

マルチ燃料対応船用機関制御に関する研究  
—バイオ燃料の燃焼技術に関する研究、  
燃焼制御システムの構築及び実証実験—

西尾 澄人\*、井亀 優\*\*、羽鳥 和夫\*\*、徐 芝徳\*\*  
春海 一佳\*、平田 宏一\*、岸 武行\*、仁木 洋一\*  
永井 建夫\*\*、福田 哲吾\*、川内 智詞\*

**Study on marine engine control for multi-fuel  
— Study on combustion technology of bio-fuel ,  
Construction of combustion control system and proof experiment—**

by

Sumito NISHIO, Masaru IKAME, Kazuo HATORI, Zhide Xu,  
Kazuyoshi HARUMI, Koichi HIRATA, Takeyuki KISHI, Youichi NIKI,  
Tateo NAGAI, Tetsugo FUKUDA and Satoshi KAWAUCHI

**Abstract**

With regard to global warming, reduction of CO<sub>2</sub> emission is a problem of great urgency. The thermal efficiency of a marine diesel engine is high. Therefore it is difficult to reduce CO<sub>2</sub> emission by improvement of the thermal efficiency. For such a reason, it is realistic to restrain the use of fossil fuel by using bio-fuel (raw vegetable oil, waste cooking oil) as a countermeasure against global warming. In this study, the authors aim at developing base technology to use various fuels, such as bio-fuel (raw vegetable oil, waste cooking oil) and the blended fuel of bio-fuel and heavy fuel, for a marine diesel engine safely and cleanly.

(1)[Study on combustion technology of bio-fuel] As a result of the experiment using the 4 stroke cycle, medium speed marine diesel engine, emission of CO and smoke of bio-fuel(raw vegetable oil, waste cooking oil) is lower than that of gas oil or marine diesel oil(MDO) at high load condition(75%,100%load), but that of bio-fuel is higher at low load condition (25%load). It is difficult to reduce CO and smoke by mixture with gas oil or MDO or by adjustment of fuel injection timing at low load condition.

(2)[Construction of combustion control system and proof experiment] The authors made the new fuel injection system composed of a common rail system and a cam drive pump to improve combustion at low load condition of a marine diesel engine. It is possible to make high injection pressure and to change injection pattern by using it. We installed it to the medium speed marine diesel engine and carried out operation test. In low engine load conditions, the combustion of biofuel results in higher CO and smoke emissions, but it is possible to reduce CO and smoke significantly by using the new injection system (low pressure pre-injection of a small amount of fuel).

---

\* 環境・動力系、\*\* 元海技研  
原稿受付 平成 26 年 4 月 15 日  
審査日 平成 26 年 5 月 13 日

## 目 次

1. まえがき	13
2. バイオ燃料の燃焼技術に関する研究	13
2.1 バイオ燃料使用による 温室効果ガス削減の考え方	13
2.2 実験装置及び方法	14
2.2.1 使用燃料	14
2.2.2 実験用ディーゼル機関	16
2.2.3 計測装置	16
2.2.4 実験方法	17
2.3 実験結果及び考察	17
2.3.1 燃料の種類が排ガス、 機関特性に与える影響	17
2.3.2 バイオ燃料の混合割合が排ガス、 機関特性に与える影響	20
2.3.3 燃料噴射時期が排ガス、 機関特性に与える影響	22
3. 燃焼制御システムの構築および実証実験	23
3.1 ハイブリッド・インジェクション・ システム (HIS) について	23
3.2 実験装置及び方法	24
3.2.1 HIS 付き実験用ディーゼル機関	24
3.2.2 使用燃料	25
3.2.3 計測装置	25
3.2.4 実験方法	25
3.3 実験結果及び考察	25
3.3.1 HIS 付きディーゼル機関での 基礎実験結果	25
3.3.2 HIS 付きディーゼル機関での バイオ燃料 100% 実験結果	33
4. まとめ	35
参考文献	36

## 1. まえがき

地球温暖化への対応として、二酸化炭素排出削減は重要な課題である。船用ディーゼル機関の熱効率はおもともと高いことから、さらなる熱効率向上による二酸化炭素排出の削減には限界がある。このため、再生可能エネルギーとして注目されている植物油等のバイオ燃料を使用することにより化石燃料の使用を抑制し、実質的な地球温暖化対策を実現することが現実的である。

バイオ燃料をディーゼル機関に適用する際、粘度を低くする等のためにエステル化する技術がよく知られている。ディーゼル油代替燃料であるバイオディーゼルフュエル (BDF、エステル化処理

したバイオ燃料) が排ガスに与える影響については、自動車用ディーゼル機関に対しての研究が進んでいる。一般的には米国再生可能エネルギー研究所 (NREL) の調査にあるように、BDF の軽油への混合率を増やすと、NO<sub>x</sub> は増加し、PM、HC、CO は大幅に減少すると言われている。(100%BDF の場合、軽油に比べて NO<sub>x</sub> は 10% 増加、CO、PM は約 50% 低減、HC は 70% 低減)<sup>1)</sup> BDF をエンジンに適用する研究については文献 2<sup>2)</sup> によくまとめられている。

一方、BDF はエステル化処理等の前処理を必要とするためにコスト増となる。このため、エステル化処理を行っていない植物油をエンジンに適用する研究も行われているがそのほとんどが小型エンジンでの実験である。文献 3<sup>3)</sup>、文献 4<sup>4)</sup> によくまとめられている。

高粘度の重油に対応できる船用ディーゼル機関では、高粘度の植物油でも加熱して直接利用する可能性がある。船用ディーゼル機関では、バルチラ社が Wartsila 32 diesel engine でパーム油を使用して実験をしているが、HFO (C 重油) に比べて NO<sub>x</sub> は同等、CO は 50% 以上増加、THC は半減、SO<sub>x</sub>、PM は大幅に低減との報告がある<sup>5)</sup>。しかし、エステル化処理していない植物油を船用ディーゼル機関に適用した研究は BDF の研究や小型エンジンの研究に比べて少ない。

そこで、エステル化処理をしていない植物油 (菜種油、パーム油、廃食油) を船用ディーゼル機関で安全かつクリーンに使用するための基盤技術を開発することを目的として研究を実施したので、その研究成果を報告する。なお、本報告は大きく 2 つのテーマから構成される。すなわち、「バイオ燃料の燃焼技術に関する研究」及び「燃焼制御システムの構築及び実証実験」からなる。

## 2. バイオ燃料の燃焼技術に関する研究

「バイオ燃料の燃焼技術に関する研究」では、バイオ燃料単独、バイオ燃料と化石燃料の混合割合を変えたエンジン実験により、これらが着火時期などの燃焼の変化に与える影響や NO<sub>x</sub>、スモーク排出などの排ガス性状に与える影響を明らかにした。さらに、燃料噴射時期を変えたエンジン実験により、より望ましい燃焼状態を実現するための基礎的知見を取得した。

2.1 バイオ燃料使用による温室効果ガス削減の考え方<sup>6)、7)</sup>

地球温暖化については、これまで地下に隔離さ

れていた炭素（C）を成分に持つ石油や石炭を使用して CO<sub>2</sub> を排出したため、大気中の CO<sub>2</sub> 濃度が増加したことが原因の一つと言われている。バ

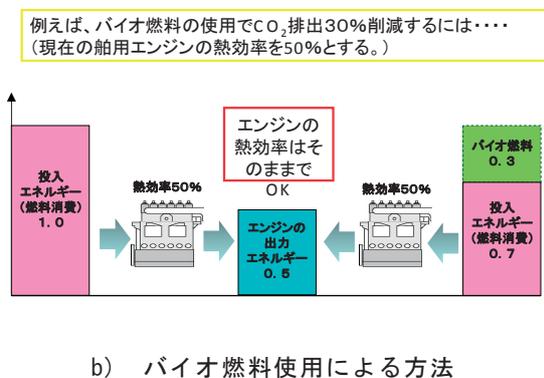
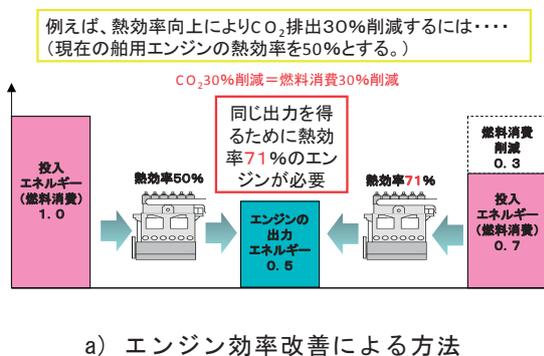


図-1 バイオ燃料使用による温室効果ガス削減の考え方



軽油 A重油 菜種油 パーム油 廃食油

図-2 使用燃料

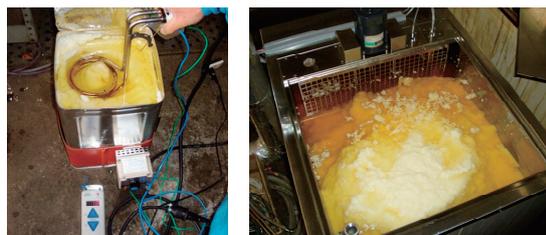


図-3 使用したパーム油（ヒータで加熱して使用）

イオ燃料の使用は、大気中の CO<sub>2</sub> を吸収して成長した生物（有機体）を利用して燃料を作りこれを使用するため、我々の生態系の C の総和は変わらず、CO<sub>2</sub> の濃度も変わらないと考えられている。「京都議定書」において、植物を原料とするバイオ燃料を燃焼させた場合には、次の世代の植物が光合成によってそれを吸収して育つため、大気中の CO<sub>2</sub> の総量を増加させないという考え方（カーボンニュートラル）により、バイオ燃料の燃焼によって排出された CO<sub>2</sub> を温室効果ガス排出量として計上しないことにしている。以上のことから、バイオ燃料は温室効果ガス削減の一つの方法と考えられている。

一方、温室効果ガス削減のためには熱機関の効率を上げることも一つの方法である。しかし、船用ディーゼル機関はすでに高効率となっているため、これは容易ではない。図 1 に示すように、使用燃料を 30%削減して同じ出力を得るエンジンを作ることは容易ではないが、バイオ燃料を 30%混合して使用することにより同等の効果が得られるため、より現実的な対応策と考えられる。

## 2.2 実験装置及び方法

### 2.2.1 使用燃料

使用した燃料は、図 2 に示す軽油、A 重油、菜種油、パーム油、廃食油であり、その性状を表 1、表 2 に示す。

菜種油は日本では一般的な植物油である。パーム油は図 3 に示すように常温では固体であるためヒータで加熱して取り扱う必要がある。配管内で冷えると固まって流れを止めるため、取り扱いには十分注意を払う必要がある。廃食油は不純物が燃料フィルターをつまらせるため、不純物を十分に分離除去するように注意が必要である。図 4 に示すように布による濾過や、タンクを 1 日以上静置して沈殿した部分を排除して使用したが、沈殿させて分離する方法が有効であった。図 4 の右図は沈殿させて除去した不純物であるが、上層部に廃食油が少し残っている。セッティングタンクの重要さが目で見て理解できる。

表 1、表 2 から菜種油等バイオ燃料は、軽油や A 重油に比べて動粘度、引火点が高く、総発熱量は約 10%低い。なお、バイオ燃料は約 10%の酸素を含んでいる。

使用燃料の温度と密度及び動粘度の関係を図 5、図 6 にそれぞれ示す。バイオ燃料の動粘度は高いため、通常機関に適用できる 10cSt 程度にするため、約 100℃に加熱して実験を行うこととした。

また、各種燃料の蒸留特性を図 7 に示す。バイオ燃料は軽油や A 重油に比べて留出温度が高い。

表-1 使用燃料の一般性状分析結果

		軽油	A重油	菜種油	パーム油	廃食油
密度(15°C)	g/cm <sup>3</sup>	0.8217	0.8737	0.9215	0.9161	0.9245
動粘度(50°C)	cSt	2.2	2.4	25.2	28.2	25.7
流動点	°C	-22.5	-32.5	-15.0	7.5	-7.5
引火点	°C	66	86	243	269	249
水分	%(m/m)	-	0.01	0.03	0.03	0.07
残留炭素	%(m/m)	-	0.035	0.33	0.21	0.32
10%残油残留炭素	%(m/m)	0.01	-	-	-	-
灰分	%(m/m)	-	0.00	0.00	0.00	0.01
硫黄分	%(m/m)	0.00	0.06	0.01	0.01	0.03
アスファルテン	%(m/m)	-	0.25	0.17	0.20	0.24
ドライスラッジ	%(m/m)	-	0.001	0.001	0.002	0.032
総発熱量	J/g	46000	45007	40750	39390	39250
セタン指数		58.5	42.6	33.8	40.6	38.5
CCAI		799	836	820	812	822
90%留出温度	°C	333.0	-	333.5	362.0	362.0
低温目詰まり点	°C	-21	-	-	-	-
酸価	mgKOH/g	-	-	0.05	0.06	1.85
金属分析						
Na	mg/kg	-	0	1	1	18
Mg	mg/kg	-	0	0	0	3
Al	mg/kg	-	0	1	0	1
Si	mg/kg	-	0	0	0	1
P	mg/kg	-	0	0	0	9
Ca	mg/kg	-	0	0	0	1
V	mg/kg	-	0	0	0	0
Cr	mg/kg	-	0	0	0	0
Fe	mg/kg	-	0	0	0	0
Ni	mg/kg	-	0	0	0	0
Cu	mg/kg	-	0	0	0	0
Zn	mg/kg	-	0	0	0	0
Mo	mg/kg	-	0	0	0	0
Sn	mg/kg	-	0	0	0	0
Ba	mg/kg	-	0	0	0	0
Pb	mg/kg	-	0	1	0	0

表-2 使用燃料の元素分析結果

		軽油	A重油	菜種油	パーム油	廃食油
H	(wt%)	14.18	12.49	11.98	11.87	11.66
C	(wt%)	85.43	86.82	77.35	76.40	77.16
N	(wt%)	0.11	0.18	0.08	0.25	0.11
O	(wt%)	<2.5(0.5)	<2.5(0.2)	10.7	11.5	11.1

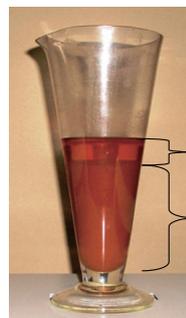


図-4 廃食油の濾過と静置による沈殿物

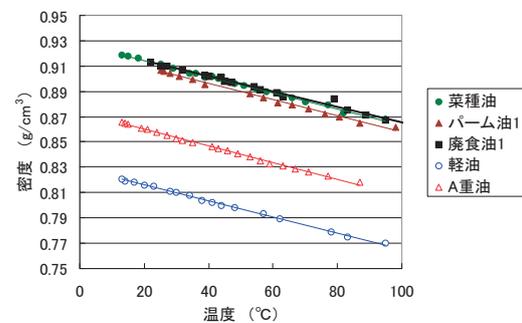
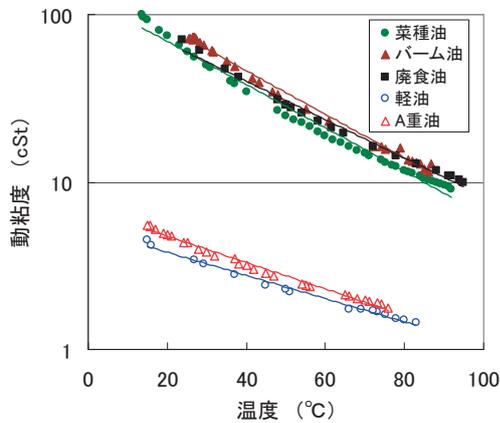


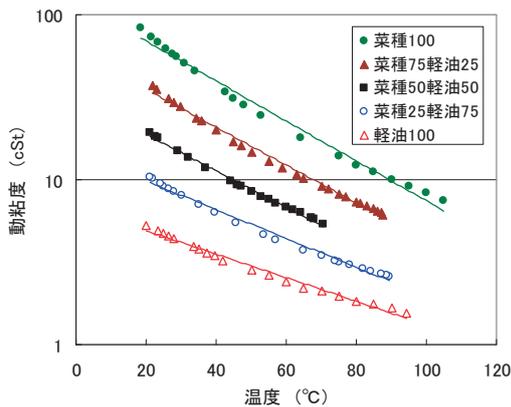
図-5 使用燃料の密度と温度の関係

### 2.2.2 実験用ディーゼル機関

本研究に使用した実験用ディーゼル機関は、図 8、表 3 に示した船用中速 4 ストロークサイクルディーゼル機関である。本ディーゼル機関は A 重油仕



a) 燃料の違い



b) 混合割合の違い

図-6 使用燃料の動粘度と温度の関係

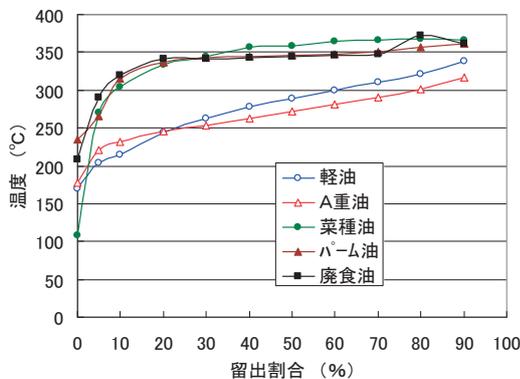


図-7 使用した燃料の蒸留特性

様で作られたものであるが、高粘度油で実験を行うため、恒温油槽、ヒータ付き燃料配管により燃料加熱ができるように燃料系統を改造してある。

### 2.2.3 計測装置

排ガス計測にはポータブル型燃焼ガス分析計 (testo350XL) を用い、NO<sub>x</sub>、CO、O<sub>2</sub>、CO<sub>2</sub> 濃度を計測した。本分析計の計測原理は表 4 のとおりである。

スモークの計測には、JIS D 8004 に準拠したスモークメータ (ろ紙式ディーゼル排気黒煙濃度測定器、SOKKEN MODEL GSM-3) を使用した。



図-8 船用中速 4 ストロークディーゼル機関

表-3 船用 4 ストロークディーゼル機関の諸元

製作者	松井鉄工所
型名	MU323DGSC
型式	中速4ストロークディーゼルエンジン 過給機、空気冷却器付き
シリンダ数	3
シリンダ径	230mm
ストローク	380mm
接続棒長さ	751mm
連続最大出力	257.4kW (350.0PS)
回転数	420rpm
正味平均有効圧力	1.77MPa (18.10kgf/cm <sup>2</sup> )
圧縮比	13
吸気弁開/閉	BTDC66° / ABDC35°
排気弁開/閉	BBDC80° / ATDC35°
噴射ノズル	φ0.32mm×7
使用燃料	A重油

表-4 排ガス測定原理

NOx (NO (0~3000ppm)、NO <sub>2</sub> (0~500ppm))	: 定電位電解法
CO (0~10000ppm)	: 定電位電解法
O <sub>2</sub> (0~25Vol.%)	: ガルバニ電池式
CO <sub>2</sub> (0~50Vol.%)	: NDIR (非分散型赤外線吸収法)

2.2.4 実験方法

燃料の種類、バイオ燃料の混合割合、燃料噴射時期が排ガス特性や機関特性に与える影響を調べるために、各種燃料を使用して船用特性の25%、50%、75%、100%負荷率に設定して実験を行った。

実験に際し、機関を各運転条件に設定後、30分以上運転し、機関の状態が静定した後、筒内圧および燃料噴射圧データをクランク角度0.5度間隔で収集するとともに排ガス計測を実施した。筒内圧データは、50波形の平均をとって、燃焼解析を行った。機関の各種温度、圧力データは1秒間隔で収集した。

排ガス計測は、機関の状態が静定した後、燃焼ガス分析計のサンプリングプローブを排気管のエンジン出口から約15m下流の穴に差し込み、排ガス成分濃度指示値が安定した約5分後にデータ収集した。

スモーク濃度の計測は、スモークメータのサンプリングプローブを排気管のエンジン出口から約15m下流の穴に差し込み計測した。本エンジンのスモーク濃度は低いため、通常の5倍の体積の吸引を5回実施し、その平均値を計測値とした。

バイオ燃料は粘度が高いため、動粘度を通常機関に適用できる10cSt程度にするために、恒温油槽内で約60℃に加熱し、燃料配管内ヒータで加熱して燃料噴射ポンプ前で約100℃になるように設定して実験を行った。A重油と菜種油の混合油は動粘度を10cSt程度にするために、燃料噴射ポンプ前の温度をそれぞれ次のように設定して実験を行った。A重油およびA重油75%菜種油25%混合油：約25℃、A重油50%菜種油50%混合油：約50℃、A重油25%菜種油75%混合油：約65℃、菜種油：約100℃。

2.3 実験結果及び考察

2.3.1 燃料の種類が排ガス、機関特性に与える影響<sup>8)、9)</sup>

船用中速ディーゼル機関(3気筒)に軽油、A重油、バイオ燃料(軽油、パーム油、廃食油)を使用して、各エンジン負荷率(船用特性の25%、

50%、75%、100%負荷)で実験した結果を図9~図13に示す。

NOxは高負荷ではバイオ燃料が軽油に比べて高い値であるが、A重油に比べるとわずかに高くなる程度である。バイオ燃料のNOxは軽油に比べて15~20%増加し、A重油に比べて0~5%増

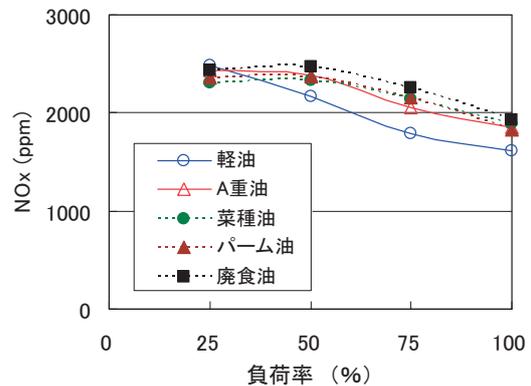


図-9 燃料の種類がNOxに与える影響

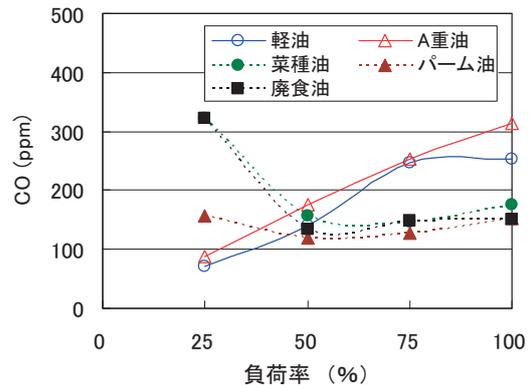


図-10 燃料の種類がCOに与える影響

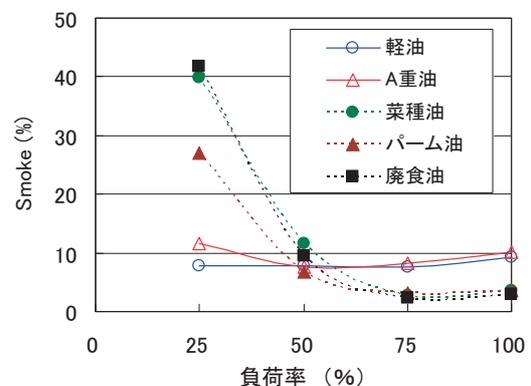


図-11 燃料の種類がSmokeに与える影響

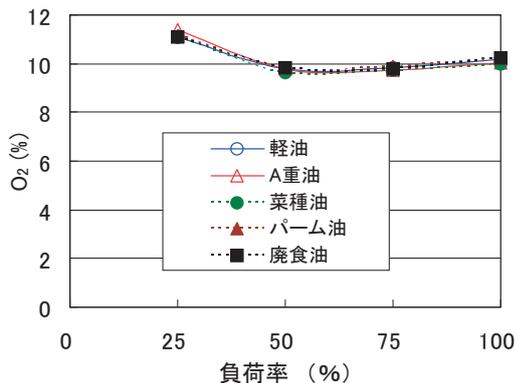


図-12 燃料の種類が O<sub>2</sub> に与える影響

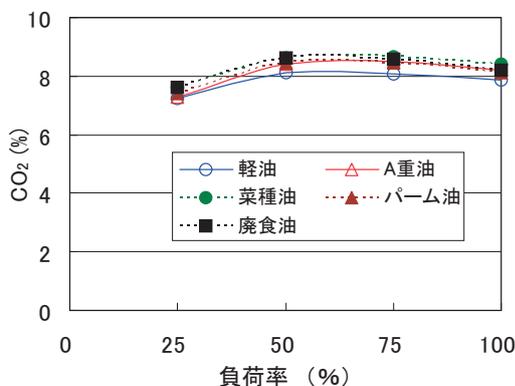


図-13 燃料の種類が CO<sub>2</sub> に与える影響

加した。一方、低負荷ではバイオ燃料が軽油やA重油に比べて低い値になる。これは低負荷では燃焼が悪くなり NO<sub>x</sub> が少なくなったものと考えられる。バイオ燃料の NO<sub>x</sub> は軽油やA重油に比べて0~7%低い値であった。

CO、スモークは良く似た傾向を示している。バイオ燃料は軽油やA重油に比べて高負荷では低い値を示すが、低負荷では高い値を示す。高負荷では、バイオ燃料のCOは軽油やA重油に比べて30~50%低減し、スモークは60~65%低減した。

一方、低負荷では、バイオ燃料のCO、スモークは軽油やA重油に比べて2~5倍の高い値であった。低負荷でのバイオ燃料の使用は燃焼悪化を起こしているものと考えられる。バイオ燃料を使用した場合に、低負荷運転で燃焼が悪化する理由としては、燃料の着火直前の周囲状態が影響しているものとする。本船用ディーゼル機関の圧縮比は13であり、過給機は付いているが、25%負荷率ではあまり過給圧が高くない。着火直前の燃焼室内圧力と温度(推定値)の一例を表5に示す。低負荷状態での着火直前の燃焼室内の条件(温度、圧力)は引火点が高いバイオ燃料にとっては厳しい条件であったためと推測する。尚、着火直前の温度(推定値)は式(1)により算出している。

$$T = \frac{PV}{PaVa} Ta \tag{1}$$

ここで、P、V、Tは着火直前の燃焼室内圧力、シリンダ容積、燃焼室内温度であり、Pa、Va、Taは吸気弁が閉じた時の給気圧、シリンダ容積、給気温度である。Pは実測値、Paに給気圧、Taは給気温度、Va/Vは圧縮比を代入しておおよその着火直前の燃焼室内温度を算出している。

図14、図15にエンジン負荷率25%、75%の各燃料(軽油、A重油、菜種油、パーム油、廃食油)の燃焼解析の結果例を示す。図中には筒内圧、燃料噴射圧、熱発生率を記してある。燃料噴射圧を見るとバイオ燃料の噴射期間が長くなっているのが分かる。これは、バイオ燃料の発熱量が他の燃料に比べて低いことにより噴射量の容積が増えたことが理由と考えられる。筒内圧を見てもバイオ燃料の燃焼後の筒内圧の上昇勾配が低くなっているが、これは燃料の発熱量の違いが関係しているものと考えられる。

着火時期は高負荷では各燃料同程度であるが、低負荷では着火時期に差が出ている。また、一般に着火遅れが大きいと熱発生率が爆発的な予混合

表-5 着火直前の燃焼室内圧力と温度の例

船用中速ディーゼル機関(圧縮比13)					
エンジン負荷率		25%	50%	75%	100%
吸入空気圧(絶対圧)	MPa	0.112	0.137	0.166	0.197
吸入空気温度	°C	33	34	35	35
着火直前の燃焼室内圧力	MPa	3.5	4.6	5.4	6.5
着火直前の燃焼室内温度(推定値)	°C	463	520	498	509

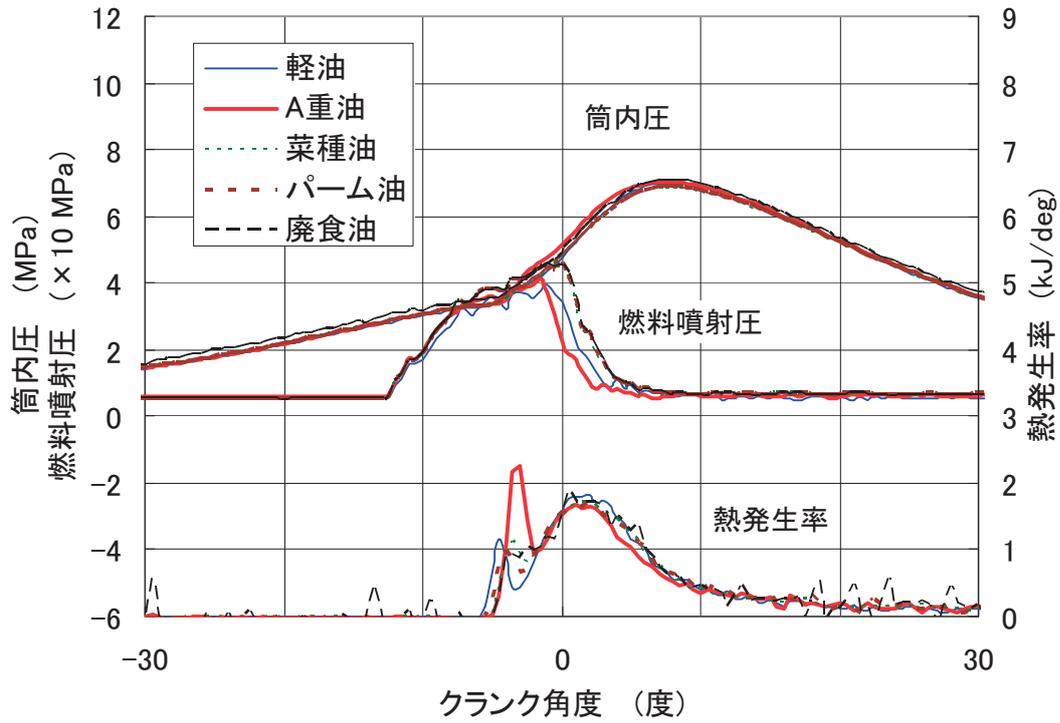


図-14 燃料の種類が燃焼特性に与える影響 (エンジン負荷率: 25%)

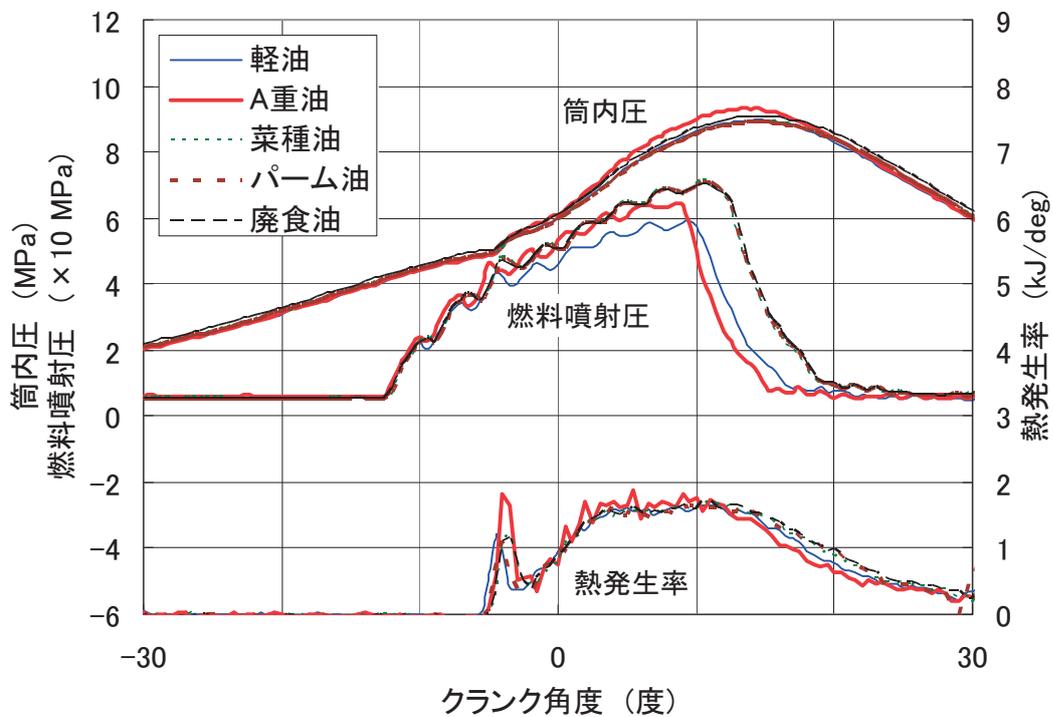


図-15 燃料の種類が燃焼特性に与える影響 (エンジン負荷率: 75%)

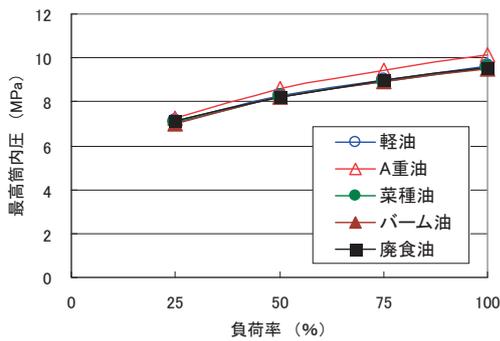


図-16 燃料の種類が最高筒内圧に与える影響

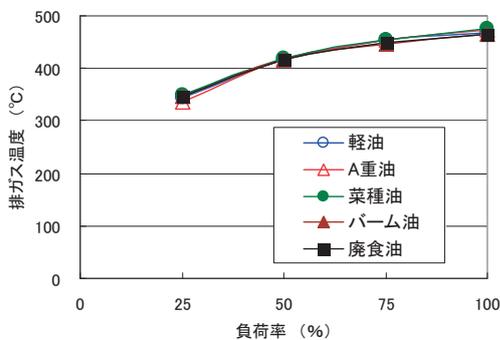


図-17 燃料の種類が排ガス温度に与える影響

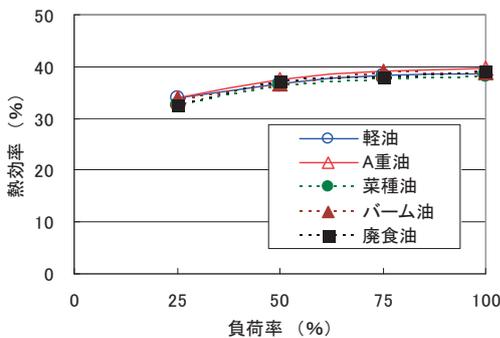


図-18 燃料の種類が熱効率に与える影響

燃焼が大きくなるが、バイオ燃料の熱発生率を見ると、予混合燃焼部分が低い値である。バイオ燃料の燃焼初期の燃焼が悪いものと推測される。低負荷での燃焼の改善が課題と考える。

図 16～図 17 に各燃料が最高筒内圧、排ガス温度に与える影響を示す。最高筒内圧は、全ての条件でバイオ燃料が A 重油より低く、軽油と同程度である。それにもかかわらず、高負荷でバイオ燃料の NO<sub>x</sub> の生成量が A 重油より高い。メチルエ

ステル化処理したバイオディーゼルフュエルは、分子構造中に酸素を含んでいるため理論的には燃焼性が増すと言われており<sup>10)</sup>、メチルエステル化処理を行っていないバイオ燃料についても同様の理由により燃焼性が増したものと考えられる。低負荷で菜種油の NO<sub>x</sub> の生成量が少ないのは、CO やスモークが高いことから燃焼が悪化したためと考えられる。

排気温度は、各条件で A 重油とほぼ同じであった。

熱効率を図 18 に示すが、各燃料同程度であり、熱効率の観点ではバイオ燃料の使用に問題がないことが分かる。

### 2.3.2 バイオ燃料の混合割合が排ガス、機関特性に与える影響<sup>8)、11)</sup>

バイオ燃料は高負荷運転においてはスモークや CO が A 重油や軽油より低く問題はないと考えられるが、低負荷運転においてはスモークや CO が高いため、低負荷運転での燃焼の改善が課題と考える。

一般に燃焼改善のためには、より燃焼性の良い燃料を混合することが知られている。そこで、バイオ燃料（菜種油）と A 重油の混合割合を変えて船用中速ディーゼル機関で実験した結果を図 19、図 20 に示す。エンジンの運転条件は船用特性の 25% 負荷率（機関出力：64.35kW（87.5PS）、機関回転数：265rpm）である。なお、図 10、図 11 の CO、スモークの結果から分かるように菜種油、パーム油および廃食油はほぼ同じような傾向を有しており、この結果はパーム油と廃食油についても同様である<sup>12)、13)</sup>。

CO、スモークは菜種油の混合割合が増えると、ほぼ混合割合に比例して増加する。NO<sub>x</sub> は菜種油の混合割合が増えると低くなる傾向にある。O<sub>2</sub>

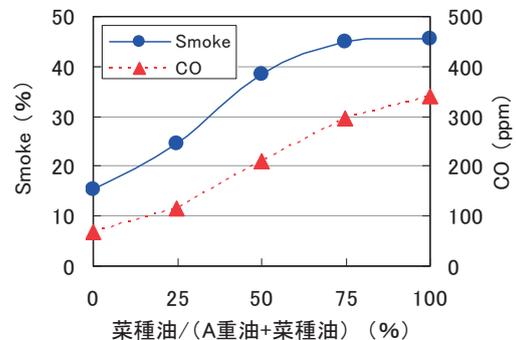


図-19 混合割合が Smoke、CO に与える影響（エンジン負荷率：25%）

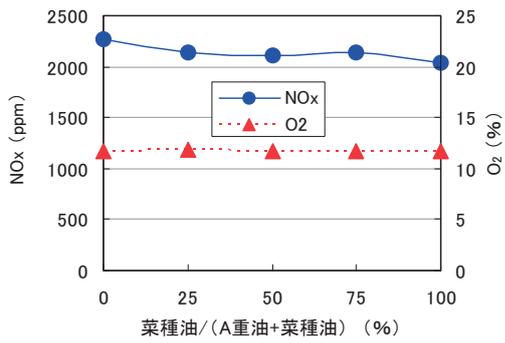


図-20 混合割合がNOx、O<sub>2</sub>に与える影響 (エンジン負荷率：25%)

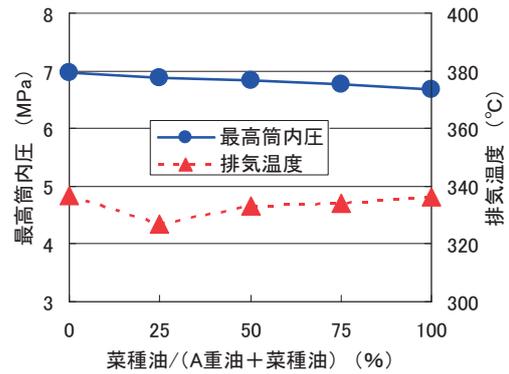


図-22 混合割合が最高筒内圧、排気温度に与える影響 (エンジン負荷率：25%)

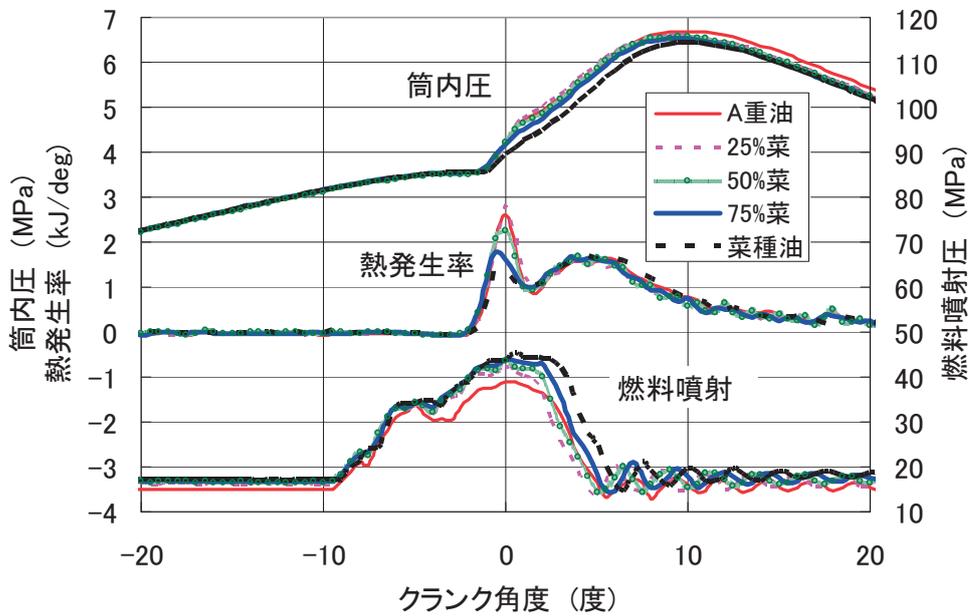


図-21 混合割合が燃焼特性に与える影響 (エンジン負荷率：25%)

は混合割合の違いで特に大きな変化は見られなかった。

図 21 の燃焼解析図の熱発生率から分かるように、菜種油と A 重油の着火時期はほぼ同じであるが、菜種油の予混合燃焼の大きさが小さい。これは、菜種油の初期の燃焼が悪いことが推測される。

図 22、図 23 に最高筒内圧、排気温度、熱効率を示す。最高筒内圧は菜種油の混合割合が増えるに従い低下しており、NOx の低下と対応している。排気温度と熱効率は菜種油の混合割合の違いで特に大きな傾向は見られなかった。

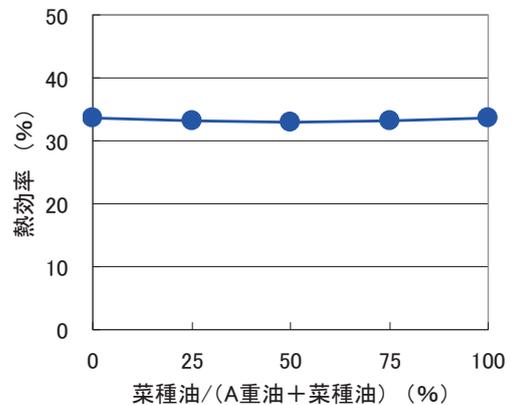


図-23 混合割合が熱効率に与える影響

2.3.3 燃料噴射時期が排ガス、機関特性に与える影響<sup>8)、11)</sup>

一般に燃焼改善のためには、適切な燃料噴射時期に設定することが知られている。そこで船用中速ディーゼル機関に菜種油（菜種油 100%）を使用して、図 24 に示すように燃料噴射時期を変えて実験を行った。エンジンの運転条件は船用特性の 25% 負荷率（機関出力：64.35kW（87.5PS）、機関回転数：265rpm）である。燃料噴射時期は図 24 の燃料噴射圧の加圧が始まる位置を上死点前 13 度、11 度、9 度、7 度、5 度に変えて実験を行った（図中それぞれ -13°、-11°、-9°、-7°、-5° と記載）。基準の燃料噴射時期は上死点前 9 度（-9°）である。

燃料噴射時期が排ガスに与える影響を図 25～図 28 に示す。CO、スモーク、NOx は、燃料噴射時期を遅くすると低減する。O<sub>2</sub> は、燃料噴射時期を遅くすると若干増加する傾向にある。CO、スモークの結果から燃料噴射時期の変更は燃焼を改善するが、A 重油の値と比較すると、大幅な低減には至っていない。

燃料噴射時期が最高筒内圧、排気温度、熱効率に与える影響を図 29～図 31 に示す。最高筒内圧は燃料噴射時期を遅くすると低下し、NOx と対応している。排気温度は燃料噴射時期を遅くすると高くなる。熱効率は燃料噴射時期を遅くしすぎると悪化する。

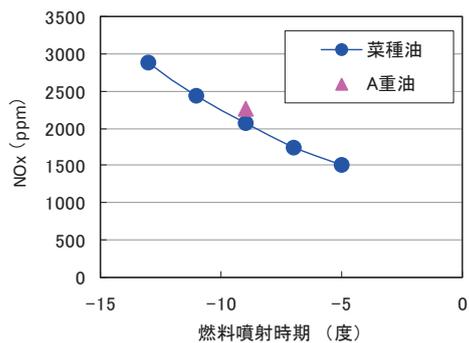


図-25 燃料噴射時期が NOx に与える影響 (エンジン負荷率：25%)

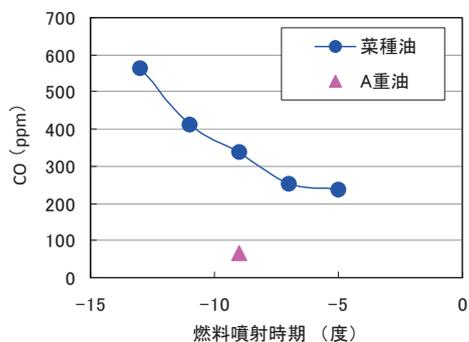


図-26 燃料噴射時期が CO に与える影響 (エンジン負荷率：25%)

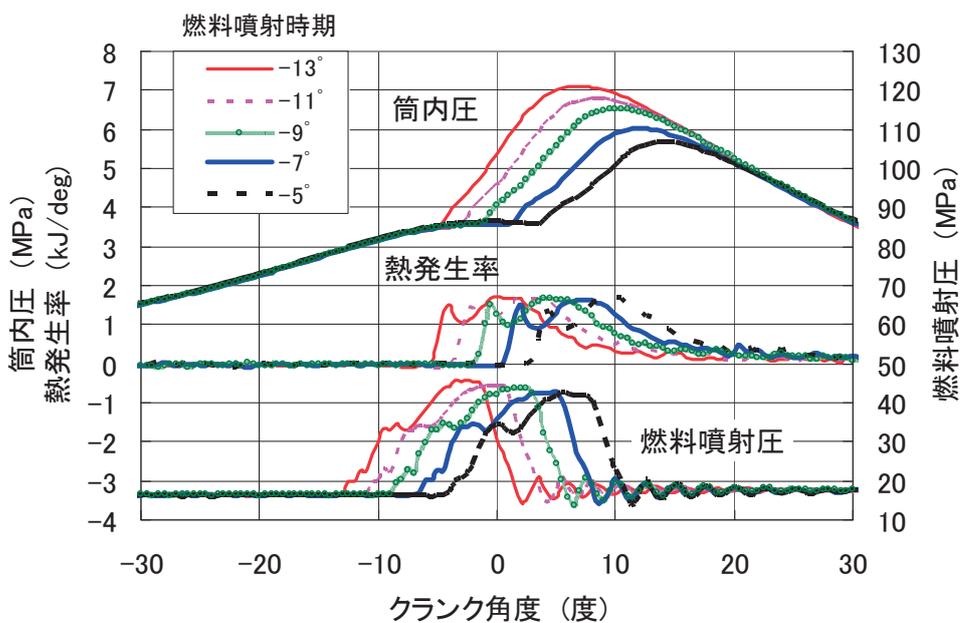


図-24 燃料噴射時期が燃焼特性に与える影響 (エンジン負荷率：25%)

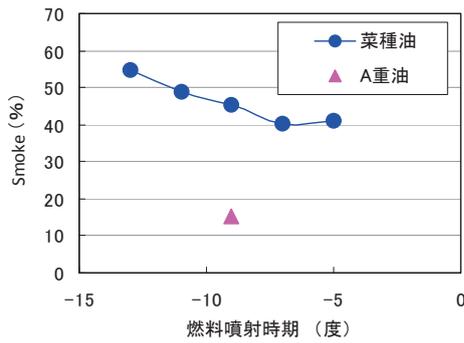


図-27 燃料噴射時期が Smoke に与える影響 (エンジン負荷率：25%)

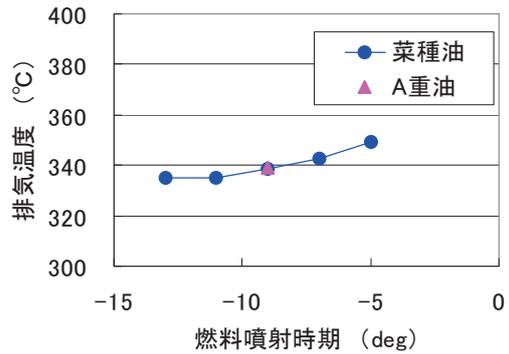


図-30 燃料噴射時期が排気温度に与える影響

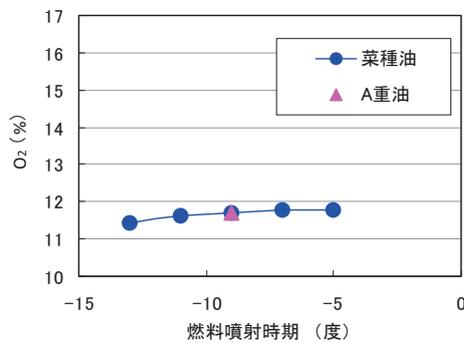


図-28 燃料噴射時期が O<sub>2</sub> に与える影響

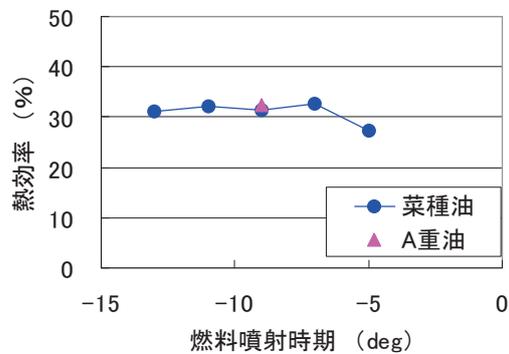


図-31 燃料噴射時期が熱効率に与える影響

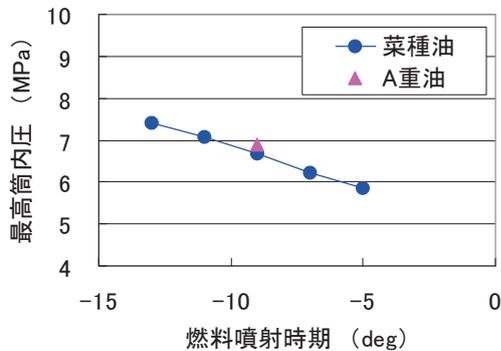


図-29 燃料噴射時期が最高筒内圧に与える影響 (エンジン負荷率：25%)

### 3. 燃焼制御システムの構築及び実証実験

「燃焼制御システムの構築及び実証実験」では、燃焼状態に応じて様々な燃料を最適に燃焼させるための燃焼制御システムを構築し、実際に本システムを用いたエンジン実験により、バイオ燃料の燃焼を制御し、その効果を確認し、評価を行った。

#### 3.1 ハイブリッド・インジェクション・システム (HIS) について

「バイオ燃料の燃焼技術に関する研究」で述べたように、バイオ燃料を船用中速ディーゼル機関に使用した実験において高負荷運転(75%、100%負荷)ではA重油や軽油に比べてCO、スモークが低減していることから、良好な燃焼が行われているものと考えられる。しかし、低負荷運転(25%負荷)においてCO、スモークの急激な増加が見られ、これは燃焼悪化によるものと考えられる。この改善の一つの方法に燃料噴射圧の高圧化や燃料噴射パターンの変更がある。

通常の機械式燃料噴射ポンプはカム駆動であるため、図33の左図に示すようにカムの形状に従い燃料噴射圧が上昇する。そのため、高負荷運転においては十分高い燃料噴射圧を得られるが、低負荷運転においては燃料噴射圧があまり高くない。

一方自動車用エンジンにおいて一般的になっているコモンレールを用いた電子制御燃料噴射システムにおいては、低負荷運転においても高圧噴射

が可能である。しかしこれを船用エンジンに適用しようとするコモンレールや加圧ポンプの大型化という問題が生じ、大幅なエンジン改造が必要になる。これは、船用エンジンが自動車用エンジンに比べ、燃焼室が大きく、回転数が遅いため、1 シリンダ 1 回あたりに噴射する燃料の量が多くなるためである。

そこで図 32 に示すように、機械式燃料噴射装置に自動車用の電子制御燃料噴射装置を付加することで、安価に、また既存のエンジンに比較的容易に適用できる燃料噴射装置を開発した。既存の機械式燃料噴射装置に電子制御噴射装置を加えることから、ハイブリッド・インジェクション・システム (HIS) と命名し、本システムによる噴射をアシスト噴射と呼ぶことにした。

図 33 に従来の機械式燃料噴射とアシスト噴射の燃料噴射圧の比較を示すが、アシスト噴射では低負荷時においても高圧噴射が可能である。また、始動時等のエンジン回転数が低い場合でも高速に燃料噴射圧を上げることが可能である。

また図 34 に示すように、プレ噴射 (パイロット噴射と呼ぶ場合もあるが、ここではこれ以降、主噴射より早いタイミングの噴射をプレ噴射に統一して記す)、アフター噴射 (ポスト噴射と呼ぶ場合もあるが、ここではこれ以降、主噴射より遅いタイミングの噴射をアフター噴射と統一して記す) 等、多様な燃料噴射パターンが可能である。

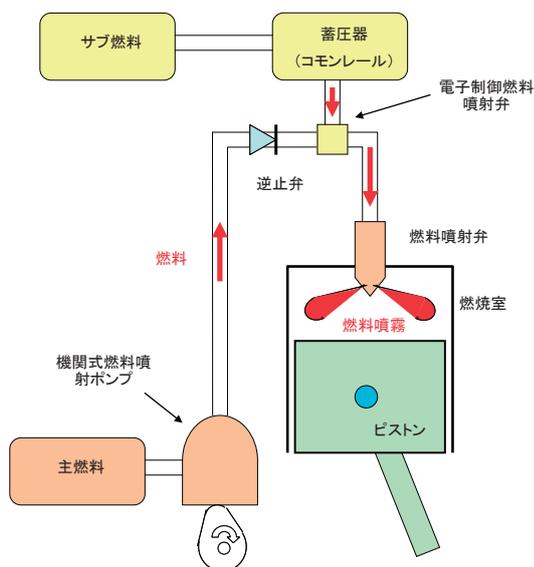


図 32 ハイブリッド・インジェクション・システム概要

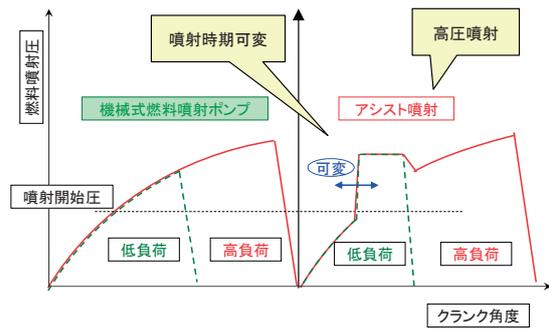


図 33 燃料噴射圧の比較

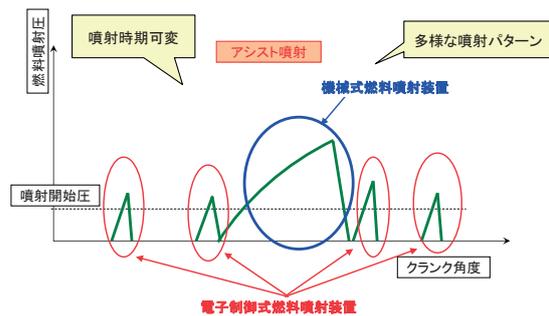


図 34 燃料噴射パターンの多様化

## 3.2 実験装置及び方法

### 3.2.1 HIS 付き実験用ディーゼル機関

コモンレールからの燃料注入の効果を最大限に発揮する方法として下記の 2 点を考慮して、表 3 に示す船用中速ディーゼル機関用のハイブリッド・インジェクション・システム (HIS) を製作した。(図 35～図 37)

- ① 逆止弁をとりつけて、加圧する燃料噴射高圧管の容積を小さくする。
- ② 電子制御燃料噴射弁の噴孔面積を大きくして、燃料通過時の圧損を小さくする。

製作した HIS の主な仕様は下記のとおりである。

- 6 気筒総排気量約 15.7 リットルの自動車用コモンレールを使用。
- ・ コモンレール最大圧力: 180MPa。(実験は 150MPa で行った。)
- ・ コモンレール圧力を 1MPa 間隔で変更可。
- ・ 燃料噴射タイミングをクランク角度 0.5 度間隔で調整が可能。
- 電子制御燃料噴射ノズルは、 $\phi 0.19 \times 8$  穴のノズルの中心に  $\phi 1.2\text{mm}$  の穴をあけて使用。(参考: 船用中速ディーゼル機関のノズルは  $\phi 0.32 \times 7$  穴、開弁圧 25.5MPa である。)

- HISは多段噴射(プレ噴射、アフター噴射)が可能になるように製作してある。

図38に本装置による噴射パターンの例を示すが、主噴射の前後にプレ噴射、アフター噴射も可能となっている。

また、機械式燃料噴射ポンプを噴射時期可変の機械式燃料噴射ポンプに変更してある。

### 3.2.2 使用燃料

使用した燃料は、表1に示すA重油、菜種油、廃食油である。

### 3.2.3 計測装置

計測装置は「バイオ燃料の燃焼技術に関する研究」で使用したポータブル型燃焼ガス分析計(testo350XL)及びスモークメータ(ろ紙式ディーゼル排気黒煙濃度測定器、SOKKEN MODEL GSM-3)を使用した。

### 2.2.4 実験方法

HISによるアシスト噴射の時期、噴射量が燃焼改善に与える影響を調べるために、廃食油50%混合油(廃食油50%+A重油50%)を用いて様々な燃料噴射パターンで基礎実験を行った。

最後に、様々な燃料噴射パターンの中で燃焼改善効果が高い噴射パターンでバイオ燃料100%(菜種油100%)を使用して燃焼改善効果の確認実験を行った。

燃料温度は廃食油50%混合油は燃料噴射ポンプ前の温度を約50℃に、菜種油100%の燃料では約100℃に設定して実験を行った。

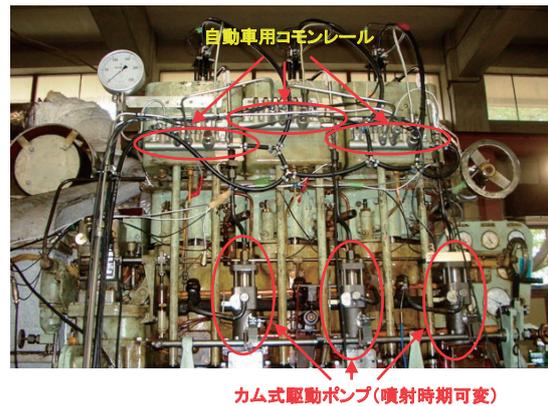


図-36 HISの取付け状況

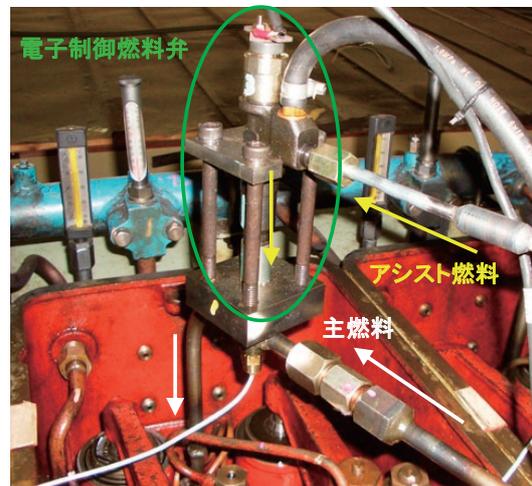


図-37 HIS付き燃料系統(電子制御弁取付け部)

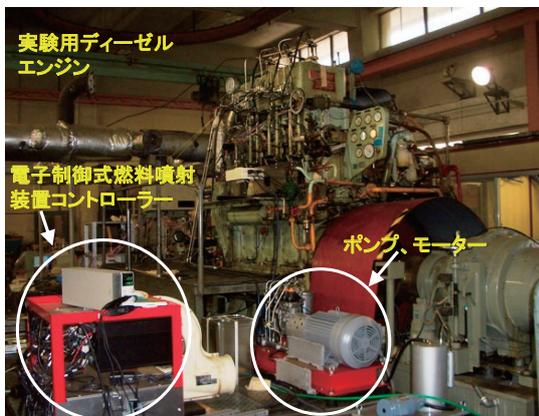


図-35 HIS付き実験用ディーゼル機関の概観

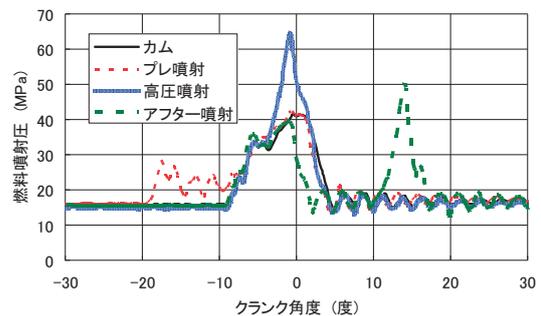


図-38 噴射パターンの例

## 3.3 実験結果及び考察

### 3.3.1 HIS付きディーゼル機関での基礎実験結果(8)、(13)

以上のように燃料噴射系をHIS(カム駆動燃料噴射ポンプ+小型コモンレール)に改造した状態

での実験結果を報告する。

バイオ燃料を使用した際に、25%負荷でCO、スモークが増加するため、これを改善する必要がある。このため、エンジン負荷率は25%で、使用燃料に廃食油50%混合油（廃食油50%+A重油50%）を用いて様々な燃料噴射パターンで実験を行い、燃焼改善の方法を探った結果、少量のプレ噴射が有効であることが分かった。この実験結

果を以下に示す。尚、菜種油50%混合油（菜種油50%+A重油50%）についても実験を行っており同じ結果が得られている<sup>14)</sup>。

まず、電子制御燃料弁の開弁時期と開弁期間（以下アシスト噴射の噴射時期及び噴射期間と示す）が排ガ斯特性、機関特性に与える影響を調べた。アシスト噴射の噴射時期が上死点に対して-20度、-10度、-5度、10度のそれぞれの状態で、噴射期

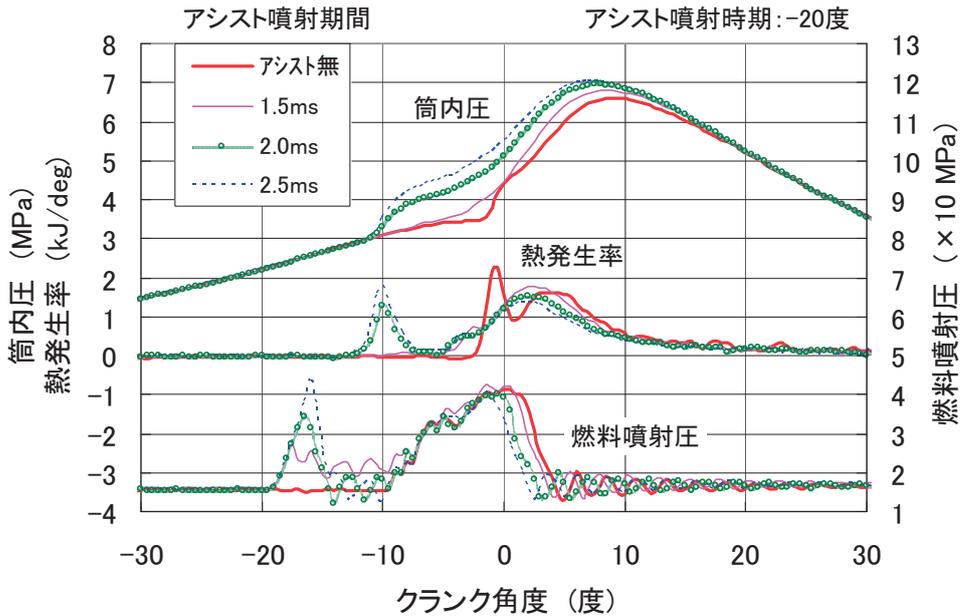


図-39 アシスト噴射量変更実験1  
(アシスト噴射時期：-20度、燃料：廃食油50%+A重油50%、25%負荷)

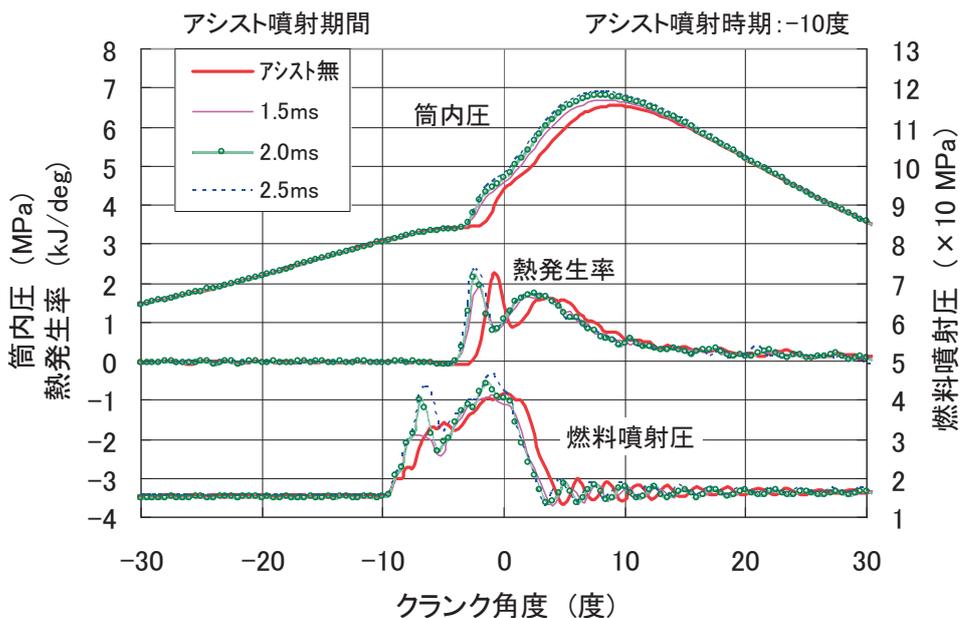


図-40 アシスト噴射量変更実験2  
(アシスト噴射時期：-10度、燃料：廃食油50%+A重油50%、25%負荷)

間を 1.5ms、2.0ms、2.5ms と変更して排ガス特性、機関特性を調べた。アシスト噴射の時期と主噴射の時期との関係から、アシスト噴射が上死点に対して-20度の噴射はプレ噴射であり、上死点-10度の噴射は燃料噴射初期の加速噴射であり、上死点に対して-5度の噴射は加圧噴射であり、上死点に対して10度の噴射はアフター噴射である。

燃料噴射弁の開弁圧は約 25.5MPa であり、噴射期間 1.5ms は少量の噴射を行うのに必要な噴射期間である。それぞれのアシスト噴射時期での燃焼解析の結果を図 39～図 42 に示す。図には筒内圧、熱発生率、燃料噴射圧が示してある。アシスト噴射-20度では、プレ噴射により初期の燃焼が変化している。噴射期間が長くなるにつれ、最高筒内

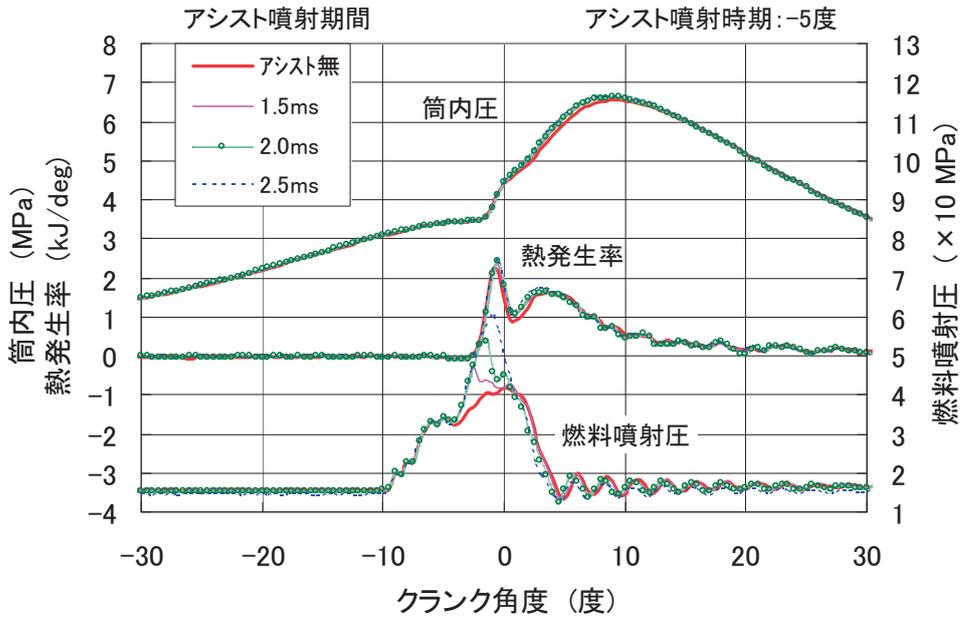


図-41 アシスト噴射量変更実験3  
(アシスト噴射時期：-5度、燃料：廃食油50%+A重油50%、25%負荷)

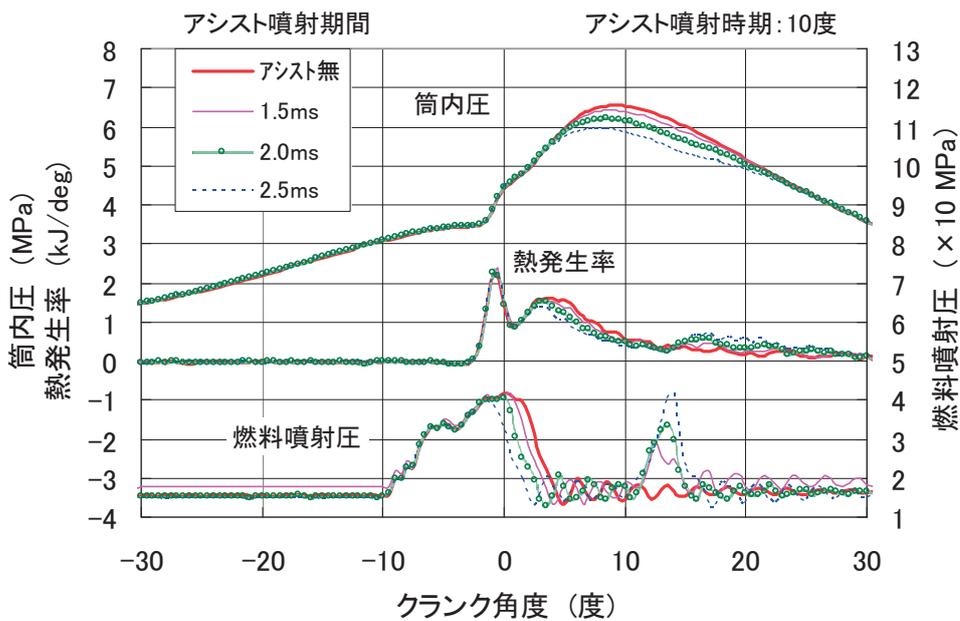


図-42 アシスト噴射量変更実験4  
(アシスト噴射時期：10度、燃料：廃食油50%+A重油50%、25%負荷)

圧が高くなっている。アシスト噴射 10 度のアフター噴射では、噴射期間が長くなると、主噴射の量が少なくなり、最高筒内圧が低くなっている。

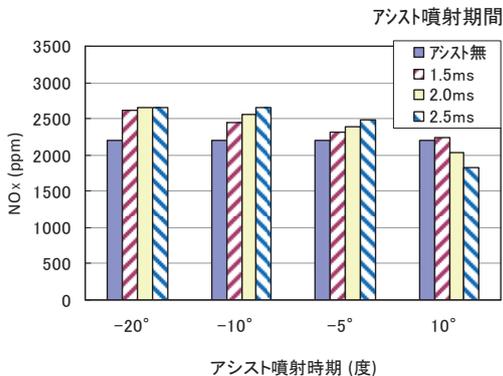


図-43 アシスト噴射時期及び噴射期間が NOx に与える影響 (燃料：廃食油 50%+A 重油 50%、25% 負荷)

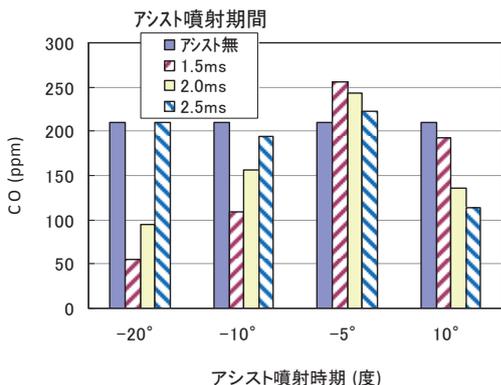


図-44 アシスト噴射時期及び噴射期間が CO に与える影響

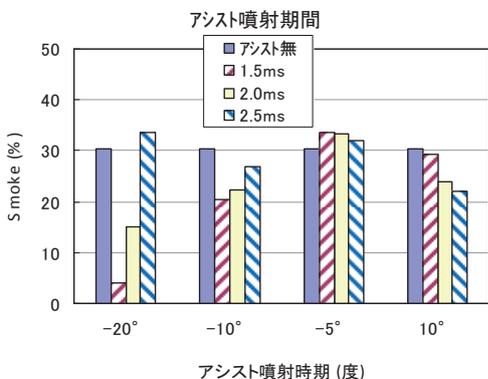


図-45 アシスト噴射時期及び噴射期間が Smoke に与える影響

図 43～図 47 にアシスト噴射の噴射時期、噴射量(噴射期間)が排ガス特性に与える影響を示す。

NOx はアシスト噴射-20、-10、-5 度では、噴射量が増えると増加し、アシスト噴射 10 度のアフター噴射では噴射量が増えると減少する。

CO、スモークは同じような傾向を示す。特にアシスト噴射-20 度での少量のプレ噴射である噴射期間 1.5ms では、CO、スモークの大幅な低減が行われている。しかし、噴射量が増えると増加していく傾向がある。少量のプレ噴射の場合、プレ噴射を行わない場合に比べて CO を約 74%、スモークを約 87% 低減できた。一方、アシスト噴射 10 度のアフター噴射では、噴射量を多くするほど CO、スモークが低減した。多量のアフター噴射の場合はアフター噴射を行わない場合に比べて CO を約 46%、スモークを約 27% 低減できた。

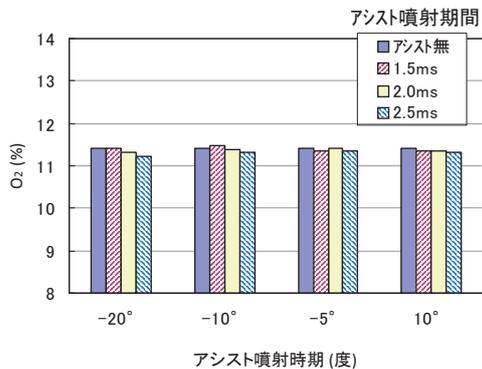


図-46 アシスト噴射時期及び噴射期間が O<sub>2</sub> に与える影響

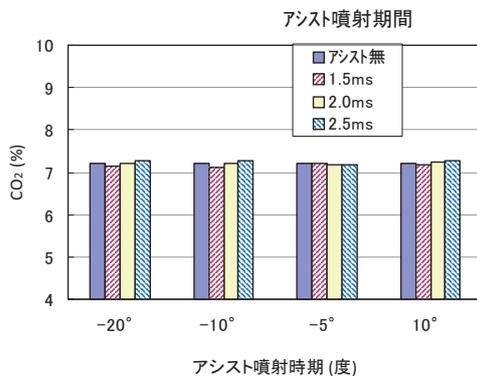


図-47 アシスト噴射時期及び噴射期間が CO<sub>2</sub> に与える影響

図48、図49にアシスト噴射の噴射時期、噴射量(噴射期間)が最高筒内圧、排気ガス温度に与える影響を示す。アシスト噴射-20度の少量のプ

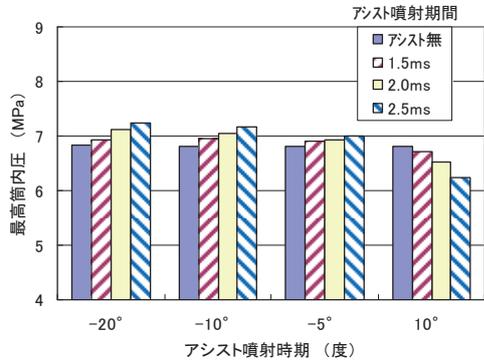


図-48 アシスト噴射時期及び噴射期間が最高筒内圧に与える影響 (燃料：廃食油50%+A重油50%、25%負荷)

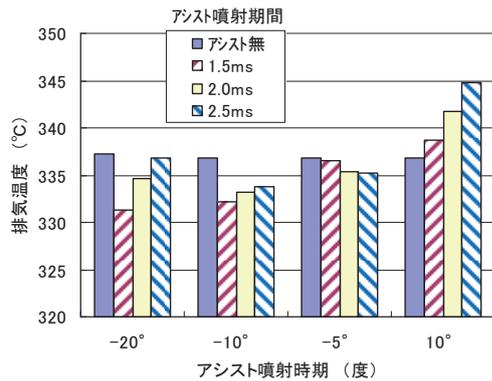


図-49 アシスト噴射時期及び噴射期間が排気温度に与える影響

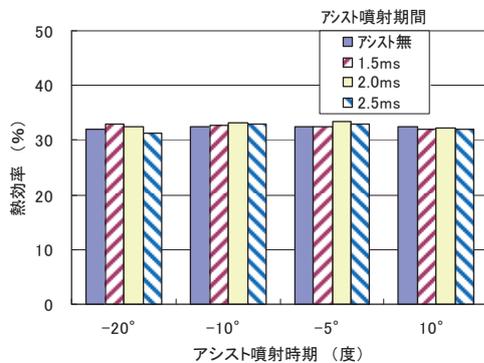


図-50 アシスト噴射時期及び噴射期間が熱効率に与える影響

レ噴射である1.5msの噴射期間では、排気温度が低減している。噴射量が増えるに従い、排気温度は上昇している。一方、アフター噴射であるアシスト噴射10度では、噴射量が増えるに従い、最高筒内圧は低くなるが、排気温度は上昇している。

図50にアシスト噴射の噴射時期、噴射量(噴射期間)が熱効率に与える影響を示す。少量のプレ噴射であるアシスト噴射-20度噴射期間1.5msでは熱効率が高くなっている。

次に、少量のプレ噴射と多量のアフター噴射が有効であることが分かったので、どの噴射位置で効果があるのかを調べるために、アシスト噴射時期を変更して実験を行った。少量のプレ噴射は1.5msの噴射期間を、多量のアフター噴射は2.5msの噴射期間を設定して、噴射時期を変更して排ガス計測、筒内圧計測を行った。燃焼解析を行った結果を図51、図52に示す。プレ噴射では、-12.5度より前の噴射では、初期の燃焼において急激な燃焼を抑えてなめらかな燃焼になっている。アフター噴射においては、最高筒内圧を低減している。

図53~図57にプレ噴射(噴射期間:1.5ms)の噴射時期が排ガス特性に与える影響を示す。NOxは-12.5度より前での噴射では高く、後になるほど低くなる傾向にある。CO、スモークは-12.5度より前の噴射では、大幅に低減している。後ろの噴射になるほどCO、スモークは高くなり、アシスト噴射を行わない場合と同じような値になっていく。尚、データを記載していないが、上死点前25度(-25度)においてもCO、スモークは低い値であった。今回のバイオ燃料の実験では、-20度~-12.5度の間でプレ噴射を行えば、CO、スモークを低減する良好な燃焼を実現でき、広い範囲でプレ噴射による低減効果があることが分かった。

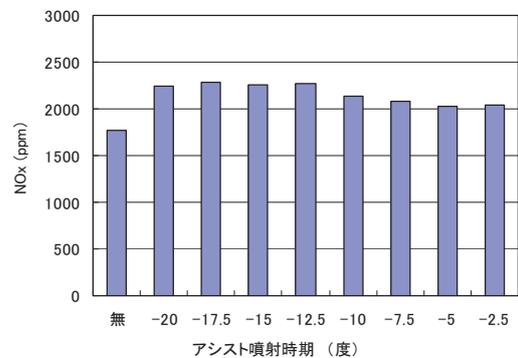


図-53 アシスト噴射時期がNOxに与える影響 (プレ噴射) (アシスト噴射期間:1.5ms、燃料：廃食油50%+A重油50%、25%負荷)

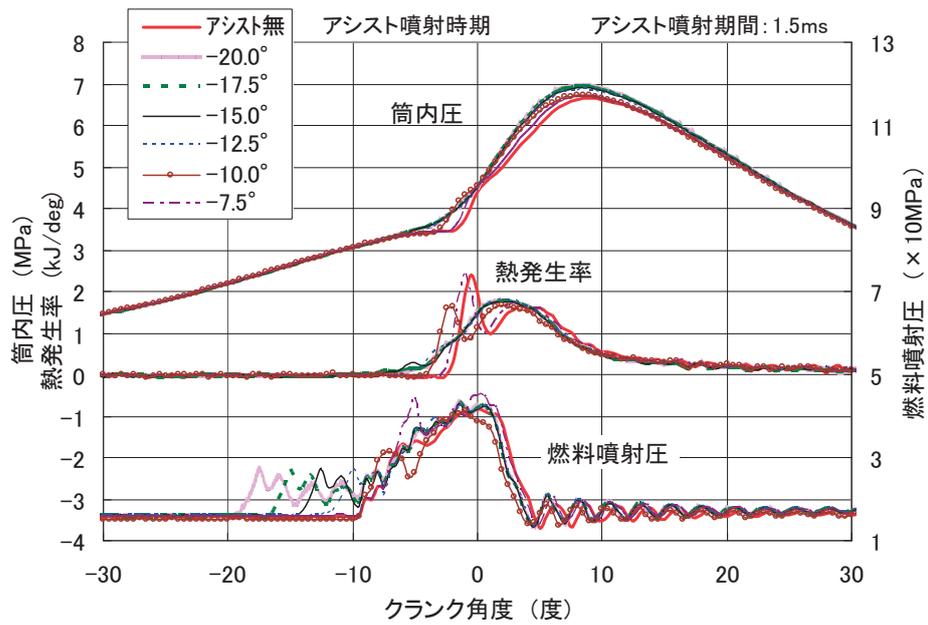


図-51 アシスト噴射時期変更実験（プレ噴射）  
（アシスト噴射期間：1.5ms、燃料：廃食油 50%+A 重油 50%、25%負荷）

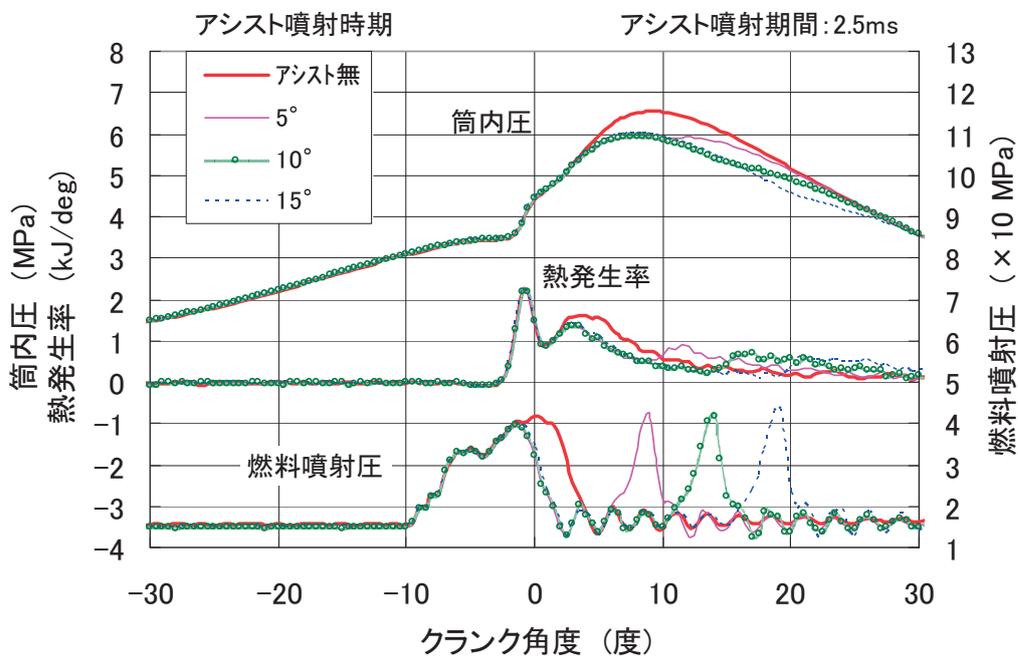


図-52 アシスト噴射時期変更実験（アフター噴射）  
（アシスト噴射期間：2.5ms、燃料：廃食油 50%+A 重油 50%、25%負荷）

図58～図60にプレ噴射の噴射時期が最高筒内圧、排気ガス温度、熱効率に与える影響を示す。  
 -12.5度より前の噴射では、最高筒内圧は高くなるが、排気ガス温度は低く、熱効率は高い値であった。

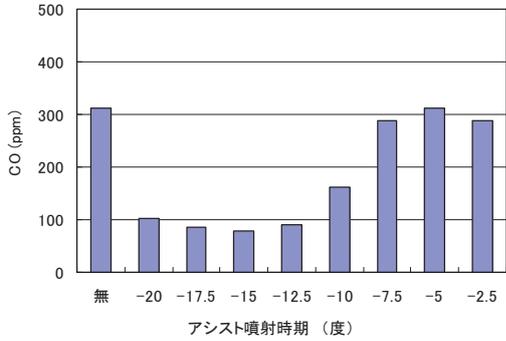


図-54 アシスト噴射時期がCOに与える影響 (プレ噴射) (アシスト噴射期間: 1.5ms、燃料: 廃食油50%+A重油50%、25%負荷)

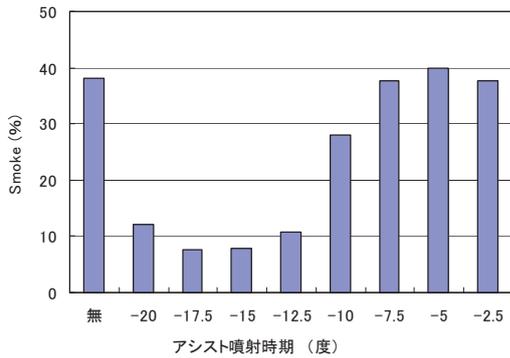


図-55 アシスト噴射時期がSmokeに与える影響 (プレ噴射)

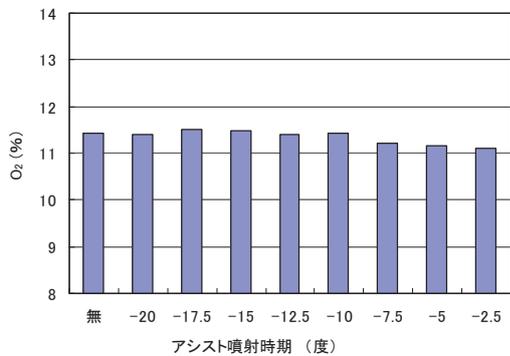


図-56 アシスト噴射時期がO<sub>2</sub>に与える影響 (プレ噴射)

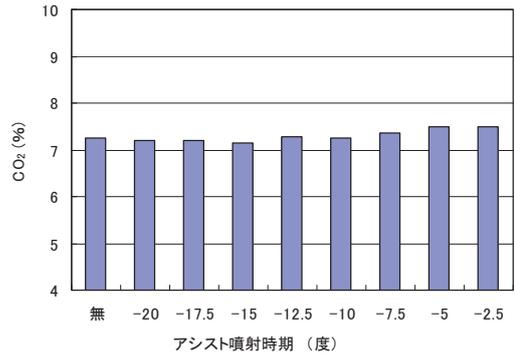


図-57 アシスト噴射時期がCO<sub>2</sub>に与える影響

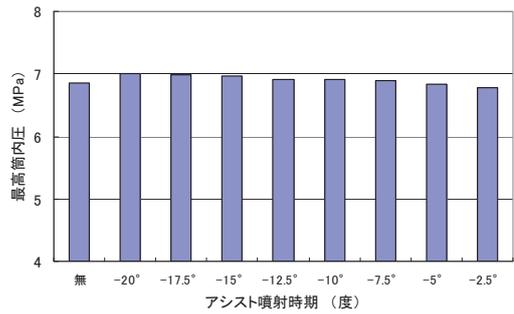


図-58 アシスト噴射時期が最高筒内圧に与える影響 (プレ噴射)

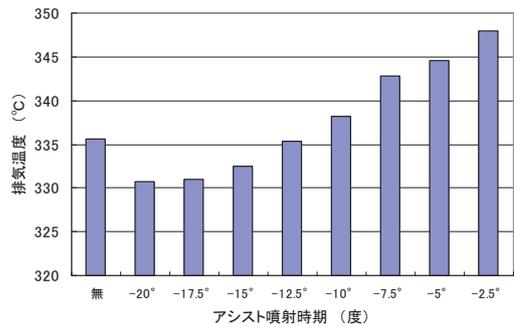


図-59 アシスト噴射時期が排気温度に与える影響 (プレ噴射)

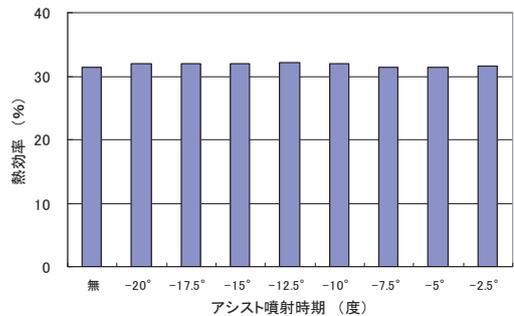


図-60 アシスト噴射時期が熱効率に与える影響 (プレ噴射)

図 61～図 65 にアフター噴射（噴射期間：2.5ms）の噴射時期が排ガス特性に与える影響を示す。噴射時期は上死点に対して 5 度、10 度、15 度に変えた実験結果である。NO<sub>x</sub> は、アシスト噴射が遅くなるほど低くなる。CO はいずれのアシスト噴射もアシスト噴射をしないときより低く、アシスト噴射 10 度のときが一番低い値であった。スモークはアフター噴射の噴射時期が遅いほど低くなった。

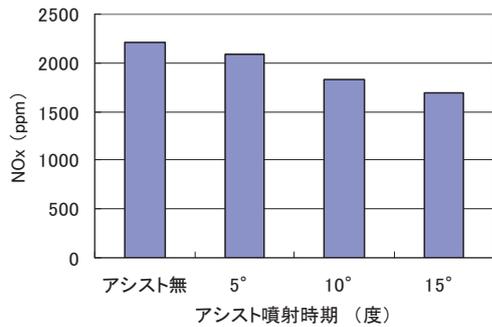


図-61 アシスト噴射時期が NO<sub>x</sub> に与える影響（アフター噴射）（アシスト噴射期間：2.5ms、燃料：廃食油 50%+A 重油 50%、25% 負荷）

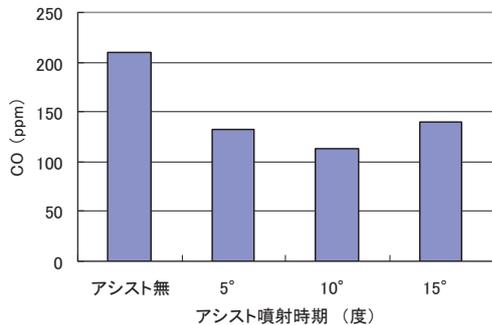


図-62 アシスト噴射時期が CO に与える影響（アフター噴射）

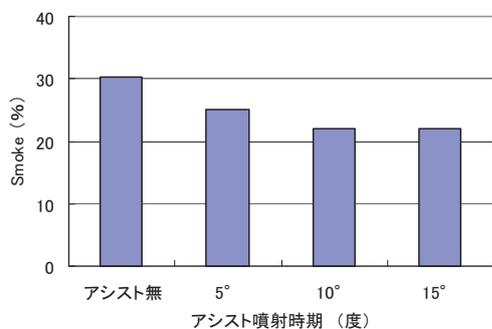


図-63 アシスト噴射時期が Smoke に与える影響（アフター噴射）

図 64 アシスト噴射時期が O<sub>2</sub> に与える影響（アフター噴射）

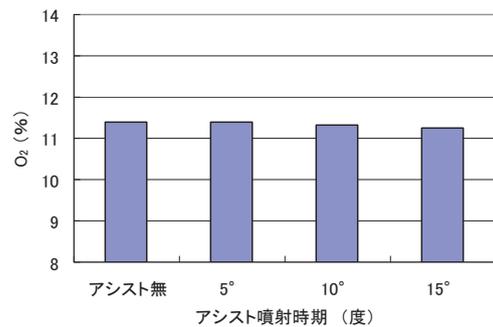


図-64 アシスト噴射時期が O<sub>2</sub> に与える影響（アフター噴射）

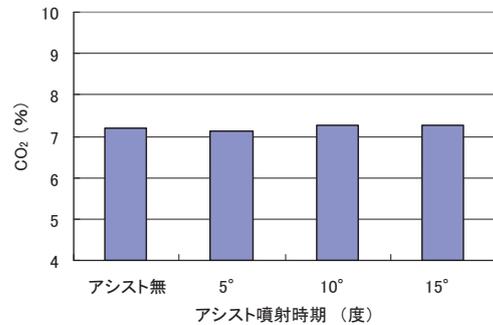


図-65 アシスト噴射時期が CO<sub>2</sub> に与える影響（アフター噴射）

図 66～図 68 にアフター噴射の噴射時期が最高筒内圧、排気ガス温度、熱効率に与える影響を示す。アフター噴射の噴射時期が遅くなるほど、排気温度は高くなり、熱効率が悪くなる傾向である。

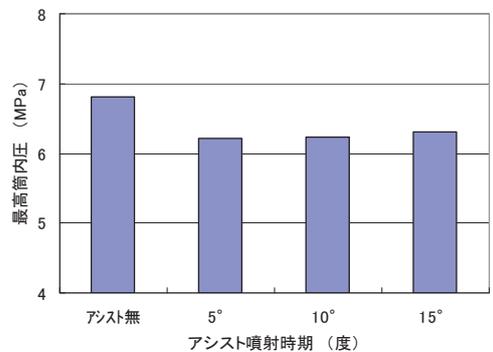


図-66 アシスト噴射時期が最高筒内圧に与える影響（アフター噴射）

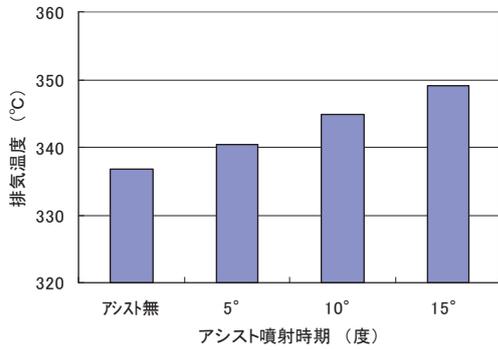


図-67 アシスト噴射時期が排気温度に与える影響 (アフター噴射)

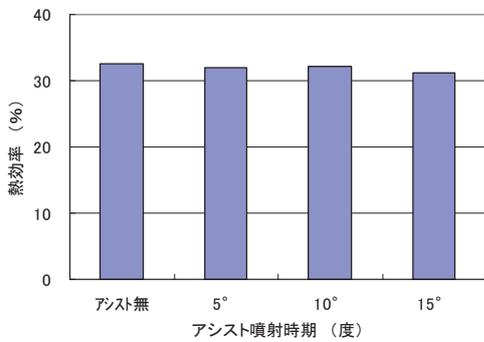


図-68 アシスト噴射時期が熱効率に与える影響 (アフター噴射)

### 3.3.2 HIS 付きディーゼル機関でのバイオ燃料100%実験結果<sup>8)、11)</sup>

最後に、バイオ燃料 100% (菜種油 100%) を用いて、燃焼が悪化していた船用特性 25% 負荷率で、HIS の効果を調べる実験を行ったので、結果を示す。

図 69 に示すようにアシスト噴射 (少量のプレ噴射: 噴射時期上死点前 20 度、噴射期間 1.5ms) を行い、主噴射の噴射時期を変更して実験を行った。このプレ噴射は、燃料噴射ノズルの開弁圧 (25.5MPa) を少し超える程度の低圧で、図 39 の実験結果に示されるように、上死点前約 10 度のところから起こる、プレ噴射された燃料の燃焼による熱発生率の変化がほとんど無い程度の少量の噴射である。このプレ噴射に要する電子制御燃料弁からの注入量は、計測したところ、燃料噴射ノズルからの全噴射量の約 7.5% である (25% 負荷率時の全噴射量は約 20 リットル/h、注入量は約 1.5 リットル/h)。機械式燃料噴射装置の燃料噴射時期を上死点前 11 度、9 度、7 度、5 度に変えて (図中それぞれ -11°、-9°、-7°、-5° と記載)、プレ噴射を上死点前 20 度に行い実験を行った。

実験結果を図 70~図 73 に示す。アシスト噴射を使用した結果は図中「on」と、アシスト噴射を使用しない結果は図中「off」と表示してある。

CO、スモークは大幅に低減している。アシスト噴射した場合のバイオ燃料はアシスト噴射しない場合に比べて CO は約 88% 低減し、スモークは約 76% 低減した。A 重油の CO やスモークの値以下

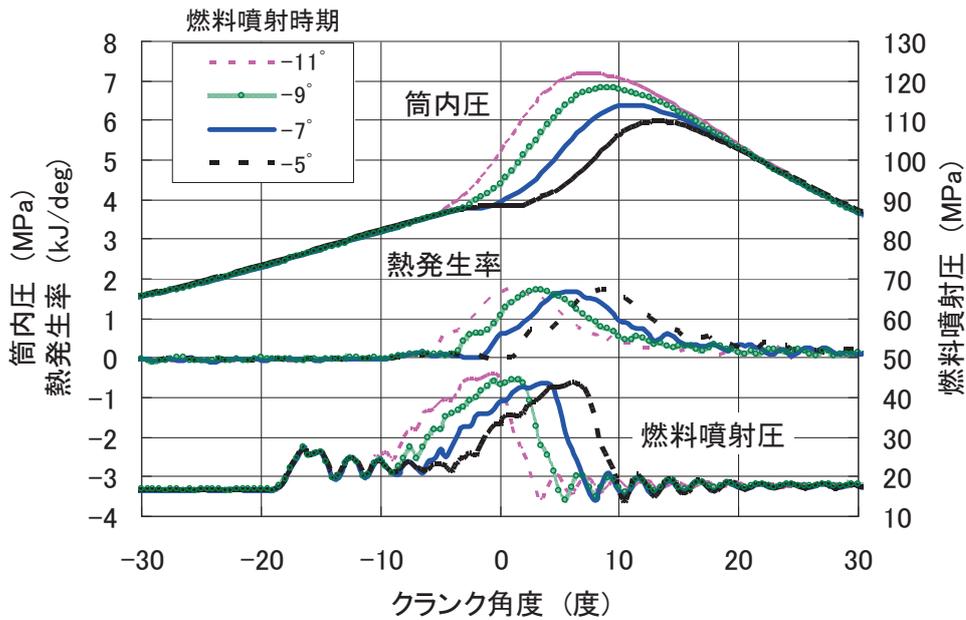


図-69 アシスト噴射が燃焼特性に与える影響

まで低減している (A 重油に比べて CO は約 37% 低減、スモークは約 29% 低減)。

NOx については、アシスト噴射 on の場合は、アシスト噴射 off の場合に比べて増加している。

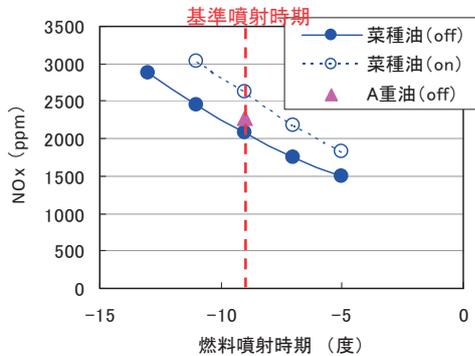


図-70 燃料噴射時期、アシスト噴射が NOx に与える影響 (エンジン負荷率: 25%、on、off はアシスト噴射の有無)

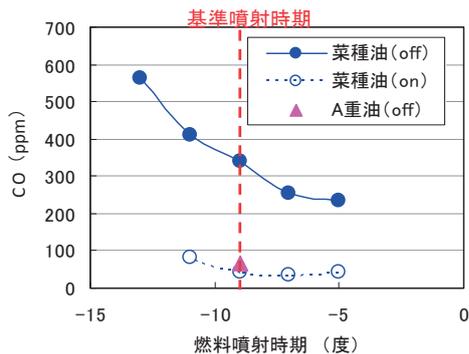


図-71 燃料噴射時期、アシスト噴射が CO に与える影響

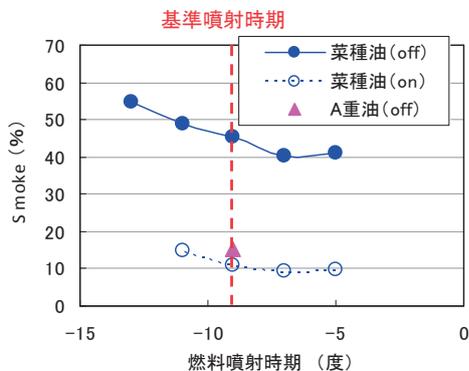


図-72 燃料噴射時期、アシスト噴射が Smoke に与える影響

アシスト噴射した場合のバイオ燃料の NOx は A 重油に比べて約 16% 増加した。

図 69 の燃焼解析の結果を見ると、上死点前約 10 度から起こる、低圧少量のプレ噴射による燃焼により、メイン噴射の着火遅れが短くなり、爆発的な予混合燃焼が抑えられている。少量のプレ噴射の効果としては、「①主噴射が始まる前の燃焼室内の温度、圧力の上昇」と「②プレ噴射による火種の効果」が考えられる。低負荷時は、燃料が噴射される時のシリンダ内圧力が低く、燃料噴霧の到達距離が長くなるため、蒸発特性の悪い菜種油の場合、壁面の影響を受け、燃焼が悪化したものと考えられる。アシスト噴射を使用した場合、低圧でプレ噴射された少量の燃料が燃焼室壁面から離れた適切な場所で燃焼し、①、②の結果として、主噴射の燃料の着火遅れを少なくし、燃料噴霧の燃焼室壁面の影響を無くしたため、燃焼が改善されたと考える。この結果、低負荷状態においても NOx は若増加するものの、CO、スモークの大幅な低減ができたものと考えられる。バイオ燃料は含酸素燃料であり、低負荷状態においても適切に着火させれば高負荷状態同様、良好な燃焼が実現できると考える。

図 74~図 76 (図中 on の表示) に最高筒内圧、排気温度、熱効率を示す。アシスト噴射 on の最高筒内圧は、アシスト噴射 off に比べて高く、NOx の結果と対応している。また、最高筒内圧は燃料噴射時期が遅くなるに従い低下しており、NOx の低下と対応している。排気温度は燃料噴射時期を遅くすると高くなるが、熱効率は今回の実験の範囲内では、悪化が起こっていない。

低圧少量のプレ噴射と遅延させた主噴射の併用で、スモーク、CO を低く抑えつつ、NOx を低減することが可能である。プレ噴射を行い主噴射を上死点前 9 度から 7 度に遅延することで、A 重油

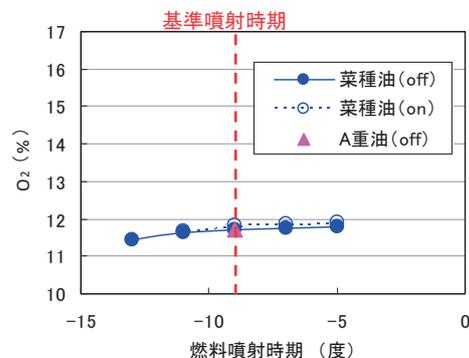


図-73 燃料噴射時期、アシスト噴射が O<sub>2</sub> に与える影響

の通常の噴射に比べて、NO<sub>x</sub>を約3.8%、COを約46%、スモークを約39%低減することができた。

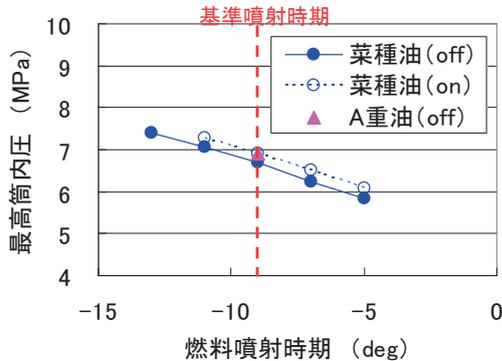


図-74 燃料噴射時期、アシスト噴射が最高筒内圧に与える影響 (エンジン負荷率: 25%、on、offはアシスト噴射の有無)

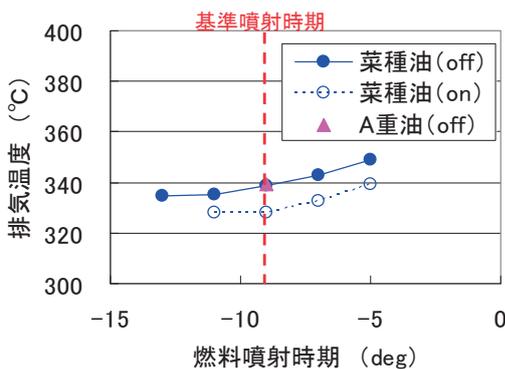


図-75 燃料噴射時期、アシスト噴射が排気温度に与える影響

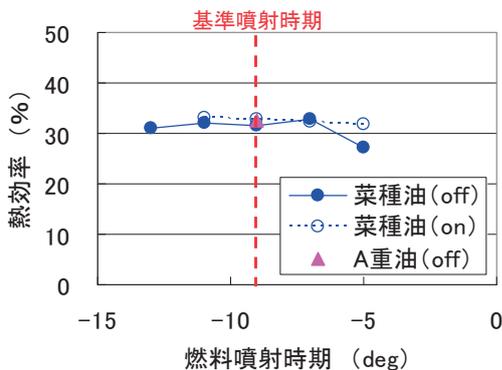


図-76 燃料噴射時期、アシスト噴射が熱効率に与える影響

#### 4. まとめ

「バイオ燃料の燃焼技術に関する研究」

船用中速4ストロークサイクルディーゼル機関 (3気筒、過給機付き、最大出力257.4kW/420rpm、松井鉄工所製) に軽油、A重油、バイオ燃料 (菜種油、パーム油、廃食油) を使用して実験を行った結果、以下のことが明らかになった。

- 1) 高負荷運転条件 (エンジン負荷率: 75%、100%) では、バイオ燃料は軽油やA重油に比べて、NO<sub>x</sub>は高くなるが、CO、スモークは低い値であり、良好な燃焼が行われていると考えられる。バイオ燃料のNO<sub>x</sub>は軽油に比べて15~20%増加し、A重油に比べて0~5%増加した。バイオ燃料のCOは軽油やA重油に比べて30~50%低減し、スモークは60~65%低減した。
- 2) 低負荷運転条件 (エンジン負荷率: 25%) では、バイオ燃料は軽油やA重油に比べて、NO<sub>x</sub>は低くなるが、CO、スモークは高い値であり、低負荷での燃焼改善が課題と考える。バイオ燃料のNO<sub>x</sub>は軽油やA重油に比べて0~7%低い値であった。バイオ燃料のCO、スモークは軽油やA重油に比べて2~5倍の高い値であった。
- 3) 低負荷運転でのバイオ燃料使用において、A重油を混合する燃焼改善では、A重油なりにCO、スモークを低減するには多量のA重油が必要となる。
- 4) 低負荷運転でのバイオ燃料使用において、燃料噴射時期変更による燃焼改善では、大幅な改善は難しい。

「燃焼制御システムの構築及び実証実験」

船用中速4ストロークサイクルディーゼル機関に電子制御燃料噴射装置と機械式燃料噴射装置を組み合わせた新しい燃料噴射システム (ハイブリッド・インジェクション・システム (HIS)) を適用した実験により、以下のことが明らかになった。

- 5) 低負荷運転でのバイオ燃料の燃焼改善にプレ噴射が有効であり、噴射量は少量の方が効果は大きい。また、プレ噴射ほどではないがアフター噴射も燃焼改善に有効であり、噴射量は多量の方が有効であった。廃食油50%混合油 (廃食油50%+A重油50%) で実験を行った範囲内では、少量のプレ噴射の場合、プレ噴射を行わない場合に比べてCOを約74%、スモークを約87%低減できた。多量

のアフター噴射の場合はアフター噴射を行わない場合に比べてCOを約46%、スモークを約27%低減できた。

- 6) 低負荷運転でのバイオ燃料100%（菜種油100%）使用において、低圧少量のプレ噴射により大幅な燃焼改善が行える。プレ噴射した場合のバイオ燃料のNO<sub>x</sub>はA重油に比べて約16%増加するが、COは約37%低減し、スモークは約29%低減した（A重油のCOやスモークの値以下に低減できる）。
- 7) 低圧少量のプレ噴射と遅延させた主噴射の併用で、スモークおよびCOを低く抑えつつ、NO<sub>x</sub>を低減することができる。

## 謝 辞

本研究は独立行政法人鉄道建設・運輸施設整備支援機構「運輸分野における基礎的研究推進制度」により実施しました。ここに謝意を表します。

## 参考文献

- 1) U.S.EPA, Draft Technical Report, EPA420-P-02-001, (2002), 1-118
- 2) 吉本、木下：植物油燃料のエンジン適用技術ーバイオディーゼル燃料についてー、日本燃焼学会誌、第51巻156号（2009）、pp.209-216
- 3) 木下、吉本：植物油燃料のエンジン適用技術ーバイオディーゼル燃料以外についてー、日本燃焼学会誌、第51巻157号（2009）、pp.121-128
- 4) 段：バイオ燃料の燃焼特性ーディーゼルエンジンにおける植物油の利用、日本マリンエンジニアリング学会誌、第47巻第1号（2012）、pp.51-58
- 5) Robert Ollus, Kay Juoperi, Alternative fuels experiences for medium-speed diesel engines, CIMAC Congress 2007, Paper No.234, (2007), pp.1-15
- 6) 西尾：バイオ燃料使用による船舶のGHG削減への展望、日本マリンエンジニアリング学会誌、第45巻第6号（2010）、pp.824-829
- 7) 西尾、徐、土屋：ディーゼル機関におけるバイオ燃料利用に関する研究、日本マリンエンジニアリング学会誌、第47巻第1号（2012）、pp.65-70
- 8) 西尾、土屋：マルチ燃料対応船用機関制御に関する研究、鉄道・運輸機構(JRTT)研究成果報告書（2011）、pp.1-131
- 9) S. Nishio, et. al. : Combustion and Exhaust Characteristics of Bio-fuels in Marine Diesel Engine, Proceedings of the International Symposium on Marine Engineering(ISME), C3-4 SUMMARY(2011)、pp.1-6
- 10) 松村、他5名：バイオディーゼル最前線、工業調査会（2006）、pp.1-221
- 11) 西尾、他4名：船用ディーゼル機関におけるバイオ燃料の燃焼改善に関する研究、日本マリンエンジニアリング学会誌、第47巻第2号（2012）、pp.249-256
- 12) 徐、他4名：船用中速ディーゼル機関におけるバーム油の燃焼および排ガス特性、日本マリンエンジニアリング学会誌、第46巻第1号（2011）、pp.127-132
- 13) 徐、他5名：船用ディーゼル機関における廃食油の燃焼および排気の改善、日本マリンエンジニアリング学会誌、第47巻第2号（2012）、pp.257-262
- 14) 徐、他3名：船用ディーゼル機関における植物油燃焼への燃料噴射制御の効果、日本マリンエンジニアリング学会誌、第46巻第2号（2011）、pp.252-256