

# パルスデトネーションエンジン開発における フレイムジェット着火の応用

佐藤博之<sup>†</sup>, 見目泰宏, 島田秀敏, 林 光一

青山学院大学理工学部機械創造工学科 〒229-8558 神奈川県相模原市淵野辺5-10-1

<sup>†</sup> corresponding author: sato@me.aoyama.ac.jp

2004年5月10日 受付 2004年7月23日 受理

## 要旨

本研究ではフレイムジェット着火(Flame jet ignition, FJI)と呼ばれる着火方法をPDEに応用することによって、DDT時間の短縮や希薄燃焼による比推力の増加を試みた。予混合気を用いたシングルサイクル実験により、理論混合量論比の条件においては、FJIによってDDT時間が約2ms短縮されることが示された。また、当量比をパラメータとして行った実験の結果から、FJIによって希薄混合気の場合、比推力が15%程度上昇するという結果が得られた。さらに、作動周波数16Hz以下での連続サイクル実験に成功し、この時もFJIを用いることによって燃焼に要する時間が短縮されることがわかった。

## 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利用して推進力を生み出す推進システムであり、熱効率や経済性の面から注目を集め、次世代航空宇宙用推進システムとして期待されるエンジンの一つである<sup>1)</sup>。PDEの基本サイクルはFig. 1に示すように、大別して(1)吸気、(2)着火、(3)燃焼、(4)排気の4過程からなる。エンジン内に燃料および酸化剤が注入され、閉端面で着火、筒内で燃焼波はデトネーションへと遷移し、開放端より既燃混合気が排出される。これはロケットエンジン型のPDEであるが、構造はシンプルであり、多気筒での構成を考えれば、既存のシステムに劣らない性能を示すと考えられている。航空宇宙用推進エンジンの性能を考えると、熱効率、推力密度、飛行マッハ数などが重要な検討項目として挙げられるが、Fig. 2に熱効率と推力密度について、既存のシステムとPDEを比較した麻生らの結果を示す<sup>2)</sup>。PDEは高い推力密度のレベルを保ちつつ熱効率も良い(40~80%)ことが予測されている。このことから、ペイロードの増加および搭載燃料の軽減化が期待でき、次世代推進システムとして非常に有望であることが示される。

PDE開発に向けての課題としては、間欠(パルス)燃焼においても安定した推力発生・維持の必要性から、高周波数運転(間欠燃焼の高周波作動)が挙げられ、その対策としてDDT(Deflagration to Detonation Transition)時間および距離の短縮が重要であると考えられる。DDTとは火炎がデフラグレーションからデトネーションへと遷移する際の過渡現象であり、その現象のつづく時間がDDT時間である。

PDEの高サイクル運転とDDTとの関係は、DDT時間が短くなるほどサイクル周期を速くすることができるため、作動周波数の増加が可能になると考えられる。また、将来的な実用化に対しては、高効率によるコストダウンを目指して比推力の向上も求められている。比推力とは燃料消費量に対する出力の比である。Wintenbergerら<sup>3)</sup>は比推力 $I_{sp}$ に関する数値解析を行い、どのような燃料-酸化剤の種類においても、当量比が小さくなるほど $I_{sp}$ が上昇することを報告している。連続作動時においては、デトネーション管内に均一に混合気が形成されることは難しく、局所的に希薄な部分が発生することが予想される。したがって、希薄な環境においても効果的にデトネーションを発生させる技術の確立が必要である。つまり、PDEの希薄燃焼は積極

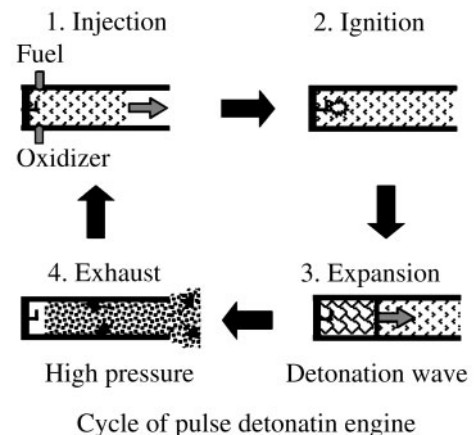


Fig. 1 Schematic diagram of PDE cycle.

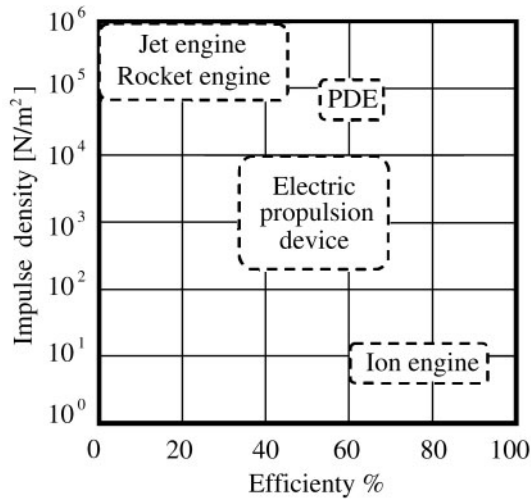


Fig. 2 Impulse densities and heat efficiencies of typical propulsion devices. (Ref. Shigeru Aso and Takatoshi Fujiwara, Proc. of the 33rd Fluid Dynamics Conf., 2001)

的に取り組むべき課題であるといえる。

そこで本研究では、DDT時間の短縮と比推力の増加を目的として、PDE点火システムに関してフレイムジェット着火(Flame Jet Ignition, FJI)を応用し、その効果について詳細に調べた。FJIとは、副燃焼室(キャビティ)の小孔より主燃焼室にジェット火炎を噴出して点火する方法であり、内燃機関において燃焼効率や燃焼速度を高める効果があることが報告されている<sup>4)</sup>。水素および空気を使用した気体燃料PDE実験装置を構築し、DDT時間および比推力に対して、PDEの着火方法として一般に用いられているスパークプラグ着火(Conventional Spark Ignition, CSI)とFJIによる結果について比較・検討を行い、FJIシステムの特長および当量比の影響を明らかにした。

## 2. 実験装置および方法

試作開発したPDE装置の概略をFig. 3に示す。PDE装置はデトネーション管、噴射装置、着火装置、ダンクタンクから構成されており、デトネーション管は全長702mm、内部断面は40×40mmの正方形であり、DDTを促進させるための長さ500mmのスパイラル(乱流混合効果による燃料-酸化剤の混合促進が目的)が挿入されている。管内の燃焼状態およびDDT時間は、複数の圧力センサ(PCB製; 113A)により計測された圧力履歴から解析された。圧力センサからの信号はアンプ(PCB製; 422E)を介し、デジタルオシロスコープ(LeCroy製; 9384)に記録される。計測システムおよびインジェクタ(電磁弁)の制御は、LabVIEW(National Instruments社製)によるプログラムを作成して行われた。

燃料および酸化剤は水素-空気が用いられ、自動車用インジェクタおよび電磁弁より噴射された。着火装置には自動車用のスパークプラグおよびイグニッションコイルを用い、その取り付け位置はCSI, FJIともにデトネーション管の閉塞端とした。副室(キャビティ)は閉塞端に取り付けられ、

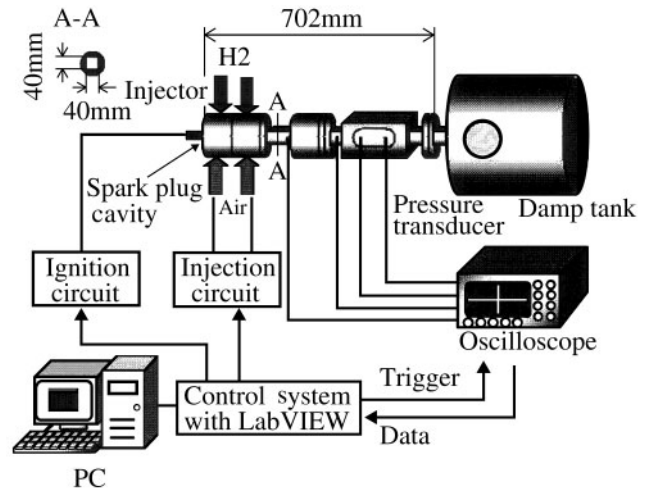


Fig. 3 Experimental setup and measurement system.

その最適形状を調べるために容積を変えられる仕様(容積 $V_C = 5 \sim 12.5 \text{cc}$ , ノズル径 $\Phi_N = 3, 4, 6 \text{mm}$ )となっている。

予混合気を用いたシングルサイクル実験では、ダンクタンク入り口において隔膜で仕切られたデトネーション管内を任意の当量比混合ガスで満たされる。初期圧力は全て0.1MPaとした。連続サイクル実験では、水素および空気はインジェクタおよび電磁弁によって管内に直接噴射され、その直後に着火される。噴射と着火のタイミングはLabVIEWで作成されたデジタル信号生成プログラムによって制御された。

## 3. 結果および考察

### 3.1 DDT時間への影響

PDEの構想はデトネーションを利用した連続運転であることから、如何に短い時間および距離においてデトネーションを形成するか(DDT問題)が重要な課題といえる。具体的なシステム構想としては、多気筒化による高周波数運転の機構が提案されているが、将来的に多気筒のシステムを組むにしても、単気筒でのデトナビリティ(デトネーションへの遷移のし易さ)性能向上を図ることは、必要不可欠な要素技術であるといえる。

ここでは、シングルサイクル実験で得られる各センサ位置における圧力履歴の結果を基にDDT問題について議論する。Fig. 4およびFig. 5は、当量比 $\phi = 1.0$ の水素-空気シングルサイクル実験において、CSIとFJIの圧力波形立ち上がりを比較したものである。ここで、時刻0は着火時刻(スパークプラグの放電)を表し、FJIの結果はキャビティ形状 $\Phi_N = 4 \text{mm}$ ,  $V_C = 1.75 \text{cc}$ の結果である。また、圧力センサは閉塞端よりそれぞれ、 $x = 238, 447, 527, 587 \text{mm}$ の4個所に設置されている。まず、 $x = 238 \text{mm}$ の結果を比較すると、CSI, FJIともに着火後数ミリ秒において、衝撃波による急激な圧力上昇が確認される。ここで、デトネーション形成の定義を「圧力波形の急激な立ち上がりおよび各センサの

示す最高圧力値がほぼ一定であること」とすると、デトネーションが発生した時刻、つまりDDT時間に着目した場合、CSIでは着火から約3.2ms ( $x=447\text{mm}$ の結果を参照)を要していることがわかる。一方、FJIでは約1.1ms ( $x=447\text{mm}$ の結果を参照)と推測される。これらの結果において、FJIを着火方法にすることによってDDT時間が約2ms短縮させることに成功したことから、FJIはDDT時間短縮に有効な方法であることが実験的に明らかにされた。

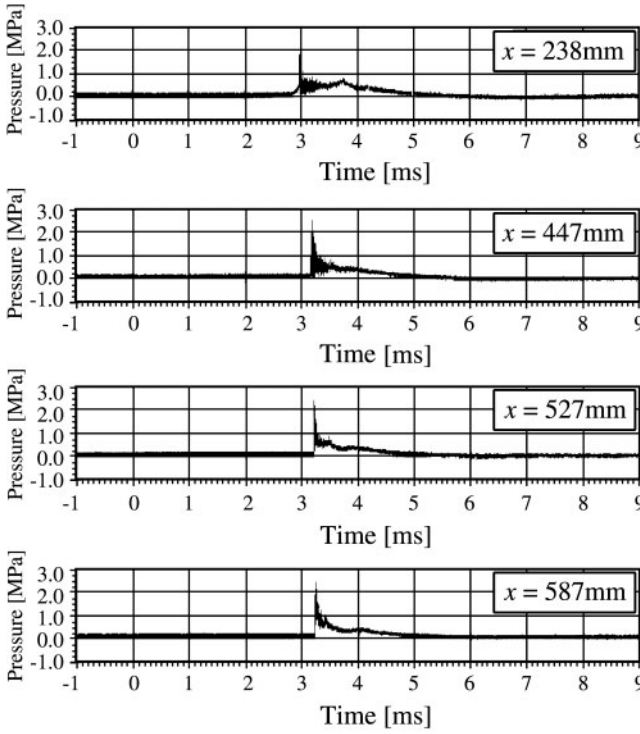


Fig. 4 Pressure history at various positions (CSI,  $\phi=1.0$ ).

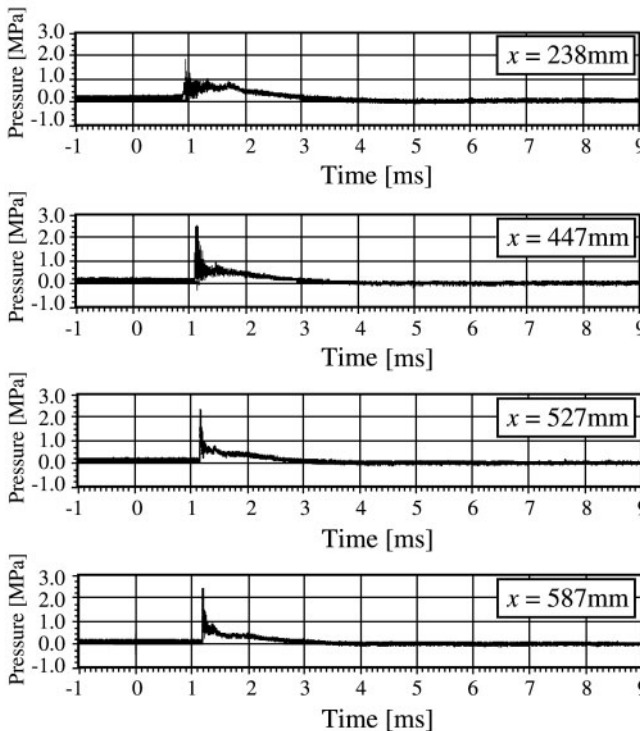


Fig. 5 Pressure history at various positions (FJI,  $\phi=1.0$ ).

なお、FJIの効果に関する見識については、3.4項にて総括して議論する。

### 3.2 キャビティ形状の最適化

CSIとFJIの圧力波形の結果から、FJIはDDT時間短縮に効果があることが明らかになった。そこで、キャビティ形状の最適化を図るために、ノズル径 $\Phi_N=3, 4, 6\text{mm}$ 、容積 $V_C=5\sim 12.5\text{cc}$ の各条件においてDDT時間の計測を行った。ここで、キャビティ形状は長さ $L$ 、直径 $D$ 、ノズル径 $\Phi_N$ をパラメータとした。また、Fig. 4およびFig. 5の結果より、DDT距離は圧力センサ#1と#2、すなわち $x=238\text{mm}$ と $x=447\text{mm}$ の間であると予想されたため、DDT時間の計測は圧力センサ#2 ( $x=447\text{mm}$ )におけるデータを用いて統一した。

Fig. 6は、キャビティ形状のパラメータである $L, D, \Phi_N$ の全てを含んだ無次元量 $L \cdot D \cdot \Phi_N^{-2}$ を用いて、各副室形状に対するDDT時間の挙動を示したものである。ここで、無次元量 $L \cdot D \cdot \Phi_N^{-2}$ の意味を考えると、副室形状の横断面積( $L \cdot D$ )とオリフィス断面積( $\Phi_N^2$ )の比と考えることができる。同図の結果から、DDT時間に対するキャビティ形状の影響に関して、無次元量 $L \cdot D \cdot \Phi_N^{-2}$ でうまく整理できて、かつ $L \cdot D \cdot \Phi_N^{-2} \approx 10$ 付近に最適条件があることがわかる。そこで、 $L \cdot \Phi_N^{-1} = 5$ および、 $L \cdot D \cdot \Phi_N^{-2} = 10$ を仮定すると、 $D=10\text{mm}$ の場合、 $\Phi_N=5\text{mm}$ および $L=25\text{mm}$ となり、本実験装置における主燃焼室の一辺 $40\text{mm}$ の立方体容積 $V (=64\text{cc})$ に対して、上記形状パラメータ ( $\Phi_N=5, D=10, L=25$ )の容積 $V_C$ は約3.3%と推算される。これらの結果から、FJI設計のための指標としては、 $(V_C \cdot V^{-1}) \times 100 = 0.8 \sim 20\%$ の範囲において $L \cdot D \cdot \Phi_N^{-2}$ のパラメータによる整理が有効であることが確認された。本研究においては、以降のFJIシステムを用いた実験では、今回用いたスペックの中でDDT時間短縮に最も効果が認められた $\Phi_N=4\text{mm}$ 、 $D=10\text{mm}$ 、 $L=20\text{mm}$ のキャビティを用いることとした<sup>9)</sup>。

### 3.3 希薄燃焼時の挙動

PDEの連続運転時における燃料-酸化剤の不完全な混合および燃焼効率、環境への対策などを考えると、希薄燃焼

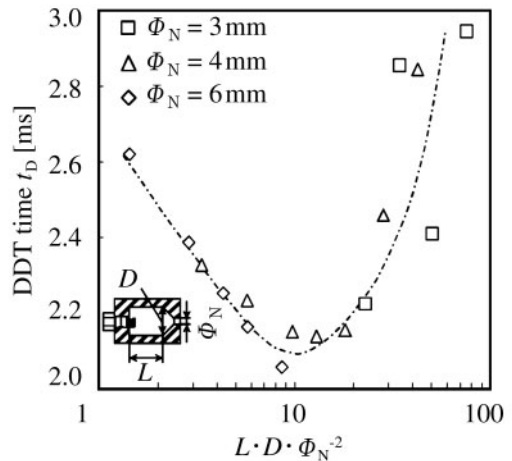


Fig. 6 Optimization of cavity parameters.

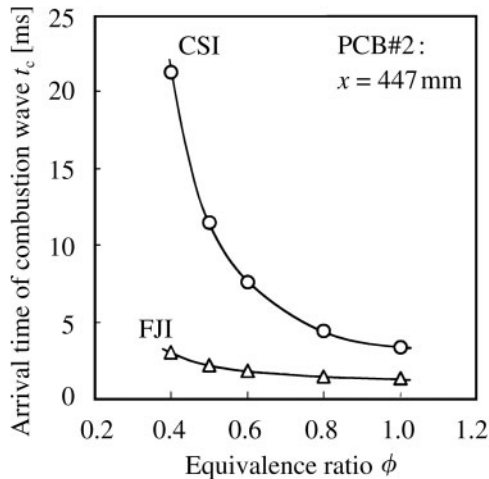


Fig. 7 Effect of equivalence ratio on the arrival time of combustion wave.

時の挙動を把握することは重要である。そこで、燃料-酸化剤の噴射割合を変えることにより、燃焼室に満たされる混合ガスの当量比をパラメータとして、燃焼波の到達時間、伝播速度および比推力について調べた。

Fig. 7はシングルサイクル実験における、当量比に対する燃焼波到達時間の影響を調べた結果である。ここで燃焼波到達時間は、着火時刻( $t=0$ )から $x=447$  mmに設置された圧力センサ#2を燃焼波が通過するのに要する時間( $t_c$ )で定義した。同図の結果からCSI方式およびFJI方式ともに、当量比の減少(燃料の希薄化)とともに燃焼波到達時間が増加する傾向が見られた。CSI方式の場合、燃料が希薄になるにしたがって燃焼波到達時間が大幅に増加し、 $\phi=0.4$ においては $t_c=22.0$  msにまで増大した。一方、FJIでは当量比の減少に対して燃焼波到達時間の増加は緩やかであり、 $\phi=0.4$ においても2.8 msにとどまる結果となった。これらの結果は、FJI方式が希薄混合気中においても燃焼波到達時間の短縮に十分な効果を持ち、特に希薄な条件であるほどFJIの効果が顕著に現れることを示している。つまり、DDT問題の解決策として希薄な条件下ではFJI方式が非常に有効的であるといえる。

PDEの実用化を考えた場合、FJI方式が着火システムとして有効であることが示唆されても、デトネーションの形成が高い推力性能を引き出す技術的なポイントであるといえる。そこで、燃焼波の伝播速度について解析した結果をFig. 8に示す。同図は、各当量比に対して燃焼波の伝播速度の最大を比較した結果を表し、Schultzら<sup>6)</sup>による数値計算の結果も参照してある。 $\phi=1.0$ では実験結果と計算結果が一致しているが、 $\phi=0.8$ 以下では実験値が計算値を下回るため、燃焼波が完全にデトネーションに遷移していないと考えられる。また、当量比の減少にともない、実験値と計算値の差が大きくなる傾向にある。これは、実験では当量比が減少するに従い、デトネーションのセルサイズが大きくなるのが原因の一つとして考えられる。伝播速度に関し

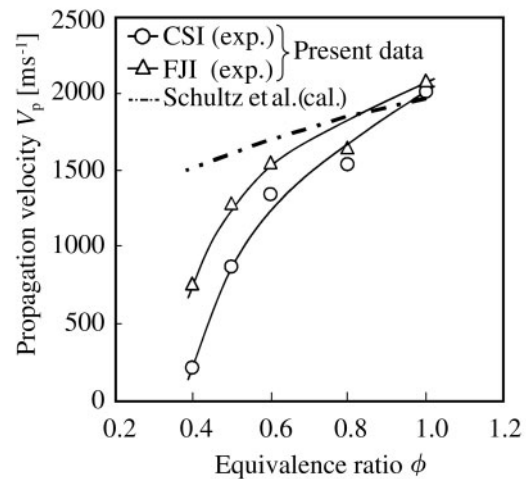


Fig. 8 Effect of equivalence ratio on propagation velocity.

て各着火方法を比較してみると、FJI方式はCSI方式のどの条件に対しても伝播速度が速い結果となっており、FJI方式は希薄混合気において、CSI方式よりも大きな伝播速度を持つ燃焼波が発生することが確認された。これは、FJIがジェット火炎によって着火に必要なエネルギー源を着火に有効な範囲に放出した結果であると考えられる。CSI方式では燃料の種類によって火炎伝播速度が決まってしまうことから伝播速度の制御が難しいといえるが、FJI方式では、いわゆるCSI方式の多点着火システムと考えることができ、ジェットの運動量および着火のためのエネルギーを制御することによって、DDT問題へのブレイクスルーが可能である。

各当量比における比推力の算出結果をFig. 9に示す。比推力 $I_{sp}$ は、以下の式によって求めることができる。

$$I_{sp} = A \int_0^t \frac{\Delta P}{m_f g} dt \quad (1)$$

ここで、 $A$ はデトネーション管の断面積、 $\Delta P$ は推力として作用する圧力と大気圧の差、 $m_f$ は消費された燃料の質量、 $g$ は重力加速度、積分範囲の0と $t$ はそれぞれ着火時刻と推力が作用した時間である。

Fig. 9において比較のため、Shauerら<sup>7)</sup>の実験結果およびWintenbergerら<sup>3)</sup>の数値解析による結果を示した。なお、Shauerらの実験は一般的なスパークプラグによる着火(CSI方式)を用いている。まず、CSI方式とFJI方式の比較を行うと、当量比が減少するに従い比推力の差が顕著になるが、特にFJI方式の場合、 $\phi=0.6$ より希薄な条件においては一定になる傾向が見られた。CSI方式とFJI方式の比推力結果を比較すると、 $\phi=1.0$ 付近では両者の値はほぼ一致しているが、希薄当量比の条件においてはFJIの比推力がCSIを上回った。 $\phi=0.6$ におけるそれぞれの比推力は5200 sおよび5990 sであり、FJIを用いることによって比推力が15%程度増加したことになる。すなわち、FJI方式はCSI方式に比べ比推力増加が見込めることが明らかにされた。

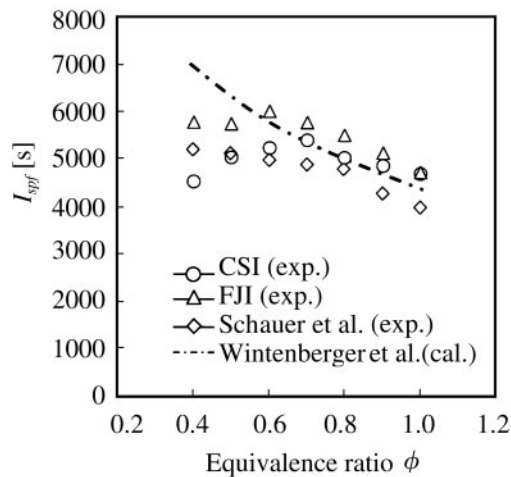


Fig. 9 Specific impulse for various equivalence ratios.

今回の結果を他の研究データと比較すると、図中 $\phi=1.0$ 付近では実験結果と数値解析で報告されていた比推力の結果がほぼ一致することが確認された。しかし、数値解析結果においては、希薄な当量比条件において比推力が増加する傾向を示しているのに対し、今回の実験結果ではCSI方式、FJI方式ともに $\phi=0.6\sim 0.7$ 付近で比推力が最大となり、さらに希薄な範囲では減少する傾向にあることがわかる。この理由については、今回の実験では、希薄当量比の条件において完全にデトネーションに遷移した燃焼波が形成されなかったため、圧力の高い燃焼ガスの伝播が得られず、比推力が減少するという結果になったものと考えられる。

### 3.4 FJIの効果

これまでにCSI方式とFJI方式の性能比較に関して実験結果に基づき議論してきたが、DDT問題へのプレイクルーに対してFJI方式が有効であることが示された。ここでは、FJIの効果について総括的な議論を行う。

FJI方式を内燃機関に応用するための基礎研究としては、鬼頭ら<sup>8), 9)</sup>、村瀬ら<sup>10), 11)</sup>によって行われており、希薄混合気の安定した点火と燃焼の促進に有効であることが報告されている。これまでの報告および本実験結果を加味してFJIの効果を考察すると、以下の様にまとめることができる。FJIが点火と燃焼促進に有効な理由としては、ジェット火炎による燃焼面積の増加、燃焼時間の速さ、およびジェット運動量による燃料ガス-酸化剤の流体力学的な混合の促進が考えられる。今回の結果においては、ジェット火炎による燃焼面積の増加によって燃焼が促進されて、希薄混合気中においても燃焼波が速やかに伝播したのと考えられる。ジェット火炎による燃焼面積増加の効果に関しては、主燃焼室に対して数パーセント程度の容量しか持たないキャビティ内で混合気が着火することにより、キャビティ内は燃焼に伴う急速なガス膨張のため高圧力状態になり、主燃焼室との圧力比により火炎ジェットがノズルから高速噴出

される。この時、既燃ガスと未燃ガスの混合気が噴出されると考えられ、ある領域においては火炎面を伴う火炎ジェット(既燃ガス)、その領域より先が未燃ガスジェットで構成されることが予想される。主燃焼室に噴出した火炎ジェットは、CSI方式の着火による静的な火炎伝播に比べ流動を伴うため、火炎表面が乱れて燃焼面積増大につながると考えられる。また、流体力学的な効果については、キャビティからの高速ジェットの噴出により、主燃焼室のガスとジェットとの間にせん断乱れが生じ、その結果として混合促進が図られたと考えられる。

### 3.5 連続運転

シングルサイクル実験におけるFJIシステムの結果(形状の最適化, Fig. 6参照)を用いて、運転周波数10, 16および20Hz(各々20サイクル)の連続サイクル実験を試みた。なお、連続運転時におけるダンプタンク内の初期圧力は1atmであり、動作中の外部への排気は行っていない。20サイクルの連続運転時において、燃焼室(デトネーション管)に取り付けられたゲージ圧力計は最大1atm以下の圧力上昇を示したことから、ダンプタンク内の圧力上昇も同程度と予想される。連続サイクル運転のサイクル再現性については、10および16Hz、20サイクルの条件において、圧力波形の時系列データより作動周波数に応じた圧力スパイクを確認できたが、20Hz、20サイクルの条件では、サイクルの途中で圧力スパイクが確認できなくなり、安定した連続運転ができなかった。以上のことから、連続運転においては10および16Hz(20サイクル)の結果を基に議論する。

連続運転時における解析を行うにあたり、燃焼波の伝播過程についてシングルサイクル実験と連続サイクル実験(各周波数で10サイクル目の結果を代表)の比較をFig. 10に示す。各圧力センサを燃焼波が通過した時刻をプロットしたものであり、当量比の条件は全て $\phi=1.0$ である。10および16Hzの連続サイクル実験では、シングルサイクル実験に比べて燃焼波の伝播する時間が長くなっていることがわかる。

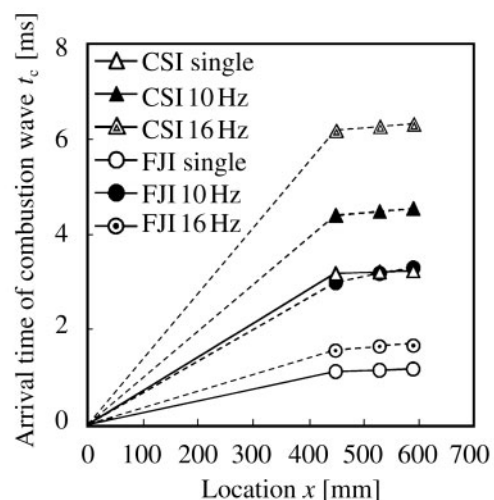


Fig. 10 Arrival time of combustion wave at multi-cycle operating conditions.

これはガスの混合が不十分であることが原因の一つであると考えられる。また、シングルサイクル実験と連続サイクル実験各々の条件に対してCSIとFJIの結果を比較すると、全ての条件においてFJIの方が短時間の内に燃焼波がデトネーション管内を伝播していることがわかる。この結果から、16Hzまでの連続作動時においては、FJIが燃焼波到達時間の短縮に効果があることを示すことができた。シングルサイクル実験では予混合気を用いた理想的な条件であるため、400~500mmの地点でCJデトネーション速度の $2000\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ に達しているが、連続作動時は混合が不十分であるため燃焼波がデトネーションに遷移せず、CJ速度を下回る結果となった。これらの結果から、連続作動時における気体の混合については、噴射圧力や噴射量を変化させるなどして、より混合を促進させる工夫が次の課題といえる。

#### 4. 結言

燃焼波到達時間の短縮(DDT問題)や希薄燃焼を目的としてFJI(ジェット着火)をPDEに応用し、その効果を実験的に検証した。水素-空気予混合気を用いて当量比をパラメータとした実験を行い、CSI(点着火)と比較することにより、FJIの効果として以下のことが示された。

- (1) FJI方式はDDT時間短縮に効果があり、最適化された条件におけるシングルサイクル実験では、DDT時間を約2ms短縮することができた。
- (2) シングルサイクル実験では、燃料希薄の条件ではデトネーションの生成に至らなかったが、FJIは燃焼波到達時間を最大19ms短縮した。
- (3) シングルサイクル実験における比推力 $I_{\text{spf}}$ は $\phi=0.6$ 付近で最大となり、この時のFJIによる $I_{\text{spf}}$ はCSIの結果を約15%上回った。
- (4) 着火方法によらず、10Hz、16Hzでは混合気が確実に着火され、安定して作動させることに成功した。ただし、混合が不完全であるため完全なデトネーションの生成には至らなかった。

- (5) 連続作動時においてもFJIは燃焼波到達時間を短縮することが明らかになった。

#### 文 献

- 1) Kailasanath, K., "A Review of Research on Pulse Detonation Engines", Proceedings of the 17th International Colloquium on the Dynamics of Explosions and Reactive Systems, 1999.
- 2) 麻生茂, 藤原隆俊, "PDE実現に向けての基礎研究にむけて", 第33回流体力学講演会講演集, pp. 15-18, 2001.
- 3) Wintemberger, E., Austin, J. M., Cooper, M., Jackson, S. and Shepherd, J., "An Analytical Model for the Impulse of a Single-cycle Pulse Detonation Engine", AIAA 2001-3811.
- 4) Hayashi, K., Matsuura, K. and Baba, S., "Performance of a Flame Jet Ignition System in a Two-stroke Engine" Advance in Combustion, SAE Paper NO. SP-1492, 2000.
- 5) 見目泰宏, 島田秀敏, 佐藤博之, 林光一, "パルスジェット着火のPDEへの適用と性能評価", 平成14年度衝撃波シンポジウム講演論文集, pp. 371-374, 2003.
- 6) Schultz, E., Wintemberger, E. and Shepherd, J., "Investigation of Deflagration to Detonation for Application to Pulse Detonation Engine Ignition Systems", Proceedings of the 16th JANNAF Propulsion Symposium, 1999.
- 7) Shauer, F., Stutrud, J. and Bradley, R., "Detonation Initiation Studies and Performance Results for Pulse Detonation Engines", AIAA 2001-1129.
- 8) 鬼頭俊平, 若井和憲, 高橋周平, 小森勝夫, "水素ジェット点火法による燃焼制御(水素-酸素火炎ジェットの効果)", 日本機械学会論文集B編, Vol. 65, No. 640, pp. 4117-4123, 1999.
- 9) 鬼頭俊平, 若井和憲, 高橋周平, 小森勝夫, "水素ジェット点火法による燃焼制御(キャビティー内における熱流束)", 日本機械学会論文集B編, Vol. 67, No. 658, pp. 1544-1548, 2001.
- 10) 村瀬英一, 小野信輔, 花田邦彦, 尹正虎, "ラジカル発光計測によるパルスジェットの点火機構", 日本機械学会論文集B編, Vol. 64, No. 617, pp. 312-319, 1998.
- 11) 村瀬英一, 小野信輔, 尹正虎, 川島久和, "パルスジェット点火におけるOHラジカル蛍光計測" 日本機械学会論文集B編, Vol. 67, No. 654, pp. 508-513, 2001.

## Application of flame jet ignition to pulse detonation engine

Hiroyuki Sato<sup>†</sup>, Yasuhiro Kenmoku, Hidetoshi Shimada, and A. Koich Hayashi

In this study, an ignition method called flame jet ignition (FJI) is applied to pulse detonation engine (PDE) for shortening DDT (deflagration to detonation transition) time and increasing specific impulse while keeping lean burn. FJI, where ignition is initiated in a cavity, is known to have effects on increasing combustion speed and combustion efficiency in internal combustion engines. For the single-cycle experiment where a premixed gas is used, DDT time is reduced in a stoichiometric mixture from 3.2ms to 1.2ms by using FJI comparing with CSI. Specific impulse is increased by 15% in lean mixtures as FJI is used. Multi-cycle tests are performed at the operational frequency less than 16Hz to find that FJI has an effect on reducing DDT time on multi-cycle operation.