

# 非定常ガス噴流の混合気形成および燃焼過程に関する研究

研究担当者

辻村 拓 三上 祥平 阿知波 統久 大田 篤志

2002 研究概要

## 1. 研究背景および目的

化石燃料の枯渇や環境問題が広く指摘されている今日、高効率かつクリーンなエネルギーの利用法を構築する必要があり、化石燃料に代わる新たなエネルギー源としてガス燃料が注目されている。特に水素は炭素原子を含まないため、燃焼において HC, CO, CO<sub>2</sub>, および PM の排出を生成せず、水のみを生成するため、非常にクリーンなエネルギーとして注目されている。水素を内燃機関に適用するにあたり、予混合吸気火花点火機関においては、局所高温部で異常燃焼が発生して機関性能が制限されるため、水素は筒内直接噴射式ディーゼル機関への適用が望ましい。現在までに、非定常ガス噴流特性に関する研究は数多くなされているが、高圧雰囲気場面に高噴射圧力で噴射された噴流特性に関する知見は少ない。

そこで本研究では、筒内直接噴射式ディーゼル機関を模擬した雰囲気場における水素の噴流特性を把握し、さらに噴射および雰囲気条件に影響される水素噴流の自着火特性の解明を目的とする。

## 2. 解析項目

### 2.1 非定常水素噴流特性

筒内直接噴射方式において、噴射および雰囲気条件は水素の噴流形成に大きく影響を及ぼす。そこで、窒素を充填した室温高圧の雰囲気場へ高圧噴射される水素噴流をシャドウグラフ撮影により観測し、噴射および雰囲気条件が水素の噴流発達過程に及ぼす影響について調べた。

### 2.2 水素噴流の燃焼特性

水素の噴流発達過程は、自着火遅れおよび着火後の燃焼過程に大きく影響を及ぼす。そこで、定容燃焼容器を用いて、噴射圧力および雰囲気中の酸素モル分率を変化させた条件での水素噴流の自着火遅れ期間の測定を行なった。また、水素噴流の火炎形状、および火炎の発達過程を把握するために直接撮影を行なった。

## 3. 実験結果および考察

### 3.1 非定常水素噴流特性

#### (1) ガス噴流の観察

図1は噴孔径  $d_n=0.7\text{mm}$  の噴射ノズルを用いて、雰囲気密度  $\rho_{amb}=11.25\text{kg/m}^3$  の窒素雰囲気中に噴射圧力  $p_{inj}=8\text{MPa}$  で水素を噴射した時のシャドウグラフ撮影結果である。図1より、ノズル近傍では、噴流と雰囲気気体の境界は比較的滑らかであるが、下部においては境界での乱れが大きくなっており、周囲気体との混合が活発になっていることがうかがえる。

#### (2) 先端到達距離の運動量理論値との比較

ディーゼル噴霧では、噴霧先端到達距離に関する半実験式として和栗らの運動量理論が広く用いられている。運動量理論では次の事項を仮定している<sup>(1)</sup>。

・油粒と噴霧を構成する空気との相対速度は無視できる。

・燃料噴霧は一定の噴霧角  $2\theta$  を持つ。

・ノズル径が噴霧の大きさに比べて十分小さい。

この運動量理論を用いると、噴霧先端到達距離  $x$  は次式で示すことができる。

$$x = a \cdot (C_D \cdot \rho_{inj} / \rho_{amb})^{0.25} \cdot (d_n \cdot u \cdot t / \tan \theta_{ave})^{0.5} \quad \dots (3-1)$$

ただし、 $x$ : 到達距離 [mm],  $C_D$ : 流量係数 [-],  $\rho_{inj}$ : 燃料密度 [ $\text{kg/m}^3$ ],  $\rho_{amb}$ : 燃焼室内密度 [ $\text{kg/m}^3$ ],  $\theta_{ave}$ : 平均噴霧拡がり角 [deg.],  $d_n$ : 噴孔径 [mm],  $u$ : 噴射速度 [mm/msec],  $t$ : 時間 [msec],  $a$ : 実験定数 (1.78) [-]。

図2に噴孔径  $d_n=0.7\text{mm}$  のノズルを用いて、雰囲気密度  $\rho_{amb}=11.25\text{kg/m}^3$  の雰囲気中に噴射圧力  $p_{inj}=4, 8, 12, 15\text{MPa}$  で噴射した場合の先端到達距離の実験値と運動量理論値を示す。噴射開始後 0.6msec 以降では理論値と

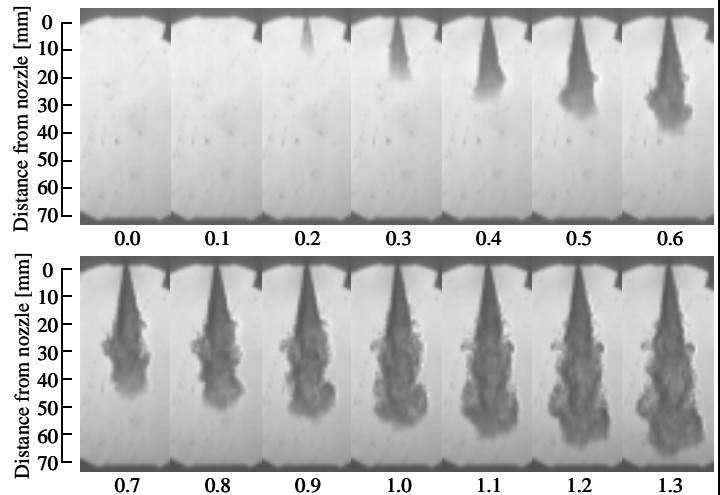


Figure 1. Temporal sequence of shadowgraph images ( $d_n=0.7\text{mm}$ ,  $\rho_{amb}=11.25\text{kg/m}^3$ ,  $p_{inj}=8\text{MPa}$ )

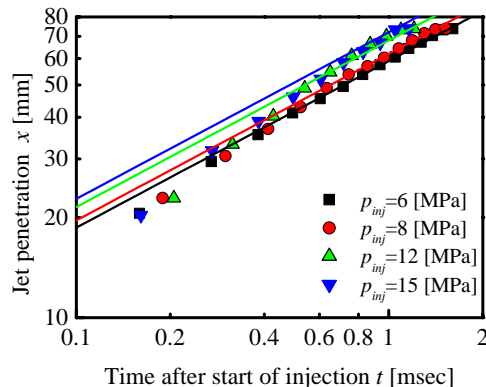


Figure 2. Comparison between experimental data and empirical equation ( $d_n=0.7\text{mm}$ ,  $\rho_{amb}=11.25\text{kg/m}^3$ )

実験値はほぼ一致している．しかし，噴射開始後 0.6msec 以内では大きく異なっている．これは，針弁立ち上がり期間では噴射量が少ないこと，および理論式では噴流が一定の拡がり角を保つと仮定するのに対し，実際は噴射開始直後に拡がり角が大きくなることから原因であると考えられる．

### 3.2 水素噴流の自着火特性への噴射条件の影響

#### (1) 噴射圧力の影響

図 3 に噴孔径  $d_n=0.7\text{mm}$  のノズルを用いて，雰囲気気密度  $\rho_{amb}=11\text{kg/m}^3$  の雰囲気中に噴射圧力  $p_{inj}=4, 8, 12, 15\text{MPa}$  で噴射した場合の水素噴流の自着火遅れ期間測定結果を示す．各条件に対して 20 回測定を行い，その平均値と標準偏差を示した．噴射圧力が増すにしたがい自着火遅れ期間が短縮する．これは，噴射圧力が高くなるにしたがって，噴流体積が増加し，周囲気体との混合が活発になるため自着火遅れ期間が短縮されるからであると考えられる．

#### (2) 雰囲気酸素モル分率の影響

図 4 に噴孔径  $d_n=0.7\text{mm}$  のノズルを用いて，噴射圧力  $p_{inj}=8\text{MPa}$ ，酸素モル分率 5, 10, 20, 30mol% で噴射した場合の水素噴流の自着火遅れ期間測定結果を示す．各条件に対して 20 回測定を行い，その平均値と標準偏差を示した．1200K の条件では 850K の条件に比べ，酸素モル分率の自着火遅れ期間への影響は小さい．このことから，雰囲気温度によって，自着火遅れ期間に対する酸素モル分率の影響に差異が生じることが分かる．

#### (3) 直接撮影による水素噴流火炎の可視化

図 5 に雰囲気温度  $T_{amb}=850\text{K}$ ，噴孔径  $d_n=0.7\text{mm}$  のノズルを用いて，雰囲気気密度  $\rho_{amb}=8\text{kg/m}^3$  の雰囲気中に，噴射圧力  $p_{inj}=8\text{MPa}$  で噴射した場合の水素噴流火炎の直接撮影画像を示す．噴射開始後 1.0msec で最初の発光が見られ，その後，噴流の発達に伴ない，発光領域が噴流上流および下流部へ拡大するとともに発光強度が増す．

## 5. まとめ

- 流速が低下する噴流下流部では，周囲気体との境界がせん断によって乱れるが，上流部では噴射方向への貫徹力が高く保持されるため，乱れが確認されない．
- 噴射開始後 0.6msec 以降では理論値と実験値はほぼ一致しているが，0.6msec 以内では大きく異なっている．これは理論式では噴流が一定の拡がり角を保つと仮定するのに対し，実際は噴射開始直後に拡がり角が大きくなるためである．
- 雰囲気温度が高い条件では，自着火遅れ期間に対する雰囲気中酸素モル分率の影響が小さい．

## 参考文献

- 和栗雄太郎，藤井勝，網谷竜夫，恒屋礼次郎，ディーゼル機関燃料噴流の到達距離に関する研究，日本機械学会論文集（第 2 部），621.436.038，pp.820-826，(1959)．

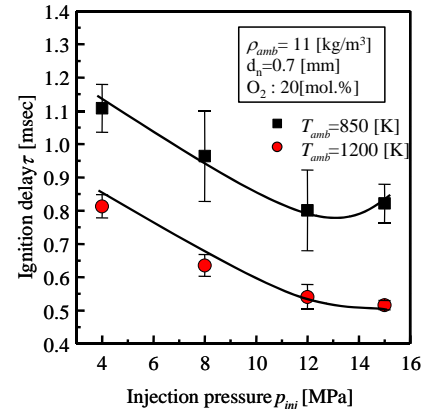


Figure 3. Effect of injection pressure on ignition delay

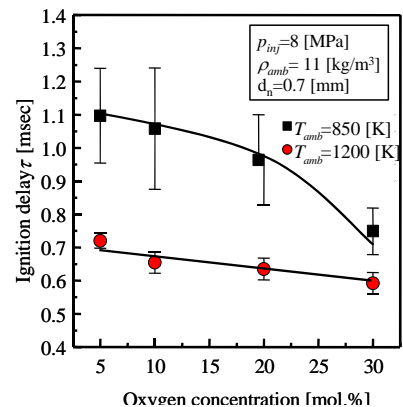


Figure 4. Effect of oxygen concentration on ignition delay

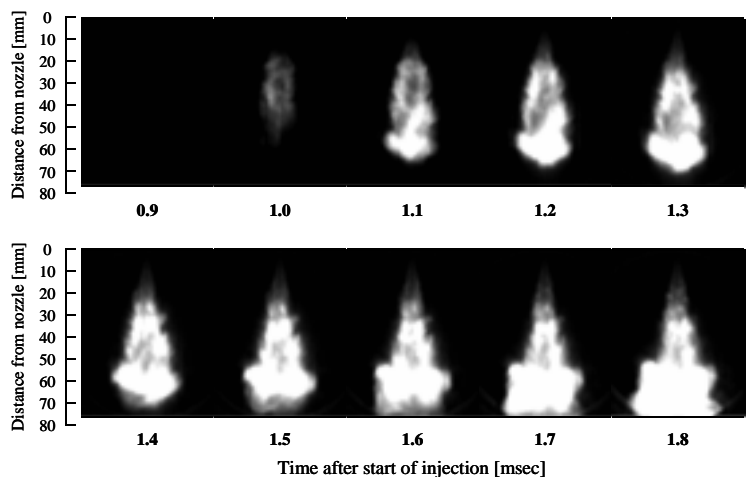


Figure 5. Temporal images of hydrogen jet flame by direct photography ( $T_{amb}=850\text{K}$ ,  $d_n=0.7\text{mm}$ ,  $\rho_{amb}=11.25\text{kg/m}^3$ ,  $p_{inj}=8\text{MPa}$ )