

# デトネーションアレスター技術の確立とメカニズムの解明

## A Development of Detonation-Arrestor Technique with Investigation into the Mechanisms

プロジェクト代表者：小 原 哲 郎（大学院理工学研究科・助教授）

Tetsuro OBARA (Associate Professor, Graduate School of Science and Engineering)

### 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 [1, 2]。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炎もしくは減衰させるデトネーションアレスター技術の確立することは安全工学上の重要課題である [3]。

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。

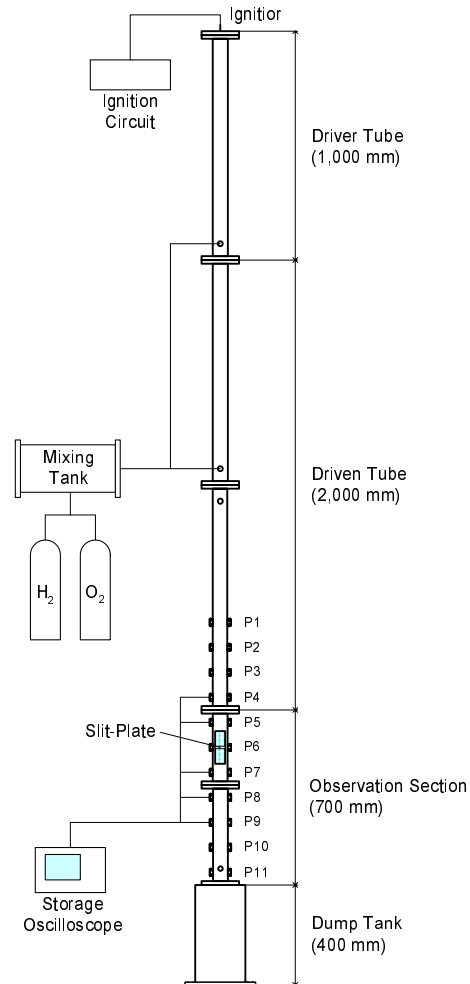


Fig. 1: 実験装置

### 2 実験装置および方法

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

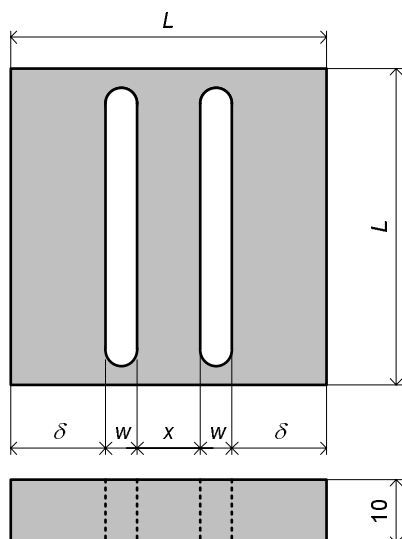


Fig. 2: スリット板の概略

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．スリット板の大きさは  $50 \times 50 \text{ mm}$ ，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．

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

図 3 に供試気体の初期圧力  $p_0 = 20 \text{ kPa}$  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

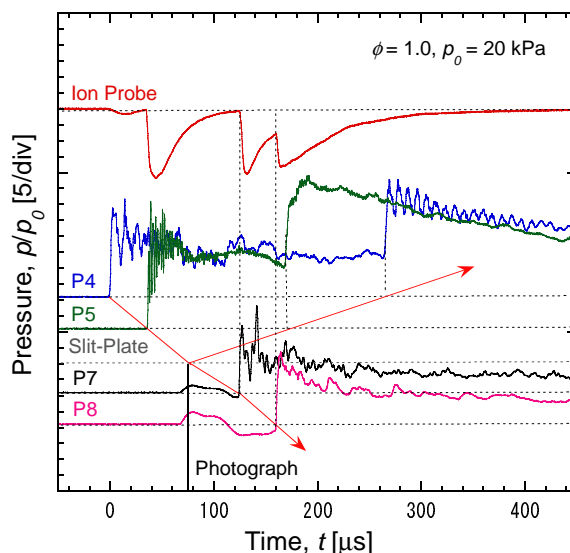


Fig. 3: イオン電流および圧力波形 ( $\phi = 1.0$ ,  $p_0 = 20 \text{ kPa}$ ).

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，スリット背後でデトネーション波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氣的ノイズであり，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 個のスリットが

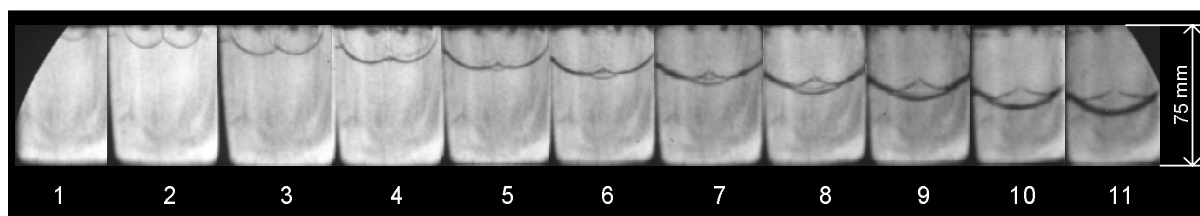


Fig. 4: デトネーション波の再開始過程を示すシュリーレン写真 ( $\phi = 1.0$ ,  $p_0 = 20$  kPa,  $x = 10$  mm, IFT:  $2 \mu\text{s}$ , Exposure time:  $400$  ns)

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波と燃焼波に分離したと判断できる．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する様子が観察される．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を拡大表示しており，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

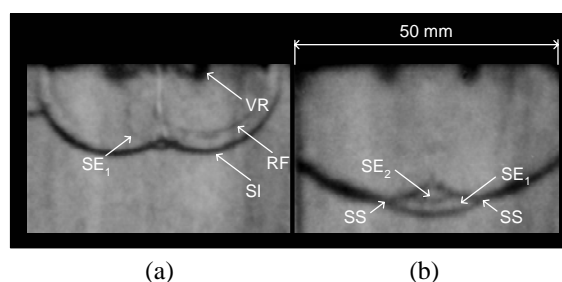


Fig. 5: Fig.4 の4コマおよび7コマ目の拡大写真 (SE: Shock wave produced by local explosion, SI: Incident shock wave, SS: Shock-shock intersection point, RF: Reaction front, VR: Vortex ring).

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広がる特徴的な模様が生じる．

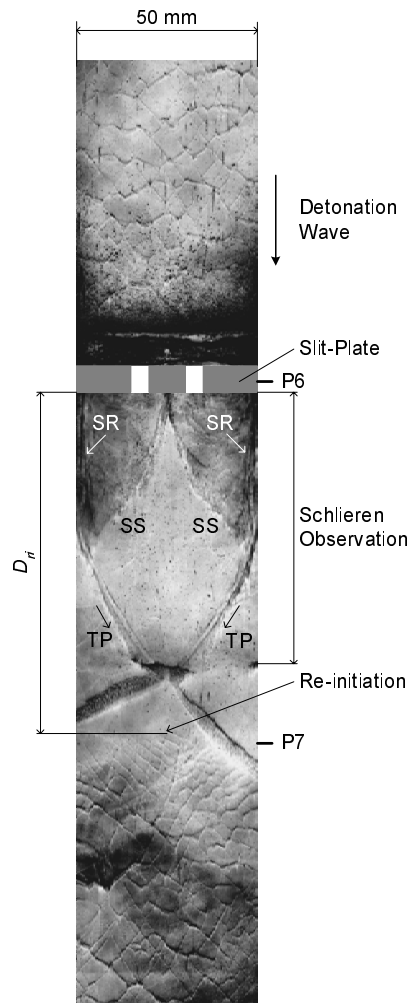


Fig. 6: デトネーション波の再開始過程のすず膜写真, SR: Reflected shock wave, SS: Shock-shock intersection point, TP: Triple point ( $\phi = 1.0$ ,  $p_0 = 20$  kPa,  $x = 10$  mm).

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くなる。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。

## 4 まとめ

2個のスリットに入射したデトネーション波は、次の(1)~(3)の過程を経て再開始するメカニズムを明らかにした。

- (1) 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。
- (2) 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。
- (3) 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。

## 参考文献

- [1] Lee, J.H.S., Dynamic Parameter of Gaseous Detonations, Ann. Rev. Fluid Mech., Vol.16, pp.311-336, 1984
- [2] Kuo, K.K., Principles of Combustion, John Wiley & Sons, Inc., 1986
- [3] 小原 哲郎, Jayan Sentanuhady, 塚田 豊, 大八木 重治, 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, 日本機械学会論文集 (B編), 72巻, 718号, pp.1605-1612, 2006.6