

# 灯油系燃料を用いた火花点火機関の基礎研究

## Feasibility study on the spark ignition engine using kerosene as fuel

小林 茂己<sup>1)</sup>, 山田 裕一<sup>1)</sup>, 宇田川 真介<sup>1)</sup>

Shigemi Kobayashi<sup>1)</sup>, Hirokazu Yamada<sup>1)</sup>, Shinsuke Udagawa<sup>1)</sup>

**Abstract** : It is expected that various combinations of available energy sources and power sources are going to coexist until hydrogen society will be achieved in the future. In order to provide potential idea for the consideration of the best mix of energy sources and power sources in the near future, this study applied its focus on a certain spark ignition engine (SI engine) that uses kerosene or Jet-fuel as fuel in spite of being Otto engine, which has simple structure, lightweight and high dependability. Two case studies aiming the field in which special effects are expected by applying the kerosene fuel engine of this study will be reported, such as "A fundamental study on the heating system with electric power supply for the sheltering base in the region" and "A study on the application of Jet fuel to SI engine".

**Keywords** : Petroleum resources, Kerosene fuel, Jet fuel, Spark ignition engine, Reciprocating engine

### 1. はじめに

我々の生活に必要なエネルギーは燃料・電力用途を含め、その大部分を石油・石炭・天然ガスに依存している。図1-1<sup>(1)</sup>参照。このうち石油は主に燃料油へと精製され、石炭と天然ガスが主に電力を得る発電用途に使用されている。

石油燃料は主として原油から精製される。図1-2<sup>(1)</sup>は国内の年間石油精製量をエネルギー換算で表し、ガソリン、軽油及びC重油で大半を占める。これはガソリンを燃料とするオットー機関や軽油・C重油を燃料とするディーゼル機関といった往復動機関、すなわちレシプロ機関向けのエネルギー供給割合が現在も高いことを示唆している。

オットー機関は重量あたり出力が高く、輸送機械の中で軽量級に属する小型航空機や自動車に用いられる。また、ディーゼル機関はオットー機関のようなノッキングによる出力制限を受けず高出力化しやすく、熱効率も高いため、重量級に属する輸送トラックや大型船舶に用いられる。

一方で、灯油系燃料に分類される灯油およびジェット燃料はレシプロ機関に用いられることがほとんどない。主に灯油は暖房やボイラー等に、ジェット燃料は航空機のジェットエンジンに用いられる。このように石油燃料はいくつかの燃料油種に分類され、その違いは原油精製時の分留温度の違いで区分される。留出温度が低い方から、ガソリンー灯油ー軽油ー重油の順に抽出される。これに起因して灯

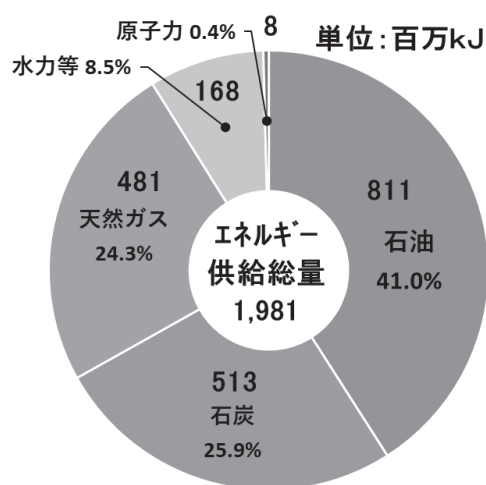


図 1-1 国内供給 1 次エネルギー (2015 年)<sup>(1)</sup>

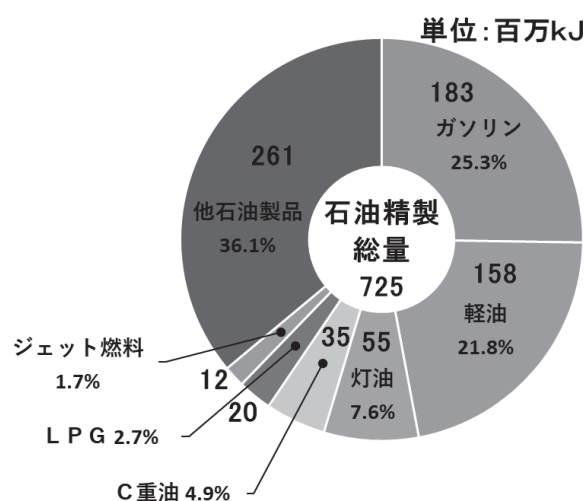


図 1-2 国内石油製品精製量 (2015 年)<sup>(1)</sup>

<sup>1)</sup>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

油はガソリンと軽油の中間的な性質を持ち、潜在的にオート機関とディーゼル機関のどちらによっても運転できる可能性を内在している。

現在、輸送機械の主要動力源であるレシプロ機関は、将来的にその一部が電動機に置き換わる可能性がある。しかし、電動機に供給される電力は石炭・天然ガスから発電されており、その変換効率は 2015 年度の実績値で 42.5 %<sup>(1)</sup> とディーゼル機関の熱効率とあまり変わらない。このため送配電損失を含めると、動力源の電動化は総合的なエネルギー効率面で一定以上のメリットが期待できない。

それゆえ、将来に期待される水素社会<sup>(2)</sup> が実現するまでの間は、利用可能なエネルギー源と動力源の組み合わせが複数で共存してゆくと予想される。本研究では近い将来のエネルギー源と動力源のベストミックスを検討するの一助とするため、引火点が高く安全性の高い燃料である灯油とオート機関の組み合わせに着目して研究している。すなわち、構造が簡単で軽量かつ信頼性の高いオート機関でありながら、灯油やジェット燃料を燃料とする機関の可能性を研究している。しかし、現在主流の熱機関との単純な置き換えは実用上の困難が予想されるため、適用先を絞り込んだ個別テーマを設定している。本稿では灯油系燃料を用いた火花点火機関を適用することで、特別な効果が期待される二つの分野を対象とした研究について以下報告する。

## 2. 地域防災拠点向け電力併給暖房システム

### 2-1. 目的

この適用ケースは災害時の防災拠点での利便性を高める狙いから発電用燃料を暖房と共用の灯油とすることを特徴とするコンパクト型電力併給暖房システム（図 2-1）である。灯油を用いるのは寒地での強力なインフラが確立されており、震災時にも入手性に優れた実績を持ち、引火点の高さゆえ消防法等の規制を受ける指定数量が大きく、備蓄量を確保し易いという他にはない利点があるからである。

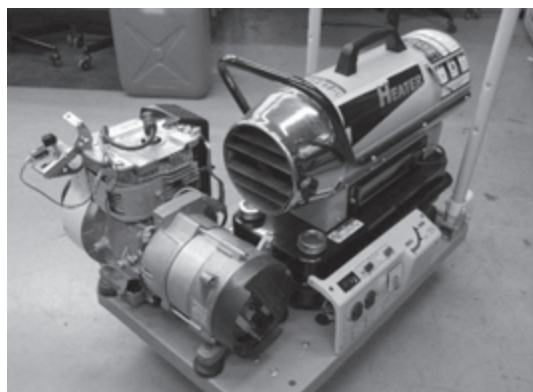


図 2-1 電力併給暖房システムのコンセプトモデル

このシステムを備えた防災拠点では、災害により電力やガスの供給が止まっても防災活動に必要な暖房用熱源と最低限の電力確保<sup>(3)</sup> が同時に可能となる。また、コンパクト型には可搬性のみでなく、平時の点検・保守費用の低コスト化、保管場所の省スペース化など、避難所指定施設にとって導入のハードルを下げる効果がある。さらに、導入時の初期コストや重量を抑えるため、発電用機関には市販のガソリン機関をベースとして用い、最小限の部品変更によってディーゼル機関のように灯油等を燃料に使用できる量産システムを目指している。上述のコンセプトに基づく発電用機関について実用運転条件や燃焼特性を明らかにする基礎的実験を行った。

### 2-2. 灯油発電用機関の性能実験方法

本研究のシステムを構築するために、コンセプトに基づいて発電用機関を試作した。基礎的研究のため、ベース機関には 1 気筒の側弁式ガソリン機関（スバル産機・EY型）を用い、気化器を変更して燃料が灯油の場合にも理論混合気が得られるよう改造し発電用機関とした。側弁式はシリンダヘッドの構造が単純で筒内圧力センサを設置し易く、燃焼解析に都合がよい。表 2-1 に発電用機関の諸元を示す。

表 2-1 発電用機関の諸元

機関形式	空冷 4 サイクル 1 気筒
バルブ機構	側弁式
排気量	1 4 3 c c ( $\phi 63 \times 46$ mm)
圧縮比	6 . 3
出 力	1 . 3 kW

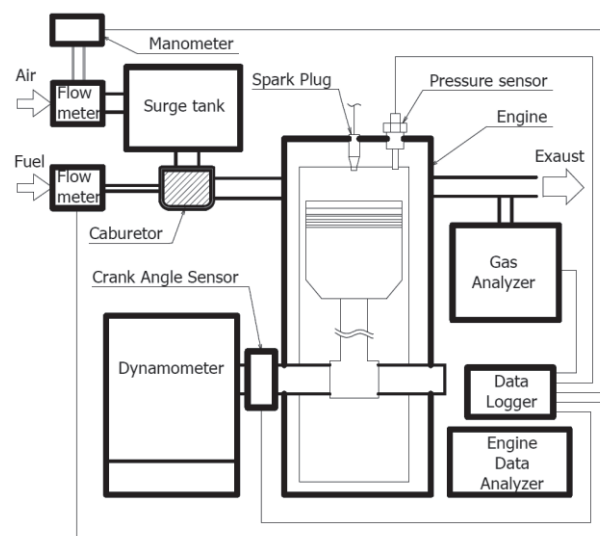


図 2-2 発電用機関と実験装置

また、図 2-2 のように動力計と発電用機関を接続し、吸気・排気系統、及び計測機器類をレイアウトして性能実験を行った。シリンダヘッドには燃焼圧力センサが取り付けられており、運転中の燃焼圧力を計測し燃焼サイクル解析に用いた。また、排気管から排気ガスをサンプリングしガス組成を分析できるようになっている。

性能実験で使用した発電用機関は基礎研究用に試作したものはあるが、発電機と接続すると 0.7 kW 程度の発電能力が見込まれる。そこで、熱出力 8.6 kW の強制吸気式暖房機と組み合わせ、図 2-1 のような装置(幅 500 mm×高さ 860 mm×奥行 900 mm)を構成し、外部電力の供給がない状態で暖房運転を試行する。

## 2-3. 灯油発電用機関の性能実験結果

### 2-3-1. 灯油運転時の燃焼安定性 (図 2-3)

はじめに灯油運転時の燃焼安定性を確認するために、クランク回転角度 0.5 度刻みに気筒内の燃焼圧力を記録しながら、動力計のトルク制御によりベース機関に対する負荷割合 60 %、30 %、無負荷で運転したときの図示仕事を図 2-3 に示す。プロットは 1 サイクル毎の図示仕事を P-V 線図より求めて連続 30 サイクルで平均した値である。また、上下に伸ばしたエラーバーにより図示仕事のばらつき  $\pm 3\sigma$  を表示している。負荷割合を 60 %までに留めたのは、燃料である灯油はガソリンに比べ自着火し易いためノッキング発生による機関へのダメージが懸念されたためである。また、グラフ上の点線で囲った範囲はベース機関(ガソリン燃料)の実用運転範囲(最大負荷トルク 6.7 Nm、定格回転数 3600 rpm)であり、本実験の運転範囲はベース機関(ガソリン燃料)に対し最大負荷トルクの 60 %、定格回転数の 100 %に相当する。図 2-3 よりこの運転範囲において灯油使用時においても、失火等のない連続運転性が確認された。

### 2-3-2. 灯油運転時の燃焼圧力波形 (図 2-4)

図 2-4 は負荷 2.0 Nm、回転数 3200 rpm の条件で運転した場合のシリンダ内の圧力観測結果である。上段に灯油を燃料として用いた場合の燃焼圧力波形、下段にガソリン使用時の燃焼圧力波形を示す。また、破線で熱発生率(単位クランク角度毎の熱発生量)を示してある。灯油使用時は主燃焼の圧力ピーク(CA400°)の直後にもう一つの鋭い圧力ピークが見られた。破線の熱発生率からは主燃焼の熱発生率よりも高い熱発生ピークが確認され、燃焼後期に未燃ガスが自着火したものと考えられる。

ガソリン使用時の圧力波形には、主燃焼後のピークはみられないが変曲点があり、熱発生率において主燃焼による熱発生ピークの後に、別のピークが存在することが分かる。ガソリンは灯油に比べ自着火温度が高いため、灯油の場合

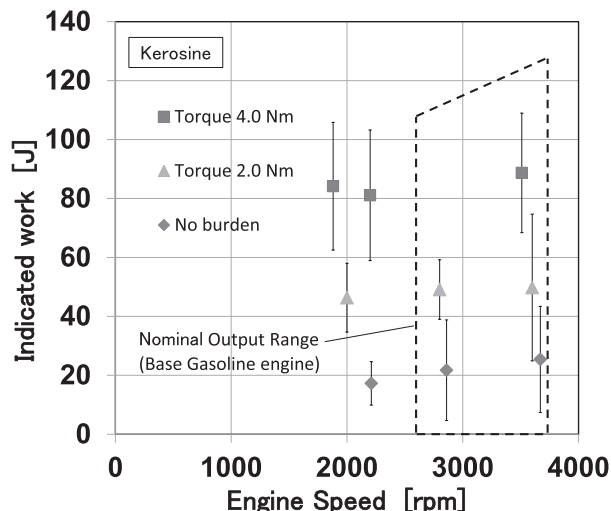


図 2-3 灯油運転時の燃焼安定性

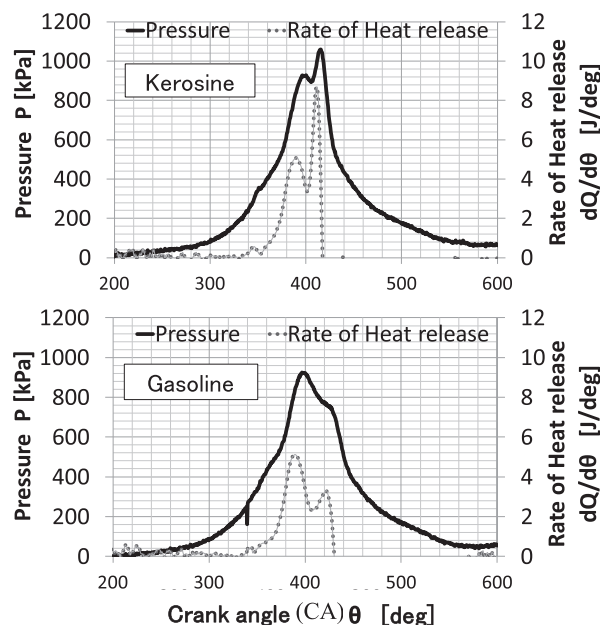


図 2-4 灯油とガソリンの燃焼圧力波形

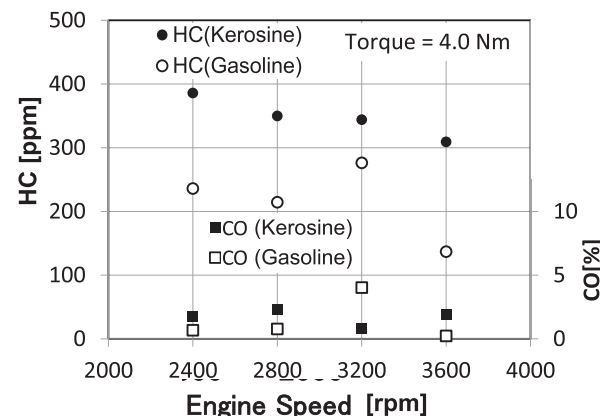


図 2-5 排ガス中の HC 濃度, CO 濃度

よりも比較的小さい規模で自着火が発生したと考えられる。

灯油燃料時に高い熱発生ピークが見られたが、今回実験の運転条件では圧力波形にノック振動は見られなかった。しかし、自着火の規模が何らかの要因によって増大した場合にはノックの発生が懸念される<sup>(4)</sup>。灯油使用にはノックに至らない運転条件の見極めが重要と考えられる。

### 2-3-3. 排気ガスおよび燃料消費率(図2-5, 図2-6)

図2-5は負荷60%(負荷トルク4.0 Nm)で排気ガス中のHC濃度及びCO濃度を測定した結果である。灯油運転時はガソリン運転時よりもHC濃度及びCO濃度がともに高い傾向が見られた。これは、灯油燃料使用時は燃料の気化性が低いため、燃焼に使われない未燃分がより多くHCとして排気に流出し、同時に不完全燃焼分が増えてCOが増加したのと考えられる。今回の実験では回転速度によらず気化器を同一設定で用いたにも関わらず、ガソリン使用時の3200 rpmに限り空燃比がやや小さくなっていた。このため混合比が濃い目になりHC濃度とCO濃度が大きくなったと見られる。

図2-6は負荷60%(負荷トルク4.0 Nm)で燃料消費率(FCR)を測定した結果である。今回の実験では灯油燃料時とガソリン燃料時の間に燃料消費率に明確な違いは見られなかった。

### 2-3-4. 発電電力を使用した暖房運転結果

実験で使用した発電用機関の出力1.3 kWをもとに発電機の効率を考慮すると発電能力は約700 Wが見込まれる。この電力をコンセプトモデルの強制吸気式暖房機に供給することで外部電力供給のない自立運転を試行できる。暖房機の消費電力は仕様では40 Wとされ、発電能力と比較して余裕があるように見えるが、とくに起動時の必要電力は瞬間的に40 W以上となり起動できない場合も考えられたため実験を行った。その結果、暖房機は問題なく起動し、続いて安定した暖房運転が継続した。図2-1のコンセプトモデルを用いて外部電力供給のない自立発電による暖房運転が可能であることを確認した。

## 2-4. 結論

市販ガソリン機関をベースとして気化器を変更した発電用機関を実験に用い、灯油燃料を使用して今回設定した実験条件で運転すると以下の点が明らかとなった。

- (1) 連続30サイクルの図示仕事を測定した結果から、灯油燃料の場合にベース機関(ガソリン燃料)の負荷60%まで正常な運転が可能であることを確認した。

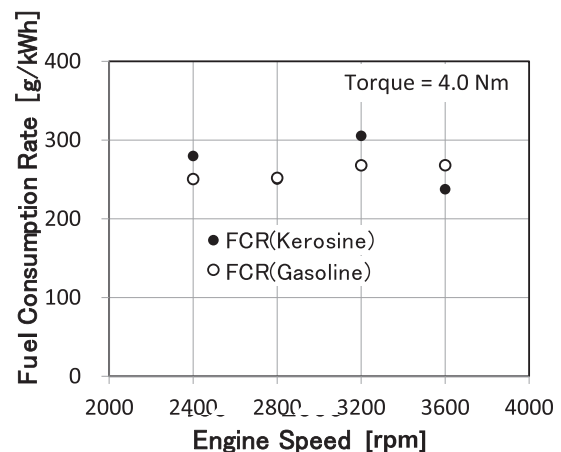


図2-6 燃料別の燃料消費率

- (2) 筒内圧力波形及び熱発生率から、主燃焼による燃焼圧力ピークの直後に自着火による別のピークが見られ、灯油燃料の場合はガソリン燃料時よりも高い熱発生ピークが見られた。
- (3) HC, CO濃度はガソリン燃料の場合よりも高くなる傾向が見られた。
- (4) 燃料消費率については灯油燃料時とガソリン燃料時で大きな違いは見られなかった。
- (5) 本研究が提案するコンセプトモデル(図2-1)は外部電力供給のない自立発電暖房が可能である。

## 2-5. 今後の計画

発電用機関の機能確認と併行し、システム全体の有効性を早い段階で概略評価しておく必要がある。シンポジウム等にて発表し、関係技術各方面の意見を集めたいと考えている。コンパクト型暖房システムが提供されることで、費用対効果のバランスが改善し、これまで発電機の導入を見送った施設が導入へ踏み切れる可能性がある。

また、防災拠点が本システムを導入する要件を考えると、平時における利用価値が高いことも重要<sup>(3)</sup>と考えられる。

平時に想定される用途として、

- ・公立学校等の災害訓練時における災害本部の暖房や電源
- ・雪中、海岸、河川敷、島しょ部など電源がとれない場所での暖房や各種機器(給水・排水、通信他)への電源供給
- ・電源のない倉庫やハウスでの臨時暖房や照明用電源
- ・バッテリーあがりの自動車や作業機械の始動

などのように、可搬性の高いコンパクト型の特徴を生かし、日常的に起こりがちな様々なケースへの適用が考えられる。今後、始動性向上による使い勝手の改善等についても検討していきたい。



### 3. 航空ジェット燃料の SI エンジンへの適用

#### 3-1. 目的

航空機には商用の定期便に多くみられるターボジェット機や小型航空機に多いレシプロ機（ピストン機関搭載機）があり、滑空機を除く国内航空機登録数は 2017 年 12 月現在 2,147 機ある。そのうち 3 機に 1 機 (33.3 %) はレシプロ機であり<sup>(5)</sup>、市場規模としても小さくはない。ところが国内空港では燃料管理の簡素化のため、航空燃料として航空ガソリンの取扱いをやめ、ジェット燃料のみとする空港が出始めている。この燃料入手難に対応するため小型航空機をジェット燃料化すべく小型航空機専用のディーゼル機関<sup>(6)</sup>やジェット機関の開発がなされ、既設のレシプロ機関と換装する事業もみられるが、まだ普及には至らず今後のスタンダードは定まっていない。そこで本章の研究では航空用として高い信頼性の実績をもつレシプロ機関でありながら、ジェット燃料を用いるレシプロ機関の可能性を検討するため基礎的な実験を行った結果について報告する。

#### 3-2. ジェット燃料化 S I 機関の性能実験方法

図 3-1 に本研究で使用した実験装置の概要を示す。実験機関は 1 気筒ガソリンピストン機関（空冷側弁式、ボア 63 mm、ストローク 46 mm、排気量 143 cc、定格出力 1.74 kW、定格回転数 3200 rpm）をベース機関として、気化器を実験用の空燃比可変型に組み換えて使用した。本実験機関に渦電流式動力計を接続し、クランク軸角度検出器(720 パルス)、筒内圧力検出器をはじめ、燃料・吸気流量計、吸・排気温度計、吸・排気圧力計、排気ガス分析器を機関前後の吸・排気系統に設置して実験を行った。

図 3-2 に実験機関周りに取り付けた圧力センサの配置を示す。今回実験では吸気管内の圧力に加え、吸気弁直前にも吸気圧力計を接続し、これにより吸気量検証に用いるデータの取得を可能とした。また、筒内圧力計測にはひずみ式圧力計及び圧電式圧力計の双方を用いた。表 3-1 に本実験で使用した航空ジェット燃料 Jet-A1 の物性を示す。ジェット燃料の蒸気圧はガソリンに比べ低いため冷間始動が困難である。本実験では始動時のみガソリンを供給し、始動後にジェット燃料に切り替えて運転した。またジェット燃料はガソリンよりも自着火点が低いため本実験では安全をみてベースガソリン機関の全負荷トルクに対し約 60 %までの範囲で実験を行うこととした。

#### 3-3. ジェット燃料化 S I 機関の性能実験結果

##### 3-3-1. ジェット燃料運転時の燃焼安定性

各負荷における回転数と指示馬力の関係を図 3-3 に示す。点線の範囲は実験機関の推奨運転範囲である。指示仕事は

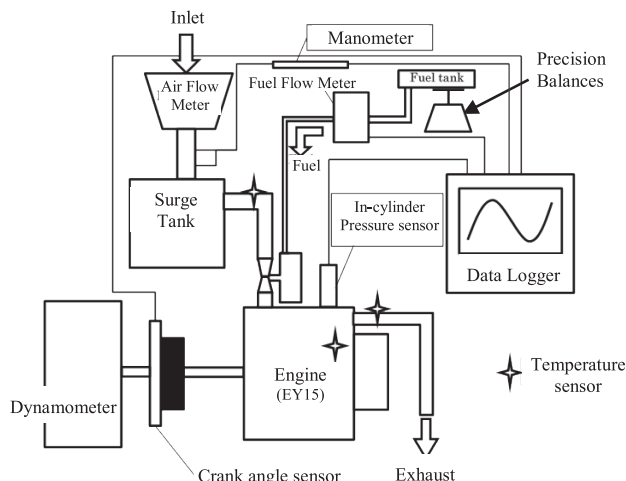


図 3-1 実験装置

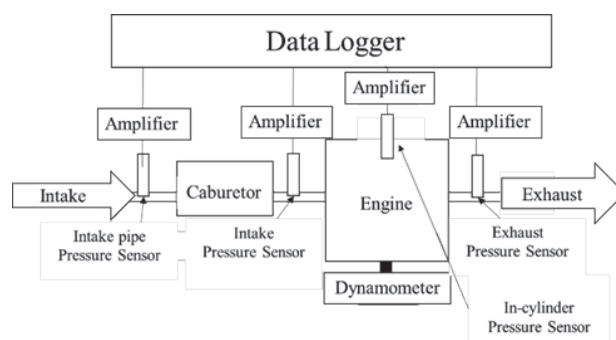


図 3-2 エンジン周りの圧力センサレイアウト

表 3-1 試験用燃料の物性<sup>(1)(2)(3)</sup>

	Jet A1	Gasoline
Net Calorific Value MJ/kg	41.9 Measured	(44)
Distillation Temp.10%-90% °C	166-233	70-180
Flash Point °C	(40)	(-40-20)
Ignition Point °C	(255)	(300)
Density kg/m <sup>3</sup>	775-840	below 783
Vapor Pressure kPa	-	44-78

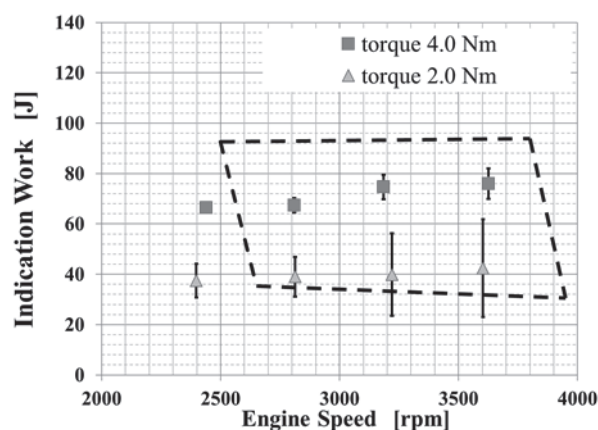


図 3-3 図示仕事の平均とばらつき

P-V 線図から求めた。プロットは 30 サイクル分の指示仕事の平均値を示し、燃焼 1 サイクル毎の変動を表すため、指示仕事のばらつき $\pm 3\sigma$ （標準偏差）の範囲をプロットの上下に示している。

図 3-3 より各負荷において回転数の上昇とともに指示馬力が上昇し、また急激な馬力の低下等は見られないため、全負荷トルク（7 Nm）の約 60 %まで失火等なく機関出力が得られることを確認した。

次に、本実験で懸念されたノックまたは自着火の有無を調べるため、筒内圧力値による観測と解析を行った。ノックが発生した場合には、圧力の急峻な立ち上がりや圧力振幅によるノック振動が見られるはずである。図 3-4 は回転数 3200 rpm - 負荷 2.0 Nm（上）と回転数 3200 rpm - 負荷 4.0 Nm（下）における筒内圧力の時間経過を 30 サイクル分アンサンブル平均したもの（太線）である。また、細線は圧力値より求めた熱発生率である。

今回の各運転条件（図 3-3 の各点）ではノックとみられる圧力波形は見られなかった。しかし、自着火を起こしやすい Jet-A1 を燃料とするため、ガソリン用の圧縮比（6.3）、負荷トルク 4.0 Nm（全負荷の 60 %）の条件で運転すると末端ガスの高温化により、耐爆性の低い燃料ではノックが起きやすくなると考えられる<sup>(4)</sup>。そこで、ノック発生前の自着火に着目し、1 燃焼ごとの全ての圧力波形を確認したところ、負荷トルク 4.0 Nm の各回転条件において 395 deg. 付近で熱発生率に変曲点が見られ、その発生頻度は観測サイクル数の 3~7 %の割合であった。

図 3-5 は 3200 rpm・4.0 Nm において熱発生率に変曲点が見られた 1 サイクルの筒内圧力の時間経過と熱発生率を表し、比較のため 30 サイクルのアンサンブル平均を重ね合わせたものである。図中には熱発生の開始（点火 337 deg.）から終わり（420 deg.）までを熱発生期間として矢印で示している。変曲点が発生した波形は 30 サイクル平均の波形と比較して、最大圧力値はほぼ変わらないが最大熱発生率は 0.2 J / deg. 程低く、熱発生率ピークは 30 サイクル平均に比べて約 3 deg. (CA) 早く出現している。

この変曲点の発生原因として燃焼期間後期に自着火が発生したことが考えられる。自着火の発生には未燃ガスの温度、圧力と、それによる自着火遅れ時間が関与していると言われる<sup>(4)(7)</sup>。本実験においては負荷トルク 4.0 Nm の場合に限り 30 サイクル中の一部のサイクル（3 ~ 7 %）に自着火が観測されるが、負荷トルク 2.0 Nm の場合には見られなかった。比較的高負荷の場合は燃焼時の筒内圧力、温度が上昇し、自着火する条件に合致したものと予想される。また変曲点が発生したサイクルの発生仕事は 30 サイクル平均の場合の約 98 %であり、若干の仕事の損失が見られる。本図により、この変曲点は熱発生期間後期に末端ガス自着火による熱発生を捕らえたものと考えられる。

これらの結果より、4.0 Nm では燃焼後期に自着火が発生したと考えられる。この条件では自発火が発生するもの

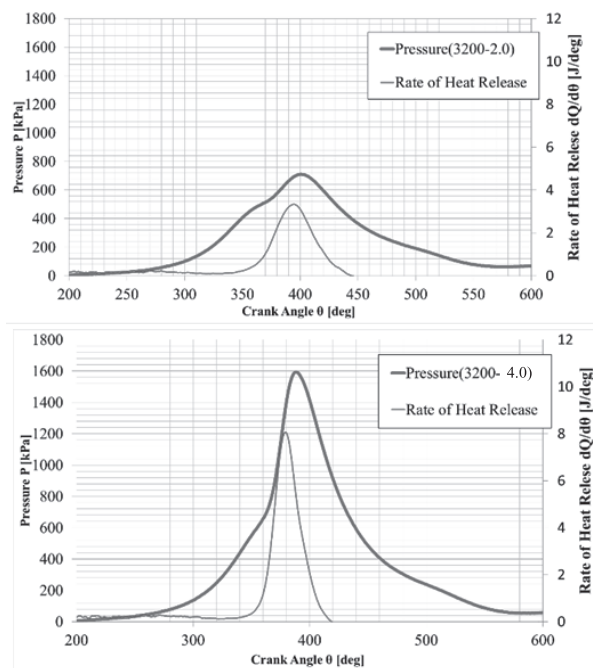


図 3-4 P- $\theta$  線図と P-dQ/d $\theta$  線図 (30 サイクル平均)

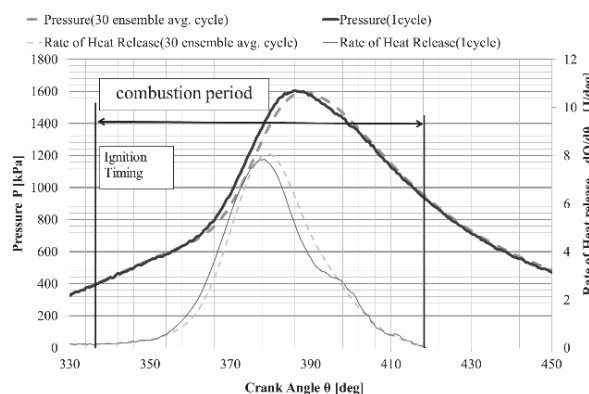


図 3-5 P- $\theta$  線図と P-dQ/d $\theta$  線図 (30 サイクル平均)

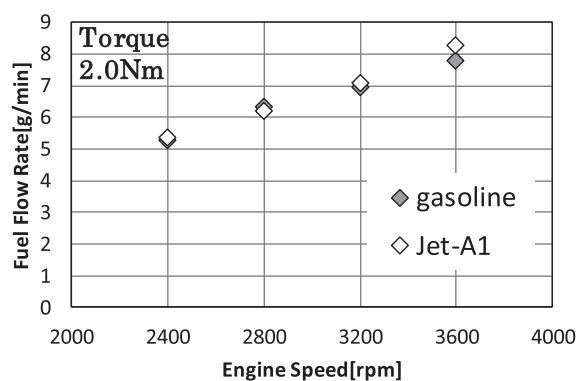


図 3-6 エンジン回転数ごとの燃料流量

の、発火遅れ時間が長いため、燃焼後期に変曲点として圧力値に現れたものと考えられる。負荷をさらに上げたとすれば、この変曲点は主燃焼ピーク発生時期に近づき、ノックを発生する<sup>(4)</sup>と予測される。本実験でみられた自着火はノッキングの兆候と考えられる。

以上の結果から、ノッキングの兆候は見られたが、全負荷トルク（7 Nm）の約 60 %まではノック発生のない運転ができることが分かった。

### 3-3-2. 燃料の違いによる燃料消費と熱効率

図 3-6 は、機関トルクを 2.0 Nm とし、回転数を 2400 rpm から 3600 rpm の間で 400 rpm ごとに変化させて燃料の違いで運転した燃料流量である。各機関回転において両者は近い値であるが、3600 rpm においてはガソリンに比べ Jet-A1 運転時の燃料流量がやや大きくなっている。

本実験では表 3-1 に示すように燃料別に発熱量の差があるため、燃料流量の違いがそのまま投入熱量の差には該当しない。そこで、動力計の吸収動力と燃料流量から熱効率を求めると図 3-7 のようになり、Jet-A1 で運転をしても平均的には熱効率に大きな差異は出ないことがわかる。しかし 2400, 2800 rpm においては、わずかながら Jet-A1 はガソリンよりも熱効率が高くなっている。この差異を考察するため、図 3-8 に排気ガス分析値よりカーボンバランス法により求めた  $\lambda$  値を機関回転数ごとに示す。図中の破線は SI エンジンにおいて最も出力の発生する最良経済空燃比 BEM、一点鎖線は最良出力空燃比 BPM を表す。

BPM は理論空燃比（ $\lambda = 1.0$ ）よりもやや濃い所（ $\lambda = 0.83$  付近）にあり、BEM は理論空燃比よりもやや薄い所（ $\lambda = 1.06$  付近）にある<sup>(8)</sup>。今回の実験では定格回転の 3200 rpm において Jet-A1、ガソリン両者の  $\lambda$  がほぼ近くなるよう気化器の調整を行った。図 3-8 に見られる通り、気化器による混合比はいずれの機関速度においても BEM と BPM の間にある。今回の実験では気化器の混合比特性が燃料によりどのような影響をうけるかを調べる狙いがあった。このため 3200 rpm のみで  $\lambda$  を合わせ、他の機関回転では気化器の調整を行わず、図 3-8 にみられる程度の  $\lambda$  のずれを許容して実験を行った。Jet-A1 での運転では定格の機関速度 3200 rpm で運転時の  $\lambda$  が最小で、それ以外の機関速度ではより BEM に近い  $\lambda$  で運転されていた。一方、ガソリンでの運転時は 2400, 2800 rpm 時において BPM 寄りの  $\lambda$  となっている。図 3-7 の熱効率において Jet-A1 に対してガソリンが小さい値となったのは気化器の混合比特性が燃料によって異なることが原因と考えられる。

### 3-3-3. 燃料の違いによる排ガス特性の違い

図 3-9 に排気ガス中に含まれる HC と CO の量を機関回転数ごとにプロットした図を示す。図 3-9 によると、Jet-A1 運転時の HC はガソリン運転時に比べて低いこと

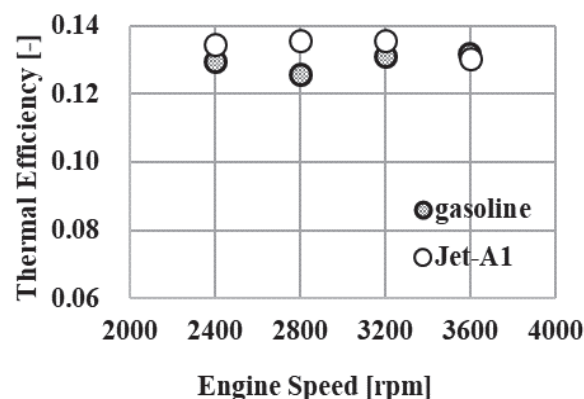


図 3-7 エンジン回転数ごとの熱効率

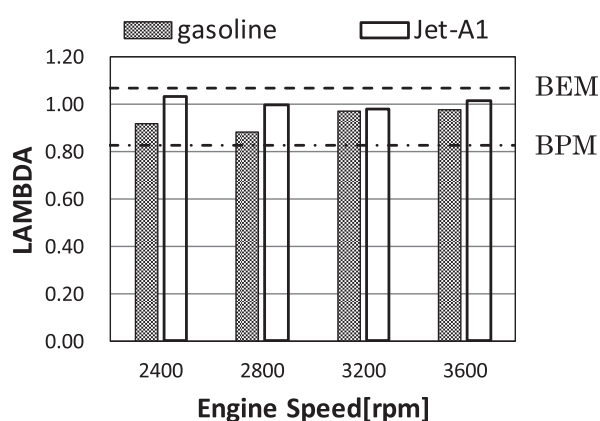


図 3-8 エンジン回転数ごとの空気過剰率  $\lambda$

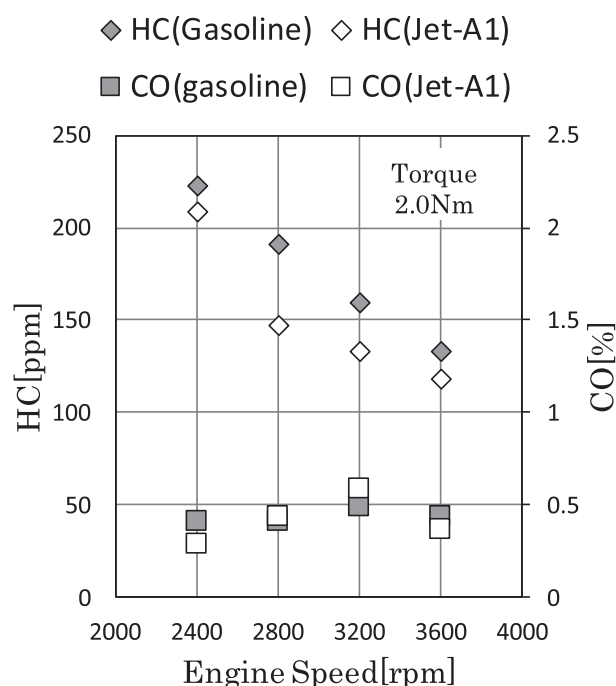


図 3-9 各運転条件における HC 及び CO

がわかる。第1報<sup>(9)</sup>では Jet-A1 では低い蒸気圧に起因して HC 値にやや高い傾向が見られたが、シリンダ温度が十分に安定したのちに計測をした今回の結果では、その影響が小さくなることが分かった。

図3-8にみられたλのずれが大きいガソリンの 2400, 2800 rpm の場合のみ、λ=1 として補正した CO 値を表示している。図3-9をみると、二つの燃料間の差異はほとんどないことがわかる。第一報においても CO 値については燃料による差異 (Jet-A1 対 ガソリン) が無いことを確認しており、本報の実験においても再確認された。

### 3-3-4. 燃料の違いによる体積効率

機関の性能を支配する要因の1つに体積効率が挙げられる。そこで異なる燃料を用いて運転を行った場合に体積効率に違いが生じないのかを確認するために空気流量を計測し、体積効率の比較を行った。

図3-10に動力計のトルクを 2.0 Nm、回転数を 3200 rpm としたときに空気流量から求めた体積効率を示す。この図からガソリン、ジェット燃料の体積効率が等しくなることが確認できた。このことから今回の条件では機関の必要とする体積効率は燃料の違いによらず同じであるとみられる。

### 3-3-5. 空燃比計測を用いたジェット燃料の H/C 値の検討

Jet-A1 における H/C 値は一般的に知られた数値が現在見当たらない。本実験ではこれまで Jet-A1 に物性の近い軽油の H/C 値 2.0 を用いて解析を行ってきた。しかしながら正確な H/C 値を知ることは今後 Jet-A1 を用いたレシプロ機関を研究していくうえで重要である。そこで空気流量及び燃料流量を精度よく計測し、それらから算出した空燃比とカーボンバランス法から求めた空燃比の一致度により燃料 H/C 値を探索する方法を試行した。ここで、カーボンバランス法による空燃比算出式は以下を用いた<sup>(10)(11)</sup>。

$$\frac{A}{F} = \frac{K_0}{C(\text{CO}) + C(\text{CO}_2) + C(\text{THC})} \times \left\{ 100 - \frac{C(\text{CO})}{2} - C(\text{THC}) + (C(\text{CO}_2) + C(\text{CO})) \times \left( \frac{H}{C} \times \frac{K \times C(\text{CO}_2) - 2 \times C(\text{CO})}{K \times C(\text{CO}_2) + C(\text{CO})} - \frac{(O)}{2} \right) \right\} \quad (1)$$

$$K_0 = \frac{28.97}{1.008 \times (H/C) + 16 \times (O/C) + 12.01} \quad (2)$$

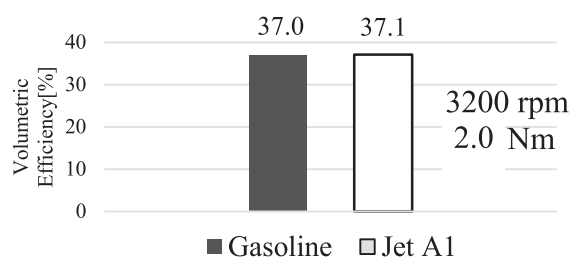


図 3-10 燃料違いによる体積効率の比較

$$C(\text{THC}) = \frac{6 \times C(\text{HC})}{10000} \quad (3)$$

ここで K = 3.8

C(CO<sub>2</sub>):二酸化炭素濃度(% vol)

C(CO):一酸化炭素濃度 (% vol)

C(HC):炭化水素濃度 (ppm vol)

H/C:燃料中に含まれる水素原子と炭素原子の割合

O/C:燃料中に含まれる酸素原子と炭素原子の割合

燃料 H/C 値をさまざまに変えて A/F を算出すると、H/C = 2.4 としたときに両者の空燃比の差が小さくなった。このことからジェット燃料 (Jet-A1) の H/C 値は 2.4 付近と推測される。ただし、この値は現時点での推定であり、今後どのような値を使用すべきかについて引き続き検討を行っていきたい。図3-11は H/C = 2.4 としたときのカーボンバランス法による空燃比と流量計による空燃比図示したグラフである。両者の方法で求めた A/F を比較すると、ほぼ近い値になっていることが分かる。

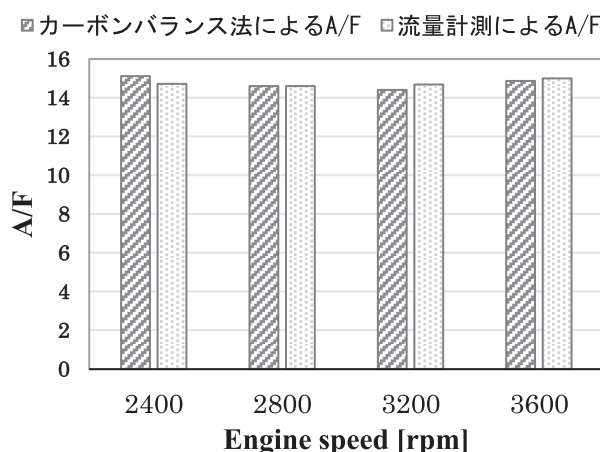


図 3-11 カーボンバランス法による A/F と 空気・燃料の質量流量計測による A/F



### 3-4. 結論

1 気筒ガソリンピストン機関（空冷側弁式，シリンダボア 63 mm，ストローク 46 mm，排気量 143 cc）に，燃料気化器を実験用の空燃比可変型に組み換えて，負荷トルク 4.0 Nm 以下，回転数 2400 rpm から 3600 rpm の間で 400 rpm ごとに変化させてジェット燃料(Jet-A1) による実験運転を行い，ガソリン運転の場合と比較した結果，以下の知見を得た．

- (1) ジェット燃料によって負荷トルク 4.0 Nm（ガソリン運転時全負荷トルクの約 60 %）までノックの発生なく正常に機関出力が得られる．
- (2) 熱発生率グラフから，ジェット燃料により負荷トルク 4.0 Nm の運転を行った場合に，主燃焼の後に変曲点がみられ，約 3～7 %の割合で発生する．この変曲点は自着火によるものとみられるがノッキングには至らない．これ以上の負荷トルクではノッキングの発生が予想される．
- (3) ガソリン運転との比較で，燃料の違いによる燃料流量の差異は同一入においてほとんどみられない．
- (4) ガソリン運転との比較で，燃料の違いによる体積効率の差異はほとんど見られない．
- (5) シリンダ温度の十分な安定を待って実験を行うと，燃料の違いによる排ガス中の HC ppm 値および CO %値に差異は見られない．
- (6) 実験に用いたジェット燃料(Jet-A1)の H/C 値は 2.4 付近と推測される．

### 4. 研究まとめ

灯油系燃料を用いる火花点火機関の特徴を生かした適用先として，”地域防災拠点向け電力併給暖房システム”，あるいは”小型航空機用レシプロ機関のジェット燃料化”を設定し，近年クローズアップされている問題を解決するための一助とする研究を行った．

市販ガソリン機関をベースとして試作したレシプロ機関と強制吸気式暖房機を組み合わせた”地域防災拠点向け電力併給暖房システム”の実験により下記が明らかとなった．

- (1) 試作したコンセプトモデルを用いた実験により，灯油を燃料として外部電力供給のない自立発電暖房が可能である．

- (2) システムの動力源となる試作機関は，本研究の実験条件において，灯油を燃料として運転した場合，ベースガソリン機関の負荷 60 %まで正常な運転が可能である．

- (3) HC，CO 濃度はガソリン運転時よりも高くなる傾向が見られたが，ジェット燃料による結果を考慮すると，灯油の場合にもシリンダ温度が温まって定常温度に達した後は差異がなくなる可能性がある．

- (4) 燃料消費率については灯油燃料時とガソリン燃料時で同等である．

また，市販ガソリン機関をベースとして試作した機関にジェット燃料を用いた実験により下記が明らかとなった．

- (5) ジェット燃料によっても負荷トルク 4.0 Nm（ガソリン運転時全負荷トルクの約 60 %）までノックの発生なく正常に機関出力が得られる．
- (6) 負荷トルク 4.0 Nm の場合に，ノッキング発生前の予兆である圧力振動を伴わない自着火がみられるため，負荷トルク 4.0 Nm を超える運転はノッキングの発生が予想される．
- (7) ガソリンと Jet A1 で燃料の違いによる排ガス中の HC ppm 値および CO %値に差異は見られない．また，Jet A1 運転時のガス値が灯油運転時よりもやや低くなったのは，シリンダ温度が温まって定常温度に達した後試験をしたためと予想される．
- (8) 燃料消費についてはジェット燃料時とガソリン燃料時で同等である．

### 謝辞

本研究にあたり，多大な協力を頂いた SUBARU GROUP 産業機器株式会社をはじめ関係各社に感謝の意を表します．

また，本校の田原校長には燃料油の炭水素比に関する先行研究を教示頂いたばかりでなく，実験に当たった卒業研究生たちをいつも励まして頂きましたことに厚くお礼申し上げます．

最後に，本研究の実験にあたり実験装置の製作や実験に精力的に取り組んだ H28 年度卒業研究生の本村孝行，樋口玲司，須田優駿の諸君，貴重な結果を導きだした H29 年度卒業研究生の瀧澤大二郎，福田祥太，吉川大介の諸君に深く感謝します．

尚，本研究費の一部は都立産業技術高専の特定課題研究費によったことを申し添えます．

## 参考文献

---

- (1) 資源エネルギー庁：「総合エネルギー統計」，2015年度
- (2) 資源エネルギー庁：「エネルギー白書」自立的かつ環境調和的なエネルギー供給構造の実現, 2013年度
- (3) 文部科学省 施設企画課：「東日本大震災の被害を踏まえた学校施設の整備について」，2011.7.7
- (4) 小林 茂己，森吉 泰生，榎本 良輝：「火炎伝播を伴う定容容器内エンドガス自着火に関する研究」～局所ガス温度計測と可視化による自着火現象の解明～，自動車技術会論文集 36 巻 3 号, pp.7-12, 2005.
- (5) 国土交通省：登録航空機数年計表 2017 年 1 月～12 月, 国土交通省 HP
- (6) Textron Aviation Inc.: Cessna Turbo Skyhawk JT-A Specifications, [http://cessna.txtav.com/en/piston/cessna-turbo-skyhawk-jt-a#\\_model-specs](http://cessna.txtav.com/en/piston/cessna-turbo-skyhawk-jt-a#_model-specs)
- (7) 脇坂知行ほか：予混合圧縮着火機関における混合器形成および燃焼過程の数値予測, 第 16 回内燃機関シンポジウム講演論文集, pp.127-132, 2000
- (8) 公益社団法人 日本航空技術協会：航空工学講座 ピストン・エンジン, 2014
- (9) 本村孝行, 樋口玲司, 須田優駿, 小林茂己：航空ジェット燃料の SI エンジンへの適用に関する研究（第一報）, 自動車技術会関東支部 2016 年度学術研究講演会予稿集, E1-2\_011, 2017
- (10) William M. Silvis : The Algorithmic Structure of the Air/Fuel Ratio Calculation (There is really only one A/F ratio equation), 株式会社 堀場製作所 Read out HORIBA Technical Reports pp.17-24, 1997
- (11) 伊藤宏一ほか：Microscan<sup>TM</sup>とカーボンバランス法による空燃比の相関, 東京都立航空工業高等専門学校 研究紀要 35, pp.111-116, 1998
- (12) JIS K 2202：自動車ガソリン, 2012
- (13) JIS K 2209：航空タービン燃料油, 1991