

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*
(デトネーション波の再開始と消炎過程の可視化)小原 哲郎*¹, 塚田 豊*²
Jayan Sentanuhady*³, 大八木 重治*¹Re-initiation Processes of Detonation Wave Behind Slit-Plate
(Visualization of Re-initiation and Quenching Processes of Detonation Wave)Tetsuro OBARA*⁴, Yutaka TSUKADA,
Jayan Sentanuhady and Shigeharu OHYAGI*⁴ Graduate School of Science and Engineering, Saitama University,
255 Shimo-Ohkubo, Sakura-ku, Saitama-shi, Saitama, 338-8570 Japan

A propagation of detonation wave shows particularly interesting phenomena, since the detonation wave is constituted from a three-dimensional shock wave system accompanied with a reaction front. Thus, the passage of a detonation wave draws cellular patterns on a soot-covered plate. Pressure and temperature behind the 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 quench the detonation wave with short distance from the origin. In this study, experiments applied high-speed schlieren photography are conducted to investigate behaviors of the detonation wave diffracting from two pieces of slits. The detonation wave produced in a stoichiometric mixture of hydrogen and oxygen is propagated through the slits and behaviors behind slit-plate are experimentally investigated. As a result, when the detonation wave diffracted from the slits, a shock wave is decoupled with a reaction front. Since two shock waves propagated from the slits interact each other at centre behind the plate, the detonation wave is re-initiated by generating a hot-spot enough to cause local explosion. It is also clarified that the shock wave reflected from a tube-wall induces detonation re-initiation.

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

1. はじめに

可燃性予混合気中を伝ばするデトネーション波は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⁽¹⁾⁽²⁾。デトネーション波が通過すると温度が上昇するとともに、圧力は初期圧の数十倍の値に上昇するため、安全工学上の見地からデトネーション波の伝ば機構に関する研究が進められてきた。デトネーション波面を構成する衝撃波は入射衝撃波、反射衝撃波およびマッハ軸衝撃波から成り、これら三衝撃波が一点で交差した三重点を有するとともにセル構造を伴って伝ばする⁽¹⁾⁽³⁾。したがって、デトネーション波の伝ばを阻止するには、波面の

セル構造を崩す必要がある⁽⁴⁾。著者らは、これまでデトネーション管内に狭い流路を設けた板(スリット板と称した)を挿入し、スリットからデトネーション波を回折させて消炎させることを試みた⁽⁴⁾。デトネーション波を臨界管直径以下のスリットから無限に拡がる空間に回折させれば、デトネーション波は自己維持できず衝撃波と反応面に分離することになる^{(5)~(7)}。しかしながら、燃焼波と分離した衝撃波が管壁で反射することにより、デトネーション波が再開始することが知られている⁽⁷⁾⁽⁸⁾。最近、著者らは衝撃波が管壁で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する現象を明らかにしているが⁽⁹⁾、この現象は極めて短時間かつ微細領域で生じるため、その機序について十分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個の流路を設けたスリット板を挿入し、スリットから回折する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

* 原稿受付 2007年3月1日。

¹ 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255)。² トヨタ自動車(株)(☎471-8571 豊田市トヨタ町1)[元:埼玉大学大学院理工学研究科]。³ 埼玉大学大学院理工学研究科。

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

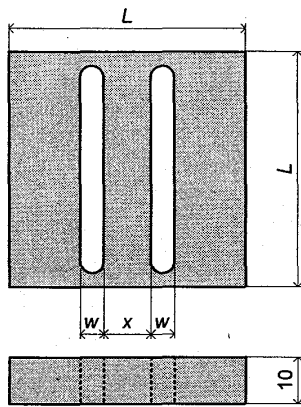


Fig. 1 Schematic diagram of slit-plate inserted at observation section of detonation tube.

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

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

実験装置については、前報⁽⁴⁾にその詳細を述べたので本論では省略する。図1にデトネーション管内に挿入した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 50×50 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通りの組合せでスリット板を製作した。スリット板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、予め灯油を燃すことにより生じるすすを塗布したアルミニウム製の板をデトネーション管内に挿入して得られる。スリット板下流における流れ場の可視化観察にはシュリーレン光学系を用いた。光源にはメタルハライドライト（住田光学ガラス社製, LS-M350, 350 W）を用いた。高速シュリーレン映像の撮影には高速度ビデオカメラ（島津製作所社製, HYPER Vision, HPV-1）を用い、コマ間隔 $1 \mu\text{s}$ 、各コマの露光時間500 nsの条件で100コマ撮影した。駆動管および被駆動管には量論の酸素-水素予混合気を充填し、初期圧 p_0 を10~100 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、スリット板の取付け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. 実験結果

3.1 回折衝撃波の干渉による再開始過程 図2にスリット板背後においてデトネーション波が再開始する過程を捉えたシュリーレン写真（コマ間隔： $1 \mu\text{s}$ ）を示す。写真の上部には幅 $w = 8$ mm、間隔 $x = 10$ mmのスリット板の下端部分を示す。供試気体の初期圧は $p_0 = 40$ kPaであるからChapman-Jouguet（以下C-Jと略す）デトネーション波のセルサイズは $\lambda \approx 4.1$ mmとなり⁽¹⁰⁾、 $w/\lambda \approx 2.0$ の条件である。また、図3は図2の1コマ目に示した中心軸（ y 軸）方向の先頭波面伝ば速度 V とデトネーション波がスリットから回折してからの経過時間 t の関係を示す。図には供試気体に対するC-Jデトネーション波の伝ば速度 $V_{CJ} = 2.79 \text{ km s}^{-1}$ を点線で示す。

図2の2コマ目以降では、2個のスリットから回折して伝ばする衝撃波ISが捉えられている。回折直後の衝撃波の伝ば速度は、図3に示した速度変化よりC-J速度を超える。これは、後述する図4の圧力波形において明らかなようにデトネーション波の一部がスリット板で反射し高圧となり、高圧によって伝ば速度を増した衝撃波が回折するためと考えられる。回折を開始したデトネーション波の伝ば速度は時間経過とともに減少しており、 $t \approx 7 \mu\text{s}$ において $V \approx 1.7 \text{ km s}^{-1}$ に減衰する。これは、スリット角部から生じた膨張波がデトネーション波に追従するためである。一方、この膨張波はデトネーション波を構成する反応面の温度も減少させる。したがって、衝撃波面から反応が開始されるまでの反応誘導距離が大きくなり、衝撃波と一体化して伝ばした反応面の伝ば速度が低下するため、図2の6コマ目以降において回折衝撃波ISと反応面RFが分離して伝ばする。スリットから回折して伝ばする2つの衝撃波は5コマ目以降において中心軸上で干渉する。衝撃波どうしが干渉した中心軸上では温度が高くなるため、7コマ目における中心軸上で局所爆発が生じる。この局所爆発によって既燃気体は急速に膨張するため楕円形の衝撃波ESを生じる様子が観察される。さらに、局所爆発によって生じた衝撃波の伝ば速度は高く、先行する回折衝撃波ISよりも先行して伝ばする様子が11コマ目以降で観察される。局所爆発によって生じた衝撃波背後に反応面が追従しデトネーション波の再開始有無についてシュリーレン写真のみから判断することは困難である。しかしながら、15コマ目以降

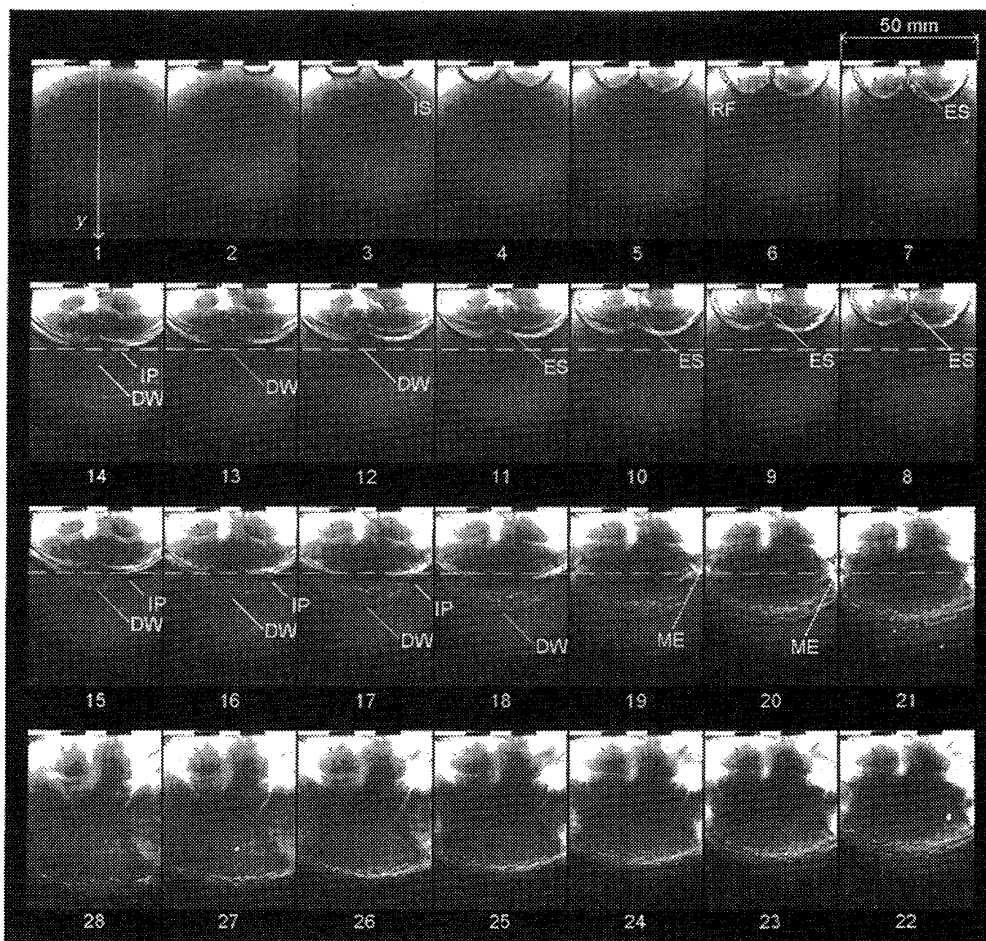


Fig. 2 Sequential schlieren photograph showing re-initiation process from centre below slit-plate, Dotted line: Detonation re-initiation point observed by soot track record as shown in Fig. 5, DW: Detonation wave, ES: Explosion shock, IP: Intersection point of IS and ES, IS: Incident shock, ME: Mild explosion, RF: Reaction front ($2\text{H}_2 + \text{O}_2$, $p_0 = 40 \text{ kPa}$, Slit-plate: $w = 8 \text{ mm}$, $x = 10 \text{ mm}$, Frame interval: $1 \mu\text{s}$, Exposure time: 500 ns).

において伝ばする波面上には乱れが観察され回折衝撃波面とは異なる様相を呈すること、図3に示す中心軸上の速度変化では $t = 10 \mu\text{s}$ において波面の伝ば速度が著しく上昇し、C-J速度を超える $V_{\text{max}} \approx 3.0 \text{ km s}^{-1}$ にまで達すること、および後述するすす膜模様の観察結果（すす膜模様からデトネーション波が再開始したと判断される位置を図2に点線で示す）から12コマ目以降においてデトネーション波DWが再開始したと考えられる。波面DW上に乱れが観察されるのは、デトネーション波面がセル構造を伴いながら伝ばすることに起因する。回折衝撃波が左右の管壁で反射する際にも弱い爆発MEを生ずる様子が19コマ目以降で観察されるが、先行するデトネーション波と一体化して伝ばする。

図4に図2と同時計測されたP4, P5, P7およびP8の測定孔におけるイオン電流および圧力履歴を示す。

スリット板から測定孔までの下流方向距離 y については図中の表に示す。縦軸は圧力を初期圧で除した無次元圧 p/p_0 、横軸はデトネーション波がスリット板に到達してからの経過時間 t を示す。デトネーション波DWはP4, P5の順に伝ばしスリット板表面でその一部が反射するため、反射衝撃波RSがP5, P4の順に伝ばする。反射衝撃波は既燃気体中を伝ばするため、反射衝撃波が通過してもイオンプローブは反応しない。デトネーション波がスリットから回折することにより、図2に示したように衝撃波と反応面に分離すると考えられるが、図4におけるP7の測定孔では圧力の立上がりイオンプローブの出力時刻が一致する。これより、P7の位置ではデトネーション波が既に再開始したと判断できる。

図5に図2のシュリーレン写真と同じ条件に対して得られたスリット板下流のすす膜模様を示す。すす膜

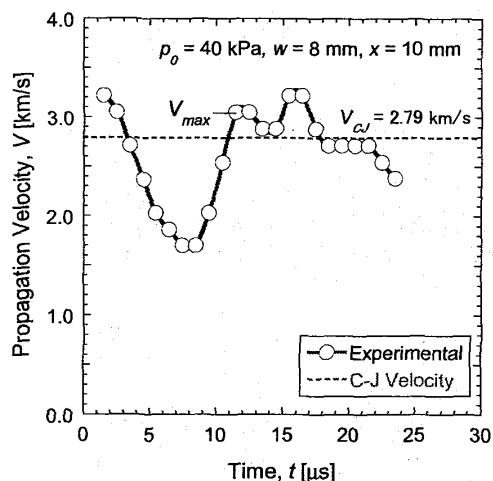


Fig. 3 Profile of propagation velocity at central axis of Fig. 2 ($2\text{H}_2 + \text{O}_2$, $p_0 = 40$ kPa, Slit-Plate: $w = 8$ mm, $x = 10$ mm).

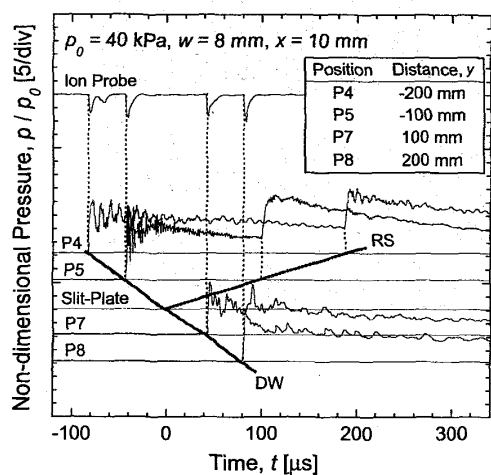


Fig. 4 Profile of ionization current (upper) and pressure (lower) measured at P4, P5, P7 and P8 ($2\text{H}_2 + \text{O}_2$, $p_0 = 40$ kPa, Slit-Plate: $w = 8$ mm, $x = 10$ mm).

模様の上には中心軸から左右に広がる特徴的な弧が描かれており、この弧の内部には細かいセル模様は観察されない。したがって、この弧は図2に示すように2つの回折衝撃波が中心軸上で干渉することにより生じた局所爆発による衝撃波と回折衝撃波の交点IPの軌跡に相当する⁽⁴⁾。デトネーション波は、図2に示すように2つの回折衝撃波が干渉することにより中心軸上における局所爆発を介して生じ、その点からす膜上にはセル模様が形成され始める。

3.2 回折衝撃波と管壁の干渉による再開始過程

図6は、幅 $w = 8$ mm、間隔 $x = 5$ mm のスリット板を用い、供試気体の初期圧を $p_0 = 30$ kPa とした場合のシュリーレン写真(コマ間隔: $1 \mu\text{s}$) である。図7に

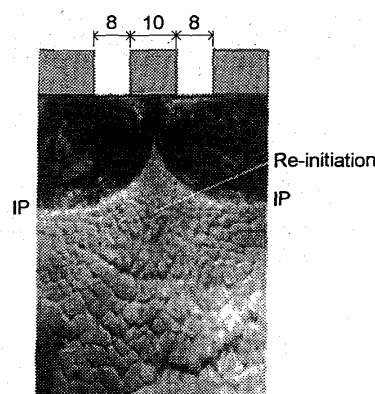


Fig. 5 Soot track record behind slit-plate correspond to Fig. 2, IP: Intersection point of IS and ES ($2\text{H}_2 + \text{O}_2$, $p_0 = 40$ kPa, Slit-Plate: $w = 8$ mm, $x = 10$ mm).

y 軸方向における先頭波面の伝ば速度変化を示す。図2と同様に2つのスリットから回折した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を生ずる様子が6コマ目で観察され、球状に広がる衝撃波 ES_1 が捉えられている。図7より、C-J速度を超える速度で伝ばしたデトネーション波が回折することによって伝ば速度が $V \approx 2.2 \text{ km s}^{-1}$ に減少する。デトネーション波が回折を開始してからの経過時間 $t \approx 5 \mu\text{s}$ において伝ば速度が上昇する。これは、図6の6コマ目に示すように、回折衝撃波が中心軸上で干渉することにより局所爆発が生じ、伝ば速度の高い衝撃波 ES_1 を駆動するためである。衝撃波の最高伝ば速度はC-J速度以上の $V_{\text{max}} \approx 3.4 \text{ km s}^{-1}$ に達するが、定常デトネーション波には遷移せずに減衰し、 $V \approx 1.6 \text{ km s}^{-1}$ 程度にまで低下する。これは、供試気体の初期圧が $p_0 = 30$ kPa と図2に比較して低いため反応速度も低く、反応面から繰出される衝撃波が先行するデトネーション波を補強することができず衝撃波と反応面に再度分離するためである。図6においても、8~10コマ目において中心軸上を伝ばする波面DW上にはデトネーション波特有のセル構造が観察されるが、14コマ目では波面構造に乱れが観察されないため衝撃波と反応面に分離したと考えられる。一方、2つの回折衝撃波および局所爆発により生じた衝撃波の交点IPは左右に広がって伝ばし18コマ目以降において管壁で反射する。この過程において第2の爆発を生ずる様子が23コマ目以降で観察でき、第2の衝撃波 ES_2 を駆動する。したがって、衝撃波 ES_2 は先行する回折衝撃波面ISと干渉しながら伝ばする。

図8に、図6のシュリーレン写真と同じ条件に対して得られたすす膜模様を示す。スリット下部の中心軸

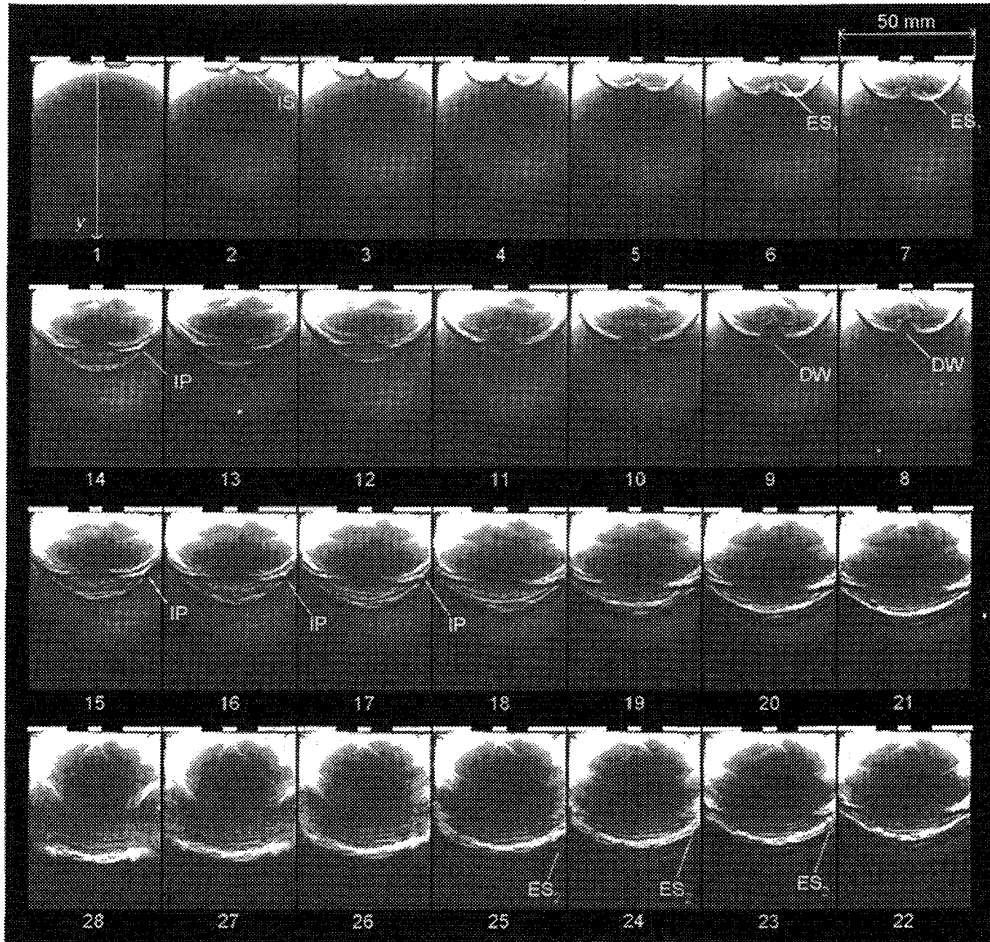


Fig. 6 Sequential schlieren photograph showing re-initiation process from wall of detonation tube, DW: Detonation wave, ES₁: First explosion shock, ES₂: Secondary explosion shock, IP: Intersection point of IS and ES₁, IS: Incident shock ($2\text{H}_2 + \text{O}_2$, $p_0 = 30 \text{ kPa}$, Slit-plate: $w = 8 \text{ mm}$, $x = 5 \text{ mm}$, Frame interval: $1 \mu\text{s}$, Exposure time: 500 ns).

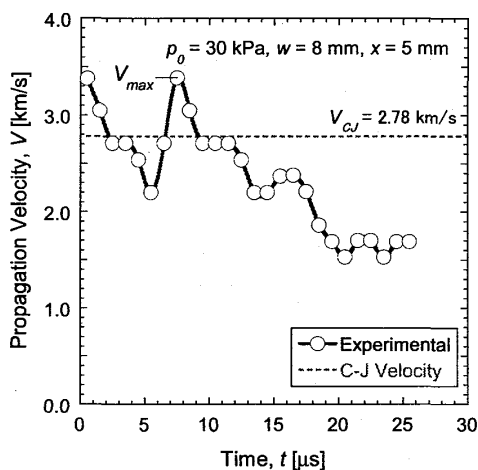


Fig. 7 Profile of propagation velocity at central axis of Fig. 6 ($2\text{H}_2 + \text{O}_2$, $p_0 = 30 \text{ kPa}$, Slit-Plate: $w = 8 \text{ mm}$, $x = 5 \text{ mm}$).

上では、1度目の局所爆発によってセル模様が生じ始めるがセルサイズが大きくなり消失する過程を示す。一方、中心軸上から左右方向に拡がる点が管壁と干渉した部分から著しく細かいセル模様が形成され始める。この軌跡は、図6に示した交点IPと対応しており、IPが左右の管壁で反射することによりデトネーション波が形成される。さらに、管壁近傍で再開始したデトネーション波は先行する衝撃波背後における高温高圧の未燃気体中を伝ばするため、左右から中心軸に収束するように形成される帯状部分DSのセルサイズは著しく小さい。この実験条件では、左右に壁がなければデトネーション波は再開始していないと考えられる。

3.3 デトネーション波の消炎過程 図9は、幅 $w = 5 \text{ mm}$ 、間隔 $x = 10 \text{ mm}$ のスリット板を用い、供試気体の初期圧を $p_0 = 40 \text{ kPa}$ とした場合のシュリーレン写真 (コマ間隔: $2 \mu\text{s}$) である。また、図10に y

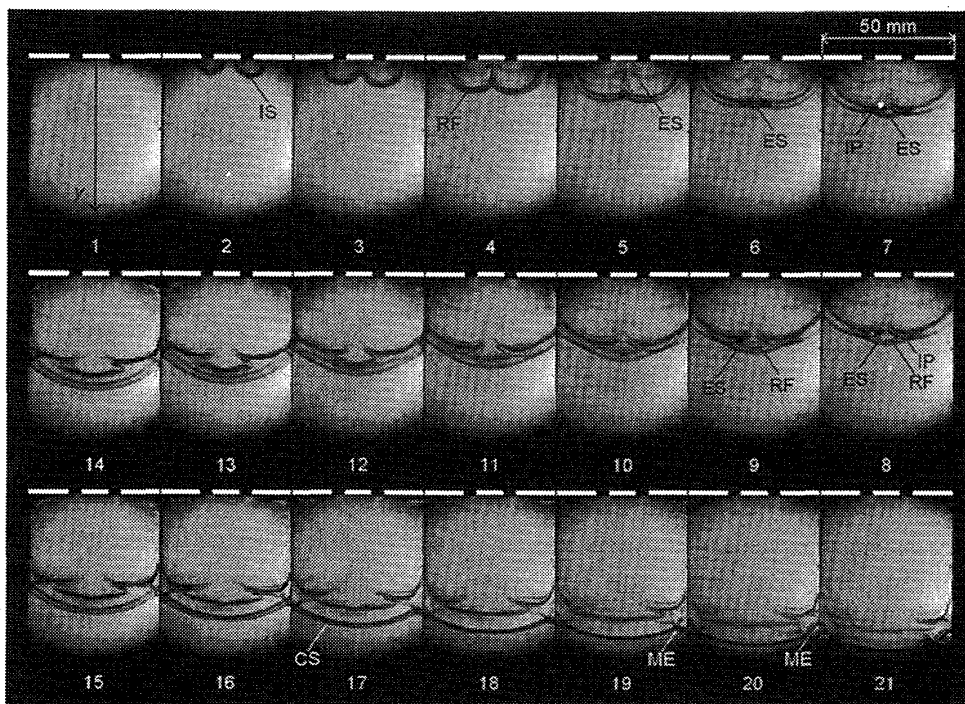


Fig. 9 Sequential schlieren photograph showing quenching process of detonation wave below slit-plate, CS: Coupled shock of IS and ES, ES: Explosion shock, IP: Intersection point of IS and ES, IS: Incident shock, ME: Mild explosion, RF: Reaction front ($2\text{H}_2 + \text{O}_2$, $p_0 = 40 \text{ kPa}$, Slit-plate: $w = 5 \text{ mm}$, $x = 10 \text{ mm}$, Frame interval: $2 \mu\text{s}$, Exposure time: 500 ns).

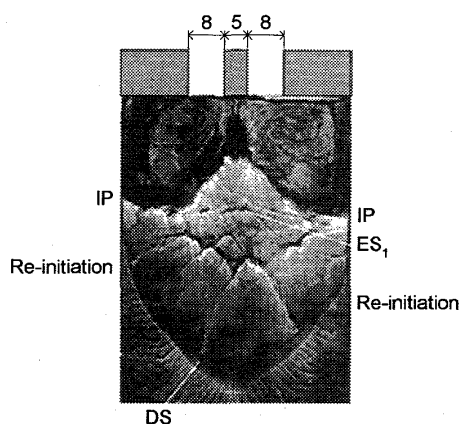


Fig. 8 Soot track record behind slit-plate correspond to Fig. 6, ES_1 : Trace of explosion shock, DS: Interaction region of detonation with shock wave, IP: Intersection point of IS and ES ($2\text{H}_2 + \text{O}_2$, $p_0 = 30 \text{ kPa}$, Slit-Plate: $w = 8 \text{ mm}$, $x = 5 \text{ mm}$).

軸方向における先頭波面の伝ば速度変化を示す。デトネーション波が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 IS と反応面 RF に分離する様子が 4 コマ目以降において明瞭に観察できる。図 10 より、デトネーション

波が回折することにより伝ば速度は減少し、 $t \approx 10 \mu\text{s}$ において $V \approx 1.5 \text{ km s}^{-1}$ 程度の値となる。この条件においても、2つの回折衝撃波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 ES を駆動する様子が 5 コマ目以降で観察できる。しかし、衝撃波 ES の最高伝ば速度は C-J 速度の 79% 程度に過ぎない。この局所爆発によって生じた衝撃波 ES の背後には反応面 RF が追従しているが、衝撃波と反応面との間には反応誘導距離が存在し時間経過とともに増加する。衝撃波 ES は伝ばするにしたがって減衰し、後続の回折衝撃波 IS と 17 コマ目において一体化し衝撃波 CS が形成される。この衝撃波 CS は、左右の管壁で反射することにより弱い局所爆発 ME を生ずる様子が 19 コマ目以降で観察される。前述したようなデトネーション波の再開始には至っていないが、図 10 に示すように中心軸上の伝ば速度は減少した後ほぼ一定の速度で伝ばする準デトネーションの状態であると考えられる。

図 11 に図 9 のシュリーレン写真と同じ条件に対して得られたすす膜模様を示す。すす膜上には回折衝撃波と局所爆発による衝撃波の交点である IP の軌跡が形成されるのみであり、デトネーション波に特有のセル模様は観察できない。したがって、この条件ではデトネーション波は観察領域内で消滅し、衝撃波と反応

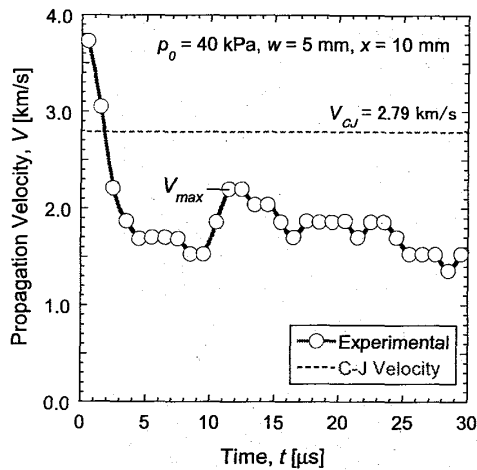


Fig. 10 Profile of propagation velocity at central axis of Fig. 9 ($2H_2 + O_2$, $p_0 = 40$ kPa, Slit-Plate: $w = 5$ mm, $x = 10$ mm).

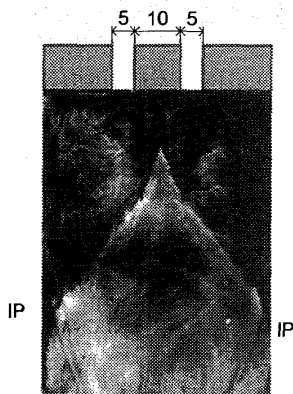


Fig. 11 Soot track record behind slit-plate correspond to Fig. 9, IP: Intersection point of IS and ES ($2H_2 + O_2$, $p_0 = 40$ kPa, Slit-Plate: $w = 5$ mm, $x = 10$ mm).

面に分離したと考えられる。

4. 考 察

デトネーション波がスリットから回折した場合の再開始条件およびスリット板下端からデトネーション波が再開始するまでの距離（再開始距離と呼ぶ）を明らかにすることは、デトネーション波を消滅させるのに有効なスリット板形状およびスリット板取付け位置を決める上で重要である。

図 12 は、2つの回折衝撃波が中心軸上で干渉し局所爆発により生じたデトネーション波の最高伝ば速度を C-J 速度で除した無次元速度 V_{max}/V_{CJ} と無次元スリット幅 w/λ の関係を示す。ここで、量論の酸水素混合気

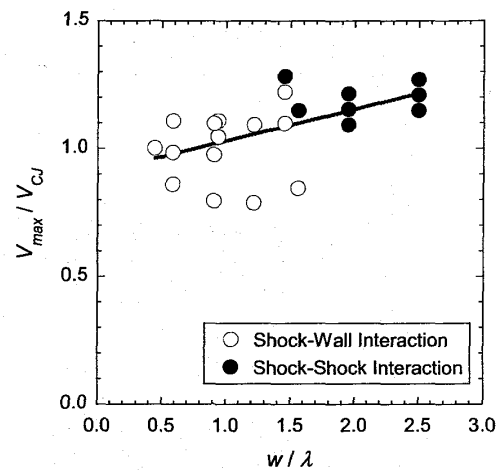


Fig. 12 Relationship of non-dimensional maximum velocity of detonation wave V_{max}/V_{CJ} with non-dimensional slit width w/λ ($2H_2 + O_2$).

における C-J デトネーション波のセルサイズ λ は初期圧 p_0 の約 1.1 乗に反比例することがデトネーション・データベース⁽¹⁰⁾より求められ、供試気体に対する代表寸法となる⁽¹⁾⁽³⁾。図中の●印は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りデトネーション波が再開始したことを示し、○印は回折衝撃波が管壁で反射しなければ観察領域内ではデトネーション波が再開始しないことを示す。実験点は高速度ビデオカメラの映像から先頭波面の位置を読み取ることにより最高速度を求めてある。したがって、データ点数が少なくばらつきはあるが、2つの回折衝撃波が中心軸上で干渉することにより生じるデトネーション波の最高伝ば速度 V は、無次元スリット幅 w/λ とともに増加傾向にある。したがって、供試気体の反応性が高く無次元スリット幅が大きいほど、局所爆発によってオーバードリブンのデトネーション波が生じることを示す。また、 w/λ が小さく反応性の低い供試気体の場合には局所爆発によって生じるデトネーション波の伝ば速度は比較的小さく、後続する膨張波により温度が低下し続けるため、管壁で反射しなければデトネーション波が再開始しないことを示す。

図 13 は、初期圧 p_0 、スリット幅 w およびスリット間隔 x を変化させて実験を繰り返した結果を整理してあり、再開始距離 D_{ri} とスリット幅 w の関係を示す。縦軸は再開始距離 D_{ri} を管断面の一边 L で除した無次元距離 D_{ri}/L であり、横軸は無次元スリット幅 w/λ である。図中の●印および○印は図 12 と同様である。図 13 より、供試気体の反応性が高く無次元スリット幅が大きい場合の再開始距離は短い。また、2つの回折

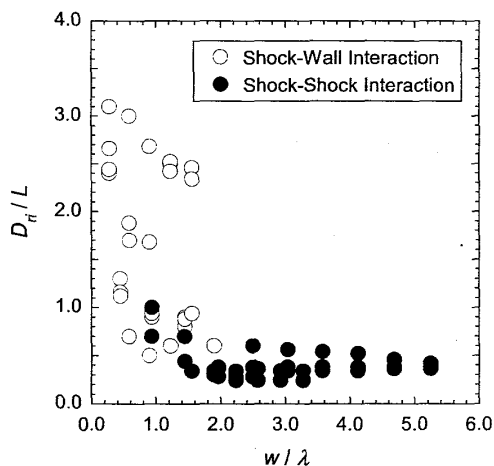


Fig. 13 Relationship between non-dimensional re-initiation distance D_{ri}/L and non-dimensional slit width w/λ ($2H_2 + O_2$).

衝撃波が中心軸上で干渉することによりデトネーション波が再開始する条件はほぼ $w/\lambda > 1$ であり、デトネーション波は管断面の一辺である L 以下、すなわち $D_{ri}/L < 1$ の領域で再開始する。したがって、衝撃波が干渉することにより局所爆発を介してデトネーション波が再開始するには、個々のスリットからセルが1個以上放出され、デトネーション波が回折する必要があることを示す。このしきい値は円管を用いて同種の実験を行った結果⁽¹²⁾と一致する。なお、実験ではスリット間の距離 x も変化させてあるが、 x の違いがデトネーション波の再開始距離に与える影響はスリット幅 w に比較し小さい結果が得られた。

5. まとめ

デトネーション管内に2個のスリットを設けた板を挿入し、スリットから回折して伝ばするデトネーション波の挙動を調べる実験を行った。得られた結果を以下に要約する。

- (1) スリットから回折した2つの衝撃波が干渉することにより局所爆発が生じる様子をシュリーレン写真より明らかにした。供試気体の初期圧およびスリット板形状の違いにより、(i) 2つの回折衝撃波の干渉による局所爆発によりデトネーション波が再開始する場合、(ii) 回折衝撃波と局所爆発による衝撃波の交点が管壁で反射することによって再開始する場合、(iii) デトネーション波が消滅する場合について明らかにした。
- (2) 回折衝撃波と局所爆発による衝撃波の交点が管壁で反射することによりデトネーション波が再開始

した場合には、デトネーション波は衝撃波面背後における高温高圧の未燃気体中を伝ばするため、その領域内では著しく細かいセル模様が形成される。

- (3) 回折衝撃波どうしが干渉することによりデトネーション波が再開始するのは $w/\lambda > 1$ の条件である。この場合、局所爆発により伝ば速度が C-J 速度以上であるオーバードリブン状態を介してデトネーション波が再開始する。

謝 辞

デトネーション波が再開始する過程の高速度シュリーレン映像を撮影するにあたり、(株)島津製作所 草野 英昭氏および(株)ノビテック 小西 信宇氏、菌部 広氏の協力を得た。また、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.*, Vol.16 (1984), pp.311-336.
- (2) Kuo, K.K., Principles of Combustion, John Wiley & Sons, Inc., (1986).
- (3) Ohya, 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.
- (4) 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), pp.3158-3165.
- (5) Mitrofanov, V.V. and Soloukhin, R.I., The Diffraction of Multifront Detonation Waves, *Soviet Physics-Doklady*, (1965), pp.1055-1058.
- (6) 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.
- (7) Pantow, E.G., et al., Decoupling and Recoupling of Detonation Waves associated with Sudden Expansion, *Shock Waves*, Vol.6 (1996), pp.131-137.
- (8) Ohya, S., et al., Diffraction and Re-Initiation of Detonations behind a Backward-Facing Step, *Shock Waves*, Vol.12 (2002), pp.221-226.
- (9) Jayan Sentanuhady, et al., Re-initiation Mechanisms of Gaseous Detonation Wave propagated through Double Slits, *Proc. of the 21th International Colloquium on the Dynamics of Explosion and Reactive Systems*, CD-ROM, (2007), (in press).
- (10) Shepherd, J.E. ed., Detonation Database, http://www.galcit.caltech.edu/detn_db/html/db.html/, (2005).
- (11) 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.
- (12) Chao, J., et al., An Experimental Investigation of the Onset of Detonation, *Proc. of the Combustion Institute*, (2005), pp.1889-1897.