

■原著論文/ORIGINAL PAPER■

細い管内でのデトネーション遷移過程に関する実験的研究

An Experimental Study on Detonation Transition Processes through Thin Tubes

永井 厚司^{1*}・岡部 俊彦²・キム ギョンミン³・吉橋 照夫⁴・小原 哲郎⁵・大八木 重治⁵NAGAI, Koji^{1*}, OKABE, Toshihiko², KIM, Kyeongmin³, YOSHIHASHI, Teruo⁴, OBARA, Tetsuro⁵, and OHYAGI, Shigeharu⁵¹ 埼玉大学大学院理工学研究科生産科学専攻 〒338-8570 さいたま市桜区下大久保 255
Graduate School of Production Science, Saitama University, 255 Shimo-Ohkubo, Sakura-ku, Saitama, 338-8570, Japan² 埼玉大学大学院理工学研究科機械工学専攻 〒338-8570 さいたま市桜区下大久保 255
Graduate School of Mechanical Engineering, Saitama University, 255 Shimo-Ohkubo, Sakura-ku, Saitama, 338-8570, Japan³ 埼玉大学工学部機械工学科 〒338-8570 さいたま市桜区下大久保 255
Department of mechanical Engineering, Saitama University, 255 Shimo-Ohkubo, Sakura-ku, Saitama, 338-8570, Japan⁴ 埼玉大学総合研究機構 〒338-8570 さいたま市桜区下大久保 255
Innovative Research Organization, Saitama University, 255 Shimo-Ohkubo, Sakura-ku, Saitama, 338-8570, Japan⁵ 埼玉大学大学院理工学研究科人間支援・生産科学部門 〒338-8570 さいたま市桜区下大久保 255
Division of Human-centered Production Science, Graduate School of Science and Engineering, Saitama University,
255 Shimo-Ohkubo, Sakura-ku, Saitama, 338-8570, Japan

2009年1月30日受付; 2009年10月28日受理/Received 30 January, 2009; Accepted 28 October, 2009

Abstract : Pulse detonation engines (PDEs) are expected to be the next-generation engine systems, and are expected to have applications in various fields. One of the fundamental problems faced during the development of PDEs is the deflagration to detonation transition (DDT). In order to realize a PDE, it is essential to shorten a parameter of detonation transition called a detonation induction distance (DID). However, the mechanism underlying the DDT process and methods to shorten DID in narrow channels have not yet been understood. An experimental study on DDT process in a narrow rectangular channel with a height of 1-5 mm and a width of 8 mm was carried out by employing pressure transducers, ionization probes, and sooted plate technique in oxyhydrogen mixtures. The effects of the tube height and equivalence ratio on pressure detonation limits were discussed. Detonation velocity, DDT process, and DID were discussed on the basis of pressure history and soot track record. Overdriven detonation and attenuated detonation were observed in the narrow channel. The DID value measured on the basis of the soot track record in the present study was in the range of the empirical formula obtained by the other researchers.

Key Words : Pulse Detonation Engine, Deflagration to Detonation Transition, Detonation Induction Distance

1. 緒言

パルスデトネーションエンジン (Pulse Detonation Engine, PDE) はデトネーションを繰り返し発生させる燃焼機関であり、高熱効率、構造の単純さ、高比推力などの特長を持つことから、次世代推進機関をはじめ様々な分野での応用が期待されている[1,2,3]。PDEの基礎研究の一つにデフラグレーションからデトネーションへの遷移 (Deflagration to Detonation Transition, DDT) 過程が挙げられる[4,5,6]。密閉

された管内を予混合気体で充填し一端で点火すると、可燃限界内であれば火炎が生じ、まず、層流火炎が伝播する。火炎は燃焼ガスの膨張により加速され、前方の未燃気体を圧縮しさらに加速し、壁面上の境界層による火炎の変形もその効果を高め、乱流予混合火炎を形成する。ある程度加速すると前方の圧縮波は衝撃波へと成長し、その背後に高温高圧の未燃気体を作り、その気体が自着火温度に達すると爆発的燃焼が開始し、Overdriven状態のデトネーション波に遷移する[7,8]。これが、DDT過程のシナリオである。このOverdriven Detonationは徐々に減衰して最終的に安定なC-Jデトネーションとなる。DDT過程についてはUrtiew,

* Corresponding author. E-mail: s05d2002@mail.saitama-u.ac.jp

Oppenheim [9] が高速シュリーレン撮影による可視化により爆発的燃焼の詳細を明らかにしており, 高温高圧下における DDT について[10], 障害物による影響[11,12], デトネーション遷移時の乱流境界層厚さとセルサイズの関係[13]など多く研究されている. 特にデフラグレーションからデトネーションへ遷移するまでの距離はデトネーション誘導距離 (Detonation Induction Distance, DID) と呼ばれ, PDE の実現にはこの DID を短くすることが不可欠である[14]. 一般に燃焼速度が大きいほど, 圧力が高いほど, 管径が小さいほど DID が短くなることが知られている[15]. 松井[16]は, 燃料-空気混合気の種々の管径 (2~28 mm) におけるデトネーションの伝ば限界について調べている. また, 石井ら[17,18]は定常に伝ばするデトネーション波を細い間隙に入射させ, 細管内での伝ば機構について調べている. しかしながら, 細管内の現象については, 初期圧や当量比によるデトネーション圧力限界, 伝ば限界直径, セルサイズ, 速度欠損[19,20]などのパラメータが関係し, DDT 過程を含め未だ十分に解明されていない. また, PDE を設計する場合, 酸素-水素混合気のようなデトネーションになりやすい気体をイニシエータとして使い主混合気を着火する場合は考えられる[4,6]. イニシエータとなるプリデトネータとして, マルチプル・チューブによるもの[21], 反射板を用いたもの[22]などが提案されている. イニシエータは, 使用する酸素はなるべく少なく, 小規模のものを作ることが重要である.

そこで, 本研究の目的は, 細管内の DDT 過程を明らかにし, PDE 用イニシエータの基礎データを与えるために, 初期圧, 混合気濃度, 管寸法に対する影響を調べることとした. そのため, 長さ 808 mm, 幅 8 mm, 高さを 1, 2, 5 mm の 3 種類の矩形断面を持つデトネーション管を製作し, 酸素-水素混合気を用いて, 管断面の高さ, 初期圧, 当量比を変化させ, 管内の圧力, 伝ば速度, セルサイズを計測することにより, DID を推定し, DDT 過程について検討した.

2. 実験装置および実験方法

2.1. 実験装置

本研究で用いた実験装置の概略を図 1 に示す. 実験装置は, 2 つのアルミニウム系合金製平板を重ね合わせたもので, 全長 1000 mm, 高さ 56 mm, 幅 126 mm である. 一方の平板に長さ 808 mm, 幅 8 mm の溝を設けることで, 矩形の細い管路を作成した. なお, 平板は溝の深さ, つまり細管の高さ $h = 1, 2, 5$ mm の 3 種類を作成した. もう一方の平板にはその溝と対向する外周部分に O リングを設け, 気密性を確保した. 実験装置には, 管内の圧力を測定するためのピエゾ式圧力変換器 (PCB Piezotronics, 113A21, 立ち上がり時間 $1 \mu\text{s}$ 以下) を 180 mm 間隔に 5 箇所 (P1, P2, P3, P4, P5), 燃焼波の伝ばを検知するためのイオンプローブを圧力変換器に対向して 3 箇所 (P2, P3, P4) に, 混合気に点火するための点火プラグを左側管端から 8 mm

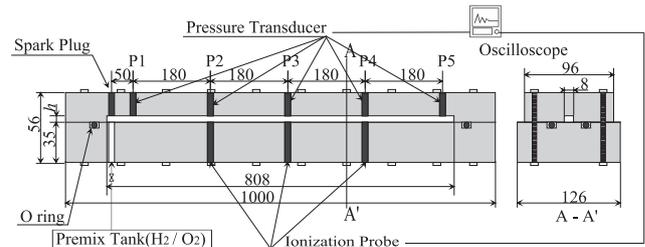


Fig.1 Schematic diagram of the experimental apparatus

Table 1 Experimental conditions

Mixture	H ₂ / O ₂
Equivalence Ratio, ϕ	0.5, 1.0, 1.5
Initial Pressure, p_0	20 - 150 kPa
Height of Channel, h	1, 2, 5 mm

かつ P1 の上流 50 mm の位置に設置した. P5 から右側管端までは 30 mm である. また, 混合気を吸排気するための吸気ポートとニードルバルブを点火プラグに対向する位置に設置した. 吸気ポートの寸法は平板部分で直径 5 mm, 深さ 18 mm であり, ニードルバルブ及び継手部分を含めるとデッドボリュームは 1800 mm^3 程度 ($h = 1$ mm のチャンネルの場合には約 22%) になる. なお, 圧力変換器と点火プラグは溝を有する平板に, イオンプローブは O リングを有する平板に設けた. 圧力変換器及びイオンプローブは平板に平滑に取り付け, デトネーション遷移に影響を与えないように設置した. 点火プラグは, 管幅 8 mm 内に設置するためセラミックス製の丸型二孔絶縁管に 2 本の鉄芯を貫通させ管内に 0.7 mm 突出させたものを採用した. イオンプローブは, 2 本の鉄芯間 (間隙幅 1 mm) に 90 V の電圧を印加してあり, 燃焼波の到達を電圧の降下で検知する. なお, イオンプローブ回路はデトネーションのような強い燃焼波に反応するように設定されている.

2.2. 実験方法

実験は, 表 1 に示す実験条件のもと, 管内を真空にした後, 水素-酸素混合気を所定の圧力まで充填し, 点火プラグにより点火する. 点火により圧力波と燃焼波が伝ばし, 圧力変換器及びイオンプローブにより信号が測定される. それぞれの信号はデジタルオシロスコープに取り込まれ, データから伝ば速度及び圧力を測定した. なお, 実験で用いた混合気は, 分圧法により約 24 時間自然混合した 3 種類の当量比の水素-酸素混合気である. また, デトネーション波面は, 入射衝撃波, 反射波, マッハ軸の三つの衝撃波からなり, 三重点が伝ば方向と垂直な方向に移動しながら伝ばするため, すず膜上を通過すると三重点の軌跡によるうろこ状のセル模様を得られる. DID 及びセルサイズ (デトネーションの伝ば方向に対して垂直方向のセル幅) を観

察するためにこのすす膜法による可視化も行った。長さ 830 mm, 幅 20 mm, 厚さ 0.5 mm のアルミニウム板に灯油の火炎ですすを塗布したものをを用いた。

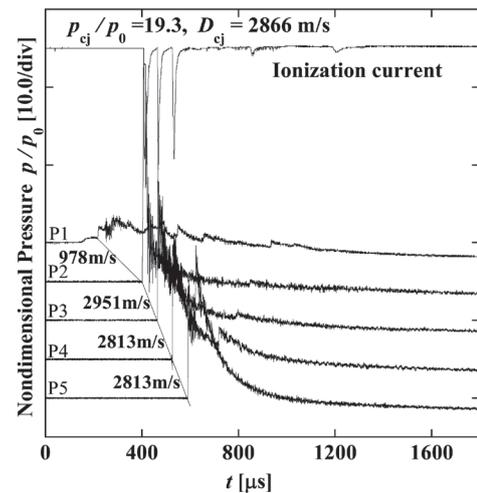
3. 実験結果および考察

3.1. 圧力, 伝ば速度

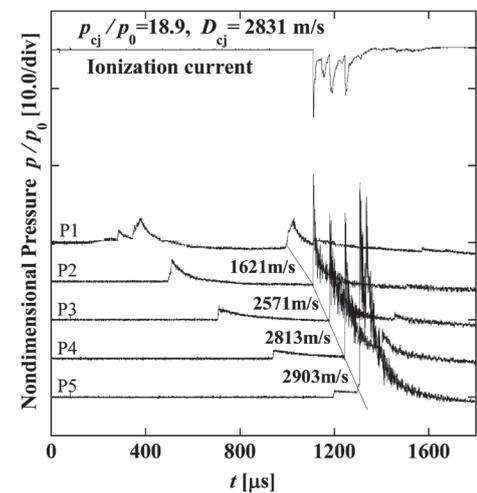
本実験で測定された圧力波形を図 2 に示す。実験条件は高さ $h = 5$ mm, 当量比 $\phi = 1.0$ または 0.5 , 初期圧 p_0 を変化させた場合である。図 2 (a), (b), (c) の 3 つのタイプの圧力波形が観測された。横軸は点火からの時間, 波形は各位置の圧力を初期圧 p_0 で除した無次元圧力と P2, P3, P4 のイオン電流である。

図 2 (a) は点火により生成された圧力波に燃焼波が瞬時に追いつき P2 でデトネーションが開始する場合である。この圧力波形の条件は当量比 $\phi = 1.0$, 初期圧 $p_0 = 150$ kPa である。P2 以降の圧力変換器は急激な圧力上昇が見られ, 衝撃波が伝ばしていることが観測される。さらに, P2 から P4 の圧力上昇時に, 対向して設置してあるイオンプローブの立下りが一致していることから, デトネーションに遷移していると判断できる。図中の速度は, 各圧力変換器間の平均伝ば速度である。ピーク圧力を初期圧で除したピーク無次元圧力は P2 では 29, P3 では 22 であり, P2-P3 間の平均伝ば速度が最も大きく 2951 m/s である。化学平衡計算により求めた C-J デトネーション速度は 2866 m/s, C-J デトネーション圧力を初期圧で除した C-J 無次元圧力は 19.3 であり, P2-P3 間で, この C-J 値よりも大きいオーバードリブンデトネーションになっていることがわかる。P3-P5 間の平均伝ば速度は 2813 m/s, P4 での無次元圧力は 17 と C-J 値より低い値になっている。P3-P5 間の速度欠損は 1.8 % である。大気圧における半径 1 cm の管での速度欠損の計算値は 1.0 %, 測定値は 1.2 % [19] であり, 細管の影響があると言える。初期圧 $p_0 = 130$ kPa 以上では, 概ね同様の圧力波形が得られた。

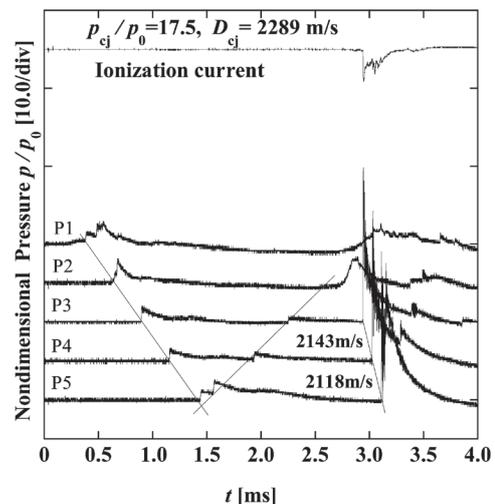
図 2 (b) は, 点火後, 圧力波と燃焼波が分離して伝ばし, 圧力波後方の燃焼波が加速して P3 または P4 でデトネーションに遷移する場合である。この圧力波形の条件は当量比 $\phi = 1.0$, 初期圧 $p_0 = 80$ kPa である。点火後, P1 で圧力波が発生し, P2 以降, 衝撃波へ遷移して伝ばする。各圧力変換器間の平均伝ば速度は P2-P3 間で 857 m/s, P3-P4 間で 773 m/s, P4-P5 間で 700 m/s と伝ばするにしたがい減速していく。この衝撃波が P4-P5 間を伝ばしているとき, P1 で急激な圧力上昇が観測される。この衝撃波の平均伝ば速度は, P2-P3 間で 2571 m/s, P3-P4 間で 2813 m/s, P4-P5 間で 2903 m/s と加速している。また, ピーク無次元圧力は P1 から順に 3.9, 14.8, 14.7, 19.8, 28.8 と上昇している。同時に, P2, P3, P4 に対向して設置してあるイオンプローブの立下りが観測され, 圧力変換器の P2, P3, P4 の立ち上がりと一致することからデトネーションが伝ばしており, P2 では既にデトネーションに遷移していると考え



(a) $p_0 = 150$ kPa, $\phi = 1.0$



(b) $p_0 = 80$ kPa, $\phi = 1.0$



(c) $p_0 = 40$ kPa, $\phi = 0.5$

Fig.2 Pressure histories ($h = 5$ mm)

られる。しかし, 化学平衡計算により求めた C-J デトネーション速度は 2831 m/s, C-J 無次元圧力は 18.9 であり, 定常状態には至っていない。また, P1 及び P2 の圧力変動を観測すると, P1 では先行する圧力波のピーク後, 反射と思われる第二ピーク後減衰し, 0.994 ms で急上昇している。P2 では, 先行する圧力波のピーク後, ならだかに減衰し, 1.11 ms で急上昇を開始する。この DDT 過程では, 先行する圧力波は減衰し, その圧力波背後でデトネーションに遷移せず, 2 番目の圧力波背後でデトネーションに遷移している。また, 2 番目の圧力波は点火から約 1 ms 後に P1 で観測されており伝ば速度が非常に遅い。これは, 点火により生成された火炎が混合気吸入口に進入し, 膨張した燃焼ガスが噴出したことにより, 図 2 (a) のように先行する圧力波に追いついてデトネーションに遷移せず, 火炎が加速することで前方に 2 番目の圧力波を形成してデトネーションに遷移したものと考えられる。初期圧 $p_0 = 45 \sim 120$ kPa では, 同様の圧力波形が得られた。この噴出ガスの影響は図 2 (a) の場合にも存在するはずで, 初期圧が高いと吸入口内で伝ばする火炎速度が速いため初期火炎核と合体して伝ばするが初期圧が低いとその差が大きくなり分離するように観察されるものと考えられる。

図 2 (c) は, 点火後, 衝撃波と燃焼波が分離して伝ばし, 燃焼波がデトネーションに遷移する前に先行する衝撃波が前方の管端で反射し, 燃焼波と衝突することによりデトネーションに遷移する場合である。この圧力波形の条件は当量比 $\phi = 0.5$, 初期圧 $p_0 = 40$ kPa である。図 2 (b) とは横軸のスケールを変えている。点火により圧力波が伝ばする。圧力波は音速より速い概ね 690 m/s で伝ばし, それぞれのピーク無次元圧力は P2 で 4.1, P3 で 3.0, P4 で 2.6, P5 で 2.3 と減衰していく。そして, 前方の管端で反射し, 元の伝ば方向と反対方向へ伝ばする。ピーク無次元圧力は反射の影響により P5 で 3.5 と若干上昇するものの P4 で 2.2, P3 で 1.8 と急激に減衰する。しかし, P1 - P2 間において, この非常に弱い反射波と対向して伝ばする燃焼波が干渉することにより, P2 で圧力上昇が生じ, 燃焼波はデトネーションへ遷移し, P3, P4, P5 でのピーク無次元圧力はそれぞれ 20.8, 20.2, 20.0 であり, 平均伝ば速度は P3 - P4 間で 2143 m/s, P4 - P5 間で 2118 m/s となる。また, P3 及び P4 でイオンプローブも反応しており, 立下りと圧力の立ち上がりが一致している。また, P2 の圧力上昇後に, P1 で圧力のゆるやかな立ち上がりが観察される。これはデトネーションによる圧力波と燃焼波の伝ばを示している。初期条件に対する化学平衡計算による C-J 無次元圧力は 17.5, C-J デトネーション速度は 2289 m/s である。圧力は C-J 値を上回っているが, 伝ば速度は C-J 値よりも低い。これは, 管端で反射した圧力波の伝ば後の状態が初期状態より温度が上昇して C-J デトネーション速度が低くなるため, その未燃混合気中を伝ばするデトネーションの伝ば速度が初期条件における C-J 値を下回ったものと考えられる。なお, 管の長さが長ければ先行する圧力波は管端で反射せず, 図 2 (b)

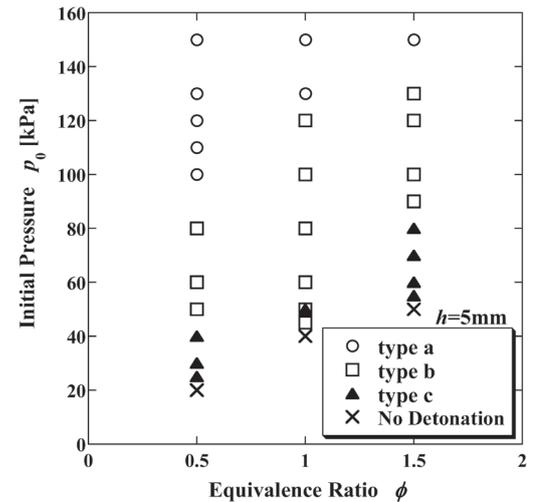
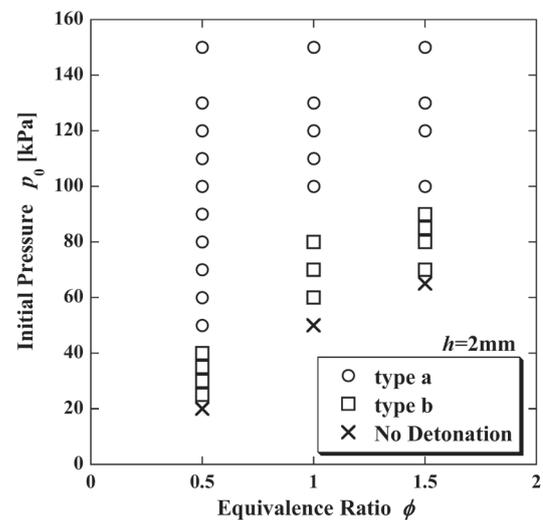
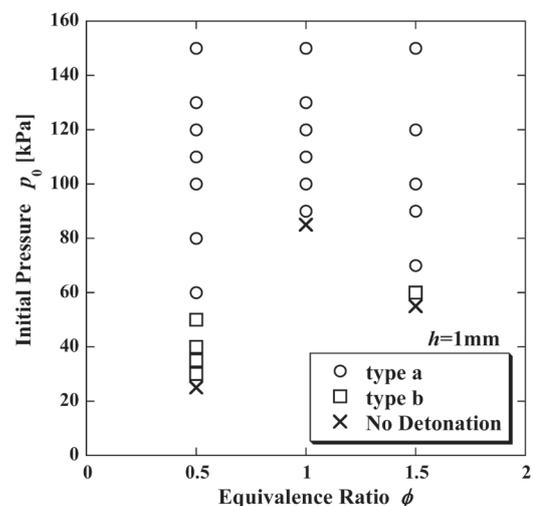
(a) $h = 5\text{mm}$ (b) $h = 2\text{mm}$ (c) $h = 1\text{mm}$

Fig.3 Detonability Limit

と同様の現象またはデトネーションに遷移しないものと考えられる。

以上に示した図2の(a), (b), (c)の3つのタイプのほかに、衝撃波は伝ばするがデトネーションに遷移しない場合が観測された。局所的にはC-Jデトネーション圧力程度までの立ち上がりがあったとしても、平均伝ば速度はC-J値の50%程度しか達せず、伝ばするにしがたい急速に減速する。イオンプローブの反応は小さく、立下がり衝撃波の立ち上がりとは一致せずに遅れており、安定な燃焼波が伝ばしない。

以上デトネーション遷移過程は、図2(a)に示すような点火による圧力波に燃焼波が瞬時に追いつきデトネーションに遷移するタイプ、(b)に示すような混合気吸入口の影響で先行する圧力波と分離した燃焼波が加速してデトネーションに遷移するタイプ、(c)に示すような細管の長さのために先行する衝撃波が管端で反射し、燃焼波と衝突することでデトネーションに遷移する3つのタイプに分類された。なお、図2(c)は細管高さ $h = 5$ mmの場合のみ観察された。

3.2. デトネーション圧力限界

図3に当量比 ϕ と初期圧 p_0 に対する現象の分類を細管の高さ h 別に、図2(a), (b), (c)の圧力波形の3つのタイプtype a, type b, type cを、○, □, ▲, そして、デトネーションに遷移しない場合を×として示す。type aとtype bは、管長さの影響のないデトネーション遷移と考えられるため、▲がある場合、□と▲の境目がこの装置でのデトネーション圧力限界である。 $h = 2, 5$ mmでは当量比 ϕ が小さいほど限界は低く、また、高さ h が小さいほど低い。これは、水素-酸素系では $\phi = 0.7$ 付近で最もセルサイズが小さく反応速度が速いこと[23,24]と、管高さが低いほど、燃焼ガスの膨張により火炎背後から火炎を押し出す効果が強いいため、初期火炎の伝ば速度が速くなるためと考えられる。 $h = 5$ mmでtype b, type cの範囲が広いのは管高さが高いことにより初期火炎が遅いためと考える。 $h = 1$ mmの場合、当量比 $\phi = 1.0$ ではtype bは存在せず、当量比 $\phi = 1.0$ 及び1.5のtype aの範囲は同様の傾向がみられるが、type bを含めて、圧力限界が $h = 2$ mmより若干高くなる。これは、高さ $h = 1$ mmでは壁面による損失の影響が大きくなっているためと考える。一方で、 $\phi = 1.5$ では逆に当量比 $\phi = 1.0$ より低くなりデトネーションになりやすい傾向となるが、これは水素濃度が増加することで未燃気体の音速が増加し、火炎前方の圧力波の速度がより速くなるため火炎伝ば速度を増加させる効果が他の条件に比べて強くなるためと考える。

3.3. すず膜法による可視化

図4に実験で得られたすず膜模様の一例を示す。実験条件は高さ $h = 1$ mm, 初期圧 $p_0 = 100$ kPa, 当量比 $\phi = 0.5$ であり、type aの場合である。図4(a), (b), (c)はそれぞれ点

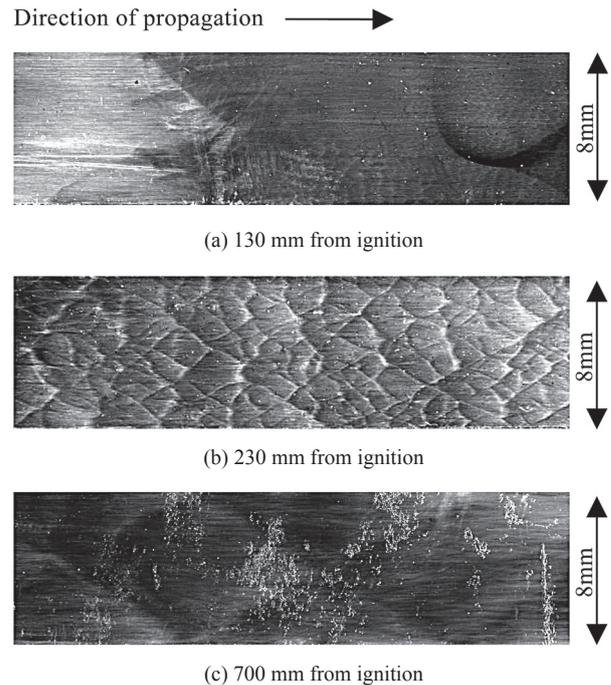


Fig.4 Soot track record ($h = 1$ mm, $p_0 = 100$ kPa, $\phi = 0.5$)

火位置から130 mm, 230 mm, 700 mmの位置から長さ30 mm, 幅8 mmの長さに対してのすず膜模様を示している。図4(a)はP1とP2間であり、点火地点から140 mmの位置あたりから1 mm以下の肉眼では見えないほどの細かいセルが管壁面から現れ、145 mmあたり下部の壁面付近に肉眼でもわかる程度の大きさのセルの規則的なパターンが観察される。このすず膜から、セルが現れる140 mmの位置でデトネーションに遷移し、かつ、DDTは管壁面で起きていると考えられる。燃焼波が壁面の境界層との相互作用により局所爆発を起こしたものと推察される。DIDは140 mm程度である。その後、セルは徐々に大きくなり、図4(b)の点火地点から230 mmの位置(P2付近)では、0.5~2 mm程度の規則的なセルが観察される。これは、酸素-水素混合気における初期圧 $p_0 = 100$ kPa, 当量比 $\phi = 0.5$ の場合のセルサイズ(0.7~2 mm程度)[23,25]と一致しており、定常に伝ばしていると考えられる。その後、セルサイズはさらに大きくなり、図4(c)の点火地点から700 mmの位置では、管幅8 mmに近い大きさのセルが現れ、右管端ではセルは消失している。図5にこのすず膜模様を記録した時の圧力波形を示す。P2でのピーク無次元圧力は16.7, P2-P3間の平均伝ば速度は2195 m/sである。化学平衡計算から求めたC-J無次元圧力は17.8, C-Jデトネーション速度は2324 m/sであり、実験値を上回っている。つまり、P1-P2間ではDDTによりC-J値を上回るオーバードリブンデトネーションになり、P2-P3間では既に減衰していると推測される。すず膜模様からも、P1-P2間では1 mm以下の細かいセルが観察されていることと一致する。セルサイズは混合気、当量比、初期圧に依存する反応速度の指標となるもの

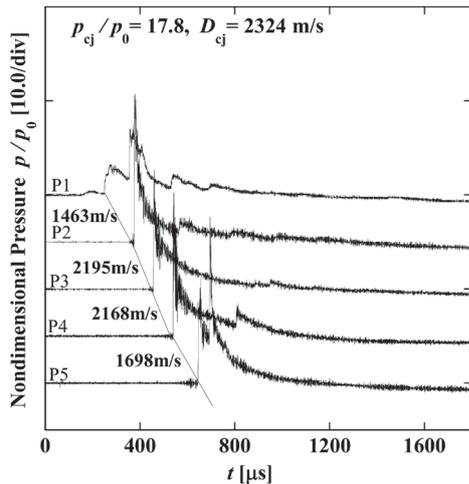
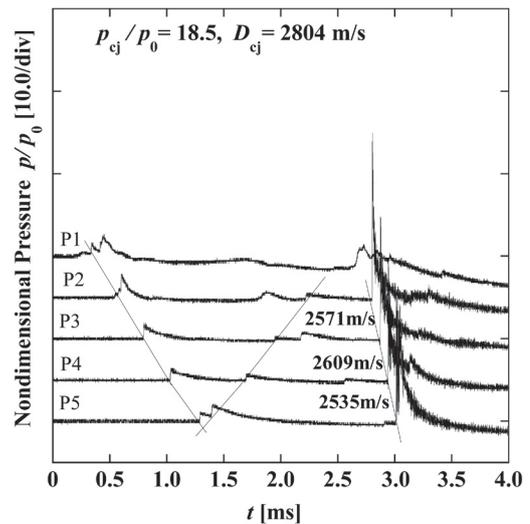


Fig.5 Pressure histories ($h = 1\text{mm}$, $p_0 = 100\text{kPa}$, $\phi = 0.5$)



(a) Pressure histories

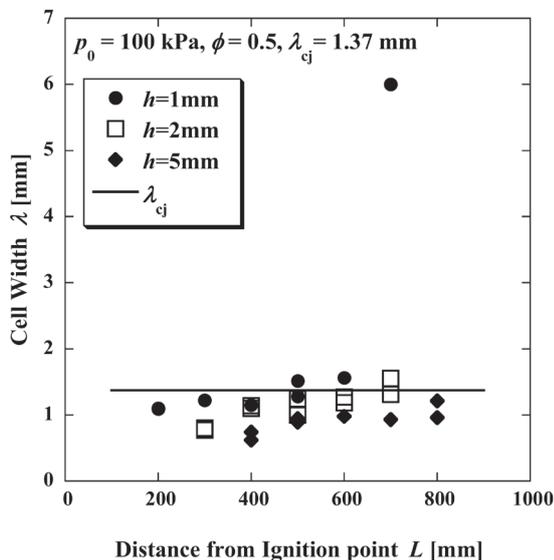


Fig.6 Variation of cell width with distance ($p_0 = 100\text{kPa}$, $\phi = 0.5$)

であるが, 本実験では約 800 mm の細管内で 1 mm 以下から 6 mm と大きく変化した. 細管内では, 早くデトネーションに遷移するが, 安定な C-J デトネーションを維持できずに減衰しやすいと考えられる. これは, 管高さ h がセルサイズより小さい場合, 安定なセル構造を維持するために必要な横波の運動が十分ではなく, 境界層による速度欠損の影響もあり, セルサイズが変動しながら伝ばするものと考えられる. 図 6 にセルサイズの伝ば距離に対する変化の一例を示す. この条件でのセルサイズの定常値は, 約 1.37 mm [25]であるが, $h = 1\text{mm}$ の場合, それ以下の高さのため安定に伝ばできず後期に 6 mm というセルに変化している. $h = 5\text{mm}$, $h = 2\text{mm}$ では, 全般的に定常値より小さくオーバードリブン状態であることを示すが, 高さが高い方がデトネーション遷移は遅れるためオーバードリブンの度合いが大きい.

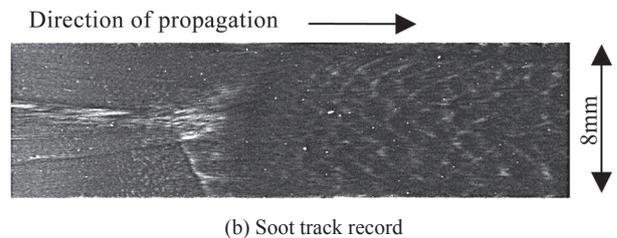


Fig.7 Pressure histories and soot track record ($h = 5\text{mm}$, $p_0 = 50\text{kPa}$, $\phi = 1.0$)

図 7 は type c の遷移点付近のすす膜模様と同時に得られた圧力波形である. この実験条件は, 高さ $h = 5\text{mm}$, 初期圧 $p_0 = 50\text{kPa}$, 当量比 $\phi = 1.0$ の場合である. 化学平衡計算により求めた C-J 無次元圧力は 18.5, C-J デトネーション速度は 2804 m/s である. 図 7 (b) は点火地点から 190 mm の位置 (P1 - P2 間) から長さ 30 mm, 幅 8 mm のすす膜模様を示している. 燃焼波が左側から右方向へ, 反射した圧力波が右側から左方向へ伝ばする. 約 210 mm の位置から全体に 1 mm 程度の細かいセルが現れ, この位置において, デトネーションに遷移したと推察される. 圧力波形からは右側管端で反射した圧力波が P1 - P2 間で干渉し, P2 でのピーク無次元圧力は 20.9 と, 急上昇し, C-J 圧力よりも高いオーバードリブンデトネーションに遷移していると考えられ, すす膜模様のセルの発生位置とも一致する.

3.4. DID とセルサイズ

図 8 に初期圧 $p_0 = 100\text{kPa}$, 当量比 $\phi = 0.5, 1.0, 1.5$ 及び初期圧 $p_0 = 150\text{kPa}$, 当量比 $\phi = 1.0$ の場合の初期圧とデトネーション誘導距離 (DID) の関係を管の高さ別にまとめたものを示す. DID は管内で初めてデトネーションセルが発生した位置から点火プラグまでの距離と定義する. DID は管の高さつまり, 管断面積が小さくなるほど, また, 初期圧が

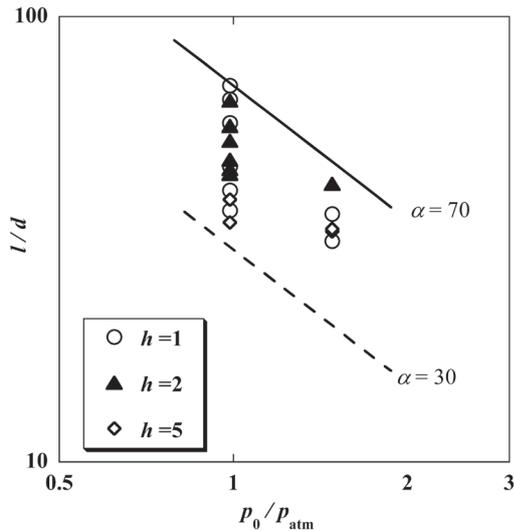


Fig. 8 Variation of DID with an initial pressure

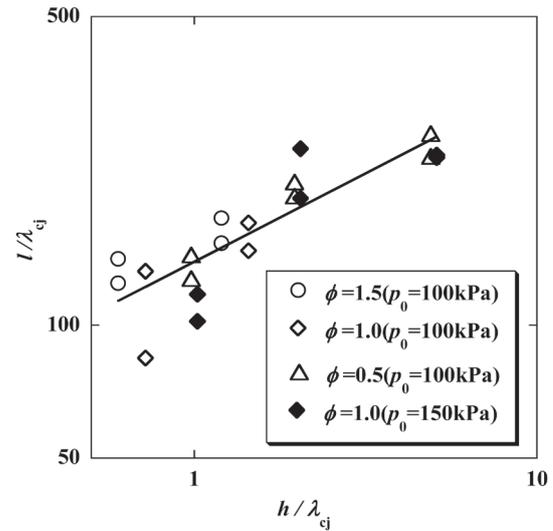


Fig. 9 Variation of DID with height of channel

高くなると短くなる。ここで、多くの酸水素混合気による実験から提案されている実験式[26,27]

$$\frac{l}{d} = \alpha \frac{p_{\text{atm}}}{p_0}, \quad (\alpha \approx 30 \text{ to } 70) \quad (1)$$

と比較する。ここで、 l は DID、 d は管径、 p_{atm} は大気圧、 p_0 は初期圧である。本実験で用いた細管は矩形のため、矩形断面積と同面積の等価直径 d に変換した値を用いた。高さ $h = 5 \text{ mm}$ 、当量比 $\phi = 0.5$ のとき最も小さく $\alpha = 32$ 、高さ $h = 1 \text{ mm}$ 、当量比 $\phi = 1.5$ のとき最も大きく $\alpha = 70$ で近似でき、式 (1) の α の範囲内で一致する。なお、図 8 中の実線は $\alpha = 70$ 、破線は $\alpha = 30$ を示している。また、初期圧 100 kPa の場合で高さ h 別にみると当量比が小さいほうが α は小さく、DID は短いといえる。当量比 $\phi = 1.0$ の場合の本実験データを式 (1) にあてはめると、高さ $h = 1 \text{ mm}$ の時 $\alpha = 40$ 、高さ $h = 2, 5 \text{ mm}$ の時 $\alpha = 50$ 程度で近似できる。また、図 7 の type c の DID は 210 mm であり、実験条件の初期圧 $p_0 = 50 \text{ kPa}$ を実験式 (1) に $\alpha = 50$ として代入し、DID の近似式に当てはめると、723 mm である。つまり、燃焼波は圧力波と干渉することにより早期にデトネーションに遷移したことが確認できた。

しかしながら、式 (1) は当量比が考慮されていないため比例係数の範囲が広く、管の高さに対する依存性が明確ではない。そこで、図 9 に DID と管の高さの関係をまとめたものを示す。セルサイズは、混合気、初期圧等に依存するパラメータである。DID と管の高さはセルサイズで無次元化することにより、次式 (2) で近似でき、図 9 の直線で示す。なお、相関係数は 0.88 である。

$$\frac{l}{\lambda_{\text{cj}}} = 139.2 \left(\frac{h}{\lambda_{\text{cj}}} \right)^{0.4} \quad (2)$$

ここで、 l [mm] は DID、 h [mm] は管の高さ、 λ_{cj} [mm] はそ

の初期圧に対する定常なデトネーションのセルサイズの実験値[23,25]である。式 (2) から DID は管高さの 0.4 乗に比例するといえる。式 (2) を整理すると DID の近似式は

$$l = 139.2 \lambda_{\text{cj}}^{0.6} h^{0.4} \quad [\text{mm}] \quad (3)$$

で表され、DID はセルサイズと管の高さに相関性があるといえる。なお、近似係数は 139.2 と得られたが、全データは 96 から 189 の範囲内であり、精度は $\pm 35\%$ 程度である。式 (3) は、幅 8 mm で管高さを変化させた扁平な管に対する近似式である。ここで、式 (1) で l は初期圧に反比例するということに対し、式 (2) でセルサイズの 0.6 乗に比例するとなると水素-酸素系のセルサイズは初期圧にほぼ反比例する[23,25]ので、 l は初期圧の -0.6 乗に比例することになり矛盾する。この点については、本実験データでは、管高さ h がセルサイズに比べて数倍以下の比較的小さな領域のため、その影響が強く反映されているものと考ええる。また、管高さについては、式 (1) の直径を面積を同じくする等価直径と考えれば、式 (1) からは管高さの 0.5 乗に比例すべきところが 0.4 乗になっている。これは次の理由から、測定範囲で近似した結果、管高さの影響が小さくなったものと考えられる。 $h/\lambda_{\text{cj}} < 1$ の場合、管の高さよりもセルサイズは大きい。しかしながら、 $h/\lambda_{\text{cj}} > 1$ の場合と比較して DID に大きな変化はみられない。本実験では、細管の高さに比べて幅が 8 mm と大きいため $h/\lambda_{\text{cj}} < 1$ の場合は定常なデトネーションには至っていないと考えられる。

4. 結言

細管内での DDT 過程について知見を得ることを目的として、幅 8 mm、高さ 1, 2, 5 mm の 3 種類の矩形断面を持つデトネーション管を製作し、酸素-水素混合気を用い

て, 初期圧と当量比を変化させ, 管内の圧力変化, 伝ば速度, セルサイズを計測することにより, デトネーション圧力限界と DID を推定した. 吸入ポート, 管長さに遷移過程は依存するが, 圧力限界は測定した範囲では管高さが低いほど低かった. DID は酸水素混合気に対する実験式に定性的に一致し, 細管の DID にも適用できることが確認できた. また, DID はセルサイズと管高さをを用いた近似式で整理できた. 一般に, 細管内では, 早くデトネーションに遷移するが管寸法がセルサイズより小さい場合, 安定なセル構造を構築できずに減衰する場合があることがわかった.

謝辞

本研究は, 科学研究費基盤研究 (B) 18360403 「パルスデトネーションエンジン持続運転における熱流体力学的問題の解決」の一環として行われた. また研究を実施するにあたって, 埼玉大学大学院理工学研究科博士前期課程機械科学系専攻の横川真人君の協力を頂いた. ここに記して謝意を表す.

References

- Kailasanath, K. *AIAA Journal* 38: 1698-1708 (2000).
- Kailasanath, K. *AIAA Journal* 41: 145-159 (2003).
- Sakurai, T., Yoshihashi, T., Obara, T., Ohyagi, S., *Journal of the Combustion Society of Japan* (in Japanese) 47: 97-104 (2005).
- Roy, G. D., Frolov, S. M., Borisov, A. A., Netzer, D. W. *Progress in Energy and Combustion Science* 30: 545-672 (2004).
- Hayashi, A. K., *Journal of the Combustion Society of Japan* (in Japanese) 44: 80-88 (2002).
- Kawahara, J., Matsuo, A., Endo, T., *Nagare* (in Japanese) 26: 205-213 (2007).
- Williams, F. A., *Combustion Theory 2nd ed.* 217-219, Perseus Books Pub., (1985).
- Ohayagi, S., *Fundamentals and Recent Advances in Detonation Researches I - Basic Theory and Experiments of Gaseous Detonations-*, *Nensho Kenkyu* (in Japanese), 124: 17-34 (2001).
- Urtiew, P. A., Oppenheim, A. K., *Proc. Roy. Soc. London Ser. A*, 295:13-28 (1966).
- Card, J., Rival, D., Ciccarelli, G., *Shock Waves* 14: 167-173 (2005).
- Ohayagi, S., Yajima, S., Obara, T., Yoshihashi, T., *JSME Trans. B.* (in Japanese) 59: 3552-3556 (1993).
- Obara, T., Yajima, S., Yoshihashi, T., Ohayagi, S., *Shock Waves* 6: 205-210 (1996).
- Kuznetsov, M., Alekseev, V., Matsukov, I., Dorofeev, S., *Shock Waves* 14: 205-215 (2005).
- Sorin, R., Zitoun, R., Desbordes, D., *Shock Waves* 15: 137-145 (2006).
- Hikita, T., Akita, K., *Outline of Combustion -Physics and Chemistry of Flames-* (in Japanese) 118-121, Corona Pub., (1971).
- Matsui, H., *Proceedings of 19th Combustion Symposium* (in Japanese) 68-70 (1981).
- Ishii, K., Ito, K., Tsuboi, T., *Proc. Combust. Inst.* 29: 2789-2794 (2002).
- Ishii, K., Ito, K., Tsuboi, T., *Journal of the Combustion Society of Japan* (in Japanese) 46: 243-250 (2004).
- Fay, J. A., *Physics of Fluids* 2: 283-289 (1959).
- Tsuge, S., *Combustion Science and Technology* 3: 195-205 (1971).
- Ishii, K., Tanaka, T., *Shock Waves* 14: 273-281 (2005).
- Numakura, R., Wakita, M., Itoh, Y., Sugata, S., Nagata, H., Totani, T., Kudo, I., *Journal of the Combustion Society of Japan* (in Japanese) 48: 265-272 (2006).
- Ohayagi, S., Ochiai, T., Yoshihashi, T., Harigaya, Y., *JSME Trans. B.* (in Japanese) 54: 3559-3564 (1988).
- Westbrook, C. K., *Combustion Science and Technology* 29: 67-81 (1982).
- Kaneshige, M., Shepherd, J.E., *Detonation Database*, Technical Report FM97-8, GALCIT, (1997).
- Soloukhin, R. I., *Shock Waves and Detonation in Gases* 107-110, Mono Book Corp., (1966).
- Otake, K., Fujiwara, T., *Combustion Engineering* (in Japanese) 154-156, Corona Pub., (1985).