反射衝撃波による非定常水素噴流の着火に関する実験*

石井 好**, 東野文男***, 桜井 明****

Ignition of Spurting Hydrogen Jets
behind a Reflected Shock Wave

by Yoshimi ISHII, Fumio HIGASHINO, and Akira SAKURAI

This paper describes an experimental study of the ignition of unsteady hydrogen jets injected into compressed high temperature air behind reflected shock waves. Hydrogen gas was injected into the test section 8.5~11. ms before incident shock wave was reflected from the end plate. Pressure measurements as well as the detection of light emission due to combustion of a hydrogen-oxygen gas mixture were made by the use of photomultiplier and pressure gages. We found: (1) The ignition delay times observed under the temperature ranging between 800 to 1 600 K were from 0.5 to 15 ms; (2) There exist ignition limits similar to the results of the experiments with premixed gases. However we did not find any clear "explosion-peninsula"; (3) The Ignition delay time of unsteady hydrogen jets compressed by means of a shock tube was longer than the premixed one, because the hydrogen jets need some time to mix with air; (4) When much hydrogen which was cooled by adiabatic expansion spurting into the low density test section, it caused the temperature of the air in the test section to fall, and the ignition delay time to become long.

Key Words: Hydrogen, Ignition, Ignition Delay Time, Shock Tube, Unsteady Jet, Reflected Shock Wave, High Temperature Air, High Pressure

1. 序 文

高温、高圧の空気中に水素気体を噴射し、その混合と燃焼の過程を明らかにすることは、将来開発が予想される水素ディーゼルエンジンなどに関連して工学上きわめて重要な問題となってきた。

著者らは衝撃波管により、手軽に空気の高圧、高温領域をつくり、そこに非定常な水素を噴射し、それが空気と混合することにより生じる燃焼⁽¹⁷⁾や、衝撃波との干渉などを観測して⁽²⁾⁽³⁾きた。本論文は、衝撃波が進行してきて管の末端で反射する直前に水素を噴射し、反射衝撃波後方の非一様、非定常な高温、高圧領域内で見られる非定常水素噴流の着火を観測したものである。

従来、酸素-水素系の燃焼に関しては多くの研究がなされ、予混合気体の着火の機構、素反応速度定数など⁽¹²⁾がよく調べられており、反射衝撃波を利用した、Soloukhin⁽⁴⁾ら、Oppenheim⁽⁵⁾らの研究がよく知られ

ている。

高橋⁽⁶⁾ら、川村⁽⁷⁾らの研究は予混合タイプの実験で、本研究の趣旨とは少し異なる。鈴木・足立⁽⁸⁾⁽⁹⁾らのものは、噴射の方法に相違があるものの、本質的には本実験と同種のものである。東野・塩練⁽¹⁾のものはフリーピストンを用いることにより通常のショックチューブでは実現できない高温、高圧領域が取扱え、しかも実際のエンジンの圧縮過程に近い非一様な場を実現できるという点で、実用ディーゼルの実験条件に近いものである。しかしながら、高温空気と非定常水素噴流との混合過程を研究することは極めて重要であるにもかかわらず実験的に調べることは非常に困難であるので、非定常な混合過程の詳細は数値シミュレーションにより説明しようとする試みがある。この立場からの数値計算は、滝⁽¹⁰⁾・藤原、高山・桜井⁽¹¹⁾などにより精力的に進められている。

2. 実験方法

図1は実験装置の概略と計測システムを示す。無隔膜衝撃波管は、低圧部の長さ4.5 m、角形断面(40 mm×40 mm)で、その管末に反射壁がある。反射壁の中央に直径4.5 mmの単純な形の噴射孔があり、そこから水素を $P_0=0.6$ MPa で $P_1=2\sim150$ Torr (7.5 Torr =

* 昭和60年11月20日 関西支部第245回講演会において講演。原稿受付 昭和60年7月1日。

** 正員、東京都立航空工業高等専門学校 (〒116 東京都荒川区南千住8-53-1)。

*** 正員、東京農工大学工学部 (〒184 小金井市中町2-24-16)。

**** 東京電機大学理工学部 (〒350-03 埼玉県比企郡鳩山町石坂)。

1 kPa)の空气中へ噴出した。噴射は、電磁弁を 100 V, 47 μ F のコンデンサに蓄えた電荷を急激に放出することにより行われ、電磁弁の開いている時間は 54 ms ほどである。水素噴流を 0.6 MPa の貯気槽から上記の電磁弁を通して大気圧の測定部へ噴出したときの、噴流先端の伝ば速度を一連のシュリーレン写真で観察したところ約 40 m/s 程度であった。また、一噴射あたりの水素流量を調べるために水中にあるメスシリンダ内に水素を導いて測定したところ 132 cc 程度であった。実験は、遅延回路を用いてこのような単発の非定常水素噴流を発生させ衝撃波が到着する 8.5~11 ms 前に噴射させるようにした。入射衝撃波の速度は 2 個のピエゾ圧力計 (間隔 1871.5 mm) とタイムカウンタを用いて測定し、反射時刻は計算により求めた。また反射壁にいちばん近い (反射壁より 126.6 mm) 位置の信号は、噴射と反射の時期を確認する目的で、ウェーブメモリ (日立 VC 8014 B) に記憶させた。反射壁から 500 mm の位置に PCB 圧力変換器を埋め込み、観測窓 (直径 5 cm) の外にフォト増幅器 (浜松ホトニクス PIN シリコンフォトダイオード S 1190: 感度波長範囲 430~1140 nm, ピーク波長 900 $\pm$ 50 nm 使用) を設置し、これらの信号も同時にウェーブメモリに記憶し、燃焼による発光と、圧力上昇を x-y プロッタに出力させた。また、入射衝撃波の速度と室温に対する音速を用いて衝撃波マッハ数を求め、反射衝撃波後方の圧力 P_3 と T_3 をランキン・ウゴニオの式から求めた⁽¹³⁾。

3. 結果と考察

図 2 は、上から PCB (反射壁から 500 mm), フォトマル (反射壁から 25 mm), ピエゾゲージ (反射壁より 126.6 mm) の出力を記録したものである。図 2 中の記

号 B は入射衝撃波の到着を, C は反射衝撃波の位置を, そして D は燃焼による発光をそれぞれ意味する。図 3 は, 反射壁付近の $x-t$ 線図を示したものである。実線は衝撃波を, 一点鎖線は接触面を, 破線は噴流の軌跡を示す。⑤の領域内に示す●印は, 着火を意味する。反射から着火までの時間 τ を着火遅れ時間と定義し, t_s は反射前何 ms 前に噴射を開始したかを示す量と定義する。表 1 は $P_1=0.7$ MPa, $P_1=20$ Torr {2.664 kPa} の際の各領域における圧力, 温度, 流速を理論計算したものである。

図 4 は, 水素の着火による発光をフォトマルで受けて, その出力電圧のピーク値と着火遅れを観測したものである。実験は $P_1=0.7$ MPa, $P_1=20$ Torr {2.664 kPa} 一定でおこなったが, 水素噴流の影響により T_3 と P_3 は $T_3=940\sim1010$ K, $P_3=66.7\sim76.0$ kPa の値であることがわかった。このような領域における着火は比較的再現性もよくデータのばらつきも少ない。図 4 の横軸は, 衝撃波の反射前何 ms (t_s) に水素噴射を開始したかを示している。この量 t_s が負の場合は, 反射衝撃波後方における噴射を意味するが, このような場合には, 着火遅れ時間 τ が長く, また, 発光による出力電圧が小さくなり, 燃えにくいことがわかる。これは, 水素噴流と空気が着火可能になるまで混合するには一定時間を要するためと考えられる。 $t_s=2\sim15$ ms では, 水素噴流が, 入射衝撃波と強く干渉するので, 混合過程はその時点で促進され, 急に燃えやすくなっているものと考えられる。本論文では, 図 5 以降の結果は, $t_s=8.5\sim11$ ms で行ったもので, 噴流がつくりだす非一様な場と衝撃波が干渉することによって, 局部的に予混合に近い状態をつくりだした可能性がある。

図 1 実験装置の概略と計測システム

図5は、着火遅れ時間 τ と $1000/T_s$ の関係を示したものである。温度 T_s の τ への影響は、図5中に破線でしめした足立・鈴木⁽⁹⁾⁽⁹⁾の結果に近いものであり、定量的に傾向は一致している。本実験の場合は、足立らの実験に比べて衝撃波が反射する前に水素を噴射するので入射衝撃波により、水素は予熱され、かつ混合も容易になり着火を早める方向に働く。逆に噴射量についてみると本実験のほうが1回あたりの噴射量は多いので測定部内の温度を下げる方向に働き着火をおく

らせようとする。特に温度 T_s が高い場合には、圧力 P_s が低い状態で実験したもので、1回の水素噴射量が相対的に大きくなり後者の影響が支配的になるものと思われる。なお、図5のDは温度が800 K以下の領域でありここでは全く着火せず、領域CはArrheniuseの反応速度則⁽¹⁵⁾に従う部分である。そして、領域Bでは確実に着火すると同時に着火おくれは一定となる。領域Aは高温、低圧の領域に相当し、先に述べたように、希薄な空気に対し断熱膨張で冷やされ

表 1 各領域の圧力、温度、流速、の理論値 ($P_4=0.7$ MPa, $P_1=2.664$ kPa)

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(7)	(8)	(9)
PRESSURE (MPa)	0.00266	0.01825	0.01825	0.711	0.0756	0.1241	0.1241	0.1969
TEMPERATURE (K)	302.9	626.231	1016.718	302.9	1017.99	1176.72	222.219	1346.46
VELOCITY (m/s)	0	586.071	586.071	0	0	235.102	235.102	0

図 2 圧力履歴とフォト出力

図 3 反射壁付近の X-T 線図

図 4 着火遅れ時間・フォト出力と噴射時期の関係

図 5 着火遅れ時間と温度

図6 着火遅れと圧力・温度の関係

た水素の量が相対的に多くなり、再度燃えにくくなる。

一般に着火遅れ時間は単に温度の関数のみでなく、圧力にも関係する量であることが知られている。図6は、圧力 P_5 と温度 T_5 をそれぞれ縦、横軸にとって着火遅れ時間をパラメータとして図に示したものである。図6で白地の部分は、本実験に用いた無隔膜衝撃波管では実験不可能な領域である。図6から予混合気体についてよくみられる着火の第1、第2限界⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾に対応すると思われる領域が下のほうに認められたが、爆発半島に対応する領域は特定できなかった。着火の第3限界は Voevodsky, Soloukhin の結果にごく近いものを得た。これらの原因としては、本研究では純粹の酸素-水素予混合気体ではなく、高温な空気中に比較的低温の低い水素を噴射したので一様な場における実験と異なり、拡散混合などの非定常な過程が大きく影響しはっきりとした限界が現れなかったものと思われる。

4. 結 論

本研究は無隔膜衝撃波管⁽¹⁶⁾を利用して得た反射衝

撃波後方の高温、高圧空气中に、水素を噴射し、着火現象を観測した。その結果、次のようなことが判明した。

(1) 本研究では、この装置を、高温、高圧な空気中に水素を噴射する実験に応用した。衝撃波が管端で反射する前8.5~11 msの間に水素を噴射した場合、温度範囲が800~1600 Kでは、着火遅れ時間が0.5~15 msであった。また予混合気体にたいする着火の第1、第2限界に似た現象が見られたが、爆発半島は特定できなかった。第3の着火限界は Voevodsky と Soloukhin の結果にちかいものを得た。

(2) 予混合の着火に比べ噴射する水素の着火は空気との混合に時間を要する。そのため着火遅れ時間は、予混合のものより大きくなる。

(3) 低密度領域に、大量の断熱膨張した低温の水素を噴射した場合、周囲の温度を降下させ、着火を遅らせることがわかった。

文 献

- (1) 東野・塩練・桜井, 機論, 50-459, B (昭59), 2571.
- (2) 石井・東野・桜井, 機論, No. 843-2 (昭59-3), 18.
- (3) 石井・東野・桜井, 機論, 50-458, B (昭59), 2592.
- (4) Voevodsky, V. V. and Soloukhin, R. I., *Proc. 10th Symp. Combust.*, (1965), 279.
- (5) Meyer, J. W. and Oppenheim, A. K., *Proc. 13th Combust. sym.*, (1971), 1153.
- (6) 高橋, 燃焼シンポジウム前刷集, (昭54), 188.
- (7) 川村・ほか3名, 衝撃シンポジウム前刷集, (昭58), 32.
- (8) 鈴木・足立, セコム科学財団研究助成金成果報告集, (昭59), 55.
- (9) 足立・鈴木, セコム科学財団研究助成金成果報告集, (昭59), 64.
- (10) 滝・藤原, 衝撃シンポジウム前刷集, (昭59), 7.
- (11) 高山・ほか4名, 第16回流体力学講演論文集, (昭59), 158.
- (12) Lewis, Bernard and Von Elbe, Guenther., *Combustion, Flames and Explosions of Gases*, (1961), 27, Academic Press.
- (13) 倉谷・上谷, 衝撃波の化学物理, (昭43), 11~18, 裳華房.
- (14) 秋田・足田, 燃焼概論, (昭46), 34~39, コロナ社.
- (15) 水谷, 燃焼工学, (昭52), 55, 森北出版.
- (16) Oguchi, H., ほか2名, *ISAS, RN 209* (1976), 1.
- (17) Higashino, F., ほか2名, *Proc. 10th Int. Colloquium Dyn. Explosions React. Syst.*, (1985), 61.