

## 1. 研究背景および目的

現在，化石燃料の枯渇および燃焼に伴う大気汚染が危惧されており，高効率かつクリーンな石油代替エネルギーとして，水素が注目されている．水素は分子構造中に炭素原子を含まないため，燃焼の際に HC, CO および  $\text{CO}_2$  を排出しない．また，水の電気分解によって得られ，燃焼して水に戻るという循環性を持つ．水素燃料を予混合吸気式火花点火機関へ適用した場合，最小点火エネルギーが小さいため点火プラグおよび排気バルブなどの高温部位で水素が着火し，過早着火や逆火などの異常燃焼が起こりうる．しかし，筒内直接噴射式ディーゼル機関では燃料供給法の特徴から異常燃焼は起こり難い．

本研究では機関サイズの自由度が高く，異常燃焼が回避できるという点から筒内直接噴射式ディーゼル機関に水素燃料を適用することに着目した．当該機関において，噴流の混合気形成特性は，自着火，燃焼過程および排気特性に大きく影響を及ぼす．また，自着火遅れ期間は機関性能を左右する重要な因子である．現在までに非定常ガス噴流の混合気形成特性や自着火に関する研究は多くされてきた．しかし，高圧雰囲気場において水素を高圧噴射した際の混合気形成特性や高温高圧雰囲気場での燃焼特性に関する研究は少ない．

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いて水素噴流の混合気形成特性および自着火特性を把握し，それらの相関を明確にすることを目的とした．

## 2. 解析項目

### 2.1 非定常ガス噴流特性

噴流の混合気形成特性は自着火および燃焼過程に大きく影響する．そこで，非定常ガス噴流の噴孔近傍部における高圧ガス噴流の挙動をシャドウグラフ撮影法により観察し，噴射圧力がショックセル構造に及ぼす影響について調べた．また，非定常ガス噴流の縦断面における燃料濃度分布を把握するためにレイリー散乱光撮影を行なった．

### 2.2 非定常水素噴流の自着火および燃焼特性

水素は高い自着火温度を有するため，雰囲気温度が水素の自着火遅れ期間に及ぼす影響を調べることが重要である．そこで，定容燃焼容器内に形成した高温高圧雰囲気中において，雰囲気温度をパラメータとし，自着火実験を行なった．

## 3. 実験結果および考察

### 3.1 非定常ガス噴流特性

#### 3.1.1 噴孔近傍部におけるガス噴流形状の観察

高圧のガスを先細ノズルより噴射する場合，等エントロピ変化を呈する完全流体の流れを仮定すると，雰囲気圧力に対し貯気槽の圧力が約 2 倍以上の条件において，流れは臨界状態に達する．この時，流れは噴孔出口において雰囲気圧力に達するまで完全膨張することができず，噴孔出口と雰囲気との間で圧力の不連続面が生じる．そして，圧力の不連続点となる噴孔出口角部より膨張波が発生し，流れの方向は半径方向外向きに変えられ，流速は超音速に達する．この膨張波は噴流の境界面に達したところで圧縮波として反射され，圧縮波同士の合体および干渉により樽型衝撃波およびマッハディスクを形成する．これより，噴孔近傍では図 1 に示す様に，衝撃波，樽型衝撃波，反射衝撃波およびマッハディスクから成るショックセルが形成される．

本実験では，雰囲気密度  $\rho_{amb}=11.3 \text{ kg/m}^3$  の窒素雰囲気中に，噴孔径  $d_n=1.0 \text{ mm}$  のノズルを用い，噴射圧力  $p_{inj}=2, 6, 10, 15 \text{ MPa}$  で，水素を噴射した．図 2 に水素を噴射した際のショックセルのシャドウグラフ画像を示す．噴射圧力  $p_{inj}=2 \text{ MPa}$  の条件では，ショックセルが確認できない．しかし，噴射圧力  $p_{inj}=6, 10, 15 \text{ MPa}$  において圧力の上昇に伴い，ショックセルは拡大する．

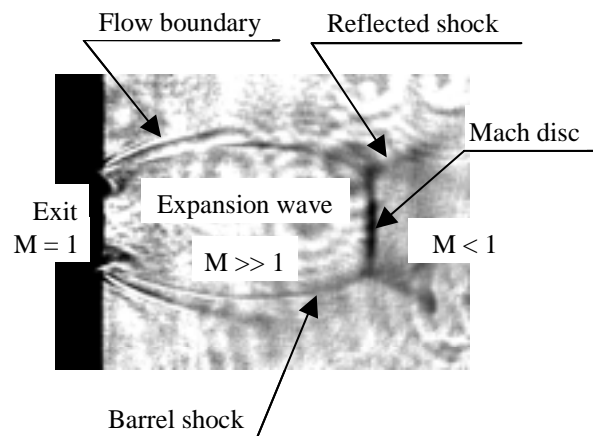


Fig.1 Shadowgraph image and schematic diagram of shock cell structure near nozzle exit

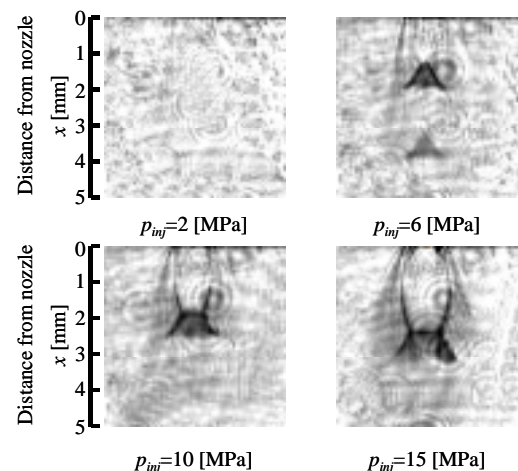


Fig.2 Shadowgraph images of shock cell structure under various injection pressure ( $d_n=1.0 \text{ [mm]}$ ,  $\rho_{amb}=11.3 \text{ [kg/m}^3]$ , Ambient gas:  $\text{N}_2$ )

### 3.1.2 非定常ガス噴流の濃度分布

噴流縦断面における濃度分布を把握するためにレイリー散乱光撮影を行なった。窒素雰囲気中に水素を噴射した場合、S/N比が小さいためレイリー散乱光を捉える事は困難である。そこで、密度および音速が水素と比較的近いヘリウムを用いると、S/N比が向上しレイリー散乱光を明確に捉える事が可能となる。本実験では、噴射圧力  $p_{inj}=12.0$  MPa で水素を噴射した場合と同等の運動量をヘリウムに持たせることによって、両者の噴流発達過程を揃えた。本実験では、雰囲気密度  $\rho_{amb}=11.3$  kg/m<sup>3</sup> の窒素雰囲気中に、噴孔径  $d_n=0.7$  mm のノズルを用い、噴射圧力  $p_{inj}=10.6$  MPa で、ヘリウムを噴射した。図3にヘリウムを噴射した際の噴流断面における燃料濃度分布を示す。噴流の発達にしたがって雰囲気気体との境界近傍は低濃度になっていることから、乱流混合により燃料希薄部が次第に拡大することが分かる。しかし、噴流上流部の中心軸付近では高濃度を保持している。

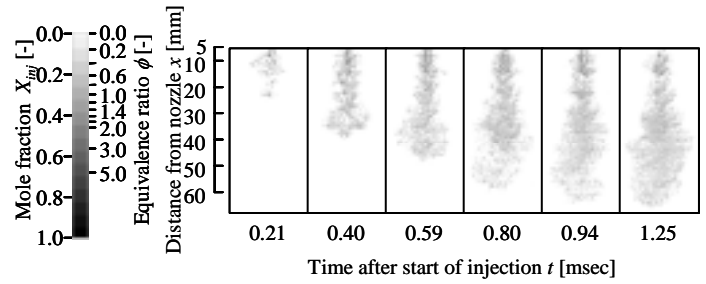


Fig.3 Temporal sequence of mole fraction and equivalence ratio images in He jet cross section measured by PLRS (Planar Laser Rayleigh scattering) ( $p_{inj}=10.6$  [MPa],  $d_n=0.7$  [mm],  $\rho_{amb}=11.3$  [kg/m<sup>3</sup>], Ambient gas: N<sub>2</sub>)

### 3.2 雰囲気温度に対する非定常水素噴流の自着火特性

本実験では、酸素過剰の希薄予混合気の予混合燃焼により得られる高温高压の既燃気体中に、水素を噴射し自着火させる方法を採用した。本実験では、雰囲気密度  $\rho_{amb}=11.4$  kg/m<sup>3</sup> の雰囲気中に、噴孔径  $d_n=0.3, 1.0$  mm のノズルを用い、噴射圧力  $p_{inj}=12.0$  MPa で、水素を噴射した。図4に雰囲気温度  $T_{amb}$  と自着火遅れ期間  $\tau$  の関係を示す。雰囲気温度 1050 K 付近を境として、低温領域において自着火遅れ期間が雰囲気温度に強く依存している。これは、雰囲気温度の低下に伴ない自着火遅れ期間に対する化学的影響が大きくなったためと考えられる。また、低温領域において、自着火遅れ期間のばらつきが大きくなっている。高橋<sup>(1)</sup>は、自着火温度限界付近において、水素噴流に伴う乱流が濃度および温度の急激な変化の原因となり、自着火に至る確率が低下すると指摘している。したがって、低温領域では、自着火可能な混合気が安定して存在しにくいいため、自着火遅れ期間のばらつきが大きくなると考えられる。

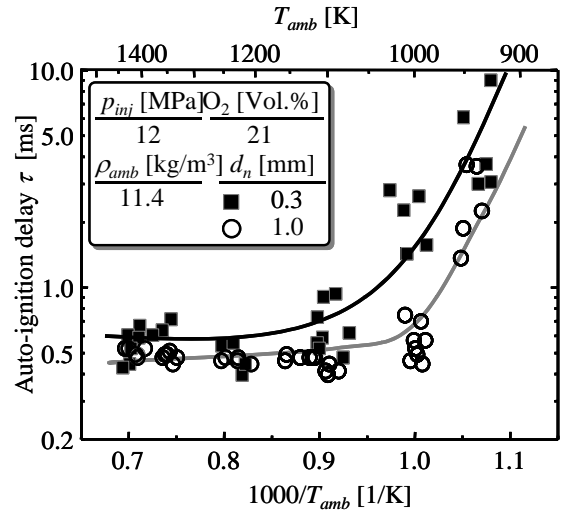


Fig.4 Auto-ignition delays of hydrogen jets in the Arrhenius coordinates

### 4. まとめ

- (1) 噴射圧力の上昇に伴ない、ショックセルが拡大する。
- (2) 非定常ガス噴流において、乱流混合により外縁部が低濃度になる。
- (3) 自着火遅れ期間は低温領域において温度依存性が大きくなる。

### 参考文献

- (1) 高橋三餘, 水素ディーゼルエンジンシステムの開発, 燃焼研究 115 号, pp.43-53 (1999).