

パルスデトネーション・エンジン連続作動特性の研究

A Study on Multiple-cycle Operation of Pulse Detonation Engine

遠藤 慎介¹、中込 大輔¹、吉橋 照夫²、小原 哲郎¹、大八木 重治¹、村山 元英³
Shinsuke Endoh¹, Daisuke Nakagomi¹, Teruo Yoshihashi², Tetsuro Obara²,
Shigeharu Ohyagi², Motohide Murayama³

¹ 埼玉大学 大学院理工学研究科

Graduate School of Science & Engineering, Saitama University

² 埼玉大学 総合研究機構技術部

Technical Support Division, Innovative Research Organization, Saitama University

³ 株式会社 IHI

IHI Corporation

Abstract

A Pulse detonation engine (PDE) is an internal combustion engine that generates power due to intermittent detonations. As an air supply method, many researchers used the solenoid valves. However, it is unsuitable for air breathing engines which use air from the atmosphere. Then, for practical use there, the PDE is expected to be equipped with some kind of rotary valves which can induce air intermittently from the atmosphere. Although some researchers reported the results using such valves for the PDE, a detailed study of the continuous operation PDE has not been reported yet, so it is meaningful to examine the behavior and the optimization of the PDE with the rotary valve. For this object, it is experimented to prove a certain, continuous operation of 40Hz by this device. The combustion test was performed for 30, 35, and 40Hz operations. The performance was evaluated by two parameters, i.e., thrust F [N] and impulse per unit area I_{cycle} [Ns/m²]. As a result, a 120 cycle, 3 seconds operation was able to be achieved by 40Hz. The impulse was decreased as the operation frequency increased, although the thrust was slightly increased.

Key Words: Pulse detonation engine, Rotary valve, Impulse

.そこ

パルスデトネーションエンジン (PDE) は、間欠的な自走デトネーションによる燃焼を燃焼器内部で繰り返し発生させ、推進力や動力を得る内燃機関として様々な研究機関で開発が進められている⁽¹⁾。これまで酸化剤供給法として、電磁バルブによる気体の噴射方式による研究は多くなされているが、空

で実用化に向けて、酸化剤の大気吸入と安定した高周波作動に向く円筒型ロータリーバルブを装着した PDE を構築した。この方式での連続作動実験について詳細に報告した例は少なく、作動時の挙動や高周波作動させるための装置の最適化について調べることは意義深い。本研究では 40Hz 連続作動を目

指し、まず作動周波数 30Hz において評価実験と最適化を進めた。デトネーションへの遷移距離を短くすることは、エンジンの作動の安定化と高周波作動に不可欠であることから、DDT 促進体形状による改善の評価を燃焼波速度で CJ 速度と比較した。それら知見を総合した装置構成で作動周波数 40Hz 作動させ、推力性能を 30, 35Hz での値と比較を行った。

2. 実験装置

図 1 に実験装置の概略図を示す。PDE 管は内径 38mm のステンレス管である。ブローから空気を流し、サージタンク、ロータリーバルブを経て PDE 管に流入させる。サージタンクは空気流量の変動を防ぐ目的で設置する。ブローからの噴射圧は 30 kPa (0.03MPa) で空気供給量は周波数により変動し 0.649 (30Hz), 0.483 (40Hz) [L/cycle]である。燃料には水素を使用し、噴射には電磁バルブを用いる。ロータリーバルブ直後に設置した噴射ポートから PDE 管に供給する。噴射ポートから 177 mm に点火プラグ (NGK)、エンジン内のデトネーション特性を調べるためのピエゾ式圧力変換器 (PT1, PT2) とイオンプローブ (I1, I2) を各々対向設置する。DDT を促進するために燃焼管には 560mm のシェルキンスパイラル溝 (図 1 の螺旋部分) を設けている。断面図と写真を図 2 に示す。管は 140 mm 毎に分割できる。

図 3 に 1 サイクルのタイムシーケンスを示す。バルブの開き始めと同時に空気を吸入し、強制的な掃気 (パージ) を行った後、燃料噴射を行い、バルブが閉じた後に点火、燃焼排気という過程を踏む。各過程の時間配分を変化させることでパージ率・充填率を、燃料噴射圧を変化させることで当量比を変化させることができる。バルブの開き始めの検出には 180° 間隔にスリットを設けたエンコーダとフォトインタラプタを用いる。ロータリーバルブの半回転が 1 サイクルに対応する。

3. 実験結果

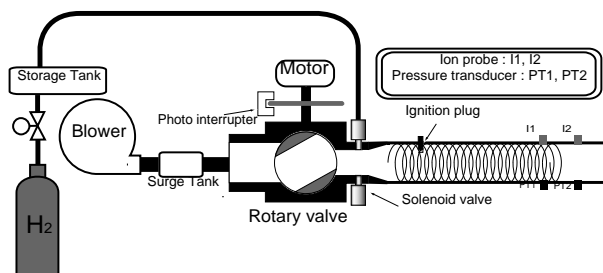


Fig. 1 Schematic of experimental apparatus

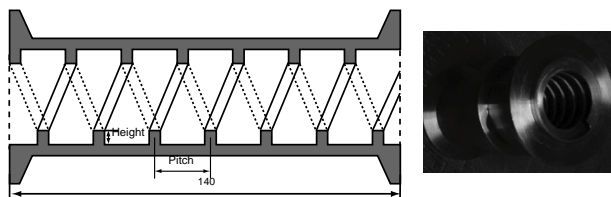


Fig. 2 Shchelkin Spiral

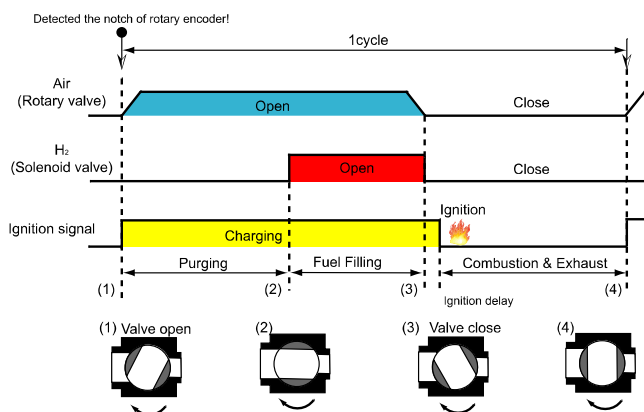


Fig. 3 Time sequence of PDE operation

3.1 DDT 距離短縮のための燃焼管形状の変更

PDE 管の長さは燃料噴射ポートから 850mm である。デトネーション遷移距離の短縮には、スパイラル溝ピッチを小さくする方法をとった。スパイラル区間 560mm を構成している管の組み合わせを図 4 に示し、その影響を燃焼波速度で CJ 速度と比較して判断する。実験条件を表 1 に、組み合わせの詳細を図 4 に示す。

3.2 40Hz 作動における推力性能

これまでの知見を総合した装置構成での 40Hz における確実な連続作動を実証するための実験を行った。30, 35, 40Hz で燃料充填時間を同じにした状態と比較した。性能の評価は、推力 $F[N]$ と単位面積当たりのインパルス $I_{\text{cycle}}[\text{Ns}/\text{m}^2]$ の 2 つで行う。

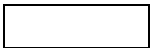


Table.1 Experimental condition (3-1)

Operation Frequency [Hz]	30		
Operation Time [s]	3.0		
Time Sequence [ms]	11-9-1-12.3		
Purge Fraction	0.38		
Fill Fraction	0.60		
Equivalence Ratio Φ	2.5		
Shchelkin Spiral Length [mm]	560		
PDE tube Length [mm]	850		
Configuration	A	B	C

Table.2 Experimental condition (3-2)

Operation Frequency [Hz]	30	35	40
Operation Time [s]	3.0		
Filling Time [ms]	8		
Purge Fraction	0.42	0.31	0.24
Fill Fraction	0.51~0.52		
Equivalence Ratio Φ	2.2~2.4		
Shchelkin Spiral Length [mm]	560		
PDE tube Length [mm]	850		
Configuration	B		

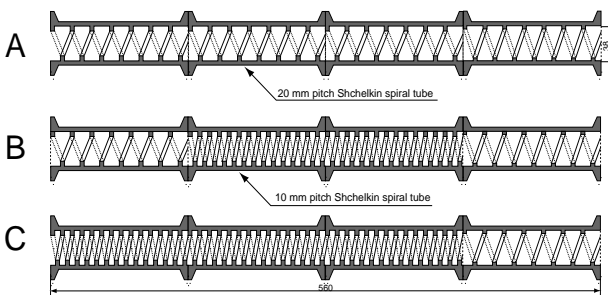


Fig.4 Combination of Shchelkin Spiral tube

燃料噴射ポート側面に設置した圧力変換器での「推力壁の圧力履歴」から、時間積分して推力および理想インパルス算出する。実験条件を表 2 に示す。

4. 実験結果および考察

図 5 に実験 3-1 の各サイクルの燃焼波速度を示す。ひし形のプロットが A、四角が B、丸が C の場合である。CJ 速度は当量比 1 と 2.5 の計算値を参考のために記してある。形状 A の場合、90 サイクルまで安定した速度が観測されず最大 1200m/s 程度にしかならない。形状 B では、ばらつきはあるが 30 サイクル以降に CJ 速度の 80% 程度の値が観測された。

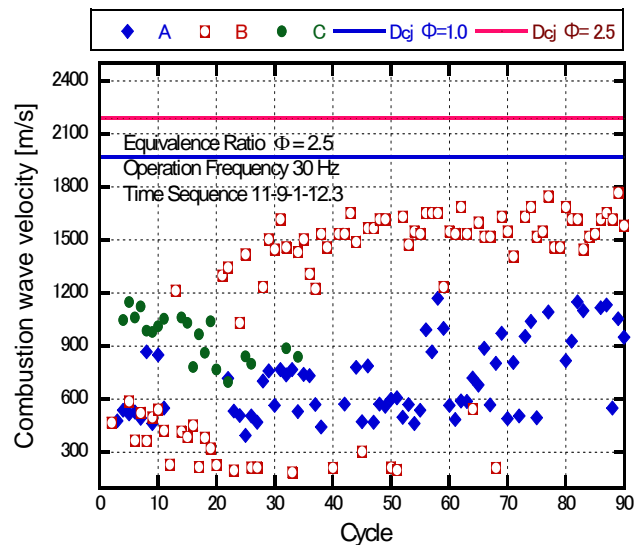


Fig. 5 Variations of combustion wave velocity with each cycle for the experiment (3-1)

形状 C は 34 サイクルからイオンプローブの反応が判別できなくなり速度を計測できなかった。

A の場合は、乱流促進体である溝のピッチが長く、乱れが持続できず加速が不十分であると思われる。C では、加速はしやすいが、サイクルを重ねるにつれ、掃気不十分により、燃焼が不安定になるためと考えられる。B ではもともと伝ば速度の遅い点火栓付近のピッチが長く、その部分での掃気がしやすいこと、そして中間 2 つ分の管の部分では、ある程度高速の乱流火炎になったものが短いピッチでうまく加速し、安定した DDT 促進に寄与したと判断できる。

形状 B でも CJ 速度にならないのは、燃料と空気が完全には混合せず燃料気体が偏在しているためと考えられる。結果から推定すると、この状態では実質的にやや希薄側の条件で燃焼しているものと思われる。

図 6 に実験条件 3-2、40Hz の場合の、イオンプローブ (I1, I2)、点火信号、推力壁圧力変換器信号を示す。横軸は点火前 0.5s からの時間である。推力壁の圧力は、噴射用電磁バルブと同じ位置の管壁 (推力側壁) に設置したものである。イオンプローブの反応は始め強く、終盤でやや弱くなる。推力側

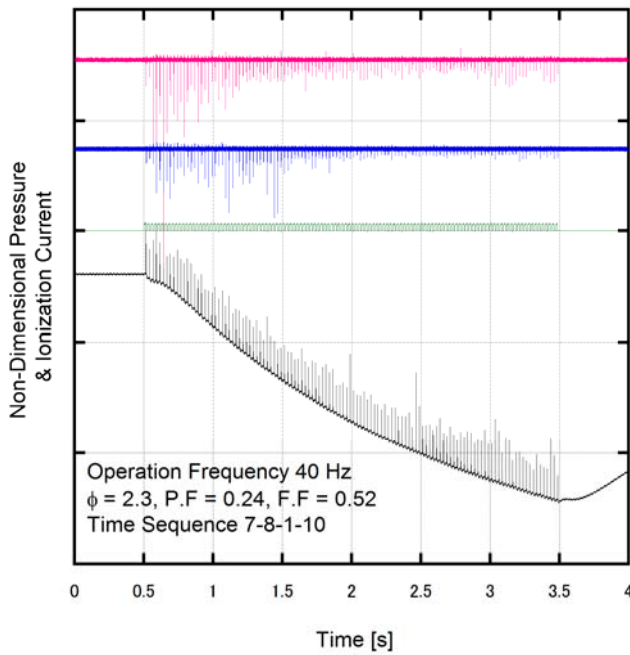
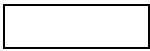


Fig.6 40Hz operation profile

壁の圧力は壁面温度の上昇に伴い、ベースラインが減少しているが、圧力の立ち上がりは維持しており、少なくとも燃料が噴射される推力壁近傍ではデトネーションが維持されているものと考えられる。

図7に実験3-2における理想インパルス（左軸）と推力（右軸）の周波数に対する測定結果を示す。単位面積当たりの理想インパルスは推力側壁面の圧力を1サイクルにわたって積分したものの平均値で、それに周波数をかけたものが推力（平均値）である。したがって、インパルスが周波数によらなければ推力は周波数の増加とともに増加する^[2]。しかしながら、結果的にはインパルスが周波数増加とともに減少し、推力の増加率は減少する。特に周波数を40Hzにしても推力は35Hzよりやや減少してしまう。これは、周波数の増加に伴い、掃気時間も減少するため毎サイクル形成される混合気が前サイクルの排気により汚染されることに原因があると考えられる。特に、掃気をロータリーバルブからの空気によってするシステムの場合、掃気流の速度が遅く、運動量を十分与えられないためこの影響が大きいと考えられる。

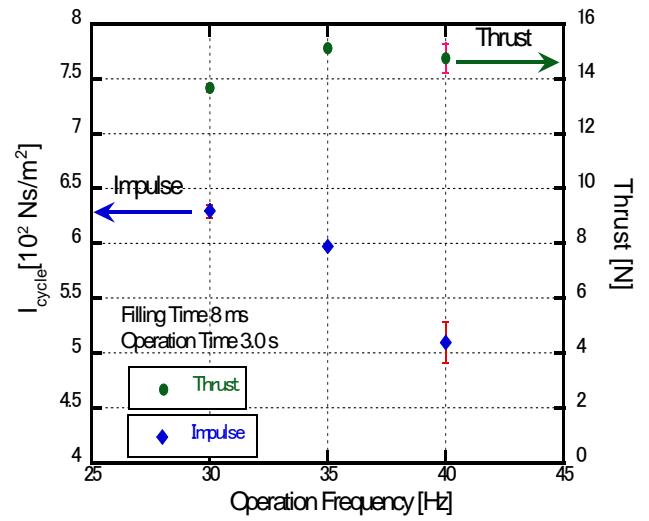


Fig. 7 Variation of impulse and thrust with operation frequency

5. 結論

ロータリーバルブを用いて空気を吸入するパルスデトネーションエンジンを構築し、作動周波数による燃焼速度のサイクル変化をエンジン内の乱れ発生装置の形状を変えて測定し、最適な形状を決定した。その形状で作動周波数40Hz連続作動を達成したが、高周波作動化は掃気状態の悪化を招き、推力の低下を招いた。このような空気導入システムを採用する場合何らかの掃気システムの改良が必要である。

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」の一環としても行われたことを付記する。

参考文献

- 1) Kailasanath, K.: Recent Developments in the Research on Pulse Detonation Engines, AIAA J., 41, 145-159, 2003
- 2) Schauer, F., Stutrud, J., Bradley, R.: Detonation Initiation Studies and Performance Results for Pulse Detonation Engine Applications, AIAA, 2001.