

パルスデトネーションエンジン持続運転に関する熱流体力学

Thermo-Fluid dynamics of Continuous Operations of Pulse Detonation Engines

代表者; 大八木 重治

共同研究者; 小原哲郎、吉橋照夫、柚木聡(院生)、遠藤慎介(院生)

研究協力者; 村山元英 (IH)

はじめに

パルスデトネーションエンジン(以下、PDE)は、間欠的なデトネーションによる燃焼を燃焼室内で発生させ、それを閉端部から解放端に伝播させることを繰り返すことで推進力や動力を得る内燃機関である。

基本構造 : 一端を閉じた円管(燃焼室) + 燃料と酸化剤噴射器 + 点火プラグ

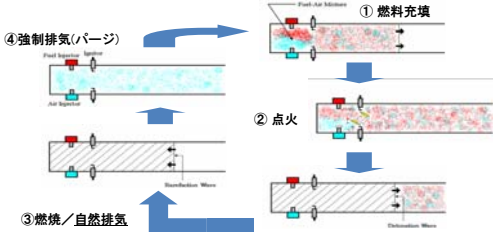
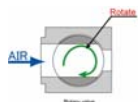


Fig. 1 Principle of Pulse Detonation Engines

PDE実用化に向けて

- ★空気吸い込み式エンジンとして大気吸入に向く形状が必要
- ★推力増加のため高周波で連続動作させる必要があるためには安定した大流量の空気が必要

そこで本研究では空気の供給に円筒型ロータリーバルブを用いています。



長所 : 噴射孔の径が大きく、電磁バルブに比べ、圧力損失が少なく単位時間当たりの流量が多く圧力損失が少なく、大気吸入に向く。

欠点 : 燃料と酸化剤の混合が電磁バルブと比較して弱い。(理由: 電磁バルブでは、対向噴射ができること等。)

◆燃料噴射ポート数の影響

実験条件を表3に示す。混合促進体を装着せずに実験を行い、2ポート、4ポート噴射の当量比、充填率への数値的影響があるかどうかをみた。

◆30Hzでのデトネーション動作について

各種装置の改良により25Hzにおける安定動作が実証された。このため、30Hzにおいても動作が達成できるのか実験を行った。25Hzのタイムシーケンスをそのまま使えない。実験条件を表4に示す。

| Kind of Plate Pairs | P3-N | P3-P6 | P5-P6 | N-N |
|---------------------|-------|-------|-------|-------|
| Equivalence Ratio | 0.916 | 0.913 | 0.916 | 0.906 |
| Purge Fraction | 1.7 | 1.7 | 1.7 | 1.7 |
| Fill Fraction | 1.47 | 1.47 | 1.47 | 1.47 |

| Data Number | #1 | #2 | #3 |
|-------------------|-------|------|------|
| Equivalence Ratio | 0.906 | 1.04 | 1.11 |
| Purge Fraction | 1.7 | 1.7 | 1.7 |
| Fill Fraction | 1.47 | 1.53 | 1.56 |

| Data Number | #4 | #5 | #6 | #7 |
|-------------------|------|-------|-------|-------|
| Equivalence Ratio | 1.17 | 0.941 | 0.938 | 0.909 |
| Purge Fraction | 1.7 | 1.85 | 1.54 | 1.54 |
| Fill Fraction | 1.58 | 1.26 | 1.7 | 1.69 |

Table.3 Experimental Conditions about Fuel Injection Port Number

| Number | 2 | 4 |
|-------------------|------|------|
| Equivalence Ratio | 1.11 | 1.1 |
| Purge Fraction | 1.7 | 1.7 |
| Fill Fraction | 1.56 | 1.55 |

Table.4 Experimental Conditions about 30Hz operation

| E.R | 1.08 | 1.01 | 0.845 |
|-----|-----------------|-----------------|-----------------|
| P.F | 1.23 | 1.07 | 1.07 |
| F.F | 1.55 | 1.75 | 1.66 |
| T.S | 10.5-9.5-1-12.3 | 9.5-10.5-1-12.3 | 9.5-10.5-1-12.3 |



Fig.5 (1) Punched Plate P3 Fig.5 (2) Orifice Plate P5, P6 Fig.6 Accurate Regulator

◆当量比・充填率の影響

当量比のみ変化した場合、充填率のみ変化した場合、両方変化した場合を複合的に図8に示した。これは各サイクルでの衝撃波と燃焼波のデトネーション検知率を全サイクルに対して、さらに90サイクル全体の検知率と作動後半(51-90サイクル)の検知率の比較も行っている。その結果、作動後半で100%に近い値となった。当量比1.1前後が最適値となる。また充填率は、管容積に対して最低140%以上混合気を充填する必要がある。

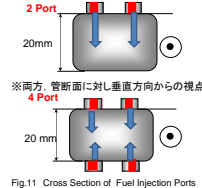
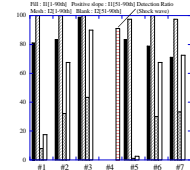


Fig.10 Detonation Probability about Φ & F.F. Fig.11 Cross Section of Fuel Injection Ports

◆燃料噴射ポート数の影響

図11に燃料噴射ポートの断面図を、図12にデトネーション検知率を示す。2ポートによる噴射の方が2に比べて検知率が高く、より安定動作している。両条件でどのような性質の違いがあるかといえ、各ポートへの噴射圧力とPDE内部の空気噴流に接しているバルブの断面積の2つである。1サイクルあたりの水素の総噴射量が同じであるならば2ポートでの噴射圧の方が高くなる。噴射圧が高くなると空気流に対して、貫通距離が大きくなるはずであるから4ポートよりも混合状態が良いということになる。

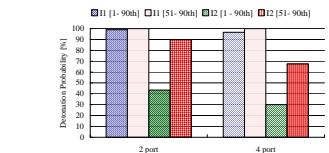
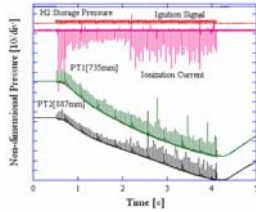


Fig.12 Detonation Probability about Fuel Injection Ports

デトネーションの判断



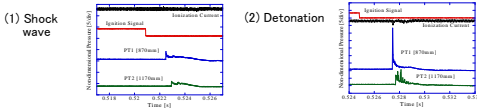
Operational records of PDE in 25Hz

PDEの動作の状態を観測するため本研究ではオシロスコープに各種信号および圧力波形、イオンプローブの状態を示すようにしている。

| | |
|-----|----------|
| 青 | 水素ストレージ圧 |
| 赤 | 点火信号 |
| ピンク | イオンプローブ |
| 緑 | PT1の圧力 |
| 黒 | PT2の圧力 |

作動状態を判断する基準として、以下を定義する。

- 例として、30Hz、3.0秒(90サイクル)動作のときは、
- 90サイクルに対して衝撃波だけが伝播した割合: 衝撃波検知率
- 90サイクルに対してデトネーションが伝播した割合: デトネーション検知率



充填率: 燃焼室容積に対して充填した混合気量の割合
バージ率: 燃焼室容積に対するバージ量の割合

実験結果

高精度レギュラータを用いた時の、180回燃料を連続噴射したときの燃料噴射圧力値の変動を図7に示す。結果として、装置改良後、圧力変動は小さくなり、安定して水素の供給が行われている。実際に同実験条件でのデトネーション発生率は改良後の装置のほうがよいことを確かめた。

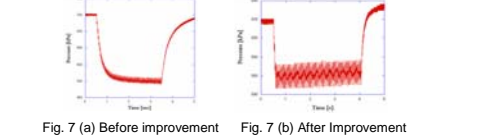


Fig. 7 (a) Before improvement Fig. 7 (b) After Improvement

◆混合促進体の影響

混合促進体の形状による作動状態を実験した結果を図8、9に示す。以前の試験においてはその組み合わせや有無で大きくデトネーション動作に影響を与えていたのだが、装置改良後の結果を見ると混合促進体の効果が如実にでてきていると言いがたい。データからはどれが最適かどうか判断しにくい。さらに何も装着しない状態とほとんど変わらないのであれば今後、長時間連続動作時のプレートへの負荷を考えれば装着しない方が望ましいという結論を得た。

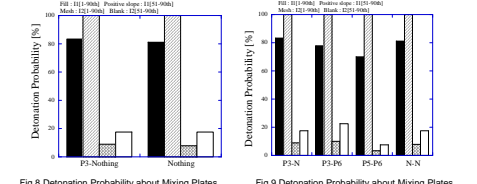


Fig.8 Detonation Probability about Mixing Plates Fig.9 Detonation Probability about Mixing Plates

実験装置

実験装置は燃料として水素を燃料噴射ポートから電磁バルブにより噴射され、酸化剤として空気をロータリーバルブを通してフローアから取り入れる。それらをステンレス管内に充填してスパークプラグにより点火する。実験中の周囲環境への騒音を低減するため、サイレンサーを接続する。

圧力変換機とイオンプローブが対向する形で2箇所に入れてあり、この部分をそれぞれI1、I2として測定領域とする。ロータリーバルブの回転角に合わせて柔軟な制御を行うためPDEの制御用バルブ発生器にはデジタルIOボードを搭載したパソコンを用いる。

デトネーションを発生させる方式として、通常の燃焼(Deflagration)から爆轟(Detonation)へ遷移する現象を用いています。この遷移するまでの距離を短縮するための機構として管内乱れを促進するシェルキンスパイラルという形状を、写真のように燃焼管に直接挿入して使用している。図2に、PDEの1サイクルの制御タイムシーケンスを示す。1サイクルはロータリーバルブの開きはじめをセンサが感知すると同時に始まり、バージ(掃気)→水素噴射→点火→燃焼排気の順でサイクルが進む。

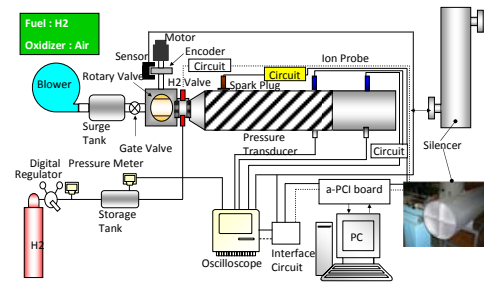


Fig.2 System Overview of PDE



Fig.3 Shchelkin Spiral Pattern of tube

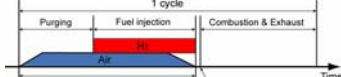


Fig.4 Time Sequence of 1 cycle

実験条件

実験は基本的に25Hz、90サイクル(3.5s)動作を行い、タイムシーケンスを[14-10-1-15](バージ-燃料噴射-点火-燃焼排気、ms単位)とした。また燃料噴射は2ポート噴射の場合、上方2箇所から4ポートの場合は上下4箇所から噴射している。

◆混合促進体の影響

実験条件を表1に示す。図5に使用した多孔プレート、オリフィス型プレート2枚を示す。本研究では噴射断面を複雑化することで空気の乱れを促進し、混合状態を改善することを試みた。オリフィス型プレートの特徴としては、P1:面内方向に三角柱を挿入した形になっていて、P2:絞り効果を持った形状になっている。

◆30Hzでのデトネーション動作

図13、14に30Hzでのデトネーション検知率と90サイクル全体の圧力波形およびイオンプローブの波形を示す。実験番号#1と#2では同当量比でのバージ割合の変化によるデトネーション動作について比較している。#2はバージ不足でデトネーション動作には至っていない。30Hzではタイムシーケンスが25Hzに比べてさらにシビアになっていることがわかる。バージ率に関しては管容積に対して最低120%以上のバージ量が必要である。また、#2と#3における同バージ量で当量比を変化させた場合に、当量比を減らした#3でデトネーション動作が起こっていることから、既燃気体を完全に排出するのに必要なバージ量の確保が求められる。今後30Hz独自のタイムシーケンスの最適化が必要である。また、実際に30Hzでのデトネーションの性質をCJデトネーションでの(速度、圧力)と比較した(図15、16参照)。作動後半の方でデトネーション検知率が高いことは前にも述べたが、加熱された管壁からの熱は損失にもなるが混合気の均質化に対しても良い影響を与えているのではないかと考えられる。

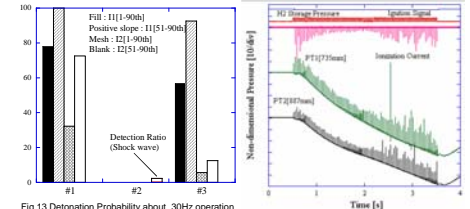


Fig.13 Detonation Probability about 30Hz operation Fig.14 Pressure & Ionization Current Profiles at 30Hz

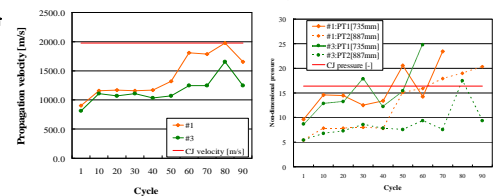


Fig.15 Propagation velocity of each cycle at 30Hz Fig.16 Non-dimensional pressure of each cycle at 30Hz

まとめ

ロータリーバルブを装着したPDEを構築し、水素/空気の混合促進と正確なデトネーション動作を主な目的として、連続動作実験を行い、以下の知見を得た。

- 装置について:
 - ◆混合促進体プレートの組み合わせや有無は、デトネーション動作に大きな影響を与えない。
 - ◆燃料噴射ポート数は上下4箇所より、上2箇所からのほうが混合に寄与する。

設定パラメータについて:

- ◆バージ率に関しては、管容積に対して最低でも120%以上の掃気空気体積が必要。

空気をロータリーバルブで供給するPDEにおいて、30Hz、3.0秒(90サイクル)連続動作を達成