連続した障害物を有する流路におけるデトネーション遷移過程
(障害物の高さおよび間隔が DDT 過程に及ぼす影響)前田 慎市^{*1} , 南 翔平^{*2} , 岡本 大佑^{*3} , 小原 哲郎^{*1}Detonation transition process in a channel equipped with the repeated obstacles
(Effect of obstacle height and spacing on the DDT process)Shinichi MAEDA^{*1}, Shohei MINAMI^{*2}, Daisuke OKAMOTO^{*3} and Tetsuro OBARA^{*1}^{*1,*2,*3} Graduate School of Science and Engineering, Saitama University
255 Shimo-Okubo, Sakura-ku, Saitama-shi, Saitama 338-8570, Japan

Received 25 August 2015

Abstract

Experiments were performed to investigate the deflagration-to-detonation transition (DDT) process in the channel equipped with repeated obstacles. A premixed gas of hydrogen-oxygen was ignited and the DDT process was visualized by using a high-speed video camera with an aid of schlieren optical method. A configuration of the repeated obstacle such as a spacing, d and a height, h were varied to investigate effects of these parameters on the detonation induction distance (DID) as well as DDT process. Furthermore, the flow-field was visualized by changing the directions of obstacle installation, such as vertical installation and transverse one. The DDT process could be clarified in detail, because the transverse installation of obstacle could acquire the flow-field in depth direction of the obstacle. As a result, it was clarified that the DDT was occurred by highly accelerated flame caused by the interaction between deflagration wave and the vortex-ring behind obstacle. Thus, the vortex-ring generated by the diffraction of compression waves was interacted with the deflagration wave, and this behavior produced a high-velocity deflagration wave through the unburned gas pocket behind obstacle. This high-velocity deflagration wave propagated in the depth direction could be a trigger of DDT onset via local-explosion. The detonation induction distance was also determined by observing a fish-scale pattern on the soot which was typical of the detonation propagation, and the relationship between DID and the configurations of repeated obstacle was also obtained.

Key words : Detonation wave, Deflagration wave, Local explosion, DDT, Obstacle, Visualization

1. 緒 言

密閉した管内に可燃性予混合気を充填し点火すると、条件によってはデフラグレーション波からデトネーション波への遷移 (Deflagration-to-Detonation Transition ; 以下, DDT と称す) が生じる (Lee, 2008) . 管内に連続した障害物を設けることにより DDT が促進され、点火から短い距離でデトネーション波への遷移が起こる (Shchelkin and Troshin, 1965) . このような管内に障害物を挿入してデトネーション波を誘起させる方法は古くから利用されているが、流路に障害物が存在することにより、(i) どのように DDT が生じるのか、(ii) 最も DDT を促進させる障害物の最適形状はどのようなものか、(iii) 予混合気の状態や流路幅等によって最適形状はどのように決まるのか、

といった基本的な問題については、十分明らかにされていない。

火災は流路内に障害物がない条件においても、前方に圧縮波が生成されるため伝播とともに加速する (Kuznetsov et al, 2005)．流路内に障害物を設けることにより圧縮波が障害物と干渉して乱れが生じ、火災はさらに加速する挙動が明らかにされている (Moen et al., 1980)．最終的には火災は既燃気体の音速まで加速するため熱的閉塞状態となる (Ciccarelli and Dorofeev, 2008)．流路に設けた障害物のブロックage比と火災加速の関係について明らかにされるとともに (Ciccarelli et al., 2005)，数値計算結果との比較もなされており、両者は妥当な一致を示すことが明らかにされている (Johansen and Ciccarelli, 2009)．さらに、可視化観察結果より火災加速を引き起こすのは、火災と衝撃波の干渉過程が重要であることも明らかにされている (Ciccarelli et al., 2010)．

DDT を引き起こすのに必要な条件についても定量的な整理がなされている (Peraldi et al., 1986; Dorofeev et al., 2000)．特に、Dorofeev et al. (2000) は、流路および障害物形状を表す寸法として後述する L を導入し、 L を定常デトネーション波のセル幅 λ で除した無次元距離 L/λ を用いてデトネーション遷移の有無を明らかにしている．これによれば、 $L/\lambda > 7$ の条件であれば DDT が生じることを述べている．

Gamezo et al. (2008) は、障害物上における DDT 過程の数値シミュレーションを行っており、障害物間において衝撃波がマッハ反射を起こすために必要な間隔をあけることが重要であること、および衝撃波の三重点において DDT が生じることを述べている．Sorin et al. (2006) は、デトネーションを生じさせるために必要な誘導距離 (Detonation Induction Distance, 以下、DID と称す) がセル幅の数十倍となることを明らかにしており、予混合気の活性化エネルギーおよび発熱量が高くなるにしたがい DID が短くなる挙動を明らかにしている．Obara et al. (2012) は、障害物上で生じる DDT 過程について超高速ビデオカメラを用いた可視化観察を行っている．これによれば、火災が障害物下流で発達した渦に巻き込まれることにより加速し、その際生じた衝撃波が次の障害物で反射し火災と干渉することにより DDT が生じることを明らかにしている．

このように、DDT 過程の機序を明らかにするためシュリーレン光学系を用いた可視化観察がなされているが (Obara et al., 1996; Thomas et al., 2001; Teodorczyk et al., 2009; Obara et al., 2012)，(i) DDT 過程は時間的には極めて短時間で完了すること、(ii) 空間的にも微小な領域で局所爆発が起こること、(iii) DDT 過程の再現性も低いこと、などから可視化観察することが難しく、その詳細な機序を明らかにするには至っていない．特に、障害物の奥行き方向で生じる現象については、シュリーレン光学系を用いて観察することが難しいことから、未解明のままである．

本論文では、燃焼管内に連続した障害物を挿入して予混合気を点火し、デフラグレーション波からデトネーション波に遷移する過程について、超高速ビデオカメラを用いて可視化観察を行った．特に、障害物を挿入する方向を観測部の鉛直方向と奥行き方向の 2 通りに変化させることにより、障害物の奥行き方向で生じる現象を明らかにした．さらに、燃焼管内の煤膜模様を採取することにより、点火から DDT が生じるまでの遷移距離を計測し、障害物形状との関係について考察した．

2. 実験装置および方法

2.1 実験装置

実験装置の概略を図 1 に示す．実験装置は、長さ 580 mm の燃焼管および 4,000 mm のダンプチューブで構成される．燃焼管左端の管軸上に自動車エンジン用の点火プラグを取り付け、予混合気を点火した．燃焼管底面には、図 2 に示す連続した障害物が挿入されている．幅 5 mm、奥行き 100 mm、高さ h の直方体 (以下、凸壁と呼ぶ) を肉厚 15 mm のベースプレートに鉛直に設置した．凸壁は、点火プラグより 20 mm の位置から開始するものとし、凸壁の間隔 d を種々変化させたベースプレートを製作し、実験に用いた．表 1 に障害物に対する実験条件を示す．凸壁の幅は 5 mm で一定としたが、間隔 d を 20 ～ 80 mm、高さ h を 4.0 ～ 42.5 mm の範囲で変化させた．図 2 に示すように燃焼管の管軸上部 (測定孔 P3, P5, P7 および P8 の位置) には圧力変換器 (PCB Piezotronics 社製, 113A24, 応答時間: 1 μ s 以内) が取り付けられており、燃焼管内の圧力変化を計測した．圧力波形を記録するには、ストレージオシロスコープ (横河メータ & インスツルメンツ社製, DL750, 最高 100 MS/s, 12 bit) を用いた．また、点火プラグが取り付けられているフランジから距離 115 mm の位置より、幅 200 mm の範囲に光学ガラス (BK7) を埋め込んだ観測窓を設置し、DDT 過程の可視化観察を行った．

Fig. 1 Schematic diagram of experimental set-up. Experiments are performed by using a combustion tube of 580 mm length and a dump tube of 4,000 mm length. A premixed gas of hydrogen–oxygen is ignited by a sparking plug. The repeated obstacle is laden on the base plate of the combustion tube. The DDT process is visualized by using a high–speed video camera and schlieren optical method. Pressure transducers are also flush mounted on the base plate, so the pressure history of detonation wave is recorded simultaneously with the flow visualization.

Fig. 2 Schematic diagram of the repeated obstacle vertically installed on the base plate of the combustion tube. The distance between sparking plug and the first obstacle is constant as 20 mm. A spacing of obstacle, d and a height, h are varied to investigate the most effective obstacle to cause the DDT. An optical window of 200 mm length is installed at a distance of 115 mm apart from the sparking–plug. Pressure transducers are flush mounted on the top surface of the combustion tube at P3 (distance from sparking plug, $x = 155$ mm), P5 ($x = 235$ mm), P7 ($x = 315$ mm) and P8 ($x = 505$ mm).

2.2 可視化方法

DDT の可視化観察には、図 1 に示すように配置したシュリーレン光学系を用いた。DDT の詳細を撮影するには、ストロボライト (Metz 社製, mecablitz 76 MZ-5) を光源として超高速度ビデオカメラ (ナックイメージテクノロジー社製, ULTRA Cam HS-106E, 最高 1.25×10^6 Frames/s, 解像度 360×412) を用いた。

凸壁の配置方法を図 3 に示す。これまでに行われた実験 (Obara et al., 2012) では、図 (a) に示すように凸壁をペー

Fig. 3 Schematic diagram showing the different installation of repeated obstacle and setting of the optical axis. (a) Repeated obstacle is vertically mounted from the base plate. (b) Repeated obstacle is transversely mounted from the side wall, then it can visualize the flow-fields along the depth direction as shown in Fig. (a).

スプレートに対して鉛直に設置し、シュリーレン光学系の光軸を紙面の奥行き方向となるように設定して可視化観察を行った (Obstacle: Vertical installation). シュリーレン光学系を用いてこの方向から流れ場の可視化観察を行った場合、流路の奥行き方向で生じる密度勾配が全て重ね合わされた画像が記録されることになる。この方法では、障害物の奥行き方向で生じる現象を明らかにすることは困難である。そこで、図 (b) に示すように光軸は図 (a) と同様とし、障害物をベースプレートから奥行き方向となるように設置して可視化観察を行った (Obstacle: Transverse installation)。これにより、図 (a) において障害物の奥行き方向で生じる現象を図 (b) では上下方向として観察することができ、DDT 過程を詳細に可視化観察することができる。

超高速度ビデオカメラを用いた可視化観察とは別に、デトネーション波への遷移が生じたことを確認する方法として煤膜法を用いた。これは、灯油を燃やすことによって生じた煤を予め塗った金属板を燃焼管底面に挿入しておくもので、DDT が生じた場合にはデトネーション波特有のうろこ模様が煤膜上には記録される。これにより、壁面上における DDT の開始位置を特定することができる。点火プラグから凸壁底面においてうろこ模様が形成されるまでの距離を計測することにより、DID を求めた。

2.3 実験方法

実験に用いた試験気体の条件を表 2 に示す。試験気体として化学量論混合比の水素 - 酸素を用いた。予混合気の実験には、分圧を計ることにより両気体を予混合タンク内で混ぜた後、12 時間以上放置することにより自然拡散させてから使用した。試験気体の初期圧は $p_0 = 70 \text{ kPa}$ で一定である。燃焼管とダンプチューブの間には、厚さ $50 \mu\text{m}$ のマイラー膜を挿入し仕切っている。実験を行う際には、燃焼管およびダンプチューブを真空とした後、燃焼管に予混合気を充填し、点火させた。したがって、燃焼管内を伝播したデトネーション波は、真空となっているダンプチューブ内で減衰されることになる。実験は、全て室温条件で行った。

3. 実験結果

本節では、初めに障害物を鉛直方向に設置して DDT 過程を可視化観察した結果について述べる。次に、障害物を奥行き方向に設置した場合の結果について述べ、これまで明らかにされていなかった障害物底面で生じる現象について明らかにする。

Table 1 Experimental condition of obstacle.

Condition	Setting Value
Width	5
Spacing, d [mm]	20, 40, 50, 60, 70, 80
Height, h [mm]	4, 5, 10, 15, 25, 42.5

Table 2 Experimental condition of test gas.

Condition	Setting Value
Fuel	H ₂
Oxidizer	O ₂
Equivalence Ratio, ϕ	1.0
Initial Pressure, p_0 [kPa]	70

3-1 障害物を鉛直方向に設置した場合の DDT 過程の可視化観察 (Obstacle: Vertical installation)

実験で得られたシュリーレン写真を図 4 に示す．障害物を図 3(a) に示すように鉛直に設置した場合の写真である．障害物の間隔を $d = 50$ mm，高さを $h = 5$ mm とした場合の結果であり，底面にある 2 個の凸壁を識別しやすいように白線で示している．この場合，凸壁により DDT が生じる過程を明らかにするため，点火プラグから数えて 4 個のみ凸壁を設置してある（図 2 において点線で示した凸壁を設置していない）．コマ間隔 $2 \mu\text{s}$ で撮影した動画から DDT 過程を捉えた写真を $6 \mu\text{s}$ ごとに抽出してある．写真 1 枚当たりの露光時間は 100 ns，解像度は約 1.48×10^5 pixel である．各写真には，予混合気の点火からの経過時間 t を示す．また，圧力変換器の取り付け孔 P3, P5, P7 の位置が示してある．

$t = 1,054 \sim 1,078 \mu\text{s}$ において，右方向に約 410 m/s の速度で伝播する凸形状の火炎（図中 F で示す）が観察される．化学量論混合比の酸素 - 水素予混合気の音速は約 538 m/s であるから，火炎はマッハ数約 0.76 の亜音速で伝播していることになる．火炎は，未燃気体の音速まで加速することが明らかにされているが (Ciccarelli and Dorofeev, 2008)，本実験では点火プラグから観測部左端までの距離が 115 mm と短いことから，火炎はまだ加速の途中段階にある．火炎面上には多数のしわが観察されることから，火炎面は奥行き方向にある観測窓には達していないと言え，火炎面と観測窓との間に未燃の予混合気を残しながら伝播していることが分かる．火炎前方にある凸壁の右下部分には円状の白い領域の発生する様子が観察される．これは，圧縮波の回折によって生じた渦輪 (V) であり，時間経過に伴い成長する様子が分かる．すなわち，既燃気体の膨張により未燃気体が圧縮作用を受け，圧縮波が凸壁で回折を起こすことによる．ただし，デトネーション波を観察する必要があることからシュリーレン光学系の感度を下げて撮影しているため，逆に弱い圧縮波を観察することは難しい．火炎が渦輪の領域に到達することにより，渦に巻き込まれるように火炎は伝播するため，火炎面積は増大するとともに加速して伝播することになる (Obara et al., 2012) ．

$t = 1,084 \mu\text{s}$ 以降の写真では，火炎が渦に巻き込まれて伝播する領域において密度勾配の大きい領域が拡大してコントラストが変化しており，燃焼が活発に生じている様子が確認できる． $t = 1,108 \mu\text{s}$ の写真では，その領域で局所爆発 (E) が生じたことを示しており，円形状の燃焼波が伝播する．最初に伝播した火炎面上には皺模様が観察されたことから，観測窓と火炎面の間に未燃気体が存在していた．しかし，この局所爆発で生じた燃焼波面には皺模様が観察されないことから，局所爆発によって生じた燃焼波は，先頭の火炎面と観測窓の間の未燃気体領域を伝播していると判断される．

$t = 1,114 \mu\text{s}$ 以降の写真では，先頭の火炎が 2 個目の凸壁に近づくにしたがって減速しており，左側の領域まで火炎が伝播できない領域が存在する．これは，前述したように火炎が渦輪に巻き込まれることによって加速した際に生じた圧縮波が 2 個目の凸壁で反射し，火炎前方の流速が相殺されるためである．

$t = 1,144 \mu\text{s}$ 以降の写真では，局所爆発で生じた燃焼波 (D) が先頭の火炎面を追い越して伝播している．この燃焼波下流にはデトネーション波に特有の三重点構造に起因する筋状の線が確認されること， $t = 1,144 \sim 1,162 \mu\text{s}$ 間の平均伝播速度は約 3,089 m/s と見積もられ，Chapman-Jouguet（以下，CJ と略す）速度の約 2,820 m/s (デトネーション研究会編，2011) を超えていることから， $t = 1,144 \mu\text{s}$ 付近においてデトネーション波への遷移が生じたと考えられる．局所爆発が生じた直後においては，オーバードリブン状態のデトネーション波が伝播する．

この一連の高速度シュリーレン写真では，渦に火炎が巻き込まれてから ($t \simeq 1,054 \mu\text{s}$)，局所爆発が生じる ($t \simeq 1,108 \mu\text{s}$) までに約 $54 \mu\text{s}$ の時間が経過していることになるが，この間に凸壁の奥行き方向で生じた現象を明らかにすることは難しい．

図 4 と同時に捉えられた圧力波形を図 5 に示す．横軸は時間，縦軸は圧力を初期圧で除した無次元圧力を示す．圧力変換器の取り付け位置（図 2 に示す P3～P8）に対応させて原点を移動してある．測定孔 P3 における圧力波

Fig. 4 High-speed schlieren photographs showing the DDT process on the repeated obstacles (Test gas: $2\text{H}_2 + \text{O}_2$; Initial pressure: $p_0 = 70 \text{ kPa}$, Obstacle: Vertical installation; $d = 50 \text{ mm}$, $h = 5 \text{ mm}$). E: Local Explosion, F: Flame, D: Detonation wave, V: Vortex-ring. The vortex-ring, V is generated behind the obstacle, because the compression wave produced by the expansion of burned gas is diffracted from the obstacle. The flame, F interacted with this vortex-ring, V and causes the flame-acceleration. This effect is the trigger to cause the DDT via local explosion, E at $t = 1,108 \mu\text{s}$, and the detonation wave propagated $t = 1,144 \sim 1,168 \mu\text{s}$.

形上には、前述したように弱い圧縮波の伝播に伴う圧力上昇が捉えられている。測定孔 P5 以降の圧力波形上には急峻な圧力上昇が捉えられており、図 4 に示したように観測部において局所爆発が生じデトネーション波が伝播したことによる立ち上がりである。デトネーション波の伝播速度は約 $3,200 \text{ m/s}$ と見積もられ、CJ 速度を超えて伝播している。なお、圧力変換器は観測部の上壁面に取り付けられているため、デトネーション波の伝播速度は可視化写真から求めた値とは若干異なる。

3.2 障害物を奥行き方向に設置した場合の DDT 過程の可視化観察 (Obstacle: Transverse installation)

障害物を図 3(b) に示したように奥行き方向に設置し、DDT 過程を捉えたシュリーレン写真を図 6 に示す。また、 $t = 1158, 1162$ および $1166 \mu\text{s}$ の写真を拡大したものを図 7 に示す。縦方向に伸びる 2 本の黒い線として撮影されているものが凸壁に相当する。図 4 と同様に、高さ $h = 5 \text{ mm}$ の凸壁を間隔 $d = 50 \text{ mm}$ で設置した場合である。コマ間隔 $2 \mu\text{s}$ で撮影した動画から DDT 過程を捉えた写真を $4 \mu\text{s}$ 間隔で抽出している。

$t = 1,150 \mu\text{s}$ では、火炎が既に左側の凸壁を乗り越え、2 個目の凸壁と干渉を開始している。図 4 で観察したのと同様に、先端の火炎面は凸形状を呈しているとともに、火炎面上には複数の皺も観察される。これより、火炎面は上下の壁面および観測窓にも達しておらず、火炎と周囲の壁で挟まれた領域には未燃気体が存在する状態で伝播を続けることが分かる。火炎が左端の凸壁から回折する際には前述した渦輪が形成されていることから、火炎

Fig. 5 Pressure histories simultaneously recorded with Fig. 4 (Test gas : $2\text{H}_2 + \text{O}_2$, Initial pressure : $p_0 = 70 \text{ kPa}$, Obstacle : Transverse installation ; $d = 50 \text{ mm}$, $h = 5 \text{ mm}$). The weak pressure rise associated with the compression wave is recorded before onset of DDT. The non-dimensional pressure rise of about thirty-six is acquired and this indicates the onset of DDT. The detonation wave of about 3,200 m/s propagates at the pressure measuring station between P5 and P8.

は渦に巻き込まれるように伝播する。先頭の火炎面は凸形状をなして伝播しているため、最初に中心付近の底面に接する。したがって、密度勾配の大きい領域が中心付近には形成されている。図4では、凸壁右側の領域で火炎が渦に巻き込まれているにも関わらず、未燃気体の残されている状態が比較的長い時間持続する様子が観察された。底面に達した火炎は、それ以上、下方には伝播できない。したがって、中心付近の火炎は凸壁方向に向かって伝播した後、未燃気体の存在する領域に達し、上下方向に伝播方向を変化させる。これにより、凸壁右側に存在する未燃気体中を約 1,130 m/s の速度 (CJ 速度の約 40% に相当する) で伝播する燃焼波 (C) が形成される様子が確認される。燃焼波が未燃気体中を伝播する過程では前方に圧縮波が形成され、圧縮波背後の流れによって火炎は加速するものと考えられる。

$t = 1,182 \mu\text{s}$ において、燃焼波 (C) が下壁に到達することにより局所爆発が生じてデトネーション波への遷移が生じており、 $t = 1,194 \mu\text{s}$ の写真ではデトネーション波 (D) が右側の凸壁を乗り越えて伝播の様子が確認できる。図4に示したシュリーレン写真では、渦に火炎が巻き込まれてから局所爆発が生じるまで約 $54 \mu\text{s}$ の時間差が生じていた。火炎は、この間に伝播方向を奥行き方向に変化させ、その火炎が壁面に到達するまでの時間に対応していることが分かる。これまで、DDT は火炎から生じた圧縮波が次の凸壁で反射し、火炎と干渉することにより生じると説明されてきたが (Obara et al., 2012)、燃焼波が障害物の奥行き方向に伝播した後、CJ 速度の約 40% に達する燃焼波を介して局所爆発が生じる挙動は、本論文で新たに得られた知見である。

4. 考 察

本節では、DDT 過程を捉えた超高速度シュリーレン写真および煤膜模様より、DDT の機序について考察を行う。また、点火プラグから DDT が生じるまでの距離 DID と障害物の間隔 d および高さ h 等との関係について考察を行う。

4-1 DDT の機序

観測部において得られた煤膜模様を図8に示す。図(a)は障害物を鉛直方向に設置した場合であり、図(b)は障害物を奥行き方向に設置した場合である。デトネーション波への遷移が生じた場合には、デトネーション波の三重重点構造に起因するうろこ模様が煤膜上には記録されることになる。図には、うろこ模様が開始されている境界を点線で示している。また、うろこ模様が観察しやすいように図(b)の四角で囲んだ領域の拡大写真を右図に示す。

Fig. 6 High-speed schlieren photographs showing the DDT process on the repeated obstacle (Test gas : $2\text{H}_2 + \text{O}_2$; Initial pressure : $p_0 = 70 \text{ kPa}$, Obstacle : Transverse installation ; $d = 50 \text{ mm}$, $h = 5 \text{ mm}$). C : Highly accelerated flame, F : Flame, D : Detonation wave. The flame is interacted with the vortex-ring, then the convex flame is propagated. When the flame-front, F is attached with the bottom-wall, the propagation direction is changed to the vertical direction accompanied with the flame acceleration, C. Since the flame is interacted with the wall, the detonation wave, D is generated via local explosion in the vicinity of the wall.

Fig. 7 Magnified schlieren photographs corresponding to $t = 1158, 1162$ and $1166 \mu\text{s}$ of Fig. 6.

これより、デトネーション波への遷移は図 (a) では障害物の底面付近から、図 (b) では上壁付近で生じていることが分かる。これらの結果は、図 4 および図 6 に示した可視化写真とも対応している。

このような超高速シュリーレン写真および煤膜模様を観察した結果、DDT 過程を示すシナリオは図 9 に示すようになる。図 (a) は DDT の第一段階を水平方向からモデル化して表している。最初に、既燃気体の膨張により圧縮波が生成される。圧縮波が凸壁で回折することにより、渦輪を形成する。次に、渦輪に火炎が巻き込まれるように伝播するため、火炎面の面積増大および加速をもたらす。底面に達した火炎の一部は凸壁と火炎の間に残って

Fig. 8 Soot-track record obtained at the observation section (Test gas : $2\text{H}_2 + \text{O}_2$; Initial pressure : $p_0 = 70 \text{ kPa}$, Obstacle : $d = 50 \text{ mm}$, $h = 5 \text{ mm}$). White region shows the position of obstacle, and the dotted line shows the onset of cellular patterns which is typical for the onset of detonation wave. These soot-track records show that the DDT onset is not from the flame-front but from vicinity of the wall.

Fig. 9 Schematic diagram showing the scenario of DDT. (a) An expansion of the burned gas generates a compression wave, and the diffraction of it produces a vortex-ring behind the obstacle. The flame is accelerated by interacting with the vortex-ring, however the unburned gas pocket is remained behind the obstacle. The flame front attached with the bottom-wall changes the direction and propagates toward the unburned gas pocket behind the obstacle. (b) When the flame propagated behind the obstacle reaches the wall of top and bottom surface, the local explosion is occurred and the detonation wave propagates much higher velocity along the both surface overtaking the incident flame.

いる未燃気体領域に伝播方向を変える．次に，図 (b) は DDT の第二段階を鉛直方向からモデル化して表している．先頭火炎と凸壁の間の未燃領域に伝播した火炎は，さらに上下方向に伝播方向を変えるため，伝播速度の高い燃焼波が凸壁下流に形成される．この火炎が上下壁面方向に伝播する過程で，壁面近傍では高温・高圧状態が形成されると考えられ，この領域に火炎が到達することにより，壁面近傍で局所爆発が生じるものと考えられる．また，デトネーション波が未燃気体の残されている上下の壁面（図 (a) では奥行き方向の壁面）を伝播する．

したがって，障害物が DDT に果たす主要な役割を列挙すると以下のとおりである．

- (i) 圧縮波が凸壁から回折することにより渦輪を形成させること．
- (ii) 先頭火炎が伝播した後においても未燃の予混合気を凸壁下流に存在させること．
- (iii) 凸壁で回折した火炎が凸壁下流の未燃領域を伝播することにより，CJ 速度の約 40% に相当する高速の火炎を生成させること．
- (iv) 高速の火炎が壁面に到達することにより，局所爆発を生じさせること．

4.2 障害物形状とデトネーション誘導距離の関係

障害物の間隔 d を大きくした場合には，障害物による DDT の促進効果は弱い．また，間隔 d が小さい場合には，燃焼波が障害物の間の凹部分に回折できないため，DDT の促進効果は期待できない (Gamezo et al., 2008; Obara et

Fig. 10 Relationship between detonation induction distance, DID and non-dimensional length L/λ (Test gas: $2\text{H}_2 + \text{O}_2$, Initial pressure: $p_0 = 70 \text{ kPa}$). The length of L is indicated in Fig. 2 ($L = Hd/h$), and λ is the cell-width of steady propagating detonation wave. Detonation induction distance has a local minimum value of $\text{DID} \simeq 125 \text{ mm}$ at the non-dimensional distance of $L/\lambda \simeq 430$, where the obstacle has the dimension of spacing $d = 50 \text{ mm}$ and height $h = 5 \text{ mm}$.

al., 2012). 同様のことは障害物の高さ h に対しても言える。したがって、流路幅 H に対応して点火から最も短い距離で DDT を生じさせる最適値が障害物の間隔 d と高さ h には存在することになる (Obara et al., 2012)。

DID については、図 8 に示したような煤膜模様を採取し、点火プラグからデトネーション波に特有のうろこ模様が生じるまでの距離を計測することにより求めた。図 10 は、縦軸にデトネーション誘導距離 DID、横軸に無次元距離 L/λ として整理した結果であり、障害物を図 3(a) Vertical Installation のように設置して得られたすす膜模様から読み取った。ここで、距離 L は図 2 に示すように、凸壁の右下部から次の凸壁の左頂点を結んだ延長線が流路内壁と交わる点を結んだ斜線の水平方向距離として定義されている (Dorofeev et al., 2000)。したがって、流路幅を H とすると $L = Hd/h$ で表される。距離 L は、障害物の間隔 d 、高さ h および流路幅 H の関数として表されるため、異なる障害物形状のデータを整理するには便利である。Dorofeev et al. (2000) は、各種予混合気におけるデトネーション遷移の有無について調査し、距離 L を用いて整理している。また、 λ は定常デトネーション波のセル幅であり、予混合気の反応速度を示すスケーリング・パラメーターとして用いることができる。すなわち、予混合気の化学反応速度が高くなるにしたがってデトネーション・セル幅 λ は小さくなる性質を持ち、ここではデトネーション・データベース (GALCIT Explosion Dynamics Detonation Database) の値を引用した。ブロックage比を $BR (= h/H)$ とすると、無次元距離 L/λ は次式で表されることになる。

$$\frac{L}{\lambda} = \frac{Hd}{h\lambda} = \frac{d}{\lambda} \cdot \frac{1}{BR}$$

これより、無次元距離 L/λ が大きい条件では、予混合気の反応速度が高いことを意味し、DID は短くなることが予想される。一方、ブロックage比 $BR \rightarrow 0$ とした場合を考えると、障害物による DDT の促進効果がないため、DDT は起こりにくく DID は長くなる。したがって、DID が最も短くなる最適値が L/λ には存在すると予想される。図より、DID は $L/\lambda \simeq 430$ ($d = 50 \text{ mm}$, $h = 5 \text{ mm}$) において極小値 $\text{DID} \simeq 125 \text{ mm}$ をとることが分かる。また、 $L/\lambda > 430$ の条件では、DID は大きく変化していない。これは、図 4 および図 6 のシュリーレン写真に示したように、DDT は点火プラグから数えて 3 個目と 4 個目の障害物間において生じており、本実験条件範囲内では DID が最も短い結果である。したがって、DID が極小値を超える条件では、 L/λ の値に大きく依存しない結果となる。Dorofeev et al. (2000) は、予混合気を構成する燃料および酸化剤を種々変化させ、 $L/\lambda > 7$ の条件において DDT が生じることを明らかにしている。本研究で得られた $L/\lambda \simeq 430$ は明らかに DDT が生じる条件下にあるが、予混合気の種類や当量比 ϕ 、初期圧 p_0 、流路幅 H 等を変化させ、実験データを蓄積することが今後の課題である。

5. 結 言

本論文では、連続した障害物を挿入した流路において水素 - 酸素予混合気を点火し、デフラグレーション波からデトネーション波に遷移する過程について、超高速ビデオカメラおよびシュリーレン光学系を用いることにより可視化観察を行った。障害物を挿入する方向を2通りに変化させ、燃焼波が障害物の奥行き方向に伝播する現象がデトネーション遷移に対して有意な効果をもたらすこと、および障害物上における DDT の機序について述べた。本論文で明らかにされた知見を要約すると以下のとおりである。

(1) DID がほぼ極小値をとる場合に DDT が生じる機序については以下のように説明される。

- i) (First Stage) 凸形状をなす火炎が伝播することにより圧縮波が形成される。圧縮波が凸壁において回折することにより凸壁下流には渦輪が形成される。渦輪は時間経過とともに成長する。
- ii) 火炎が渦輪領域に到達すると、火炎は渦に巻き込まれるように湾曲して伝播するため、火炎面積の増大をもたらす、火炎は加速しながら伝播する。この際、凸壁下流には未燃の予混合気を取り残された状態となる。
- iii) (Second Stage) 湾曲した火炎先端が底面に達すると下方へは伝播できないため、障害物の奥行き方向に存在する未燃領域に伝播方向を変化させ、極めて伝播速度の高い燃焼波が生じる。
- iv) 奥行き方向に伝播した火炎が壁面に達することにより局所爆発が生じ、先頭の火炎面と奥行き方向の壁面間に存在する未燃領域においてデトネーション波への遷移が完了する。

(2) 本実験条件下において DDT を起こすのに最も効果的なのは、障害物の間隔が $d = 50 \text{ mm}$ 、高さが $h = 5 \text{ mm}$ の場合であり、無次元距離で表すと $L/\lambda \simeq 430$ の場合である。

文 献

- Ciccarelli, G., Fowler, C. J. and Bardou, M., Effect of obstacle size and spacing on the initial stage of flame acceleration in a rough tube, *Shock Waves*, Vol.14, No.3 (2005), pp.161–166.
- Ciccarelli, G. and Dorofeev, S., Flame acceleration and transition to detonation in ducts, *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol.34 (2008), pp.499–550.
- Ciccarelli, G., Johansen, C. T. and Parravani, M., The role of shock–flame interactions on flame acceleration in an obstacle laden channel, *Combustion and Flame*, Vol.157 (2010), pp.2125–2136.
- デトネーション研究会編, デトネーションの熱流体力学 1 (第 13 章 デトネーション特性解析コード (AISTJAN) について), 理工図書 (2011), pp.267–282.
- Dorofeev, S. B., Sidorov, V. P., Kuznetsov, M. S., Matsukov, I. D. and Alekseev, V. I., Effect of scale on the onset of detonations, *Shock Waves*, Vol.10 (2000), pp.137–149.
- GALCIT Explosion Dynamics Laboratory Detonation Database,
available from (http://www.galcit.caltech.edu/detn_db/html/db.html) (参照日 2015 年 3 月 20 日)
- Gamezo, V. N., Ogawa, T. and Oran, E. S., Flame acceleration and DDT in channels with obstacles; Effect of obstacle spacing, *Combustion and Flame*, Vol.155 (2008), pp.302–315.
- Johansen, C. T. and Ciccarelli, G., Visualization of the unburned gas flow field ahead of an accelerating flame in an obstructed square channel, *Combustion and Flame*, Vol.156 (2009), pp.405–416.
- Kuznetsov, M., Alekseev, V., Matsukov, I. and Dorofeev, S., DDT in a smooth tube filled with a hydrogen–oxygen mixture, *Shock Waves*, Vol.14, No.3 (2005), pp.205–215.
- Lee, J. H. S., *The Detonation Phenomenon*, Cambridge University Press (2008).
- Moen, I. O., Donato, M., Knystautas, R. and Lee, J. H., Flame acceleration due to turbulence produced by obstacles, *Combustion and Flame*, Vol.39 (1980), pp.21–32.
- Obara, T., Yajima, S., Yoshihashi, T. and Ohyagi, S., A high–speed photographic study of the transition from deflagration to detonation wave, *Shock Waves*, Vol.6 (1996), pp.205–210.
- Obara, T., Kobayashi, T. and Ohyagi, S., Mechanism of deflagration–to–detonation transitions above repeated obstacles, *Shock Waves*, Vol.22, Issue 6 (2012), pp.627–639.

- Peraldi, O., Knystautas, R. and Lee, J. H., Criteria for transition to detonation in tubes, Proceedings of 21st Symposium (International) on Combustion (1986), pp.1629–1637.
- Shchelkin, K. I. and Troshin, Ya. K., Gasdynamics of combustion, Mono Book Corporation (1965), pp.30–36.
- Sorin, R., Zitoun, R. and Desbordes, D., Optimization of the deflagration to detonation transition: Reduction of length and time of transition, Shock Waves, Vol.15 (2006), pp.137–145.
- Teodorczyk, A., Drobnik, P. and Dabkowski, A., Fast turbulent deflagration and DDT of hydrogen–air mixtures in small obstructed channel, International Journal of Hydrogen Energy, Vol.34 (2009), pp.5887–5893.
- Thomas, G. O., Bambrey, R. J. and Brown, C., Experimental observations of flame acceleration and transition to detonation following shock–flame interaction, Combustion Theory and Modeling, Vol.5 (2001), pp.573–594.

References

- Ciccarelli, G., Fowler, C. J. and Bardon, M., Effect of obstacle size and spacing on the initial stage of flame acceleration in a rough tube, Shock Waves, Vol.14, No.3 (2005), pp.161–166.
- Ciccarelli, G. and Dorofeev, S., Flame acceleration and transition to detonation in ducts, Progress in Energy and Combustion Science, Vol.34 (2008), pp.499–550.
- Ciccarelli, G., Johansen, C. T. and Parravani, M., The role of shock–flame interactions on flame acceleration in an obstacle laden channel, Combustion and Flame, Vol.157 (2010), pp.2125–2136.
- Detonation Society (Ed.), Thermal–fluid dynamics of detonation 1 (Chap.13, Characteristic analysis code AISTJAN for detonation), Rikoh Tosho (2011), pp.267–282 (in Japanese).
- Dorofeev, S. B., Sidorov, V. P., Kuznetsov, M. S., Matsukov, I. D. and Alekseev, V. I., Effect of scale on the onset of detonations, Shock Waves, Vol.10 (2000), pp.137–149.
- GALCIT Explosion Dynamics Laboratory Detonation Database,
available from (http://www.galcit.caltech.edu/detn_db/html/db.html) (accessed on 20 March, 2015).
- Gamezo, V. N., Ogawa, T. and Oran, E. S., Flame acceleration and DDT in channels with obstacles; Effect of obstacle spacing, Combustion and Flame, Vol.155 (2008), pp.302–315.
- Johansen, C. T. and Ciccarelli, G., Visualization of the unburned gas flow field ahead of an accelerating flame in an obstructed square channel, Combustion and Flame, Vol.156 (2009), pp.405–416.
- Kuznetsov, M., Alekseev, V., Matsukov, I. and Dorofeev, S., DDT in a smooth tube filled with a hydrogen–oxygen mixture, Shock Waves, Vol.14, No.3 (2005), pp.205–215.
- Lee, J. H. S., The Detonation Phenomenon, Cambridge University Press (2008).
- Moen, I. O., Donato, M., Knystautas, R. and Lee, J. H., Flame acceleration due to turbulence produced by obstacles, Combustion and Flame, Vol.39 (1980), pp.21–32.
- Obara, T., Yajima, S., Yoshihashi, T. and Ohyagi, S., A high–speed photographic study of the transition from deflagration to detonation wave, Shock Waves, Vol.6 (1996), pp.205–210.
- Obara, T., Kobayashi, T. and Ohyagi, S., Mechanism of deflagration–to–detonation transitions above repeated obstacles, Shock Waves, Vol.22, Issue 6 (2012), pp.627–639.
- Peraldi, O., Knystautas, R. and Lee, J. H., Criteria for transition to detonation in tubes, Proceedings of 21st Symposium (International) on Combustion (1986), pp.1629–1637.
- Shchelkin, K. I. and Troshin, Ya. K., Gasdynamics of combustion, Mono Book Corporation (1965), pp.30–36.
- Sorin, R., Zitoun, R. and Desbordes, D., Optimization of the deflagration to detonation transition: Reduction of length and time of transition, Shock Waves, Vol.15 (2006), pp.137–145.
- Teodorczyk, A., Drobnik, P. and Dabkowski, A., Fast turbulent deflagration and DDT of hydrogen–air mixtures in small obstructed channel, International Journal of Hydrogen Energy, Vol.34 (2009), pp.5887–5893.
- Thomas, G. O., Bambrey, R. J. and Brown, C., Experimental observations of flame acceleration and transition to detonation following shock–flame interaction, Combustion Theory and Modeling, Vol.5 (2001), pp.573–594.