

デフラグレーション波からデトネーション波への遷移過程* (障害物の影響)

大八木 重治*¹, 矢島 智*²
小原 哲郎*¹, 吉橋 照夫*³

Transition Processes from Deflagration to Detonation Waves (Effects of Obstacles)

Shigeharu OHYAGI, Satoshi YAJIMA,
Tetsuro OBARA and Teruo YOSHIHASHI

Transition processes from deflagration to detonation waves in stoichiometric oxyhydrogen mixtures diluted with nitrogen were observed using high-speed Schlieren photography as well as pressure and ionization current measurements. In this study, effects of obstacles on the transition processes were investigated. The obstacles were multigutter shaped and were installed near an ignition plug on an inner wall of a rectangular tube. Width and depth of the gutter were selected as parameters while composition of the mixture was fixed. It was revealed that there exist optimum values of these parameters for enhancing the transition to detonation.

Key Words: Detonation, Premixed Combustion, Shock Wave, Flow Visualization, Deflagration, Transition

1. 緒 論

密閉された管内を予混合気体で充てんし一端で点火すると層流火炎から乱流火炎をへてデトネーション波に遷移する。この現象は、DDT (Deflagration to Detonation Transition) 過程と呼ばれ、多くの研究者⁽¹⁾⁽²⁾により研究されてきた。特に、Oppenheim ら⁽¹⁾は、回転式ミラー方式の超高速カメラを用いて、この過程を観察し、乱流火炎とこれに先行する衝撃波の間で局所的爆発が起こり、デトネーション波を開始させることを見いだした。しかしながら、この局所爆発が起きる条件、局所爆発の強さなど未知の部分も多い。また、層流火炎に遷移し、加速する過程は、乱流燃焼の基本的問題の一つであり、詳細な研究が必要である。これらのことから、本研究では、イメージコンバータ式超高速カメラによる高速シュリーレン撮影による可視化と圧力変換器ならびにイオンプローブによる衝撃波、燃焼波の測定を手段として、デフラグレーション波からデトネーション波への遷移過程を系統的に調べるこ

とによって、火炎の加速と乱れの関係、局所爆発の起きる過程とその条件などを明らかにすることを目的とする。本報はその第1報として、点火端付近に設置された連続した突起状の障害物により、意図的に火炎を乱し、突起の間隔と高さを変化させてその影響を調べる。

2. 実験装置と方法

図1に実験装置の概略を示す。デトネーション管(全長3000 mm)は、25×30 mmのく形管とダンプタンクからなり、それぞれマイラー膜により仕切られている。可視化用に200 mm×30 mmのガラス窓が設置されている。管軸方向には、500 mm間隔で5箇所の測定位置(P2~P5)に対向する10個の測定孔が設けてあり、イオンプローブと圧力変換器を取付け、燃焼波の到達時刻と圧力波形を同時に測定した。着火は、管端から164 mmの位置にある点火プラグにより行った。

実験に用いた障害物の形状を図2に示す。障害物は、長さ494 mmのジュラルミンの板を加工したもので、幅5 mmの突起が一定の間隔でなぶ形状をしている。突起の出ている底板の肉厚は5 mmである。幅 d 、高さを h とし、例えば、 $d=20$ mm、 $h=10$ mmであれば、その障害物を、D20H10と呼ぶ⁽³⁾。これらの障害物

* 原稿受付 平成5年4月26日。

*¹ 正員、埼玉大学工学部 (☎338 浦和市下大久保 225)。

*² 三菱重工業(株) (☎213 川崎市宮前区宮前平 3-7-1)。

*³ 埼玉大学工学部。

は、点火端から 330 mm までの間のみ設置してある。

図 3 に高速シュリーレン撮影時の装置の概略図を示す。現象の観察にはイメージコンバタ式カメラ (Hadland Photonics, Co. Ltd, IMACON 792) を用いた。ここでは、撮影をより容易にするために蛍光面を高解像 CCD カメラで撮影し、コンピュータを用いて画像処理するシステムを用いた。シュリーレン用の光源は、キセノンフラッシュランプ(発光時間 200 μ s)を用いた。点火信号はデジタル遅延回路により遅延され、CCD, IMACON, フラッシュランプへ送られ、得られた像は、CCD カメラによりビデオ信号に変換され、フレームストアにより高解像モニタ上に映し出される。高速度カメラの撮影速度は 5×10^4 FPS(こま間隔 20 μ s) と固定し、4 こまずつ撮影を行った。

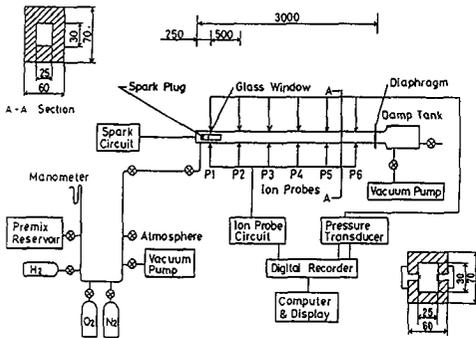


図 1 実験装置概略図

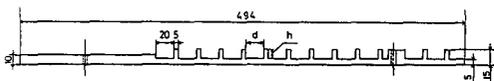


図 2 障害物の形状 (D20H10)

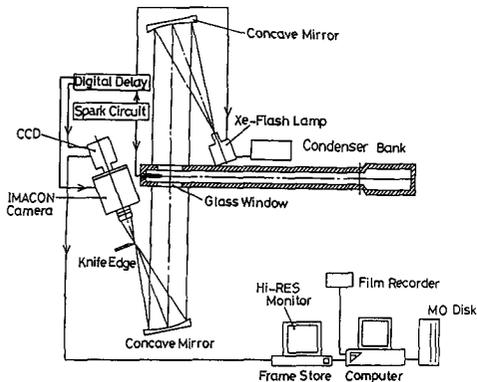


図 3 シュリーレン装置概略図

実験条件を表 1 に示す。混合気体は水素-酸素-窒素系であり、当量比 ϕ を 1, 希釈度 β (窒素の酸素に対するモル比) を 1.28 に固定した。初期圧は 53.3 kPa, 初期温度は室温である。パラメータは障害物の突起間隔 $d=10, 20, 30$ mm, 高さ $h=5, 10, 15$ mm, であり、突起のない障害物 D_{∞} についても同様の実験を行い、比較した。可視化窓はそれぞれ, P1, P2 の位置に設置して可視化を試みた。

3. 結果と考察

3.1 波動線図 図 4 に突起の高さ h を 5 mm に固定し, 突起間隔 d を変化させたときの燃焼波の波動線図を示す。横軸は点火端からの距離 x , 縦軸は燃焼波の到達時刻 t_f を示す。燃焼波の P2 到達時刻は早いほうから順に D20H5, D30H5, D10H5 であり, その順で P6 まで伝ばしている。

図 5 は突起間隔 d を 20 mm にし, 高さ h を 5~15

表 1 実験条件

Premixed Gas	$H_2 + 0.5(O_2 + \beta N_2)$
Initial Pressure	53.3kPa
Initial Temperature	290~299K
Equivalence Ratio ϕ	1.0
Dilution Ratio β	1.28
Obstacle	D10H5, D20H5, D30H5 D10H10, D20H10, D30H10 D10H15, D20H15, D30H15 D_{∞}
Position of Glass Window	P1, P2

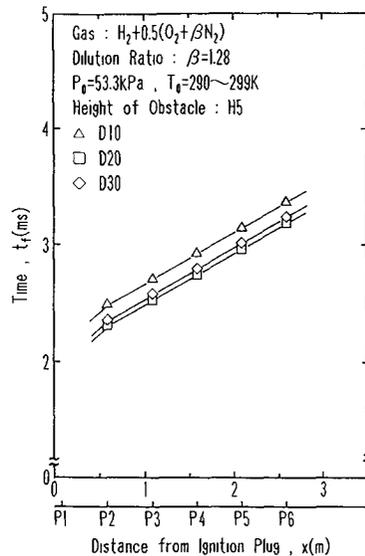


図 4 波動線図

mm に変化させたときの波動線図である。 $h=5\text{ mm}$ と $h=10\text{ mm}$ の場合、P2 の位置ですでにデトネーションへ遷移していると考えられるが、 $h=15\text{ mm}$ の場合では遷移が遅れて P2 の位置では燃焼波より衝撃波が先行している状態であり、その後加速して P3 と P4 の間でデトネーションへ遷移している。

これら各障害物を設置したときの燃焼波の P6 到達時刻をまとめ、図 6 に示す。横軸は障害物の突起間隔 d 、縦軸は燃焼波の P6 到達時刻 $t_{f,P6}$ を示している。この時刻が早いほど遷移を促進する障害物であるということがいえる。 $h=5\text{ mm}$ の場合、 $d=10\text{ mm}$ から 20 mm に変化させると遷移が早まるが、さらに $d=30$

mm に拡大してもあまり変化は見られない。 $h=10\text{ mm}$ の場合では $d=20\text{ mm}$ のときが最も遷移を促進させ、 $h=15\text{ mm}$ の場合では突起間隔が大きくなるほど遷移が遅れることがわかる。これらは突起のない障害物 D_∞ と比べて明らかに到達時刻が早く、突起により遷移が促進されることが確認された。

図 7 は横軸に突起の高さをとり、燃焼波の P6 到達時刻をまとめた図であるが、この図 7 よりどの突起間隔の障害物も $h=10\text{ mm}$ のときが最も遷移を促進させることがわかる。これらから遷移過程において最適な突起間隔と高さの組合せは D20H10 である。

3・2 シュリーレン写真 図 8 は障害物 D_∞ を設置し、可視化窓の中心を点火端から 89 mm (P1) の位置に設置した場合の、点火直後の火炎伝播の様子を可視化したシュリーレン写真である。いちばん上のものが、点火後 2.212 ms の写真でそれ以後 $20\text{ }\mu\text{s}$ 間隔に計 4 こまの写真を同時に影影した。火炎は左から右へ伝播している。突起がない場合、火炎は層流火炎の形態をとり伝播している。図 8 中の数字は、点火後、カメラが作動し、シャッターが開くまでの時間 (ms) を示し μs 単位で遅延回路で設定したものである。点火ノイズ

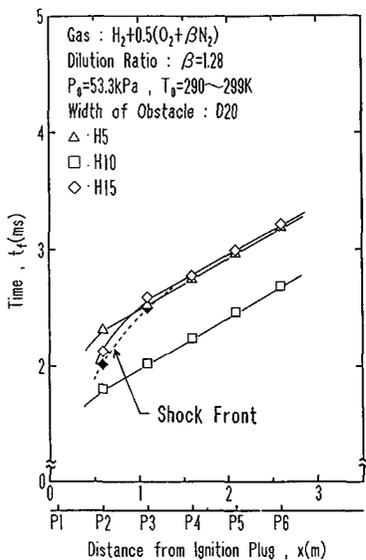


図 5 波動線図

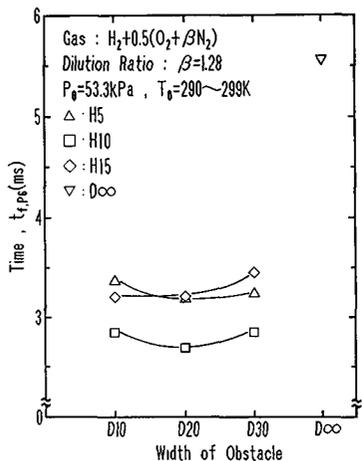


図 6 突起間隔と燃焼波の P6 到達時間の関係

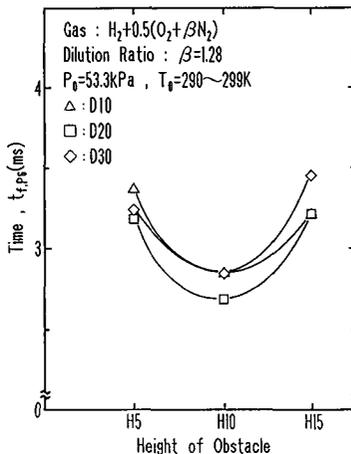


図 7 突起の高さと燃焼波の P6 到達時刻の関係

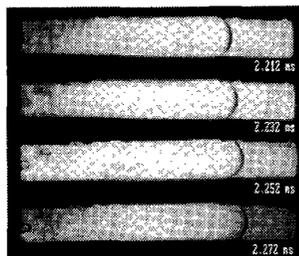


図 8 シュリーレン写真(測定位置: P1, 障害物: D_∞)

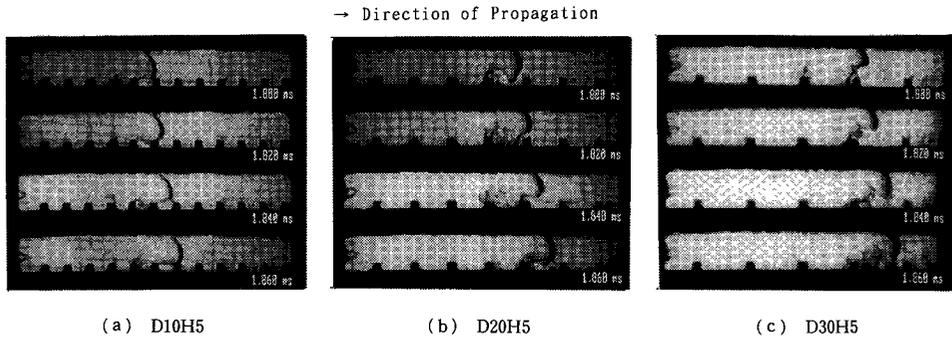


図 9 シュリーレン写真(測定位置：P1)

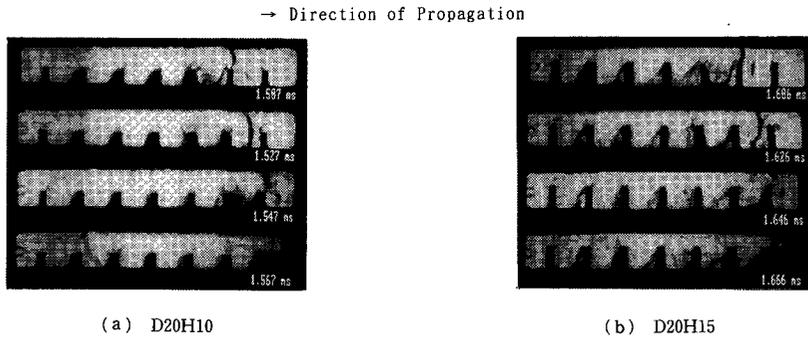


図 10 シュリーレン写真(測定位置：P2)

などの影響でこの時間がずれ、期待した画像が得られない場合もあった。このため、この時刻は圧力変換器、イオンプローブより得られる時刻からずれる場合もある。そこで、同じ位置で数回の実験を行い、現象の順序を確認している。以後の撮影例では最も現象をよく表している写真を示すので時刻が波動線図と正確には一致していない場合もある。

図 9 は $h=5$ mm とし、 $d=10, 20, 30$ mm と変化させたときの P1 の位置での火炎と障害物との干渉の様子を可視化したシュリーレン写真である。 $d=10$ mm の場合 [図 9 (a)]、火炎前面は層流であるが、下側は突起により乱されていることがわかる。また、火炎は突起間を飛び越すようにして伝ばしており、突起間に未燃焼領域が存在していることがわかる。 $d=20$ mm の場合 [図 9 (b)]、突起間の燃焼が激しく、この燃焼により火炎が加速していると考えられる。 $d=30$ mm の場合、突起によって生じた乱れはすぐに減衰してしまい、火炎の加速には有効に働いていない。

図 10 は $d=20$ mm に固定し、 $h=10, 15$ mm と変化させたときの P1 の位置でのシュリーレン写真である。 $h=10$ mm の場合 [図 10 (a)]、 $h=5$ mm の場合 [図 9 (b)] と比較して、火炎伝ば速度は大きく、障害

物によって火炎前方にできる渦中心で局所爆発が起こり、1.567 ms では点火端に向かうレトネーション波が観察されている。 $h=15$ mm の場合 [図 10 (b)]、 $h=10$ mm に比べて伝ば速度がやや小さくなるが、1.606 ms 後では、火炎前方に圧力波が確認され、突起との干渉により生じた渦と考えられる黒いシュリーレン像が観察されている。また火炎背後の突起後方には未燃焼領域が観察され、徐々に燃焼していることがわかる。

図 11 は可視化窓の中心を点火端から 589 mm の位置 (P2) に移動し、可視化シュリーレン写真である。障害物 D_{90} を設置した場合 [図 11 (a)]、火炎前方に衝撃波群が形成されている。火炎はこの乱れた場の中を伝ばするため、火炎前面は非常に乱れた乱流火炎への遷移し、伝ば速度は約 610 m/s となっている。D20H15 を設置した場合 [図 11 (b)] でも波動線図 (図 5) で示したように P2 の位置では燃焼波と衝撃波が離れている状態で伝ばしている。火炎面には急激な密度こう配が観察され、約 700 m/s の速度で伝ばする乱流火炎の様相を呈している。D30H5 を設置した場合 [図 11 (c)]、P2 の位置では火炎は前方の衝撃波に接近し、両者一体となって伝ばしている。燃焼領域は波面後方

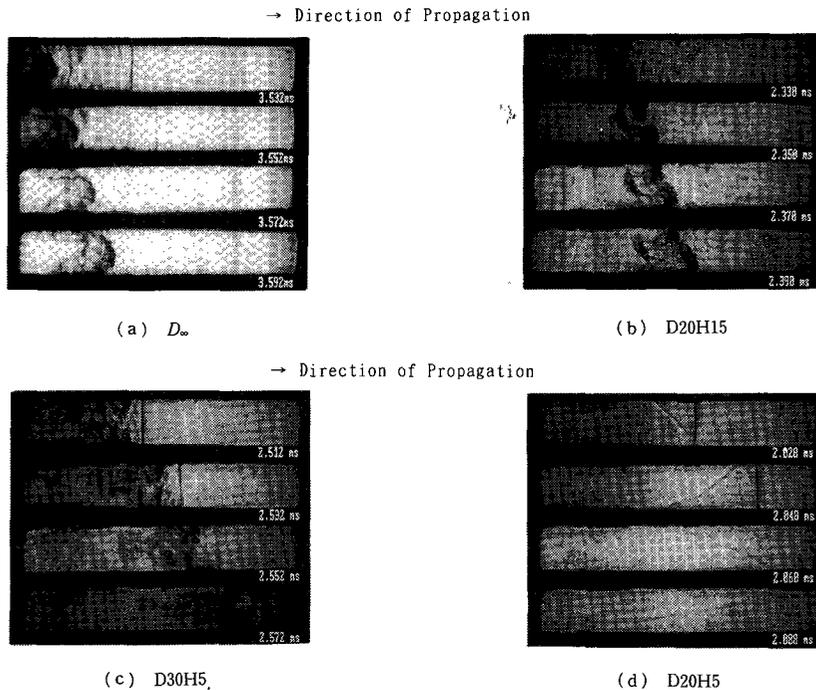


図 11 シュリーレン写真(測定位置:P2)

の広範囲に及んでいる。伝ば速度は約 1400 m/s となっており、 D_{∞} よりもかなり早くなっているが、デトネーションとはいえず「衝撃波に誘起された燃焼波」と呼ぶべきであろう。D20H5 を設置した場合 [図 11(d)] では P2 の位置ですでにデトネーションへ遷移しており、波面はフラットで燃焼領域は極めて薄くなっている。伝ば速度は約 2100 m/s となっており、その背後には局所爆発の際に生じたと考えられる横波も観察されている。また、波面に垂直な方向に微細なすじが観察されており、これらは波面の三重衝撃波構造に起因するものと考えられる。この現象は White ら⁽⁴⁾ により得られたデトネーション波面の干渉じま写真とよく似ている。これら、P2 における現象は、P1 付近で設置された障害物の影響を受け、その発達段階が異なり、いくつかのパターンに分類できる。 D_{∞} や D20H15 のように加速の遅い障害物の場合、P2 では、弱い衝撃波群の後方に乱流火炎が徐々に加速する段階であり、D30H5 の場合は、乱流火炎が衝撃波に追いつき、衝撃波が強められることにより、燃焼領域が徐々に狭くなる。さらに、D20H5 では、完全なデトネーション波に遷移した状態である。

4. 結 論

イメージコンバータカメラを用い、デフラグレーション

波から、デトネーション波への遷移過程について障害物の影響に焦点を当てて観察した結果、以下のような結論を得た。

- (1) 障害物の高さ、間隔を変化させることにより、火炎後方の障害物間の乱れ状態が変化し、これにより、火炎の加速に最適な障害物の形状が決まる。
- (2) デトネーション波への遷移過程においては、衝撃波の後方から乱流火炎が追いつくように伝ばする。乱流火炎が衝撃波に追いつくと、燃焼領域が狭くなり、最終的にデトネーション波へ遷移する。

本研究は、平成 2 年度埼玉大学工学部に設置された特別設備「超高速現象画像記録解析装置」のシステムを用いて行われた。

最後に本実験の遂行にあたり、熱心に協力された学部学生 三森尚武君(現：富士写真光機)に感謝する。

文 献

- (1) Urtiew, P. A. and Oppenheim, A. K., *Proc. R. Soc., Ser., A*, 295(1966), 13.
- (2) Lee, J. H. S. and Knystautas, R., *Proc. 29th Symp. Int. Combust., The Combustion Institute*, (1990), 735.
- (3) 矢島・吉橋・大八木, 第 23 期航空宇宙学会講演論文集, (1992), 70.
- (4) White, D. R., *Phys. Fluids*, 4(1961), 465.