パルスデトネーションエンジンのイニシエータが
デトネーション起爆と推力に及ぼす影響*八房 智 顯^{*1}, 遠 藤 琢 磨^{*2}, 滝 史 郎^{*2}Effect of Initiator Conditions on Detonation Initiation and
Impulse in Pulse-Detonation EnginesTomoaki YATSUFUSA^{*3}, Takuma ENDO and Shiro TAKI^{*3} Department of Mechanical Engineering, Tokushima University,
2-1 Minami-Josanjima, Tokushima-shi, Tokushima, 770-8506 Japan

The effects of the initiator conditions to the detonation initiation and the impulse of the pulse detonation engine were investigated. White-gasoline-air mixture in the main combustor was detonated by the initiator filled with white-gasoline-oxygen mixture. It was found that a predominant parameter to initiate the detonation of white-gasoline-air mixture in the main combustor was the overflowed white-gasoline-oxygen volume from the initiator to the main combustor. In case of the pulse detonation engine investigated, the overflowed volume of 400 cm³ was required to initiate reliably the detonation of white-gasoline-air mixture in the main combustor. It was also clarified that the loss of the impulse in the case, where the fully developed detonation was not observed in the main combustor, was caused by the exhausting of unburned white-gasoline-air mixture before it burned.

Key Words: Pulse Detonation Engine, Detonation, Shock Wave, Combustion

1. 結 言

パルスデトネーションエンジン (Pulse detonation engine: PDE) は、燃焼をデトネーションで行う内燃機関である⁽¹⁾⁽²⁾。PDE は比較的シンプルな構成であり、主に主燃焼室 (デトネーション管)、爆発性混合気の充填システム、および点火システムから構成される。パルスデトネーションエンジンは、デトネーションによって形成された高温・高圧の既燃ガスを膨張排気、もしくはタービンを駆動し、推力または回転動力を得る。デトネーションを用いた内燃機関は、デトネーションによる自己圧縮作用によって燃焼時に作動気体が圧縮されるため、ガスタービンのような定圧燃焼を用いる内燃機関に比べて高い熱効率が期待できる⁽³⁾。更に、デトネーションの自己圧縮作用のため、パルスデトネーションエンジンは燃焼前の圧縮工程を無くしても、ある程度の熱効率を維持したままサイクルが成立し、圧縮機を省いた稼働部の少ないシンプルなエンジンとすることも可能である。パルスデトネーションエ

ンジンでは、効率の低下を避けるためにデトネーションを小空間で効率的に起爆する必要があり、爆発性の強い燃料・酸素混合気を用いる⁽⁴⁾、シェルキンスパイラルなどの障害物を用いてデフラグレーション-デトネーション遷移 (Deflagration-to-Detonation Transition; DDT) の距離を短縮させる⁽⁵⁾、イニシエータを用いる⁽⁶⁾などの方法が試みられている。上述のようなデトネーション起爆法において、イニシエータによる起爆は混合気充填時に抵抗となるシェルキンスパイラルなどの障害物を主燃焼室内に設置する必要がないため、特に有望な起爆方法であると考えられる。またイニシエータを用いることで、主燃焼室内では燃料・酸素混合気の代わりに、燃料・空気混合気を用いることができるため、酸素をイニシエータのみのわずかな使用量に抑えることができる。しかし、イニシエータを用いた起爆に関する特性は十分に明らかにされていない。また、イニシエータによる混合気の起爆状態が推力に及ぼす影響についてもこれまで詳細に調べられた例は少ない。したがって、イニシエータを用いた PDE システムを構築する上で、起爆特性およびこれに関連した推力特性の解明は不可欠である。

* 原稿受付 2008 年 4 月 4 日。

^{*1} 正員、徳島大学大学院ソシオテクノサイエンス研究部
(〒770-8506 徳島市南常三島 2-1)。^{*2} 正員、広島大学大学院工学研究科 (〒739-8527 広島市鏡山 1-4-1)。

E-mail: yatsu@eco.tokushima-u.ac.jp

本研究で用いた PDE は、航空機への搭載を考えた場合に取り扱い及び貯蔵等の実用面で有利な、液体燃料・空気混合気を主燃焼室内で用いるように製作されており⁷⁾、またデトネーションの起爆には、液体燃料・酸素混合気を充填したイニシエータを使用している。また推力の測定には単パルス運転を行い、弾道振り子法によって推力を測定した。本研究では、ホワイトガソリンおよび空気を燃料・酸化剤として充填した主燃焼室を起爆するためのイニシエータについて実験結果を報告し、起爆の成否を支配する要因および、起爆状態が推力特性に及ぼす影響について議論する。

2. 実験装置および実験方法

2-1 液体燃料 PDE 実験装置の詳細 本研究で用いた液体燃料 PDE は第 1 図に示すように主燃焼室とイニシエータとからなる。主燃焼室は長さが 2250mm であり、直径は閉管端から 250mm までは 100mm、以降開放端まで 106mm である。主燃焼室への空気の供給は、予め容積が 0.77m³ の貯気タンクに大気を圧縮貯気した空気によって行われる。供給開始時のタンク圧力は 0.28MPa とした。なお、本論文で示す圧力は絶対圧力である。PDE の作動に必要な流入空気の断続は、可変速モータ駆動のロータリーバルブを用いて行った。貯気タンクから主燃焼室までの流路における最小直径は 30mm で、貯気タンク圧力 0.28MPa におけるロータリーバルブ全開時の空気の質量流量は約 0.26kg/s である。ロータリーバルブの開弁期間は全周期の 3/4、全開期間は 1/3 であり、10Hz の作動時には空気供給圧力 0.28MPa で 1 サイクル当たりの質量流量は約 14g である。

液体燃料については蒸発と混合の促進を考慮し、燃料噴射装置はロータリーバルブよりも上流の主燃焼室から 200mm の位置に設置した。主燃焼室への燃料噴射は市販自動車に用いられているガソリン直噴インジェクタ（デンソー製、Model 23209-74180）を 4 本用いて行い、作動させるインジェクタの本数を変えて燃料噴射量を調整した。インジェクタの作動には 10MPa 程度の供給燃料圧力が必要であるが、燃料はアキュムレータを用いて窒素で加圧した。(株)デンソーによって公表された資料によると、燃料供給圧力が 5–10MPa の場合、燃料液滴直径は約 18μm である。

イニシエータは内径が 30mm の円筒型で、圧力ゲージとイオンセンサを各 3 本ずつ設置した体積 190ml の詳細測定用イニシエータ (Type A) と、長さが 140–570mm で可変であり、容積にして 100–400ml の範囲で可変のイニシエータ (Type B) を製作した。詳細を図 2 に示す。イニシエータに充填する混合気は液体燃

料・酸素混合気で、主燃焼室に燃料を供給するインジェクタと同型のものが 1 本閉管端に設置してある。酸素は閉管端に向けて 60° の角度で噴射燃料に対向するよう噴射され、液体燃料との混合を促進する他、残留ガスの滞留体積を低減させた。酸素の供給は MAC 社製バルブ (Model 55B-12-PE-871BA) を用いて行われ、1 次側圧力が 0.6MPa の場合、開弁時の酸素供給質量流量は 7.3g/s である。点火は自動車用点火コイルと点火プラグとを用いて行っており、4 本の点火プラグを閉管端より 50mm の位置に設置した。

主燃焼室への燃料供給、イニシエータへの酸素と燃料の供給および点火のタイミングはロータリーバルブの回転角度に合わせて制御した。ロータリーバルブの回転角度はロータリーエンコーダによって検知され、デジタル IO ボードを通じてパーソナルコンピュータに入力される。パーソナルコンピュータは予め設定された制御用時間履歴を元に、所定のロータリーバルブ回転角度において燃料噴射・酸素噴射および点火のための信号を、デジタル IO ボードを通じて出力する。イニシエータおよび主燃焼室内の火炎および衝撃波の伝播状態は、ピエゾ式圧力ゲージとイオンセンサによって測定される。

Fig. 1 Schematics of experimental apparatus

Fig. 2 Details of Type A initiator (right) and Type B initiator (left)

2・2 推力測定方法 PDEは単パルス運転を行い、弾道振り子法によって推力を求めた。PDE本体は4本のワイヤーで懸垂され、推力は振り子の中立点からの最大振れ幅を測定することにより求めた。実験で用いたPDEはデトネーション起爆から排気終了までの時間が10ms程度であり、振り子の振動周期である約2秒に比べて十分に小さい。したがって、PDE懸垂部は瞬時に初速を得たと考えても問題はない。

PDE懸垂部は、空気・燃料供給用の配管や制御用配線などで外部と繋がっているため、懸垂部の振動は緩やかな減衰振動になる。したがって、振り子の振動が振り子の速度に比例した減衰力が働く減衰振動であるとするれば、推力 I_{cyc} と懸垂部の最大振幅 x_{max} は次のように示される。

$$I_{\text{cyc}} = m \frac{2\pi}{T} e^{\frac{\pi}{2}\zeta} x_{\text{max}} \quad (1)$$

ここで、振動周期 T と減衰係数 ζ が振幅に関わらず一定となる理想的な減衰振動系とは異なり、振り子を自由振動させた際のこれらの実測値は振幅の減衰に伴って変化した。このため T と ζ は最大振幅 x_{max} に対して三次の多項式でフィッティングし x_{max} の関数とした。懸垂部の実効質量 m は、後述のインパクトを使った方法によって決定する。以上から推力 I_{cyc} は式(1)を用いて x_{max} のみから算出することができる。なお x_{max} の測定は、懸垂部の振動をビデオ撮影して行った。

PDE懸垂部は配管や配線などで外部と繋がっているため、懸垂部の質量を正確に求めることができない。そこで既知の質量 m_{imp} 、速度 v_{imp} のインパクトを懸垂部に衝突させ、懸垂部の実効質量を求めた。インパクトと懸垂部は衝突後、これらは連結装置によって結合し、衝突直後の結合体の速度 v から実効質量が以下の式によって求められる。

$$m = m_{\text{imp}} \left(\frac{v_{\text{imp}}}{v} - 1 \right) \quad (2)$$

なお、結合体の衝突直後の速度は、結合体の減衰振動をビデオ撮影して求めた。また、実効質量は質量・速度・力積がそれぞれ8.72kg, 1.09m/s, 9.5Nsと18.1kg, 1.03m/s, 18.7Nsの2つの異なるインパクトを用い、各条件で10回繰り返し測定を行った。

実際に懸垂部がデトネーションの排気によって推力を受ける状態はインパクト質量が0になる極限と考えることができ、測定した2条件を元にインパクト質量が0の時の実効質量を外挿して求めた。実効質量の校正実験には260cm³のイニシエータを装着した状態で、 $m = 218.8\text{kg}$ が得られた。なお400cm³もしく

は100cm³のイニシエータを用いた場合には、実効質量にイニシエータの質量変化分(400cm³: +1.1kg, 100cm³: -1.3kg)を加減して用いた。

本測定法による推力測定の誤差は、予備実験時の実効質量、振動周期、減衰係数の測定精度、および本実験時の最大振幅の読取精度に因る。これらを誤差伝播法則によって評価すると、入力インパルスが4.6Nsで誤差は16.6%, 12.4Nsで6.2%, 32.7Nsで3.9%となった。測定誤差は推力が小さい場合ほど顕著になるが、これは主に最大振幅の読み取り誤差が最大振幅に対して大きくなることによるものである。

2・3 実験条件 PDE用液体燃料には、表1に諸特性を示すホワイトガソリン（コールマン（株）製）を用いた。ホワイトガソリンは添加剤を含まない粗製ナフサで、オクタン価が低く揮発性も高いためデトネーションが発生しやすいと考えられ、PDE燃料に求められる特性を有している。またホワイトガソリンの主成分である炭素数が6以上のアルカン類は、常温常圧の空気混合気のデトネーションセルサイズが50mm程度であり⁽⁸⁾、内径100–106mmの主燃焼管を伝播可能である。

図3にPDEの時間制御チャートを示す。時刻の基準はバルブが開き始める瞬間とした。バルブの開弁期間は全サイクルの72%、バルブの全開期間は29%である。同図にはロータリーバルブの回転角度に対する空気質量流量も合わせて示した。ロータリーバルブの開弁状態によって空気流量は変化するが、燃料噴射割合は一定であるため、ロータリーバルブが部分開弁で空気流量が少ない状態では燃料当量比は大きくなる。また同図中には、イニシエータの時間制御チャートも合わせて示している。イニシエータへのホワイトガソリンと酸素の噴射は噴射終了時刻を89ms、すなわちロータリーバルブ閉弁後17msに固定している。噴射開始

Table 1 Physical properties of white gasoline

Physical properties		
Composition	C _n H _{2n+2} (n=6-9)	83%
	Naphthene	12%
	Aromatic Hydrocarbon	5%
Density	690 kg/m ³	
Boiling temperature	333-413 K	
Firing temperature	243 K	
Ignition temperature	545 K	
Detonation properties (n-octane, P ₀ =0.1 MPa, T ₀ =298 K)		
CJ velocity [m/s]	1792 (w/ air, ϕ=1.0)	
	2493 (w/ O ₂ , ϕ=1.4)	
CJ pressure [MPa]	1.86 (w/ air, ϕ=1.0)	
	4.76 (w/ O ₂ , ϕ=1.4)	

時刻は実験条件によって変化させ、噴射持続時間を 29-69ms の範囲で変化させた。

図 4 に燃料および空気の流量から概算される、主燃焼室のホワイトガソリン・空気混合気当量比分布を示す。ロータリーバルブが全開状態で充填される混合気の当量比は 1.0 であるのに対し、部分開弁状態で充填される混合気の体積はおおよそ 2100cm^3 で、その平均当量比は 2.3 である。主燃焼室内の火炎測定部は閉管端から 535-985mm の区間で、この部分は当量比が 1.0 の混合気で満たされる。

3. 実験結果および考察

3・1 イニシエータ内の着火・起爆状態 イニシエータ内での着火および火炎伝播状態を調べるため図 2 に示すタイプ A のイニシエータを用いて実験を行った。実験条件を表 2 に示す。混合気のイニシエータへの噴射量は、イニシエータ体積 190cm^3 を上

Fig.3 Flow-chart of PDE operation.

PS: Start of fuel-O₂ injection into the initiator

PE: End of fuel-O₂ injection into the initiator

MS: Start of fuel injection into the main combustor

ME: End of fuel injection into the main combustor

Fig.4 Distribution of the mixture-equivalence ratio in the main combustor

回る 410cm^3 とした。イニシエータ内に充填した混合気の当量比は 1.4 である。イニシエータの起爆実験は、主燃焼室には空気を充填し、ロータリーバルブは閉じた状態で行った。点火はホワイトガソリンおよび酸素の噴射終了後 3ms で行った。

図 5 はイニシエータ内の圧力履歴と火炎到達時刻を表したものである。 P_A と P_B の圧力履歴はそれぞれ 4MPa と 2MPa ずらして表示した。圧力履歴 P_A と P_B において、火炎到達直前もしくは直後に 1MPa 程度の圧力上昇が見られるが、上昇の程度が緩やかでこの時点ではデトネーションは発生していないことがわかる。圧力履歴 P_C では、2MPa の圧力上昇の直後に火炎が到達し、その後 9MPa の急激な圧力上昇が見られる。この急激な圧力上昇はピーク圧力の違いはあるものの、行った 3 回の実験のいずれでも発生した。以上の結果から試作した小体積のイニシエータにおいても、酸素を酸化剤として用いることで、障害物などを用いることなく強い衝撃波を伴った爆発的な燃焼が発生することが明らかになった。

3・2 イニシエータ体積およびイニシエータへの燃料・酸素混合気噴射体積が主燃焼室内のデトネーション起爆に及ぼす影響

主燃焼室内のホワイトガソリン・空気混合気の起爆に、イニシエータの体積およびホワイトガソリン・酸素混合気の噴射条件が及ぼす影響について調べるため、タイプ B のイニシエータを用いて実験を行った。イニシエータ体積は 100, 260, 400cm^3 と変化させた。主燃焼室内混合気の初期条件は実験条件によらず一定で詳細を表 3 に示す。

図 6 には主燃焼室内の 535-985mm 区間の平均火炎伝

Table 2 Experimental conditions on test series of detonation initiation in initiator

Initiator volume	190cm^3
Injected mixture	White gasoline and O_2 ($\phi=1.4$)
Injected volume of O_2	410cm^3
Ignition timing	3 ms after end of injection

Fig.5 Pressure histories in initiator

播速度を示した。同区間は点火時に当量比が 1.0 のホワイトガソリン・空気混合気で充填されている。各実験条件における実験繰返し数は 3-5 回である。火炎伝播速度は、はっきりと 2 つの領域に分かれており、一方は 1000m/s 以下、他方は Chapman-Jouguet (以下 CJ) デトネーション速度と同程度である。前者はデトネーションが起爆され、後者は起爆が生じなかったと考えられる。

体積が 100cm³ のイニシエータを用いた場合、イニシエータに噴射されるホワイトガソリン・酸素混合気の体積が 288cm³ 以下では主燃焼室内でデトネーションが全く発生しなかった。イニシエータへの噴射体積が 351-476cm³ では、デトネーションが発生する場合としない場合の両方が見られた。噴射体積が 538cm³ 以上では確実にデトネーションが発生した。同様の傾向は 260cm³ と 400cm³ のイニシエータでも見られたが、デトネーション起爆には、イニシエータ体積が大きいほどイニシエータへの必要噴射体積が大きくなった。

確実にデトネーションを起爆させるためには、いずれの体積のイニシエータを用いた場合にもイニシエータ体積以上のホワイトガソリン・酸素混合気を噴射する必要がある。すなわち、主燃焼室内でデトネーションを起爆させるためにはイニシエータから主燃焼室にいくらか燃料を溢れ出させる必要がある。ホワイトガソリンおよび酸素の噴射はロータリーバルブが閉じた後も続くため、イニシエータから主燃焼室に溢れ出したホワイトガソリン・酸素混合気はイニシエータ出口付近に留まっていると考えられる。ここで溢れ量を以下のように定義する。

$$(\text{溢れ量}) = (\text{酸素の噴射体積}) - (\text{イニシエータ体積}) \quad (3)$$

図 7 は主燃焼室内の 535-985mm 区間の平均火炎伝播速

度とデトネーションの起爆成功率を溢れ量に対して示したものである。いずれの体積のイニシエータにおいても、確実に主燃焼室内でデトネーションを起爆させるためには溢れ量がおよそ 400cm³ を超える必要がある。すなわち、イニシエータ PDE で主燃焼室内のデトネーションを起爆するための支配的なパラメータは、イニシエータ体積でもイニシエータに噴射する混合気体積でもなく、イニシエータから主燃焼室内に溢れ出すホワイトガソリン・酸素混合気の体積であると言える。

図 8 は、主燃焼室閉管端から 10mm および 835mm の管壁に取り付けた圧力センサによって測定した圧力履歴と、イオンプローブによる火炎到達時刻を示したものである。横軸は点火からの時間、縦軸は閉管端からの距離および圧力を示している。閉管端から 10mm に設置した圧力センサは閉管端壁と円管壁の影響を受けるため、閉管端壁中央部にセンサを設置した場合に比べて衝撃波圧力が高く測定されると考えられる。図 8 に示した実験は、それぞれイニシエータ体積が 260cm³、酸素噴射体積が 538cm³ の同一の条件であり、

Fig.6 Flame propagation velocities in main combustor as a function of injected oxygen volume into initiator

Fig.7 Flame propagation velocities in main combustor as a function of overflowed volume

Table 3 Experimental conditions on test series of detonation initiation in main-combustor and thrust measurement

Initiator (White gasoline and O ₂)	
Initiator volume	100-400 cm ³
Equivalence ratio	1.4
Injected volume of O ₂	289-789 cm ³ /cycle
Injected mass of white gasoline	0.15-0.44 g/cycle
Main combustor (White gasoline and air)	
Supplied air mass	13.6 g/cycle
Volumetric mixture fill fraction	58%
Injected mass of white gasoline	1.19 g/cycle
Equivalence ratio	1.00 (fully opened) 1.31 (mean)

5 回の同条件での実験のうち 4 回はデトネーションが起爆され、1 回は起爆されなかった。両実験の閉管端での圧力を比較すると、閉管端に衝撃波が到達して 7MPa 以上の圧力ピークが現れた後、0.2ms 程度は圧力履歴にほとんど違いが見られない。すなわち、主燃焼室内でデトネーションが発生した場合としない場合のいずれにおいても、閉管端付近に衝撃波が到達した直後の状態はほぼ同様である。したがってデトネーションが起爆されるかどうかは、主燃焼室内に溢れ出した燃料・酸素混合気の爆発に伴う強い衝撃波がその前方に存在する燃料・空気混合気中に伝播し、衝撃波が減衰する前にデトネーションに遷移できるかどうかによる。すなわち、イニシエータから主燃焼室に溢れ出した起爆しやすい燃料・酸素混合気は、燃料・空気混合気を起爆するためのエネルギー源であると考えることができる。デトネーションを起爆するためのエネルギー量にはしきい値が存在し、それ以下ではデトネーションは起爆しない。主燃焼室内でデトネーションを発生させるために必要な燃料・酸素混合気の溢れ量にしきい値が存在するのは、起爆エネルギーにしきい値が存在するためであると考えられる。

デトネーションの起爆エネルギーは被起爆側混合気のデトネーションセルサイズとデトネーション速度からおおよその値を知ることができる⁽⁹⁾。常温・常圧におけるホワイトガソリン・空気混合気のデトネーションセルサイズは約 50mm であるので、これからデトネーションの起爆エネルギーを推算すると、平面起爆では 755kJ/m^2 、自由空間での球状デトネーションの起爆は 345kJ となる。円管内でのデトネーションの起爆は、

Fig.8 Flame and shock wave propagation in main combustor in initiation failure case(a) and detonated case(b)

理想的には平面デトネーションを起爆することと等価である。本装置は直径 100mm の円管であるので起爆に必要なエネルギーは 5.9kJ である。一方起爆に必要なホワイトガソリン・酸素混合気の溢れ量 400cm^3 のエネルギー量は 6.6kJ で、推算される値と比較的よく一致している。したがって、主燃焼室閉管端側に配置された高起爆性混合気の起爆エネルギーが臨界値に達した場合に主燃焼室内でデトネーションが起爆され、イニシエータ内に充填された高起爆性混合気のエネルギーは起爆そのものにはほとんど寄与しないと考えられる。

3.3 イニシエータ条件とデトネーションの起爆状態が推力に及ぼす影響

図 9 に推力測定で得られた結果を示す。同図に示したデータは図 6 および図 7 に示した同一の実験から得られた結果である。主燃焼室内の当量比や混合気充填率などは全ての実験を同一条件で行った。白抜きのプロット(図中・D)はデトネーションが起爆された場合、塗りつぶし(図中・N-D)は起爆されなかった場合の推力をそれぞれ示している。図中の曲線は均一希釈モデル⁽¹⁰⁾によって予測される値を示している。

均一希釈モデルでは実際の部分充填 PDE の代わりに、エネルギー的に等価な仮想の均一希釈気体で充填された PDE を解析し、性能を予測するものである。本実験で用いた PDE の性能予測を行うために、イニシエータ内の燃料・酸素混合気、主燃焼室内の燃料・空気混合気、および主燃焼室内の空気を仮想的に混合した等価均一希釈気体を考慮した。等価均一希釈気体を完全充填する仮想的な PDE は、燃焼室の長さ、および体積を実験に用いた PDE に等しくして解析を行った。

図 9 には凡例中 MD で示した 3 条件の解析結果も合わせて示した。最初の条件はイニシエータに噴射した燃料・酸素混合気、主燃焼室内に部分的に充填された燃料・空気混合気、および主燃焼室内の空気を考慮した場合であり、図上方の 3 本の曲線で示される。次はイニシエータの燃料・酸素混合気を空気で置き換え、主燃焼室内の燃料・空気混合気と空気を考慮した場合で、本条件では 19.6Ns の一定である。最後は主燃焼室内の燃料・空気混合気を空気で置き換えてイニシエータの燃料・酸素混合気の発熱のみを考慮した場合で、図下方の 3 本の曲線で示される。

図 9 の白抜きのプロットで示したデトネーションが発生した場合において、得られた推力はイニシエータの燃料・酸素混合気と主燃焼室内の燃料・空気混合気の両方を考慮した解析結果によく一致している。一方で、塗りつぶしで示したデトネーションが起爆されなかった場合には、燃料・酸素および燃料・空気混合気

を考慮した解析値よりも低い推力が得られた。溢れ量が少なくなるほど、解析値との差が大きくなる傾向が見られる。

図 10 上段には主燃焼室内の衝撃波伝播速度 U_s および衝撃波背後速度 U_p を、中段には主燃焼室閉管端から 835mm における衝撃波と火炎の到達時刻差 ΔT_{s-f} を示している。横軸は計測区間 535-985mm の平均火炎伝播速度である。衝撃波および火炎の到達時刻は 835mm の位置に設置された圧力センサとイオンプローブによって測定した。衝撃波伝播速度と衝撃波背後速度は 835mm の圧力センサで測定した衝撃波圧力から求めた。なお、

Fig.9 Variation of impulse that includes both initiation failure and detonated cases.

Fig.10 Flame propagation velocity, shock propagation velocity, shock induced velocity, arrival-time difference between leading shock wave and flame front at 835mm, and estimated burned fraction

閉管端近傍と 835mm に設置した圧力センサを用いて両センサ間の平均衝撃波伝播速度を求めることもできるが、この場合イニシエータ近傍における減衰前の高速デフラグレーション速度を含み、速度を過大評価してしまうため、835mm における衝撃波圧力から衝撃波伝播速度を求めた。ここで衝撃波面付近は圧力振動があるため、衝撃波により圧力が立ち上がってから $5\mu\text{s}$ の間の平均圧力を衝撃波圧力として用いた。なおデータのサンプリング速度は 10MS/s であるので、 $5\mu\text{s}$ 間の測定サンプル数は 50 点である。

図 10 上段には傾きが 1 の直線が引いてある。直線近傍にある衝撃波背後速度は、実験室座標系から見た火炎伝播速度と衝撃波背後速度がほぼ同程度であり、衝撃波背後速度に比べて火炎自体の伝播速度は非常に小さいことを意味する。火炎伝播速度が低い場合には多くの衝撃波背後速度 U_p が直線より上方にあり、火炎伝播速度が衝撃波背後速度より小さいことを示している。火炎が伝播速度 U_f 一定であると仮定すれば、衝撃波が 835mm に到達した時点の火炎面との距離は U_f と ΔT_{f-s} の積になり、その値は U_f が約 200m/s では 0.4m 程度、600m/s 以上では 0.1m 以下まで短くなる。 U_f が 200m/s 程度では火炎面は衝撃波と閉管端の中間付近にあることになり、閉管端からの膨張波が影響して U_f が U_p よりも小さくなったと考えられる。一方で火炎伝播速度が大きくなると、直線よりも下方の衝撃波背後速度 U_p が多く見られ、火炎伝播速度が衝撃波背後速度より大きくなっており、衝撃波背後の誘起流に乗った火炎がある程度自立伝播していることを示している。

主燃焼室内の流れ場は、衝撃波伝播速度 U_s 、衝撃波背後速度 U_p 、火炎伝播速度 U_f 、およびある点における衝撃波と火炎の到達時刻差 ΔT_{s-f} によって、そのおよそその状態を知ることができる。デトネーションが起爆されなかった場合、先行衝撃波は未燃混合気に出口方向の流れ速度を誘起する。その結果、未燃混合気は燃焼する前に主燃焼室から排出される。排出された未燃混合気は推力に寄与しないと考えられる⁽¹¹⁾。ここで、主燃焼室内で燃焼した混合気の割合を ϕ_b とすると、 ϕ_b は図 10 の上段および中段に示した値から概算することができる。ただし、これらの諸速度は主燃焼室内の全区間で一定に保たれると仮定する。以上から、 ϕ_b は次式のように示される。

$$\phi_b = 1 - \frac{U_p}{U_f} t_{\text{mext}} \quad (4)$$

$$t_{\text{mext}} = \frac{l - l_p}{U_f} - \frac{l_m - l_p}{U_s} - \frac{l - l_m}{U_p} + \Delta T_{s-f}$$

式中の l , l_p , l_m , l_{mxt} はそれぞれ主燃焼室長さ, 閉管端から衝撃波を検知する圧力センサまでの距離, 閉管端からの爆発性混合気充填距離, 未燃混合気の排出時間である。図 10 下段は算出した ϕ_B である。主燃焼室内平均火炎伝播速度が減少するに伴って燃焼割合 ϕ_B も減少する傾向が見られる。

図 11 に燃焼割合 ϕ_B に対して推力を示した。塗りつぶしのプロットはデトネーションが起爆されなかった場合を示す。白抜きで示したデトネーションが発生した場合は、燃焼割合を 1 とした。推力は ϕ_B の増加に伴って単調に増加している。すなわち、デトネーションが発生しなかった場合に推力が減少する原因の一つは、爆発性混合気が燃焼前に管外に排出されてしまうことによるためであると考えられる。さらにデトネーションが発生しない場合でも、先行衝撃波が強く衝撃波背後の誘起流に乗った見かけの火炎伝播速度が大きい場合には燃焼割合が 1 に近づき、得られる推力もデトネーションが発生した場合に近い値が得られた。

Fig.11 Relation between burned fraction and impulse

4. 結 言

ホワイトガソリン・空気混合気をホワイトガソリン・酸素イニシエータで起爆するイニシエータ PDE を用いてデトネーション起爆実験および推力測定を行い、以下の結果が得られた。

1) PDE 主燃焼室内のホワイトガソリン・空気混合気を起爆させるためには、イニシエータへのホワイトガソリン・酸素混合気噴射量をイニシエータ体積以上にする必要がある。起爆の可否を決定する主要因は、イニシエータ体積、もしくはイニシエータへのホワイトガソリン・酸素混合気の噴射量ではなく、イニシエータから主燃焼室に溢れ出したホワイトガソリン・酸素混合気量であった。本実験装置では、体積の異なるいずれのイニシエータを用いても、確実なデトネーション起爆には約 400cm³ 以上のホワイトガソリン・酸素混合気を溢れさせる必要があった。

2) デトネーションが起爆されなかった場合、主燃焼室内の火炎伝播速度が推力に大きく影響することが明らかになった。主燃焼室内平均火炎伝播速度が減少すると得られる推力も減少した。測定された火炎伝播速度や衝撃波圧力から主燃焼室内流れを大まかに推算した結果、デトネーションが起爆されなかった場合に推力が減少するのは、爆発性混合気未燃のまま管外に排出されることが原因の一つであると考えられる。

文 献

- (1) Nicholls, J. A., Wilkinson, H. R., and Morrison, R. B., "Intermittent detonation as a thrust-producing mechanism," *Jet Propulsion*, Vol. 27, No. 5 (1957), pp. 535-542.
- (2) Kailasanath, K., "Review of propulsion applications of detonation waves," *AIAA Journal*, Vol. 38, No. 9, (2000), pp. 1698-1708.
- (3) Heiser W. H., and Pratt D. T., "Thermodynamic cycle analysis of pulse detonation engines," *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 18, No. 1 (2002), pp. 68-76.
- (4) Schauer F., Stutrud J., and Bradley R., "Detonation Initiation Studies and Performance Results for Pulsed Detonation Engine Applications," *AIAA Paper* (2001), AIAA-2001-1129.
- (5) Sakurai, T., Ooko, A., Yuzuki, M., Yoshihashi, T., Obara, T., Ohayagi S., "Effect of Injected Volume and Distribution of Purge-Air Regarding Stable Operation for a Pulse Detonation Engine," *Journal of JSASS*, Vol. 54, No. 628 (2006), pp. 204-209.
- (6) Brophy, C. M., Werner, LT S., and Sinibaldi, J. O., "Performance characterization of a valveless pulse detonation engine," *AIAA Paper* (2003), AIAA-2003-1344.
- (7) Yatsufus, T., Ohira, M., Yamamoto, S., Nishimura K., Yoshinaga, K., Endo, T., Taki, S., "Experimental Studies on Detonation Initiation of Liquid-Fuel-Air Mixture in a Pulse Detonation Engine with Initiator," *Journal of JSASS*, Vol. 52, No. 611 (2004), pp.549, 555.
- (8) Tieszen, S. R., Stamps, D. W., Westbrook, C. K., and Pitz, W. J., "Gaseous hydrocarbon-air detonations," *Combustion and Flame*, Vol. 84, No. 3 (1991), pp. 376-390.
- (9) Lee, J. H. S., Dynamic parameter of gaseous detonations, *Annual Review of Fluid Mechanics*, Vol.16, (1984), pp.311-36.
- (10) Endo, T., Yatsufusa, T., Taki, S., Matsuo, A., Inaba, K., Kasahara, J., "Homogeneous-dilution model of partially fueled simplified pulse detonation engines," *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 23, No. 5 (2007), pp.1033-1041.
- (11) Kiyanda, C. B., Tanguay, V., Higgins, A. J., and Lee, J. H. S., "Effect of transient gasdynamic processes on the impulse of pulse detonation engine," *Journal of Propulsion and Power, Technical notes*, Vol. 18, No. 5 (2002), pp. 1124, 1125.