

火花点火機関におけるバイオガス燃料の燃焼特性に関する研究 (エンジン実験装置製作と燃焼実験)

森口 剛士¹⁾・友松 重樹²⁾・長瀬 慶紀³⁾

Study on Combustion Characteristics of Biogas Fuel using S.I. Engine (Making of S.I. Engine experimental device and Combustion Experiments)

Koji MORIGUCHI, Shigeki TOMOMATSU, Yoshinori NAGASE

Abstract

Biogas, which is made from animal excreta and food waste, consists of 60% methane and 40% carbon dioxide. The biogas composition ratio is changed by fermentation condition. Combustibility of biogas was researched about relation between gas flow and flame shape using constant volume combustion chamber. But combustion characteristics of biogas/air mixture have not been researched in spark ignition engine. The purposes of this study are making of engine experimental system and comparing combustion characteristics of biogas with propane. First of all, the authors designed and made intake system for biogas supply, spark ignition system and combustion pressure measurement system. To comparing each combustion characteristics, combustion pressure was measured under same ignition timing condition. In these experiments, concentrations of methane in biogas were 70, 60 and 50%. From the result of pressure measurement, combustion period of propane mixture was the shortest in all conditions. For biogas mixtures, combustion period decreased with increase of methane concentration. Maximum combustion pressure increased with decrease of combustion period. As results, it was found as follows. To investigate combustion characteristics of biogas/air mixture, engine experimental system was designed and constructed. From combustion pressure measurement, there is high correlation between combustion period and methane concentration of biogas. However, to discuss about indicated work, indicated mean effective pressure, indicated thermal efficiency and specific fuel consumption of each conditions, these should be compared under MBT conditions.

KeyWords: Composition ratio of Biogas, S.I. Engine, Combustion Pressure, Combustion characteristic

1. はじめに

産業革命による工業の発達は人々に便利さを提供してきたがその反面、地球環境に甚大な悪影響を与え続けている。工業の発達に伴い化石燃料が使用され、大気汚染や酸性雨等の環境問題の原因となっている。そのため近年、理論的にカーボンニュートラルであるバイオガスが化石燃料の代替燃料として注目されている。

バイオガスは主に家畜糞尿や生ごみなどの有機物から生成され、一般的なバイオガスは約 60% のメタン、約 40% の二酸化炭素で構成される。バイオガスはその他に硫化水素やアンモニア、窒素、酸素、水素等の物質が数%程度含まれることもある。バイオガスの発熱量は都市ガスの 6A 程度あり、代替燃料としての価値が高く注目されている。よって世界各地でバイオガスプラントを設置し、バイオガスを回収する研究や取り組み、またメタンと二酸化炭素から生成した模擬バイオガスをガスコージェネレーションシステムやエンジンの燃料として用いる研究

が行われている。

従来の研究によって、バイオガスは発生の際に原料状態や発酵状態によって組成が変化すると報告¹⁾がある。このことによりバイオガスをエンジンなどで高効率に使用するためには、組成を変化させたバイオガスの燃焼特性を調査する必要がある。またバイオガスのメタン濃度が何%までなら燃焼するかを確認する必要がある。そこで小田ら^{2,3)}はバイオガスのメタン濃度を減少させた時のガスコージェネレーションの運転性能についての調査を行った。その結果、小田らが用いたエンジンではバイオガスのメタン濃度が 52% までは運転可能であることを定性的に明らかにした。しかし、バイオガスの燃焼特性に関しては定量的には調査されていない。

根井ら^{4,5)}は定容燃焼容器においてバイオガスの組成を変化させた時にフラクタル次元で評価した火炎形状の複雑さと乱流燃焼速度、乱れ強さとの関係について調査している。しかし、エンジンにおける火炎形状の複雑さと乱流燃焼速度や乱れ強さ等との関係については研究されていない。

本研究の目的は、模擬バイオガスとプロパンを燃焼させるためのエンジン実験装置製作および燃焼圧力計測シス

1) 機械システム工学専攻大学院生

2) 機械システム工学科助教

3) 機械システム工学科准教授

テムの構築、構築したエンジン実験装置および燃焼圧力計測システムを用いて組成比を変えた模擬バイオガスの燃焼圧力を計測することにより、一般的なガスエンジンの燃料であるプロパンの燃焼圧力と比較し模擬バイオガスの燃焼特性を調査することである。

2. 実験装置

2.1 供試機関

本研究で使用した供試機関は実験用に改造を加えた三菱製 R52R 型水冷式 4 サイクル単気筒エンジンである。表 1 に供試機関主要諸元、図 1 にヘッドの形状を示す。このエンジンは、純正のシリンダヘッドを取り外し、シリンダライナとピストンヘッドの上部にそれぞれ延長したシリンダライナとピストンを取り付けてある。ボア×ストロークが 84.0 mm×90.0 mm、排気量 498.8 cc、燃焼室形状はパンケーキ型となっている。また吸排気バルブの駆動方法は、クランクシャフトからベベルギアを介してカムシャフトを回転させ、計測用シリンダヘッド側壁にあるバルブを水平に開閉させる方法である。

表 1. 供試機関主要諸元.

Engine type	4 cycle single cylinder
Combustion chamber	Pancake type
Bore×Stroke	84.0 mm×90.0 mm
Displacement	498.8 cc
Connecting rod	166.0 mm
Compression ratio	6.0

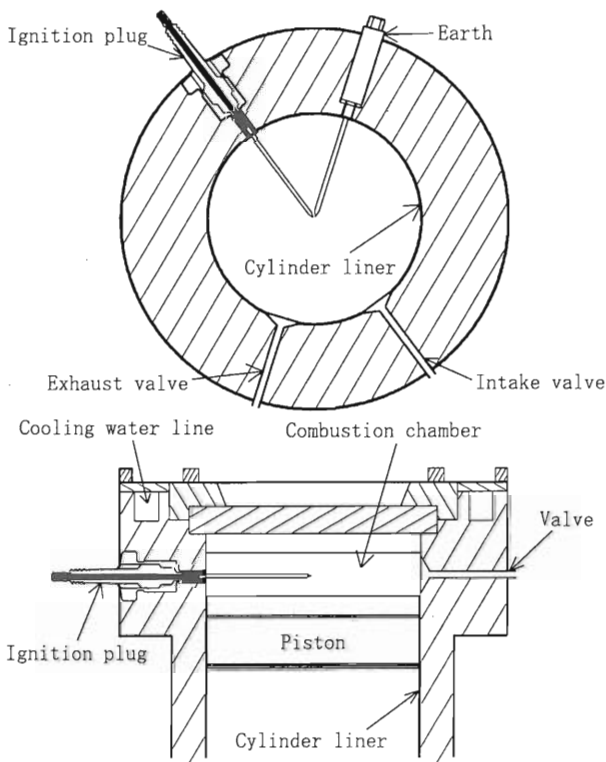


図 1. ヘッド形状.

2.2 吸排気装置

バイオガスの成分は原料や生成条件により左右されるために、安定した組成のバイオガスを得ることは非常に困難である。よって、本研究では主成分であるメタンと二酸化炭素を高压ガスボンベから供給し、模擬バイオガスを生成する吸排気管を設置した。図 2 に設置した吸排気装置の概略図を示す。

模擬バイオガスは組成比、模擬バイオガス/空気予混合気の当量比および充填効率から、メタンと二酸化炭素の単位時間当たりの質量流量を算出した。またプロパンはプロパン/空気予混合気の当量比および充填効率から質量流量を算出した。メタン、二酸化炭素およびプロパンの流量調節は市販のマスフローコントローラにより行った。空気は自然吸気で空気吸入口にはエアフィルタを設置している。吸入空気流量はエアフィルタの下流に取り付けた層流流量計の差圧をゲッチングマンノメータで読み取り、その差圧により算出した。空気の流量調節はエンジン上流に設置したバルブで行った。予混合気の攪拌はミキサを自作し、それをエンジンの上流側に設置することにより解決した。図 3 に自作したミキサの図面を示す。

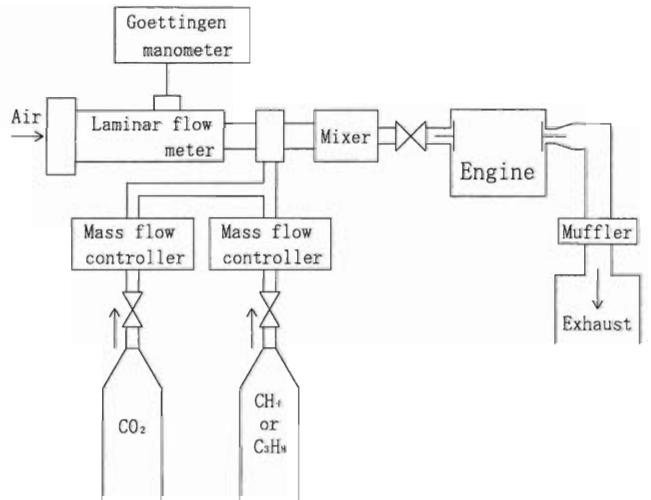


図 2. R52R 吸排気システム.

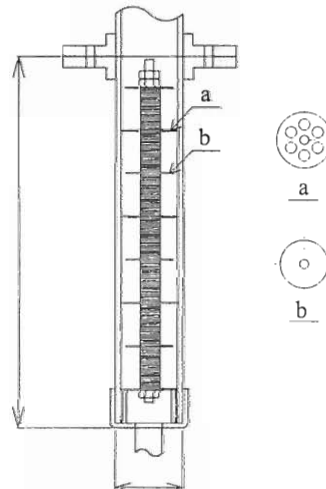


図 3. ミキサ.

ミキサは円筒の塩ビ管に二種類の形状のアルミ板を各4枚、計8枚取り付け、この板を通過する際に生じる乱れにより二酸化炭素、メタンおよび空気を混合する。

排気系に関して、エンジンの着火運転時に発生する排気騒音減少のため軽自動車用のマフラーを設置した。排気管路内で排気ガス中の水蒸気が凝縮するため、水抜き用のバルブを管路中に設置した。

今回設置した吸排気装置では標準状態での最大充填効率は約66%であり目標の70%に満たない。今後、充填効率向上のために管径を太くする、過給を行うなどの改良を行う必要があると考えている。実験の再現性を向上させるために吸入空気温度を一定にできるシステムに改良する必要がある。そのため、ミキサに温度調節器を設置する必要があると考えている。

2.3 点火装置

本研究での点火装置は点火エネルギーおよび応答性、使い勝手が良いこと等を考慮し Capacitor discharged ignition (以下、CDI)方式とした。今回設置した点火系の概略を図4に示す。CDIへの点火信号は、フォトトランジスタのセンサ部に受光すると、約1.5Vの電圧を出力する回路とした。このフォトトランジスタをクランク軸とともに回転するディスクの片側に取り付け、ディスクを挟んで反対側に電球を設置した。ディスクには穴が空いておりクランク軸が回転し、この穴がフォトトランジスタと電球の間を通過すると電球の光がフォトトランジスタに入りフォトトランジスタから電圧が出力される。点火時期はフォトトランジスタと電球の設置位置を機械的に移動させることにより調節する。しかし、CDIはTTLレベルの信号で反応するのにに対し、フォトトランジスタから出力される電圧は約1.5VであるためTTLレベルに増幅する必要がある。そのため、フォトトランジスタとCDIの間に増幅回路を設置した。増幅回路でTTLレベルに増幅された点火信号がCDIへ入力され、CDIから出力された電圧が点火コイルによってさらに昇圧され、点火プラグで点火するシステムとなっている。それぞれの回路図を図5および図6に示す。

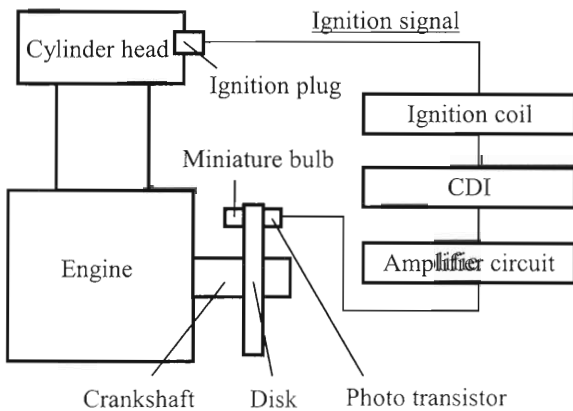


図4. 点火装置類の概略.

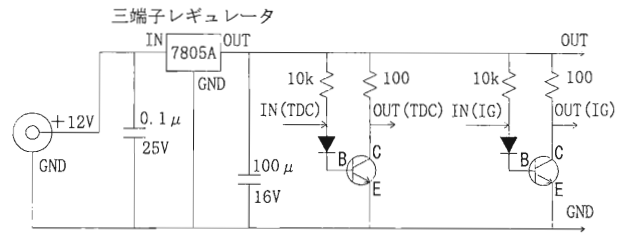


図5. 増幅回路図.

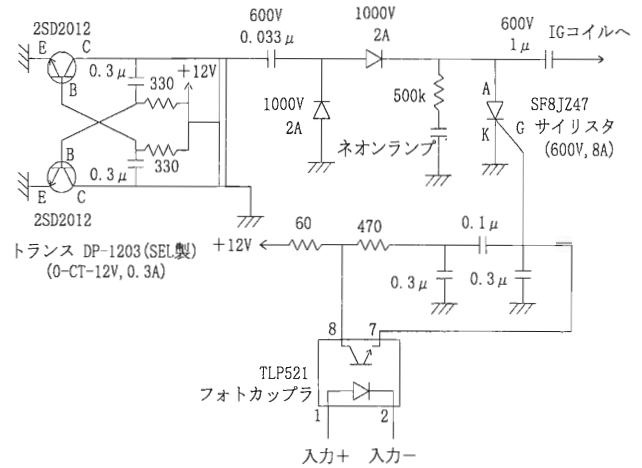


図6. CDI回路図.

図5の増幅回路はトランジスタ回路によってフォトトランジスタからの信号を増幅するものを作成した。また点火信号だけでなく、燃焼圧力の計測開始時期である上死点(以下、TDC)信号も計測しているため増幅回路には2組のトランジスタ回路が組み込まれている。

図6のCDIの原理について簡単に説明する。CDIの原理は昇圧回路であるトランスによって350V程度の電圧をつくり、これを一旦コンデンサ(図中600V、1μ)に充電する。その後、増幅回路からフォトカップラ(図中TLP521)の1に点火信号が入力され、7からサイリスタ(図中SF8JZ47)へ信号が入力される。サイリスタに信号が入力されると、コンデンサに溜まった電気が一気に点火コイルへと流れる。フォトカップラはCDIの電圧から増幅回路を保護するために設置してある。点火コイルは原付用のものを使用し、点火は燃焼室の中心とした。

2.4 冷却水路および潤滑油路

図7に設置したエンジン冷却水路の概略図を示す。図中のTは温度計である。冷却水の循環はポンプを用いて行い、冷却水はエンジンと熱交換器に流れる。熱交換器は冷却水により潤滑油を加熱するために設置してある。水温の変動が小さくなるように冷却水タンクの容量は約40ℓとしている。水温は2個のヒータを温度調節器でON-OFF制御することにより調節される。燃焼運転時にエンジンで冷却水が過熱される場合は、タンクに常温の水道水を入れることによって冷却水の温度を下げる。エンジンへの冷却水流量は実験条件の発熱量より算出し、十分冷却できる18ℓ/minとした。

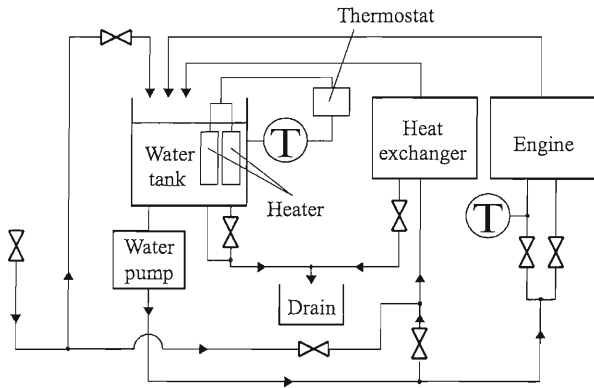


図7. 冷却水路.

潤滑油の潤滑方法はドライサンプ方式である。図8に設置した潤滑油路を示す。図中のTは温度計、Pは圧力計である。潤滑油の循環はポンプにて行い、潤滑油はエンジンのシリンダライナ、カムシャフト等を潤滑する。油量は経路中の圧力計で確認しながら、フィルタ後に設置してあるバルブにて調節する。潤滑油の温度調節は熱交換器を介し冷却水にて行い、油温はエンジン流入直前に取り付けられた温度計にて確認する。

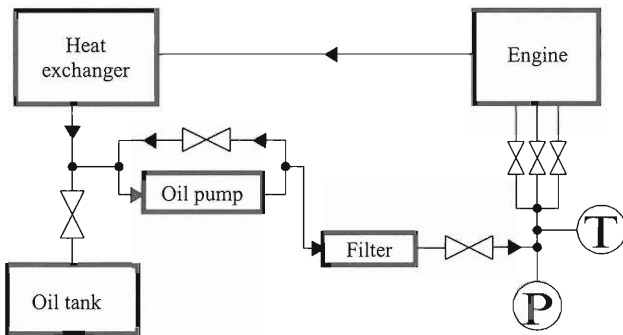


図8. 潤滑油経路.

2.5 燃焼圧力計測システム

図9に燃焼圧力計測システムを示す。圧力計測には歪みゲージ式圧力計とアンプを用い、データの収録にはデータロガーを用いた。燃焼圧力計測開始時期は下死点(以下、BDC)とし、データロガーのサンプリング間隔は20 μsとし

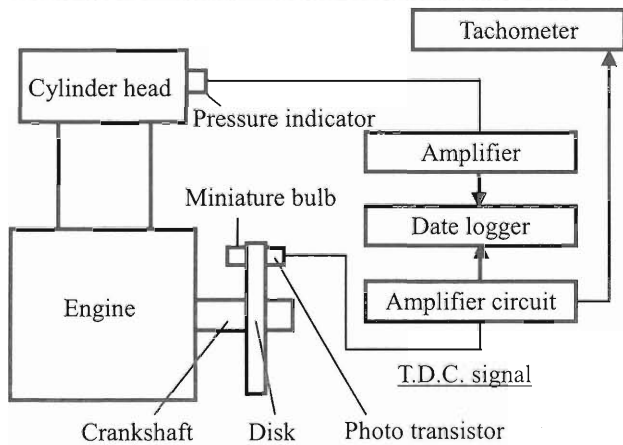


図9. 計測システム.

た。回転数の表示には TDC 信号を用いた。TDC 信号は点火信号と同じように計測し、点火時期は点火信号の時間差としてオシロスコープにて確認した。

3. エンジンでの実験

3.1 実験方法

本研究では組成比ごとの模擬バイオガスの燃焼特性の調査およびプロパンとの燃焼圧力の比較が目的である。表2に本研究での実験条件を示す。

表2. 実験条件.

Engine speed	1000 rpm
Charging efficiency	65 %
Water temperature	80 °C
Oil temperature	70 °C
Equivalence ratio	1.0
Ignition timing	BTDC5 deg.
Ratio of CH ₄ in biogas	70 %, 60 %, 55 %

エンジン回転数は 1000 rpm、充填効率は 65 %、冷却水温度は 80 °C、潤滑油温度は 70 °C、当量比は 1.0、点火時期は BTDC5 deg.とした。また、模擬バイオガスの組成比は一般的に生成されるバイオガスの組成比がメタン:二酸化炭素=6:4であることから、メタン濃度を 70 %、60 %、55 %の3条件とした。各組成比の模擬バイオガスとプロパンの燃焼圧力計測は着火運転から約 10 秒後に開始した。計測した燃焼圧力より図示平均有効圧力、図示馬力、図示熱効率、燃料消費率を算出した。各結果の算出方法⁶⁾を以下に示す。

燃焼室内圧力 P とクランク角度 θ における燃焼室内の容積より P - V 線図を描くと、 P - V 線図で囲まれる面積が図示仕事 W となる。エンジンの行程容積を V m³ とすると図示平均有効圧力 P_{mi} は

$$P_{mi} = \frac{W}{V} \quad [\text{Pa}] \quad (1)$$

となる。エンジン回転数を N rpm とすると図示馬力 L_i は

$$L_i = \frac{P_{mi} \times V \times N}{120} \quad [\text{W}] \quad (2)$$

となる。組成比、当量比から求めた燃料の流量を G_f kg/s、模擬バイオガスとプロパンの低位発熱量をそれぞれ H_b J/kg、 H_p J/kg とすると図示熱効率 η_b と η_p はそれぞれ

$$\eta_b = \frac{L_i}{G_f \times H_m} \quad (3)$$

$$\eta_p = \frac{L_i}{G_f \times H_m} \quad (4)$$

となる。燃料の流量と図示馬力より算出した燃料消費率 b_e は

$$b_e = \frac{G_f}{L_f} \quad [\text{kg/J}] \quad (5)$$

となる。燃料消費率は本来ならば正味馬力で計算しなければならないが、負荷が計測できないため図示馬力より算出した。

3.2 実験結果および考察

本エンジンにおける模擬バイオガスおよびプロパンの燃焼圧力は計測できた。しかし、着火運転中に排気バルブが焼き付いたため、実際の着火運転時間は約 2 分間であった。その原因は排気バルブとバルブホルダ間の潤滑不足による焼き付きであると考えられる。そのため、今後の課題として排気バルブに潤滑油路を設置する等により焼き付きを防止し、連続着火運転を可能にする必要がある。今回は燃焼圧力が安定する前に圧力を計測しているため、100 サイクルの燃焼圧力から 1 サイクルの燃焼圧力を選定し、結果に用いている。

図 10 にメタン濃度 70 %、60 %、55 % の模擬バイオガスとプロパンの燃焼圧力の計測結果を示す。この図は横軸がクランク角度、縦軸が燃焼圧力の $P-\theta$ 線図である。 $P-\theta$ 線図より模擬バイオガスの各組成とプロパンの燃焼による圧力のピーク値が確認できる。また TDC 付近で圧力が上昇しているが、これはエンジンの圧縮行程による圧力上昇である。点火から燃焼圧力のピーク値までの時間を確認すると、プロパンが最も短く約 6.00ms となっている。次に短いものは模擬バイオガスのメタン濃度 70 % で約 8.67ms であり、その次はメタン濃度 60 % で約 13.00ms となっている。点火から燃焼による圧力ピーク値までの時間が最も長いものはメタン濃度 55 % で約 54.17ms となっている。模擬バイオガスとプロパンを比較すると点火から圧力ピークまでの時間はプロパンが最も短い。模擬バイオガ

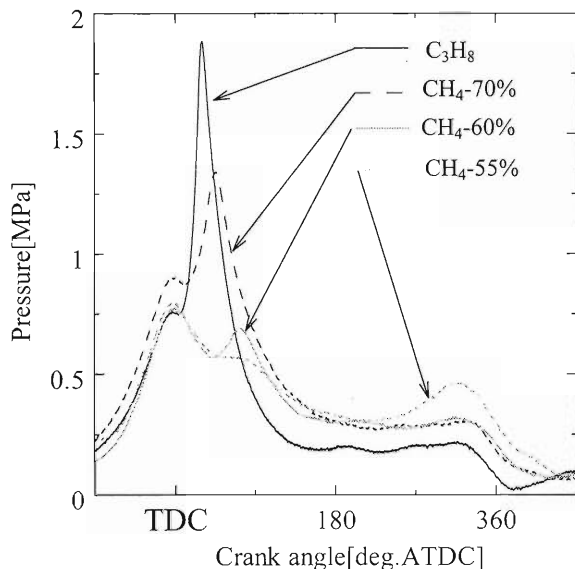


図 10. $P-\theta$ 線図.

スのメタン濃度毎に比較すると、メタン濃度が高いほど点火から燃焼による圧力ピークまでの時間が短くなっていることが確認できる。以上より、模擬バイオガスはプロパンと比較して燃焼速度が遅く、組成比が燃焼速度に影響していることがわかり、模擬バイオガスのメタン濃度が高い条件ほど、燃焼速度が速いといえる。燃焼圧力のピーク値に着目するとプロパンが約 1.89 MPa、模擬バイオガスのメタン濃度 70 % が 1.34 MPa、メタン濃度 60 % が 0.69 MPa、メタン濃度 55 % が 0.56 MPa となっている。このことから点火から圧力ピークまでの時間が短いほど燃焼圧力のピーク値が高くなっていることがわかる。

表 3 に各組成におけるバイオガスおよびプロパンの図示仕事、図示平均有効圧力、図示熱効率、図示燃料消費率、各ガスの発熱量を示す。また図 11 にメタン濃度 70 %、60 %、55 % およびプロパンの $P-V$ 線図を示す。

表 3. 図示仕事等の算出結果.

燃料	バイオガス			プロパン	駆動運転
	メタン濃度 [%]				
	70	60	55		
燃料流量 [g/s]	0.166	0.162	0.16	0.202	—
図示仕事 [J]	87.8	24.3	-55.8	99.4	-103.8
図示平均有効圧力 [MPa]	0.176	0.049	-0.112	0.199	-0.208
図示熱効率 [%]	8.84	2.50	-5.82	8.84	—
図示燃料消費率 [kg/MJ]	0.226	0.801	-0.344	0.244	—
各ガスの発熱量 [kJ/s]	8.28	8.10	7.99	9.42	—

表 3 より各組成比における模擬バイオガスとプロパンの図示仕事はプロパンが 99.4 J、模擬バイオガスのメタン濃度 70 % が 87.8 J、メタン濃度 60 % が 24.3 J、メタン濃度 55 % が -55.8 J、駆動運転時が -103.8 J となった。

駆動運転時の図示仕事との比較により、本エンジンにおいても一般的であるメタン濃度 60 % およびメタン濃度 70 %、メタン濃度 55 % のバイオガスが燃焼していると考えられる。模擬バイオガスのメタン濃度 70 % とメタン濃度 60 % では図示仕事が正の値であるのに対し、メタン濃度 55 % は負の値となっている。これは燃焼により外部に行う仕事よりも外部から受ける仕事が多いことを示す。このことによりエンジンにおいても燃焼速度が図示仕事に影響を及ぼすと考えられる。プロパンとメタン濃度 70 % の模擬バイオガスを比較した際、図示仕事に差が見られるが、図示熱効率については同じ値の 8.84 % となった。点火時期を同じ BTDC 5° とした場合の熱効率は同じであることがわかる。

図 11 の $P-V$ 線図より、全ての条件において上死点から遅れて燃焼圧力のピークを迎えおり、点火時期が遅かったことがわかった。よって、条件により最適な点火時期は異なってくるため、図示仕事を比較する場合は組成や等量比毎に最適点火時期を調査する必要がある。

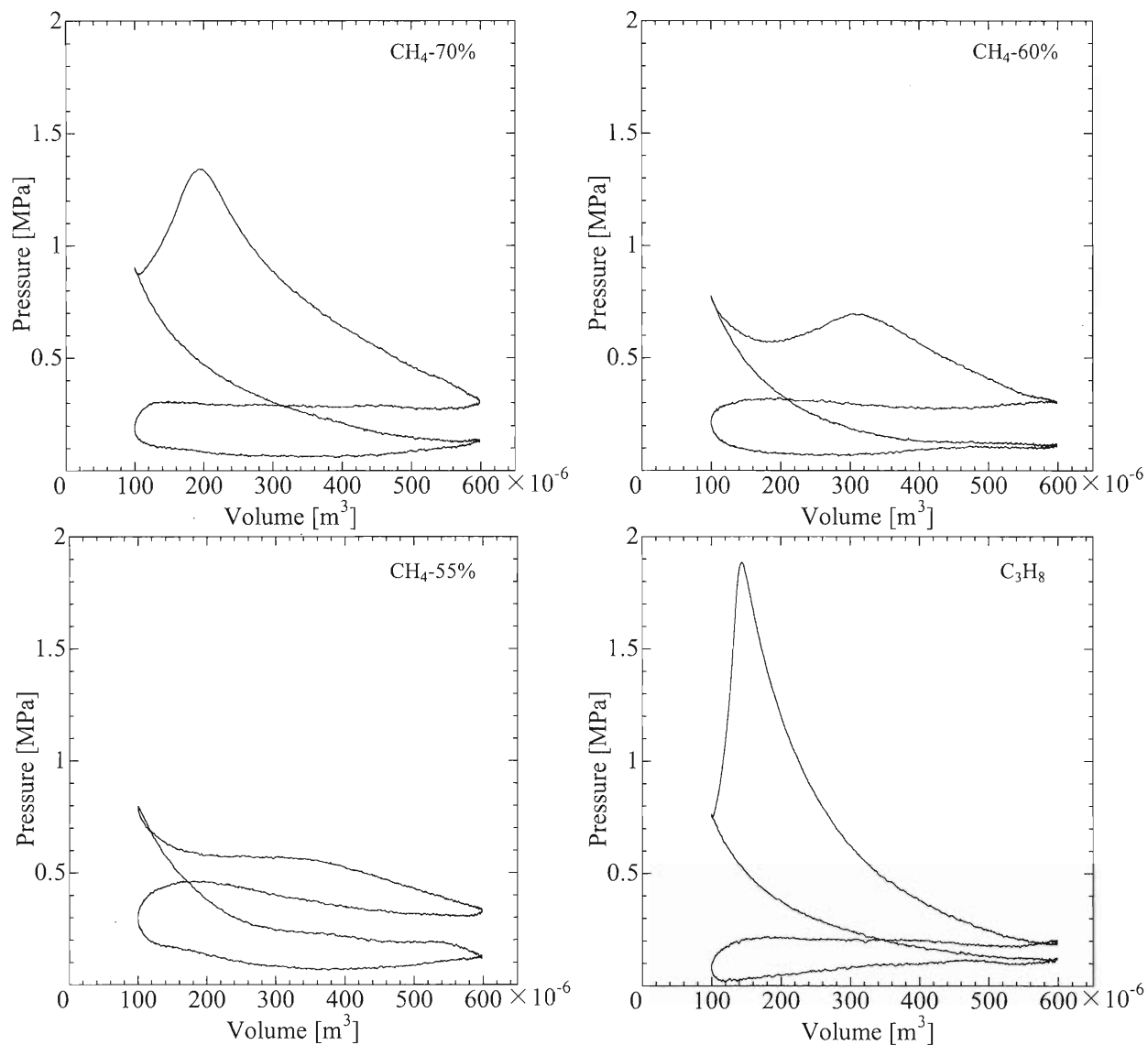


図 11. 各条件における P - V 線図.

4. 結論

エンジンを用い模擬バイオガスとプロパンの燃焼実験を行い、燃焼圧力を計測することにより以下の結論を得た。

- (1) バイオガス燃料の燃焼特性を調査するエンジンの計測システムを構築した。
- (2) 構築したエンジン計測システムにより、プロパンおよび模擬バイオガスを燃焼させ、燃焼圧力を計測することができた。
- (3) バイオガスのメタン濃度が減少するにつれて燃焼期間が長くなることが確認できた。しかし、各条件での熱効率を議論するためには、それぞれの条件について MBT を調べた上で、比較する必要がある。

参考文献

- 1) Heinz Schulz and Barbara Eder Heinz Schulz and Barbara Eder 共著, 浮田良則監訳: バイオガス応用技術, オーム社, pp.1-3, 41-43, 2002.
- 2) 小田他 4 名: 模擬バイオガスを用いたガスエンジンコージェネレーションの研究, 宮崎大学工学部紀要, 第 36 号, pp.115-120, 2007.
- 3) 山崎他 3 名: バイオマスガス対応小型ガスエンジンの開発, 日本機械学会論文集(B 編), 72 巻, 729 号, pp.102-108, 2007.
- 4) 根井 幹仁: バイオガスの基礎燃焼特性に関する実験的研究, 平成 19 年度宮崎大学大学院工学研究科修士論文, 2007.
- 5) 陳他 5 名: バイオガス燃料組成がエンジン性能に及ぼす影響, 日本エネルギー学会大会講演要旨集, pp.272-273, 2008.
- 6) 田坂 英紀: 機械工学入門講座内燃機関, 森北出版株式会社, pp.37-43, 72-76, 2005.