

高速A/Dコンバータボードを用いた燃焼解析システムの開発

北九州職業能力開発短期大学校 赤星英和・前田恭一・佐藤数美

Development of Combustion Analysis System Using High Speed A/D-Converter Board
Hidekazu AKAHOSHI, Kyoichi MAEDA, Kazumi SATO

要約 内燃機関のシリンダ内での燃焼状態を高速かつ正確に解析することは、内燃機関の性能を評価する上で極めて重要なことである。また、計測したデータをコンピュータで数値解析することは、機械技術者にとって非常に重要な課題になっている。しかしながら、このような学生のための実験・実習用教材装置の多くは、解析結果のみが出力されるようになっており、途中の重要な解析過程が置き去りにされる傾向にある。そこで、16ビットパソコンに市販の高速A/Dコンバータボードを装着し、自作のパルス制御回路を用いてシリンダ内圧力を計測する燃焼解析装置を試作するとともに、その計測データをもとに燃焼解析するためのプログラムも試作し、一連の燃焼解析の方法を教育できるシステムを開発した。

I はじめに

内燃機関の性能を評価する方法として、シリンダ内の圧力値を採取し、その値をもとに種々の線図を作成し、解析する方法がある。いわゆる、内燃機関の燃焼解析であるが、最近では、クランク角度0.25度毎にシリンダ内の圧力値を採取できる高精度な燃焼解析装置が開発されている⁽¹⁾。また、A/D変換器とパルス制御回路等を装備した専用のインターフェースをパソコンに用いた燃焼解析装置等も市販されている^{(2),(3)}。これらはいずれにおいても高価であり、解析結果表示のシステムのため、学生に対して基本的な内燃機関の燃焼解析の方法を指導する上で、適切な機器とは言い難い。また、計測器の汎用性を考えてデジタルメモリスコープ等を使用してデータの採取を行なった場合、内蔵メモリの関係で数サイクルのデータ採取しかできず、データの平均化処理を考えた場合に問題がある。

今回、数値解析の教材化の一つとして、16ビットパソコンに市販の高速A/Dコンバータボードを用いて、安価な燃焼解析装置を試作した。そして、燃焼解析に必要なプログラムの作成を行ない、燃焼解析方法を分りやすく教育できるシステムを開発した。

II 本システムの意義

内燃機関のシリンダ内での燃焼状態を高速かつ正確に解析することは、内燃機関の性能を評価する上で極めて重要なことである。学生は基本的な内燃機関の仕事の概念について、実際にデータを採取し、インジケータ線図を作成することで把握できる。これは短大、大学における熱力学あるいは内燃機関工学の学習が単なる机上の学問に終ることではなく、実験を通して知識の裏付けとなり、知識の拡大へとつながり、教育的効果は多大である。

また、広義的な目的で捉えるならば、アクチュエータにセンサーを取付け、ある物理量を計測し、コンピュータで数値解析することは、機械技術者にとって非常に重要なテーマになっている。しかしながら、このような実験・実習の教材用として市販されている装置の多くは、解析結果のみ出力され、途中の解析過程が置き去りにされる傾向にある。この問題点を解決する意味でも、比較的安価にできる本教材システムは、効果的な技術教育を行なうことを可能にするひとつの手法である。

III システムの概要

1. 本体

図1にシステムの概要を示す。

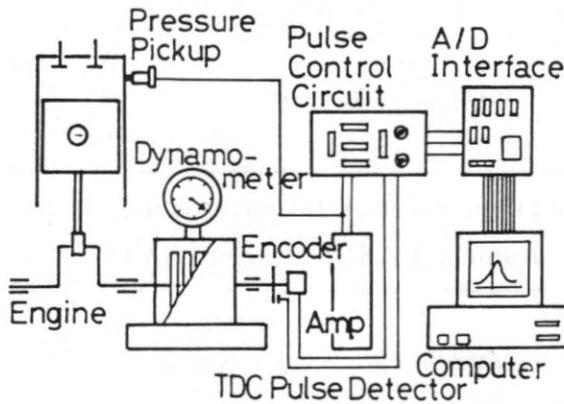


図1 システムの概要

シリンダヘッドに取付けた圧力センサーを用いて、シリンダ内の圧力に対応した電圧値を動ひずみ計を介して、パソコンに基盤として差込んだ高速A/Dコンバータボードに取り込んだ。データの取り込みにあたっては、グラウンド間電位差の影響を受けない差動入力モードとし、入力レンジは-5Vから+5Vの範囲にセットした。一方、クランクシャフトの一端にロータリエンコーダ及び上死点検出器をセットし、クランク角に対応した1回転360パルスを出力する外部入力信号(以下、EXT信号という)と1回転1パルスを出力する上死点検出信号(以下、TDC信号という)をパルス制御回路へ送った。パルス制御回路で制御されたEXT信号を高速A/Dコンバータボードに送り、ハンドシェイクでシリンダ内の圧力値をA/D変換後、パソコンのメモリに格納した。

本装置は増設RAMボードなしでも32768個のデータ格納が可能であり、4サイクル機関では最大45サイクルのサンプリングが可能であったが、2MBの増設RAMボード(I.Oバンクメモリ方式)を実装し、500サイクルのサンプリングを可能とした。

バンクメモリに格納したデータは、直ちにCPUに転送させ、平均化処理を施してフロッピディスクに1サイクル分を保存した。その後、このデータをもとに解析プログラムを用いて、解析結果をプリンタ及びプロッタに出力した。

なお、16ビットパソコンの実行速度を上げるため、倍速CPU(80286をCx486SLCに変

更)を用いた。実行結果として、演算速度を約35%アップさせることができた。

2. パルス制御回路

図2はTDC信号の中の排気上死点を検出して、A/D変換開始時期を捉えるためのパルス制御回路である。

スタートスイッチSWをONにすることにより、2個のフリップフロップを介してハンドシェイクに必要なEXT信号を高速A/Dコンバータボードに出力する。また、サンプリング開始時期は、シリンダ内圧力データの処理上、排気の上死点が適当であり、圧縮上死点での信号分を除くため、インバータ及びAND回路を加えている。すなわち、このパルス制御回路はデータのサンプリング時には必ず排気の上死点より開始し、4サイクル機関の1サイクル当たりのデータとして、720個の倍数で終了するようにTDC信号及びEXT信号を制御する回路である。

IV データサンプリングプログラム

シリンダ内圧力に対応したデータのサンプリングプログラムは、使用した高速A/Dコンバータボード専用の市販ソフトによる機械語サブルーチンを用いてDOS-BASICで作成した。

図3は、データサンプリングプログラムのフローチャートを示し、図4はそのプログラムの一部として、プログラムのメニューの部分及び機械語サブルーチンを用いた部分を示している。

機械語サブルーチンは以下に示すように、4つに区

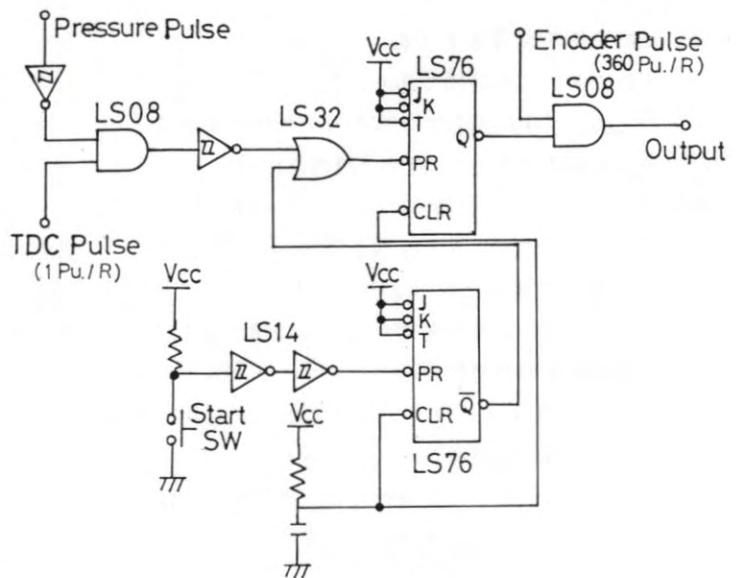


図2 パルス制御回路

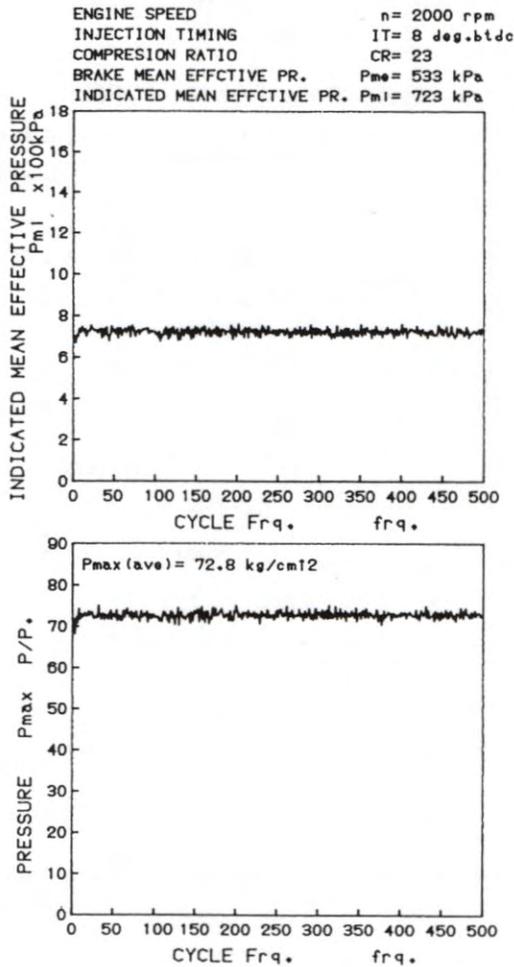


図5 図示平均有効圧力 P_{mi} 及び最大圧力 P_{max} 線図

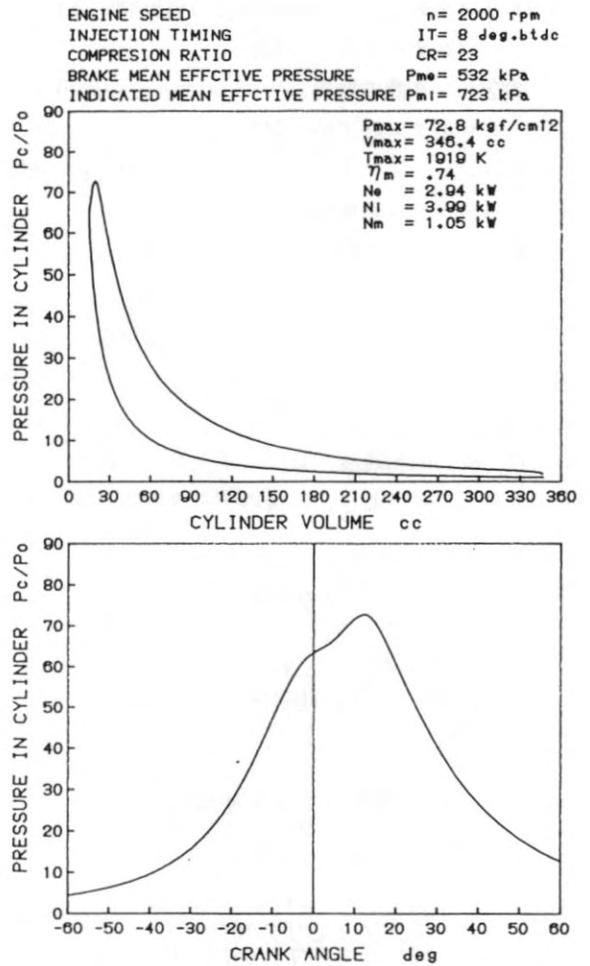


図6 P- θ 線図及びP-V線図

タで描いた。

1. 図示平均有効圧力、最大圧力-サイクル線図

機関の変動率を示すには、サイクル毎の図示平均有効圧力、最大圧力を求めることが有効である。

図5は各サイクル毎の図示平均有効圧力 P_{mi} 及び最大圧力 P_{max} を示した線図である。

2. P- θ 線図及びP-V線図

クランク角度に対応したシリンダ内圧力データを描いたP- θ 線図からP-V線図への変換のため、クランク角 θ に対応した行程容積 V_s を、以下のような近似式として示されるピストン変位量 X から算出して求めた。⁽⁷⁾

$$X = R_c \{ (1 - \cos\theta) + (1 - \cos 2\theta) / 4\lambda \} \dots\dots\dots(1)$$

$$V_s = \pi D^2 X / 4$$

ただし、 $\lambda : (=L/R_c)$ コンロッド長さ/クランク半径
 D : シリンダ内径

図6はP- θ 線図及び変換後のP-V線図である。ここで、シリンダ容積 V は行程容積 V_s に燃焼室容積 V_c を加えた値であり、シリンダ内圧力 P は絶対圧力である。なお、線図では縦軸のシリンダ内圧力は大気圧 P_o との比として表した。

3. Log P-Log V線図及びLog T-Log V線図

図7はP-V及びT-V線図の縦、横軸をそれぞれ対数表示に描きかえたLog P-Log V線図及びLog T-Log V線図である。Log T-Log V線図は温度サイクル線図ともいわれ、シリンダ内の燃焼ガス温度が求められる。この場合、圧縮始めの温度及び圧力の基準点としてどのように設定するかで、かなりの数値の開きがでてくる。ここでは文献資料に基づき、大気圧

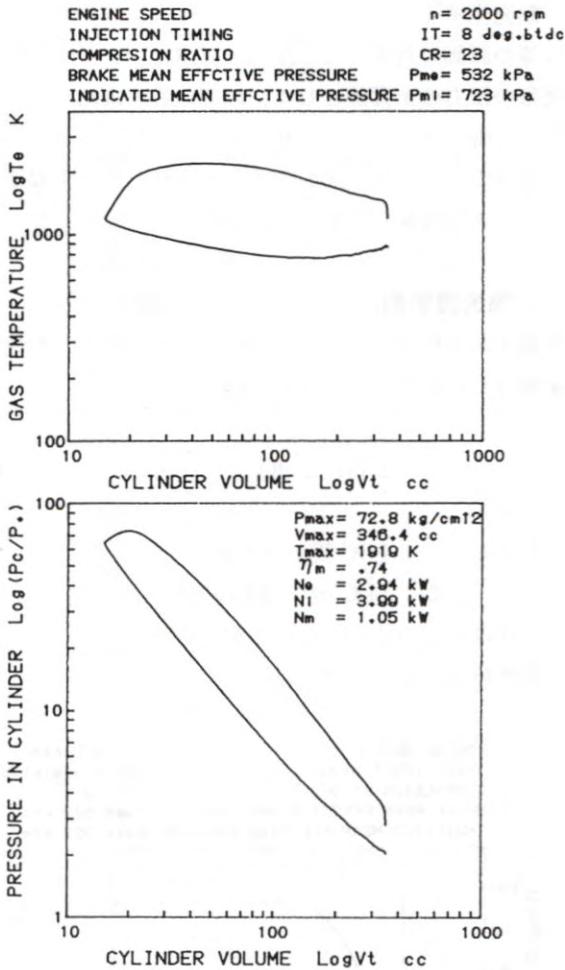


図7 LogP-LogV線図及びLogT-LogV線図

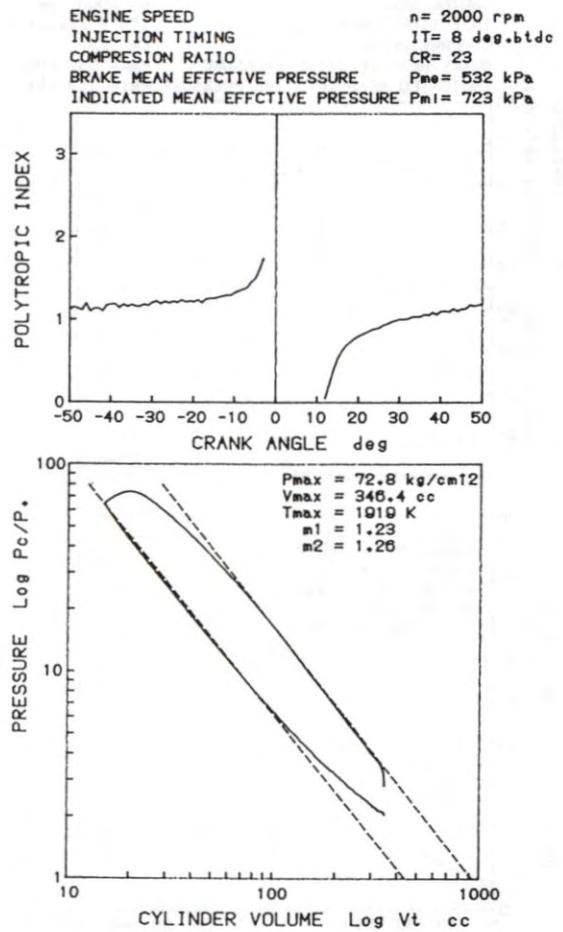


図8 ポリトロープ指数-クランク角度線図及び平均ポリトロープ指数

P₀ = 1 kgf/cm²、その点の温度 T₀ = 360 K とし、以下の式にて各点を求めた。(8),(9),(10),(11),(12)

$$T = T_0 \cdot P/P_0 \cdot V/V_0 \quad \dots\dots\dots(2)$$

4. ポリトロープ指数-クランク角度線図

Log P-Log V 線図における圧縮行程、膨張行程を適当な直線と見なして、その勾配を求めれば、各々の平均ポリトロープ指数 m を求めることができる。図8の下図は断熱変化時の平均ポリトロープ指数 m₁、m₂ を求めたものである。(13),(14)

$$PV^m = C \text{ (一定)}$$

両辺の対数を取り、微分して m を求めると、

$$m = -d(\text{Log } P)/d(\text{Log } V)$$

となる。

具体的なプログラム上での対応は、以下のようにして各ポリトロープ指数 m を求めた。

$$m(\theta) = -\text{Log} \{P(\theta)/P(\theta-1)\} / \text{Log} \{V(\theta)/V(\theta-1)\} \quad \dots\dots\dots(3)$$

図8の上図は、上記の(3)式より求めたポリトロープ指数-クランク角度線図である。

また、圧縮行程時及び膨張行程時の平均ポリトロープ指数 m₁、m₂ の算出は、下記に示す最小二乗法の式により圧縮行程、膨張行程の各々の測定点 (P_i、V_i) を数十点 (K) 入力することにより、平均的直線の勾配を求めた。(15)

$$m = (1/K \cdot \Sigma P_i V_i - \bar{P}\bar{V}) / (1/K \cdot \Sigma V_i^2 - \bar{V}^2)$$

ただし $\bar{P} = 1/K \Sigma P_i$ (P_iの平均値)

$\bar{V} = 1/K \Sigma V_i$ (V_iの平均値)

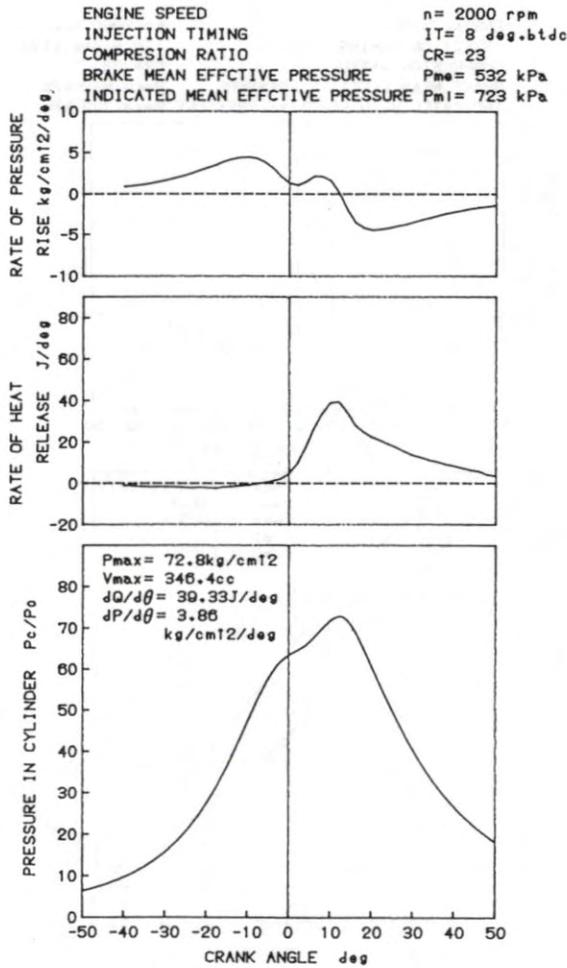


図9 熱発生率ークランク角度線図及び圧力上昇率ークランク角度線図

5. 熱発生率ークランク角度線図

内燃機関の燃焼は厳密には不均一なガスであるが、ここでは、均一なガス分布として取扱い、熱発生率は熱力学第一法則をもとに以下の近似式で求めた。(16),(17),(18)

$$dQ/d\theta = (\kappa p dV/d\theta + V dp/d\theta) / (\kappa - 1) \dots\dots(4)$$

ただし、 κ : 比熱比

P : 圧力

V : 容積

θ : クランク角度

なお、熱発生率の単位としては、S I 単位系 J/deg とした。図9の中図は、上記の(4)式より求めた熱発生率ークランク角度線図である。

6. 圧力上昇率ークランク角度線図

熱発生率と共に重要な線図として、ノッキングの度合等の評価の対象となる圧力上昇率は、クランク角1度毎の圧力の上昇値として、以下の式で求めた。

$$dp/d\theta = p(\theta) - p(\theta - 1) \dots\dots(5)$$

図9の上図は、上記の(5)式より求めた圧力上昇率ークランク角度線図である。

7. 燃焼質量割合ークランク角度線図

熱発生率の積分により、以下に示す式により、燃焼質量割合 C_x をクランク角度ごとに求めた。

$$C_x(\theta) = \sum_a^\theta dQ / \sum_a^b dQ \dots\dots(6)$$

ただし、 a : TDC 後の $dQ/d\theta > 0$ 時の θ

b : TDC 後の $dQ/d\theta \leq 0$ 時の θ

図10は上記の(6)式より求めた燃焼質量割合ークランク角度線図である。(19)

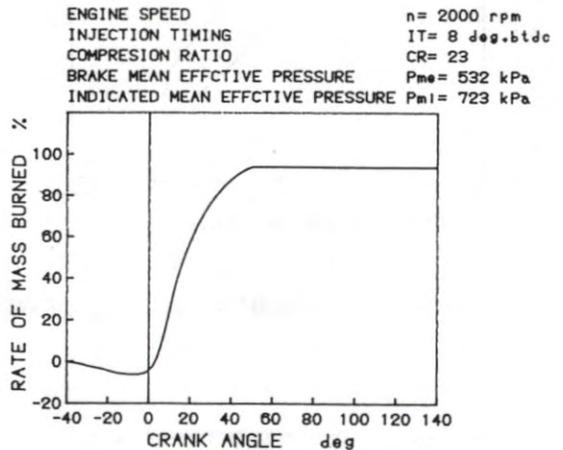


図10 燃焼質量割合ークランク角度線図

8. ピストン速度ークランク角度線図及びピストン加速度ークランク角度線図

ピストン速度 W_p はピストン変位量 X を時間 t で微分して、以下の式に代入して求めた。

$$W_p = \pi n R_c (\sin\theta + 1/2\lambda \cdot \sin 2\theta) / 30 \dots\dots(7)$$

ただし、 R_c : クランク半径

n : エンジン回転速度

また、ピストン加速度 α_p は(7)式のピストン速度 W_p を時間 t で微分して、以下の式で求めた。

$$\alpha_p = \pi^2 n^2 R_c (\cos\theta + 1/\lambda \cdot \cos 2\theta) / 30^2 \dots\dots(8)$$

図11は上記の(7)、(8)式より求めたピストン速度ーク

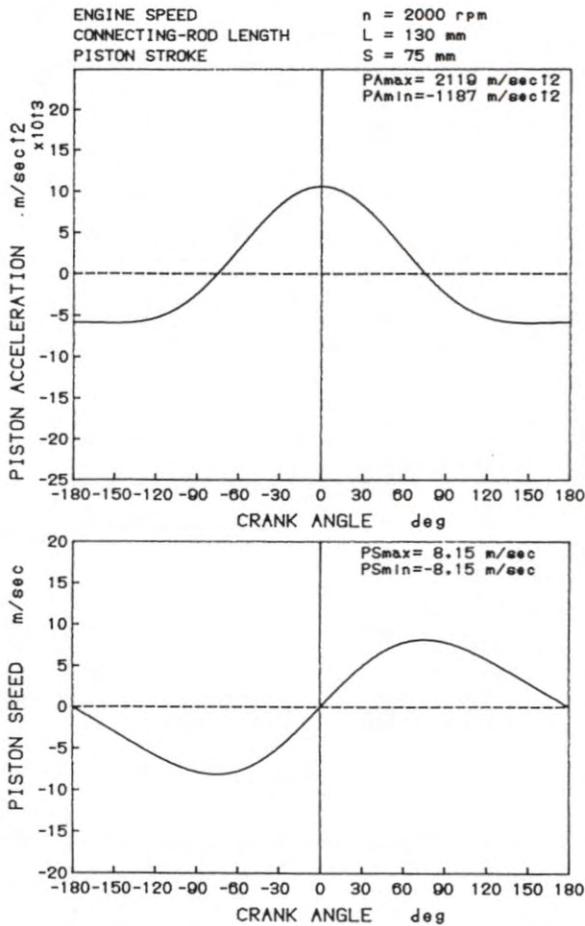


図11 ピストン速度—クランク角度線図及びピストン加速度—クランク角度線図

クランク角度線図及びピストン加速度—クランク角度線図である。

VI 図示平均有効圧力の算出

図6の上図のP-V線図における閉曲線内の仕事量(面積)を算出し、行程容積 V_s で除せば図示平均有効圧力 P_{mi} が求まる。

図示平均有効圧力の算出にあたっては、図示仕事の算出が必要である。通常は線図作成後、プランナーで閉ざされた部分の面積を測定するか、方眼紙に線図作成後、目盛数を数えて算出するかである。また、等容積毎のシリンダ圧力値の差を求めて平均値を算出する方法もある。前者の方法は、学生の基本実験後のデータ処理として指導している方法である。後者の方法は、パソコンの計算力を十二分に発揮させる方法があるので、今回のプログラム上に用いた。

図示平均有効圧力の算出にあたって、等容積毎としていくらの容積を取るかによって誤差の大きさが違ってくる。常識的には容積を細分するほど正確な値が求められると考えられる。しかしながら、シリンダ内圧力値はクランク角に対応した値より比例配分して容積に対応した値を求めなければならないために、細分するほど誤差が大きくなる傾向にある。したがって、これらの誤差の最小条件を満たす容積毎の算出は容易ではないので、今回は行程容積 1 cm^2 毎から 5 cm^2 毎の5つの図示平均有効圧力を算出し、それらの値の平均を取った。

なお、パソコンで算出した図示平均有効圧力の値を確かめるため、 1 mm 方眼紙にプロッターでP-V線図を作図して、詳細に面積計算をした。その結果、今回の実験条件であった正味平均有効圧力 $P_{me} = 532 \text{ kPa}$ 、エンジン回転速度 $n = 2,000 \text{ rpm}$ 時における図示平均有効圧力は、 724.5 kPa と算出され、パソコンでの 723 kPa と比較してもその差はわずかであることから、プログラムの有効性を確認することができた。

VII 今後の課題

使用した12ビット高速A/Dコンバータボードによるハンドシェイクモードでのサンプリング時の実測時間は、メーカーの取扱説明書によると、 $40.7 \mu\text{sec}$ となっている。本実験では、エンジン回転速度 $3,500 \text{ rpm}$ まで計測が可能であった。この時の1データの実測時間は $47.6 \mu\text{sec}$ となり、若干の違いがあるが、ほぼ本A/Dコンバータボードの性能を十分に活用している。したがって、本装置は実測時間の関係から、ディーゼルエンジンの燃焼解析用としては十分対応するが、高速回転用ガソリンエンジンの燃焼解析としては問題を残している。

今後の対策として、32ビットパソコン、高精度なA/Dコンバータボード及び高精度なロータリエンコーダを使用すれば、上記の課題は解決すると思われる。

VIII おわりに

数値解析の方法は機械系技術者にとって、大変重要なテーマである。その数値解析システムの教材化の一つとして、学生と共に思考しながら内燃機関の燃焼解析方法を学習できる燃焼解析装置を開発した。そして、すでに作成していた燃焼解析プログラムを改造して本装置に適用させることにより、燃焼解析のシステムを構築した。

試作にあたりパルス制御回路の排気上死点の検出方

法、図示平均有効圧力を算出方法等について多くの時間を費やしたが、一般的に使用されているパソコンに市販の12ビット高速A/Dコンバータボードを装着した安価な燃焼解析システムの完成をみた。今後は、諸々の課題について更に検討を加え、システムの高精度化を図りたいと考えている。

最後に、内燃機関の燃焼解析理論についてご指導いただいた職業能力開発大学校産業機械工学科福谷格教授に感謝します。

(参考文献)

- (1) 前田他、多チャンネルエンジン燃焼解析装置(CB-466)の開発、内燃機関 1984.5
- (2) 小倉他、内燃機関における燃焼解析装置の試作、内燃機関 1983.4
- (3) 小倉他、マイクロコンピュータを用いたエンジン燃焼解析装置の開発、内燃機関 1985.10
- (4) アイ・オー・データ機器、高速A/Dコンバータボード(PIO-9045)取扱説明書
- (5) アイ・オー・データ機器、98-ソフトライブラリー(PIO-S9820)V3.0取扱説明書
- (6) 赤星他、北九州職業訓練短期大学校紀要第1号、燃焼特性の一考察と燃焼解析プログラムの試作、1989.3
- (7) 赤星他、北九州職業訓練短期大学校紀要第3号、12ビットA/Dインターフェースボードを用いた燃焼解析システムの試作、1991.3
- (8) 小茂鳥、渡部、内燃機関工学、実教出版
- (9) 小茂鳥、機械工学実験法、日刊工業新聞
- (10) 五味、内燃機関、朝倉書店
- (11) 大道寺、ディーゼル機関設計法、工学図書
- (12) 関、機械設計製図演習3 ガソリンエンジン編、オーム社
- (13) 熊谷、内燃機関測定法、養賢堂
- (14) 長尾、内燃機関講義上巻、養賢堂
- (15) 内燃機関編集委員会、内燃機関の実験と計測、山海堂
- (16) 八田、内燃機関計測ハンドブック、朝倉書店
- (17) 宮本他、ディーゼル機関における熱発生率および燃焼率の算出方法とそれに伴う誤差要因について、内燃機関 Vol. 18, 1979 No. 224 山海堂
- (18) 内燃機関編集委員会、内燃機関の燃焼、山海堂
- (19) 共和電業、高性能エンジン燃焼解析システムエンジンアナライザ説明書、共和電業