

# 1. 内燃機関の性能測定試験

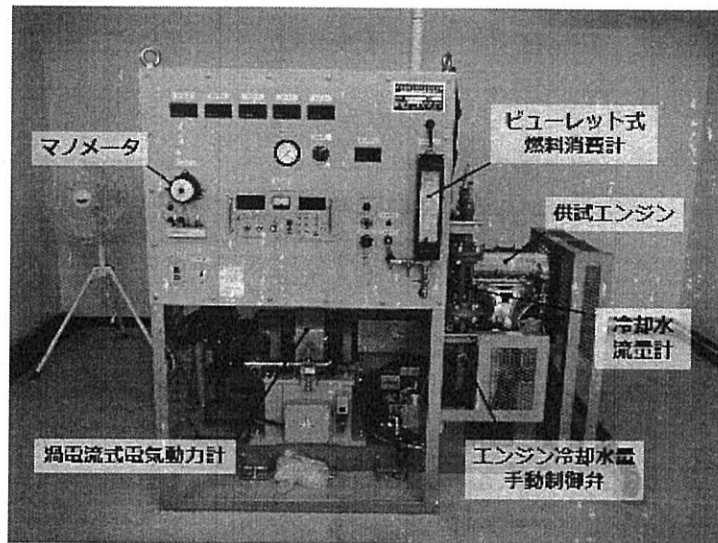
## 1. 目的

代表的な内燃機関であるガソリンエンジンを用いて負荷試験（一定負荷をエンジンに加えて性能を測定する試験方法）を行い，得られた測定データをもとに軸トルク，軸出力，燃料消費率，吸入空気量および各種効率（体積効率，熱効率）等を計算して性能曲線を作成する．それにより，内燃機関の動作原理や性能特性を理解することを目的とする．

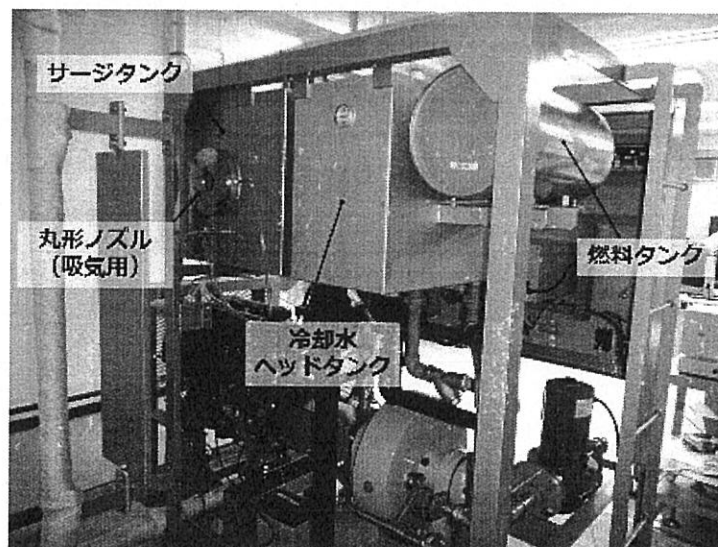
## 2. 実験装置の概要

### (1) 内燃機関性能試験装置

本実験で用いる内燃機関性能試験装置の外観写真（正面および背面）を以下に示す．



(a) 正面



(b) 背面

図1 内燃機関性能試験装置の外観写真

## (2) 供試エンジン

本実験で用いる供試エンジンの諸元は下表の通りである。

表 1 供試エンジンの諸元表

エンジン名	2NZ-FE トヨタ自動車工業(株)
種別	ガソリンエンジン (4 サイクル)
ボア(内径)× ストローク(行程)	75.0 mm×73.5 mm
気筒数	4
排気量	1298 cc
コンロッド (連接棒) 長さ	129.52 mm
最大出力	65 kW (88 PS) / 6000 rpm
最大トルク	121 N m (12.3 kg m) / 4000 rpm
圧縮比	10.5
冷却方式	水冷式

## (3) 渦電流式電気動力計

エンジンに負荷を加える際には渦電流式電気動力計を用いる。動力計のロードセルで荷重を測定することにより、エンジンの軸出力やトルクを計算で求めることができる。

渦電流式電気動力計の概略図を図 2 に示す。渦電流式電気動力計とは、電磁力によるブレーキを利用して、機関の動力を測定する装置である。渦電流ブレーキの構造は、内燃機関の軸端に金属円盤（ローター）が取り付けられており、その外周には磁極（ステータ）が配置されている。電磁石によって生じる磁界の中で金属円盤を回転させると、円盤内に渦電流が発生し、回転方向と逆向きの制動力が円盤に作用する。その制動力によって機関の動力は吸収され、ステータにかかる反トルクがロードセルで検知される。なお、本装置のトルクアームの腕の長さは、 $L=286.5\text{ mm}$  である。

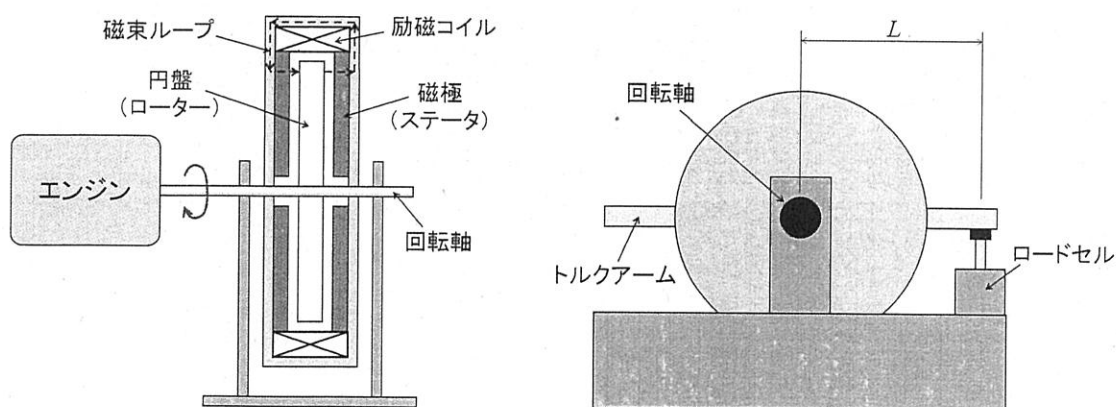


図 2 渦電流式電気動力計の概略図

## (4) 燃料消費計測装置

燃料消費量の計測は、ビューレット式燃料消費計を用いて行う。本装置の燃料系統図を図 3 に示す。計測方法は、C2 を閉じて燃料タンクからの燃料供給を遮断し、燃料消費計に入っている燃料のみがエ

ンジンに送られるようにする。燃料消費計の液面が下がり、計測線を通してから次の任意の計測線を通してからの時間  $t$  [sec] をストップウォッチで計測する。再度、燃料消費量を計測する際は C3 を閉じて液面を上昇させる。ビューレット 3 連球の容量は上から 30, 50, 100 cc である。

### (5) 吸入空気量計測装置

吸入空気量の計測は、サージタンク（一時的に空気を溜めておくタンク）に取り付けた丸形ノズル部で行う。図 4 に吸排気系統の概略図を示す。吸入空気はサージタンクの丸形ノズルを通してエンジンに供給されるようになっており、丸形ノズルを空気が通過する際の静圧差を差圧計で読み、その差圧から吸入空気量を算出する。なお、丸型ノズルの絞り径は  $d=48$  mm, 流量係数は  $\alpha=0.822$  である。

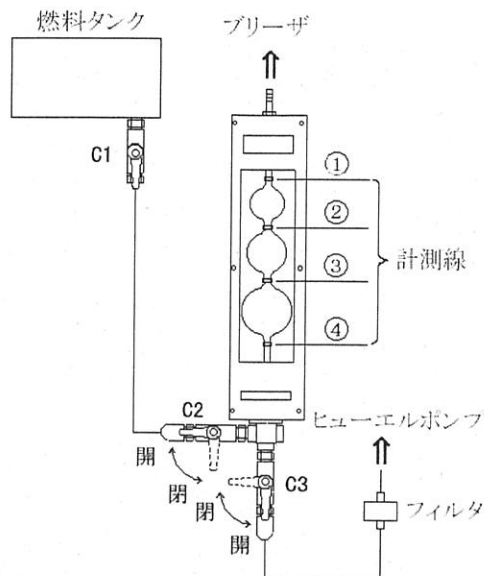


図3 ビューレット式燃料消費計の燃料系統図

## 3. 実験手法

図1に示す実験装置を用いて、エンジンに負荷をかけて各回転数（1500～5000 rpm）で動作させたときの各計器の値を読み取る。今回の実験では、絞り弁開度を50%に設定して負荷をかける「部分負荷試験」を行う。詳細な実験手法は以下の通りである。

### (1) 運転準備

- ①燃料タンクにガソリンを供給し、燃料ラインのコックを全て「開」にする。

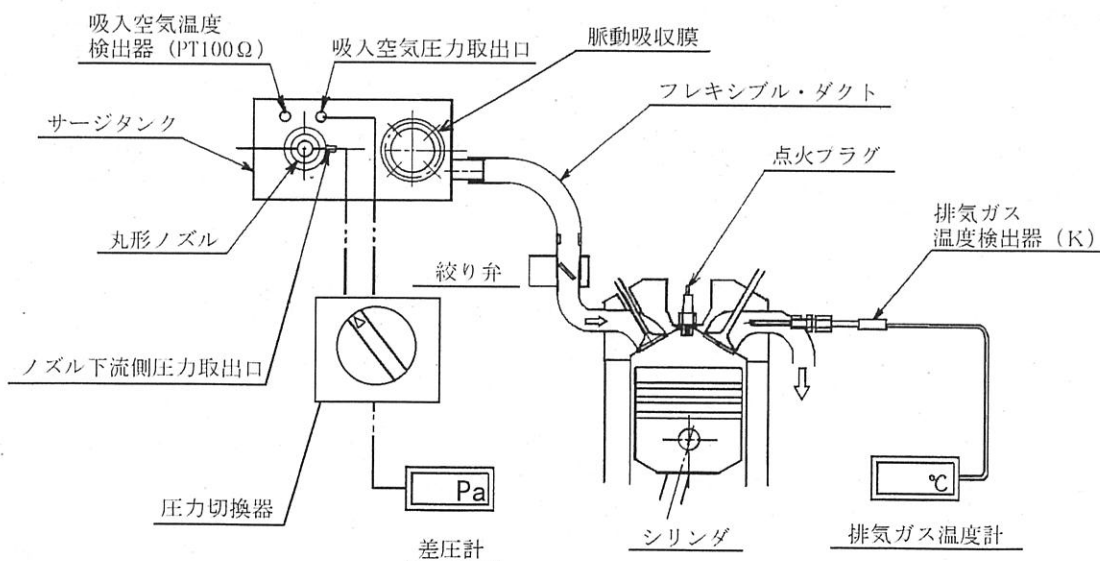


図4 吸排気系統の概略図

- ②冷却水ヘッドタンクへの給水弁を開き、ヘッドタンクに冷却水を給水する。
- ③電源コードをコンセントに接続し、内燃機関性能試験装置の電源を ON にする。
- ④動力計制御装置の電源を入れ、各指示計が表示されるか、電源ランプが点灯しているか確認する。
- ⑤循環ポンプのスイッチを入れ、動力計への冷却水を給水する。さらに、エンジン冷却水入口絞り弁を開き、エンジンへの冷却水を給水する。

## (2) 暖機運転 (試運転)

- ①動力計制御装置の制御モードを「ASR (速度制御)」に選択し、負荷設定ダイヤルを所定の回転数 (2000～3000 rpm 程度) に合わせる。(負荷設定ダイヤル値×10 = 動力計回転速度)
  - ②絞り弁 (スロットル) をいっぱいまで押し込んで、絞り弁開度が 0% に表示されていることを確認する。
  - ③エンジン始動スイッチを回しエンジンを始動させる。エンジンアイドリング時の回転数は 1000 rpm 前後なので、①で設定した回転数がある値以上であれば動力計は無負荷状態になる。
  - ④必要に応じて絞り弁を回し、エンジンの回転数を上昇させる。
  - ⑤エンジンの冷却水出口温度が 80～85℃程度に達するまで、暖機運転を継続する。
- ※本実験で用いる動力計は、負荷設定ダイヤルで設定した回転速度よりも高い回転数で回された時にはじめて制御が有効となり、エンジンの回転数を一定に維持するよう負荷がかかる。

## (3) エンジン性能測定試験

- ①暖機試験終了後、動力計制御装置の負荷設定ダイヤルを 150 (150×10 rpm) に設定する。
- ②絞り弁 (スロットル) を回し、計測する絞り弁開度 (今回の実験は 50%) に合わせる。
- ③動力計の負荷設定ダイヤルを計測回転数になるよう、回転速度計を見ながらゆっくり回す。
- ④エンジン冷却水出口温度が 80～85℃程度になるよう、手動バルブで冷却水流量を調整する。
- ⑤冷却水出口温度が安定し定常状態になったところで、以下 13 項目の計測を行い、測定データを記録用紙に記入する。
- ⑥動力計制御装置の回転数を 1500～5000 rpm まで 500 rpm 刻みで上昇させ、③～⑤の操作を繰り返す。

本実験では以下の 13 項目について計測を行う。

動力計荷重 [N]	回転数 [rpm]	吸入空気温度 [℃]	吸入空気圧力 [Pa]
燃料消費量 [cc]	燃料消費時間 [s]	排気ガス圧力 [kPa]	排気ガス温度 [℃]
冷却水流量 [ℓ/h]	冷却水入口温度 [℃]	冷却水出口温度 [℃]	潤滑油圧力 [MPa]
潤滑油温度 [℃]			

## (4) 停止

- ①絞り弁 (スロットル) をゆっくり回し、アイドリング状態 (開度 0%) にする (1000 rpm 前後)。
- ②動力計制御装置の負荷設定ダイヤルを 200×10 rpm にする。
- ③しばらくアイドリングを続け、冷却水出口温度が 50～60℃に下がるのを待ち、エンジンを止める。
- ④動力計冷却水用循環ポンプを OFF にする。
- ⑤内燃機関性能試験装置の電源スイッチを OFF にする。
- ⑥ヘッドタンク給水バルブを閉じ、装置への給水を止める。
- ⑦燃料ラインのコックを全て閉じる。

#### 4. 計算項目

軸トルク，軸出力，燃料消費率，吸入空気量および各種効率（体積効率，熱効率）等の計算方法について述べる．

##### (1) 軸トルクと軸出力

軸トルク  $T$  [N m] は出力軸の回転力（モーメント）を表し，軸出力  $P$  [kW] はエンジンが単位時間に行う仕事（仕事率）を表す．それぞれ以下の式で求めることができる．

$$T = F \cdot r \quad [\text{N m}] \quad (1)$$

$$P = \frac{F \times 2\pi r \times N_D}{60 \times 1000} \quad [\text{kW}] \quad (2)$$

$T$  : 軸トルク [N m]  
 $F$  : 動力計ローターの周囲部にかかる摩擦力 [N]  
 $r$  : 動力計ローターの半径 [m]  
 $P$  : 軸出力 [kW]  
 $N_D$  : 動力計回転数 [rpm]

##### (2) 修正軸トルクと修正軸出力

エンジンの出力は吸入空気密度に影響を受ける．したがって，測定結果の軸トルクおよび軸出力は標準状態の空気に換算しておくことが望ましい．修正軸トルク  $T_0$  [N m] と修正軸出力  $P_0$  [kW] は次式で求める．

$$T_0 = k_a \cdot T \quad [\text{N m}] \quad (3)$$

$$P_0 = k_a \cdot P \quad [\text{kW}] \quad (4)$$

$$k_a = \left( \frac{p_0}{p} \right)^{1.2} \cdot \left( \frac{\theta + 273}{\theta_0 + 273} \right)^{0.6} \quad [-] \quad (5)$$

$T_0$  : 修正軸トルク [N m]  
 $P_0$  : 修正軸出力 [kW]  
 $k_a$  : 出力修正係数 [-]  
 $N_D$  : 動力計回転数 [rpm]  
 $p_0$  : 標準乾燥大気圧 [kPa] (=101.325 kPa)  
 $p$  : 乾燥大気圧力 [kPa] (= [全大気圧力  $p_a$ ] - [大気中の水蒸気分圧  $\phi \cdot p_s$  ])  
 $\theta$  : 吸入空気温度 [°C]  
 $\theta_0$  : 標準大気温度 [°C] (=25°C)

##### (3) 燃料消費率

燃料消費率  $g$  [g/(kW h)] とは，1 kW の出力を得るために消費される 1 時間あたりの燃料流量であり，次式で求められる．

$$g = \frac{V_f}{P} \cdot \gamma \cdot 1000 \quad [\text{g/(kW h)}] \quad (6)$$

- $g$  : 燃料消費率 [g/(kW h)]  
 $V_f$  : 燃料流量 [ℓ/h]  
 $P$  : 軸出力 [kW]  
 $\gamma$  : 燃料密度 [g/mℓ] (=0.72 g/mℓ)

#### (4) 吸入空気量

吸入空気量  $G_s$  [kg] は、サージタンク入口の丸型ノズルを通過する空気の静圧差（差圧）を用いて、次式により求める。ただし、試験環境下での乾燥空気密度  $\rho_d$  [kg/m<sup>3</sup>] を計算するにあたって、基準状態（大気温度 0°C、大気圧 101.3 kPa）の乾燥空気密度は 1.293 kg/m<sup>3</sup> とする。また、試験環境下での水蒸気密度  $\rho_w$  [kg/m<sup>3</sup>] は、付録の表 2 を用いて算出すること。

$$G_s = \alpha \cdot \frac{\pi}{4} d^2 \sqrt{2\rho_a (p_1 - p_2)} \times 10^3 \quad [\text{kg/s}] \quad (7)$$

$$\rho_a = \rho_d + \rho_w \quad [\text{kg/m}^3] \quad (8)$$

- $G_s$  : 吸入空気量 [kg/s]  
 $\alpha$  : 丸形ノズル流量係数 [-] ( $\approx 0.822$ )  
 $d$  : 丸形ノズル絞り径 [m]  
 $p_1 - p_2$  : ノズル上流側，下流側の差圧 [kPa]  
 $\rho_a$  : 試験環境下（温度  $\theta$  [°C]，大気圧  $p_a$  [kPa]，湿度  $\phi$ ）での湿り空気密度 [kg/m<sup>3</sup>]  
 $\rho_d$  : 試験環境下での乾燥空気密度 [kg/m<sup>3</sup>]  
 $\rho_w$  : 試験環境下での水蒸気密度 [kg/m<sup>3</sup>]

#### (5) 体積効率

体積効率  $\eta_V$  とは、エンジンが空気を吸入できる能力を表す指標であり、総行程体積  $V_h$  [m<sup>3</sup>] に対する 1 サイクルあたりの新気体積  $V_a$  [m<sup>3</sup>] として定義される。これは、試験時の大気条件での総行程体積に相当する空気質量を 100% としたときの、同一の大気条件での吸入空気質量の割合に等しい。

$$\eta_V = \frac{V_a}{V_h} \times 100 = \frac{\rho_a V_a}{\rho_a V_h} \times 100 \quad [\%] \quad (9)$$

$$V_h = \frac{\pi}{4} D^2 \cdot S \cdot n \quad [\text{m}^3] \quad (10)$$

- $\eta_V$  : 体積効率 [%]  
 $V_a$  : 1 サイクルあたりの新気体積 [m<sup>3</sup>]  
 $V_h$  : 総行程体積 [m<sup>3</sup>]  
 $\rho_a$  : 温度  $\theta$  [°C]，大気圧  $p_a$  [kPa]，湿度  $\phi$  における湿り空気密度 [kg/m<sup>3</sup>]  
 $D$  : シリンダー内径 [m]  
 $S$  : 行程 [m]  
 $n$  : シリンダー数 [-]

#### (6) 正味熱効率

正味熱効率  $\eta_e$  は、出力軸が行った仕事と実際にエンジンに供給された燃料の発熱量との比であり、

次式で求められる.

$$\eta_e = \frac{P \times 3600}{Q_f} \times 100 \quad [\%] \quad (11)$$

$$Q_f = H \cdot V_f \cdot \gamma \quad [\text{kJ/h}] \quad (12)$$

$\eta_e$  : 正味熱効率 [%]

$P$  : 軸出力 [kW]

$Q_f$  : 単位時間あたりの燃料の発熱量 [kJ/h]

$H$  : 単位質量あたりの燃料の低発熱量 [kJ/kg] (=46000 kJ/kg)

$V_f$  : 燃料流量 [ℓ/h]

$\gamma$  : 燃料密度 [g/ml] (=0.72 g/ml)

### (7) 空燃比 (混合比)

エンジン内での適切な燃焼を行うためには、燃料と空気 (酸化剤) の混合割合が重要となる. この割合は空燃比 (混合比) と呼ばれ、エンジンに供給される吸入空気量と燃料流量の重量比で表される.

$$AFR = \frac{G_s}{V_f \cdot \gamma} \times 3600 \quad [\text{kg/kg}] \quad (13)$$

$AFR$  : 空燃比 [kg/kg]

$G_s$  : 吸入空気量 [kg/s]

$V_f$  : 燃料流量 [ℓ/h]

$\gamma$  : 燃料密度 [g/ml] (=0.72 g/ml)

### (8) 理論空燃比

燃料と空気が過不足なく反応するときの空燃比を理論空燃比という. 炭化水素系燃料の分子式を  $C_nH_m$  とすると、燃料が完全燃焼するときの化学反応式は



によって表される. このとき、 $C_nH_m$  の燃料の理論空燃比  $AFR_{th}$  は次式で求められる.

$$AFR_{th} = \frac{4.312 \times 32 \left(n + \frac{m}{4}\right)}{12n + m} \quad [\text{kg/kg}] \quad (15)$$

$AFR_{th}$  : 理論空燃比 [kg/kg]

## 5. 結果の整理

以上の測定結果および計算結果を表にまとめ、回転数に対する①修正軸トルク、②修正軸出力、③燃料消費率、④吸入空気量、⑤体積効率、⑥正味熱効率、⑦空燃比のグラフを作成しなさい. また、



各グラフの特性について述べなさい。

## 6. 考察

以下の関係性について、論理的に考察を行いなさい。

### (1) 回転数と体積効率の関係性

体積効率はシリンダー内への空気の吸気過程に大きく依存する。自動車用エンジンにおける「吸気慣性効果」について述べ、エンジンの回転数が低回転から高回転まで変化した際に吸気慣性効果が体積効率にどのような影響を及ぼすのか考察しなさい。

### (2) 回転数と空燃比、発熱量の関係性

ガソリン（平均分子式： $C_7H_{13}$ ）を燃料とした場合の理論空燃比を計算し、実験で求めた各回転数での空燃比と理論空燃比とを比較しなさい。

また、測定データから、各回転数における1サイクルあたりの燃焼による燃料消費量（反応量）と発熱量をそれぞれ計算し、回転数と1サイクルあたりの発熱量の関係性について考察しなさい。

### (3) 回転数と修正軸トルクの関係性

エンジンの軸トルクは燃焼終了時のシリンダー内のガス圧に依存する。上記(1)、(2)における体積効率や発熱量の大小が燃焼終了時のガス圧にどのような影響を及ぼすのかを熱力学的に考察し、回転数と軸トルクの関係性について評価しなさい。

## 7. 課題

以下の設問(1)～(3)について、図を用いて説明しなさい。

- (1) 電気動力計における渦電流ブレーキの原理に関して、フレミングの法則（電磁誘導）に基づいて説明せよ。
- (2) オリフィス流量計の原理を参考にして、吸入空気量の計算式（式(7)）をベルヌーイの式、連続の式を用いて導出せよ。
- (3) 図5に示されるようなピストン・クランク機構について、ピストンの変位  $x$  [m]、速度  $v$  [m/s]、加速度  $a$  [m/s<sup>2</sup>]が式(16)～(18)により近似的に求められることを示しなさい。ただし、 $r$  [m]はクランク長さ、 $l$  [m]は連接棒長さ、 $\theta$  [rad]は上死点からの回転角、 $\omega$  [rad/s]はクランクの角速度を表す。また、本実験で用いているエンジンが回転数  $N=3000$  rpm で作動しているとき、クランク回転角  $[\circ]$  とピストンの変位、速度、加速度との関係をそれぞれグラフに描きなさい。

$$x = r(1 - \cos \theta) + \frac{r^2}{4l}(1 - \cos 2\theta) \quad (16)$$

$$v = \omega r \left( \sin \theta + \frac{r \cdot \sin 2\theta}{2l} \right) \quad (17)$$

$$a = \omega^2 r \left( \cos \theta + \frac{r \cdot \cos 2\theta}{l} \right) \quad (18)$$



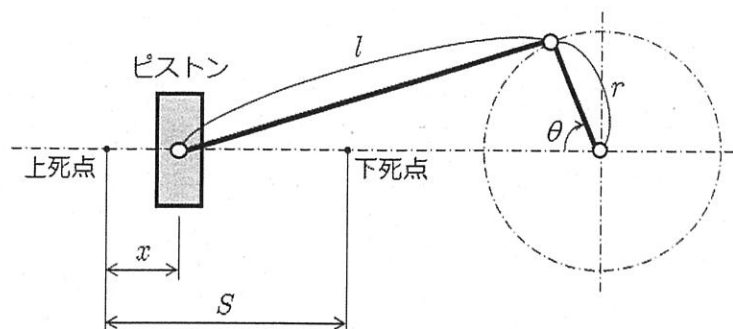


図5 ピストン・クランク機構

## 8. 付録

表2 温度[°C]と飽和水蒸気圧[kPa], 飽和水蒸気密度[kg/m³]の関係

温度 [°C]	飽和水蒸気圧 [kPa]	飽和水蒸気密度 [kg/m³]	温度 [°C]	飽和水蒸気圧 [kPa]	飽和水蒸気密度 [kg/m³]
0.0	0.611	0.00485	20.0	2.337	0.01730
1.0	0.657	0.00520	21.0	2.486	0.01834
2.0	0.705	0.00556	22.0	2.642	0.01943
3.0	0.757	0.00595	23.0	2.809	0.02058
4.0	0.813	0.00636	24.0	2.983	0.02179
5.0	0.872	0.00680	25.0	3.166	0.02306
6.0	0.934	0.00726	26.0	3.360	0.02438
7.0	1.001	0.00775	27.0	3.564	0.02578
8.0	1.072	0.00827	28.0	3.779	0.02725
9.0	1.147	0.00882	29.0	4.004	0.02878
10.0	1.227	0.00940	30.0	4.243	0.03039
11.0	1.312	0.01001	31.0	4.492	0.03207
12.0	1.402	0.01066	32.0	4.755	0.03384
13.0	1.497	0.01135	33.0	5.029	0.03569
14.0	1.597	0.01207	34.0	5.319	0.03762
15.0	1.704	0.01283	35.0	5.623	0.03964
16.0	1.814	0.01364	36.0	5.941	0.04175
17.0	1.937	0.01448	37.0	6.276	0.04396
18.0	2.062	0.01537	38.0	6.625	0.04627
19.0	2.195	0.01631	39.0	6.992	0.04869
			40.0	7.377	0.05120

\*\*\* 内燃機関性能総合試験装置 エンジン性能計算 \*\*\*

実験月日 : 2019-04-11 エンジン形式 : 2NZ-FE 動力計形式 : EWS-150-L  
 実験者 : 出力 : 64.72 kW 力量計 : 1000.1 N  
 実験場所 : 新潟工業高校 最高回転速度 : 6000 rpm 腕の長さ : 0.2865 m  
 実験番号 : 1 サイクル数 : 4 燃料名称 : GASOLINE  
 天候 : 雨 シリンダ数 : 4 燃料密度 : 0.72 g/ml  
 気温 : 21 °C シリンダ内径 : 75 mm 低発熱量 : 46050 kJ/kg  
 湿度 : 52 % 行程 : 73.5 mm 組成 C : 85 (%)  
 大気圧 : 102.9 kPa 総行程容積 : 1298 ml 組成 H : 14 (%)  
 : 圧縮比 : 10.5 ノズル内径 : 48 mm

ファイル名= 測定値 ( 1 / 2 )

項目	絞り弁 開度	設定 負荷率	動力計 制動 荷重	動力計 回転速度	吸入空気 温度	吸入空気 圧力	吸入空気 空気量	燃料 消費量	燃料消費 計測時間	燃料流量
記号	THN	R	W	N	TA1	DPA2	DPA1	b	t	FF1
単位	%	%	N	rpm	°C	Pa	Pa	ml	s	l/h
EX- 1	50		331	1500	17.2		30	50	31.683	
EX- 2	50		360	2000	18.6		80	50	22.997	
EX- 3	50		385	2500	19.5		150	50	17.334	
EX- 4	50		418	3000	19.6		230	50	12.963	
EX- 5	50		426	3500	19.9		340	50	10.981	
EX- 6	50		414	4000	20.6		440	50	9.525	
EX- 7	50		404	4500	21.4		580	50	7.621	
EX- 8	50		379	5000	21.7		660	50	6.565	
EX- 9										
EX- 10										

ファイル名= 測定値 ( 2 / 2 )

項目	排気ガス 圧力	排気ガス 温度	冷却液 流量	冷却液 入口温度	冷却液 出口温度	潤滑油 圧力	潤滑油 温度	プラグ座 温度
記号	PG1	TG1	FW1	TW1	TW2	PL1	TL1	TP
単位	kPa	°C	l/h	°C	°C	MPa	°C	°C
EX- 1		706	400	12.1	31.7	5	49	
EX- 2		760	540	12.1	31.6	5.4	55	
EX- 3		810	680	12.1	31	5.4	61	
EX- 4		829	840	12.1	31.2	5.8	67	
EX- 5		850	960	12.2	31.5	5.5	72	
EX- 6		860	600	12.2	41.2	5.6	82	
EX- 7		837	600	12.2	44.9	4.6	90	
EX- 8		827	620	12.2	45.5	5.2	98	
EX- 9								
EX- 10								

[illegible]

ファイル名= 計算値 (2/2)

[illegible]

# エンジン性能曲線

エンジン型式 : 2NZ-FE  
 シリンダ数 : 4  
 シリンダ内径 : 75[mm]  
 行程 : 73.5[mm]  
 総行程容積 : 1298[ml]  
 ファイル名 :  
 絞り弁開度 : 50[%]

燃料名 : GASOLINE  
 燃料密度 : .72[g/ml]  
 実験場所 : 新潟工業高校  
 実験年月日 : 2019-04-11  
 気温 : 21[°C]  
 湿度 : 52[%]  
 大気圧 : 102.9[kPa]

