

小型ガソリンエンジンの燃焼解析

Combustion Analysis of Small-sized Gasoline Engine

菊地 吉郎・本間 明*

Kichiro KIKUCHI・Akira HONMA

1. はじめに

エンジンの燃焼室内での燃焼現象は、出力の増大や熱効率の向上のみならず大気汚染物質の生成に深く関与しているため、その解明は重要な課題である。しかしながら、実機の燃焼室はいわばブラックボックスであり、内部の現象を直接目で観察することはできない。燃焼室部材を石英ガラスなどで製作した可視化用実験装置を用いて研究している企業等もあるが、膨大な費用と危険性の点から一般的方法とはいえない。このため、ブラックボックスの内視鏡の役割を果たす燃焼解析装置を用いることが多いが、市販されている専用装置はこれまた非常に高価である。

そこで、機能は必要最小限であるが、専用装置と同等な解析能力をもつ簡易型の燃焼解析装置を、パーソナルコンピュータをベースとして構築した。本報では、装置の構成と機能及び本装置を用いた小型ガソリンエンジンの燃焼解析例に関して報告する。

2. 燃焼解析装置の構成と機能

2.1 システム構成

実験装置全体のブロック図を図1に示す。ここで、エンジン及び摩擦式動力計を除いたものを燃焼解析装置と称している。燃焼解析装置のシステム構成を表1に示す。

エンジンのシリンダヘッドには燃焼圧力計測用の水冷式圧力センサが取り付けられ、出力軸には動力吸収用の摩擦式動力計が取り付けられている。摩擦式動力計軸端に取り付けられたスリット円板及び投受光器か

ら成る回転角度検出装置により発生し、増幅器で増幅された1サイクル当たり360個(あるいは720個)の回転角度パルス信号により、動ひずみ測定器で増幅された燃焼圧力信号は変換時間 $3\mu\text{s}$ のA-D変換器によりデジタル化され、ハードディスク内のメモリに連続して書き込まれる。本装置は試験1回当たり600サイクル間のデータを取り込み、990ケースの試験データを

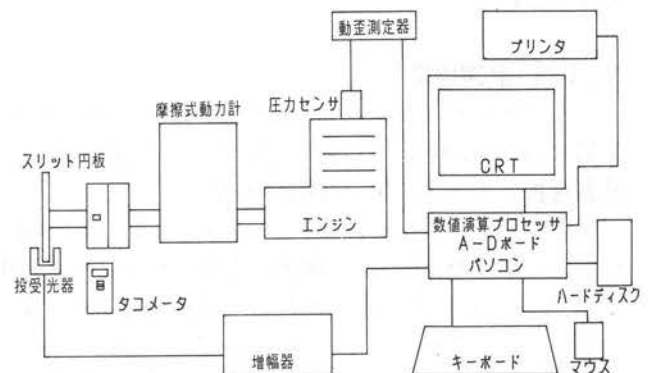


図1 実験装置全体ブロック図

表1 燃焼解析装置システム構成

パソコン	NEC PC-9801RS
CRT	NEC PC-KD854
プリンタ	NEC PC-PR201G
数値演算プロセッサ	I-O DATA PK-X87S
A-Dボード	UNION DATA UAD-98MX
ハードディスク	I-O DATA HDS-540M-L
動歪測定器	共和電業 DPM 603A
増幅器	小野測器 PA-500
圧力センサ	共和電業 PE-100KP
摩擦式動力計	フチノ製作所 PB-5
スリット円板	小野測器 PP-011
投受光器	小野測器 PP-933
タコメータ	小野測器 HT-5200

*平成7年度機械工学科卒業生(現エフテック勤務)

キャリブレーション・パラメータセット(試験・解析条件)と共に記憶することができ、これらのデータを必要に応じて呼び出し、解析することができる。解析結果はCRTに表示され、ハードコピーはプリンタに出力される。

2.2 データ前処理機能

解析に先立ち、解析結果に大きな障害をもたらす要因を除去するために、次のような燃焼圧力データの前処理を行っている¹⁾。

- 1) 回転角度パルス信号へのノイズ混入の有無のチェック
- 2) 回転角度ゼロパルス信号(1回転あたり1パルス)と燃焼圧力データの位相補正
- 3) 燃焼圧力データの平均化及びFFTを応用したデジタルフィルタリングによる高周波成分の除去
- 4) 燃焼圧力データのドリフト補正(吸気弁閉時期を大気圧条件とする)

2.3 計測・解析機能

燃焼解析を実行するに当たり、先ず計測を行い、次に解析を行うという想定のもとに、CRT画面に従い機能を記述する。

2.3.1 計測機能

プログラム名 BNMAIN を実行すると、計測・解析選択メニュー(図2)となり、計測モードを選択すると計測選択メインメニュー(図3)となる。

先ず、キャリブレーション・パラメータセット(以降、パラメータと略記する)を選択すると、パラメータ(図4)となる。計算に必要なエンジン諸元等及び計測条件等を入力した後、メインメニューをクリックし図3に戻る。データファイル名等を入力した後、計測開始を選択すると計測が行われ、パラメータと燃焼圧力データが1組のデータとしてメモリーに書き込まれる。計測終了後、計測条件ロード・セーブを選択すると、計測条件ロード・セーブ(図5)となる。計測前に設定したパラメータのみを単独に記憶しておく事により、以降の計測で同一のパラメータを入力する手続きを省略できる。Return をクリックすると図3に戻る。

2.3.2 解析機能

図3で計測／解析選択をクリックすると図2に戻る。解析モードを選択するとデータファイル選択メニュー(図6)となり、データファイル名を選択すると(但し、

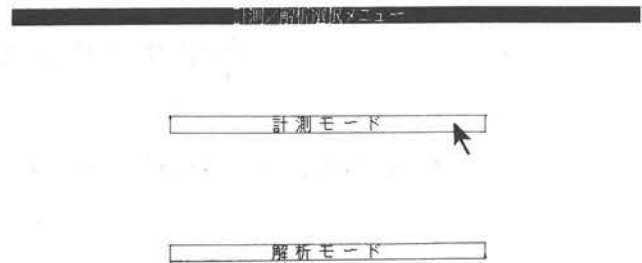


図2 計測・解析選択メニュー



図3 計測選択メインメニュー



図4 キャリブレーション、パラメータセット

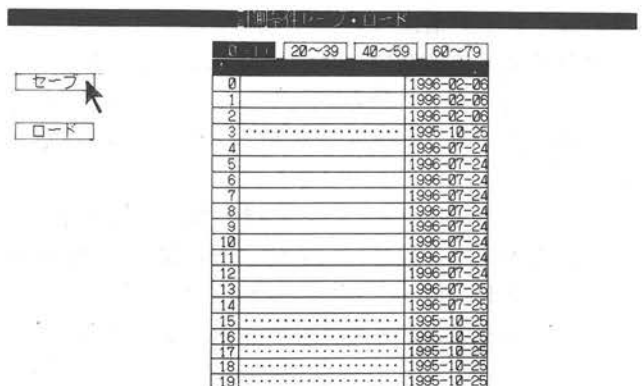


図5 計測条件ロード・セーブ

計測直後に解析を実行する場合、図6はスキップされる)解析選択メインメニュー(図7)となる。

計測済みデータのロードを選択すると図6に戻り、解析するデータファイル名を変更できる。パラメータを選択するとパラメータ(図8)となり、選択したデータファイルの燃焼圧力データは不変であるが、パラメータのみを一時的に変更した解析が可能となり、メインメニューをクリックすると解析メニュー(図9)となる。解析を選択すると図9へスキップする。また、計測済みデータの更新を選択すると図8となり、パラメータを入力すると計測時に入力したパラメータは更新され、データファイル名は不変であるが内容が書き換えられ、メインメニューをクリックする事により図9となる。

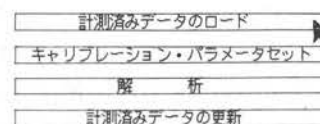
図9は燃焼圧力データの前処理方法の指定である。トップ位置補正は、回転角度ゼロパルス信号と燃焼圧力データの位相補正值を入力する。解析スタートサイクル及び解析サイクル数は、連続計測した燃焼圧力データの解析範囲を指定する。また、解析サイクル数を例えば10と指定すると、10サイクル間のデータを平均化処理したのち解析を実行する。カットオフ周波数及びカットオフ特性は、平均化処理した燃焼圧力データをデジタルフィルタリング処理するローパスフィルタ特性の指定である。A/V閉(吸気弁閉時期)は燃焼解析を開始するクランク角度であるが、これを変更することによりドリフト補正を行う。

入力終了後、熱発生を選択すると3節で示される熱発生率計算結果(図12)となり、P-Vを選択するとP-V線図解析結果(図13)となるが、両図の説明は3.2、3.3項において記述される。なお、各々の画面でReturnをクリックすれば図9に戻る。

図9でメインメニューをクリックすれば図7に戻り、図7で計測/解析をクリックすれば図2に戻り、図2でMS-DOSをクリックすれば図10となり、(はい)を選択すればプログラムは終了する(あるいは、図6に



図6 データファイル選択メニュー



データファイル名: @TEST030.DAT

計測年月日: 1996-02-06

コメント:

図7 解析選択メインメニュー



エンジン回転数 (rpm) = 2500
エンジン出力 (PS) = 1.875

図8 パラメータ変更



図9 解析メニュー

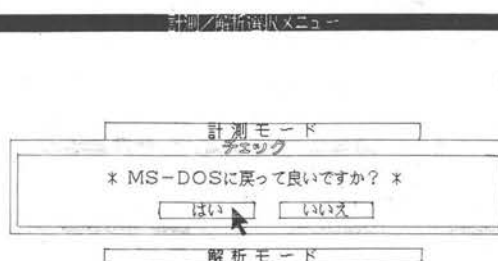


図10 終了メニュー

戻り、MS-DOS をクリックしても図10となる)。

なお、図12及び図13のグラフには縦軸のスケール変更機能が備わっており、各種グラフの縦軸にマウスカーソルを合わせてクリックすると、例えば図11となり、表示範囲の変更やグラフそのものの消去を設定できる。

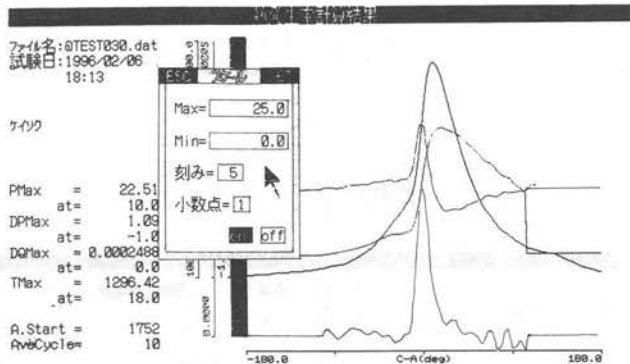


図11 スケール変更

3. 小型ガソリンエンジンの燃焼解析

3.1 実験装置及び方法

実験装置全体のブロック図は、すでに図1に示した通りである。実験エンジンの主要諸元を表2に示す。

表2 実験エンジン主要諸元

型 式	E Y 2 0 B
シリンダ直径	6 7 . 0 m m
ストローク	5 2 . 0 m m
定格出力	3 P S / 3 0 0 0 r p m
点火時期	- 2 0 d e g

本エンジンは富士重工製EY20Bであり、型式は空冷4サイクル立形側弁式ガソリンエンジン(1/2減速機付)である。このタイプのエンジンは、いわゆる可搬型として、発電機・ポンプなどの駆動に広く用いられている。燃焼圧力計測用の圧力センサをシリンダヘッドに取り付けるため、アルミ製シリンダヘッドの一部をNCフライス盤で切削してフラット面を作った。この部分の肉厚は約4mmであるのに対し、センサ取り付けネジ部長さは約10mmであったため、シリンダ中心付近にM22P=1.5のネジを切り、圧力センサ先端がシリンダヘッド内面で面一となるように、内側にM14P=1.25、外側にM22P=1.5のネジを切った円柱形カラーを用い、高さを調整して圧力センサを取り付けた。

動力計はフチノ製作所製プロニー型動力計であり、型式はPB-5である。仕様は最大吸収馬力5PS、最高回転数2000rpmである。

実験装置は、動力計台上に架台を溶接し、その上に実験エンジンを固定して両者をカップリングで結合し、動力計軸端に角度検出装置を取り付けて製作した。

実験の方法は、非接触式回転計を用いてエンジン回転数を計測し、連続定格出力時に動力計回転数1500rpm、動力計の力量計目盛り4.0kgとなるようにスロットルレバー開度及び動力計の荷重を調整して負荷を与えた。同一回転数の部分負荷は、負荷率に応じて力量計目盛りを変更することにより与えられる(例えば50%負荷の場合、力量計目盛りを2.0kgとする)。エンジン回転が安定した時点で30サイクル間の燃焼圧力信号を取り込み、そのうちの10サイクル間のデータを平均化し、1kHzのデジタルローパスフィルタによる処理をしたのち燃焼解析を行った。

3.2 熱発生率計算結果

連続定格出力(エンジン回転数3000rpm、軸出力3PS)の場合の結果を図12に示す。横軸はクランク角度C-A(deg)であり、縦軸は燃焼圧力P(kgf/cm²)、圧力上昇率dP(kgf/cm²/deg)、熱発生率dQ(kcal/deg)及び燃焼室内平均ガス温度T(K)である。

グラフの左側には、諸量の最大値Max及びその時のクランク角度の検索結果を表示しており、本実験の場合、PMax=24kgf/cm² at 14deg、DPMMax=1kgf/cm²/deg at 3deg、DQMax=2.7×10⁻⁴kcal/deg at 5deg、TMax=1319K at 30degであることが分かる。なお、燃焼圧力データ以外は計算値(計算式²⁾を付録に示す)であり、吸気弁閉時期(上死点前101deg)から排気弁閉時期(上死点后104deg)まで計算を行っている。

圧力上昇率はクランク角度1deg当たりの燃焼圧力の変化量であり、燃焼現象の急峻さを表すのでノッキングの発生と関連付けることができる。熱発生率はクランク角度1deg当たりの熱発生量であり、燃焼室内で有効に発生した熱の発生状況を表す。本実験の場合、解析結果より燃焼開始時期は上死点前15degであり、燃焼期間は41degであることが分かる。本エンジンの点火時期は上死点前20degなので、着火遅れは5degとなる。エンジン回転数は3000rpmなので、クランク角度を時間に換算すると、燃焼期間は2.3ms、着火遅れは0.8msとなる。

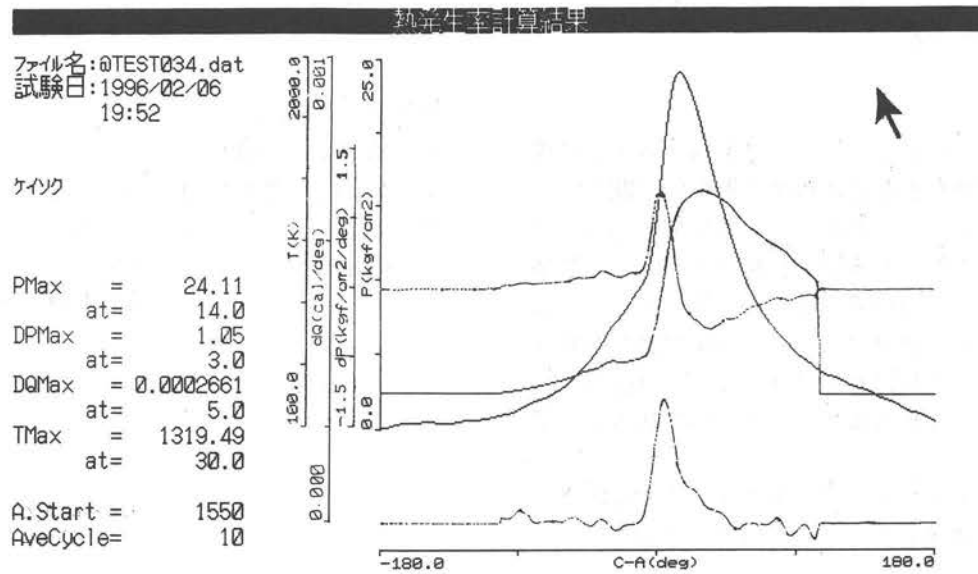


図12 熱発生率計算結果

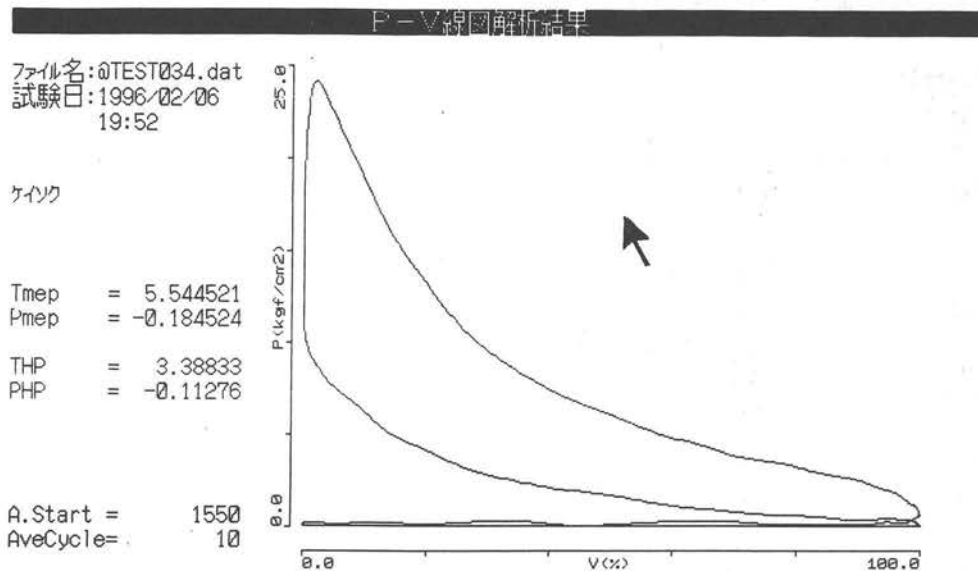


図13 P-V線図解析結果

3.3 P-V線図解析結果

連続定格出力の場合の結果を図13に示す。横軸は燃焼室容積比率V(%)であり、縦軸は燃焼圧力P(kgf/cm²)である。横軸を比率で表示しているため、エンジンの種類により燃焼室容積が異なっても、同一スケールでグラフは表示される。このグラフは、いわゆるインジケータ線図であり、線の囲む面積は1サイクル当たりの仕事量を表す。

グラフの左側には高圧部と低圧部の合計T及び低圧

部Pの図示平均有効圧力 $mep(kgf/cm^2)$ 及び図示出力HP(PS)の解析結果を表示しており、本実験の場合、 $Tmep=5.5kgf/cm^2$ 、 $Pmep=-0.2kgf/cm^2$ また $THP=3.4PS$ 、 $PHP=-0.1PS$ であることがわかる。ここに高圧部とは、吸気弁閉時期から排気弁開時期までの圧縮・膨張行程であり、低圧部とは、それ以外の排気・吸入行程である。すなわち低圧部Pが負であることは、吸排気行程で損失を生じている事を意味する。

また、本実験の場合、動力計で計測した軸出力は3

PSなので、解析した図示出力3.4PSとの比較により、機械効率は88%となる。

4. おわりに

本報ではパーソナルコンピュータをベースとして構築した簡易型燃焼解析装置の概要と解析例を報告した。小型ガソリンエンジンの燃焼圧力信号を取り込み、熱発生率の計算及びP-V線図の解析を実行し、諸数値を検索した結果は十分に妥当なものであったが、一部に不満足点が認められたので、その点を早急に改良するつもりである。続報においては、種々の試験の分析結果を取りまとめ、燃焼現象と関連付けて報告する予定でいる。

なお、燃焼解析ソフトは(株)アイコン代表取締役和田博雄氏と共同開発したことを付け加えておく。

参考文献

- 1) 菊地・和田ほか2名, 舶機誌, 24-12, (1989), 27.
- 2) 斎藤ほか5名, 熱機関演習, (1992), 18-19, 実教出版

附録 熱発生率の計算

計算に用いる記号

A : 仕事の熱当量 (=1/426.8)	[kcal/kgf/m]
D : ピストン直径	[m]
G : ガス重量	[kgf]
P : 燃焼圧力	[kgf/m ²]
Q : 有効発生熱量	[kcal]
R : ガス定数	[kgf·m/kgf/K]
T : 平均ガス温度	[K]
V : 燃焼室容積	[m ³]
l : 連接棒長さ	[m]
r : クランク半径	[m]
ε : 圧縮比	
θ : クランク角度	[rad]
κ : 比熱比	
λ : 空気過剰率 (1とする)	
ρ : 連かん比 (=r/l)	

計算式

熱発生率

$$\frac{dQ}{d\theta} = A \frac{1}{\kappa - 1} \left(V \frac{dP}{d\theta} + \kappa P \frac{dV}{d\theta} \right)$$

燃焼室容積

$$V = \frac{\pi}{4} D^2 r \left\{ 1 - \cos \theta + \frac{\rho}{4} (1 - \cos 2\theta) + \frac{2}{\varepsilon - 1} \right\}$$

状態方程式

$$PV = GRT$$

物性値の近似式

$$R = 29.2647 - 0.0402 / \lambda$$

$$\kappa = C_0 + C_1 T + C_2 T^2 + C_3 / \lambda$$

$$C_0 = 1.4373, \quad C_1 = -1.318 \times 10^{-4}$$

$$C_2 = 3.12 \times 10^{-8}, \quad C_3 = -4.8 \times 10^{-2}$$

(受理年月日 1996年9月27日)