

デトネーション波の消炎および再開始現象の解明

Study on Quenching and Re-initiation Behavior of Detonation Wave

プロジェクト代表者：小 原 哲 郎 (大学院理工学研究科・准教授)
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。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^{1,2)}。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消炎および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 図1に実験に用いたデトネーション管（全長 4,100 mm）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、観測部およびダンブタンクで構成される。駆動管 (Driver Tube) は長さ 1000 mm である。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) には光学ガラス (BK7) が埋め込まれた観測窓を備える。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。ダンブタンクは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。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。

3. 結果および考察 図2に実験で得られた圧力およびイオンプローブからの出力波形を示す。図の縦軸は圧力を初期圧で除した無次元圧力 p/p_1 、横軸はデトネーション波がスリット板に入射してから経過時刻 t である。供試気体の初期圧は $p_1 = 40$ kPa、スリット幅 $w = 8$ mm、スリット間隔 $x = 5$ mm とした場合であるデトネーション波は測定孔 P4, P5 の

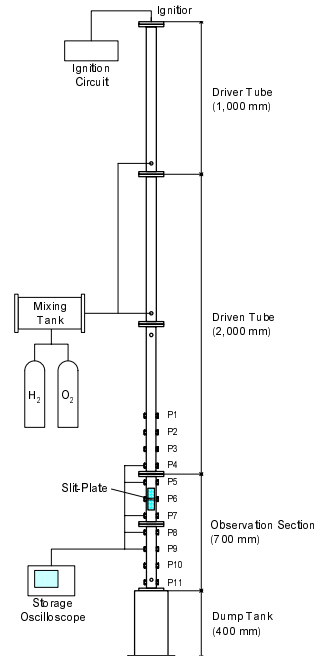


Fig. 1: 実験装置の概略図

順に伝ばするため圧力が急峻に立上がる。また、デトネーション波の一部はスリット板表面で反射するため、反射衝撃波が 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、これに対応するイオンプローブからの出力は生じない。デトネーション波がスリットから回折することにより後述するようにデトネーション波は衝撃波と反応面に分離すると考えられるが、測定孔 P7 の位置では圧力とイオンプローブの出力時刻が一致していることから、スリット板から測定孔 P7 に至る過程でデトネーション波が再開始したと考えられる。

図3は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高速シュリーレン写真であり、図2に示した圧力波形と同時に撮影された。写真のコマ間隔は 1 μs 、1 コマ当たりの露光時間 500 ns の条件である。2 コマ目以降では、2 個のスリットから伝ばするデトネーション波 IS が捉えられている。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 Prandtl-Meyer の膨張波が生じ、デトネーション波の形状を湾曲させるとともに、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

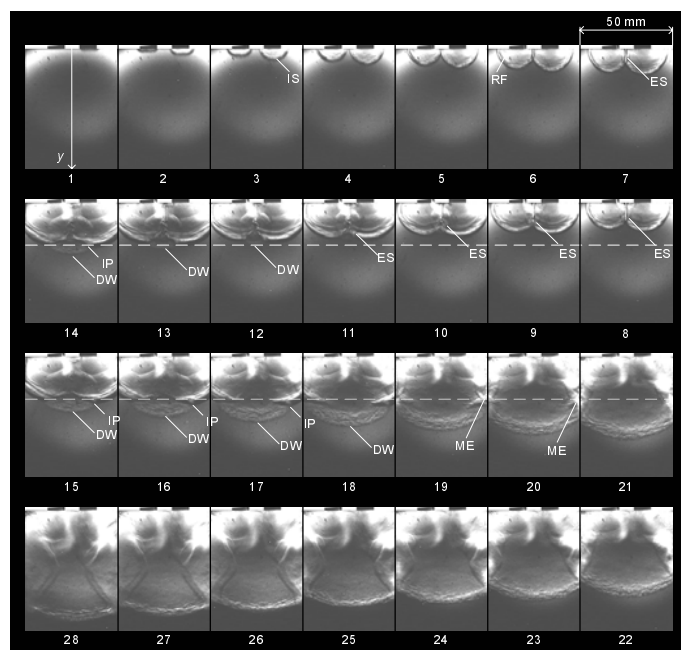


Fig. 3: 高速度シュリーレン写真 ($\phi = 1.0$, $p_1 = 40$ kPa, $w = 8$ mm, $x = 10$ mm)

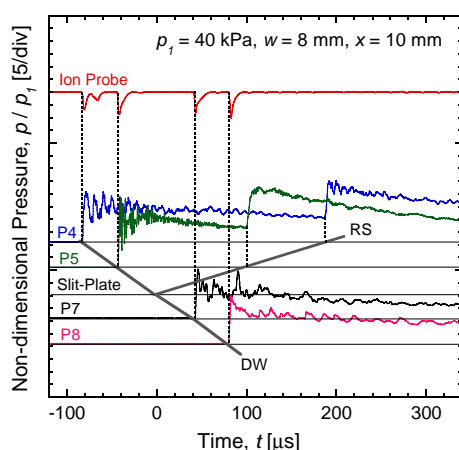


Fig. 2: イオン電流および圧力波形 ($\phi = 1.0$, $p_1 = 40$ kPa, $w = 8$ mm, $x = 10$ mm)

応面の伝ば速度が低下する．これにより，6 コマ目以降においてデトネーション波は回折衝撃波 IS と反応面 RF に分離して伝ばする．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 を追い抜いて伝ばする様子が 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高速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，および後述するすす膜模様の観察結果から 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．デトネーション波が再開始した直後ではオーバードリブンのデトネーション波 (C-J デトネーション波よりも伝ば速度が大きく圧力も高い) となっており，セルサイズが極めて小さいことから個々のセルを可視化観察することは難しい．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．

4. まとめ 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 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様子を明らかにした．

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) 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