拡散噴流強制火花点火による水素の急速燃焼抑制*

木戸口 善行^{*1}, 池田 大志^{*2}, 嘉本 耕治^{*3}
Ali MOHAMMADI^{*4}, 三輪 恵^{*1}

Control of Rapid Combustion of Hydrogen Jet Ignited by Spark Plug

Yoshiyuki KIDOGUCHI^{*5}, Daishi IKEDA, Koji KAMOTO,
Ali MOHAMMADI and Kei MIWA^{*5} Department of Ecosystem Engineering, The University of Tokushima,
2-1 Minamijosanjima, Tokushima-shi, Tokushima, 770-8506 Japan

This study tried to control rapid combustion of hydrogen fuel. Experiment was carried out using constant volume chamber. Hydrogen was injected in this chamber using gas injector and the jet was ignited by a spark plug. High-speed schlieren photography method using high-speed digital video camera was employed to observe combustion process of hydrogen jet. Combustion process was analyzed by the photographs and pressure history. It has been shown by the results that igniting hydrogen spray can control rapid combustion. The spark plug should be located in the boundary of the spray near the outlet of injector in order to reduce initial pressure rise of hydrogen combustion. This kind of injector location also improves combustion efficiency, because combustion continues mainly in the internal of the chamber leading to the reduction of quenching on the wall. Early ignition during injection further reduces initial rapid pressure rise of hydrogen jet.

Key Words: Gaseous Fuel, Combustion, Flame, Hydrogen, Jet, Spark Ignition

1. まえがき

水素および天然ガスは、資源枯渇と大気汚染問題の観点から次世代の内燃機関用燃料として注目され、ガス機関の研究開発が進められている^{①-④}。とくに、水素はリサイクル性をもち、CO₂やHCを排出しないことから将来燃料として有望である。また、可燃範囲が広く最小点火エネルギーが低いことから、希薄燃焼が実現できてNO_x低減に有利であり、低負荷では燃焼変動を小さくすることができる。しかし、逆火、過早着火、ノッキングなどの異常燃焼が起こる^⑤。これらは、水素が急速燃焼を起こすことに起因しており、熱損失も大きくなって熱効率も低くなる。このため、水素では急速燃焼を抑制することが課題になっている。

水素の燃焼に関しては、燃焼速度^⑥や乱流燃焼機構^{⑦⑧}、化学反応機構^⑨などの基本的事項が調べられているが、急速燃焼については、実機関を用いて高速回転による急速膨張で異常燃焼を抑制すること^⑩などが行われているものの、急速燃焼を抑制する方法は確立

していない。

そこで本研究では、水素の急速燃焼を抑制するために、拡散噴流に火花点火させることを検討した。この場合、燃焼は燃料と空気の混合に支配される拡散燃焼になる。すなわち、拡散噴流において、燃料噴射初期に形成された可燃範囲にある混合気を火花点火により着火させ、後続の噴射された燃料を順次燃焼させることにより急速燃焼を抑制する。実験でははじめに、高速シュリーレン法と画像処理および燃焼圧力解析により、定容容器内の水素噴流の火炎構造および燃焼過程を天然ガス噴流と比較して、水素の燃焼機構を調べ、つぎに点火条件を変更することにより、拡散噴流燃焼において最適な水素の急速燃焼抑制方法について検討した。

2. 実験装置および方法

本研究では、高速シュリーレン法によってガス噴流燃焼における火炎発達過程を解析した。図1に実験装置の概略を示す。シュリーレン撮影装置は光源、凹面鏡、シュリーレンストップ(直径2.0mm)から構成されている。光源にはキセノンランプ(ウシオ電機UXL-1000D-0, 出力1kW)を用い、凹面鏡は、鏡径200mm、焦点距離2000mmとした。撮影には高速度デジタルビデオカメラ(Eastman Kodak Ektapro HS4540)を使用し、

* 原稿受付 2003年12月5日。

^{*1} 正員、徳島大学大学院工学研究科(〒770-8506 徳島市南常三島町2-1)。^{*2} マツダ(株)。^{*3} 三菱農機(株)。^{*4} 正員、京都大学大学院エネルギー科学研究科。

E-mail: kidog@eco.tokushima-u.ac.jp

Fig.1 Schematic diagram of experimental apparatus

Fig.2 Spark position

撮影速度は 9000pps とした。燃焼容器は、内径 90mm、容積 613cc の円筒形定容容器で、光軸が通過する 2 面に直径 70mm の観察窓を、直交する 2 面には点火プラグを設けた。点火プラグの電極には直径 1.2mm の Ni 棒を使用し、電極間距離を 0.8mm とした。燃料の水素および天然ガスは、燃料噴射圧力を一定に保つために燃焼室上部に設けた蓄圧室を介して、筒内直接噴射用ガス噴射弁を用いて噴射した。

実験では、噴射期間 10ms 一定で雰囲気圧力 p_a を 0.5 ~ 1.0MPa、噴射圧力 p_j を 1.0 ~ 3.0MPa まで変化させるとともに点火位置および点火時期を変更して燃焼観察および圧力測定を行った。当量比は、噴射圧力 $p_j=3.0$ MPa、雰囲気圧力 $p_a=0.5$ MPa のときに 0.06、 $p_j=1.0$ MPa、 $p_a=0.75$ MPa のときに 0.02 であった。点火位置 S_p は、図 2 に示す中心点火位置を STD とし、噴射軸上で STD に対して 30mm 下流側の位置 L1、30mm 上流側で噴孔から 5mm 離れた位置 U1、および U1 に対して噴射軸垂直方向に 6mm 離れた噴流境界位置 U2 に変化させた。いずれの場合も、電極は対向させて設置している。標準点火時期 t_{ig} は噴流が点火位置に達した時に点火することとし、噴射開始後 0 ~ 10ms までの間で点火時期を変化させた。噴射開始からの時間および点火してから時間をそれぞれ t_0 および t とすると、 $t_{ig}=t_0-t$ で表される。燃焼圧力は圧電式圧力変換器 (AVL GU21D) を使用して測定し、各実験条件では、5 回以上

繰り返して実験を行い、燃焼圧力経過の一致をもって燃焼の再現性を確認した。

噴流拡散燃焼では周囲空気が噴流にエントレインされて、噴流内で燃料と空気の混合過程と燃焼反応が同時進行する。燃焼は噴流内の至るところで起こり、火炎が乱れによって凹凸を生じ、シュリーレン画像では多数の輝度むらが観察される。このような輝度むらをトレーサとして、画像相互相関法⁽¹⁾を適用して火炎画像を解析し、燃焼過程を調べた。

3. 実験結果

3.1 水素ガス噴流の燃焼

3.1.1 天然ガスとの比較

水素ガスの噴流燃焼の特徴を明らかにするために、天然ガス噴流の燃焼との比較を行った。はじめに、噴流到達距離を調べた。図 3 は雰囲気圧力 $p_a=0.5$ MPa として、噴射圧力を $p_j=1.0$ ~ 5.0MPa に変化させたときの水素および天然ガス噴流の噴流到達距離 L を噴射してから時間 t_0 に対して示す。いずれの噴射圧力でも水素と天然ガスはほぼ同等の噴流到達距離を示すことがわかる。

Fig.3 Comparison of tip penetration between H₂ and CNG jet

Fig.4 Comparison of flame development

Fig.5 Comparison of flame structure between H_2 and CNG jet

つぎに、 $p_a=0.75\text{MPa}$ 、 $p_j=1.0\text{MPa}$ のもとで、水素および天然ガス噴流を中心点火 ($S_p=STD$) で燃焼させた。図4にこのときの火炎発達過程をシュリーレン撮影した結果を示す。時間 t は点火してから経過時間である。水素噴流の燃焼経過をみると、点火直後から電極を中心として火炎全体が放射状に広がる。また、大きな拡散速度をもつ水素では、噴流上流でも空気との混合が進んで火炎が上流に拡大して、早期に火炎の投影面積が大きくなる。これに対して、天然ガス噴流では上流で混合が進まず、燃料の拡散は下流に進む。このため火炎の広がりが遅く、点火後に初期火炎が噴流に押し流されて、点火位置より下流で放射状に火炎が広がる。ここで輝度むらの動きを画像解析して拡散燃焼経過を調べた。図5は図4のシュリーレン画像を画像相互相関法により解析して得られた輝度むらの瞬間速度分布を示す。水素噴流の燃焼では、火炎が点火位置 ($Y=30\text{mm}$) より上流側で噴流に対して逆流するように

Fig.6 Comparison of combustion pressure

広がり、下流側では噴流外側に向かって放射状に広がる。一方、天然ガス噴流の燃焼では、点火位置より下流域で放射状に火炎が広がる。図6は図4に対する燃焼圧力 p および圧力上昇率 dp/dt の時間経過を示す。水素は急速に火炎が広がるため、点火後早期に圧力上昇率が大きくなり、 $t=0\sim10\text{ms}$ における圧力が高くなる。これに対して、天然ガスでは水素に比べて点火直後は圧力上昇率が小さく、 $t=5\text{ms}$ 付近から圧力上昇率が大きくなり、噴射終了近くの $t=8.7\text{ms}$ 以降も圧力が上昇する。なお、本実験では噴射期間同一のため、噴射量に対する発熱量が大きい天然ガスのほうが最大圧力が高くなる。

3.1.2 噴射圧力および雰囲気圧力の影響

つぎに、噴射圧力 p_j および雰囲気圧力 p_a が水素噴流の火炎発達過程に及ぼす影響を調べた。図7に STD 点火で p_j および p_a を変化させたときの燃焼圧力 p の経過、図8に火炎のシュリーレン画像を示す。噴射圧力を高くすると、圧力上昇率が大きくなり、噴流下流方向だけでなく上流方向へも火炎が早期に広がる。また、噴射圧力が高いほど輝度むらが細かくなる。一方、雰囲気圧力が高くなると、燃焼圧力は高いが火炎全体の広がりが遅くなる。このような燃焼過程を定量化するために、シュリーレン画像における輝度むらの大きさと瞬間速度分布を解析した。図9は画像から得られた輝度

Fig.7 Comparison of combustion pressure

Fig.8 Effect of injection pressure and ambient pressure on flame development of H_2 jet

Fig.9 Flame cell size and flame speed

むらを真円と仮定したときの直径 D とその個数 N 、および瞬時速度 v の頻度 f の分布について、火炎発達過程の各時間で示したものである。雰囲気圧力の低い $p_a = 0.5 \text{ MPa}$ の $p_i = 1.0 \text{ MPa}$ と 3.0 MPa の比較から、噴射圧力が低いと輝度むらの移動速度は $v = 5 \text{ m/s}$ 以下の割合が多く、時間に対して輝度むらの大きさはあまり変わらない。これに対して、噴射圧力が高いと輝度むらは $v = 10 \text{ m/s}$ 以上の高い移動速度を維持して、 $D = 0.6 \text{ mm}$ 以下の細かい輝度むらが時間とともに増加する。噴射圧力 $p_i = 3.0 \text{ MPa}$ として雰囲気圧力を $p_a = 1.0 \text{ MPa}$ に高くすると、 $p_a = 0.5 \text{ MPa}$ に比べて $t = 0.99 \text{ ms}$ 以降で輝度むらの移動速度が小さくなり、 $D = 0.6 \text{ mm}$ 以下の細かい輝度むらの増加が抑えられる。

以上をまとめると、水素噴流では天然ガスに比べて

拡散燃焼における火炎の拡がりが速く、点火位置を中心にして放射状に火炎が広がる。これにともない点火直後の圧力上昇率が大きくなる。また、噴射圧力が高くなると、噴流内部での混合が進んで燃焼が活発になるため、火炎画像にあらわれる輝度むらが細くなる。

3.2 水素の急速燃焼抑制

3.2.1 点火位置の効果

ここでは、水素噴流の着火と燃焼に大きな影響を及ぼす点火条件について検討した。はじめに、雰囲気圧力 $p_a = 0.5 \text{ MPa}$ 、噴射圧力 $p_i = 3.0 \text{ MPa}$ の条件で点火位置 S_p を図 2 に示す STD, U1, U2 および L1 の 4 ヲ所に変更した。図 10 はこのときのシュリーレン画像を示す。図中の時刻 t_0 は、水素を噴射してから時間、 t は点火後の経過時間を示す。中心点火 ($S_p = \text{STD}$) の場合は、火炎が点火位置を中心にして放射状に広がるのに対し、噴孔近くの $S_p = \text{U1}$, U2 で点火すると、火炎は上流の点火位置から筒状に広がり、噴流全体で燃焼しながら噴流火炎が発達する。とくに、噴射軸に対して離れた噴流境界位置で点火させた $S_p = \text{U2}$ では、 $S_p = \text{U1}$ に比べると噴流下流方向への火炎の拡がりは遅いが、噴流内部での燃焼が盛んとなり、太い筒状の火炎を形成して燃焼室全体に火炎が広がる。これは、 $S_p = \text{U2}$ では噴孔付近で噴流が電極に衝突して速度が低下するため、初期火炎の形成が安定化することと、さらに、点火位置が噴流境界のため燃料と空気との混合が促進され、初期火炎が噴流内に取込まれて火炎の拡がりが大きくなったためと考えられる。噴孔から離れた壁面に近い位置 ($S_p = \text{L1}$) で点火すると、壁面近くで着火して火炎が下流から上流に発達する。

 Fig.10 Effect of ignition position on flame development of H_2 jet

Fig.11 Effect of ignition position on history of combustion pressure

図 11 は点火位置を変更したときの燃焼圧力 p と圧力上昇率 dp/dt の経過を示す。噴孔付近点火である $S_p=U1, U2$ にすると、点火までに噴射される燃料量が少ないため $S_p=STD$ に比べて $t=0\sim 5\text{ms}$ の燃焼初期における圧力上昇率を低く抑えることができる。また、 $t=5\text{ms}$ 以降では、 $U1$ は STD と同様の圧力経過をたどるが、 $U2$ では圧力上昇が大きく、最大圧力が最も高くなる。燃焼室底面付近の $S_p=L1$ では、点火位置が噴孔から遠く、点火までに多くの燃料が噴射されて燃焼するため、他の点火位置に比べて $t=8\text{ms}$ までは初期燃焼圧力が高くなる。

図 12 は、各点火位置で燃焼圧力から燃焼による発熱量を算出して総噴射量に対する燃焼割合 Q_p/Q_i を求め、点火開始から 5ms 毎に積上げ表示したものである。噴流境界点火の $S_p=U2$ では、他の点火位置に比べて噴

Fig.12 Effect of spark position on history of accumulated heat release

射後半の $t=5\sim 10\text{ms}$ での燃焼割合が高く、燃焼終了時期の $t=20\text{ms}$ における燃焼割合が最も高い。これより、 $S_p=U2$ では、燃焼室中央部に筒状に発達した噴流内で燃焼が持続するため、壁面付近に到達する火炎の割合が少なくなり、壁面冷却による消炎の影響も小さくなって燃焼割合が高くなると考えられる。

以上のことから、水素噴流燃焼では、噴孔付近の $S_p=U1, U2$ で点火させると初期圧力の上昇を低く抑えることができる。さらに、噴流境界 ($S_p=U2$) で点火させると、火炎が燃焼室全体に広がるため、急速燃焼を抑制しながら高い燃焼割合が得られる。

3・2・2 点火時期の効果

つぎに、点火時期による水素の急速燃焼抑制について調べた。図 13 は水素の初期燃焼圧力上昇を抑えることができる点火位置 $S_p=U2$ のもとで、雰囲気圧力 $p_a=0.75\text{MPa}$ 、噴射圧力 $p_j=1.0\text{MPa}$ の条件で、点火時期 t_{ig} を噴射直後 $t_{ig}=0\text{ms}$ から噴射終了時 $t_{ig}=10\text{ms}$ まで変化させたときの燃焼圧力と圧力上昇率の経過を噴射開始からの時間 t_0 に対して示す。図より、 $S_p=U2$ で点火時期を早くすると、燃焼初期における圧力上昇率がさらに低くなり、点火から最大圧力に達するまでに要する期間が長くなって急速燃焼が抑えられる。とくに $t_{ig}=0\text{ms}$ の場合には、圧力 p が緩やかな勾配を維持して上昇する期間が噴射終了まで続く。これは、噴射直後に点火した場合、燃料を噴射しながら燃焼が持続する噴流燃焼形態となるためである。 $t_{ig}=2.5\text{ms}$ の場合は、点火直後から $t_0=4\text{ms}$ 付近にかけては、点火時期までに噴射された燃料が燃焼

Fig.13 Effect of ignition timing on history of combustion pressure

Fig.14 Effect of ignition timing on flame development

するため点火直後の圧力勾配が大きくなるが、 $t_{ig}=4\text{ms}$ 以降は噴射された燃料が順次燃焼する形態となるため、 $t_{ig}=0\text{ms}$ の場合と同様に緩やかな圧力勾配になる。点火時期を $t_{ig}=5\text{ms}$ 以降に遅らせると、点火までに燃焼室内に噴射される燃料の量が多くなり、予混合燃焼の形態に近い急激な燃焼となるため、圧力の立上がりが大きくなる。噴射終了時点火の $t_{ig}=10\text{ms}$ では、点火時期が遅いため燃料が拡散し、可燃濃度範囲以下の領域が増加するため圧力上昇率および最大圧力が低くなる。

図 14 は点火時期を変化させたときの燃焼経過のシュリーレン画像である。 $t_{ig}=0\text{ms}$ では噴流下流への火炎の拡がり量が少なく、点火後に噴射された燃料が燃焼室中央付近で燃焼する。 $t_{ig}=5\text{ms}$ および 7.5ms では点火直後の火炎の拡がり量は $t_{ig}=0\text{ms}$ の場合より大きく、その後圧力上昇率の低下とともに火炎の拡がりは緩やかになり、後続の噴射された燃料は上流から中央付近で燃焼する。

以上より、水素噴流燃焼で初期燃焼における圧力上昇率を抑えるためには、点火時期を早くして燃料噴射初期に点火し、噴射率律速による燃焼制御をすることが有効である。

4. まとめ

水素噴流の着火・燃焼過程をシュリーレン法による火炎観察と燃焼圧力解析により調べて、天然ガス噴流との燃焼形態の相違を明らかにした。さらに、拡散

噴流火花点火による水素噴流の着火および燃焼制御方法を検討した。おもな結果をまとめると次の通りになる。

- (1) 水素は天然ガスに比べて混合がさかんで、点火位置を中心にして火炎全体が放射状に拡がり、噴流上流へも火炎が拡がる。これにともない点火後に燃焼圧力が急速に上昇する。
- (2) 水素噴流燃焼では、噴孔付近で点火させると、燃焼初期の圧力上昇率が低くなり水素の急速燃焼を抑えることができる。
- (3) さらに、噴孔付近で噴射軸から離れた噴流境界位置で点火すると、噴流が電極に衝突して噴流速度が低下する効果も加わって着火が安定化し、火炎が燃焼室全体に拡がって高い燃焼割合が確保できる。
- (4) 水素噴流燃焼で急速燃焼を抑制するためには、点火時期を早くして噴射率律速による燃焼制御が有効である。

終わりに、本研究を進めるにあたり、実験にご便宜を賜ったトヨタ自動車株式に厚く御礼申し上げます。

文 献

- (1) M. Ikegami, K. Miwa and M. Shioji, Int. J. Hydrogen Energy, Vol.7, No.4, pp.341-353, 1982.
- (2) 小林春樹, 松下智彦, 古浜庄一, 機論 (B編), 55 巻 511 号, pp.895-903, 1989.
- (3) K. Kato, K. Igarashi, M. Masuda, K. Otsubo, A. Yasuda, K. Takeda and T. Sato, SAE 1999-01-0574.
- (4) 石山拓二, 塩路昌宏, 田中大樹, 中川秀樹, 中井俊作, 自技論, Vol.34, No.3, pp.29-34, 2003.
- (5) 近藤卓, 飯尾秀一, 星間勝, 古浜庄一, 機論 (B編), 63 巻 610 号, pp.2209-2214, 1997.
- (6) G. W. Koroll, R. K. Kumar and E. M. Bowles, Combust. Flame, Vol.94, pp.330-340, 1993.
- (7) K. Koyanagi, M. Hiruma, K. Yamane and S. Furuhashi, SAE 931811, 1993.
- (8) 城戸裕之, 中原真也, 機論 (B編), 63 巻 614 号, pp.3477-3482, 1997.
- (9) 南雲義郎, Catherina Dewi Wijaya, 伏見千尋, 越光男, 火薬学会誌, Vol.63, No.2, pp.65-72, 2002.
- (10) Masahiro Shioji, Yusuke Houki and Takuji Ishiyama, Proc. Of the 13th World Hydrogen Energy Conference, pp.641-647, 2000.
- (11) 塩路昌宏, 紀本孝, 岡本章章, 池上詢, 機論 (B編), 54 巻 504 号, pp.2228-2233, 1988.