

## 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\*

(スリット板形状の違いによる影響)

Jayan Sentanuhady\*<sup>1</sup>; 小原哲郎\*<sup>2</sup>  
塚田豊\*<sup>1</sup>, 大八木重治\*<sup>2</sup>

### Re-initiation Processes of Detonation Wave Behind Slit-Plate (Influence of Slit-Plate Configuration)

Jayan Sentanuhady, Tetsuro OBARA\*<sup>3</sup>,  
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

Pressure and temperature behind a detonation wave are extremely high and have a potential to cause serious damages around it. Therefore, it is necessary from safety engineering point of view to decay the detonation wave with short distance from a generation of it. In this study, experiments are conducted in order to investigate behaviors of the detonation wave propagating into two pieces of slits, since the detonation wave might be quenched behind the slits by expansion waves generated at a corner of the slits and this behavior might be applicable to a technique of detonation-arrester. The detonation wave produced in a stoichiometric mixture of hydrogen and oxygen is propagated through the slits and behaviors of it are 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, a shock wave is decoupled with a reaction front. Two shock waves diffracted from the slits interact each other at center behind the slits, then this shock wave interaction induces a hot-spot enough to cause local explosion. Since, the shock wave is reflected from a tube-wall eventually, the detonation wave is re-initiated by mechanisms of shock-shock interaction or shock-wall interactions.

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

#### 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す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炎もしくは減衰させる方法を確立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、反射衝撃波およびマッハ軸衝撃波で構成され、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炎させるには波面のセル構造を崩すことが不可欠となる<sup>(6)(7)</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反応面に分離する<sup>(1)(6)(7)</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されるため、衝撃波背後の温度が低下して衝撃波と反応面に分離すると考えられる。さらに、デトネーション波が流路急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>(8)~(11)</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ている<sup>(12)</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す

\* 原稿受付 2006年10月25日。

\*<sup>1</sup> 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255)。

\*<sup>2</sup> 正員, 埼玉大学大学院理工学研究科。

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

ることが実験および数値計算より明らかにされている(3)(13)~(15)。さらに、管内を伝ばしたデトネー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(16)。デトネーション波が回折を起こすことにより一度、衝撃波と反応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返す過程においてデトネーション波が再開始する可能性がある(6)(7)(17)~(19)。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、スリット板の形状および供試気体の初期圧を変化させて実験を行い、デトネーション波が再開始する過程を超高速度カメラにより可視化観察した結果について述べる。

## 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 $50 \times 50$  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、上部に自動車用点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 $25 \mu\text{m}$ 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

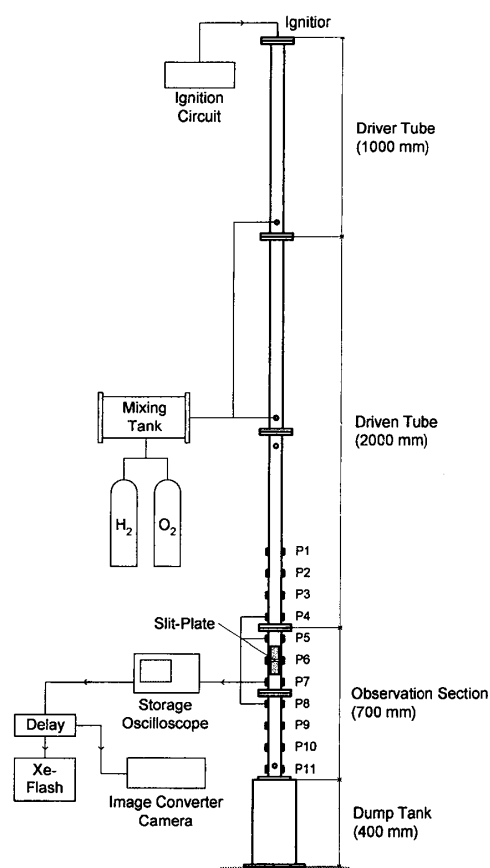


Fig. 1 Schematic diagram of vertical detonation tube (Total length: 4100 mm, Cross section:  $50 \times 50$  mm, P1 ~ P11: Measuring station of pressure transducer and ionization probe).

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は管に対向して設けられており、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元を示す。スリット板の大きさは $50 \times 50$  mm, 厚さ10 mmで一定とし、スリットの幅 $w$ を3, 5, 8 mm, スリットの間隔 $x$ を2, 5, 10 mmと変化させ、計9種類の組合わせでスリット板を製作し実験に供した。スリット板を図1に示す測定孔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, 立上がり時間 $1 \mu\text{s}$ 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。イオンプローブは間隔が約1 mm

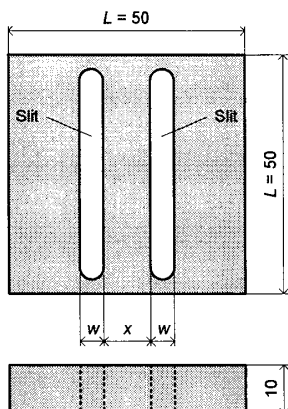


Fig. 2 Schematic diagram of slit-plate inserted at observation section P6. Detonation wave propagates through two slits of  $w$  in width.

Table 1 Configuration of slit-plate.

Parameter	Dimension
Length, $L$ (mm)	50
Thickness (mm)	10
Width of Slit, $w$ (mm)	3, 5, 8
Distance between Slit, $x$ (mm)	2, 5, 10

の2鉄芯間に直流90Vの電圧を印加してあり、導電性を示す既燃気体が鉄芯間を通過することで導通状態となる特性を利用し反応面の到達を検知する<sup>(20)</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、衝撃波と反応面が一体化して伝播したことになる、伝播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、反応面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節約するように1つのチャンネルに重ねて記録した。

スリット板の下流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0.4mm)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播した場合、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す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、シュリーレン光学系、キセノン光源(Hadland Photonics, Ltd., Xenon Lamp Unit, 375 J/Flash)およびイメージコンバータ超高速カメラ

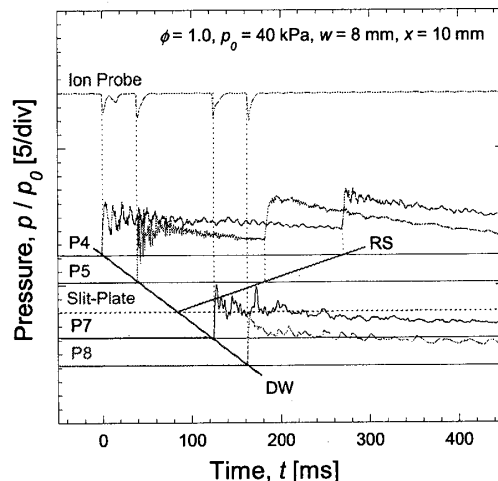


Fig. 3 Output from ionization probe (upper) and four pressure histories (lower) ( $\phi = 1.0$ ,  $p_0 = 40$  kPa, Slit-Plate:  $w = 8$  mm,  $x = 10$  mm).

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400ns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、測定孔P5に取付けた圧力変換器からの出力信号を用いた。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。駆動管の初期圧は100kPaで一定とし、供試気体の初期圧 $p_0$ を10~100kPa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の測定孔に到達するまでに、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

**3.1 デトネーション波の再開始過程 (SSI型)** 図3に実験で得られた圧力波形およびイオン電流波形を示す。供試気体は、当量比 $\phi = 1.0$ 、初期圧 $p_0 = 40$  kPaの酸素-水素混合気であり、観測部には幅 $w = 8$  mm、スリット間隔 $x = 10$  mmのスリット板を挿入した場合の結果である。この供試気体に対するChapman-Jouguet(以下、C-Jと略す)デトネーション波の伝播速度は約2.79 km/sであることが化学平衡計算<sup>(21)</sup>により求められている。図の縦軸は圧力を初期圧で除した無次元圧力、横軸は測定孔P4の位置をデトネーション波が通過してからの経過時間である。図の上部にはP4, P5, P7およびP8の測定孔に取付けたイオンプローブからの出力波形を同一チャンネルに重ね合わせて記録した波形、図の下部にはそれぞれイオンプローブに対向した測定孔における圧力変化を示す。定常状態で伝播したデトネーション波DWはP4, P5の順に伝

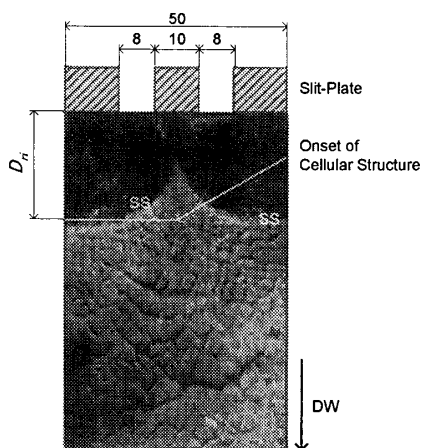


Fig. 4 Soot track record showing re-initiation processes of detonation wave, SS: Shock-shock interaction point as shown in fig.5 ( $\phi = 1.0$ ,  $p_0 = 40$  kPa, Slit-Plate:  $w = 8$  mm,  $x = 10$  mm).

ばし、スリット板表面で一部が反射するため、反射衝撃波 RS が P5, P4 の順で伝ばし圧力が上昇する。イオン電流波形と圧力波形は同時に立上っており、衝撃波と反応面が一体化して伝ばしていることを示す。スリット板表面で反射した反射衝撃波 RS は既燃気体中を伝ばするため、反射衝撃波に対応するイオンプローブからの出力は検知されない。スリットに入射したデトネーション波は、後述するように衝撃波と反応面に分離するが、測定孔 P7 の位置では既に圧力の立上りにイオン電流波形が同期しているため、デトネーション波が再開始していることを示す。デトネーション波はスリット板の有無に関わらず、ほぼ一定の速度で伝ばする。

図 4 に図 3 と同時に得られたスリット板下流におけるすす膜模様を示し、スリット板の挿入位置が示してある。すす膜模様はデトネーション波に特有のセルを観察しやすいように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 DW は図の下方方向に伝ばする。すす膜模様には、中心軸から左右下方方向に広がる一対の特徴的な弧 SS が描かれる。弧の内側ではすすの多くが剥がされ吹き飛ばされていることを示すが、デトネーション波がすす膜上を伝ばした際に特有のセル模様は観察されない。したがって、この領域ではデトネーション波に特有の入射衝撃波、反射衝撃波およびマッハ軸衝撃波からなる三重点構造が消失していることを示す。なお、すす膜上に弧 SS が形成される原因については後述する。この弧 SS より下流の中心軸からうろこ状の様子が放射状に形成され始める。

したがって、スリットにデトネーション波が入射し回折を開始した直後からデトネーション波は衝撃波と反応面に一度分離し、スリット板下端からの距離  $D_{ri}$  が約 24 mm の位置でデトネーション波が再開始したと判断できる。なお、衝撃波と反応面に分離する過程を示すシュリーレン写真については後述する。また、デトネーション波が再開始したすす膜上においては著しく細かいセルが観察され、オーバードリブン(過駆動状態)のデトネーション波が形成されたと考えられる。デトネーション波の再開始位置より下流の領域ではセル模様が徐々に大きくなる様子が観察できる。

図 5 にデトネーション波の再開始過程を示す高速シュリーレン写真を示す。実験条件は図 3 および図 4 と同様である。写真のコマ間隔は  $2 \mu\text{s}$ 、コマ当たりの露光時間は 400 ns である。また、図 6 には図 5 において特徴的な 3, 5 および 7 コマ目の拡大写真を示し、図 4 で観察されたスリット板後端からセル模様が形成され始めた距離  $D_{ri} = 24$  mm の位置を点線で示す。図 5 の 1 コマ目では、2 個のスリットから衝撃波 IS が回折して伝ばする。回折衝撃波の伝ば速度は約 1.4 km/s と見積もられ、C-J デトネーション波の伝ば速度に比較し著しく低い。この供試気体の音速は 538 m/s であるから、回折衝撃波の伝ばマッハ数は  $M_s = 2.6$  に相当する。2 コマ目において 2 つの衝撃波は中心軸上で干渉を開始する。衝撃波どうしが干渉した中心軸上では圧力および温度が上昇するため局所爆発を生じる様子が解り、楕円形の衝撃波  $ES_1$  を生じる。3 コマ目において回折衝撃波 IS の背後に観察される波 RF は、回折衝撃波に追従して伝ばする反応面である。すなわち、デトネーション波がスリットから回折を開始することにより、スリット角部より膨張波が発生し、デトネーション波背後の温度および圧力を低下させるため、反応速度が減少し衝撃波と反応面に分離して伝ばする。4 コマ目においても衝撃波の背後には反応面 RF が追従して伝ばする様子が明確に解る。局所爆発により生じた衝撃波  $ES_1$  の伝ば速度は約 2.5 km/s と見積もられ、回折衝撃波 IS よりも伝ば速度が高く、4 コマ目以降で回折衝撃波 IS を追い越して伝ばする。回折衝撃波 IS と局所爆発による衝撃波  $ES_1$  の交点 SS では圧力および温度が高くなると考えられ、図 4 に示したすす膜模様において観察された弧 SS を形成する原因である<sup>(7)</sup>。5 コマ目では、回折衝撃波に追従する反応面どうしが中心軸上で干渉することにより二度目の局所爆発を生じることが確認できる。6 コマ目以降では二度目の局所爆発によって生じた衝撃波  $ES_2$  を観察することができる。さらに、6 コマ目以降の中心軸上では

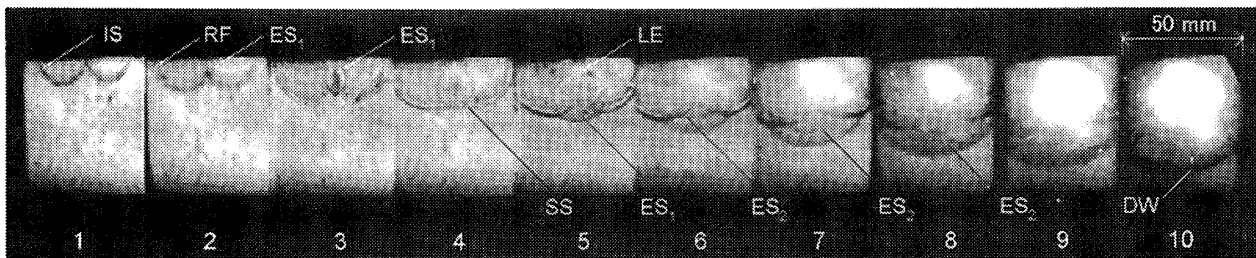


Fig. 5 High-speed schlieren photographs showing re-initiation processes of detonation wave behind slit-plate, IS: Incident shock, ES: Explosion shock, RF: Reaction front, SS: Shock-shock interaction point, LE: Light emission, DW: Detonation wave (Interframe time:  $2 \mu\text{s}$ , Exposure time:  $400 \text{ ns}$ ,  $\phi = 1.0$ ,  $p_0 = 40 \text{ kPa}$ , Slit-Plate:  $w = 8 \text{ mm}$ ,  $x = 10 \text{ mm}$ ).

強い発光 LE を生じる様子が観察できるが、発光領域の内部では密度勾配に相当するシュリーレン像を観察することは困難である。二度目の局所爆発による衝撃波  $ES_2$  は、6 コマ目以降で  $ES_1$  に追従して伝ばする。この衝撃波  $ES_2$  の伝ば速度は  $3.1 \text{ km/s}$  と見積もられ、一度目の局所爆発によって生じた衝撃波  $ES_1$  を追い越して伝ばすることにより、デトネーション波 DW が再開始したと考えられる。デトネーション波が再開始した直後の伝ば速度は C-J 速度を超えることから、デトネーション波の再開始直後においては反応速度が C-J 状態における反応速度よりも高いオーバードリブンのデトネーション波が形成され、図 4 に示したように反応速度に逆比例するセルサイズは小さくなる。10 コマ目においてデトネーション波面 DW が厚く撮影されているのは、波面にセル構造を伴うためと考えられる。また、再開始したデトネーション波は 10 コマ目において左右の壁面で反射の様子が観察できる。図 4 に示したすす膜模様と図 6 のシュリーレン写真を観察すると、スリット板背後においてデトネーション波のセル模様が形成され始めるのは、回折衝撃波 IS と一度目の局所爆発による衝撃波  $ES_1$  との交点の軌跡である SS を二度目の局所爆発による衝撃波  $ES_2$  が追い抜いた位置付近であることが解る。

図 3~6 に示した実験結果では、デトネーション波は 2 つの回折衝撃波どうしが中心軸上で干渉することに起因して再開始しており、この再開始パターンを本論では SSI 型 (Shock-Shock Interaction) と呼ぶことにする。

**3.2 デトネーション波の再開始過程 (SWI 型)** デトネーション波が再開始するもう 1 つのパターン、すなわち衝撃波が壁面で反射することによりデトネーション波が再開始される SWI 型 (Shock-Wall Interaction) について述べる。図 7 にデトネーション波が壁面近傍で再開始した場合のすす膜模様を示す。供試気体の初期

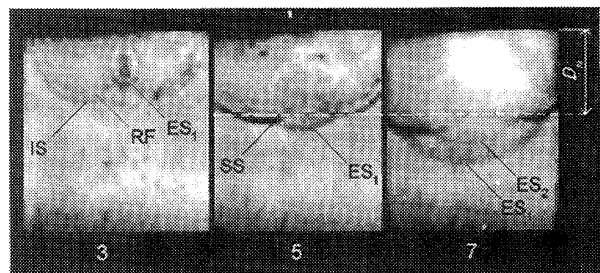


Fig. 6 High-magnification of frames 3, 5 and 7 as shown in fig. 5, dotted line indicates onset of cellular structure  $D_{ri}$  as observed in fig. 4.

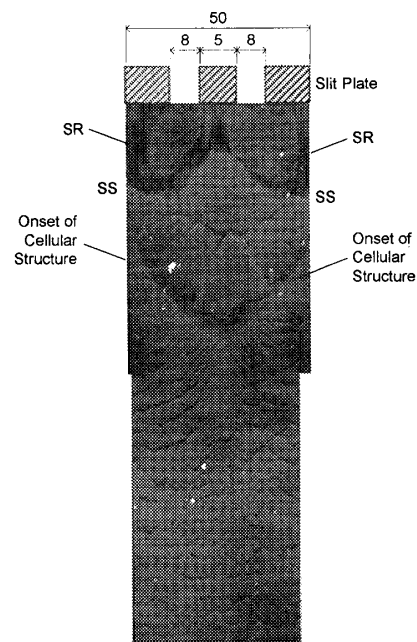


Fig. 7 Soot track record showing re-initiation processes of detonation wave, SS: Shock-shock interaction point, SR: triple point of Mach reflection ( $\phi = 1.0$ ,  $p_0 = 30 \text{ kPa}$ , Slit-Plate:  $w = 8 \text{ mm}$ ,  $x = 5 \text{ mm}$ ).

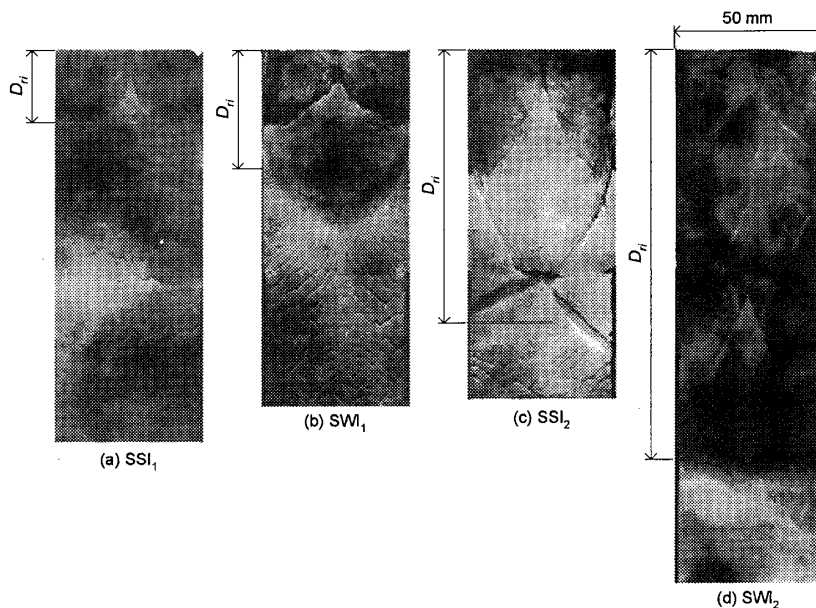


Fig. 8 Soot track record showing differences of re-initiation processes varied with slit-plate for constant initial pressure  $p_0 = 20$  kPa and equivalence ratio  $\phi = 1.0$ , Slit-Plate: (a)  $w = 8$  mm,  $x = 10$  mm, (b)  $w = 8$  mm,  $x = 5$  mm, (c)  $w = 5$  mm,  $x = 10$  mm, (d)  $w = 5$  mm,  $x = 5$  mm.

圧は  $p_0 = 30$  kPa であり、幅  $w = 8$  mm、間隔  $x = 5$  mm のスリット板を観測部に挿入した場合の結果である。図 4 に示したすす膜模様と同様に、スリットから回折した 2 つの衝撃波どうしが中心軸上で干渉した結果、局所爆発を生じたと考えられ、弧 SS が描かれる。弧 SS 内部においてはセル模様が観察できないことから、この領域でもデトネーション波は衝撃波と反応面に分離したことを示す。また、回折衝撃波が壁面で反射する際にはマッハ反射を呈していると考えられ、三重点の軌跡 SR がすす膜上に記録される<sup>(7)</sup>。この実験条件では 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ってデトネーション波は再開始されていない。弧 SS が左右の壁面近傍で反射することによってセル模様が形成され始める。すなわち、供試気体の初期圧が図 4 に比べて低いため、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って局所爆発が生じるものの、デトネーション波が再開始するには至らない。局所爆発によって生じた衝撃波と回折衝撃波の交差した点が左右の壁面と干渉して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。

#### 4. 考 察

図 8 は実験で得られたスリット板背後のすす膜模様を示し、供試気体の初期圧は  $p_0 = 20$  kPa で一定としスリット板の形状を変化させることによって得られた再開始過程の 4 パターン、(a) SSI<sub>1</sub>、(b) SWI<sub>1</sub>、(c) SSI<sub>2</sub>、(d) SWI<sub>2</sub> を示す。下添え字 1 および 2 はそれぞれデ

トネーション波が再開始するまでに回折衝撃波が衝撃波あるいは壁面と干渉した回数を示す。図 (a) では、2 つの回折衝撃波が干渉した中心軸上でスリット板下端からの距離  $D_{ri} \approx 25$  mm の位置からデトネーション波が再開始している。図 (b) では、左右の壁面付近から再開始している ( $D_{ri} \approx 45$  mm)。図 (c) では、回折衝撃波どうしが一度目に干渉することでは再開始に至らず、壁面で反射後に二度目の干渉によって中心軸上から再開始する ( $D_{ri} \approx 94$  mm)。図 (d) では、二度目の干渉の後、左壁面付近からセル模様が形成され始める ( $D_{ri} \approx 150$  mm)。このようにスリットの形状を変化させることによりデトネーション波が再開始する挙動や再開始位置が変化する。なお、いずれの条件においてもデトネーション波が再開始した直後においては著しく細かいセル模様が観察され、オーバードリブのデトネーション波が形成されることを意味する。

図 9 にスリット板の違いによるデトネーション波再開始距離  $D_{ri}$  の供試気体初期圧  $p_0$  に対する関係を示す。縦軸はスリット板下端からデトネーション波の再開始点までの距離  $D_{ri}$ 、横軸は供試気体の初期圧  $p_0$  である。図には、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ってデトネーション波が再開始した SSI 型および衝撃波が壁面と干渉することにより再開始した SWI 型の違いを示す。白抜き印がスリット幅  $w = 5$  mm の場合であり、中塗り印が  $w = 8$  mm の場合である。また、○印はスリット間隔  $x = 10$  mm、□印は  $x = 5$  mm、△印は  $x = 2$  mm の場合である。

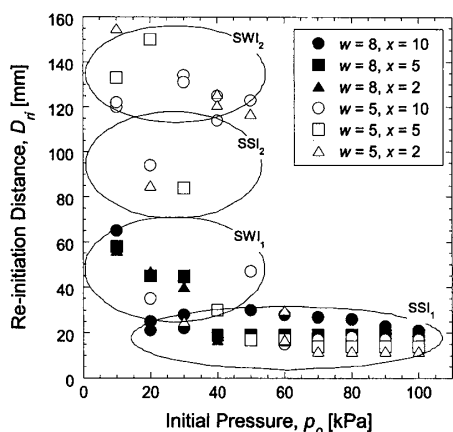


Fig. 9 Relationship between re-initiation distance  $D_{ri}$  and initial pressure of test gas  $p_0$  varied with slit-plate, SSI: detonation wave is re-initiated by shock-shock interaction, SWI: re-initiated by shock-wall interaction ( $\phi = 1.0$ ).

供試気体の初期圧  $p_0$  が約 60 kPa 以上の条件では、デトネーション波が再開始するまでの距離  $D_{ri}$  は 10 ~ 30 mm 程度と短く、2つの回折衝撃波どうしが中心軸上で干渉した直後にデトネーション波が再開始する SSI<sub>1</sub> 型に分類される。したがって、 $p_0 \geq 60$  kPa の条件では再開始距離はスリット板の形状に大きく依存せず、スリット直後において再開始する結果が得られた。これは、供試気体の初期圧が高く反応速度も高い条件では図 5 および図 6 で観察したように、回折衝撃波どうしが中心軸上で干渉し局所爆発によって強い衝撃波が駆動されデトネーション波の再開始に至るためである。一方、初期圧が  $p_0 \leq 50$  kPa と低い条件では、デトネーション波が再開始するまでの距離はスリット板の形状に大きく依存するとともに、デトネーション波が再開始する過程には SSI<sub>1</sub>, SWI<sub>1</sub>, SSI<sub>2</sub> および SWI<sub>2</sub> の 4 パターンがある。したがって、デトネーション波の再開始距離は離散的な値をとる。スリット幅  $w = 8$  mm を用いた場合には幅  $w = 5$  mm の実験結果と比較しデトネーション波が再開始するまでの距離は比較的短い。すなわち、幅  $w = 8$  mm のスリット板の場合には回折衝撃波どうしが一度目に干渉することにより再開始する SSI<sub>1</sub> 型、あるいは回折衝撃波が壁面と干渉することにより再開始される SWI<sub>1</sub> 型の結果が得られたのに対し、幅  $w = 5$  mm のスリット板の場合には、衝撃波が二度目の干渉を起こすことによってデトネーション波が再開始される。スリット間隔  $x$  を 2, 5, 10 mm と変化させることによって再開始距離は大きく変化せず、スリット幅  $w$  の影響の方が大きいことが解る。デトネーション波を衝撃波と反応面に分離

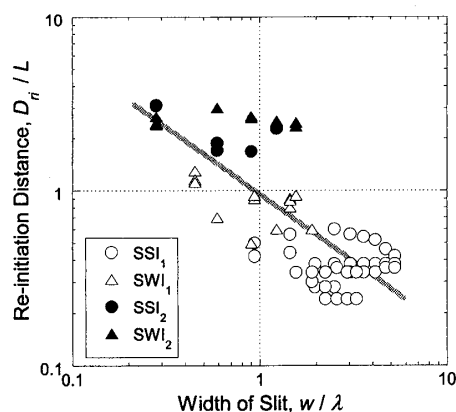


Fig. 10 Relationship between non-dimensional re-initiation distance  $D_{ri}/L$  and non-dimensional width of slit  $w/\lambda$ ,  $L$ : width of slit-plate,  $\lambda$ : cell-size of C-J detonation wave ( $\phi = 1.0$ ).

し消炎させることを目的として流路にスリット板を挿入する場合には、スリット幅を小さくすることが有効と考えられる。

図 10 に再開始距離のスリット幅に対する関係を示す。図の縦軸は、再開始距離をデトネーション管断面の一边で除した無次元距離  $D_{ri}/L$ 、横軸はスリット幅を C-J デトネーション波のセルサイズ  $\lambda$  で除した無次元距離  $w/\lambda$  を示す。○印および△印はそれぞれ再開始のパターン SSI および SWI を表す。このように実験データを整理した場合には、全体的にデータにばらつきがあるものの、右下がりの傾向にあることは明らかである。デトネーション波のセルサイズは供試気体の化学反応速度に反比例するため、供試気体に対する物性値と位置付けられる。横軸  $w/\lambda$  は、スリットから放出されるセルの個数を表すが、セルの個数が多く供試気体の反応性が高いほどデトネーション波が再開始する距離が短いことが解る。また、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再開始する条件は、ほぼ  $w/\lambda \geq 1$  であることが解る。すなわち、2つの回折衝撃波どうしが干渉することにより局所爆発が生じ、直ちにデトネーション波が再開始するのは、個々のスリットからセルが 1 個以上放出される条件である。したがって、スリット板を用いてデトネーション波を消炎させるためには、スリット幅は供試気体に対する C-J デトネーション波のセルサイズ未満にする必要のあることが明らかにされた。

## 5. 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。本実験により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が再開始するパターンには、i) 2つの回折衝撃波どうしが干渉することで局所爆発を生じ再開始する場合、ii) 回折衝撃波が壁面で反射し再開始する場合に大別される。
- (2) スリット板の形状および供試気体の初期圧の組合せによっては、スリット板直後でデトネーション波が再開始する SSI<sub>1</sub> 型がある。SSI<sub>1</sub> 型によりデトネーション波が再開始する場合には次の i)~iv) の過程を経る。
  - i) デトネーション波がスリットから回折することによりスリット角部から生じる膨張波の影響を受け、デトネーション波は衝撃波と反応面に分離する。
  - 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、衝撃波を駆動する。
  - iii) 回折衝撃波に追従する反応面どうしが中心軸上で干渉することにより二度目の局所爆発が生じ、伝ば速度が著しく大きい衝撃波を駆動する。
  - iv) 二度目の局所爆発によって生じた衝撃波には、反応面が追従しており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、無次元スリット幅  $w/\lambda$  を用いて整理することができる。また、C-J デトネーション波が2個のスリットに入射した場合、2つの回折衝撃波どうしが干渉することでデトネーション波が再開始するのは、ほぼ  $w/\lambda \geq 1$  の条件である。

### 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。

### 文 献

- (1) Lee, J.H.S., Dynamic Parameter of Gaseous Detonations, *Ann. Rev. Fluid Mech.*, Vol.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*, Vol.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)*, Vol.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*, Vol.72, No.718 (2006), pp.1605-1612.
- (7) Obara, T., et al., Re-Initiation Processes of Detonation Wave behind Slit-Plate — Influence of Initial Test Gas Pressure —, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol.72, No.724 (2006), in press.
- (8) Liu, Y.K., et al., Effect of Geometry on the Transition of Detonation through an Orifice, *Combustion and Flame*, Vol.56 (1984), pp.215-225.
- (9) Ohyagi, S., et al., Diffraction and Re-Initiation of Detonations behind a Backward-Facing Step, *Shock Waves*, Vol.12 (2002), pp.221-226.
- (10) Chao, J., et al., An Experimental Investigation of the Onset of Detonation, *Proc. Combustion Institute*, Vol.30 (2005), pp.1889-1897.
- (11) Khasainov, B., et al., Detonation Diffraction from Circular Tubes to Cones, *Shock Waves*, Vol.14 (2005), pp.187-192.
- (12) Bartlmä, F. and Schröder, K., The Diffraction of a Plane Detonation Wave at a Convex Corner, *Combustion and Flame*, Vol.66 (1986), pp.237-248.
- (13) Teodorczyk, A., et al., Propagation Mechanism of Quasi-Detonations, *22nd Symp. (Int.) on Combustion*, The Combustion Institute, (1988), pp.1723-1731.
- (14) Jones, D.A., et al., Reignition of Detonations by Reflected Shocks, *Shock Waves*, Vol.5 (1995), pp.47-57.
- (15) 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.
- (16) Shepherd, J.E., et al., Detonation Diffraction, *Proc. 22nd Int. Symp. on Shock Waves*, (1999), pp.41-48.
- (17) 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.
- (18) 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.
- (19) Jayan Sentanuhady, et al., Behavior of Detonation Wave Propagation in Multi Rectangular Orifice, *Proc. of the Forty-Third Symp. (Japanese) on Combustion*, (2005), pp.490-491.
- (20) Obara, T., et al., A High-Speed Photographic Study of the Transition from Deflagration to Detonation Wave, *Shock Waves*, Vol.6, No.4 (1996), pp.205-210.
- (21) Hikita, T. and Akita, K., Outline of Combustion – Physics and Chemistry of Flames –, *Corona Pub.*, (1971).