パソコン支援による簡易燃焼解析システム と中小形中速ディーゼル機関での適用例*

石橋 徳憲** 近藤 博美**
古川 与四郎** 乾 豊**

A Simple Combustion Analyzing System Aided by a Personal Computer
and its Applications for Small and Medium Size Medium Speed Diesel Engines

By Tokunori Ishibashi, Hiromi Kondo, Yoshiro Furukawa, Yutaka Inui

This paper describes an outline of the combustion analysis system aided by a personal computer and presents the results of a study on the combustion tests in the medium speed diesel engines with 220mm bore and 240mm bore. An evaluation is made of the time history for the unburnt quantities of the fuel injected into the combustion chamber. A new understanding is proposed in the relations between the cumulative fuel injection rate and the cumulative heat release rate.

1. ま え が き

機関の性能と信頼性の確認は設計・開発される機関において必要不可欠なものであり、燃焼挙動と密接に関係する噴射率と熱発生率等の解析はそれらの確認のための手法の一つとして挙げることができる。これらの解析での入力としては、消費した燃料と空気の量、性能と熱収支に関する計測値および1サイクルの動的な計測値として燃焼圧力、針弁リフト量、燃料噴射圧力等の膨大な量のデータを必要とする。データの入出力および解析システムでは、動的な計測データの高速A/D処理、実験結果に潜在する情報を引き出すための多方面の角度からの分析あるいは演算処理、実験結果の本質を表現する基準化された出力機能および実験事実に基づいた新しい知見を容易に再導入できるソフトウェア機能等が要求される。市販の燃焼解析装置としては優れたものもあり、高速A/D処理、データの平均化および統計的処理および熱発生率等の解析までも行えるものもある。しかしながら、実験結果の多角的な解析および新しい知見の再導入の点では、それらのポータブルタイプの装置のみでは不備であり、パーソナルコンピュータを有効に利用した質的および量的なソフトウェア機能の支援によって実施可能である。

本報告では、実験の現場においてオンライン・リアルタイムで多角的に燃焼解析を行うために開発したパーソ

ナルコンピュータの支援による燃焼解析システムの概要および解析例について述べる。システムでは、ポータブルタイプの燃焼解析装置を活用し、パーソナルコンピュータにおいてデータの入出力処理、計算処理、解析処理およびグラフィック処理等のプログラム化によりソフトウェア機能の充実を図っている。本解析では、実測した燃料噴射系と燃焼系の出力情報に基づいて簡易的に定義した燃焼室内の燃料の未燃焼割合の観点から解析を行った。さらに、燃料噴射終了後における燃料の残存未燃焼量については、実測結果に基づきその減少傾向を無次元表示によりグラフィック処理した。

2. システム概要

システムの構築においては、実験担当者の専門的なレベルに左右されないハードウェア機能とソフトウェア機能を備えることが望まれる。実験担当者の枠の拡大を図るためには、システムの操作の容易さと計測値の確認手順における基準化した対話形式のソフトウェア機能等の充実などが必要不可欠なものである。図1は、この思想にもとづき開発したディーゼル機関におけるパソコン支援による簡易燃焼解析システムのフロー図である。本節では、解析のための前処理と燃焼解析処理の概要について述べる。

2.1 解析の前処理 実用のディーゼル機関の燃焼試験では、機関の最適諸元の決定あるいは燃焼性能などの確認のチューニング(変更)の過程において不確実な点を明らかにするうえで解析の可能なデータとしての取り込み、さらに実験履歴、実験結果および解析結果に関してデータベース化が要求される。燃焼圧力などの動的

*原稿受付 昭和62年12月26日

昭和62年秋季学術講演(昭和62年10月7日)

**正会員 ダイハツディーゼル(大阪市大淀区大淀中1丁目1番80号)

図1 システム概要

なデータの計測は計測場所の温度・圧力あるいは霧出気の条件等の制限あるいはセンサーの選択など技術的な面から考えても難しいが、信憑性のあるデータの獲得は重大な課題である。また、実験担当者の枠の拡大を図ることは、データの獲得と同様に重要な課題でもある。これらの課題の解決には、システムを構成する各機器の機能を十分に活用し、計測データの獲得方法を標準化することが有効である。図1に示すシステムの構成要素の一つである燃焼解析装置CB-366, CB-466(小野測器株式会社)は、高速データ処理、平均化および頻度分布処理機能を持っている。したがって、課題解決にあたっては、中央処理装置(CPU)にデータを取り込む前処理において再現性の確認手順を標準化し、燃焼解析装置のCRT上で処理データをポイントサーチし、確認後パソコンのキーボードからCPUへの入力指令を行っている。

2.2 燃焼解析処理 中央処理装置(CPU)では、計算処理により燃焼性能、熱収支、噴射時期、噴射期間、噴射圧力と燃焼圧力の最大値等が求められ、解析処理により噴射率、熱発生率、燃焼期間、燃焼割合等の燃焼に関する情報が演算整理される。さらに、CPUにおいては、CRT上のメニューにより計測あるいは解析結果について作表処理あるいはグラフィック処理し、これらの結果をプリンターおよびプロッターにより出力する。計測データは、メモリ処理の選択によりディスクドライブ内のフロッピーディスクに記憶できる。機関の最適諸元のチューニング過程でのデータの比較は、ディスクドライブでのフロッピーディスク内のデータを検出し再びCPUに呼び出し計算およびグラフィック処理により実施可能である。パソコンの容量の不足に対応するために計算データの取り込み、各種の計算あるいは解析処理、グラフィック処理、データベースの作成に関するプログラ

ムについてモジュール化を図り、ディスクドライブ内の拡張用プログラムで補い、プログラムはメンテナンスが容易なように個々の容量を少なくし、メニュー選択により実行できるよう構成されている。

図2は、計測および解析結果の作表出力例を示している。図3は、計測結果および一般的な解析結果の出力比較例を示している。図3.aは、噴射ポンプと燃料弁での燃料圧力、針弁リフト量および燃焼圧力の計測データの比較例である。図3.bは、計測データを解析処理した噴射率と熱発生率を示している。図3.cは、噴射率と熱発生率の累積値について百分率で各正味平均有効圧力について比較例を示したものである。

3. 解析例およびその考察について

中速機関における燃焼解析例としては、燃焼割合に着目し近似燃焼遅れ曲線を用いた性能シミュレーションに応用した研究¹⁾、等容容器内での噴霧燃焼に基づいた現象論的な熱発生率の予測の研究²⁾、燃料噴霧を1個の液滴と仮定し燃料噴霧の有効燃焼速度係数による燃焼と熱効率の評価の研究などが報告されている。いずれにしても燃料噴射系と燃焼系の計測された出力情報の中に潜在している噴射率と熱発生率などの評価は、中速中小形ディーゼル機関の燃焼を解析する上で重要である。本節では新しい表現法を用いた解析例について考察する。

3.1 未燃焼割合による燃焼評価

<未燃焼割合の定義> 未燃焼割合 H_i は、下記の式で定義した。

$$H_i = 1 - \frac{\int dQ / Q_i}{\int dB / B_i} \quad (1)$$

ここで、 B_i は1サイクルの総燃料噴射量であり、 Q_i は計算処理により求めた燃焼終了角度までの熱発生率の累

***** PERFORMANCE DATA *****

***** RESULT OF COMBUSTION ANALYSIS *

FILE NAME (4)

0 LOAD PS
1 LOAD %
2 E.REV. rpa
3 T.REV. rpa
4 RACK rep.mm
5 R.mean mm
6 Sp.Gr. Samp
7 Ftemp Samp
8 F.O.C. L/h
9 Ftemp FLOW
10 Ftemp INJ.
11 Patm ata
12 Troom 'C
13 Tboost1
14 Tboost2
15 Pboost atg
16 Pexh.u atg
17 Pexh.l
18 Pexh.m atg
19 Texh#1 'C
20 Texh#2
21 Texh#3
22 Texh#4
23 Texh#5
24 Texh#6
25
26
27 Texh.m 'C
28 Tex.tu 'C
29 Tex.tl
30 Tex.tm 'C
31 Tex.to 'C
32 Dfw L/m
33 Tfw.i 'C
34 Tfw.o
35 Tv.i 'C
36 Tv.o
37 Dsw L/m
38 Tic.i 'C
39 Tic.o
40 Olo L/m
41 Tlo.i 'C
42 Tlo.o
43 Pmax.3 ata
44 Pmax.m
45 DIFF.P mm
46 I.V.W. Tw1
47 E.V.W. Tw2
48 LINER(P)Tw3
49 LINER(S)Tw4

FILE NAME (4)

P.R. Kg/cm2/m/s
Cm m/s
Pme Kg/cm2
Gfuel Kg/h
be g/PSH
be(N)
be(ISO)
H1 60°40BTDC
H2 40°20BTDC
H3 70°90ATDC
H4 90°110ATDC
48 INJ.START DEG
49 END
70 COMB.START DEG
71 END
72 INJ.DURATION
73 COMB.DURATION
75 Cinitmax DEG
76 Qht/Qht: 2 %
77 Cinitmin DEG
78 Qht/Qht: 3 %
79 Qht/Qht: INJ.END
80 Qht/Qht: TDC
81 Qht/Qht: Pmax
82 Qht: END cal/cyc
83 Qhtend/Qfuel %
84 Qhc/Qc
85 G Kg/h
86 Gair
87 CA(dP/dO)m DEG
88 (dP/dO)m Kg/cm2
89 CA(Pmax) DEG
90 Pmax Kg/cm2
91 CA(Ppmax) DEG
92 Ppmax Kg/cm2
93 CA(Pnmax) DEG
94 Pnmax Kg/cm2
95 Qfuel cal/cycl
96 Qe %
97 Qm
98 Qc
99 Qc(IC:WATER)
100 Qc(IC:AIR)
101 Qexh.
102 Qother
103 Qc(IC) SW/AIR %
104 Pm
105 Pm/Pmi
106 Vc

図2 作表アイテム出力例

図3.a 計測値比較例

図3.b 噴射率と熱発生率の比較例

図3.c 累積値比較例

積量である。 $\int dB$ および $\int dQ$ は、任意のクランク角度までの噴射量と熱発生量である。

＜ P_{me} 変更試験における未燃焼割合＞ 図4は、正味平均有効圧力 $P_{me} = 8.1$ から 16.2 kg/cm^2 まで変更したときの未燃焼割合の比較について示している。横軸は、着火角度を基点にした燃焼期間を表わしており、クランク角度に相当する。未燃焼割合は、領域a、領域b、領域cに区分できる。領域aでは、着火後、急激に未燃焼割合が減少し、領域aとbの遷移域では低負荷ほど変曲の様子が顕著である。領域bでは直線的に未燃焼割合が減少し、領域cでは湾曲を描きながら滑らかに下降する。領域aは予混合燃焼域に対応し、領域bは拡散燃焼域に対応し、領域cは燃料噴射終了後の燃焼域に対応する。領域aとbでは、 P_{me} の影響による減少勾配の差異が明確でない。しかし、領域cでは、着火時期が遅れ噴射期間が短い低負荷において湾曲期間が長くなる傾向がある。機関はシリンダ径が240 mmの中速中小形ディーゼル機関であり、機関の回転数が720 rpmであり、燃料は船用A重油に相当する。

図4. 未燃焼割合
(P_{em} 変更試験)

＜高圧高噴射率機関での未燃焼割合＞ 図5は、図4の機関に比較して高圧で高噴射率の燃料噴射系を持つシリンダ径220 mm機関での未燃焼割合を示している。燃料は、船用A重油相当の燃料Aと熱分解系低質重油Cである。未燃焼割合の時間的経過は図4と同様に三領域に区分できる。燃料AとCによる差異については、領域aからbに移る部分および燃料噴射終了後の領域cで見られ、低質油Cの場合が若干未燃焼割合が大きい。しかし、拡散燃焼域に対応する領域bではほとんど重なっている。図4と図5を比較すると領域aでの減少勾配については差異が見られないが、領域bでは高圧高噴射率機

関での減少傾向が顕著に見られる。燃焼期間は、明らかに図5の機関が著しく短い。

図5 未燃焼割合 (高圧高噴射率機関
での燃料変更)

3.2 燃焼噴射終了後での未燃焼量の減少 図6は、図4の領域cについて燃焼室内に残存する未燃焼量の観点から示したものである。横軸は、燃料噴射終了時を始点とし、燃焼終りを終点とした無次元燃焼期間である。縦軸は、燃料噴射終了時に燃焼室内に残存する未燃焼量に対する割合を百分率で示している。 M_{tail} が燃料噴射終了時の残存未燃焼量であり、 $(M_{tail} - M_t)$ が任意の時刻での未燃焼量である。便宜上、残存未燃焼量は、燃料噴射終了から燃焼終了までの期間の熱発生率の累積

図6 燃料噴射終了後の未燃焼量の減少傾向

量から求めた。残存未燃焼量の減少傾向においては、正味平均有効圧力 P_{me} が低いほど湾曲のくぼみの程度が大きくなる。いずれの P_{me} においても残存未燃焼量に着目することにより実測結果に基づく関数近似ができるものと考えられる。

4. む す び

ディーゼル機関の設計・開発では、実験データを敏速に処理しその情報をフィードバックすることが重要である。その試みとして、著者らは実験の現場でオンラインリアルタイムで噴射率と熱発生率に潜在する情報を得る手段としてパソコン支援による簡易燃焼解析システムを構築した。この実験範囲内では、下記の知見を得ることができた。

(1) 二種の実験機関において定義した未燃焼割合 H_i により燃料噴射系と燃焼系の相関に関する情報を得るこ

とができた。未燃焼割合 H_i の時間的経過については、予混合燃焼域に対応する領域 a, 拡散燃焼域 b, 燃料噴射終了後の燃焼域 c の独特の特徴を持つ三領域に区分できる。

(2) 燃料噴射終了後の燃焼域 c では、燃焼室内に残存する未燃焼量の観点から実験結果を整理することができる。残存未燃焼量の時間的な減少経過は、燃料噴射終了時から燃焼終了時までの燃焼期間を無次元表示することにより表現できる。この領域は、実測結果に基づいて容易に関数近似ができるものと思われる。

文 献

- 1) 永井他, 舶機誌, 5-1 (昭 45-1)
- 2) 田辺他, 機論, 49-437 (昭 58-1)
- 3) 下津他, 機論, 51-461 (昭 60-1)