

# 火花点火機関によるバイオガス燃料の燃焼特性の検討 （エンジン実験装置改良と燃焼実験）

服部 拓也<sup>a)</sup>・長瀬 慶紀<sup>b)</sup>・友松 重樹<sup>c)</sup>

## Study on Combustion Characteristics of Biogas Fuel using S.I. Engine (Improvement of Engine experimental device and combustion experiment)

Takuya HATTORI, Yoshinori NAGASE, Shigeki TOMOMATSU

### Abstract

The biogas is produced by excrement of the animal or the food waste. Because the combustion is carbon neutral theoretically, the biogas is attracted attention as an alternative fuel. However, supply of the biogas of the stable composition is difficult because a component and the generation condition in raw materials influence composition of generated gas. In the conventional research, the artificial biogas which mixed methane and carbon dioxide was burned in the spark ignition engine, and the burning characteristics of the gas were compared with those of propane. However, enough number of combustion experiments were not carried out by the malfunction of the experimental device. In this research, experimental device for the test engine is improved and burning characteristics are investigated from the in-cylinder gas pressure when burning the biogas which methane concentration was changed from 50 to 70% in the MBT conditions of the engine. It is found that the indicated thermal efficiency is improved by driving the engine in MBT. To control the ignition timing is effective for thermal efficiency improvement in the combustion of the biogas. The concentration of the carbon dioxide in the fuel influences combustion speed. In addition, it is confirmed that the methane concentrations of 45% is able to burn.

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

### 1. はじめに

近年、温暖化や大気汚染をはじめとした環境問題や石油等のエネルギー資源の枯渇問題がマスメディア等で大きくとりあげられており、我々の生活の中で無視できないレベルとなっている。特に、石油・天然ガスなどの化石燃料に代わるエネルギーの確保は急務であり、太陽光・風力・水力といったクリーンエネルギーが注目されている。バイオガスは家畜の糞尿や生ごみを原料として生成され、その燃焼は理論的にカーボンニュートラルであることから、代替燃料として注目されている。

しかし、バイオガスは原料である家畜糞尿や生ごみ等の構成物質や生成条件が発生するガスの組成に影響するため、安定した組成のバイオガスの供給が困難である。このことから様々な組成のバイオガスに合わせて運転条件を決定する必要がある。これまでの研究において、メタンおよび二酸化炭素を混合した模擬バイオガスをエンジンで燃焼させ、プロパンと比較した場合の、火花点火機関における燃焼特性について調査が行われたが、排気バルブが焼付くなどの、実験装置の不具合により十分な燃焼実験が

行われなかった。そこで本研究では、エンジン実験装置の改良を行い、メタン濃度を 70～50%まで、10%ごとに变化させた模擬バイオガスと、プロパンの最適点火時期（Minimum advance for Best Torque、以下 MBT）の調査を行い、MBT での燃焼ガス圧力計測の結果から、プロパンと比較した模擬バイオガスの燃焼特性の調査を行うことを目的とする。

### 2. 実験装置改良

#### 2.1 吸気系装置

昨年度の研究では、吸入混合気の温度管理が行われておらず、実験の再現性に問題があった。また、排気バルブが十分潤滑されておらず、燃焼実験中に焼付きを起こしてしまい、十分な燃焼ガス圧力データが得られなかった。そこで本研究では、充填効率をそろえ、実験の再現性を高めるために吸気系の改良を行い、排気バルブの焼付きを防止するための潤滑油供給経路の設置を行うことで、安定した燃焼実験が行えるように実験装置の改良を行った。

昨年度の研究で製作されたミキサは本体が塩ビ製となっており、本体を加熱し吸入混合気を加熱するためのヒータの設置が不可能であり、充填効率をそろえるための吸入温度の管理が行えていなかった。そこで本年度は、ミキサ本体をアルミ製に変更し、周囲にラバーヒータを巻き

a) 機械システム工学専攻大学院生

b) 機械システム工学科准教授

c) 機械システム工学科助教

付けてミキサ本体を加熱し、吸入混合気の温度管理が行えるように設計を行った。また、充填効率向上を目標として、全体的に管路を太くし管路の曲りを少なくなるように配管の見直しを行った。図1に本年度設置した吸気系の概略図を、図2にミキサの構造を示す。図1①の部分に負圧に耐え得るホースを用いることによりミキサの取り外しを容易に行うことができる。また、図1②の部分に熱電対を挿入し吸気温度の計測が行えるようにした。熱電対はミキサに巻かれたラバーヒータを制御する温調器へと繋がっており、吸気温度の制御を可能にしている。

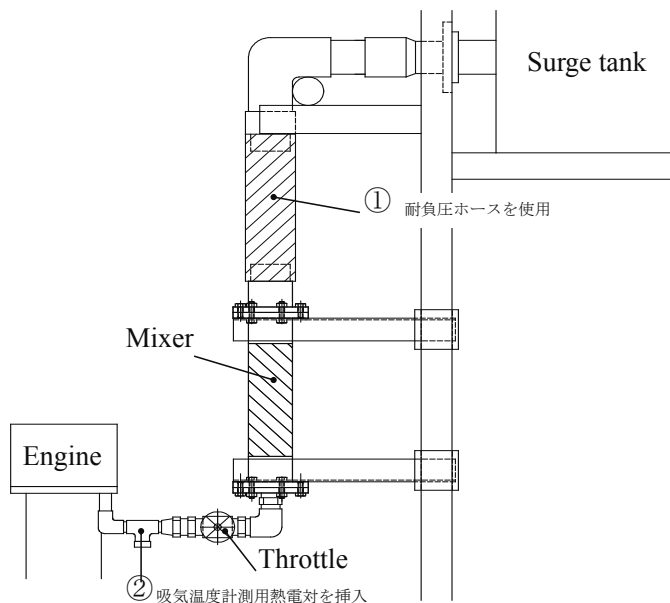


Fig.1 Schematic drawings of intake system

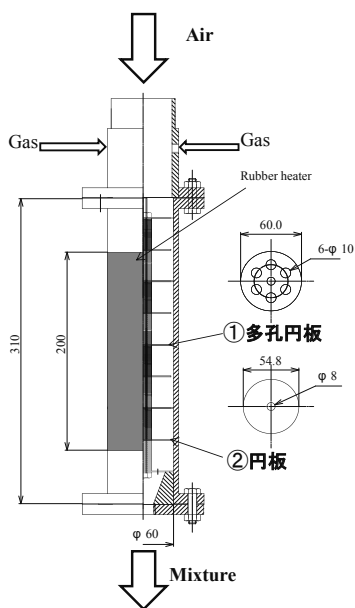


Fig.2 Mixer

## 2.2 排気バルブ潤滑油経路

前年度の研究において、実験中潤滑不足によって排気バルブが焼付き、十分な燃焼実験が行われなかった。そこで

焼付きを防止し連続運転を可能にするため、排気バルブに潤滑油を供給する為の潤滑経路の設計を行い、設置を行った。潤滑油供給経路の全体図を図3に、排気バルブの潤滑経路詳細を図4に示す。図3の点線で示す部分が、本年度設置した排気バルブ潤滑経路である。潤滑油はオイルタンクからポンプを通り、銅管を経由して供給される。銅管から供給された潤滑油は①バルブホルダナット、②バルブホルダの順で通過し、排気バルブを潤滑する。バルブホルダに潤滑経路を接続するため、M5のボルトの中心に貫通穴を空け、銅管とロウ付けにより接続した部品を新たに製作した。

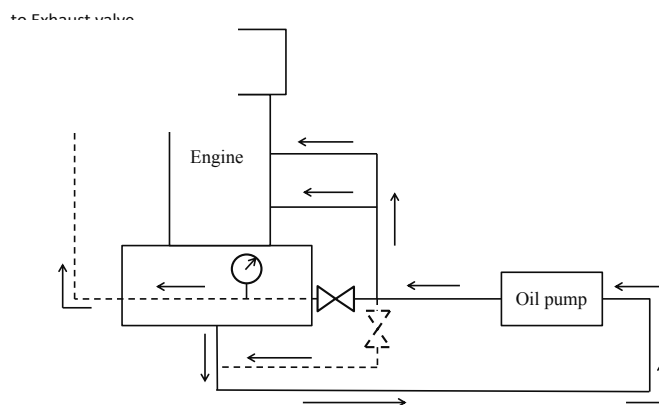


Fig.3 Lubricant supply route

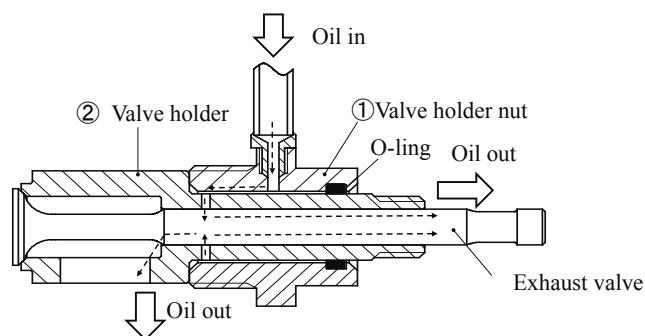


Fig.4 Lubrication routes of exhaust valve

## 3. 供試機関および実験装置

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。この機関は、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、さらに計測用シリンダヘッドを取り付けてある。表1に供試機関主要諸元、図5にヘッドの形状を示す。供試機関は、排気量 498.8cc、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

Table 1 Specification of engine

Engine type	4 Cycle single cylinder
Combustion chamber	Pancake type
Bore × stroke [mm]	84.0×90.0
Displacement [cc]	498.8
Connecting rod length [mm]	166.0
Compression ratio	6.0

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。シリンダヘッド内部には、冷却水を通す空間が設けてあり、冷却水は外部のポンプを使い循環させ、電気ヒータとサーモスタットを用いて 80℃を保つようにしている。シリンダヘッドに点火プラグとそのアース、歪ゲージ式圧力計を取り付ける。

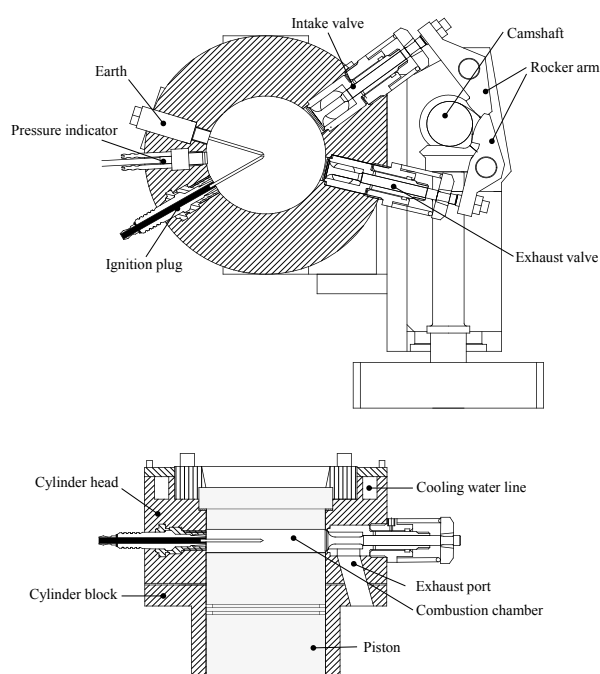


Fig.5 Cylinder head

Table 2 Experiment conditions

Engine speed [rpm]	1000
Charging efficiency [%]	50
Water temperature [°C]	80
Oil temperature [°C]	70
Inhalation mixture temperature [°C]	65
Equivalence ratio	1.0
Density of CH <sub>4</sub> in biogas [%]	70,60,50
Sampling interval [μs]	20

Table 3 Valve timing

Valve		Timing [degATDC]	Open interval [deg.]
Intake	Open	25	210
	Close	235	
Exhaust	Open	208	246
	Close	38	

データを取り込むことで実験条件の統一を行えるようにした。また、バルブのオーバーラップする区間においては大気圧になっているものとし、圧力の補正を行った。表 3 にバルブ開閉時期、図 6 に弁時期線図を示す。

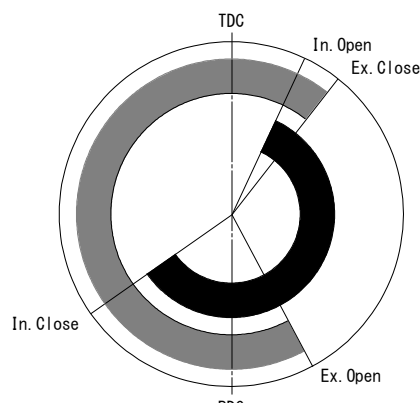


Fig.6 Valve diagram

## 4. エンジンでの実験

### 4.1 実験方法

本実験では、メタン濃度を 50 から 70%まで、10%ごとに変化させた模擬バイオガスおよびプロパンについて MBT 検定を行い、各燃料における MBT を決定した上で、MBT での燃焼圧力を測定する。表 2 に実験条件を示す。着火運転条件として、空燃比は理論空燃比を基準とし、充填効率は、吸入空気量調節用スロットルバルブを用いて 50%に設定する。実験は、エンジンを始動させデータを収録する前に、十分に暖機運転を行い、エンジンオイル温度を 70℃、冷却水温度を 80℃、吸入空気温度を 65℃に設定し、機関が安定して燃焼している状態を確認し、燃焼圧力

計測した燃焼圧力から指圧線図を作成し、図示仕事を求め、図示仕事の最大となる時の点火時期を MBT と判断した。計測は 100 サイクル分を 1 回とし連続して 5 回行い、図示仕事の平均値を求め比較を行った。先に MBT 検定を行い、本研究で使用する各種燃料の MBT を決定した上で、MBT での燃焼実験を行った。

### 4.2 実験結果および考察

本研究では燃焼ガス圧力計測の結果から以下に示す式を用いて図示仕事、図示平均有効圧力、図示熱効率を算出し、プロパンと比較した模擬バイオガスの燃焼特性につい

て調査を行った。

#### (1) 図示仕事

計測した燃焼圧力から指圧線図を作成し、指圧線図より求められる仕事量を図示仕事とした。図示仕事を  $W_i$  [J]、計測した燃焼圧力を  $p$  [Pa]、供試機関の行程容積を  $v$  [m<sup>3</sup>] とすると。図示仕事は

$$W_i = \sum p dv \quad [J] \quad (1)$$

となる。

各点火時期毎に算出した図示仕事が最大となる時の点火時期を MBT と定めた。

#### (2) 図示平均有効圧力

式(1)により図示仕事が求まる。機関の行程容積より、図示平均有効圧力を  $Pm_i$  [Pa]と置くと、図示平均有効圧力は

$$Pm_i = \frac{W_i}{v} \quad [Pa] \quad (2)$$

となる。

#### (4) 図示熱効率

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、図示熱効率は、

$$\eta_b = \frac{Li}{Gf \times Hu} \quad (3)$$

$$\eta_p = \frac{Li}{Gf \times Hp} \quad (4)$$

となる。

図 7、図 8 に、各種燃料の MBT 検定における燃焼圧力の計測結果を点火時期毎に、横軸に体積、縦軸に燃焼圧力をとった p-v 線図、横軸にクランク角度、縦軸に燃焼圧力をとった p-θ 線図に示したものを示す。また、表 4 に検定結果のまとめを示す。図示仕事は、台形の面積の計算式を応用して、p-v 線図より、微小体積  $dv = v_{x+1} - v_x$  にその時の平均圧力  $(P_{x+1} + P_x)/2$  を掛け、その値を足し合わせることで算出した。

Table 4 Result of experiment for the MBT

	MBT [deg.BTDC]	Indicated work [J]	Indicated mean effective pressure [MPa]
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	8	148.1	0.2991
CH <sub>4</sub> -70%	13	126.8	0.2926
CH <sub>4</sub> -60%	22	117.7	0.2747
CH <sub>4</sub> -50%	27	95.5	0.2466

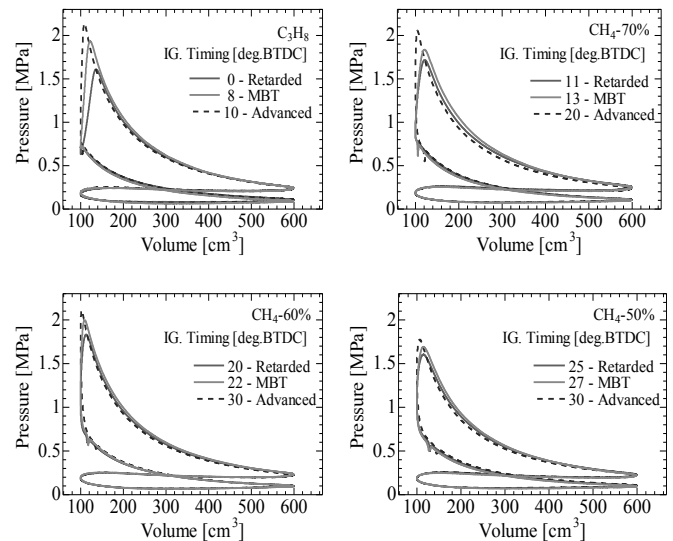


Fig.7 p-v diagram

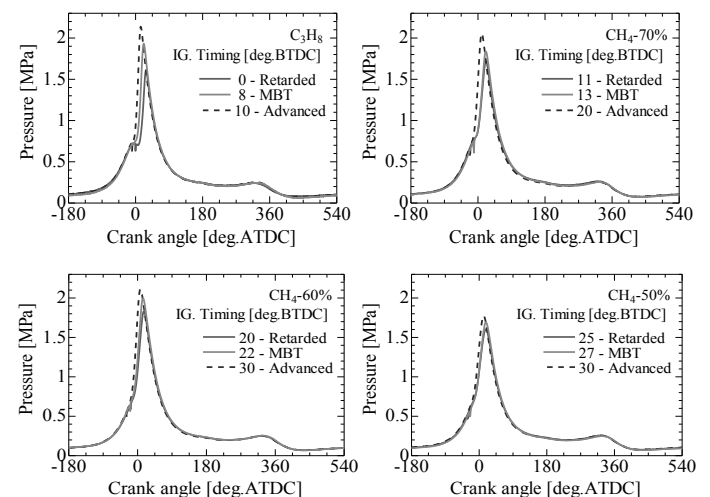


Fig.8 p-θ diagram

検定を行った結果、各種燃料の MBT は、メタン濃度 70、60、50%の各組成の模擬バイオガスは BTDC 13°、BTDC 22°、BTDC 27°、プロパンで BTDC 8°であった。検定の結果より、プロパンが最も点火時期の進角が小さく、模擬バイオガスに比べ燃焼速度が速いことが分かる。

模擬バイオガスでは、メタン濃度が低下するほど点火時期の進角が大きくなることから、メタン濃度が低下するほど燃焼速度が減少し、模擬バイオガス内メタン濃度が燃焼速度に影響していることが分かる。

また、MBT での各種燃料の図示仕事が、プロパンで 148.1 J、メタン濃度 70、60、50%の模擬バイオガスでは、126.8 J、117.7 J、95.5 J であるのに対し、今回の実験条件による各種燃料の発熱量は、プロパンで 8.87 J/s、メタン濃度 70、60、50%の模擬バイオガスでは、6.94 J/s、6.71 J/s、6.42 J/s であり、発熱量の差が図示仕事に影響を及ぼしていると考えられる。

Table 5 Result of combustion experiment

	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	Density of CH <sub>4</sub> in biogas [%]			
		70	60	50	45
Fuel flow [g/s]	0.1916	0.1388	0.1342	0.1283	0.1155
Indicated work [J]	148.1	126.8	117.7	95.5	70.5
Indicated mean effective pressure [MPa]	0.2970	0.2543	0.2359	0.1914	0.1414
Indicated thermal efficiency [%]	13.91	15.23	14.62	12.41	8.310
Calorific value [kJ/s]	8.87	6.94	6.71	6.42	5.78

MBT での燃焼実験を行った結果を表 5 に示す。燃焼実験結果よりメタン濃度 70、60%で燃焼実験を行った結果、図示熱効率がプロパンよりも高くなることが確認でき、MBT で燃焼することが出来ると、熱効率を向上することが出来ることが分かった。

また、今回 MBT を求めてはいないが、メタン濃度 45% の模擬バイオガスについても燃焼実験を行った。実験結果を図 9 に示す。実験を行ったところ、失火が多いものの、火花点火機関における連続した燃焼を行い、燃焼圧力を計測することができた。他の研究においてメタン濃度 52% 程度まで燃焼が可能であることは確認されているが、今回の実験ではよりメタン濃度が希薄な条件下でも燃焼が可能であることが確認できた。今後の研究において、メタン濃度が希薄な条件下でも安定した燃焼が可能なシステムを構築することが出来れば、バイオガスの使用範囲を広げることが出来るのではないかと考えている。

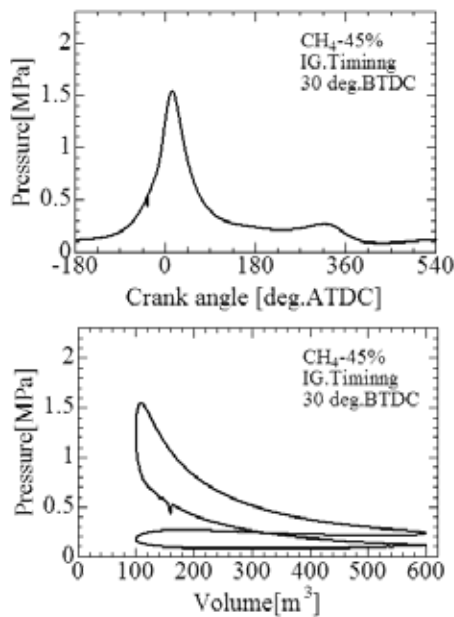
Fig.9 Result of CH<sub>4</sub>-45% Biogas

Table 6 Comparison of Heat release rates

Fuel	Ignition Timing [deg. ATDC]	Heat release timing [deg. ATDC]		Heat release period [deg.]	Max. Heat release rate [J/deg.]
		Start	End		
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	-8	-5	24	29	57.5
CH <sub>4</sub> -70%	-13	-7	26	33	36.0
CH <sub>4</sub> -60%	-22	-14	20	34	35.5
CH <sub>4</sub> -50%	-27	-16	20	36	27.7
CH <sub>4</sub> -45%	-30	-18	25	43	19.1

次に、燃焼速度に観点を置き、熱発生率を求め比較を行ったところ、表 6、図 10 の様な結果が得られた。

今回は燃焼期間について比較をおこなう為、計算を簡略化し、以下のような式を用いてクランク角度 1°ごとに見かけの熱発生率を求め比較を行った。

#### (5) 熱発生率

シリンダ内ガスの状態変化を可逆的とすると、熱力学の第一法則から熱量  $Q$  と内部エネルギー  $U$  は以下の関係式が成り立つ。

$$dQ = dU + pdv \quad (5)$$

従って、単位クランク角あたりのシリンダ内ガスに与えられる熱量は、次式となる。

$$\frac{dQ}{d\theta} = \frac{dU}{d\theta} + p \frac{dv}{d\theta} \quad (6)$$

また、定容比熱  $C_v$  は比熱比  $\kappa$  とガス定数  $R$  から

$$C_v = \frac{R}{\kappa - 1} \quad (7)$$

ここで、シリンダ内ガスを完全ガスとみなすと

$$dU = M \cdot C_v \cdot dT \quad (8)$$

以上の式をまとめて以下の式を得る。

$$\frac{dQ}{d\theta} = \frac{MR}{\kappa - 1} \frac{dT}{d\theta} + p \frac{dv}{d\theta} \quad (9)$$

また完全ガスの状態方程式は  $pv = MRT$  であるが、 $p$ 、 $v$ 、 $T$  が変数であるから、その全ての微分形をとって、

$$vdp + pdv = MRdT \quad (10)$$

以上の式を整理すると次式となる。

$$\frac{dQ}{d\theta} = \frac{1}{\kappa-1} \left( v \frac{dp}{d\theta} + \kappa \cdot p \frac{dv}{d\theta} \right) \quad (11)$$

以上の式を用いて熱発生率を算出する。

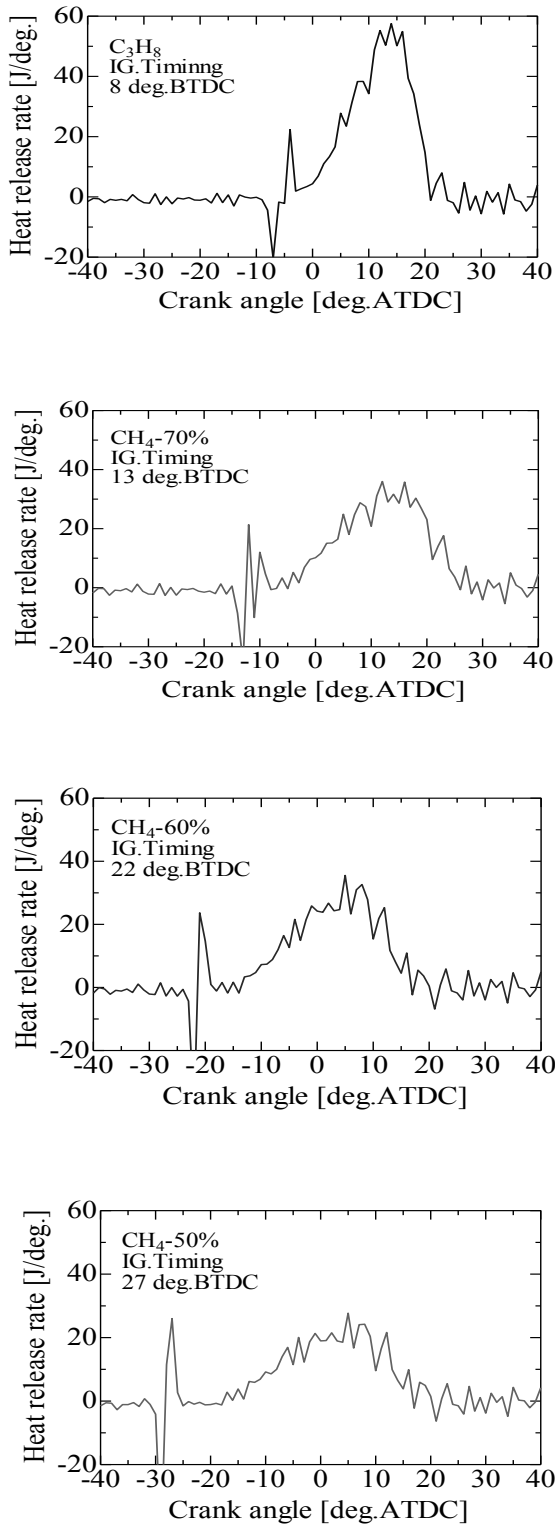


Fig.10 Heat release rate

各燃料の点火時期から熱発生時期までの時間は、プロパンで3°、模擬バイオガスではメタン濃度の濃い順に、6°、8°、11°、12°、であった。点火してから熱が発生するまでの時間に差が生じていることから、燃料内CO<sub>2</sub>濃度が多くなるほど、着火遅れが長くなり、燃焼期間も長くなっていることが確認でき、不活性ガスであるCO<sub>2</sub>の割合が燃焼速度に影響することが確認できた。また、CO<sub>2</sub>濃度割合によって燃焼速度に違いが出ることから、バイオガスの燃焼に関しても点火時期の制御が最適な燃焼を行うために有効であることが確認できた。

## 5. 結論

火花点火機関を用い模擬バイオガスとプロパンの燃焼実験を行い、MBTでの燃焼圧力を計測することにより以下の結論を得た。

1. 排気バルブに潤滑経路を設けたことにより、焼付きを防止し、安定した燃焼実験を行うことが出来るようになった。これにより、プロパンおよび模擬バイオガスについて、点火時期を変更して燃焼圧力計測を行うことが出来た。
2. MBT検定を行い様々な点火時期での燃焼実験を行うことにより、点火時期の変化が燃焼圧力に影響を与えることが確認できた。また、MBTで燃焼実験が行えたことで、図示熱効率の向上を図ることができ、点火時期の制御がバイオガスの燃焼においても熱効率向上に有効であることが確認できた。
3. 見かけの熱発生率を求めることにより、燃料内のCO<sub>2</sub>の割合が燃焼速度に影響することを確認できた。
4. メタン濃度45%についても燃焼圧力計測を行うことが出来、火花点火機関で一般的に運転可能とされているメタン濃度よりも低い値での燃焼運転が可能であることが確認できた。

## 参考文献

- 1) 森口剛士, 長瀬慶紀, 友松重樹: 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, 日本機械学会九州学生会第41回卒業研究発表講演会 pp.339-340, 2010.
- 2) Heinz Schulz and Barbara Eder Heinz Schulz and Barbara Eder 共著, 浮田良則監訳, バイオガス実用技術, オーム社, pp. 1-3, 41-43, 2002