

プロパン - 空気混合気を用いたパルス

デトネーションタービンエンジンの作動実験

越智亨，吉永公一，大深健嗣(広大院・工)
高木尚哉(広島大)，
八房智顕，遠藤琢磨，滝史郎(広大院・工)，
青木修一，梅田良人(東邦ガス・基盤技術研究部)

Experiments on Pulse Detonation Turbine Engine with propane-air mixture

Akira Ochi, Koichi Yoshinaga, Takeshi Ofuka, Naoya Takaki
Tomoaki Yatsufusa, Takuma Endo and Shiro Taki (Hiroshima University)
Shuichi Aoki and Yoshito Umeda (Toho Gas Co.,Ltd)

Abstract: We are devoting ourselves to improve thermal efficiency of Pulse Detonation Turbine Engine (PDTE) as power generators, and carried out experiments on 10Hz, 5sec operation of PDTE with shock diffuser. Shock diffuser deforms a strong shock wave into a series of weaker shock waves. As a result of the experiment 1.65-2.46% thermal efficiency was obtained.

Keywords: Pulse Detonation Turbine Engine, Shock diffuser

1. まえがき

パルスデトネーションタービンエンジン(PDTE)は，間欠的に発生するデトネーションの排気エネルギーを，タービンを介して軸出力として取り出すものである．パルスデトネーションエンジン(PDE)は初期圧縮無しでもある程度の熱効率を保ったままサイクルが成り立つため構造が単純で，燃焼行程がデトネーションで行われるため，従来の定容燃焼を利用したガスタービンエンジンに比べ高い理論熱効率が予想される⁽¹⁾．PDEを発電に利用する際，間欠流に対してタービン効率は低いため，タービンに入る以前に排気を平滑化する機構は重要である．本実験ではプロパン - 空気混合気を用いた単気筒PDTEのデトネーション管とタービンの間に衝撃波拡散装置を取り付け，排気の平滑化によるタービン効率の改善を試みた．

2. 実験装置

Fig.1にPDTE試作機の概要を示す．本装置は本体起爆方法に比較的短距離でデトネーションに遷移するプロパン - 酸素混合気イニシエータ(内径30mm，長さ91mm)を用いている．イニシエータには混合気他にパージ用の空気が噴射され，二本の自動車用点火プラグによって点火する．この際発生するデトネーションを本体のプロパン - 空気混合気に伝

播させる．本体用プロパンは二つの電磁バルブから空気主流方向に対して直角に噴射され，プロパン - 空気混合気はロータリーバルブを通して管内に流入する．また，プロパンを噴射しないタイミングではロータリーバルブからの空気は本体のパージに用いられる．デトネーション管(内径95.6mm，長さ1180mm)には火炎の通過を検知するイオンプローブと圧力センサが取り付けられている．衝撃波拡散装置は衝撃波閉じ込め管(内径134mm，長さ1000mm)の内部に，多段反射板(外径50,71,87,100mm，全長400mm)を入れたものである．これにより一つの強い衝撃波を段階的に反射して，複数の弱い衝撃波とする．タービンアダプタ管(内径48.6mm，長さ225mm)とタービン出口には圧力センサが取り付けられ，タービン入り口直前及び出口直後の排気圧が計測される．タービンはMHI製の自動車用2000ccガソリンエンジンのターボチャージャーを用いた．タービン出力の測定は，タービンに直結されたコンプレッサが行う圧縮仕事を測定することによって行った．圧縮仕事はコンプレッサ前後のエンタルピー変化で表され，コンプレッサ出口の流量と温度を測定することで求めることができる．コンプレッサの流量はコンプレッサ下流に設置した測定誤差 $\pm 3\%$ 以内のオリフィス流量測定装置によって測定し，温度は熱電対によって測定した．

3. 実験条件

Table.1 Experimental conditions

Charged gas	
Initiator	C3H8-O2(ER=1.44)
Main	C3H8-Air(ER=1.52)
Fill fraction of mixture	76.7%
Frequency	10Hz
Operation time	5sec

Table.1に実験条件を示す．作動周波数10Hzで5secの連続作動実験を行った．イニシエータ用混合気の噴射時間は45msで，プロパン，酸素の流量はそれぞれ233ml及び808ml，混合気の当量比は $\phi=1.44$ である．本体用混合気噴射時間は40msで，プロパン，

空気の流量はそれぞれ332ml及び5214ml，当量比が $\phi=1.52$ ，混合気充填率はデトネーション管体積の76.7%である．デトネーション起爆の判定はイオンプローブ及び圧力センサによる火炎伝播速度の計測値が $D_{CJ}=1825\text{m/s}$ の70%以上に達した場合とし，本実験で用いた制御シーケンスでは安定したデトネーションの起爆が確認された．

4. 実験結果

実験によって得られたデトネーション管出口圧力 P_1 ，タービン入り口圧力 P_{inlet} ，タービン出口圧力 P_{outlet} をFig.2に示す．これは実験開始から4.8秒後のサイクルに対しての波形である， P_{inlet} の最大圧力時刻は P_1 の最大圧力時刻に比べて後方に2.4ms程度ずれている．これは衝撃波が多段反射板により段階的に反射し，弱い衝撃波群に拡散したためであるが，それぞれの立ち上がりは鋭く，十分に減衰されていないことが分かる．またタービン入り口圧力は約60ms(1サイクルの60%)で過剰圧力が0であり，それ以降タービンは仕事をしていないことになる．この時間を無くすためには作動周波数を20~30Hzに上げる必要がある． P_{outlet} もデトネーション管出口に衝撃波が到達した後，約14msの間で最大0.1MPa程度上昇しており，高エンタルピーを有したままタービンから排気されていることが分かる．Fig.3に示

すコンプレッサ出口における空気の質量流量に対してもタービン入り口圧力 P_{inlet} の間欠的な圧力上昇に応答した変動が見られる。サイクルごとの平均流量は実験開始と共に上昇し、約2秒にわたってわずかにオーバーシュートした後一定となっている。Fig.4に示すコンプレッサ出口温度の細かい振動は駆動用モータのインバータから発生するノイズによるものである。コンプレッサ出口温度は5秒程度の運転時間では完全に定常にならなかった。コンプレッサ出口の質量流量の結果からは、圧縮空気の状態は2秒程度で一定になっているため、温度が一定にならないのは熱電対の熱容量の影響であると考えられる。したがって、今後熱効率等の計算には実験開始後4～5秒の1秒間についての平均値を使用することとした。Fig.5に示す出力の算出には以下の値を使用した。

空気比熱比	$\kappa=1.402$	プロパン分子量	$M_{C_3H_8}=44.094$
室温	$T_{atm}=300.15[K]$	空気分子量	$M_{air}=28.966$
普遍気体定数	$R_0=8.314[J/mol \cdot K]$	プロパン低位発熱量	$H_{C_3H_8}=46.35[MJ/kg]$

コンプレッサによる圧縮前の流速が十分小さいとすると、コンプレッサの行った仕事率 L_{comp} は圧縮前後のエンタルピの差から、

$$L_{comp} = Q_{comp} \left\{ \frac{Q_{comp}^2}{2A_{orifice}^2 \rho_{orifice}^2} + \frac{\kappa}{\kappa-1} \frac{R_0}{M_{air}} (T_{comp} - T_{atm}) \right\}$$

と計算できる。ここで $A_{orifice}$ はオリフィス流量測定管断面積で、 $A_{orifice}=3663.8mm^2$ で、 $\rho_{orifice}$ はオリフィス流量測定装置上流の空気密度である、これはオリフィス流量測定装置での測定より求めることができる、ただし実験中の出力には本体に流入するパージ用の空気による出力が含まれている。そこで燃料を噴射しない状態での出力を計測し、上記の出力から差し引くと、正味出力として、

$$L_{comp}=7.88[kW]$$

が得られた。装置全体で消費されたプロパンの質量 $m_{C_3H_8}$ と供給酸素及び空気中の酸素の質量 m_{O_2} はそれぞれ0.01028[kg/s]、0.0252[kg/s]となり燃料過濃である。十分に酸化剤が供給され、供給したプロパンがすべて燃焼した場合の発熱量を Q_{max} 、熱効率 η_{min} とし、実際に供給した酸化剤の量だけプロパンが燃焼した場合の発熱量を Q_{min} 、熱効率を η_{max} とした場合、それぞれ

$$\eta_{min} = \frac{L_{comp}}{Q_{max}} = \frac{L_{comp}}{H_{C_3H_8} \times m_{C_3H_8}} = 1.654 [\%], \quad \eta_{max} = \frac{L_{comp}}{Q_{min}} = \frac{L_{comp}}{H_{C_3H_8} \frac{5M_{O_2}}{m_{O_2}M_{C_3H_8}}} = 2.455 [\%]$$

となる、したがって、試作したPDTEの熱効率 η は

$$1.654 \leq \eta \leq 2.455 [\%]$$

である。

5. まとめ

衝撃波拡散装置を取り付けた単気筒プロパン - 空気PDTEにおいて作動周波数10Hzで5秒間の連続作動実験を行い、タービン出力7.88[kW]、熱効率1.654~2.455[%]を得た。これは当量比1のプロパン - 空気混合気をデトネーション管体積の80%まで充填し初期圧、排気圧共に1気圧、タービン効率100%とした場合の理論熱効率29.1%⁽²⁾に比べ大幅に低い。この原因はタービン入り口での圧力上昇が急激でピーク圧力が大きすぎたこと、これに

よって高エンタルピのガスがタービンから排出されたこと、タービンが仕事をしていない時間が長いことなどが考えられる。対策としては、V字型スリットの入った衝撃波拡散管⁽³⁾を用いることである、これによりタービン入り口の圧力上昇を緩やかに、またピーク圧力を抑えることができる。Dead timeは運転周波数を増加させることにより低減が可能である。

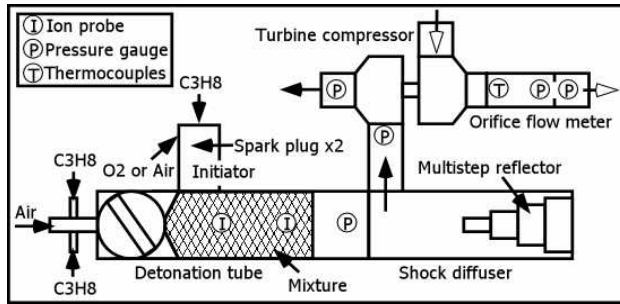


Fig.1 PDTE

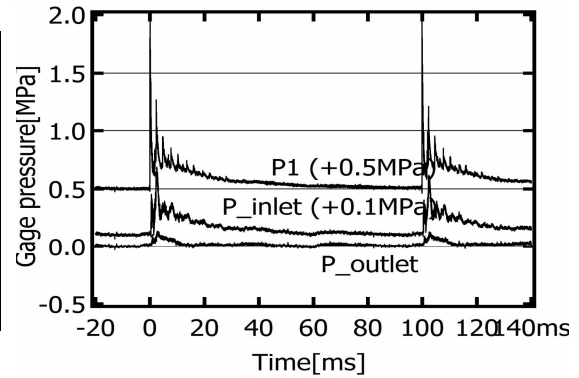


Fig.2 Pressure history

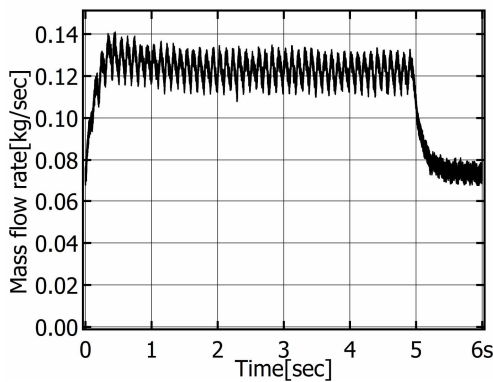


Fig.3 Mass flow rate at 10Hz, 5s operation

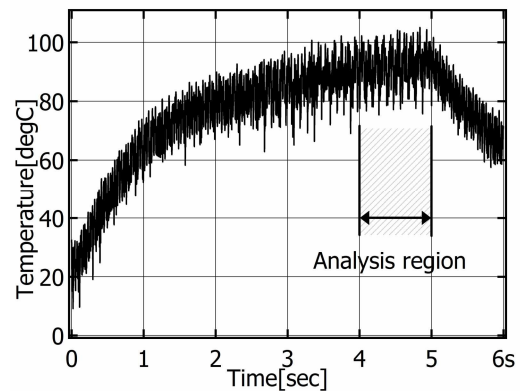


Fig.4 Temperature at 10Hz, 5s operation

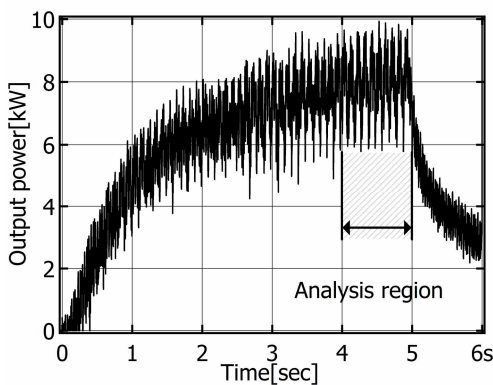


Fig.5 Compressor output at 10Hz, 5s operation

参考文献

- (1)William H. Heiser, David T. Pratt,: Thermo dynamic Cycle Analysis of Pulse Detonation Engines, Journal of Propulsion and Power, Vol.18, No.1, 2002, pp68-76
- (2)遠藤琢磨, 八房智顕, 滝史郎, 笠原次郎, パルスデトネーションタービンエンジンの性能に関する熱力学的解析 Science and Technology of Energetic Materials, Vol.65, pp.103-110, 2004.
- (3)吉永公一, 遠藤琢磨, 滝史郎, 八房智顕, パルスデトネーションタービンエンジンの開発(1) - 単気筒タービンエンジンの試作 - , 衝撃波シンポジウム(2005)