

スリット板背後におけるデトネーション波の再開始過程\*  
(供試気体初期圧力の影響)小 原 哲 郎<sup>\*1</sup>, Jayan SENTANUHADY<sup>\*2</sup>  
塚 田 豊<sup>\*2</sup>, 大八木 重 治<sup>\*1</sup>Re-Initiation Processes of Detonation Wave behind Slit-Plate  
(Influence of Initial Test Gas Pressure)Tetsuro OBARA<sup>\*3</sup>, Jayan SENTANUHADY,  
Yutaka TSUKADA and Shigeharu OHYAGI<sup>\*3</sup> Graduate School of Science and Engineering, Saitama University,  
255 Shimo-Ohkubo, Sakura-ku, Saitama-shi, Saitama, 338-8570 Japan

Experiments were conducted in order to investigate behaviors of a detonation wave propagating into two pieces of slit, since the detonation wave might be quenched behind a slit-plate by expansion waves generated at a corner of the plate and this technique might be applicable to a detonation arrestor. The detonation wave produced in a stoichiometric mixture of hydrogen and oxygen was propagated through the slits and behaviors of the detonation wave were experimentally investigated by using a technique of pressure measurement, soot track record and high-speed schlieren photography. As a result, when the detonation wave propagated through the slits, it was quenched and a shock wave was decoupled with a reaction front. Two shock waves diffracted from the slits interacted each other at centre of the tube, then this shock wave interaction induced a hot-spot enough to cause local explosions behind the slit-plate. Since the shock wave was reflected from the wall and interacted at centre of the tube, the detonation wave was re-initiated behind the slits.

**Key Words:** Detonation, Premixed Combustion, Combustion Phenomena, Shock Wave, Compressible Flow

## 1. は じ め に

可燃性の予混合気体中を伝ばするデトネーション波は、その前方に衝撃波を伴い、衝撃波により未燃気体の温度を自己着火温度以上に高めながら伝ばする<sup>(1)(2)</sup>。デトネーション波が通過すると圧力は初期圧力の数十倍のオーダーで増加するため、安全工学上の見地からデトネーション波の発生と伝ば機構に関する研究が進められてきた経緯がある。特に、可燃性気体を取扱う工場やプラント設備等においてデトネーション波が発生されれば周囲に与える影響は甚大であるため、デトネーション波を消滅もしくは減衰させる方法を確認することは安全工学上の重要課題である<sup>(3)</sup>。

デトネーション波面は入射衝撃波、マッハ軸衝撃波および反射衝撃波で構成され、これら三衝撃波が一点で交差した三重点を伴いながら伝ばする特徴があ

る<sup>(1)(4)(5)</sup>。したがって、デトネーション波は衝撃波群と反応帯により構成されるセル構造を伴い伝ばする。デトネーション波を消滅させるには波面のセル構造を崩壊されることが不可欠となる<sup>(6)</sup>。デトネーション波をセルサイズ以下の狭い流路に入射させることにより、デトネーション波は衝撃波と燃焼波面に分離する<sup>(1)(6)</sup>。すなわち、デトネーション波の伝ばに不可欠なセル構造が物理的に崩壊されるため、衝撃波背後の温度が低下して衝撃波と燃焼波面とに分離すると考えられる。さらに、デトネーション波が断面拡大部において回折する際には、回折角部から膨張波が発生しデトネーション波背後の温度を低下させる。これまでに、デトネーション波が回折する際の挙動<sup>(7)</sup>、回折したデトネーション波の伝ば限界を示す臨界管直径<sup>(8)</sup>および回折角を変化させた場合のデトネーション波の挙動について可視化観察がなされた<sup>(9)</sup>。また、衝撃波が壁面と干渉し反射することにより、デトネーション波が再開始されることが実験および数値計算より明らかにされている<sup>(3)(10)(11)</sup>。さらに、管内を伝ばしたデトネー

\* 原稿受付 2006年3月15日。

<sup>\*1</sup> 正員, 埼玉大学大学院理工学研究科(〒338-8570 さいたま市桜区下大久保 225)。<sup>\*2</sup> 埼玉大学大学院理工学研究科。

E-mail: tobara@mech.saitama-u.ac.jp

ション波を回折させることにより完全に消滅させるには、管内径が少なくともセルサイズの数倍以下である必要があることが報告されている<sup>(12)</sup>。デトネーション波が回折を起こすことにより一度、衝撃波と燃焼波面に分離した場合でも、衝撃波が管壁面で複数回の反射を繰り返す過程においてデトネーション波が再開始される可能性がある<sup>(6)(13)~(15)</sup>。しかしながら、衝撃波が管壁等と干渉して反射した場合や衝撃波どうしの干渉によってデトネーション波が再開始される現象は極めて短時間で生じるため、その過程について十分明らかにされていない。また、デトネーション波が再開始する位置は物理的・化学的条件によって決定されると考えられるが、複雑であり明らかにされていない。

本研究では、デトネーション管内に2個のスリットを設けた板（以下、スリット板と呼ぶ）を挿入し、スリットに入射したデトネーション波の挙動について実験的に調べた。具体的には、スリット板の形状を一定とし、供試気体の初期圧力を変化させて実験を行い、デトネーション波の再開始過程について可視化観察を行ったので報告する。

## 2. 実験装置および方法

**2.1 実験装置** 図1に実験に用いたデトネーション管の概略を示す。デトネーション管は鉛直に設置されており、上から順に駆動管、被駆動管、観測部およびダンプタンクで構成される。デトネーション管は内断面が50×50 mmの正方形であり、全長は4100 mmである。

駆動管 (Driver Tube) は長さ1000 mmであり、上部に自動車用火プラグを取付け混合気体を着火し、デトネーション波を間接開始させた。駆動管内部に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時間を短くするためのスパイラルコイル (外径50 mm, 長さ500 mm, ピッチ38 mm) が挿入してある。駆動管と被駆動管の間には、厚さ25 μmのマイラー膜を挿入し駆動気体と供試気体を分離した。被駆動管 (Driven Tube) は長さ2000 mmであり、定常デトネーション波を観測部に入射させるために用いた。被駆動管には測定孔 (上から順にP1~P4と呼ぶ) を100 mm間隔で設けた。観測部 (Observation Section) は、長さ700 mmであり、光学ガラス (BK7) が埋め込まれた観測窓 (長さ150 mm, 幅50 mm) を備える。観測部には、測定孔 (P5~P11と呼ぶ) が100 mm間隔で設けてあり、デトネーション波の再開始過程を調べることができる。ダンプタンク (Dump Tank) は内径200 mm, 長さ400 mm (容積 $1.26 \times 10^{-2} \text{ m}^3$ ) であり、内部を真空にしてデト

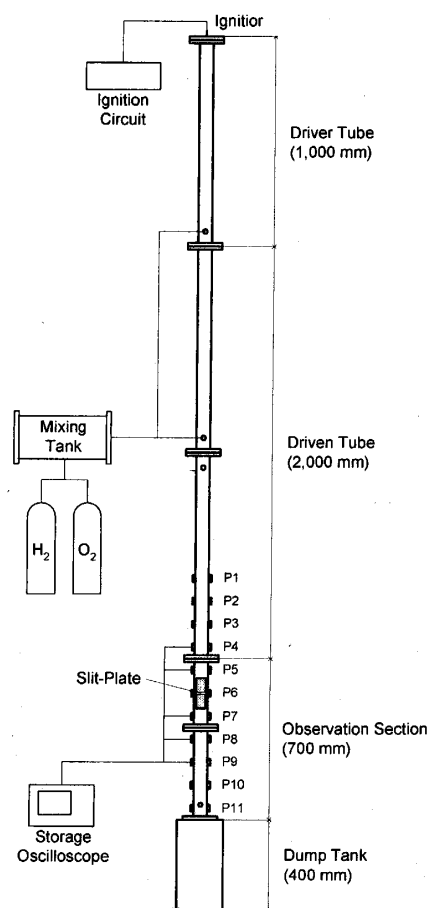


Fig. 1 Schematic diagram of vertical detonation tube (Total length: 4100 mm, Cross section: 50 × 50 mm, P1 ~ P11: Position of measuring stations).

ネーション波を減衰させるのに使用した。なお、測定孔P1~P11は管に対向する位置に設けられており、圧力変換器とイオンプローブをそれぞれ取付け、圧力波形とイオン電流波形の同時計測を行った。

図2にスリット板の概略を示す。また、表1に製作したスリット板の諸量を示す。スリット板の大きさは50×50 mm, 厚さ10 mm, 1個のスリット幅は5 mmで一定であり、スリットの間隔 $x$ を2 mm (Plate A), 5 mm (Plate B), 10 mm (Plate C) と変えたスリット板を製作した。スリット板を図1に示すP6の位置に固定し、デトネーション波を上方からスリットに入射させる実験を行った。

**2.2 実験方法** ピエゾ式圧力変換器 (PCB Piezotronics, 113A24, 立ち上がり時間1 μs以下) およびイオンプローブを図1に示す測定孔P4, P5, P7, P8に取付けデトネーション波の圧力および伝ば速度を計測するのに用いた。イオンプローブは2本の鉄芯間 (間隙約1 mm) に90 Vの電圧を印加してあり、導電

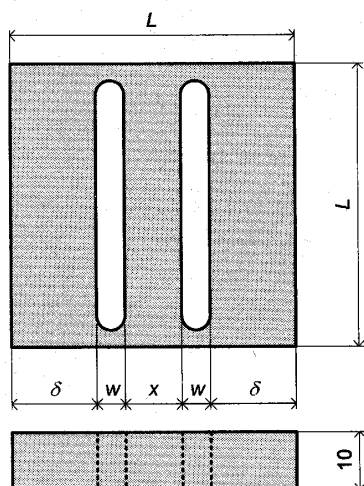


Fig. 2 Schematic diagram of double slit-plate inserted at observation section P6.

Table 1 Experimental conditions of slit-plate.

Parameters	Conditions
Length, $L$ (mm)	50
Thickness (mm)	10
Width of Slit, $w$ (mm)	5
Distance of Slit, $x$ (mm)	2 (Plate A) 5 (Plate B) 10 (Plate C)
Length between Slit and Wall, $\delta$ (mm)	19.0 (Plate A) 17.5 (Plate B) 15.0 (Plate C)

Table 2 Experimental conditions of gases.

Parameter of gases	Driver	Driven
Fuel	H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>
Oxidizer	O <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>
Equivalence Ratio, $\phi$	1.0	1.0
Initial Pressure, $p_0$ (kPa)	100	20 ~ 100

性を示す既燃気体が鉄芯間を通過することで、鉄芯間が導通状態となる特性を利用し燃焼波の到達を検知する<sup>(16)</sup>。したがって、圧力波形およびイオンプローブの出力時刻が一致していれば、衝撃波と燃焼波が一体化して伝ばしたことになり、伝ばする波をデトネーション波と判別することができる。なお、4個のイオンプローブからの出力信号は、燃焼波の到達時刻を検出するために使用するため、オシロスコープの使用チャンネル数を減らすため1つのチャンネルに重ね合わせて記録した。

スリット板の上下領域におけるすす膜模様を採取し、

デトネーション波の消炎および再開始現象について調べた。すす膜模様は、予め灯油を燃した際のすすを塗布したアルミニウム製の板 (厚さ 0.4 mm) をデトネーション管内に挿入しておくことにより得られる。すなわち、3次元構造を有するデトネーション波がすす膜上を伝ばした場合、すすの剥がされ方は不均一となり3次元構造に起因するうろこ模様がすす膜上には記録される。すす膜模様を採取することによりスリット板からデトネーション波が再開始されるまでの距離を求めた。

スリット板背後におけるデトネーション波の再開始過程の可視化観察には、Z型に配置したシュリーレン光学系、キセノン光源 (Hadland Photonics, Ltd., Xenon Lamp Unit, 375 J Flash<sup>-1</sup>) およびイメージコンバータ超高速カメラ (Hadland Photonics, Ltd., Imacon 792) を用いた。キセノン光源の発光時間は半値幅で約 50  $\mu$ s である。シュリーレン写真のコマ間隔は 2  $\mu$ s、露光時間 400 ns の条件で撮影した。なお、キセノン光源およびカメラのトリガーには、P5 に取付けた圧力変換器からの出力信号を用いた。

表2に実験条件を示す。駆動管および被駆動管には量論混合比の酸素-水素混合気体を充填した。駆動管の初期圧力は 100 kPa で一定とし、供試気体の初期圧力  $p_0$  を 20 ~ 100 kPa の範囲で変化させた。なお、駆動管内で生成されたデトネーション波はスリット板を設置した P6 の位置に到達するまでに、定常デトネーション波に遷移することを確認してある。

### 3. 結果および考察

スリットの間隔  $x$  を 10 mm で一定とし (Plate C), 供試気体の初期圧力  $p_0$  を 20 kPa と 40 kPa で変化させた場合の実験結果を示し、スリット板に入射したデトネーション波のスリット背後における再開始過程について述べる。

**3-1 初期圧力  $p_0 = 20$  kPa の場合** 図3に供試気体の初期圧力  $p_0 = 20$  kPa の条件に対して得られた圧力波形およびイオン電流波形を示す。供試気体の当量比は  $\phi = 1.0$  である。横軸はデトネーション波が測定孔 P4 に到達してからの時間であり、縦軸は圧力を初期圧力で除した無次元圧力である。図の上部には、イオンプローブからの出力信号、下部には測定孔 P4, P5, P7 および P8 の位置で計測された圧力履歴を示す。デトネーション波が P4, P5 の順に伝ばすることにより、これらの圧力波形は急峻に上昇する。デトネーション波の大部分はスリット板表面で反射するため、反射衝撃波が P5, P4 と上流方向へ伝ばする。デトネーション

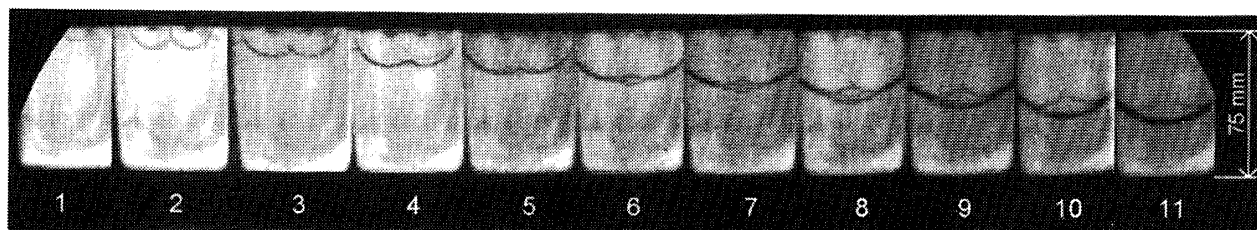


Fig. 4 Schlieren photograph showing re-initiation processes of detonation wave ( $\phi = 1.0$ ,  $p_0 = 20$  kPa,  $x = 10$  mm, IFT:  $2 \mu\text{s}$ , Exposure time:  $400$  ns).

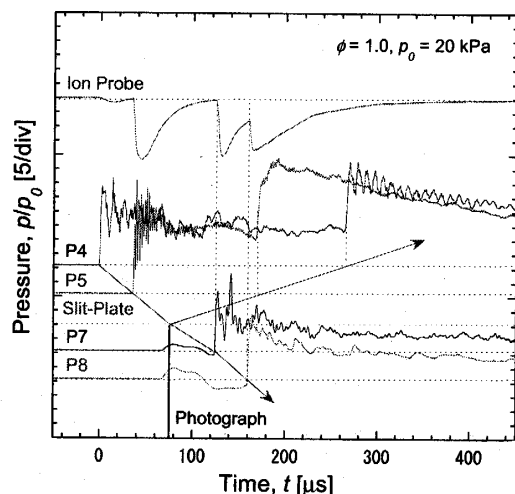


Fig. 3 Profile of ionization current (upper) and pressure (lower) ( $\phi = 1.0$ ,  $p_0 = 20$  kPa).

波がスリットに入射することにより伝ば速度が減少しており、後述するシュリーレン写真を考慮するならば、スリット背後では衝撃波と燃焼波に分離したと判断できる。なお、測定孔 P7 および P8 の圧力波形において衝撃波前方に記録された圧力変動は、シュリーレン撮影に用いたキセノン光源からの電気的ノイズであり、この部分においては正確な圧力波形を記録していない。測定孔 P7 および P8 の位置では圧力の立上がり時刻とイオンプローブの出力時刻が一致することから、P7 の位置ではデトネーション波の再開始を確認できる。したがって、スリット板背後から P7 に至る過程でデトネーション波が再開始する。

図 4 は、図 3 の圧力波形と同時撮影されたシュリーレン写真である。写真のコマ間隔は  $2 \mu\text{s}$ 、各コマの露光時間は  $400$  ns であり、スリット板背後の  $50 \text{ mm} \times 75 \text{ mm}$  の領域を撮影した。写真の 1 コマ目では、2 個のスリットから衝撃波が回折して伝ばする。このシュリーレン写真から伝ばする波が衝撃波かデトネーション波かを判別することは難しいが、波面上にはデトネーション波特有のセル模様が観察されないこと、および後述するすす膜上にもセル模様が観察できないことから衝撃

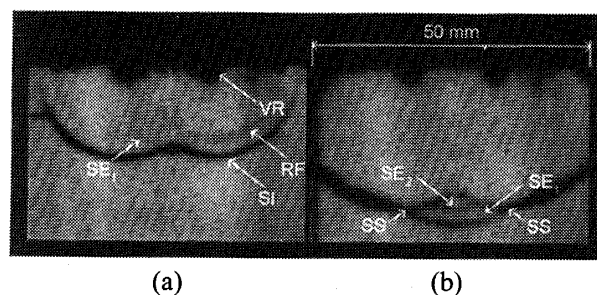


Fig. 5 High-magnification of (a) 4th and (b) 7th frame of Fig. 4 (SE: Shock wave produced by local explosion, SI: Incident shock wave, SS: Shock-shock intersection point, RF: Reaction front, VR: Vortex ring).

波と燃焼波に分離したと判断できる<sup>(18)</sup>。衝撃波は、スリットの角部から生じる膨張波の影響を受け、湾曲した形状を呈する。2 コマ目において、2 個のスリットから回折した衝撃波どうしが干渉の様子が観察される。3 コマ目において 2 つの衝撃波が干渉した中心軸上で高圧領域に起因する密度変化が観察され、4 コマ目の中心軸上では円形の衝撃波が観察できる。この衝撃波は、2 つの衝撃波が干渉することによる高温・高圧領域において供試気体が着火することにより局所爆発を生じ、既燃気体が膨張することにより形成される。局所爆発により生じた衝撃波の伝ば速度は高く、5 コマ目以降において 2 つの回折衝撃波を貫いて伝ばする。さらに、同様の局所爆発は 6 コマ目と 7 コマ目の間でも生じたことがわかり、4 コマ目の局所爆発で生じた衝撃波背後に第 2 の衝撃波が追従する。2 度目の局所爆発により生じた衝撃波の伝ば速度は先行する衝撃波の伝ば速度よりも高く、9～11 コマ目においてこれら 2 つの衝撃波が一体化して伝ばする。さらに、9～11 コマ目では衝撃波が厚く撮影されることから、露光時間  $400$  ns における伝ば距離が長く伝ば速度が高いと考えられる。

図 5(a) および (b) は図 4 のシュリーレン写真の一部

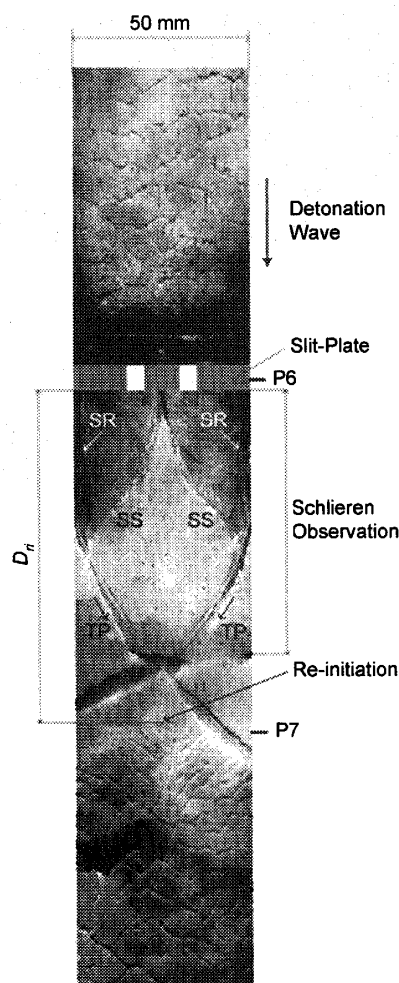


Fig. 6 Soot track record showing re-initiation processes of detonation wave, SR : Reflected shock wave, SS : Shock-shock intersection point, TP : Triple point ( $\phi = 1.0$ ,  $p_0 = 20$  kPa,  $x = 10$  mm).

を拡大表示してあり、図4のそれぞれ4コマ目および7コマ目に相当する。図5(a)では2つの衝撃波SIがスリットから回折することにより、渦輪VRが形成される。衝撃波SIに追従する波RFが観察される。これは、デトネーション波がスリットから回折する際に衝撃波面と燃焼波面に分離した際の燃焼波面と考えられる。2つの衝撃波SIが干渉した中心軸上では局所爆発が生じ、円状の衝撃波 $SE_1$ が観察できる。さらに、図5(b)では衝撃波 $SE_1$ に追従して前述した2度目の局所爆発による衝撃波 $SE_2$ が生じる。入射衝撃波SIと局所爆発により生じた衝撃波の交点SSでは、高温・高圧状態になると考えられ、すす膜上に特徴的な軌跡を描くことになるが、これについては後述する。

図6は、図3および図4と同条件の実験により得られたすす膜模様である。デトネーション波の伝ばにより生成されるセル模様を観察しやすいようにすす膜模

様をスキャン処理後に白黒反転し、コントラストおよび明るさを調整する画像処理を施してある。デトネーション波は図の下方方向に伝ばし、P6の位置に取付けたスリットに入射する。スリット板の上方位置において、ほぼ規則的なセル模様が観察できる。デトネーション波はスリット板表面に衝突し反射衝撃波が上方へ伝ばするため、スリット板上部においてすす膜の大部分が剥がされ飛散する。一方、スリット板下部においてはセル模様が消失するとともに中心軸上から左右斜め下方方向に拡がる特徴的な模様が生じる。この模様は図5で観察したように、先行する回折衝撃波と局所爆発により生じた衝撃波の交点SSの軌跡と一致する。また、左右の壁面近傍では入射衝撃波が反射することによる軌跡SRが観察できる。この軌跡SRと衝撃波どうしの交点SSが干渉する点から衝撃波はマッハ反射を呈すると考えられ、その軌跡TPが観察できる。マッハ反射による三重点の軌跡は下方の中心軸に向かい交差する。デトネーション波が再開始されるのは、マッハ反射による三重点TPが中心軸上で交差した点の下流位置で生じる。図中においてRe-Initiationで示す位置より下方でセル模様が観察され、デトネーション波が再開始した証拠である。また、デトネーション波が再開始された位置は測定孔P7付近であり、図3に示した圧力波形におけるP7の位置でデトネーション波が再開始することとも符合する。デトネーション波が再開始した直後においては細かいセル模様が観察され、スリット板上部における定常デトネーション波のセルサイズに比較して小さい。したがって、デトネーション波が再開始した直後においては、Overdrivenのデトネーション波が生成される。さらに、セルサイズはデトネーション波の伝ばとともに大きくなり、スリット板上部のセルサイズとほぼ等しい大きさになる。また、デトネーション波が再開始した点より下流においては、上流において衝撃波どうしが干渉することにより形成されたスケールの大きな軌跡は観察できない。図6より、スリット板からデトネーション波再開始点までの距離 $D_{ri}$ は約94 mmと見積もられる。

**3.2 初期圧力  $p_0 = 40$  kPa の場合** 図7は、供試気体の初期圧力  $p_0 = 40$  kPa の条件に対して得られたシュリーレン写真である。コマ間隔、露光時間は図4と同一である。1コマ目において2個のスリットから回折する衝撃波が観察できる。2コマ目以降において、回折衝撃波どうしの干渉が起こる。3コマ目において回折衝撃波の背後に観察できる湾曲した密度変化は、燃焼波面であると考えられる。デトネーション波がスリットから回折を開始した際、スリット角部から

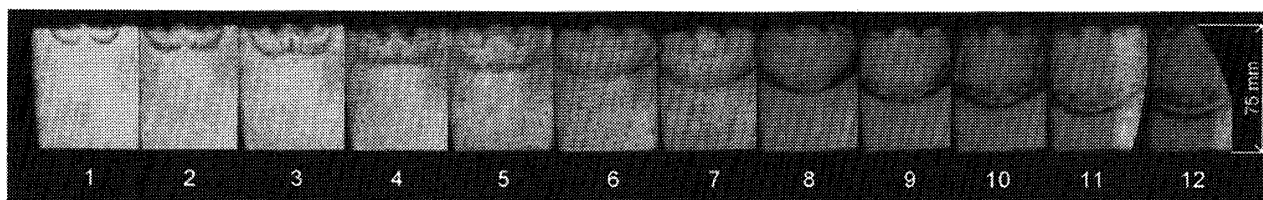


Fig. 7 Schlieren photograph showing re-initiation processes of detonation wave ( $\phi = 1.0$ ,  $p_0 = 40$  kPa,  $x = 10$  mm, IFT:  $2 \mu\text{s}$ , Exposure time: 400 ns).

生じる膨張波によりデトネーション波背後の温度および圧力は低下する。したがって、衝撃波と一体化して伝ばした反応帯における燃焼速度は低下する。これにより、衝撃波から燃焼波までの距離である誘導反応帯厚みは大きくなり、シュリーレン写真において分離して可視化される。3コマ目では、図4で観察したのと同様に2つの回折衝撃波どうしが干渉した中心軸上で局所爆発が生じる様子が観察できる。局所爆発により生じた衝撃波が回折衝撃波と干渉の様子および中心軸上において燃焼が生じる領域を確認することができる。供試気体の初期圧力は図4に示したシュリーレン写真よりも高く燃焼速度も高いため、局所爆発により生じた衝撃波は先行する回折衝撃波に追いつき、回折衝撃波の形状を平面形状へと変形させる様子が4コマ目で観察できる。5コマ目以降において、局所爆発による衝撃波は先行する衝撃波よりも伝ば速度が高く、中心軸上の下方に凸形状の衝撃波へと遷移させる。さらに、5コマ目における左右の壁近傍では、衝撃波と燃焼波面が分離するのに対し、中心軸上では衝撃波と燃焼波がほぼ一体化して伝ばする。したがって、中心軸領域では図4で観察されたような2度の局所爆発は生じない。回折衝撃波は5コマ目以降で左右の壁面と干渉し反射するが、反射衝撃波は回折衝撃波に追従する反応帯と干渉するため、シュリーレン写真では反射衝撃波の挙動を観察することは難しい。しかし、8コマ目以降においては先行する衝撃波が壁面と干渉する点から反射衝撃波が生じる様子が観察できる。10コマ目以降では、衝撃波はその背後に白く撮影される領域を伴い伝ばする。この領域では密度勾配の傾きが衝撃波とは逆方向となり燃焼波面であると考えられる。供試気体の初期圧力が  $p_0 = 40$  kPa の条件では、中心軸上で回折衝撃波どうしが干渉し局所爆発を介して衝撃波を駆動することにより誘導反応帯厚みは減少するが、デトネーション波の再開始には至らず、可視化領域内で再び衝撃波と燃焼波に分離する。

図8は、図7に示したシュリーレン写真に同期して得られた圧力波形である。圧力波形の概略は図3に示

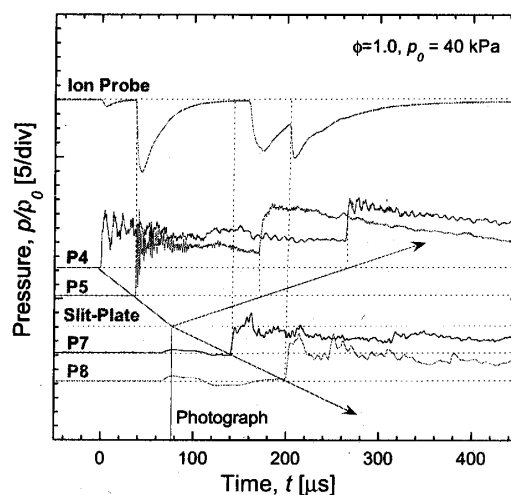


Fig. 8 Profile of ionization current (upper) and pressure (lower) ( $\phi = 1.0$ ,  $p_0 = 40$  kPa,  $x = 10$  mm).

した初期圧力  $p_0 = 20$  kPa の場合と同様であるが、測定孔 P7 の位置では圧力の立上がり時刻より遅れてイオンプローブの出力信号が記録されることから、測定孔 P7 の位置ではデトネーション波が再開始していない。測定孔 P8 の位置では両者の立ち上がり時刻が一致することから、P7 と P8 の間でデトネーション波が再開始したと考えられる。したがって、供試気体の初期圧力が  $p_0 = 40$  kPa と高い条件では  $p_0 = 20$  kPa の場合に比較し、スリット板からデトネーション波の再開始点までの距離は長い。

図9は図7および図8と同じ条件に対して得られたすす膜模様であり、デトネーション波は右側壁より再開始される。スリット板からデトネーション波が再開始されるまでの距離  $D_{ri}$  はスリット板より約 125 mm と見積もられ、図6に示した  $D_{ri} = 94$  mm に比べて長い。また、デトネーション波が再開始する距離が長い結果については図8に示した圧力波形とも符合する。供試気体の初期圧力が高い条件に対してデトネーション波の再開始距離が長くなる原因について、次のように考察される。

初期圧力  $p_0 = 20$  kPa の条件では、図6に示すよう

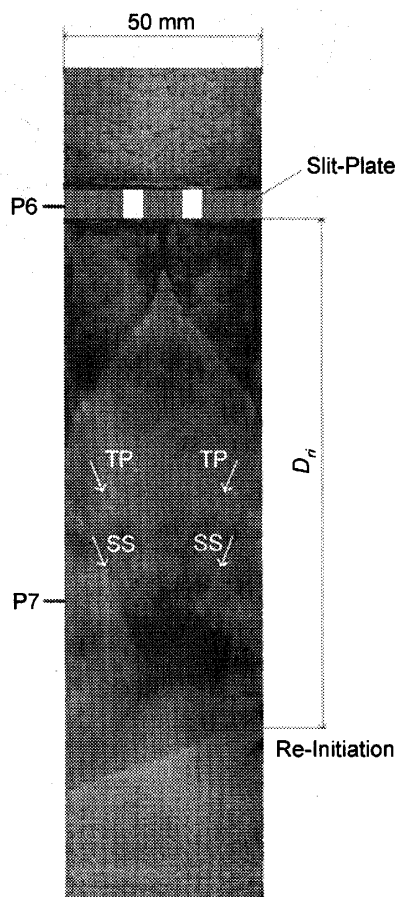


Fig. 9 Soot track record showing re-initiation processes of detonation wave, SS: Shock-shock intersection point, TP: Triple point ( $\phi = 1.0$ ,  $p_0 = 40$  kPa,  $x = 10$  mm).

に入射衝撃波が壁面でマッハ反射した際の三重点の軌跡 TP と局所爆発と入射衝撃波の交点である SS の壁面における反射による軌跡が中心軸上のほぼ一点で干渉する。したがって、この交点においては圧力および温度の著しく高い Hot-Spot が形成され、強い局所爆発を介してデトネーション波が再開始されたと考えられる。一方、図 9 に示した初期圧力  $p_0 = 40$  kPa の条件では、図中の TP と SS の軌跡が中心軸上の一点では交差しない。したがって、この領域における圧力および温度は低いため強い局所爆発は生じず、デトネーション波を再開始するには至らないと推察される。したがって、交点 SS が再び右側壁で反射することによりデトネーション波が再開始したと考えられる。

**3.3 デトネーション波の再開始距離** 前述したように 2 個のスリットから回折した衝撃波によってデトネーション波が再開始するには、回折衝撃波どうしが中心軸上で干渉する現象、および回折衝撃波が壁面と干渉する現象の相互作用によって引き起こされる。デ

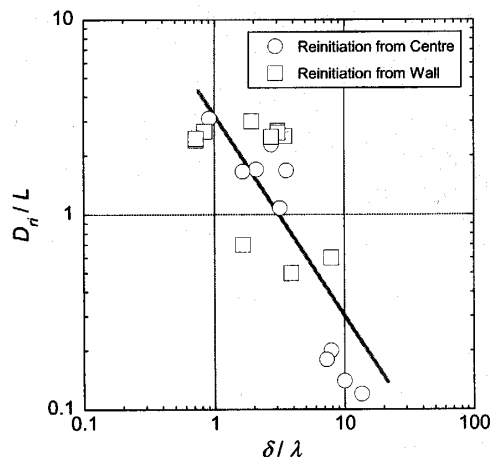


Fig. 10 Relationship of detonation re-initiation distance  $D_{ri}/L$  with non-dimensional distance  $\delta/\lambda$  ( $\phi = 1.0$ ,  $p_0 = 20 \sim 100$  kPa,  $x = 2, 5, 10$  mm)

トネーション波が再開始するまでの距離  $D_{ri}$  をスリット板の形状による物理的条件および供試気体の初期圧力による化学的条件によって整理することを考える。定常デトネーション波のセルサイズ  $\lambda$  は、供試気体の種類、当量比および初期圧などによって決定される。また、セルサイズ  $\lambda$  は供試気体の反応速度に反比例するため<sup>(1)(5)</sup>、供試気体に対する代表寸法と位置付けられる。図 2 に示すように 2 個のスリット幅  $w$  を一定とした場合、スリットから壁面までの距離を  $\delta$  とすれば、 $\delta$  が小さいスリット板では、2 つの衝撃波が中心軸上で干渉するまでにスリット角部から生じる膨張波の影響を受けるため衝撃波は減衰して誘導反応帯厚みは増すため、局所爆発を生じる可能性は低い。図 4 および図 7 に示したように、デトネーション波が再開始するには衝撃波どうしの干渉により局所爆発を生じる現象が関与することから、デトネーション波が再開始するまでの距離  $D_{ri}$  に対して無次元距離  $\delta/\lambda$  によって実験データを整理する。

図 10 は、スリット板からデトネーション波が再開始するまでの距離を管断面の一边で除した無次元距離  $D_{ri}/L$  と  $\delta/\lambda$  の関係を示す。同図には、供試気体の初期圧力  $p_0$  を  $20 \sim 100$  kPa の範囲で変化させ、得られたすす膜模様を観察した結果、管の中心軸付近でデトネーション波の再開始が生じた場合 (○印, SS と TP が中心軸上で干渉することによる再開始) および管壁付近で再開始した場合 (□印, SS, TP が壁面で反射することによる再開始) を区別した結果が示してある。実験データにばらつきはあるが、スリット板からデトネーション波が再開始されるまでの距離  $D_{ri}$  は、無次



元距離  $\delta/\lambda$  によって整理される。横軸  $\delta/\lambda$  が大きい条件では、物理的にはスリット間隔  $x$  が小さく、化学的にはセルサイズ  $\lambda$  が小さく供試気体の反応速度が高い条件であるため、デトネーション波が再開始しやすい。したがって、図 10 に示すように、デトネーション再開始距離  $D_{ri}$  は、負の傾きとなる。また、実験データは両対数グラフ上においてほぼ直線上に分布することから、デトネーション波が再開始するまでの距離は、無次元距離  $\delta/\lambda$  のべき関数で整理される。

#### 4. ま と め

デトネーション管内に 2 個のスリットを有する板を挿入し、スリットに入射したデトネーション波の挙動を調べる実験を行った。供試気体の初期圧力を変化させて実験を行い、圧力計測、高速シュリーレン撮影およびすす膜模様を採取することにより、デトネーション波が再開始するメカニズムを明らかにした。本論で得られた結果を以下に要約する。

- (1) 2 個のスリットに入射したデトネーション波は、次の i)~iii) の過程を経て再開始する。
  - i) スリットに入射したデトネーション波は、スリットから回折を開始した直後よりスリット角部からの膨張波の影響を受け、衝撃波と燃焼波に分離する。
  - ii) 2 つの回折衝撃波どうしが中心軸上で干渉することにより局所爆発が生じ、伝ば速度が著しく大きい衝撃波を駆動する。この衝撃波は回折衝撃波と一体化して伝ばする。
  - iii) 上記の衝撃波は左右の壁面で反射した際にマッハ反射を呈し、三重点が中心軸上で再び干渉することにより、デトネーション波が再開始される。
- (2) 回折衝撃波と局所爆発で生じた衝撃波の交点の軌跡を SS、回折衝撃波が壁面でマッハ反射を起こした際の三重点の軌跡を TP で表せば、SS と TP が中心軸上のほぼ一点で干渉する場合には、干渉領域は高温・高圧状態となるため、スリット板から短い距離でデトネーション波が再開始される。
- (3) スリット板からデトネーション波が再開始するまでの距離  $D_{ri}$  は、無次元距離  $\delta/\lambda$  を用いて推定することができる。

#### 謝 辞

本実験を行うにあたり、本学 吉橋 照夫 技師の協力を得た。ここに付記し謝意を表する。

#### 文 献

- (1) Lee, J.H.S., Dynamic Parameter of Gaseous Detonations, *Ann. Rev. Fluid Mech.*, **16** (1984), pp.311-336.
- (2) Kuo, K.K., Principles of Combustion, *John Wiley & Sons, Inc.*, (1986).
- (3) Pantow, E.G., et al., Decoupling and Recoupling of Detonation Waves associated with Sudden Expansion, *Shock Waves*, **6** (1996), pp.131-137.
- (4) Ohyagi, S., et al., Three-Dimensional Cellular Structure of Detonations, *Proc. of the 22nd Int. Symp. on Shock Waves*, (1999), pp.247-250.
- (5) Ohyagi, S., Fundamentals and Recent Advances in Detonation Researches I - Basic Theory and Experiments of Gaseous Detonations -, *Nensho Kenkyu (Combustion Research)*, **124** (2001), pp.17-34.
- (6) Obara, T., et al., A Study on Behavior of Detonation Wave passing through Narrow Grooves, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, (in press).
- (7) Ohyagi, S., et al., Diffraction and Re-Initiation of Detonations behind a Backward-Facing Step, *Shock Waves*, **12** (2002), pp.221-226.
- (8) Liu, Y.K., et al., Effect of Geometry on the Transition of Detonation through an Orifice, *Combustion and Flame*, **56** (1984), pp.215-225.
- (9) Bartlma, F. and Schröder, K., The Diffraction of a Plane Detonation Wave at a Convex Corner, *Combustion and Flame*, **66** (1986), pp.237-248.
- (10) Teodorczyk, A., et al., Propagation Mechanism of Quasi-Detonations, *22nd Symp. (Int.) on Combustion*, The Combustion Institute, (1988), pp.1723-1731.
- (11) Jones, D.A., et al., Reignition of Detonations by Reflected Shocks, *Shock Waves*, **5** (1995), pp.47-57.
- (12) Shepherd, J.E., et al., Detonation Diffraction, *Proc. 22nd Int. Symp on Shock Waves*, (1999), pp.41-48.
- (13) Jayan Sentanuhady, et al., An Experimental Study on Gaseous Detonation Wave propagating through Small Holes, *Proc. of 16th Shock Wave Symp. (Japanese)*, (2005) pp.343-346.
- (14) Jayan Sentanuhady, et al., Re-Initiation of Detonation Waves behind a Perforated Plate, *Proc. of the 20th Int. Colloquium on the Dynamics of Explosion and Reactive Systems*, (2005), (CD-ROM).
- (15) Jayan Sentanuhady, et al., Behavior of Detonation Wave Propagation in Multi Rectangular Orifice, *Proc. of the Forty-Third Symposium (Japanese) on Combustion*, (2005), pp.490-491.
- (16) Obara, T., et al., A High-Speed Photographic Study of the Transition from Deflagration to Detonation Wave, *Shock Waves*, **6-4** (1996), pp.205-210.
- (17) Hikita, T. and Akita, K., Outline of Combustion - Physics and Chemistry of Flames -, *Corona Pub.*, (1971).
- (18) Tsuboi, N., et al., Numerical Study on Detonation Propagation in Pulse Detonation Engine with Expanded Cross-section Area, *Proc. of the 19th Int. Colloquium on the Dynamics of Explosion and Reactive Systems*, (2003), (CD-ROM).