G071022

急速圧縮膨張装置を用いた天然ガスデュアルフュエル燃焼の解析藤井 拓磨^{*1}, 松川 裕哉^{*2}, 川那辺 洋^{*3}, 石山 拓二^{*3}**Analysis of Combustion Process in a DDF Engine
Using a Rapid Compression/Expansion Machine**Takuma FUJII^{*1}, Yuya MATSUKAWA, Hiroshi KAWANABE and Takuji ISHIYAMA^{*1} Graduate School of Energy Science, Kyoto University
Yoshida Honmachi, Sakyo-ku, Kyoto, 606-8501, Japan

Combustion of diesel dual fuel (DDF) was investigated using a rapid compression/expansion machine (RCEM). Ignition and spreading of burnt gas region were visualized by a high-speed color digital camera. According to the visualized images, auto-ignition occurs in the pilot-spray with a part of natural gas mixture, then the burnt gas, which is observed as a bright white region, spreads out. In the latter period of the combustion, a dark region, which corresponds to a hydrocarbon emission, still remains between the sprays. For a case of early injection, the burnt gas quickly moves out from a piston bowl to a squish area, so that the natural gas mixture in the center of the bowl does not burn completely. For a case of two-stage injection, injected fuel of the first part diffuses into the natural gas mixture and the combustion.

Key Words : Gaseous Fuel, Diesel Dual Fuel Engine, Pilot Injection, Rapid Compression/Expansion Machine

1. は じ め に

軽油噴霧を着火源とする天然ガスデュアルフュエル機関では、低負荷時に天然ガス予混合気の燃焼が不十分となり、出力が低下するとともに大量の未燃炭化水素が排出されるといった問題がある^{(1),(2)}。軽油および天然ガスの量を調整し理論空燃比で燃焼を行うことにより、未燃炭化水素の排出を低減することができるが、燃料消費率は軽油のみで運転した場合に比べて悪化する。また、高負荷では排気温度が、低負荷では燃焼変動率が大きくなることが問題となり、中負荷以外では軽油のみで運転しなければならない⁽³⁾。天然ガスデュアルフュエル機関において高効率を実現しながら未燃炭化水素の排出を防ぐには、パイロット軽油噴霧や天然ガス量について適切な制御指針を立てて運転しなければならないが、未燃炭化水素排出のメカニズムに関する知見はいまだ充分ではない。このメカニズムの解析には、天然ガスデュアルフュエル燃焼において、筒内の平均的な状態だけでなく、軽油の自着火ならびに天然ガス燃焼における火炎の空間分布を知ることが非常に重要である。

本研究では、未燃炭化水素が多く排出される中・低当量比を対象に、パイロット噴射の適正化に関する知見を得ることを目的とし、天然ガスデュアルフュエル機関の着火燃焼過程を調査した。実機関よりも高い可視化の自由度を有するとともに残留ガスなどの影響を受けずに試験を行える急速圧縮膨張装置 (RCEM) を用いた。この急速圧縮膨張装置を用いて一回の燃焼を行わせ、筒内の圧力履歴を調べると同時に、高速度カメラを用いて筒内の直接撮影を行った。得られた圧力履歴と噴霧火炎の撮影画像をもとに、パイロット噴射条件を変更した際、これらが燃焼過程に与える影響を調査した。

^{*1} 学生員, 京都大学大学院エネルギー科学研究科 (〒606-8501 京都府京都市左京区吉田本町)

^{*2} 京都大学大学院エネルギー科学研究科

^{*3} 正員, 京都大学大学院エネルギー科学研究科

E-mail: fujii.takuma.48w@st.kyoto-u.ac.jp

2. 実験装置および方法

実験には、単気筒ディーゼル機関をベースとして、これに合成石英ガラス製の可視化窓を備えるシリンダヘッドと外部駆動用モータを取り付けた急速圧縮膨張装置（RCEM）を用いた。装置系統図を図1に、機関諸元を表1に示す。機関回転数は1200 rpmとし、主燃料には13A天然ガス、パイロット燃料にはJIS 2号軽油を用いた。混合タンク内にあらかじめ組成を調整して作成した天然ガス、空気（N₂: 79%, O₂: 21%）からなる混合気を筒内に吸入、圧縮し、そこへ軽油を噴射して1サイクルのみ燃焼させる。軽油はピエゾ式インジェクタを含むコモンレール式燃料噴射装置を用いて筒内へ噴射する。コモンレール圧力は90 MPaとした。なお、軽油噴射を行わない場合には圧縮上死点で筒内平均温度が880 K、圧力が4.28 MPaとなる。筒内の撮影は、図2に示すようにエンジンヘッドに取り付けたガラス窓から高速度カラーカメラ（PhantomV710）を用いて行う。撮影のフレームレートは33000 fps、露光時間は8μsとした。このとき、可視化領域は図3に示すとおりであり、六噴孔ノズルから形成される噴霧の一噴霧とその周辺について、噴孔付近からスキッシュエリアまでを可視化できる。

3. 実験結果

3・1 単段パイロット噴射における燃焼過程

パイロット噴射時期が燃焼過程に与える影響を調べるために、総括当量比 $\phi = 0.5$ においてパイロット噴射開始時期を $\theta = 0, -5, -10, -15, -20, -25, -30$ °ATDCに変更し実験を行った。軽油の噴射量は5 mm³とし、噴射期間は1.5°CAであった。それぞれの筒内圧力 p と熱発生率 $dQ/d\theta$ のクランク角経過を図4に示す。

Fig.1 Schematic diagram of experimental apparatus

Fig.2 Schematic of optical arrangement

Table 1 RCEM specification

Engine Type	Direct injection Single cylinder
Bore x Stroke	102 x 105 mm
Displacement	857 cc
Compression Ratio	14.9
Combustion Chamber	Toroidal Type
Injection System	Common-rail (max.pressure:180 MPa)
Injector	Piezo actuated φ0.18 mm x 6 holes - 150°

Fig.3 Visualization area (top view)

Fig.4 Temporal histories of in-cylinder pressure p and heat release rate $dQ/d\theta$ for combustion with single-stage pilot injection.

Fig.5 Visualization images for combustion with single-stage pilot injection.

まず $\theta_i = 0, -5, -10, -15, 20$ °ATDC について述べる。燃焼初期では、いずれの噴射時期でも低温酸化反応と見られる弱い熱発生があり、その後、急峻な熱発生が見られる（以下、初期燃焼と呼ぶ）。初期燃焼後、なだらかな熱発生が見られ、ピークが見られる（以下、主燃焼と呼ぶ）。このように、これらの噴射時期では熱発生率経過に2つのピークが見られる。一方、噴射時期の比較的早い $\theta_i = -25, -30$ °ATDC では、初期燃焼と主燃焼の区別ができず、熱発生率のピークは1つしか見られない。噴射時期が遅い条件に対し、熱発生率上昇も緩やかになっている。以下、熱発生率経過に2つのピークが見られるパイロット噴射開始時期 $\theta_i = -10$ °ATDC を標準条件とする。

次に、 $\theta_i = -5, -10, -25$ °ATDC における筒内撮影画像をそれぞれ図 5(a),(b),(c) に示す。各画像右上に表示した値はクランク角（°ATDC）である。標準条件および $\theta_i = -5$ °ATDC の条件では、着火時に噴霧軸上の一部に輝炎発光が見られ、噴霧軸方向に火炎が広がっていることがわかる（①）。図 4 よりこの部分が初期燃焼に対応することから、初期燃焼は軽油噴霧の予混合的燃焼であると考えられる。またこのことから主燃焼では、初期燃焼時の噴霧火炎によって着火した天然ガス予混合気が燃焼していると考えられる。 $\theta_i = -5$ °ATDC では初期燃焼時の火炎は、標準条件と比較して噴霧下流でより広範囲に広がっている（②, ③）。これは、 $\theta_i = -5$ °ATDC の場合は着火遅れが短く、周囲気体をエントレインした噴霧先端から順次自着火に至るためと考えられる。また、筒内には時計回りに弱いスワール流が存在するため、画像右から左に向かって火炎が移動している。 $\theta_i = -25$ °ATDC では、着火時から燃焼後期までほとんど輝炎発光が見られない。これは、噴射時期が早くなるほど着火遅れが長くなるため、着火時期では軽油と周囲気体の混合が進み、燃料過濃領域が減少したためと考えられる。またこの混合の促進によって、図 4 でも見られたように、主に軽油噴霧の着火である初期燃焼と天然ガスが主体となる主燃焼の区別ができなくなる。標準条件および $\theta_i = -5$ °ATDC では、初期燃焼から主燃焼に移行する時期になると輝炎発光は弱くなり、可視化領域中央からキャビティ壁にかけて白く見える部分が存在する（⑤, ⑥）。この部分は、天然ガス混合気の既燃部であると考えられる。標準条件および $\theta_i = -5$ °ATDC では、主燃焼後期において軽油噴霧間にはこの

Fig.6 Temporal histories of heat release rate $dQ/d\theta$ for combustion on DDF and without NG condition.

Fig.7 Visualization images for combustion on without NG condition.

白い発光のみられない領域が存在する。このことから、着火遅れが比較的短くなるような噴射時期が遅い条件では、軽油噴霧間の天然ガス混合気が未燃物質として排出される可能性がある。 $\theta = -25^\circ\text{ATDC}$ ではこの既燃部がスキッシュエリアにも及んでいるが、反対にピストン中心部には少ない。これは、噴射時期が早いため、軽油噴霧はスキッシュエリアに到達出来るが、筒内流動が小さいことから大部分がキャビティ壁周辺に滞留するためと考えられる。

図6に、標準条件において、天然ガスを供給しないでパイロット軽油のみの燃焼を行ったときの熱発生率のクランク角経過をデュアルフュエル燃焼と比較して示す。デュアルフュエル燃焼は軽油のみの燃焼に比べて着火遅れが長い。これは、デュアルフュエル燃焼の場合、空気より比熱比の小さな天然ガスを混合することで、本実験の場合パイロット噴射時に圧縮温度が15 K程度低下するのに併せて、軽油噴霧がセタン価の低い天然ガスをエントレインするためと考えられる。またデュアルフュエル燃焼の初期燃焼の熱発生率のピークは、軽油のみの熱発生率のピークよりも大きい。これから、軽油噴霧が天然ガスをエントレインし、初期燃焼時に軽油と天然ガスが同時に燃焼したことがわかる。標準条件における軽油のみの燃焼を行ったときの筒内撮影画像を図7に示す。これは、図5(b)に対し着火遅れの違いを考慮したクランク角について表示した。図5(b)と図7を比較すると、デュアルフュエル燃焼の場合は軽油のみの場合に比べて、着火時に見られる輝炎発光は弱いことがわかる。これは、デュアルフュエル燃焼の場合は軽油のみの場合に比べて着火遅れが長いことから、軽油噴霧と空気の混合が促進されるため燃料過濃領域が減少し、輝炎発光が弱くなるためと考えられる。また燃焼後期における白い既燃部は全く見られない。このことから、白い既燃部は天然ガス予混合気の燃焼によるものであることが分かる。

3・2 二段パイロット噴射における燃焼過程

パイロット噴射を2回に分割して行った際の燃焼過程について調査した。総括当量比を $\phi = 0.5$ とし、一段目の噴射量を $q_1 = 3 \text{ mm}^3$ 、二段目を $q_2 = 2 \text{ mm}^3$ とした。このとき、一段目噴射期間は 1.19°CA 、二段目噴射期間は 0.97°CA であった。一段目のパイロット噴射時期を $\theta_1 = -30^\circ\text{ATDC}$ とし二段目噴射時期を $\theta_2 = 0, -10, -20^\circ\text{ATDC}$ としたときの筒内圧力と熱発生率のクランク角経過を図8に示す。これによると、単段噴射の場合と同様に初期燃焼および主燃焼のピークが見られる。初期燃焼の熱発生率のピークは $\theta_2 = 0^\circ\text{ATDC}$ で最大となり、主燃焼の熱発生率のピークは二段目噴射時期が早いほど大きく、 $\theta_2 = -20^\circ\text{ATDC}$ で最大となる。図4, 8から θ_2 と θ が一致する条件の熱発生率経過を比較すると、初期燃焼の熱発生率のピークは、二段噴射条件では単段噴射条件の場合よりも小さくなる傾向が見られる。これは、二段目の噴射量が単段噴射に比べて少なく、初期燃焼時に燃焼する軽油が少ないためと考えられる。また主燃焼の熱発生率のピークを比較すると、二段噴射条件では単段噴射の場合よりも大きくなる傾向が見られる。これは、一段目に噴射された軽油の拡散によって、広がりを持った着火源を形成することや、主燃焼においても拡散した一段目の軽油の燃焼が続いているためと考えられる。

次に、 $\theta_1 = -30^\circ\text{ATDC}$ 、 $\theta_2 = -10^\circ\text{ATDC}$ としたときの筒内撮影画像を図9に示す。図9から、着火時に可視化領域上部から中央にかけて噴霧軸上に輝炎発光が見られる。また可視化領域中央部からキャビティ壁にかけて噴霧

Fig.8 Temporal histories of in-cylinder pressure p and heat release rate $dQ/d\theta$ for combustion with two-stage pilot injection.

Fig.9 Visualization images for combustion with two-stage pilot injection ($\theta_1 = -30^\circ\text{ATDC}$, $\theta_2 = -10^\circ\text{ATDC}$).

軸上に火炎が見られる。図9と図5(b)を比較すると、二段噴射の場合は、初期燃焼時の火炎の広がり小さく、キャビティ壁付近でその差が顕著である(②)。これは、単段噴射条件よりも初期燃焼時に燃焼する軽油の量が少ないことによると考えられる。しかし、主燃焼時には初期燃焼時よりも火炎の範囲が広がり(④, ⑤)、図5(b)における主燃焼時の画像と比較しても明るいことがわかる。これは、一段目に噴射された燃料によって天然ガスの燃焼が促進されたことによると考えられる。

4. ま と め

RCEMを用いて天然ガスデュアルフュエル燃焼を行わせ、筒内直接撮影からその燃焼過程を調査した。以下に得られた知見を示す。

- (1) 単段噴射条件の場合、パイロット噴射時期が遅い条件では着火時に輝炎発光がみられ、その後噴霧軸周辺で天然ガス予混合気は燃焼し、既燃部は火炎の位置と対応している。噴射時期が早い条件では、輝炎発光はほとんど見られず、キャビティ壁周辺やスキッシュエリアに既燃部が見られる。
- (2) $\theta_1 = -5, -10^\circ\text{ATDC}$ の筒内撮影画像から、着火遅れが比較的短くなる遅い噴射時期の条件では、軽油噴霧間の天然ガス混合気は未燃物質として排出される可能性がある。
- (3) DDF燃焼と軽油のみの燃焼の比較から、DDF燃焼では初期燃焼時に軽油噴霧にエンタレインされた天然ガスも同時に燃焼していると考えられる。
- (4) 二段パイロット噴射では、主燃焼時において初期燃焼時に見られた火炎が広がり、キャビティ内の火炎が単段噴射の場合と比較しても明るく、主燃焼がより活発になっている。

5. 引 用 文 献

- (1) Karim, G.A., An Examination of Some Measures for Improving the Performance of Gas Fuelled Diesel Engines at Light Load, SAE Paper No.912366, (1991)
- (2) 中山, 岡本, 他4名, 天然ガスデュアルフュエルディーゼル機関の性能・排気ガス特性の改善, 自動車技術会講演論文集, Paper No.9739165, (1997), 141-144
- (3) Taniguchi, S, et al.: Feasibility Study of Exhaust Emissions in a Natural Gas Diesel Dual Fuel (DDF) Engine, SAE Paper No.2012-01-1649, (2012)