

## 狭い溝中を通過するデトネーション波の挙動に関する研究\*

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>A Study on Behavior of Detonation Wave  
Passing through Narrow GroovesTetsuro OBARA<sup>\*3</sup>, Jayan SENTANUHADY,  
Yutaka TSUKADA and Shigeharu OHYAGI<sup>\*3</sup> Department of Mechanical Engineering, Saitama University,  
255 Shimo-Ohkubo, Sakura-ku, Saitama-shi, Saitama, 338-8570 Japan

A detonation wave produced in a combustible gaseous mixture might cause serious damages by interacting with an artificial structure or human bodies because of an extremely high-pressure and high-temperature behind this wave. Therefore, the detonation wave produced in the gaseous mixture and propagated into a circumstance by accident should be attenuated or quenched within a short distance from its origin. Experiments were conducted in order to investigate behaviors of the detonation wave passing through narrow grooves, since the detonation wave was accompanied with a cellular structure and no detonation wave could be propagated. In this study, the detonation wave produced in a gaseous mixture of hydrogen and oxygen was propagated through a grooved block and behaviors of the detonation wave were experimentally investigated by using techniques of pressure measurement and soot track record. As a result, the behavior of detonation wave propagating through the grooved block was classified into two categories, i.e. (i) the detonation wave was quenched, (ii) the detonation wave was once quenched behind the block but re-initiated again by focusing mechanisms of a reflected shock wave on a central axis.

**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燃焼波は、デフラグレーション波とデトネーション波に大別される。デフラグレーション波は既燃気体から未燃気体へ熱伝導により熱を伝え未燃気体の温度を高めながら伝ばする機構のため、その伝ば速度は遅いのが特徴である。また、デフラグレーション波が通過すると気体の密度は著しく小さくなり、圧力も若干減少する性質がある。一方、デトネーション波はその前方に衝撃波を伴い、衝撃波によって未燃気体の温度を自己着火温度以上にまで高めながら伝ばする機構のため、未燃気体の音速を超えて伝ばする<sup>(1)~(3)</sup>。デトネーション波が通過すると気体の密度は上昇し圧力も数十倍のオーダーで増加するため、可燃物の爆発危険性の評価という安全工

学上の見地から研究が進められてきた経緯がある<sup>(3)</sup>。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甚大な被害を与える可能性があるため、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>(4)</sup>。

デトネーション波は平面衝撃波のような単一の波面とは異なり、複雑な三次元構造を有しながら伝ばすることが知られている<sup>(1)(2)</sup>。具体的には、デトネーション波面の前方にある衝撃波自体は入射衝撃波、マッハ軸衝撃波および反射衝撃波からなり、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>(5)</sup>。デトネーション波面上に形成される三重点は波面上を移動しながら伝ばするとともに、デトネーション波に追従するすべり線、横波などと複雑に干渉することが知られている。したがって、予めすすを塗布しておいた表面上をデトネーション波が伝ばした際には、デトネーション波面の三次元構造にしたがいます

\* 原稿受付 2005年10月12日。

<sup>\*1</sup> 正員, 埼玉大学工学部(☎338-8570 さいたま市桜区下大久保255)。<sup>\*2</sup> 埼玉大学大学院理工学研究科。

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

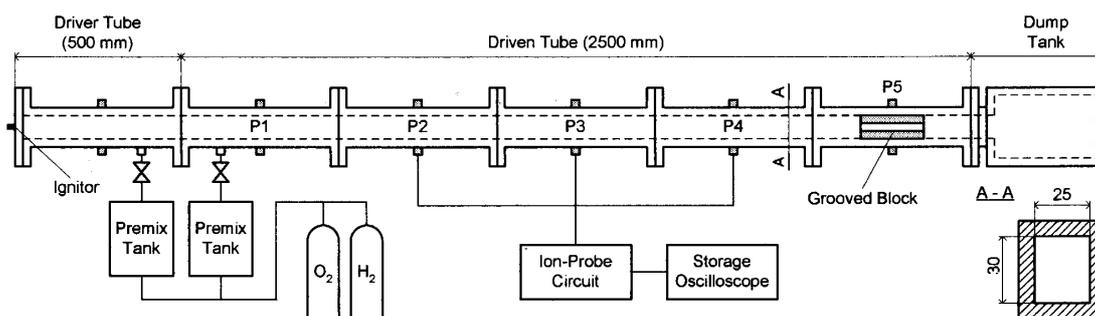


Fig. 1 Schematic diagram of experimental set-up using detonation tube.

すの剥がされ方に不均一性が生じるため、すす膜上にはうろこ模様が形成される。デトネーション波の伝ば方向に垂直なうろこの長さ(セルサイズ)  $\lambda$  は供試気体を構成する燃料や酸化剤の種類, 当量比  $\phi$ , 初期圧力  $p_1$  により決定されるため, 供試気体を特徴づける物性値の一つと考えられる。また, セルサイズは, デトネーション波を定常で次元構造と考えた場合に衝撃波面から反応が開始されるまでの距離である誘導反応帯厚みに比例する物理量である<sup>(1)</sup>。したがって, セルサイズはデトネーション波が伝ばする空間において長さに対する代表寸法としても定義される。

デトネーション波を消炎もしくは減衰させるには, 二つの方法が考えられる。まず, デトネーション波が伝ばするには, 前述したようにその波面上にセル構造を伴わなければならないことから, 供試気体の組成や初期圧力などを変化させることにより, 管内径  $d$  よりもセルサイズ  $\lambda$  を大きくする化学的方法が考えられる。一方, デトネーション波が伝ばする管内にセルサイズ以下の断面縮小部分を設ける物理的方法も考えられる。後者の物理的方法では, 可燃性気体の組成や圧力などを変化させる必要がなく, 特別な配管設備も必要としないことから容易である。本論では後者の物理的方法を用い, 管内に溝を設けた断面縮小部分にデトネーション波を入射させることによってデトネーション波を消炎もしくは減衰させることを試みた<sup>(6)(7)</sup>。

デトネーション波が断面縮小部分から回折して伝ばする際には, 回折部の角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ため, デトネーション波は衝撃波とデフラグレーション波面に分離すると考えられる。これまでに, デトネーション波が回折する際の挙動<sup>(8)</sup>, 臨界管直径<sup>(9)</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<sup>(10)</sup>がなされている。また, 衝撃波が壁面と干渉し反射することによって, 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によって明らかにされている<sup>(4)(11)(12)</sup>。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って完全に消炎させるには, 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>(13)</sup>。デトネーション波が断面急拡大部において回折を起こすことによって衝撃波とデフラグレーション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返すことによってデトネーション波が再開始される現象が考えられる。したがって, 断面急拡大部からの距離を大きくして現象を観察し, デトネーション波を消炎させるための物理的条件について論じることが重要である。

本研究では, デトネーション管内に断面が正方形の溝を設けた板(以下, 溝付ブロックと呼ぶ)を挿入し, デトネーション波の挙動について実験的に調べた。また, 溝付ブロックの長さ, 溝幅および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挙動について調べたので報告する。

## 2. 実験装置および方法

**2.1 デトネーション管** 図1に実験に用いたデトネーション管の概略を示す<sup>(6)(7)</sup>。デトネーション管は内断面が幅 25 mm, 高さ 30 mm であり, 全長 3000 mm である。駆動管(Driver Tube)は長さ 500 mm であり, 図1の左端に自動車用点火プラグを取付けて混合気体を着火し, デトネーション波を間接開始させた<sup>(14)</sup>。なお, 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状のコイル(直径 18 mm, 長さ 500 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被駆動気体を分離した。

被駆動管(Driven Tube)は長さ 500 mm の管を 5 個接続してあり, 全長 2500 mm である。点火プラグからの距離が 750 mm の位置から 500 mm おきに圧力変換器およびイオンプローブの取付孔が設けてあり, これら測定孔を順に P1~P5 と呼ぶ。測定孔 P2~P4 に圧力変換器(PCB Piezotronics, 113A24, 立上り時

Table 1 Experimental conditions of grooved block.

Parameters	Conditions
Thickness of Grooved Block, $L$ (mm)	20, 30, 40, 50, 100
Width of Groove, $w$ (mm)	2, 5
Distance between Groove, $x$ (mm)	2, 5

Table 2 Experimental conditions of driver and driven gases.

Parameters	Driver Gas	Driven Gas
Fuel	Hydrogen	Hydrogen
Oxidizer	Oxygen	Oxygen
Equivalence Ratio	1.0	1.0
Initial Pressure (kPa)	100	20 ~ 100

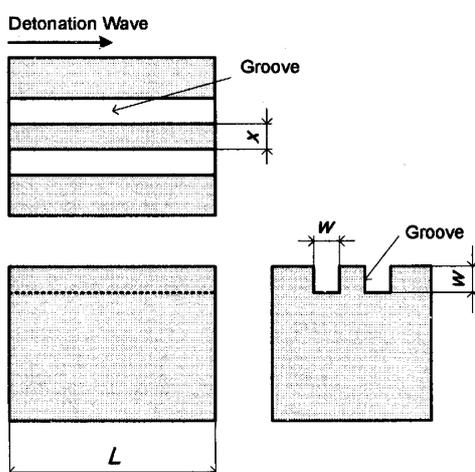


Fig. 2 Schematic diagram of double grooved block.

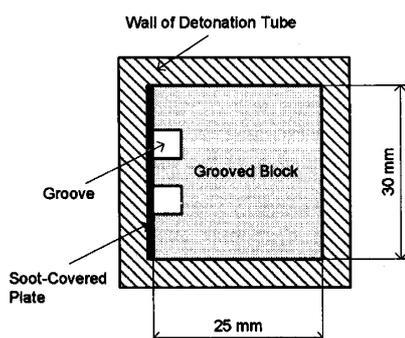


Fig. 3 Schematic diagram showing cross section of grooved block mounted inside detonation tube.

間  $1 \mu\text{s}$  以下) およびイオンプローブを取付け、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  $1 \text{ mm}$ )に  $90 \text{ V}$  の電圧を印加した単純な構造であり、燃焼波背後の電離した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仕組みである。したがって、圧力波形およびイオンプローブの出力信号における立上り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ていることになり、デトネーション波と判断することができる。被駆動管における測定孔 P5 の位置には溝付ブロックを挿入してある。デトネーション波が溝付ブロックを通して伝ばする様子について圧力およびイオン電流波形を計測した。また、溝付ブロック部分におけるすす模様を採取し、デトネーション波の消炎や再開始現象について調べた。なお、被駆動管内を伝ばしたデトネーション波は図1の右端に取付けたダンプタンク内で減衰される。

**2.2 溝付ブロックの概略** 図2に2個の溝を設けた溝付ブロックの設計図を示す。溝付ブロックの長さは  $L$  であり、 $20 \sim 100 \text{ mm}$  の範囲で変化させた。溝付ブロックの上部に幅  $w$  の正方形溝を設けてあり、定常状態で伝ばしたデトネーション波はこの溝に入射される。2個の溝の距離を  $x$  とするが、本実験では溝幅に等しく  $x = w$  として加工した溝付ブロックを用いた。

図3に溝付ブロックをデトネーション管内部に装着した状態における断面図を示す。溝付ブロック前後におけるデトネーション波の挙動を調べるため、溝付ブロックとデトネーション管壁面の間に予め灯油を燃した際に生成されるすすを塗ったアルミニウム製の板(厚さ  $0.4 \text{ mm}$ )を挟んである。

表1に実験に用いた溝付ブロックの条件を示す。溝の数を2個としたアルミニウム板を用いた。溝の幅は  $2 \text{ mm}$  と  $5 \text{ mm}$  の2種類である。溝付ブロックの長さ  $L$  を  $20, 30, 40, 50$  および  $100 \text{ mm}$  と変化させ、溝内部および溝背後におけるデトネーション波の伝ば挙動

について調べた。

**2.3 実験方法** 表2に供試気体の実験条件を示す。駆動管および被駆動管には量論混合比の酸素-水素(以下、酸水素と略す)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、被駆動気体の初期圧力を20~100 kPaの範囲で変化させて実験を行った。なお、駆動管内で生成されたデトネーション波は溝付ブロックを設置したP5の位置に到達する上流の位置において、定常デトネーション波に遷移することを確認してある。実験を行う際の手順は以下の通りである。溝付ブロックをP5の位置に挟むとともに、駆動管と被駆動管の間、および被駆動管とダンパタンクの間に厚さ25  $\mu\text{m}$ のマイラー膜を挟む。デトネーション管全体を真空にした後、駆動管および被駆動管には所定の圧力まで混合気体を充填する。その後、駆動管に取付けた点火プラグにより混合気体を着火しデトネーション波を発生させた。

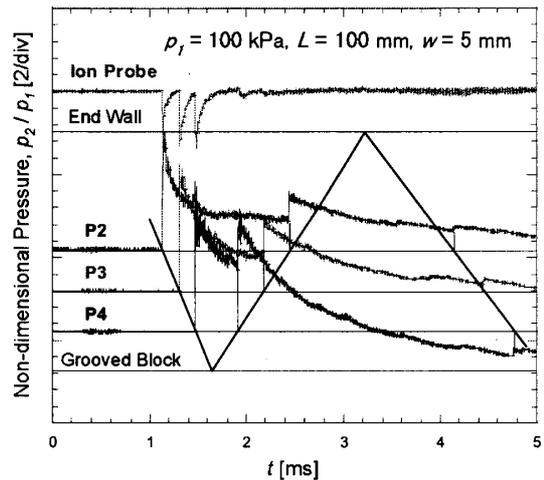
### 3. 実験結果

まず、溝付ブロックの長さを $L = 100 \text{ mm}$ で一定とし、供試気体の初期圧力を $p_1 = 100 \text{ kPa}$ , 40 kPa, 20 kPaと3通りに変化させた場合の実験結果を示す。次に、溝付ブロックの長さを $L = 20 \text{ mm}$ で一定とし、供試気体の初期圧力を変化させた場合に溝付ブロックを過ぎるデトネーション波の挙動の違いについて述べる。

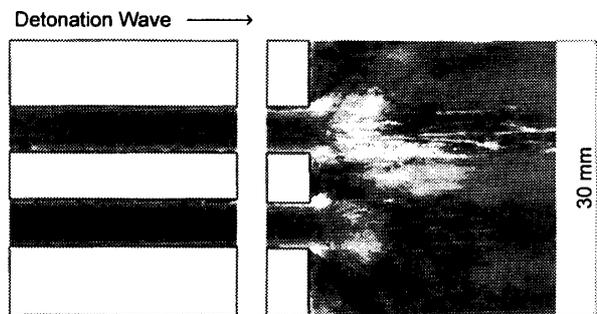
#### 3.1 溝付ブロック長さ $L = 100 \text{ mm}$ の場合

**3.1.1 初期圧力 $p_1 = 100 \text{ kPa}$ の場合** 図4は溝付ブロックの長さ $L = 100 \text{ mm}$ の場合に得られた実験結果を示し、図4(a)は圧力波形であり図4(b)はこの際に得られたすす膜模様である。供試気体の初期圧力を $p_1 = 100 \text{ kPa}$ とし、溝付ブロックにおける溝幅を $w = 5 \text{ mm}$ とした場合の結果である。なお、この供試気体に対する定常デトネーション波のセルサイズ $\lambda$ は約1.4 mmと見積もられることから<sup>(15)</sup>,  $L/\lambda \approx 71$ ,  $w/\lambda \approx 4$ の条件である。

図4(a)に示した圧力波形の横軸は時間であり、縦軸は圧力を初期圧力で除した無次元圧力である。波形の上部には、イオンプローブからの出力信号であるイオン電流波形、下部には測定孔P2, P3およびP4の位置で計測された圧力履歴を示す。測定孔P2, P3およびP4における圧力は急峻に立上り、イオンプローブからの出力信号の時刻とも一致することから、これらの位置においてデトネーション波の伝播が確認できる。デトネーション波の伝播速度 $D$ は約2903 m/sであり、Chapman-Jouguet(以下、C-Jと略す)のデト



(a) Pressure histories

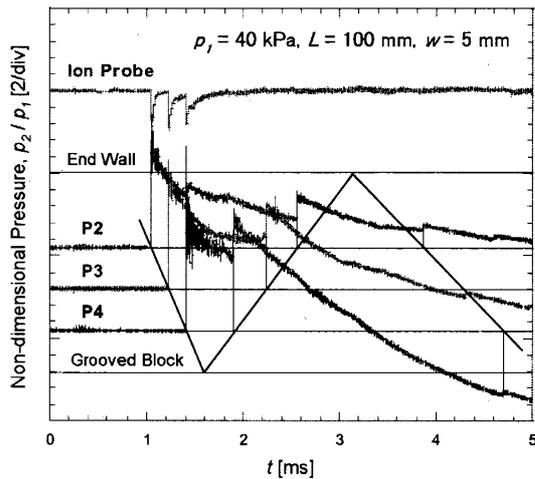


(b) Soot track record

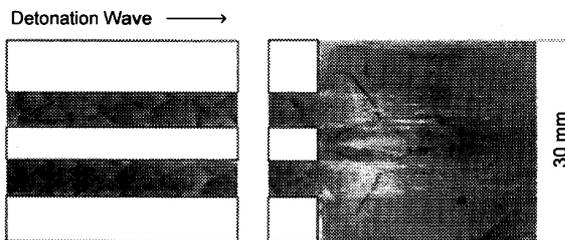
Fig. 4 (a) Pressure histories, (b) soot track record ( $L = 100 \text{ mm}$ ,  $p_1 = 100 \text{ kPa}$ ,  $w = 5 \text{ mm}$ ,  $\lambda = 1.4 \text{ mm}$ ).

ネーション波速度( $D_{CJ} = 2843 \text{ m/s}$ )<sup>(16)</sup>にほぼ等しい。デトネーション波は溝付ブロックの表面において反射し、反射衝撃波が上流方向へと伝播するためP4~P2の順で圧力が再び立上がる。さらに、上流方向へ伝播した衝撃波が点火プラグを取付けた管端で反射し伝播する。反射衝撃波は既燃気体中を伝播するため、イオンプローブは検知しない。なお、デトネーション波が伝播した後の圧力波形が初期値を下回っているが、デトネーション波背後の正確な圧力値を示していない。

図4(b)は、この際に得られたすす膜模様であり、左図は溝内部、右図は溝付ブロック下流におけるすす膜模様である。デトネーション波は図の右方向へと伝播する。左図より、溝内部においてもデトネーションのセルに相当するうろこ模様が確認できる。したがって、供試気体の初期圧力 $p_1 = 100 \text{ kPa}$ の条件では、溝幅 $w = 5 \text{ mm}$ の溝を通過してもデトネーション波が伝播することがわかる。図4(b)の右図では、2個の溝からデトネーション波が回折して伝播する際、すすの大部分が剥ぎ取られるため白色を呈しており、気体の流れ



(a) Pressure histories

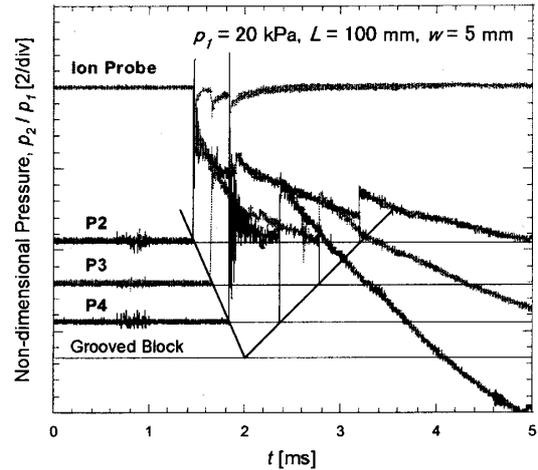


(b) Soot track record

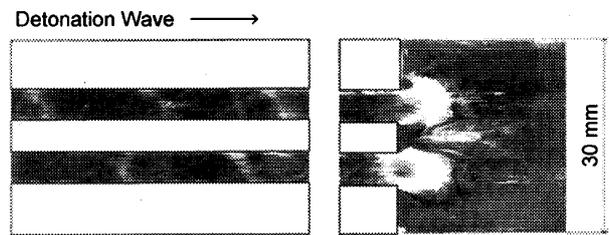
Fig. 5 (a) Pressure histories, (b) soot track record  
( $L = 100$  mm,  $p_1 = 40$  kPa,  $w = 5$  mm,  $\lambda = 5.7$  mm).

によってすすが吹き飛ばされたことを示す多数の筋も観察される。また、この領域においてデトネーション波の伝ばを示すような模様が確認できないことから、溝付ブロックの直後においてデトネーション波は衝撃波とデフラグレーション波に分離したと考えられる。すなわち、デトネーション波が溝から回折して伝ばする際、溝の角部において膨張波が発生してデトネーション波における反応帯の温度を低下させるため、反応速度が低くなり誘導反応帯厚みが増すことによって衝撃波面とデフラグレーション波面に分離したと考えられる。なお、溝付ブロック下流を伝ばする衝撃波が管壁で反射を繰り返すことにより、デトネーション波が再開されることになるが、その再開現象については後述する。

**3.1.2 初期圧力  $p_1 = 40$  kPa の場合** 図5に供試気体の初期圧力を  $p_1 = 40$  kPa にした場合の結果を示す。この条件に対する定常デトネーション波のセルサイズは  $\lambda = 5.7$  mm と見積もられるので<sup>(15)</sup>,  $L/\lambda \approx 18$ ,  $w/\lambda \approx 1$  の条件である。被駆動管に挿入した溝付ブロックは図4と同様である。図5(a)に示す圧力波形より、デトネーション波の伝ば速度  $D$  は



(a) Pressure histories



(b) Soot track record

Fig. 6 (a) Pressure histories, (b) soot track record  
( $L = 100$  mm,  $p_1 = 20$  kPa,  $w = 5$  mm,  $\lambda = 9.1$  mm).

約 2813 m/s と見積もられ、C-Jデトネーション波の伝ば速度 ( $D_{CJ} = 2792$  m/s) にほぼ等しい。図5(b)の左図より溝内部において観察されるセルサイズは初期圧力  $p_1 = 100$  kPa の結果に比較し大きいことがわかり、 $\lambda = 4.1$  mm と見積もられる。図5(b)の右図は、溝の下流におけるすす膜模様であるが、デトネーション波の伝ばを特徴づけるセル模様は完全に消失している。これは、溝内部において  $w/\lambda \approx 1$  の条件であり、溝幅が臨界管直径 ( $d_c = 10\lambda$ ) よりも小さいためである。

**3.1.3 初期圧力  $p_1 = 20$  kPa の場合** 図6は供試気体の初期圧力を  $p_1 = 20$  kPa とした場合の結果である。この条件に対する定常デトネーション波のセルサイズは  $\lambda = 9.1$  mm と見積もられるので<sup>(15)</sup>,  $L/\lambda \approx 11$ ,  $w/\lambda \approx 0.5$  の条件である。図6(a)より、圧力測定孔 P2~P4 の区間におけるデトネーション波の伝ば速度は 2728 m/s と見積もられ、ほぼ C-Jデトネーション波の伝ば速度 ( $D_{CJ} = 2754$  m/s) に等しい。図6(b)の左図より、溝内部においてデトネーション波の伝ばを示すセル模様は観察できず、周期性をもつてすすが剥がされた白い筋が観察されるのみである。

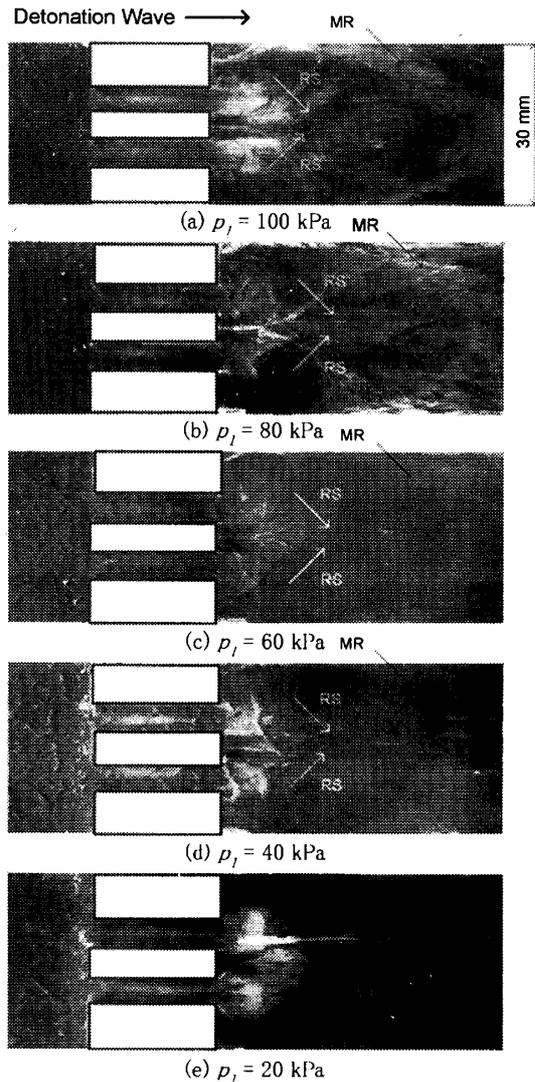


Fig. 7 Soot track record in front and behind grooved block varied with initial pressure ( $L = 20$  mm,  $w = 5$  mm).

これは、溝幅  $w$  がセルサイズ  $\lambda$  よりも小さく、この条件ではデトネーション波は伝ばできず、デトネーション波が消炎に至る際にスピンを起こしながら伝ばするためと考えられる<sup>(17)</sup>。したがって、このスピントネーション波が回折した場合、デトネーション波は消炎されるため、図 6(b) の右図においてもセル模様は観察されない。

**3.2 溝付ブロック長さ  $L = 20$  mm の場合** 図 7 は長さ  $L = 20$  mm、溝幅  $w = 5$  mm の溝付ブロックを用いた場合のすす膜模様であり、供試気体の初期圧力  $p_1$  を 100 kPa から 20 kPa まで 20 kPa ごとに減少させた場合の結果である。

図 7(a) に示すように供試気体の初期圧力が  $p_1 = 100$  kPa の場合 ( $\lambda = 1.4$  mm,  $w/\lambda \approx 4$ ) では、溝付

ブロックの左側および溝内部において細かいセル模様が観察されるため、デトネーション波の伝ばが確認できる。溝付ブロックの右側では、細かいセルは観察されないことから、デトネーション波が回折した際に消炎したと考えられる。溝付ブロックの右側では、デトネーション波は衝撃波とデフラグレーション波面に分離して伝ばするため、2 個の溝から回折した衝撃波どうしの干渉が起こると考えられるが、溝の直後においてはデトネーション波が再開始されていない。また、デトネーション波に追従する既燃気体が溝からジェット状となり噴射されるため大部分のすす膜が剥がされる。これにより、溝背後の部分は白色になるため、セル模様の存在を確認することは難しい。なお、溝背後のすす膜において楕円形状にすすが剥がされ白く変色している部分 (MR) は、デトネーション波が溝から回折した際の衝撃波が管壁面でマッハ反射を起こし、入射衝撃波、反射衝撃波、マッハ軸の交点で形成される三重点の軌跡がすす膜上に記録されたと推測されるが、高速度カメラを用いた可視化観察による検証が必要である。

図 7(b) に示す  $p_1 = 80$  kPa の場合 ( $\lambda = 1.9$  mm,  $w/\lambda \approx 3$ ) では、溝の左部分においてセルサイズが大きくなる様子がわかる。図 7(a) と同様にデトネーション波が溝から回折することによってセル模様が消失する。また、2 個の溝から回折して伝ばした衝撃波が管壁面で干渉し、反射衝撃波どうしが中心軸上で干渉することによって形成される円弧上の模様 (RS) が観察できる。図 7(c) に示す  $p_1 = 60$  kPa ( $\lambda = 2.4$  mm,  $w/\lambda \approx 2$ ) および図 7(d) に示す  $p_1 = 40$  kPa の場合 ( $\lambda = 5.7$  mm,  $w/\lambda \approx 1$ ) では、溝の直後においてセル模様が存在する。すなわち、図 7(c) では溝直後の領域でセルサイズが 5.4 mm 程度に大きくなった後、セル構造がすす膜上から消失する様子がわかる。すなわち、デトネーション波が 2 個の溝から回折する際に発生する膨張波の相互作用によって、誘導反応帯厚みが増してセルサイズも大きくなり、デトネーション波が消炎する過程が観察できる。

図 7(e) に示す  $p_1 = 20$  kPa の場合 ( $\lambda = 9.1$  mm,  $w/\lambda \approx 0.5$ ) では、溝内部においてセル模様は観察されないことからデトネーション波が溝内部を伝ばすることができず、衝撃波とデフラグレーション波に分離したと考えられる。デフラグレーション波背後に追従する既燃気体が溝を通過することにより、既燃気体の高速ジェットが形成されるため、溝付ブロックの後方領域においてすすが剥がされる量が増え、白色として観察される。また、この場合には初期圧力が低いため

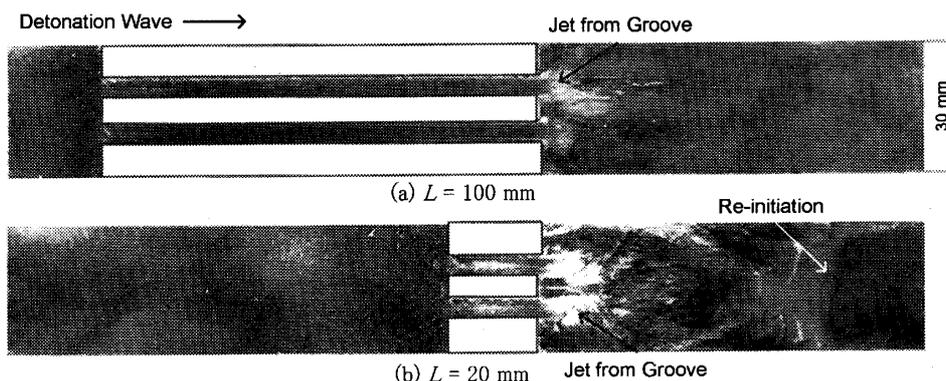


Fig. 8 Soot track record showing the re-initiation processes compared with a different length of groove ( $p_1 = 100$  kPa,  $w = 5$  mm,  $\lambda = 1.4$  mm), (a)  $L = 100$  mm,  $L/\lambda \approx 71$ , (b)  $L = 20$  mm,  $L/\lambda \approx 14$ .

デトネーション波が消炎した際の衝撃波も弱いと考えられ、図 7(a)~(d) で観察された反射衝撃波どうしの干渉による模様 RS、衝撃波のマッハ反射に起因すると考えられる模様 MR も観察できない。

#### 4. 考 察

デトネーション波が溝付ブロックに入射した際には、溝内部および溝背後では以下の 3 通りの現象が考えられる。

- (1) 溝付ブロックに設ける溝幅  $w$  がデトネーションセルサイズ  $\lambda$  よりも小さく ( $w < \lambda$ )、溝付ブロックの長さ  $L$  が  $\lambda$  に対して十分に長ければ ( $L \gg \lambda$ )、デトネーション波は溝内部において衝撃波とデフラグレーション波に分離し、両者が溝から回折して伝ばする。
- (2) (i) 溝付ブロックから回折して伝ばした衝撃波が管内壁で反射を起こし局所的に高温・高圧領域を形成すること、(ii) 2 個の溝を設けた場合には衝撃波どうしの干渉が起こること、(iii) 衝撃波に追従するデフラグレーション波が未燃気体中にジェット噴射されることにより乱流燃焼が促進され、デフラグレーション波の伝ば速度が増加する効果、およびこれらの相乗効果によってデトネーション波が再開始される。
- (3) 溝幅  $w$  が臨界管直径以上、すなわち溝幅  $w$  のセルサイズ  $\lambda$  に対する比が 10 倍より大きい場合には ( $w/\lambda > 10$ )<sup>(1)</sup>、溝からデトネーション波が回折しても消炎せず、デトネーション波が伝ばする。

上記のうち本実験で観察されたのは、(1) と (2) の現象である。本実験で用いた溝幅は 5 mm 以下であること、量論の酸水素混合気体の初期圧力は 100 kPa を上限値としているため、デトネーション波の最小セル

サイズは  $\lambda = 1.4$  mm 程度であり、溝幅は上記した臨界管直径以下の条件であることから (3) の現象は生じない。したがって、本実験条件は溝内部をデトネーション波が伝ばした場合においても、デトネーション波が持続せず溝を通過することによって衝撃波とデフラグレーション波に分離する条件である。溝を通過し衝撃波とデフラグレーション波に分離した状態からデトネーション波が再開始されるメカニズムについては安全工学上の観点からも興味深い。

図 8 は、デトネーション波の再開始過程について溝付ブロックの長さ  $L$  を変化させて比較してあり、溝背後から約 90 mm の領域におけるすす膜模様について着目する。供試気体の初期圧力は  $p_1 = 100$  kPa ( $\lambda = 1.4$  mm) である。図 8(a) は溝付ブロックの長さが  $L = 100$  mm の場合であるが、溝の直後においてすす膜が吹き飛ばされており白色に変化しているのみであり、溝下流の領域において新たなセル模様を観察することはできない。したがって、この実験条件では上記した (2)-(iii) のメカニズムによりデトネーション波が再開始される現象は生じていない。

図 8(b) は、溝付ブロックの長さが  $L = 20$  mm の場合である。図 8(a) と同様に溝直後においてすす膜の大部分が吹き飛ばされているが、溝背後からの距離が約 65 mm の位置においてセル模様を観察することができるため、この位置においてデトネーション波が再開始されたと考えられる。デトネーション波の再開始時には、過大デトネーション波が形成されるため、著しく小さいセル模様がすす膜上に記録されている。デトネーション波が再開始されるメカニズムについてはすす膜模様の観察からは明言できないが、前述した (2)-(i) および (2)-(ii) のメカニズムによると推察される。すなわち、デトネーション波が 2 個の溝から回折

を始めた後、溝から放出された2つの衝撃波が上下の管壁面と干渉し複数回の反射を繰り返す。したがって、管の中心軸上では衝撃波の収束現象が起きることにより、局所的な高温・高圧状態である Hot Spot が形成されてデトネーション波が再開始されたと推察できる。図 8(a) に示すように溝の長さが  $L = 100$  mm の場合には、溝幅が 5 mm と小さくセルサイズの約 4 倍であり、デトネーション波が狭い溝を比較的長い距離を伝ばする過程において、デトネーション波背後で境界層が発達しデトネーション波が減衰するためと考えられる。したがって、溝直後におけるすす膜の吹き飛ばされ方は図 8(b) のほうが図 8(a) よりも顕著である。さらに、デトネーション波が消炎した際に形成される衝撃波も弱く、複数回の反射を繰り返して中心軸上で収束しても、デトネーション波を再開始するのに必要な高温高圧状態にならないためと推察される。

### 5. ま と め

デトネーション波を減衰させることを目的とし、管内部に溝付ブロックを挿入して実験を行った。溝付ブロックの長さ  $L$ 、溝付ブロックに設ける溝幅  $w$  および供試気体の初期圧力を変化させて実験を行い、溝付ブロックを過ぎるデトネーション波の挙動について実験的に調べた。本論で得られた結果を以下に要約する。

- (1) 溝幅  $w$  がデトネーション波のセルサイズ  $\lambda$  よりも大きい場合には ( $w > \lambda$ )、溝内部をデトネーション波が伝ばすることが確認された。溝内部をデトネーション波が伝ばした場合、溝背後においてデトネーション波が消炎する場合、デトネーション波が消炎した後、再開始される現象がそれぞれ観察された。デトネーション波が消炎するのは、溝の角部から発生する膨張波によってデトネーション波の反応帯の温度を低下させ、誘導反応帯厚みが増して衝撃波とデフラグレーション波に分離するためと考えられる。
- (2) 溝下流の領域においてデトネーション波が再開始されるのは、2 個の溝から回折した衝撃波どしどしが管壁で複数回の反射を繰り返す、中心軸上で衝撃波の収束現象により局所的な高温・高圧領域が形成されるため、反応速度が急速に増加するためと考えられる。
- (3) 溝幅  $w$  がデトネーション波のセルサイズ  $\lambda$  よりも小さい場合には ( $w < \lambda$ )、溝内部を定常デトネーション波は伝ばできず、デトネーション波が消炎に至る過程において見られるスピンを起こしていることが確認された。

### 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), 311–336.
- (2) Kuo, K.K., Principles of combustion, *John Wiley & Sons, Inc.*, (1986).
- (3) Niioka, T., et al., Fundamentals of Combustion Phenomena, *Ohmsha*, (2001).
- (4) Pantow, E.G., et al., Decoupling and recoupling of detonation waves associated with sudden expansion, *Shock Waves*, **6** (1996), 131–137.
- (5) Ohyagi, S., et al., Three-dimensional cellular structure of detonations, *Proc. of the 22nd Int. Symp. on Shock Waves*, (1999), 247–250.
- (6) Jayan Sentanuhady, et al., An Experimental Study on Gaseous Detonation Wave Propagating Through Small Holes, *Proc. of 16th Shock Wave Symp. (Japanese)*, (2005) 343–346.
- (7) 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).
- (8) Ohyagi, S., et al., Diffraction and re-initiation of detonations behind a backward-facing step, *Shock Waves*, **12** (2002), 221–226.
- (9) Liu, Y.K., et al., Effect of geometry on the transition of detonation through an orifice, *Combustion and Flame*, **56** (1984), 215–225.
- (10) Bartlmä, F. and Schröder, K., The diffraction of a plane detonation wave at a convex corner, *Combustion and Flame*, **66** (1986), 237–248.
- (11) Teodorczyk, A., et al., Propagation mechanism of quasi-detonations, *22nd Symp. (int.) on Combustion*, The Combustion Institute, (1988), 1723–1731.
- (12) Jones, D.A., et al., Reignition of detonations by reflected shocks, *Shock Waves*, **5** (1995), 47–57.
- (13) Shepherd, J.E., et al., Detonation diffraction, *Proc. 22nd Int. Symp. on Shock Waves*, (1999), 41–48.
- (14) Obara, T., et al., A high-speed photographic study of the transition from deflagration to detonation wave, *Shock Waves*, **6–4** (1996), 205–210.
- (15) Ohyagi, S., Fundamentals and Recent Advances in Detonation Researches I – Basic Theory and Experiments of Gaseous Detonations –, *Nensho Kenkyu (Combustion Research)*, **124** (2001), 17–34.
- (16) Hikita, T. and Akita, K., Outline of Combustion – Physics and Chemistry of Flames –, *Corona Pub.*, (1971).
- (17) Tsuboi, N., et al., Three-dimensional numerical simulation of H<sub>2</sub>/air detonation in a circular tube: structure of spinning mode, *Proc. of the 20th Int. Colloquium on the Dynamics of Explosion and Reactive Systems*, (2005), (CD-ROM).