

■ 原著論文 / ORIGINAL PAPER ■

流路直交型副室を用いたフレームジェットの火炎加速およびデトネーション遷移距離に及ぼす影響

Effects of Transversely Flame Jetting into Channel from Sub-chambers on Flame Accelerations and Detonation Transition Distances

前田 慎市^{1*}・青島 亮太¹・黒澤 哲朗²・市川 昌紀³・小原 哲郎¹MAEDA, Shinichi^{1*}, AOSHIMA, Ryota¹, KUROSAWA, Tetsuro², ICHIKAWA, Akinori³, and OBARA, Tetsuro¹¹ 埼玉大学大学院理工学研究科 〒338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保 255
Saitama University, 255 Shimo-Okubo, Sakura-ku, Saitama, Saitama 338-8570, Japan² 埼玉大学工学部 〒338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保 255
Saitama University, 255 Shimo-Okubo, Sakura-ku, Saitama, Saitama 338-8570, Japan³ 東北大学大学院 流体科学研究所 〒980-8577 宮城県仙台市青葉区片平 2-1-1
Institute of Fluid Science, Tohoku University, 2-1-1 Katahira, Aoba-ku, Sendai, Miyagi 980-8577

2014 年 11 月 27 日 ; 2015 年 5 月 11 日 受理 / Received 27 November, 2014; Accepted 11 May, 2015

Abstract : Sub-chambers were used to initiate the detonation wave by injecting a flame-jet into the detonation tube. A configuration of the sub-chamber was divided into five types by changing the number of sub-chambers and the directions of flame injection. The detonation tube had a cross area of 50×50 mm, a length of 775 mm and equipped a window section for a visualization of the flowfield. The test gas was a stoichiometric premixed gas of hydrogen and oxygen and the initial pressure was constant as 80 kPa. The experimental results showed that the detonation transition distance was about 60% shorter than the case of spark ignition without flame-jet. Increasing the number of sub-chambers and colliding flame-jets emanating from counter positions resulted in decreasing the detonation transition distance. Schlieren photographs showed that the flame-jets promoted the formation of leading shock wave ahead of the turbulent flame in a short distance. Pressure measurements on the end wall of the detonation tube indicated that the shock or compression waves were reflected repeatedly in the cross-section, leading to a pressure wave and flame interaction. For the flame-jet initiation using the sub-chambers, generating turbulent flow in the premixed gas was of importance to promote the detonation transition.

Key Words : Detonation Wave, Deflagration to detonation transition (DDT), Flame-Jet, Shock Wave, Sub-Chamber

1. 緒言

可燃性の予混合気体を点火した際に生じる燃焼波は、デフラグレーション波 (爆燃波) とデトネーション波 (爆轟波) の 2 種類に大別される。デフラグレーション波の伝播は既燃気体から未燃気体への熱伝導および物質拡散に支配されるため、その伝播速度は亜音速である。一方、デトネーション波が可燃性予混合気体の温度および圧力を上昇させるのは衝撃波によってなされるため、デトネーション波は常に超音速で伝播する。デトネーション波面では圧力が初期圧力の数十倍に高くなる性質があり、この特徴を工学的に利用したパルスデトネーションエンジンと呼ばれる燃焼器を

開発する研究が行われている[1]。パルスデトネーションエンジンにおいて、実用に供するようなサイズや出力を達成するには、デトネーション波を点火から短い距離で開始することが重要となる。高いエネルギーを瞬間的に予混合気体に供給し、点火とほぼ同時にデトネーション波を開始させる方法は直接開始と呼ばれており、これまでに様々な混合気における臨界起爆エネルギーの値や、その相関式がデトネーション・セル幅 (以下、セル幅と略す) を用いて整理されている[2]。デトネーション波を直接開始させるには、一般的に用いられている燃料・空気混合気に対して 1 J オーダー以上のエネルギーを高周波数で発生させる必要がある。実用的とは言い難い。一方、数 mJ オーダーの弱い点火源を用いて最初にデフラグレーション波を発生させ、これをデトネーション波へ遷移させる方法 (Deflagration to

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

Detonation Transition, 以下 DDT と略す) [3]は間接開始と呼ばれる。デフラグレーション波を発生させるには、自動車エンジン用の点火機構で十分であるが、DDT を発生させるためには有限の距離が必要となる。燃焼器を軽量化、単純化するためには DDT を点火から短時間、短距離で引き起こし、デトネーション波を間接開始させる方法を確立することが不可欠となる。DDT 過程は、点火から火炎の加速段階、および最終的なデトネーション波の発生段階の 2 つに分けられる。点火からデトネーション波への遷移距離 (以下、DDT 距離と呼ぶ) を短縮するには、火炎加速を促進することにより、デトネーション波が発生する状況を短距離で生成する必要がある。Shchelkin スパイラルコイル[4]に代表されるような障害物[5]を燃焼器内に設置した場合、DDT 距離が大幅に短縮化されることが知られている。これらの障害物は、火炎の乱流化による火炎加速の促進や、火炎加速に伴って生成される衝撃波と障害物の干渉によるホットスポットの生成といった役割を担う。しかし、燃焼器内に擾乱源を設置すると燃焼によって得られるエネルギーの一部が熱損失や運動量損失によって失われる結果となる。したがって、一度デトネーション波が発生した場合には、これら擾乱源はデトネーション波伝播の妨げになる。さらに、一般的に燃焼器壁面よりも熱容量の小さい擾乱源を冷却し、混合気の自着火を防ぐための機構を別途考えることも必要となる。

擾乱源を用いない DDT 距離の短縮化手法として、副燃焼室で発生させた燃焼ガスを主燃焼室に噴射する手法 (以下、Flame Jet: FJ と略す) がある。このようなデトネーション波の開始方法として、FJ 噴射孔の近傍で生じた渦における未燃気体・既燃気体の乱流混合によって、デトネーション波がほぼ直接的に開始される場合があり、Jet initiation [6-9]と呼ばれている。Jet initiation では、開放空間に充填された可燃性混合気に対してもデトネーション波を開始可能であるが、FJ の噴射孔径に対してセル幅を十分小さくする必要がある。一方で、Jet initiation が発生しないような状況においても、火炎加速の促進手法として FJ を利用する実験が行われている[10-13]。直管状の主燃焼器の流路方向に直交した FJ を用いた研究が主として行われており、FJ の数が 1 個[11]、複数[10,13]、さらに流路方向に分布した場合[12]といった様々な条件が試行されている。これらの実験では、火炎の自発光を高速カメラで観測[10,12]しているものもあるが、観測位置は FJ 近傍に限定されている。さらに下流の衝撃波面や燃焼波面の観測には、圧力ゲージ、およびイオンプローブやフォトダイオードを用いている。したがって FJ の下流で生成される衝撃波や燃焼波については、プローブ間の平均的な伝播速度のみが示されており、FJ の有無やその個数に影響される燃焼波の伝播挙動や燃焼波に先行する衝撃波の生成については詳細に示されていない。

本研究では、主燃焼管に対して体積が 200 分の 1 程度の小容量副室からの FJ を用い、火炎加速による DDT 距離短

縮を目的として実験を行った。対向に設置した FJ の個数を変化させ、その下流で生成される衝撃波および燃焼波の特徴について、シュリーレン法および高速度ビデオカメラを用いて可視化観測した。また、管側壁に取り付けた圧力変換器とイオンプローブ、およびすす膜法を用いた可視化観察により、FJ の個数が DDT 距離に及ぼす影響を明らかにした。

2. 実験装置および実験方法

実験に用いたデトネーション管の概略を図 1 に示す。デトネーション管は、断面が 50×50 mm の矩形管であり、流路長さは 775 mm である。デトネーション管は鉛直に設置されており、上端が閉管端、下端が開管端になっている。デトネーション管の上端部に設置された副室部 (Sub-Chamber Section) において予混合気を点火することにより、FJ をデトネーション管内に直交方向から噴射する。FJ の噴射孔は、閉管端から 25 mm 下流に位置する。FJ の生成に使用した副室断面の概略を図 2 に示す。副室は、内径 14 mm の円管の片側に自動車用点火プラグを取り付けたものであり、片側はデトネーション管の側壁に開口している。本研究では、副室の開口部に流路を絞るオリフィス等は挿入していない。点火プラグのギャップ位置から副室の開口部までの流路長さは 61 mm である。図 2 (a) に示すように、FJ はデトネーション管の管軸に対して直交する方向に噴射

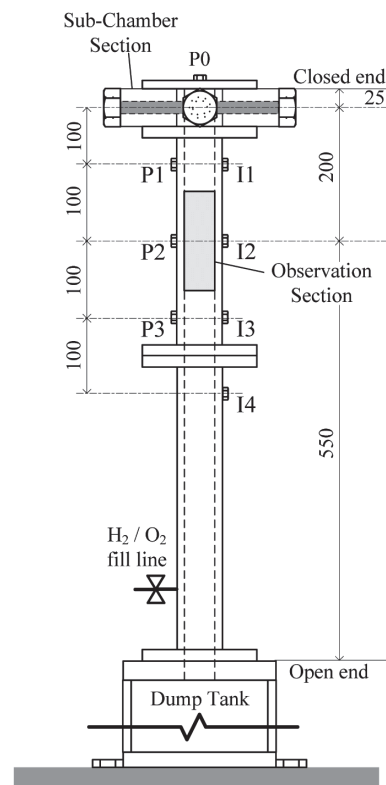


Fig.1 Schematic of experimental setup.

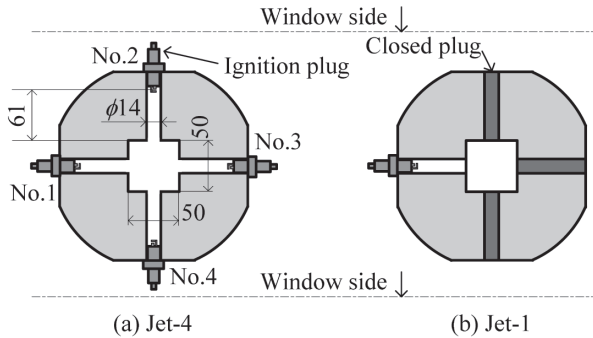


Fig.2 Schematic of cross-section of the sub-chamber (top view).

され、最大で No.1～No.4 の 4 方向から FJ を対向噴出できる。以降、この形式を Jet-4 と呼ぶ。また、各副室は開口部を閉止栓で閉じることができる。図 2 (b) に示すように、1 つの副室のみを使用する場合を Jet-1 と呼ぶ。副室の有無の影響を確認するため、No.1～No.4 の全ての副室を閉止栓で閉じ、図 1 に示す P0 の位置に圧力変換器の代わりに点火プラグを設置して点火を行った場合を Spark と呼ぶ。デトネーション管内に生成された燃焼波またはデトネーション波は管の下端に設置されている予め真空引きされたダンプタンク (Dump Tank) で消火させる。FJ の噴出孔から 200 mm 下流を中心として、長さ 166 mm の光学ガラス (BK7) を取り付けられた可視化部 (Observation Section) が設けられており、管内の可視化観察を行った。閉管端に 1 カ所 (P0)、および管側壁に 100 mm 間隔で 3 カ所 (P1～P3) にピエゾ式圧力変換器 (PCB Piezotronics, Inc., 立ち上がり時間: 1 μ s 以下) を設置し、管内の火炎加速およびデトネーション波への遷移に伴う圧力変化を計測する。また管側壁には、圧力変換器と対向するように 4 カ所 (I1～I4) にイオンプローブを設置し、火炎面の到達を検出する。圧力変換器およびイオンプローブからの出力波形をオシロスコープ (横河メータ & インストルメンツ社製, スコープコーダ, DL750P, 最高 100 MS/s, 12 bit) を用いて記録した。

管内での火炎加速およびそれに伴う衝撃波の生成の結果、デトネーション波へ遷移することが考えられる。デトネーション波への遷移位置は、圧力変換器やイオンプローブの出力からも判断できるが、その遷移位置を正確に求めるため、すす膜法による可視化を行った。管側壁の一面にすす膜を塗布した肉厚 0.5 mm のステンレス製板を固定できるようになっている。すす膜の上流端は FJ の噴射孔から 117 mm 下流の位置であり、長さは最大 600 mm である。デトネーション波がすす膜上を伝播した場合には、デトネーション波に特有のうろこ模様がすす膜上には記録されることになる。

閉管端付近で噴射された FJ の下流領域におけるデトネーション管内の衝撃波および火炎の伝播を可視化するため、シュリーレン光学系および高速度ビデオカメラ (Vision Research, Inc., Phantom V7.3) を用いた観察を行った。光源

Table 1 Experimental condition.

Mixture	Initial pressure kPa	Sub-chamber type	
		No.	Name
2H ₂ + O ₂	80	-	Spark
		1 or 3	Jet-1
		1, 3	Jet-2-Counter
		2, 3	Jet-2-Cross
		1, 2, 3	Jet-3
		1, 2, 3, 4	Jet-4

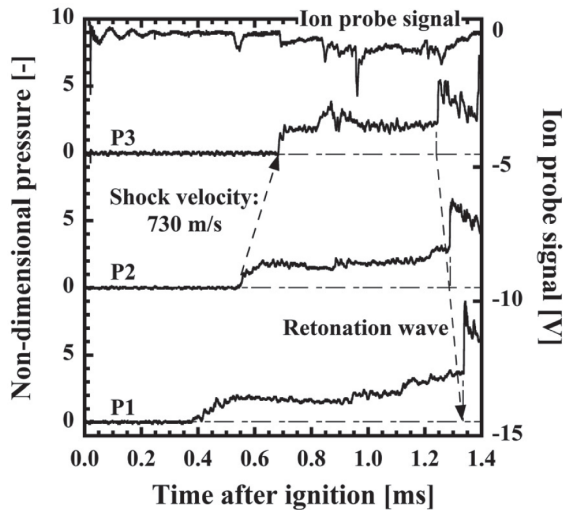
には、メタルハライドライト (住田光学ガラス, LS-M350) を用いた。

表 1 に実験条件を示す。試験気体は化学量論混合比の水素-酸素とし、副室の条件のみを変更した。副室、デトネーション管ともに水素-酸素予混合気を初期圧力 80 kPa で充填し、室温条件で実験を行った。観測領域の火炎伝播に影響を及ぼさないように、試験気体の供給部は開管端付近に設置されている。副室の条件は表 1 に示した 5 通りであり、図 2 に対応し使用する副室の番号と、以降の呼び名を記載した。Jet-2 については、FJ を対向 (counter) または直交 (cross) して噴射する場合に分けて実験を行った。また、各条件においてそれぞれ 2～5 回の複数回実験を行った。

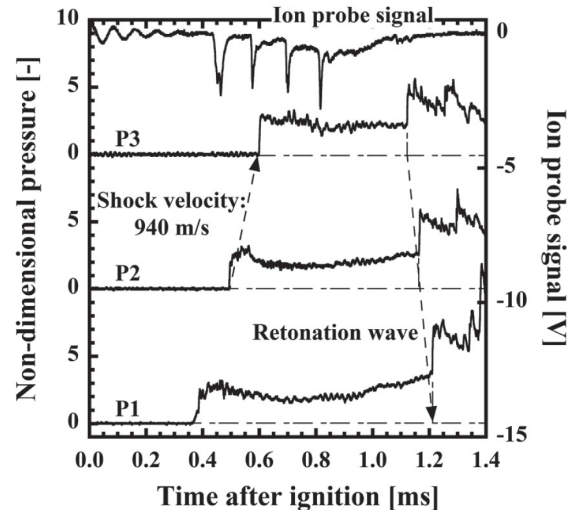
3. 実験結果および考察

3.1. デトネーション管内の圧力履歴

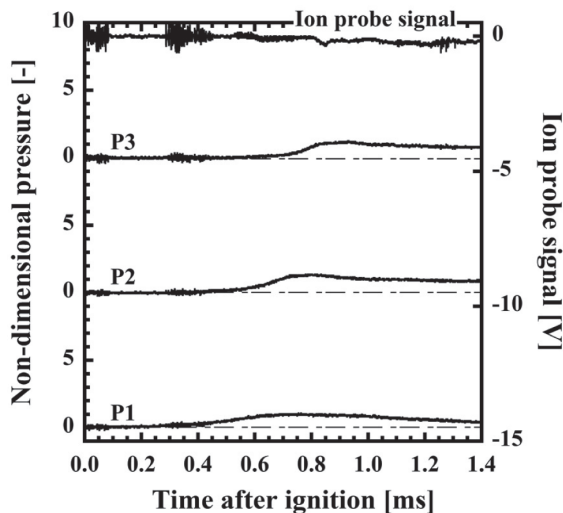
本節では、デトネーション管の側壁で計測された圧力およびイオンプローブ出力より、FJ によって生成された管内の圧力変化について議論する。図 3 (a) および (b) は、点火プラグを 1 個使用した場合であり、(a) は Jet-1 条件、(b) は Spark 条件である。横軸は、点火からの経過時間であり、縦軸は圧力を初期圧力で除した無次元圧力である。縦軸は、P2 および P3 の波形で測定孔の距離に比例して原点を移動して表示している。Spark 条件では、火炎伝播により生成される圧力波は弱く、圧力の上昇はなだらかである。またイオンプローブ波形には明確な立ち下がりが記録されていない。一方、Jet-1 条件では P2 および P3 位置で急峻な圧力の立ち上がりが見られ、衝撃波が生成されている。これらの立ち上がり時刻と P2-P3 間の距離から得られる平均伝播速度は約 730 m/s であった。これは、化学平衡計算[14]から得られる本条件での Chapman-Jouguet 速度 (以下、C-J 速度と呼ぶ) 2830 m/s より大幅に低く、またイオンプローブの立ち下がり出力との一致も見られないことから、衝撃波面と火炎面が未だ分離した状態である。しかしながら、時刻 1.2 ms 付近では下流から上流に向かって伝播する強い衝撃波が見られる。これは、P3 より下流でデトネーション波に遷移した際の衝撃波 (レトネーション波と呼ばれる) であ



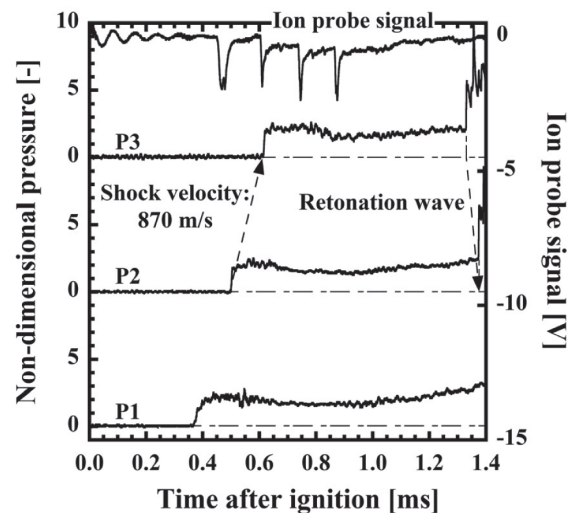
(a) Jet-1



(a) Jet-2-Counter



(b) Spark



(b) Jet-2-Cross

Fig.3 Pressure and Ion probe signal histories by using one spark plug.

Fig.4 Pressure and Ion probe signal histories by using two spark plugs.

る。

次に, 図 4 (a) および (b) は点火プラグを 2 個使用した場合であり, (a) は Jet-2-Counter 条件, (b) は Jet-2-Cross 条件である。Jet-1 と比較して, より早い段階で衝撃波が生成されていることが分かる。またイオンプローブの出力も P1 ~ P4 の 4 つで明確に見られる。衝撃波の伝播速度は (a) の Counter 条件で 940 m/s, (b) の Cross 条件で 870 m/s であった。Counter 条件の方が Cross 条件と比較して衝撃波伝播速度が 10 % 程度高いが, 全体的な圧力履歴には大きな差異は見られない。両条件共に時刻 1.2 ms ~ 1.4 ms 付近でレトネーション波が伝播していることから, 図 3 (a) と同様に計測範囲内ではデトネーション波へ遷移していない。

図 5 (a) に Jet-3 条件, 図 5 (b) に Jet-4 条件の結果を示す。両条件共に P1 で既に不連続な圧力上昇が見られ, 衝撃波が生成されている。また伝播速度も約 1000 m/s に達している。P3 では, 先行する衝撃波による圧力上昇の直後に高い圧力スパイクが見られる。これは, DDT 過程におけるデト

ネーション波の遷移時に見られる局所爆発により生じたと考えられ, 上流方向にレトネーション波が伝播している。したがって, これらの条件では P3 のすぐ下流でデトネーション波に遷移したと考えられる。

図 3 ~ 図 5 より, FJ (副室) の個数を増やすことによって, 火炎伝播に伴って生成される衝撃波が強くなることが分かる。これにより, より素早い火炎加速が達成されていると推測できる。特に Jet-1 条件と Spark 条件では, 点火プラグの個数は同じであるにもかかわらず, 副室の存在によりデトネーション管内の未燃気体に対してデトネーション遷移が短距離で生じやすい流れ場を誘起できると考えられる。イオンプローブの出力から正確な火炎の伝播速度や, 火炎面の状態を取得することは困難である。次節では, 高速度カメラを用いたシュリーレン撮影画像について議論する。

3.2. 衝撃波面および火炎面の可視化観測結果

図 6 に, 表 1 の Spark 条件から Jet-3 条件までの火炎面の

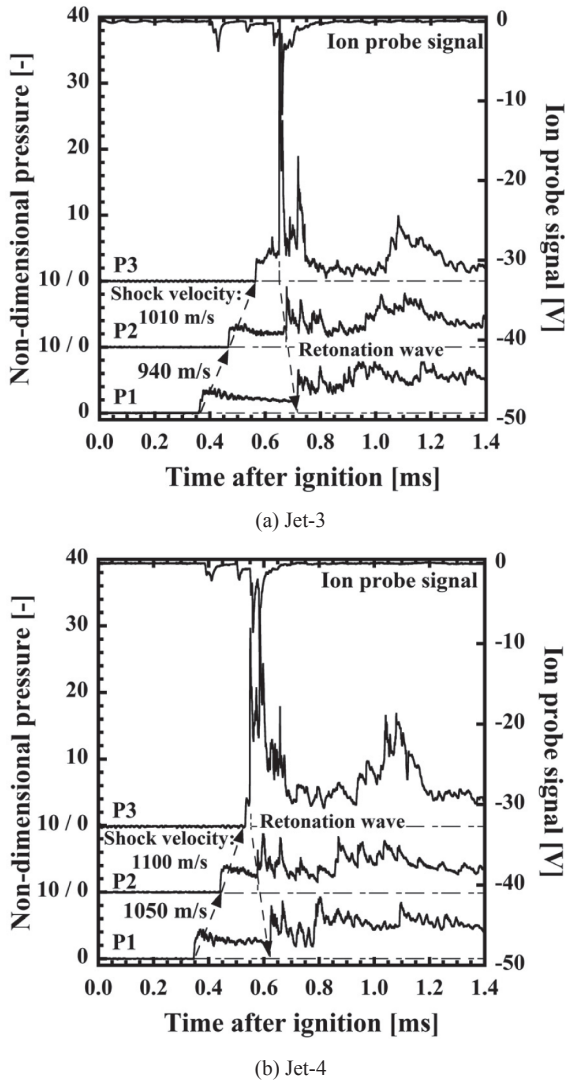


Fig.5 Pressure and Ion probe signal histories by using three or four spark plugs.

シュリーレン画像を示す。図は高速度カメラで撮影した時系列画像の 1 枚であり、火炎面がおおよそ観測窓の中心付近(図中の一点鎖線、FJ の噴出孔から 200 mm 下流)に到達した画像を抽出している。図 6 (a) の Spark 条件では、火炎表面に火炎面の不安定性に起因する皺が観察されるものの、全体的には層流火炎として伝播している。図 3 (b) で管内圧力の上昇が生じていることから、火炎伝播に伴って圧縮波が生成されていると考えられる。しかしながら、圧縮波が弱いため本実験におけるシュリーレン光学系の感度では明確には見られない。図 6 (b) および (c) の Jet-1 条件では、各画像に矢印で示した FJ の噴射方向(図 2 の No.1 または No.3)によって火炎面に偏りが見られる。FJ を噴射した側の壁面と向かい合った側の壁面に火炎面が偏っており、非対称に伝播していることから、FJ の噴射時の影響が残っていることが分かる。図 6 (b)~(f) では、火炎面に先行して衝撃波の伝播が観察されたが、これらの画像では可視化領域の外に伝播した後である。Spark 条件とは異なり、

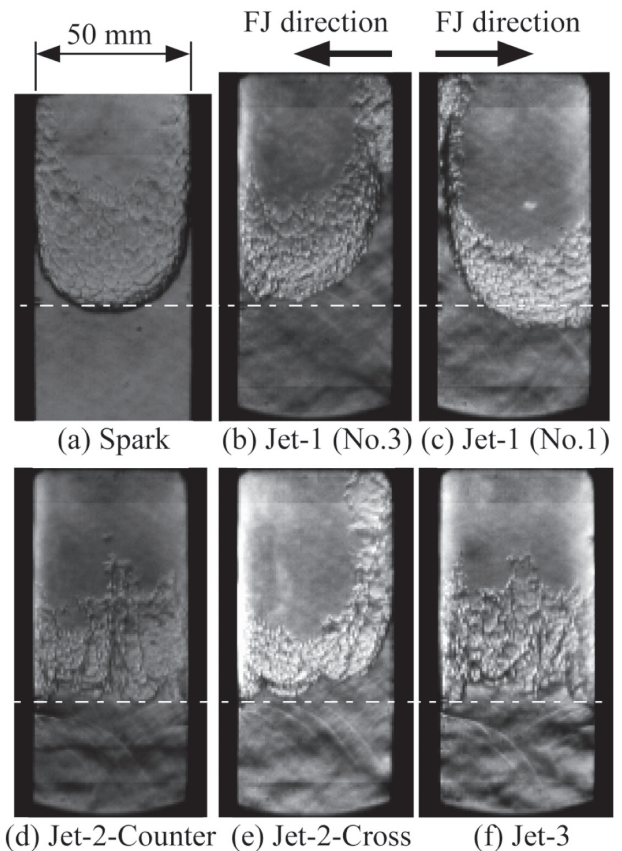


Fig.6 High-speed schlieren photograph for the various sub-chamber types.

火炎面の前方に多数の圧縮波が伝播していることが観測され、これらが集積した結果、衝撃波が形成されたと考えられる。このことは、図 3 (a)、図 4 および図 5 に示した圧力履歴とも一致する。図 6 (e) の Jet-2-Cross 条件では、図 6 (b) と同様の火炎面の偏りが見られる。本条件では、図 2 に示した No.2 および No.3 の副室を使用しているため、No.3 側の壁面と向かい合った側の壁面に火炎面が偏った影響が残っているものと考えられる。図 6 (d) および (f) の Jet-2-Counter 条件および Jet-3 条件では、火炎面は観測方向の管幅全体に渡って分布しており、またその表面には細かいスケールの火炎面の凹凸が見られる。これらは、DDT 過程の火炎加速領域において見られる典型的な乱流火炎であると考えられる。

次に、図 7 に Jet-4 条件で得られた可視化領域内を火炎が伝播する挙動を捉えた時系列シュリーレン画像を示す。各画像の時刻は図 5 (b) と同様に点火時刻を基準とした。火炎伝播に伴う圧縮波の集積により生成された衝撃波面が明確に観測される。また図 6 で示した Jet-2-Counter 条件および Jet-3 条件と同様に、観測方向の管幅全体に渡って乱流火炎が見られる。時刻 0.4410 ms 以降では、各画像に示した矢印部分において管壁付近の火炎が管中心付近の火炎に対して徐々に突出していく様子が見られる。これは、先行する衝撃波の背後で成長した境界層と火炎面の干渉によ

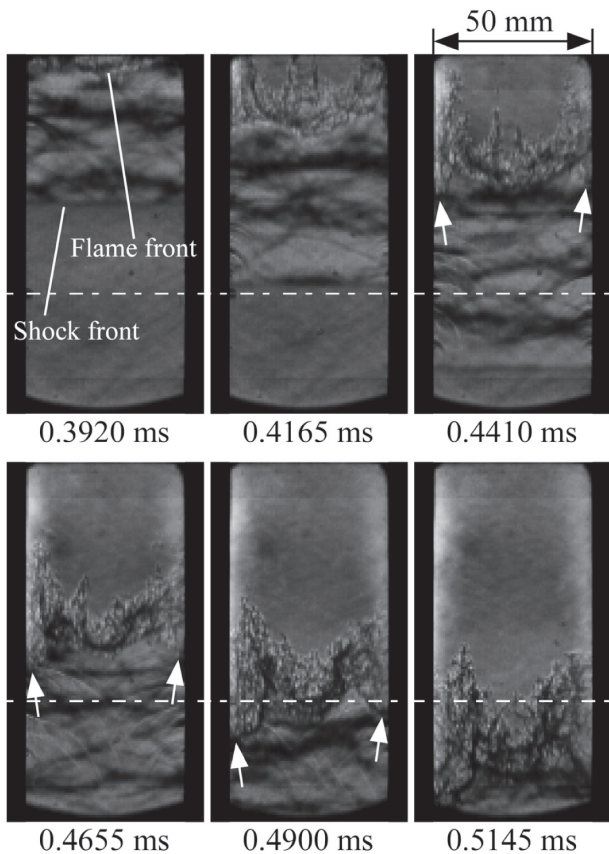


Fig.7 Temporal evolution (24.5 μ s intervals) of the flame propagation in Jet-4 condition.

り, 壁面付近で燃焼速度が高まった結果であると考えられる. このような火炎形状は, "Tulip" 形状[15]として知られ, DDT 過程における火炎加速のほぼ最終段階において見られる[3]. このことは, 図 5 (b) の管内圧力履歴において, 可視化領域のすぐ下流にある P3 付近でデトネーション波へ遷移していることとも符合する. このような "Tulip" 形状の火炎の形成は, Jet-2-Counter 条件および Jet-3 条件でも可視化領域の下流端付近において観察された.

図 7 の時系列画像から得られた, 衝撃波面および火炎面の位置の時間履歴を図 8 に示す. これらの位置は, 流路の中心線上で抽出したものである. 図より, 可視化領域の範囲内では両者の位置履歴はほぼ線形的に推移していることから, その傾きとして移動速度を計算した. 図 7 から分かるように衝撃波面はほぼ平面であり, また流路壁面に対してほぼ垂直であることから, 図 8 から計算した速度は衝撃波面の伝播速度と言え. 一方, 火炎面は細かなスケールを持った乱流火炎であるため, 図 8 から得られる速度は火炎面の局所的な伝播速度とは異なり, 流路の中心軸上を進行する火炎面の平均的な移動速度である. これは, 過去多くの研究で行われているイオンプローブやフォトダイオードを用いた火炎伝播速度の計測においても同様と考えられる. 全ての条件に対して得られた衝撃波面および火炎面の速度を図 9 に示す. 横軸は物理量ではなく, 表 1 で示した

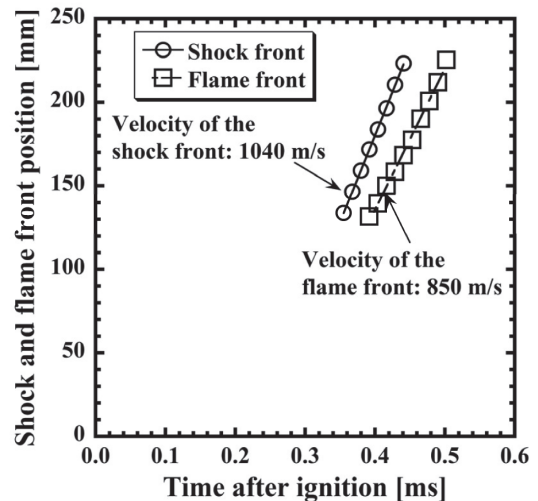


Fig.8 Temporal evolutions of the shock and flame fronts inside the visualized region.

副室の種類を表している. 図には, 化学平衡計算[14]で得られた初期充填状態の音速 (533 m/s) および定圧燃焼状態の音速 (1445 m/s) を示す. Spark 条件では火炎面のみが観測されたため, 衝撃波面の伝播速度は示されていない. 図より, ばらつきはあるものの副室の数を増やすにしたがって衝撃波面および火炎面の速度が高くなり, 未燃気体の音速を超えて伝播する傾向が得られた. 内壁が滑らかな直管内での水素-酸素混合気の DDT 過程[16]において, デトネーション波に遷移する直前の火炎面の速度は 800 m/s 程度と報告されている. また, この時の火炎面に先行する衝撃波の伝播マッハ数は一般的に 2~3 であることから, Jet-4 条件では, FJ の噴出孔から 200 mm (管幅の 4 倍) 程度下流で, 局所爆発の生じやすい流れ場が生成されていることが分かる.

副室の各条件において閉管端に設置した圧力変換器 P0 で得られた圧力履歴を図 10 (a) に示す. 縦軸は圧力変化を初期圧力で除した無次元圧力であり, 見易くするため各条件で原点を移動して表示している. 全ての圧力履歴において, 時刻 0.25~0.40 ms の間でそれ以降の時刻と比べて大きな圧力変動が観測されている. これらは, デトネーション管への FJ 噴射に伴って生成された圧縮波または衝撃波によるものと考えられる. 時刻 0.25 ms における最初の圧力上昇は, 副室内の予混合気を点火することにより生じた圧縮波が, 副室の噴射孔から回折することにより生じたと考えられる. 副室はデトネーション管の管軸に対して垂直に設置されていることから, これらの圧縮波または衝撃波はデトネーション管の断面内で反射を繰り返すため圧力変動を生成する. 図 10 (b) は, この圧力変動のピーク値における圧力比を副室の種類によって整理した結果である. 図 10 (a) から明らかなように, ばらつきはあるものの副室の数を増やすにしたがってピーク値および振動数の高い圧力変動が生じている. Jet-4 条件では初期圧力の 10 倍程度

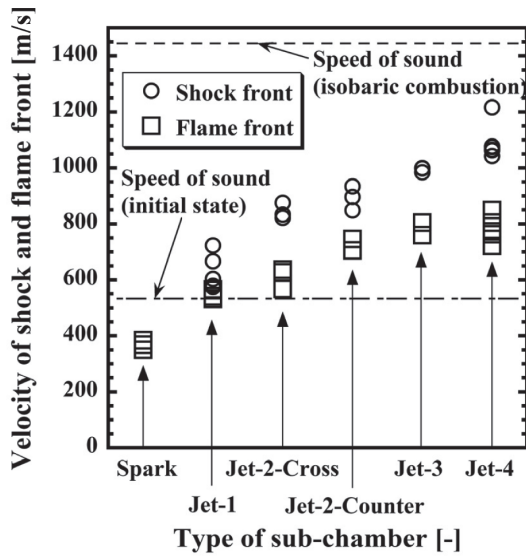


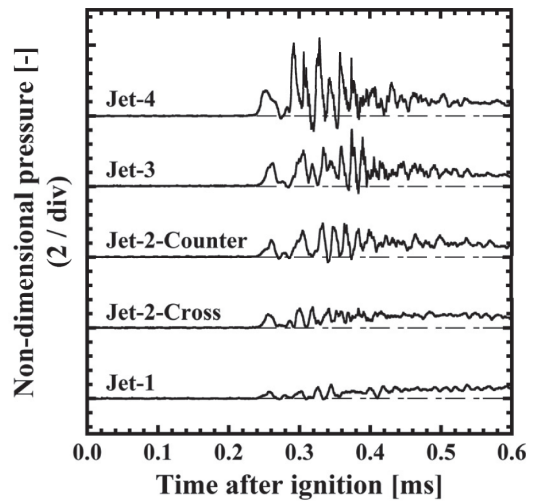
Fig.9 Averaged velocities of the shock and flame fronts inside the visualized region for the various types of sub-chamber.

のピーク値を有する圧力変動が生じている。つまり、対向する FJ によって生成される圧縮波または衝撃波の数が増加するため、それらの反射によってより強い圧力変動が生じたと考えられる。このデトネーション管断面内での衝撃波の反射は、FJ により生成された火炎面と干渉する。衝撃波と火炎の干渉では、未燃気体と既燃気体で密度の異なる界面を衝撃波が通過する。これにより、Richtmyer-Meshkov 不安定性が誘起されて火炎表面が乱れ、火炎面積が増大する。さらに、火炎表面の乱れの成長に伴い流速のすべり層が発達し、Kelvin-Helmholtz 不安定性を誘起する。混合気中を伝播する火炎は、既燃気体の膨張効果による Landau-Darrius 不安定性や物質拡散と熱拡散の大きさの違いに起因する不安定性により、本質的に不安定である。これら通常の火炎伝播で見られる不安定性に比べて、衝撃波と火炎の干渉で誘起される Richtmyer-Meshkov 不安定性や Kelvin-Helmholtz 不安定性は、乱流火炎を引き起こす効果が強い。これらの強力な不安定性は、燃焼器の周囲壁面や障害物によって誘起され、DDT 過程における火炎加速において重要な役割を果たすと考えられている[3]。代表的な DDT 距離の短縮手法である Shchelkin スパイラルコイルは、これらの不安定性を物理的な擾乱源によって促進する手法である。本実験で用いた FJ 機構では、物理的な擾乱源を用いずとも、副室が配置された閉管端近傍でこれらの不安定性が生成されていると考えられる。

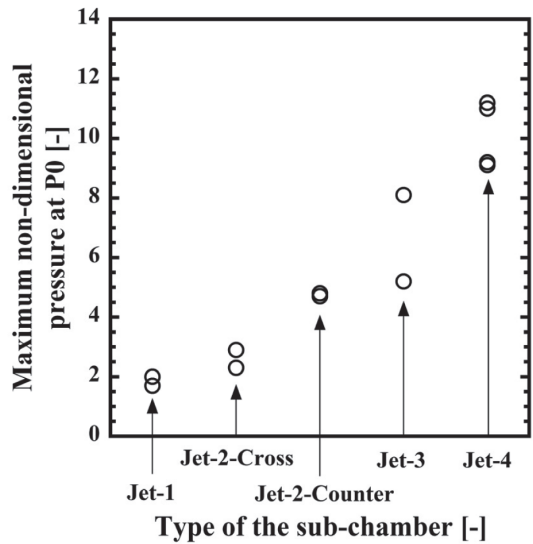
しかしながら、本実験では可視化領域内ではデトネーション波の遷移は観測されなかった。そこで次節では、すす膜法を用いて DDT 距離を計測し、副室の種類による影響について議論する。

3.3. すず膜法による DDT 距離の計測結果

Jet-4 条件で得られたすす膜の一例を図 11 に示す。デト



(a) Pressure history



(b) Maximum pressure

Fig.10 (a) Pressure histories at the closed end (P0) of the detonation tube, and (b) the maximum peak pressure of the pressure oscillation.

ネーション波の伝播を示すセル模様が観察しやすいようにモノクロ化およびコントラスト調整の画像処理を施してある。また、図には FJ の噴射孔からの距離および圧力変換器 (P2, P3) の位置も示している。本研究では、セル模様が観測された最も上流側の位置をデトネーション波への遷移位置とし、FJ 噴射孔からの距離を DDT 距離と定義した。図 11 では、DDT 距離は 432 mm と見積もられる。なお、Spark 条件では点火プラグを取り付けた閉管端 (図 1 の P0 位置) を基準として DDT 距離を定義した。また、DDT 距離がデトネーション管長さの 775 mm を超えることが予測されたため、同じ断面を有する管を接続して、長さ 1700 mm のデトネーション管として実験を行った。すす膜模様から得られた DDT 距離を副室の各条件についてまとめた結果を図 12 に示す。副室を使用しない Spark 条件では、

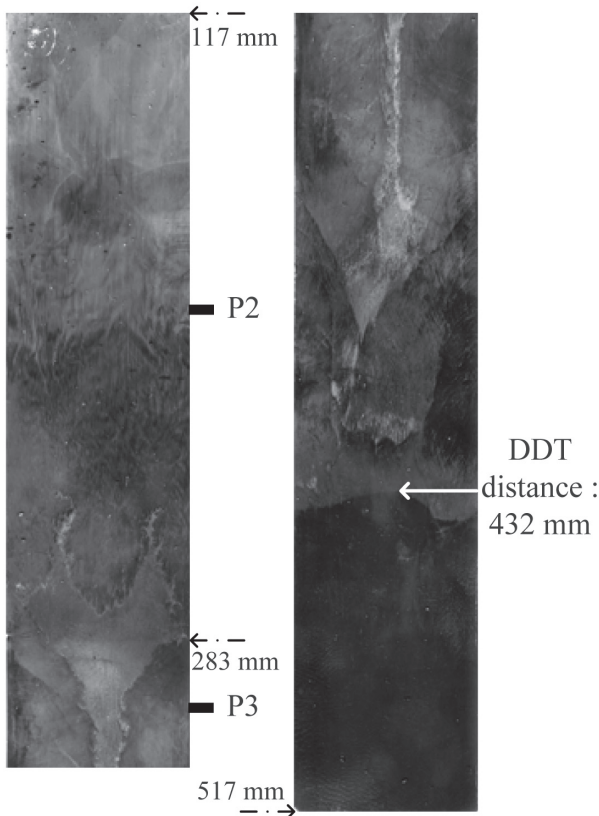


Fig.11 Typical soot foil record obtained for Jet-4 condition.

DDT 距離が 1200 mm～1400 mm であった。一方、副室からの FJ を用いた場合、DDT 距離は 400～600 mm になり、Spark 条件による DDT 距離の 50 % 以下にまで短縮されることがわかる。また、副室の個数や配置を変化させた場合の結果を比較すると、ばらつきはあるものの副室の個数が多いほど DDT 距離が短くなる傾向がある。また、2 方向から噴射した場合の DDT 距離を比較すると、FJ を対向噴射した場合の方が DDT 距離が僅かに短い傾向が得られた。

デトネーション管内に物理的な障害物を設置して DDT 距離を短縮する手法は、これまでに多くの研究が行われている。特に、単純な障害物として円管内にオリフィスプレート等を等間隔で連続的に配置した場合の、様々な混合気組成やブロックージ比における結果が参考文献[3]にまとめられている。一般的に用いられる Shchelkin スパイラルコイルのブロックージ比が 0.1～0.3 とすると、同じブロックージ比のオリフィスプレートを配置した場合、火炎が既燃気体の音速付近まで加速されるのに要する距離は 1/2～1/4 程度に短縮される。また、我々の研究グループの過去の実験[5]では、一辺 100 mm の正方形断面を有するデトネーション管にブロック状の障害物を連続的に配置した場合、水素・酸素量論混合気中における DDT 距離が、障害物が無い場合に比べて 1/4～1/5 に短縮されている。これらより、本研究で用いたデトネーション管内に Shchelkin スパイラルコイルに代表されるような障害物を設置した場合にも、同様

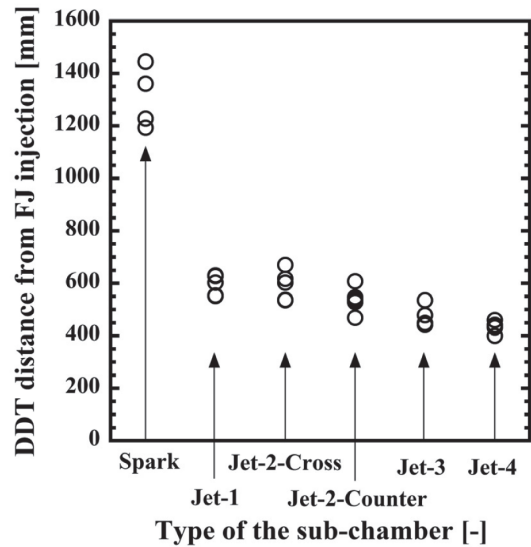


Fig.12 DDT distances for various types of sub-chamber.

の DDT 距離の短縮率が得られると考えられる。本研究の FJ (Jet-4 条件) では、障害物を用いた場合と同程度の DDT 距離の短縮率が得られたと言える。

また参考文献[3]では、火炎がほぼ一次元的に伝播している際の管断面内の質量バランス、乱流燃焼速度の関係式、火炎位置における境界層厚さの関係式を用いて、滑らかな管内において点火から層流火炎が伝播し、火炎が既燃気体の音速まで加速されるのに要する距離 X_s についてシンプルなモデルが示されている。

$$\frac{X_s}{D} = \frac{\gamma}{C} \left[\frac{1}{\kappa} \ln \left(\gamma \frac{D}{h} \right) + K \right] \quad (1)$$

ここで κ , K , C は混合気組成に依らない定数で、経験的に $\kappa = 0.4$, $K = 5.5$, $C = 0.2$ とされている。 D/h は管直径 D と壁面粗さ h の比であり、ブロックージ比 BR を用いて

$$\frac{D}{h} = \frac{2}{1 - (1 - BR)^{0.5}} \quad (2)$$

と表せる。また、

$$\gamma = \frac{\Delta}{D} = \left[\frac{a_p}{\eta(\sigma - 1)^2 S_L} \left(\frac{\delta}{D} \right)^{1/3} \right]^{1/(2m+7/3)} \quad (3)$$

であり、火炎位置における境界層厚さ Δ と管直径の比を表している。ここで、 a_p は既燃気体の音速、 σ は未燃気体と既燃気体の密度比、 S_L は層流燃焼速度、 δ は層流火炎厚さ、 η および m は定数であり、経験的に $\eta = 2.1$, $m = -0.18$ とされている。モデルの適用範囲は $BR \leq 0.1$ であり、 X_s の予測精度は $\pm 25\%$ とされている。計算にあたっては、管直径 D を本研究で用いた矩形管の水力直径 (一辺の長さ 50 mm) とし、ブロックージ比 BR は文献中に滑らかな管内の結果として示されている 0.01 とした。また a_p , σ , S_L , δ は、式 (1) および (3) の経験的な定数の決定に用いられた実験

データが示されている参考文献[16]中に示された値のうち、本研究で用いた水素・酸素量論混合気、初期圧力 80 kPa で の値を使用した。モデル計算の結果、 X_S の値は 1570 mm となり、図 12 に示した Spark 条件における DDT 距離と予測精度の範囲内で概ね一致している。加えて参考文献[3]では、火炎伝播の初期状態において流れ場に乱れが存在する場合、初期の燃焼速度として層流燃焼速度にあるファクターを掛けた「実効的な燃焼速度 $S_{L,eff}$ 」を設定することで、式 (1)~(3) を用いて X_S を予測できる可能性が示されている。本研究で用いた FJ では、噴射位置付近で火炎面に乱れを誘起し、初期の燃焼速度を上昇させると考えられることから、この考え方に合致する。実効的な燃焼速度を、層流燃焼速度の 10 倍 ($S_{L,eff} = 10S_L$) と設定してモデル計算を行った結果、得られた X_S は 420 mm となった。これは、本研究の Jet-4 条件で得られた DDT 距離 400~450 mm と一致する。従って、本研究の FJ (Jet-4 条件) では、閉管端付近において Spark 条件と比べて 10 倍程度の実効的な燃焼速度が得られていると考えられる。

滑らかな管内での DDT 過程における火炎加速では、火炎に先行する衝撃波または圧縮波による未燃混合気の前圧縮と加速による境界層の生成、およびこれによる火炎面の加速と新たな圧縮波の生成、という正の相互作用[2]が働き、火炎はデトネーション波への遷移に必要な速度 (概ね既燃気体の音速) まで加速される。Spark 条件では、点火後の初期段階では比較的弱い不安定性しか生じないため、火炎加速は緩やかである。従って、火炎前方に誘起される圧縮波も弱いため、前述の正の相互作用によって最終的な火炎速度に達するにはかなりの距離を要すると考えられる。一方、FJ を用いた点火では、通常の点火プラグと比較して大きなエネルギーを主燃焼室であるデトネーション管に対して供給し、閉管端付近で管断面の広い範囲にわたって火炎面が形成される。それに加え、本実験の結果から、FJ の噴射過程で生成された圧縮波または衝撃波によって、火炎面に先行する衝撃波を早期に生成できること、および図 10 で示した圧力変動による衝撃波と火炎の干渉による乱流火炎への遷移が、火炎の加速過程を促進していると考えられる。このことは、例えば図 4 で示した圧力履歴において、衝撃波による不連続な圧力上昇以降に爆風波のような膨張部分を伴っていないこと、および図 6 (Spark 条件を除く) および図 7 において火炎面の前方に次々と圧縮波が生成されていることから分かる。これら火炎加速を促進させる効果は、図 3 において Jet-1 条件でも Spark 条件と比較して圧力履歴に大きな違いを生じる要因と考えられ、結果的に図 12 から、DDT 距離短縮に大きな効果が得られた。また、FJ の数の増加に伴い DDT 距離がさらに短縮されることから、閉管端近傍で強い圧縮波や衝撃波を生成すること、およびそれによる火炎の乱流化が DDT の促進には重要であることが明らかにされた。

4. 結言

本研究では、副室内で発生させた火炎をデトネーション管内へと噴射することにより DDT を促進させる方法に着目し実験を行った。本研究で得られた知見を以下に要約する。

- (1) 閉管端上で通常の点火 (Spark 条件) を行った場合と比較し、副室からの FJ による点火 (Jet-1 条件) を行った場合では、DDT 距離が半分程度まで短縮化された。FJ の数を増やし対向噴射した場合、さらに DDT 距離が短縮される傾向が得られ、4 方向から対向噴射した場合 (Jet-4 条件) には Spark 条件に比して DDT 距離が 1/3 程度に短縮される。
- (2) FJ を用いた場合、火炎面に先行する衝撃波および乱流火炎が噴射孔から短い距離で生成されていることが、管内の圧力計測およびシュリーレン画像による直接観測で示された。特に、Jet-4 条件では噴射位置から 200 mm 程度下流において、デトネーション波に遷移する直前の火炎速度まで加速していることが明らかにされた。
- (3) FJ を用いた場合、閉管端上において FJ の個数に応じて初期圧力の 2 倍~10 倍のピークを有する圧力変動が観測された。FJ の噴射により閉管端近傍で火炎面に先行する衝撃波が生成され、また衝撃波と火炎の相互作用により火炎の乱流化が促進された結果、DDT 距離が短縮化されたと考えられる。

謝辞

本研究を実施するにあたって、実験装置の製作に本学技術職員 吉橋照夫 氏の御助力を頂いた。ここに記して謝意を表す。

References

1. Kasahara, J., *J. Combust. Soc. Japan* (in Japanese) 55: 337-348 (2013).
2. Lee, J.H.S., *The Detonation Phenomenon*: 297-369 (2008).
3. Ciccarelli, G. and Dorofeev, S., *Prog. Energy Combust. Sci.* 34: 499-550 (2008).
4. Shchelkin, K.I. and Troshin, Ya.K., *Gasdynamics of Combustion*: 30 (1965).
5. Obara, T., Kobayashi, T. and Ohyagi, S., *Shock Waves* 22: 627-639 (2012).
6. Knystautas, R., Lee, J.H., Moen, I. and Wagner, H.G.G., *Proc. Combust. Inst.* 17: 1235-1245 (1979).
7. Mackay, D.J., Murray, S.B., Moen, I.O. and Thibault, P.A., *Proc. Combust. Inst.* 22: 1339-1353 (1988).
8. Thomas, G.O. and Jones, A., *Combust. and Flame* 120: 392-398 (2000).

9. Ishii, K. and Tanaka, T., *Shock Waves* 14: 273-281 (2005).
10. Ishii, K., Akiyoshi, T., Gonda, M., Murayama, M., *Trans. JSME (B)* (in Japanese) 73: 182-188 (2007).
11. Zhao, W., Han, Q.X. and Zhang, Q., *Combust. Explos. Shock Waves* 49: 171-177 (2013).
12. Murakami, R., Tomotsune, Y., Ishii, K., *J. JSASS* (in Japanese) 62: 129-135 (2014).
13. Kim, T.H., Obara, T., Ohyagi, S., Yoshikawa, M., *Trans. JSME (B)* (in Japanese) 70: 707-714 (2004).
14. Tanaka, K., Detonation kenkyu-kai (Eds.), *Detonation-no-netsu-ryutai-rikigaku 1 (kiso-hen) Chapter 13* (in Japanese): 267-282 (2009).
15. Salamandra, G.D., Bazhenova, T.V. and Naboko, I.M., *Proc. Combust. Inst.* 7: 851-855 (1959).
16. Kuznetsov, M., Alekseev, V., Matsukov, I. and Dorofeev, S., *Shock Waves* 14: 205-215 (2005).