予燃焼室形ディーゼル機関の低回転数域
における数次燃焼現象*

(その実態究明と燃焼火炎分光スペクトルの測定)

永瀬和彦^{*1}, 舟津浩二^{*1}, 村山眞悟^{*2}Phenomena of Multi-Stage Ignition in the Pre-combustion Chamber Type
Diesel Engine in Low Speed Ranges(Investigation into the Cause of the Phenomena and Measurement of
the Spectra Emitted in the Combustion Chamber)

Kazuhiko NAGASE, Kohji FUNATSU, Shingo MURAYAMA

When a precombustion chamber type Diesel engine was operated under light loads and at low speeds, ignition flames were observed generating in the main combustion chamber in several stages (during each injection period). The authors, by means of inserting an optical fiber probe into the combustion chamber, investigated the real state and cause of the phenomena, and confirmed a number of spectra existing in those flames.

Key Words: Diesel Engine, Diesel Combustion, Pre-combustion Chamber, Spectrum Analysis, Injection Pressure

1. 緒言

副室を持つディーゼル機関の燃焼解明のために行われている多くの研究¹⁾により、その複雑な燃焼の実態が次第に明らかにされつつある。しかし、これらの研究は多くの設備を要し、手軽に実際の機関に適用するのは難しい。筆者等はさきに光ファイバを実機の燃焼室に挿入することによって、限られた波長ではあるがディーゼル火炎の分光スペクトルを容易に測定する方法を提案した²⁾。本研究においては、上記の方法を予燃焼室ディーゼル機関に適用した際、見出された「低負荷、低回転数域に限って主燃焼室で数次にわたり火炎が観測される現象(以下「数次燃焼」という)」の実態を究明し、さらに、これらの火炎に複数のバンドスペクトルが存在することを確認した。

2. 実験装置

本報で使用した実験装置の概略をつぎに示す。

2・1 供試機関 使用した機関は、主要緒元を表1に示す DMH15HS形機関をモデルにした実験用単筒機関で、ワード・レオナード式電動機がこれに直結し、始動、動力吸収及び回転数制御を行う。過給機はなく、これに代え、独立の送風系から、モードに応じた所定の温度及び圧力に設定された空気を供給する。

2・2 燃料噴射制御装置 供試機関に付属するいつ流式燃料噴射ポンプを用いるとともに、併せて、筆者等が先に提案した噴射圧により噴射量を制御する燃料噴射制御装置³⁾ (以下「噴射圧制御装置」という)を使用した。

表1 機関の諸元

Principal of Dimension	Rating
No. of Cylinder	6
Bore × Stroke (mm)	140 × 160
Rating Power (kw/rpm)	140 / 1600

* 昭和62年3月14日 関西支部第62期定時総会講演会において講演, 原稿受付 昭和61年7月24日。

^{*1} 正員, (財)鉄道総合技術研究所 (〒181 国分寺市光町3-8-38)。

^{*2} 宇宙開発事業団 (〒105 東京都港区浜松町2-4-1)。

2・3 光ファイバを用いた燃焼解析装置 図1は本装置の概念図であって、内部に耐熱性石英光ファイバを封入した特殊な金具を図のように予燃焼室と主燃焼室に挿入する。入射面における視野は約20度である。光ファイバにより外部へ導いた火炎の光エネルギーはそのまま、あるいは分岐バンドル光ファイバを用いて複数に分波したのち、特定波長の光のみをよく透過する半値幅約50nmの干渉フィルターを前置した応答性のよい受光素子で電気的出力に変換する。光ファイバの火炎入射面（窓）に付着する煤による光透過減衰量（以下「透過損失」という）の評価方法は既報²⁾と同一である。運転中、透過損失が殆ど変化しない特定モードでは、これに加え、図1の予燃焼室にその実施例を示すような火炎分光方法を併用した。この方法では火炎の光エネルギーを光ファイバで半値幅0.5nmの分光器へ導き、運転中に逐次（同時ではない）分光した火炎を光電子増倍管で電気的エネルギーに変換して記録する。

3. 数次燃焼現象

3・1 噴射圧制御装置使用時の数次燃焼 噴射圧制御装置を用い、供試機関を中速（1200rpm）で運転すると、概ね25%以下の低負荷域では、噴射圧が高い場合主燃焼室では火炎を殆ど観測出来ない⁴⁾。この現象は低速域ではより顕著となる。図2はその例として、図示の条件下で噴射圧を11.8MPa から約2.0MPa毎に設定したときのもので、線図は上から噴射弁ニードルリフト、シリンダ内圧（2.0MPa/Div）、予・主の両燃焼室の火炎の状況（任意5回重複撮影）、クランク角度を示す。フィルターの中心波長は950nm、クランク角度は10度（但しTDC 前後10度については5度毎）である。空気過剰率は8.2であり、同一モードの下での実機の値が6.0前後であるのに比べやや高い。これは実験装置付属の送風機においては、微量の給気量制御が困難なためである。

主燃焼室の弱い火炎をなるべく正確に検知するため図2においては、噴射圧が11.8MPa のとき火炎の増幅率は予燃焼室火炎の4倍に、13.7～15.7MPa では10倍に、それ以上の噴射圧では100倍に設定してある。このように増幅率を上げても、噴射圧が高いと主燃焼室

図1 光ファイバによる火炎分光法概念図

図2 噴射圧を変化させた時の燃焼火炎の変化（800rpm、負荷：25%、噴射量：0.042cm³/st.）

の火炎は殆ど観測出来ないが、噴射圧17.7MPa のとき、主燃焼室は2次にわたっての僅かな火炎の発生、すなわち、数次燃焼現象が認められる。

3・2 いつ流式ポンプ使用時の数次燃焼 このような数次燃焼がたまたま今回用いた噴射圧制御装置による特殊な噴射条件の下でのみ発生しているとも考えられた。そこで、同じ機関に従来のいつ流式ポンプを適用し、いろいろな条件の下で運転したところ、最も顕著な数次燃焼が生じたケースを図3に示す。図は負荷50%とし、噴射時期を本来は1200rpm 以上の回転数域で使う-37.5℃A に設定したまま、回転数を低下させた時の予・主の両燃焼室の火炎（中心波長1550nm）の状況を示す。1000rpm ではその存在が殆ど認められなかった主燃焼室での数次燃焼が回転数の低下とともに次第に明らかとなり、800rpmでは顕著に発生している。なお、この時の噴射圧最高値は約17.7MPa で、前号の実験で数次燃焼が発生した時の値と同じであり、

空気過剰率は2.8である。しかし、これらのデータだけでは、両燃焼室の火炎の詳細な挙動などは明らかではない。

4. 実験結果と考察

4.1 数次燃焼の発生原因 図2及び図3に示すように数次燃焼が発生した際のニードルリフトの状態に異常は認められないので、本現象の発生原因は噴射系にはないと思われる。そこで、図3で最も顕著な数次燃焼が発生した回転数800rpmのときの両燃焼室の燃焼行程100回平均の分光スペクトルの変化を調べた。その結果を図4及び同図を波長の平面で裁断した図5（噴射期間を併記してある）で示す。測定波長は測定器材の関係で両燃焼室とも4波に限定した。測定値は透過損失の補正がしてあり、それぞれの波長の透過損失を図4上部に示す。

予燃焼室の分光照度は高く、強い火炎が発生したこ

図3 回転数を変化させたときの数次燃焼現象の発生状況

図4 数次燃焼発生時の両燃焼室の火炎分光スペクトル (立体図)

とを示している。しかし、窓への煤の付着も図示のように著しい。このため、可視域 (550nm) の照度測定は出来なかった。主燃焼室は両図に示すようにほぼ3次に分かれ断続的な燃焼が行われているが、この間、予燃焼室は安定した燃焼が行われている。

廣安等の研究¹⁾によれば、副室における燃焼は「噴射時期を早めると、着火時期の遅延による主燃焼室への燃料流失の減少及び主燃焼室との連絡孔からの吹上げによる副室内燃料の分散促進により、着火後の火災の広がりが急激になる」とされる。図2に示す事例において、噴射圧が高いとき主燃焼室で火災が観測されない理由も高圧噴射により予燃焼室内での燃料分散が促進され、その結果、予燃焼室内だけで急激な燃焼が行われるためと推定される。そして、噴射圧を17.7MPa付近に設定すると、燃焼の大部分が予燃焼室で、残り一部が主燃焼室で行われることとなり、数次燃焼が発生すると推定した。

一方、図3で最も顕著な数次燃焼が発生した回転数800rpmの時の噴射圧最高値は先に述べたように図2で数次燃焼が生じたときの噴射圧と同じであった。このように数次燃焼が生じ易い噴射圧の下で、噴射時期を早めた結果、着火遅れの増大及び主燃焼室連絡孔からの気流吹上げなどにより図2に比べ2倍の燃料が噴射されたにもかかわらず、予燃焼室で激しい燃焼が行われ、これが顕著な数次燃焼に結び付いたと推定した。

図5 数次燃焼発生時の両燃焼室の火災分光スペクトル (平面図)

4.2 上死点付近での火災の消滅 図5に示すように、数次燃焼火災は上死点付近では完全に消滅している。この原因の一つは予燃焼室への強い気流の吹上げであろう。廣安等によれば、主燃焼室の燃焼は「噴射時期を早めると噴孔がピストンに接近しその冷却作用を受けるため茶褐色の火災が観測される」とされる。本事例では、気流吹上げに加えてピストン冷却効果などにより火災が消滅したと思われる。図3の他の事例でも、上死点付近では主燃焼室の火災はほとんど全て消滅している。

4.3 火災分光スペクトル 数次燃焼が発生する800rpm, 50%負荷の下で長時間運転をした結果では、透過損失の変化は認められなかった。このような状態の下では、図1に示した分光器を用い逐次分光を実施しても火災の正確な分光スペクトルを採ることが出来る。そこで、この方法を導入し、いつ流式ポンプを使用し、上記モードでの数次燃焼火災の分光スペクトルを測定した結果を図6に示す。値は行程100回の平均値で透過損失の補正がしてある。測定波長の間隔は約20nm毎だが、照度変化の激しい波長域では間隔をより細かく、変化の少ない所ではより粗くしてある。この図は、数次燃焼火災の特定波長域及び特定の行程にバンドスペクトルが存在することを示している。

これをより明確にするため特定行程で見た図6の断面図を図7に示す。図から C_2H_2O 等のバンドスペクトルを認めることが出来る。なお、波長の若干の誤差は分光器の回折格子駆動系の徒動によるものである。図8はこれらのバンドスペクトルの行程による変化を示す。50°CA付近での H_2O スペクトルに見られるように

図6 数次燃焼発生時の主燃焼室の火災分光スペクトル

図7 数次燃焼発生時の主燃焼室のバンドスペクトル発生状況

特定の行程でこれらが顕著に発生していること、波長の短いバンドスペクトルほど最高値が僅かではあるが行程の早い時期に偏って発生していること、その傾向は第3次の燃焼では比較的明瞭であることなどが判る。特定の行程では上記以外のバンドスペクトルも存在する模様だが、確定は出来なかった。

伊藤等の研究³⁾によれば、「軽油バーナーの火炎は当量比が小さくなるにつれバンドスペクトルである C_2 、 CH 、 CH_2O ラジカルの特徴が出る」とされる。本例でも、これと同様に予燃焼室から噴出した僅かな火炎又は燃料が高い空気過剰率の下で燃焼したため明瞭なバンドスペクトルが観測出来たのであろう。図7において空気過剰率の高い上死点前8度でバンドスペクトルが最も顕著に現れているのはこのためと推定される。

以上のように、従来から煤などにより測定が困難とされてきたディーゼル火炎のバンドスペクトルを測定するには、高い空気過剰率の下で火炎を燃焼させる方法、例えば、数次燃焼のように僅かな火炎を副室等から噴出させる本方法をとれば、比較的容易にその実施が出来ると推定される。

5. 結 語

予燃焼室形ディーゼル機関の燃焼室に光ファイバを挿入し、低回転数域における燃焼解析を行った結果、次のようなことが判った。

1) 機関を低負荷、低回転で運転すると、特定の条件の下で、主燃焼室に数次にわたって火炎が観測さ

図8 数次燃焼発生時の主燃焼室バンドスペクトルの行程による変化

れる現象(数次燃焼)が発生する。

2) 数次燃焼は主燃焼室との連絡孔からの気流吹上げと比較的高い圧力による噴射により予燃焼室内における燃料の拡散が促進され、大部分の燃焼が予燃焼室で、残り一部の燃焼が主燃焼室で行われる結果、生ずると推定される。

3) 上死点付近において数次燃焼火炎が消滅する主な理由は、主燃焼室との連絡孔から予燃焼室への気流の吹上げとピストンによる冷却効果と想定される。

4) 数次燃焼火炎には C_2 、 H_2O 等のバンドスペクトルが含まれていることを確認した。

本研究の実施に際しては慶応義塾大学佐藤豪及び川口修教授、同志社大学藤本元教授並びに東京電機大学吉田亮助教授から多くの御教示を得た。実験の実施に際しては磨田啓氏、昭和60年度東京電機大学卒業生島居芳樹、林真吾、松本俊也の各氏をはじめとする多くの方々の御協力を得た。ここに深謝の意を表します。

文 献

- 1) 例えば廣安ほか2名：第5回内燃機関合同シンポジウム講演論文集、No.119(昭60)
- 2) Nagase K. et al.: Trans. SAE No.851560
- 3) 永瀬・福島：機関論, 51-470, B, (昭60), 3252
- 4) 永瀬ほか3名：第940回熱工学講演会講演論文、No.114B(昭60.11), 機関論掲載予定
- 5) 伊藤ほか4名：機関論, 51-465, B, (昭60) 1731

討 論

〔質問〕 池 上 詢〔京都大学工学部〕

火炎が一度とぎれる現象が低速でおこることは知られていると思う。つまり着火遅れが長いと未燃のまま混合気が主室に達し、そこで一気に燃えて副室の圧力と釣合い一時火炎がとだえと考えられるがいかがか。また、後半の輝度の変動は視野の大きさとの関係があると思われるがどうか。

〔回答〕 ご指摘いただいた現象^(付1)では、着火時期は上死点後となっており、しかも、主燃焼室内の火炎はほとんどの場合、途切れてはいない。しかるに、数次燃焼においては第1燃焼の主室火炎は完全に途切れており、その時期も不整燃焼の影響を受けることなくすべて上死点附近に集中している。したがって、主室火炎の一次燃焼の途切れの主因は、やはり主室から予

室への気流の吹上げとピストンすきまの狭少化であると思う。しかし、二次、三次燃焼の間の途切れはご指摘のことも一因であろうと考えている。

輝度の変化には、ご指摘のようなことも一因に含まれていると思う。これが輝度にどの程度影響を及ぼしているのかは、残念ながらよくわからない。しかし、同一方法で調べた同一機関の主室燃焼期間と噴射期間(噴射圧)および排気温度などとの関係^(付2)をみると、整合性のとれたものとなっている。したがって、この方法で得た主室の燃焼データは実態を比較的よく表したものと考えている。

(付1) 長尾・ほか2名, 機論, 24-144 (昭33), 599.

(付2) 永瀬ほか1名, 機論, 53-486, B (昭62), 659.