

含酸素系バイオ燃料が汎用火花点火機関の燃焼に及ぼす影響

Effects of oxygen-containing biofuels on combustion in generic spark ignition engines

小林 茂己¹⁾, 宇田川 真介¹⁾

Shigemi Kobayashi¹⁾, Shinsuke Udagawa¹⁾

Abstract : The purpose of this research is to contribute to the immediate technological development in the field of generic spark ignition engines that will lead to permanent decarbonization. In order to immediately reduce CO₂ emissions, a method to reduce petroleum fuel consumption by mixing biofuel with that was researched. While oxygen-containing biofuel as a CO₂-free fuel, experiments were conducted using several fuels with biofuel ratio of 15%, 50%, and 85% in this study. As a result, the combustion improvement of ethanol was confirmed, and mutually complementary effects were also found when ethanol and FAME were mixed. It was calculated that the reduction in CO₂ emissions by using a fuel mixture of 15% gasoline, 50% ethanol, and 35% FAME (fatty acid methyl ester) reduces life cycle CO₂ emissions by 60% compared to gasoline.

Keywords : Biofuel, Oxygen-containing fuel, Spark ignition engine, Air-Fuel ratio, Exhaust gas characteristics

1. はじめに

様々な要因によって大気中のCO₂濃度が高まり、ある限界点を越えた場合に地球温暖化が加速的に進むと言われる。これについては多くの科学者が提唱する段階を過ぎ、2030年までの取組みとその成否が温暖化抑制のシナリオ実現をつなぎとめる最後の機会と認識されるに至った[1]。現在では国や政府をはじめ様々な規模のコミュニティにおいてカーボンニュートラルやカーボンハーフを目指した達成期限付きの目標が設定されている[2]。

これまでの自動車用動力の脱炭素化への方策は電動化(EV化)や燃料電池化(FCEV化)が主導であり狭義の脱炭素化手法といえる。しかし、EV化/FCEV化による脱炭素化には電池性能の他、電力供給源/水素生成原料も含めた広義の脱炭素化を同時実現しなければ成立しないという大きな課題が存在する。また、欧州連合が内燃機関搭載車の新車販売を2035年から禁止するとした方針を合成燃料の使用を条件に撤回して以降、EV化以外の技術開発が改めて注目されている。すなわち再生可能エネルギー由来の“合成燃料”を燃料として内燃機関のポテンシャルを最大化する取組みである。

恒久的な脱炭素化には、水素社会[3]の実現が不可欠となるが、そこまでのロードマップにおいても脱炭素化比率を可能な限り高め温暖化を遅らせる必要がある。そのためには現在利用できる再生可能エネルギーを最適に組み合わせ、化石燃料の消費を極限まで減らしていく地道な努力の積み上げが必須と考えられる。

本研究が対象とする汎用小型内燃機関の利用分野においても恒久的な脱炭素化までをつなぎ即応的な技術開発が必要とされている。これを受け現在利用できる多様な燃料を活用する研究が各方面で進められている。本研究

では再生可能なエネルギー源として含酸素系バイオ燃料(植物由来のエタノールや廃食油由来の脂肪酸メチルエステル)に着目している。本研究の目的は内燃機関を動力発生手段としながら脱炭素化までのロードマップにおける即応的な技術開発に資することである。

2. 実験装置及び実験方法

2.1 実験装置

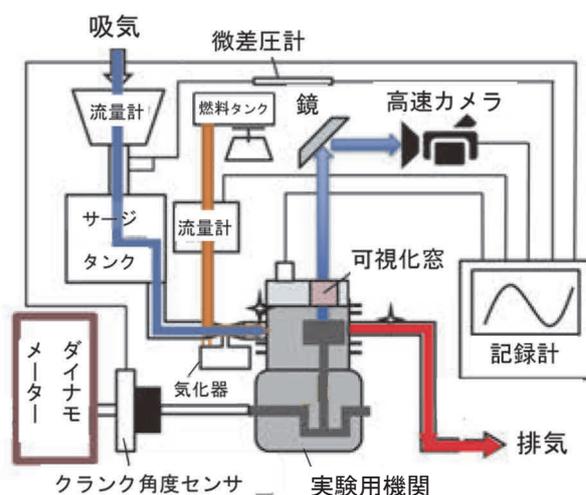


図1 燃焼サイクル解析装置

図1に本実験に使用した燃焼サイクル解析装置の概略及び各種計測機器のレイアウトを示す。実験用内燃機関は出力測定のため動力系に接続され、回転速度や負荷を制御した運転が可能である。また、出力軸には回転角度検出装置が設けてあり分解能0.5°で回転角度を検出できる。燃焼用の空気及び燃料は各系統で流量計を行ったのち、空燃比調整が可能な気化器により混合されて内燃機関に供給される。また、シリンダ内の燃焼圧力を観測するためシリンダヘッドに筒内圧力センサを取付けて 5

1) 東京都立産業技術高等専門学校 ものづくり工学科
航空宇宙工学コース

μs 間隔でサンプリングし記録する。筒内圧力センサにはノック振動などの高周波帯域にも感度の高いピエゾ式を用いた。これにより燃焼サイクル毎の詳細な燃焼圧力や熱発生時間履歴を解析することができる。さらに図示しない排気分析計により排気ガス中の HC, CO, CO₂ 等の体積濃度の計測を行った。

この燃焼サイクル解析装置 (図 1) に表 1 の諸元をもった実験用機関を取付けて実験を行った。シリンダヘッドの下面には燃焼室上部を形成するくぼみがあり、くぼみの容積が異なるシリンダヘッドを使い分けて圧縮比を変更した。

表 1 実験用機関の諸元

機関形式	オットー式空冷 4 サイクル 1 気筒
バルブ機構	側弁式
排気量	143 cc (φ 63 × 46 mm)
圧縮比	6.3 又は 4.7 シリンダヘッド交換により選択
出力	最大 1.5 kW

2.2 供試燃料

現在、政府のグリーンイノベーション基金などを通じて合成燃料の商用化を目指した技術開発が進められている。近い将来にガソリン、灯油、エタノールについては工場や発電所などから排出された二酸化炭素及び、水素を用いて合成される可能性がある。しかし現在では製造技術やコストの課題が残るため、合成燃料の商用生産が可能となるまでの間は含酸素系バイオ燃料のエタノールや脂肪酸メチルエステルの活用が有望とみられる。

今回の報告では、ガソリンに代え灯油や含酸素系バイオ燃料であるエタノールや脂肪酸メチルエステルを混合した表 2 の 5 種類を用いた実験結果について報告する。また、表 3 に実験に使用した各種燃料の物性を示す。表の値は本研究で実測した値又は文献値である。表 3 に示す 4 つの燃料のうちガソリン・灯油は化石燃料に属する。一方、エタノール、脂肪酸メチルエステルはバイオ燃料に属し、植物由来の原料から工業的に生産可能であり、再生可能エネルギーとも呼ばれる。ただし、エタノールのエネルギー密度はガソリン比 66% 程度に留まり、化石燃料をエタノールに置き換えた場合、燃料のエネルギー密度がその分低下することを意味する。

2.3 実験方法

各燃料を用いて行った運転に際しては、燃料種別に合わせてシリンダヘッド交換により圧縮比を調整した。また、予め気化器の調整を行って運転可能な空燃比に設定して運転を行った。十分な暖気を行ってから動力測定、燃焼圧力測定をはじめとする各種の測定を行い、得られたデータをもとに燃焼サイクル解析、及び排ガス分析などを行った。

表 2 供試燃料の構成とその割合

(本報の表記) 供試燃料	Gasoline ガソリン	Kerosene 灯油	Ethanol エタノール	FAME 脂肪酸 メチルエステル	Bio Fuel ratio バイオ割合
K100		100%			0%
KF15		85%		15%	15%
GE50	50%		50%		50%
GE50F35	15%		50%	35%	85%
G100	100%				0%

表 3 各種燃料の物性 (注釈なしは JIS 規格)

燃料	Gasoline ガソリン	Kerosene 灯油	Ethanol エタノール	FAME 脂肪酸 メチルエステル
物性値				
発熱量 [MJ/kg]	44.9[4]	44.2[4] 43.3(実測)	26.8[5]	39.8[4] 40(実測)
引火点[°C]	-40~20	40 以上	13[5]	120 以上
発火点[°C]	300[6]	255[6]	420[5]	130 以上 [6]
密度[kg/m ³]	783 以下 758(実測)	790~800 799(実測)	794[7] 763(実測)	860~900 882(実測)
エネルギー 密度[Wh/kg] (推算値)	12,472	12,278 ガソリン比 98 %	8,250 ガソリン比 66 %	11,056 ガソリン比 89 %

3. 実験結果 燃料(K100, KF15, GE50, GE50F35)

本研究ではまず含酸素系バイオ燃料に属する脂肪酸メチルエステル (FAME) の活用を検討した。しかし表 3 のとおり FAME は発火点が 130 °C と低く異常燃焼の発生が予想された。そこでガソリンよりも FAME に物性が近い灯油を基油として用い、これに FAME を混合して実験することとした。

【K100 燃料を用いた実験】

最初に灯油 (K100) を用いて実験を行った。灯油や FAME を用いる実験ではガソリンよりも発火点が低い燃料であるためシリンダヘッドを交換して圧縮比を 4.7 に下げた実験を行った。図 2 は機関速度 3200 rpm 一定でスロットル開度を調整し、負荷を 1.0 Nm~6.0 Nm で運転した場合の P-θ 線図 (クランク角度-筒内圧力線図) である。各負荷の圧力線図は 1 回分 (1 サイクル分) の燃焼圧力波形ではなく 270 サイクル分をアンサンブル平均したグラフである。

図 2 は機関速度 3200 rpm, 負荷トルク 1.0 Nm~6.0 Nm で運転したときのサイクル中の筒内圧力と熱発生率の変化を観測した結果である。このグラフは 270 回分の燃焼サイクルをアンサンブル平均したものでサイクル間変動の影響なく負荷ごとの燃焼過程を見ることが出来る。この結果から K100 を用いた場合にも負荷トルク増大とともに筒内圧ピークの早期化と熱発生期間の短縮が見られ、概して良好な運転が可能であることが分かった。

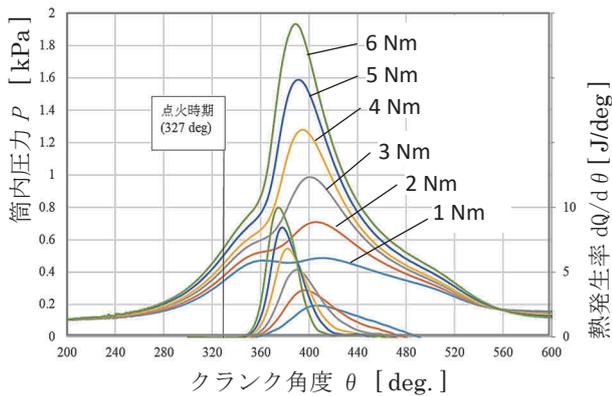


図2 筒内圧力と熱発生率の履歴

続いて、270 サイクルの燃焼圧力波形を 1 サイクルずつ詳しく調べた。すると負荷トルク 6.0 Nm の場合において 5.0 Nm 以下では見られない圧力振動が 270 サイクル中 87 サイクル(32.2%)で見られることが分かった。この圧力振動には周波数解析により 5 kHz と 8.5 kHz に周波数のピークがみられ、Draper の式[8]を用いて実験機関のノック周波数の計算を行った結果とよく一致した。したがって実験機関の圧縮比を 4.7 に下げた場合でも負荷トルク 6.0 Nm の場合はノックが発生することが分かった。これにより K100 を用いた場合の運転は負荷トルク 5.0 Nm までに制限されることが分かった。

また、270 サイクルを個別に周波数解析し、共振周波数の強度を 4 グループ(強度順に A, B, C, D)に層別し代表的な 1 サイクルの P-θ 線図と熱発生率を示すと図 3 のようになる。この結果からサイクル別にみると明らかに自着火とそれに伴うノック振動がみられた。またサイクル個別に調べた結果 87 サイクル以外にもノック振動発生には至らないが自着火が発生したサイクルの存在も確認され、ノック現象面で興味深い結果が得られた。

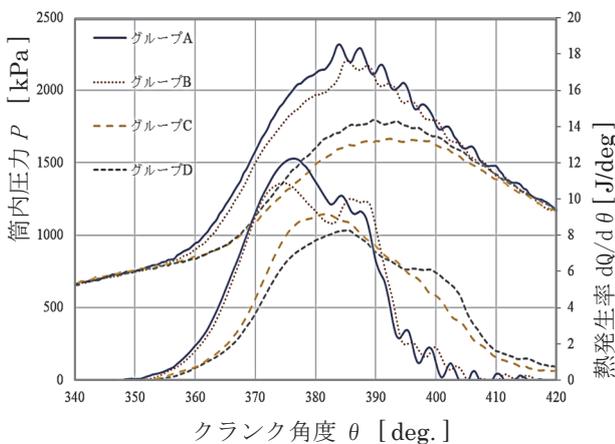


図3 共振周波数が異なるグループの代表波形

ここまでの結果より FAME を混合する基油として灯油(K100)が適合する可能性を確認したが、圧縮比 4.7 の条件でも負荷範囲は 5.0 Nm 以下に制限される。また、熱効率は最大負荷トルク 5.0 Nm のときの約 17%であった。

【KF15 燃料を用いた実験】

灯油に FAME を混合した場合の実験について述べる。予備実験の結果では FAME の混合割合を増やしていくと燃料フィルターつまりや熱発生遅延による出力の低下が懸念された。このため FAME の混合割合 15% の KF15(表 2)を用いて実験した。しかし実験に用いる燃料は理論空燃比を把握していなければ定量的な実験を行うことができない。そこで実験装置(図 1)の空気流量計と燃料流量計の誤差検証を行って空燃比への影響が 0%~2.8%であることを確かめてから理論空燃比を求める実験を行った。

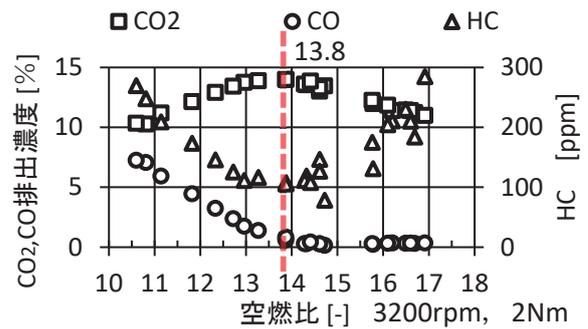


図4 燃料:KF15 空燃比による排出ガス変化

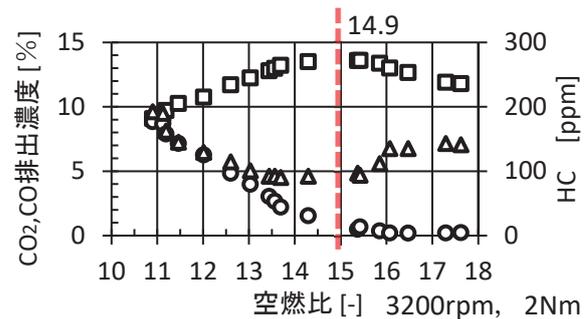


図5 燃料:灯油 空燃比による排出ガス変化

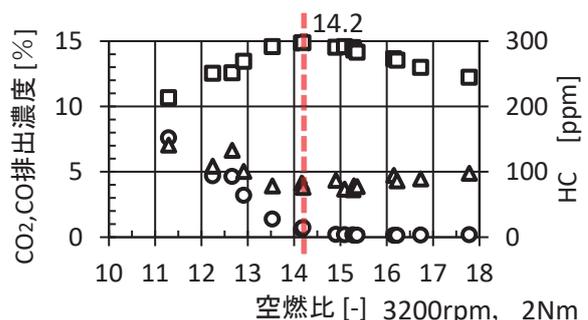


図6 燃料:ガソリン 空燃比による排出ガス変化

図 4 は KF15 燃料を使用して、運転条件 3200 rpm, 2 Nm で空燃比を様々に変えた場合の排出ガス変化を表したものである。CO₂ の極大、CO 排出の立ち上がりの傾向から KF15 燃料の場合は理論空燃比が 13.8 付近にあるとみられる。また、比較のため K100(灯油)燃料と G100(ガソリン)燃料の場合で調べた結果の図 5, 図 6 からそれぞれ理論空燃比は 14.9, 14.2 付近にあるとみられる。理論空燃比で運転しても FAME を混合した場合は灯油やガソリ

ン運転に対して約 10%~20%の HC の増加がみられたが、CO の増加は見られない。また、理論空燃比からずれたときの HC 増加傾向は KF15 燃料の場合が鋭敏である。

図 7 は運転条件 3200 rpm, 2 Nm で KF15 燃料と K100 燃料を用いて運転した場合の筒内圧力と熱発生率の変化をクランク角ごとに示したもので、270 回分の燃焼サイクルをアンサンブル平均したものである。

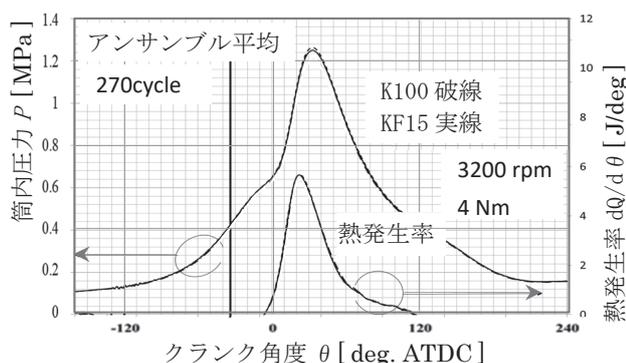


図 7 筒内圧力と熱発生率の変化

図 7 から KF15 燃料, K100(灯油)燃料の場合で筒内圧力変化には差異がほとんどみられない。しかし、詳細な分析結果では、10%~90%燃焼期間は KF15 燃料の場合 371.5° ~ 425.5°CA(Crank Angle)間の 54° CA, K100 燃料の場合 371° ~ 424.5°間の 53.5° CA であった。つまり KF15 燃料の場合は燃焼開始がわずかに遅く、燃焼期間は若干長く燃焼はやや緩慢な傾向がみられた。

今回の実験条件では、バイオ燃料である FAME の混合割合を 15%程度とすれば負荷トルク 4 Nm 程度まで問題なく運転できることが分かった。ただし、空燃比が理論空燃比を外れた場合は HC の増大傾向が鋭敏であるため、空燃比を理論空燃比付近に正確にコントロールする必要がある。灯油を基油としてバイオ燃料として FAME のみを混合する場合は 15%程度の割合であれば実用の可能性があると考えられる。

【GE50 燃料を用いた実験】

続いてガソリンを基油とした燃料でバイオ燃料化を目指した実験を行った。モータースポーツ界ではガソリンにバイオ燃料を含む合成燃料の使用が急速に進み、F1 レースは 2022 年からバイオエタノールを 10%混合した燃料を使用している。本研究ではガソリンを基油としてエタノール割合を 50%とした表 2 の GE50 燃料を用いて実験を行うことにした。エタノールはガソリンよりもオクタン価が高く、混合した燃料も比較的オクタン価が高いと考え GE50 燃料の実験は圧縮比を 6.3 に変更して行った。

図 8, 図 9 は GE50 燃料, G100 燃料を用いて、機関速度 3200 rpm, 負荷トルクを 2 Nm, 4 Nm, 5 Nm に変えて運転した場合の筒内圧力及び熱発生率を示したものである。(実線が GE50, 一点鎖線が G100 の結果を表す)

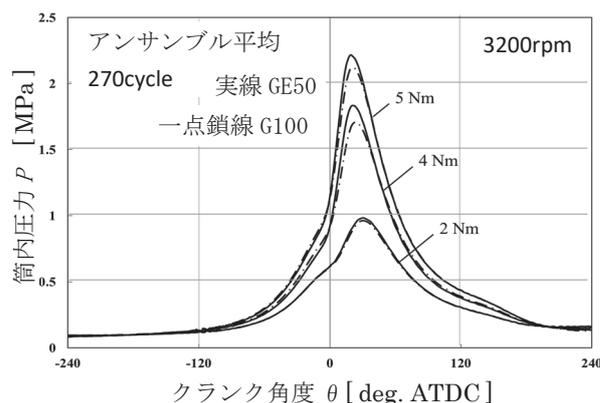


図 8 筒内圧力の変化 (GE50)

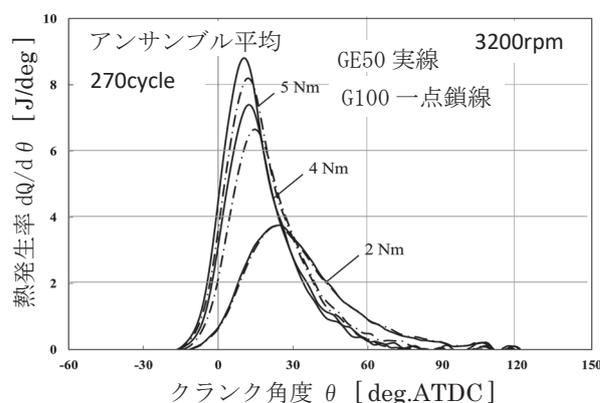


図 9 熱発生率の変化 (GE50)

図 8 よりいずれの負荷トルクにおいても火花点火後の筒内圧力の立ち上がりは GE50 が G100 よりも早いことが分かる。また、図 9 の熱発生率からも GE50 の初期燃焼が急速でその後速やかに燃焼が終わっているため等容度の高い良好な燃焼状態にあるとみられる。

また、本実験は規定の負荷トルクに合わせてスロットル開度を調整しており、燃料によらず共通の出力設定で運転を行ったものである。従って図 8 で GE50 の場合に筒内圧力のピークが高いのは、出力が大きいことを意味していない。筒内圧力から図示仕事や摩擦仕事を求めた結果については他の燃料の場合と共に表 4 で後述する。

図 8 グラフの横軸のクランク角度を燃焼室容積 V に変換すると P-V 線図が得られる。この線図で囲まれる面積は図示仕事 W_i の大きさを表し、主にピストン摺動による摩擦仕事と実際に出力軸から測定される正味仕事の和と定義される。正味仕事は動力計により計測される出力を 1 秒当たりのサイクル数で割って求められる。今回の実験は上述のとおり出力合わせにより運転を行ったため、図示仕事大きいとそれだけ摩擦仕事大きいことを意味する。ここまでの実験で GE50 燃料を用いた場合は燃焼が速やかに完了し良好な燃焼状態が得られたが、図 8 の結果は GE50 燃料を用いた場合に摩擦仕事が増大することを示唆している。バイオ燃料割合を上げるにはオイルやオイルリングを工夫することが有効と考えられる。

【GE50F35 燃料を用いた実験】

GE50 燃料よりもバイオ燃料割合を高めるには更にエタノールの割合を高める方法もあるが、摩擦損失の増大と発熱量の低下の割合が大きくなる。摩擦仕事の増大の原因はピストンリング摺動部の潤滑状態の悪化と想定し、エタノールとは別に潤滑性を向上するバイオ燃料の添加を検討した。ここで先に実験に用いた FAME は燃料分子に含まれる炭素数がガソリンよりも多いため潤滑性がガソリンよりも高いと考えられ、かつ発熱量はエタノールより大きい。FAME を単独で混合した場合は燃焼期間遅延、自着火による異常燃焼が懸念される。しかし、エタノールと併用して用いればエタノールによる燃焼期間短縮・アンチノック性向上により実用性の改善が期待される。そこでエタノールに FAME を組合わせた GE50F35 燃料(表 2)を用い、摩擦損失を抑えながらバイオ燃料割合を高める方策としてその効果を確かめる実験を行った。

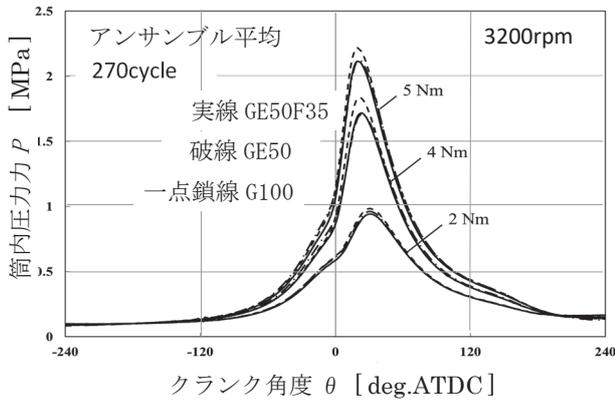


図 10 筒内圧力の変化

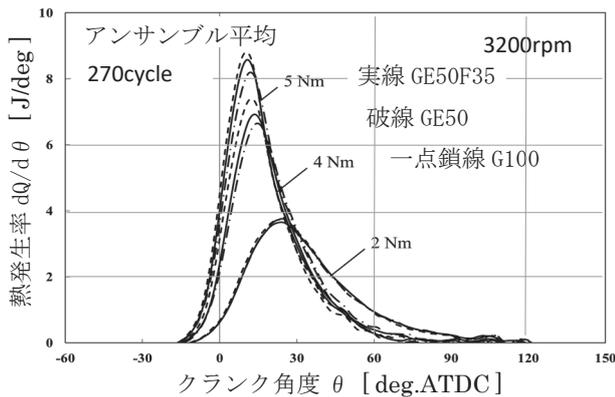


図 11 熱発生率の変化

図 10, 図 11 は GE50F35(実線)を用いて機関速度 3200 rpm, 負荷トルク 2 Nm, 4 Nm, 5 Nm の条件で運転したときの筒内圧力及び熱発生率を示したものである。図中には GE50(破線), G100(一点鎖線)を用いた場合も示した。図 10 より GE50F35 を用いた場合の筒内圧力変化は G100 の場合とほぼ重なることが分かる。筒内圧力をもとに P-V 線図から求めた面積より 270 サイクル平均の

図示仕事は表 4 のようになり、正味仕事から図示仕事を差し引いて求めた摩擦仕事を併記した。摩擦仕事は GE50F35 の場合と G100 はほぼ同等となり、GE50 の場合にみられた摩擦仕事は FAME を混合したことにより低下したものと考えられる。

表 4 図示仕事及び摩擦仕事の算出結果 J/cycle

燃料	図示仕事 Wi ①	正味仕事 We ②	摩擦仕事 Wf ①-②
GE50F35	67.33	50.64	16.68
G100	67.28	50.64	16.64
GE50	69.12	50.64	18.47

また、図 11 より GE50F35 を用いた場合は GE50 に比べ火花点火後の熱発生立ち上がりはやや遅くなるが G100 ほど遅くはならないことが分かった。図 11 の詳細な分析により負荷トルク 4 Nm 時の 10%-90%燃焼期間を比較すると表 5 のようになる。GE50F35 の場合、GE50 よりも燃焼開始(10%燃焼)は遅く燃焼期間は長くなるが、G100 に対しては同等であることが分かる。

表 5 10%-90%燃焼期間 数値: クランク角度 ATDC

燃料	10%燃焼点	90%燃焼点	燃焼期間
GE50F35	3.5°	42.5°	39°
G100	4.0°	43.0°	39°
GE50	2.0°	39.0°	37°

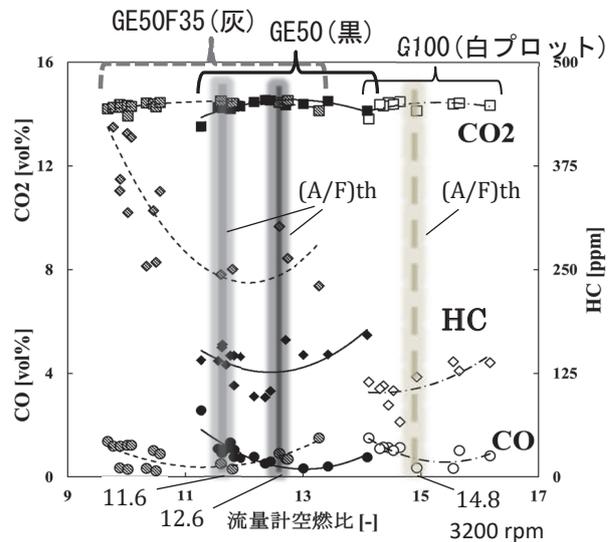


図 12 空燃比による排出ガス変化

図 12 は使用燃料ごとに排出ガス成分の体積濃度%と空燃比の関係を調べた結果である。使用燃料の違いはプロットのグレースケールを変えて白, 黒, 灰で示した。各燃料の理論空燃比は異なっており、CO2 が極大となる空燃比はそれぞれ異なる。この理論空燃比を基準線として内燃機関の特有的な排出ガス変化の傾向がみられること

は各燃料の場合に共通である。しかし、明らかな相違はHC(菱形プロット)が GE50F35 の場合に増大していることで、各燃料の下限値どうしの比較では G100, GE50 の場合に約 100 ppm 前後、GE50F35 の場合には 250 ppm と増大している。表 3 に示された FAME の引火点の高さは蒸発性の低さを表しており、FAME がシリンダ壁に付着するなどして HC を増大させたと考えられる。実用のためには燃料の微粒化、酸化触媒による無害化、あるいは FAME の混合割合を制限するなどの対応が必要である。また、GE50F35 の場合には始動性の改善の余地がある。

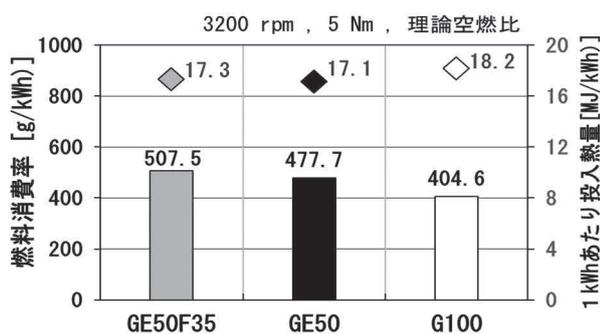


図 1.3 各燃料を用いた場合の燃料消費率比較

図 1.3 は各燃料を用いて理論空燃比で運転した場合の燃料消費率を表したものである。1 kWh あたりの燃料消費重量は GE50 や GE50F35 の場合がより多く消費する。しかし、これは表 3 に示したようにエタノールや FAME の発熱量がガソリンに比べて低いためである。燃料消費量に発熱量をかけた投入熱量 MJ で比較すると 1 kWh あたり機関へ投入した燃料熱量は GE50 や GE50F35 の方がむしろ少なく、やや熱効率が優れていることが分かる。これは前述のとおりエタノールを混合した場合に燃焼期間が短くなり等容度が増した結果と考えられる。

図 1.4, 図 1.5 は図 1.3 の燃料消費率をもとに各燃料の標準炭素排出係数[9]を使用して CO₂ 排出量を算出した結果である。図 1.4 は燃料生産過程の CO₂ 排出量を含まない値、図 1.5 は燃料生産過程の CO₂ 排出量を含めたライフサイクル CO₂ (LC-CO₂) 排出量を算出[9]したものである。図 1.4 では CO₂ 排出量がガソリン(G100)比で 41%(GE50), 81%(GE50F35)の減少となり、図 1.5 では 29%(GE50), 60%(GE50F35)の減少となる。

4. まとめ

本研究の実験装置を用い、ガソリン、灯油が基油として含酸素系バイオ燃料を混合して実験を行った結果、以下の知見を得た。

- (1) 灯油を基油として脂肪酸メチルエステルを混合する場合は 15%以下の割合ならば実用可能性がある。
- (2) GE50 燃料(ガソリン 50% - エタノール 50%) の燃焼は改善傾向にあり、排ガスへの影響は少ないが潤滑性を改善する必要がある。

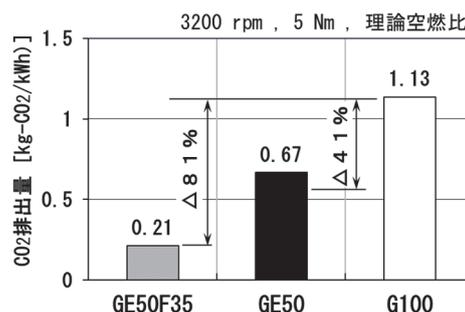


図 1.4 各燃料を用いた場合の CO₂ 排出量比較

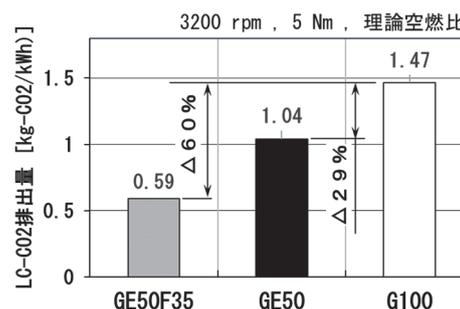


図 1.5 各燃料を用いた場合の LC-CO₂ 排出量比較

- (3) GE50F35 燃料(ガソリン 15% - エタノール 50% - 脂肪酸メチルエステル 35%) はエタノールの燃焼改善効果に助けられ FAME を 35%混合しても燃焼面ではガソリン同等であり、摩擦損失は低減した。
- (4) FAME 混合によりバイオ燃料割合の増加、摩擦損失の低減効果が得られるが、実用には排ガス面で HC 低減対策が必要となる。
- (5) 本研究で使用したバイオ混合燃料では、ライフサイクル CO₂ 排出量が GE50 の場合ガソリン比で 29%, GE50F35 の場合 60%減少すると推定される。

本研究に際し都立産技高専小林研究室の令和 2 年度、令和 3 年度、令和 4 年度卒業研究生諸君の協力に感謝します。尚、研究費用の一部は特定課題研究費に依った。

参考文献

- [1] 国土交通省：「国土交通白書」第 1 部 気候変動に伴う災害の激甚化・頻発化、2022 年度
- [2] 東京都：「ゼロエミッション東京戦略」、2019 年度
- [3] 経済産業省：「水素社会実現に向けた経済産業省の取組み」、2020 年度
- [4] 日本自動車研究所：燃料定数の設定方法
- [5] “化学便覧 応用化学編 第 5 版”，(社)日本化学会，丸善出版(株)，(1995)， pp. I-773.
- [6] 株式会社八光電気 HP：各種物質の性質
- [7] アルコール協会規格 JAAS001「エタノール」2012.8
- [8] C.S.Draper, Journal of AS, Vol.5 No.6(1938), pp.219
- [9] 資源エネルギー庁：「エネルギー源別標準発熱量・炭素排出係数」，2018 年度