減できる。なお，廃植物油の混合によりボイラー効率が低下していないので，現在の 20%から更に廃植物油の割合を高めることができる可能性が高い。

3.2 健康リスク評価

健康リスクについて，TVOCsなどを計測した結果，非発癌物質による発病リスク（参考値）に関しては，代替燃料（NEF）による排気ガスは A 重油による排気ガスに比べ，5.90%高い結果となったが，逆に発癌物質については代替燃料（NEF）が A 重油に比べて 9.27%低くなった。

(4) 実用性に対する考察

廃植物油を既存の軽油や重油とリサイクル的に混合する形で形成

する代替燃料が、現在の熱機関に対し実用的に利用可能かどうか確認した結果、軽油と混焼させるディーゼルエンジンの場合は廃植物油の割合が10%の事例が最も良い環境性能を達成した。またA重油と混焼させるボイラー代替燃料の場合、20%の混合率でもボイラー効率などは低下せず、期待された環境負荷の低減も得られている。

数値的に検討してみると、20%の廃植物油をA重油に混合するボイラーの代替燃料は実用性がきわめて高いものと言えることが分かった。

なお、近年はこのような代替燃料にも、あらゆる条件下での品質の確保が法的にも要求されるようになってきた。

品質の面でこれらの性能を満たす代替燃料を開発するためには、本研究の成果を踏まえたうえで、新たに品質に関する目標と条件を設定して実験計測装置を構成し、確認実証実験を実施する必要があることを申し添える。

参考文献

第2章 小型ディーゼルエンジンの廃植物油混合燃料によるエンジン駆動および環境特性に関する基礎研究

- [1] Venkanna BK, Venkataramana Reddy C. Direct injection diesel engine performance, emission, and combustion characteristics using diesel fuel, nonedible honne oil methyl ester, and blends with diesel fuel, *International Journal of Energy Research* 2012;36(13):1247-61.
- [2] Subramanian KA, Lahane S. Comparative evaluations of injection and spray characteristics of a diesel engine using karanja biodiesel-diesel blends, *International Journal of Energy Research* 2013;37(6):582-97.
- [3] Hill J, Nelson E, Tilman D, Polasky S, Tiffany D. Environmental, economic, and energetic costs and benefits of biodiesel and ethanol biofuels, *Proceedings of the National Academy of Sciences* 2006;103(30):11206-10.
- [4] de Gorter H, Just DR. The Social Costs and Benefits of Biofuels: The Intersection of Environmental, Energy and Agricultural Policy, *Applied Economic Perspectives and Policy* 2010;32(1):4-32.
- [5] Mythili R, Venkatachalam P, Subramanian P, Uma D. Production characterization and efficiency of biodiesel: a review, *International Journal of Energy Research* 2014;n/a-n/a.
- [6] Runge CF, Senauer B. How biofuels could starve the poor, *Foreign affairs* 2007;41-53.
- [7] Mitchell D. A note on rising food prices, 2008.
- [8] McHenry MP. Small-scale (≤ 6 kW) stand-alone and grid-connected photovoltaic, wind, hydroelectric, biodiesel, and wood gasification system's simulated technical, economic, and mitigation analyses for rural regions in Western Australia, *Renewable Energy* 2012;38(1):195-205.
- [9] Hunter W, Follett R, Cary J. Use of vegetable oil to remove

- nitrate from flowing groundwater, Transactions of the ASAE 1997;40(2):345-53.
- [10] FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAOSTAT 2009.
- [11] Gelfand I, Snapp SS, Robertson GP. Energy Efficiency of Conventional, Organic, and Alternative Cropping Systems for Food and Fuel at a Site in the U.S. Midwest, Environmental Science & Technology 2010;44(10):4006-11.
- [12] Dorado MP, Ballesteros E, Arnal JM, Gómez J, López FJ. Exhaust emissions from a Diesel engine fueled with transesterified waste olive oil, Fuel 2003;82(11):1311-5.
- [13] Cardone M, Prati MV, Rocco V, Seggiani M, Senatore A, Vitolo S. Brassica carinata as an Alternative Oil Crop for the Production of Biodiesel in Italy: Engine Performance and Regulated and Unregulated Exhaust Emissions, Environmental Science & Technology 2002;36(21):4656-62.
- [14] Utlu Z, Koçak MS. The effect of biodiesel fuel obtained from waste frying oil on direct injection diesel engine performance and exhaust emissions, Renewable Energy 2008;33(8):1936-41.
- [15] Ghobadian B, Rahimi H, Nikbakht AM, Najafi G, Yusaf TF. Diesel engine performance and exhaust emission analysis using waste cooking biodiesel fuel with an artificial neural network, Renewable Energy 2009;34(4):976-82.
- [16] Di Y, Cheung CS, Huang Z. Experimental investigation on regulated and unregulated emissions of a diesel engine fueled with ultra-low sulfur diesel fuel blended with biodiesel from waste cooking oil, Science of The Total Environment 2009;407(2):835-46.
- [17] Çetinkaya M, Ulusoy Y, Tekin Y, Karaosmanoğlu F. Engine and winter road test performances of used cooking oil originated biodiesel, Energy Conversion and Management 2005;46(7-8):1279-91.
- [18] IBM, IBM SPSS Statistics V22.0, in, 2013.

- [19] Bluman AG, Elementary statistics, McGraw Hill, 2013.
- [20] Ben L, Raud-Ducros N, Truquet R, Charnay G, Influence of air/fuel ratio on cyclic variation and exhaust emission in natural gas SI engine, in, SAE Technical Paper, 1999.
- [21] Isomura S, Norimatsu H, Air-fuel ratio control system, in, Google Patents, 1981.
- [22] Nakagawa T, Saito M, Sanbuichi H, Terasaka K, Air/fuel ratio feedback control system for lean combustion engine, in, Google Patents, 1991.
- [23] kumar Agrawal A, Singh SK, Sinha S, Shukla MK. Effect of EGR on the exhaust gas temperature and exhaust opacity in compression ignition engines, *Sadhana* 2004;29(3):275-84.
- [24] Forson F, Oduro E, Hammond-Donkoh E. Performance of Jatropha oil blends in a diesel engine, *Renewable Energy* 2004;29(7):1135-45.
- [25] Wei X, Del Re L, Langthaler P, LPV dynamical models of diesel engine nox emission, in: *Modeling and Control of Economic Systems 2001:(SME 2001): a Proceedings Volume from the 10th IFAC Symposium, Klagenfurt, Austria, 6-8 September 2001, Elsevier, 2003, pp. 245.*
- [26] Wang Y, Al-Shemmeri T, Eames P, McMullan J, Hewitt N, Huang Y, Rezvani S. An experimental investigation of the performance and gaseous exhaust emissions of a diesel engine using blends of a vegetable oil, *Applied Thermal Engineering* 2006;26(14):1684-91.
- [27] Li DG, Zhen H, Xingcai L, Wu-gao Z, Jian-guang Y. Physico-chemical properties of ethanol-diesel blend fuel and its effect on performance and emissions of diesel engines, *Renewable Energy* 2005;30(6):967-76.
- [28] Virtanen AK, Ristimäki JM, Vaaraslahti KM, Keskinen J. Effect of engine load on diesel soot particles, *Environmental Science & Technology* 2004;38(9):2551-6.
- [29] He C, Ge Y, Tan J, Han X. Spray properties of alternative fuels: A comparative analysis of biodiesel and diesel, *International Journal of Energy Research*

2008;32(14):1329-38.

- [30] Gravalos I, Gialamas T, Koutsofitis Z, Kateris D, Xyradakis P, Tsiropoulos Z, Lianos G. Comparison of performance characteristics of agricultural tractor diesel engine operating on home and industrially produced biodiesel, International Journal of Energy Research 2009;33(12):1048-58.

第3章 廃植物油混焼小型ディーゼルエンジンの排気ガスに関する健康リスク評価とライフサイクルアセスメント

- [1] Harris-Roxas, B., Harris, E., Differing forms, differing purposes: A typology of health impact assessment. *Environmental Impact Assessment Review* 2011;31:396-403.
- [2] Lee, C.-C., Chiu, Y.-B., Nuclear energy consumption, oil prices, and economic growth: Evidence from highly industrialized countries. *Energy Economics* 2011;33:236-248.
- [3] Murphy, D.J., Hall, C.A., Energy return on investment, peak oil, and the end of economic growth. *Annals of the New York Academy of Sciences* 2011;1219:52-72.
- [4] de Almeida, P., Silva, P.D., The peak of oil production-timings and market recognition. *Energy Policy* 2009;37:1267-1276.
- [5] Hanabusa, K., Causality relationship between the price of oil and economic growth in Japan. *Energy Policy* 2009;37:1953-1957.
- [6] Rob, M., Clint, W., *Biofuels Markets and Technologies*. PikeResearch. 2009.
- [7] Keskin, A., Gürü, M., Altiparmak, D., Aydin, K., Using of cotton oil soapstock biodiesel-diesel fuel blends as an alternative diesel fuel. *Renewable Energy* 2008;33:553-557.
- [8] Qi, D., Chen, H., Geng, L., Bian, Y., Ren, X., Performance and combustion characteristics of biodiesel-diesel-methanol blend fuelled engine. *Applied Energy* 2010;87:1679-1686.
- [9] Singh, S., Singh, D., Biodiesel production through the use of different sources and characterization of oils and their esters as the substitute of diesel: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2010;14:200-216.
- [10] FAO, *Vegetable Oils 2914*. Food and Agriculture Organization of the United Nations, <http://www.fao.org/statistics/>. 2014.

- [11] JOPA, Vegetable oil supply quantity of Japan. Japan Oilseed Processors Association, http://www.oil.or.jp/kiso/seisan/seisan06_03.html. 2014.
- [12] Kulkarni, M.G., Dalai, A.K., Waste cooking oil an economical source for biodiesel: a review. *Industrial & engineering chemistry research* 2006:45;2901-2913.
- [13] Wang, Y., Ou, S., Liu, P., Xue, F., Tang, S., Comparison of two different processes to synthesize biodiesel by waste cooking oil. *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical* 2006:252;107-112.
- [14] Zhang, Y., Dube, M., McLean, D., Kates, M., Biodiesel production from waste cooking oil: 1. Process design and technological assessment. *Bioresource technology* 2003:89; 1-16.
- [15] OSHA, Part, A APPENDIX F TO § 1910.1200-GUIDANCE FOR HAZARD. 2014
- [16] EPA, Risk Assessment Guidance for Superfund Volume I: Human Health Evaluation Manual (Part F, Supplemental Guidance for Inhalation Risk Assessment). EPA-540-R-070-002 OSWER 9285.7-82. 2009.
- [17] Kuzmack, A.M., McGaughy, R.E., Quantitative risk assessment for community exposure to vinyl chloride. US Environmental Protection Agency. 1975.
- [18] EPA, Preparation of Engineering Assessments: CEB engineering manual. U.S. Environmental Protection Agency. 1991.
- [19] Gamo, M., Oka, T., Nakanishi, J., Ranking the risks of 12 major environmental pollutants that occur in Japan. *Chemosphere* 2003:53;277-284.

第4章 固形廃植物油を混合したボイラー用代替燃料の環境負荷

- [1] Armaroli N, Balzani V. The Future of Energy Supply: Challenges and Opportunities. *Angewandte Chemie International Edition*. 2007; 46(1 - 2): 52-66.
- [2] Cullather N. *The Hungry World 2010* (Harvard University Press).
- [3] James C. *Global Status of Commercialized Biotech/Gm Crops: 2014*. ISAAA brief. 2015; 49.
- [4] Panwar N, Kaushik S, Kothari S. Role of Renewable Energy Sources in Environmental Protection: A Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2011; 15(3): 1513-1524.
- [5] Kinyua MN. *Energy Production and Effluent Quality in Tubular Digesters Treating Livestock Waste in Rural Costa Rica*. 2015.
- [6] Lin B-F, Huang J-H, Huang D-Y. Experimental Study of the Effects of Vegetable Oil Methyl Ester on Di Diesel Engine Performance Characteristics and Pollutant Emissions. *Fuel*. 2009; 88(9): 1779-1785.
- [7] Lam MK, Lee KT, Mohamed AR. Homogeneous, Heterogeneous and Enzymatic Catalysis for Transesterification of High Free Fatty Acid Oil (Waste Cooking Oil) to Biodiesel: A Review. *Biotechnology advances*. 2010; 28(4): 500-518.
- [8] Dorado M, Ballesteros E, Arnal J, Gomez J, Lopez F. Exhaust Emissions from a Diesel Engine Fueled with Transesterified Waste Olive Oil☆. *Fuel*. 2003; 82(11): 1311-1315.
- [9] Cardone M, Mazzoncini M, Menini S, Rocco V, Senatore A, Seggiani M, Vitolo S. Brassica Carinata as an Alternative Oil Crop for the Production of Biodiesel in Italy: Agronomic Evaluation, Fuel Production by Transesterification and Characterization. *Biomass and Bioenergy*. 2003; 25(6): 623-636.
- [10] Utlu Z, Koçak MS. The Effect of Biodiesel Fuel Obtained from Waste Frying Oil on Direct Injection Diesel Engine Performance and Exhaust Emissions. *Renewable Energy*. 2008;

- 33(8): 1936-1941.
- [11] Ghobadian A, Speller S, Jones M. Service Quality: Concepts and Models. *International journal of quality & reliability management*. 1994; 11(9): 43-66.
 - [12] Cetinkaya Y, Falk P, Mayhall CG. Vancomycin-Resistant Enterococci. *Clinical microbiology reviews*. 2000; 13(4): 686-707.
 - [13] Di Serio M, Tesser R, Dimiccoli M, Cammarota F, Nastasi M, Santacesaria E. Synthesis of Biodiesel Via Homogeneous Lewis Acid Catalyst. *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical*. 2005; 239(1-2): 111-115.
 - [14] Guinee JB, Heijungs R, Huppes G, Zamagni A, Masoni P, Buonamici R, Ekvall T, Rydberg T. 2010, (ACS Publications).
 - [15] Finkbeiner M, Inaba A, Tan R, Christiansen K, Klüppel H-J. The New International Standards for Life Cycle Assessment: Iso 14040 and Iso 14044. *The international journal of life cycle assessment*. 2006; 11(2): 80-85.
 - [16] Williams AS. 2009, (Champaign, IL: Illinois Sustainable Technology Center).
 - [17] Curran MA. Report on Activity of Task Force 1: Data Registry-Global Life Cycle Inventory Data Resources. *The International Journal of Life Cycle Assessment*. 2006; 11(4): 284-289.

謝辞

本研究の一部（第2章，第3章）は，「平成26年度笹川科学研究助成（研究番号：26-624）研究課題：廃植物油混合燃料によるディーゼルエンジンの健康リスク軽減効果に関する研究」の助成を受けて遂行されました。

本研究の一部（第4章）は，NEDOによる，平成24年度「新エネルギーベンチャー技術革新事業（Bフェーズ）ボイラー用バイオマスリサイクル燃料の技術開発」の助成を受けて遂行されました。

本研究で使用した，ディーゼルエンジン用廃植物油混合燃料，およびボイラー用固形廃植物油混合代替燃料（NEF）は，すべて株式会社グローイングジャパン（当時）より提供されたものです。

本研究を遂行するにあたり，三重大学四日市フロント（当時）の伊藤幸生コーディネーターには種々お世話になりました。

ここに記して，深謝いたします。