

パルスデトネーションエンジン開発に向けた基礎研究

A Fundamental Study for Development of Pulse Detonation Engines

プロジェクト代表者：大八木 重治（埼玉大学大学院理工学研究科・教授）

Shigeharu Ohyagi

Professor, Graduate school of science and engineering, Saitama University

1. はじめに

これまでPDEは航空用推進器として多くの研究がなされてきている¹⁾。そして近年、別のアプリケーションとして発電を目的としたパルスデトネーションタービンエンジン(PDTE)が提案されている。これは従来のガスタービンエンジンよりも熱効率のよいことが期待されているためである。また燃焼前の予圧縮を必要としないため装置を簡潔にすることができ実現性が高いことも利点として挙げられる。このようなPDTEシステムの成立性が村山らによって検討され、その発電効率は50%近いとされている²⁾。熱力学的に理想的なPDTEの定式化も進められており³⁾、また慶応大学⁴⁾や埼玉大学⁵⁾においてはCFD解析により、発電効率やPDEとタービン接続部の形状について検討がなされている。実験的にはSchauerらの研究で熱効率~1.3%が得られており⁶⁾、また最近では国内においても進められ筑波大学は熱効率0.96-1.66%を達成⁷⁾、広島大学ではPDTEを試作し性能予測を行っている⁸⁾。埼玉大学でも実験が行われてきた⁹⁾。またPDEにおいてデトネーション管へ燃料を部分的に充填することによる推力性能の向上がKailasanathら¹⁰⁾によって報告され、さらに解析的にPerkins¹¹⁾らにより、実験的にSchauer¹⁾らによって研究されている。例えば、このような燃料部分充填による効率的な作動状態がPDTEでも得られるならば、その価値は非常に大きい。そこで自動車用ターボチャージャーを使用したPDTEの燃料部分充填による熱効率を明らかにすることを目的に実験を行ったのでその結果について報告する。

2. 実験装置及び方法

実験装置概略図を図1に示す。デトネーション管は内径38 mm、長さ1120 mmのステンレス管であり、DDT促進のため管にはスパイラル状の溝が管左端より560 mmまで切られている。管壁の厚みは4 mmで最肉厚部では23 mmである。燃料には水素、酸化剤として空気を用い、対向噴射により管内で混合させ自動車用点火プラグにより着火する。パージガスとして空気を用い管端より管軸方向へと噴射する。管端出口部分には自動車用ターボチャージャーを取り付け、投入した化学エネルギーに対するターボチャージャー圧縮機の仕事を求める。ターボチャージャーの駆動状態を把握するためにタービン入口と圧縮機出口直後において圧力と温度を計測し、また圧縮空気の質量流量は圧縮機出口の絞り後方に設置したピトー管により全圧、静圧、そして静温を計測し算出した。

実験は作動周波数20 Hzで行い、作動時間は30 secとした。PDTEの作動は燃料・酸化剤を25 ms噴射し管内で混合させ点火する。これによりDDT過程を経てデトネーションが管出口方向へと伝播しタービンへと流入する。本実験では減衰器⁸⁾を使用していないためデトネーション波が直接タービンへ流入することになる。このデトネーション波がタービンを駆動し、その動力により圧縮機を作動させ仕事を

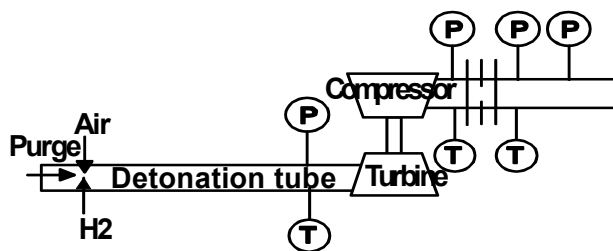


Table 1 Experimental conditions

Operation frequency [Hz]	20
Operation time [sec]	30
Equivalence ratio	1.7
Fuel fill fraction	0.8, 0.88, 0.96
Purging fill fraction	0.22

Fig. 1 Schematic of experimental apparatus

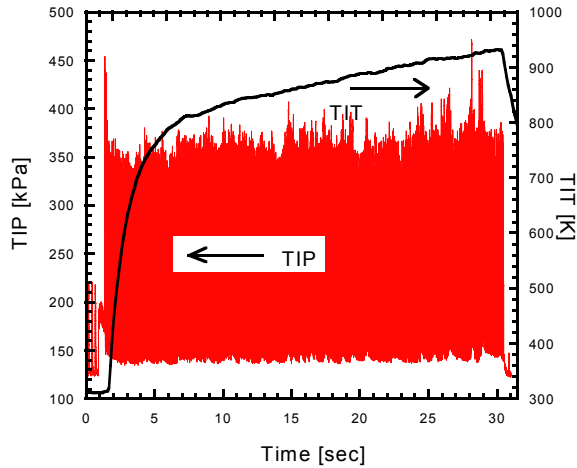


Fig.2 Turbine inlet pressure and temperature

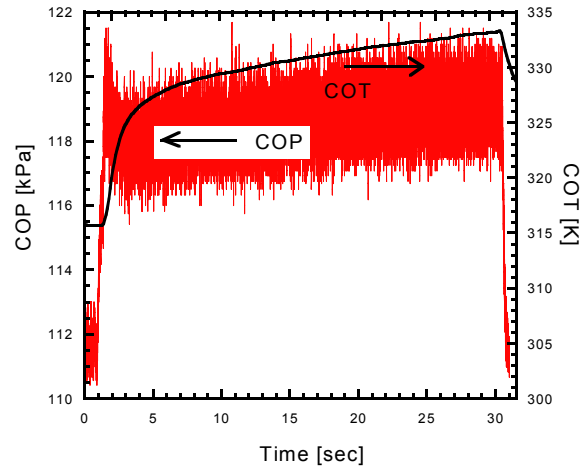


Fig.3 Compressor outlet pressure and temperature

する。その後パージガスを13 ms噴射し管内の既燃ガスを掃気することで1サイクルが終了する。当量比は噴射した燃料・酸化剤より計算した1.7とし、燃料充填率(FF)を0.8, 0.88, 0.96と変化させ、パージガスの充填率は0.2と固定し実験を行った。表1に実験条件をまとめる。また燃焼を行う前には噴射バルブへの供給ガス量を調節するために10数秒前後の空気噴射が行われる。そのため、燃焼開始前にタービンの回転が生じる。

3. 実験結果及び考察

燃料充填率0.96におけるタービン入口及び圧縮機出口における作動開始からの圧力と温度を図2, 3に示す。タービン入口では燃焼ガスの状態を知るために全圧(TIP)と全温(TIT)を計測している。図2ではデトネーションによる連続的な圧力ピークが観察でき各サイクルで安定して作動していることがわかる。全温は作動開始と同時に急激に上昇していき、その後作動終了まで緩やかに増加する。作動終了と同時に温度はすぐに低下する。この間欠的な流れによってタービンを駆動し仕事がなされる。

図3には圧縮機出口直後で測定した全圧(COP)と全温(COT)を示している。PDTEの作動と同時に圧縮機が仕事を始め圧力が上昇していることがわかる。作動中は安定して圧力が維持される。タービン入口とは異なり1サイクルごとの急激な圧力変化は見られないがPDTEの間欠的な作動のために圧縮空気の圧力にも変動が見られる。温度もPDEの作動開始とともに急激に上昇し、その後緩やかに上昇していく。これらの結果よりPDTEは安定して作動し、空気を圧縮し仕事をしていることが確認できる。

4. 熱効率解析

熱効率を算出するために用いた解析方法を以下に示す。ここでは充填率0.96の場合を述べる。図4にはピトー管における静圧 P_s 、全圧 P_t 及び静温 T_s を示している。作動開始後すぐに安定した圧力と温度が得られている。この値を用いて圧縮空気の流量を算出する。これらの平均値を取ると各値は、

$$P_s = 98.8 \text{ [kPa]}, P_t = 114.3 \text{ [kPa]}, T_s = 334.8 \text{ [K]}$$

となった。

出口空気密度は状態式より

$$\rho_{air} = \frac{P_s}{RT_s} = 1.024 \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

ここで $R \text{ [J/kg}\cdot\text{K]}$ は空気的气体定数である。このときの出口空気速度は

$$v_c = \sqrt{\frac{2}{\rho_{air}}(P_t - P_s)} = 174.0 \text{ [m/s]}$$

となり、空気質量流量は

$$\dot{m} = \rho_{air} v_c A = 0.0727 \text{ [kg/s]}$$

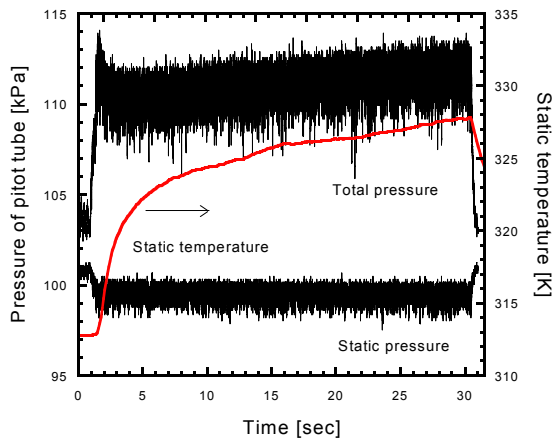


Fig.4 Static pressure and temperature at pitot tube

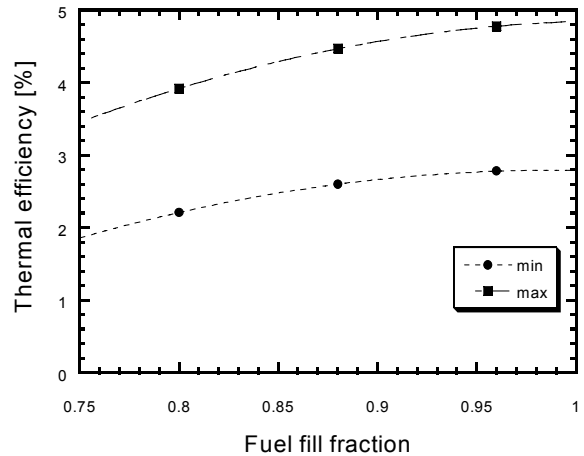


Fig.5 Relationship between the thermal efficiency and the fuel fill fraction

である．よって，圧縮機を行った仕事率は定圧比熱 $C_p=1.007$ [kJ/kg/K]，室温を T_a [K]として，

$$\dot{W}_c = \dot{m} c_p (T_s - T_a) = 2.80 \quad [\text{kW}]$$

ターボチャージャーの摩擦による損失を無視した場合，次式が成り立ち，

$$\dot{W}_t = \dot{W}_c$$

となる．次に供給した水素の発熱量を求める．予め流量計測の結果より噴射圧力及び噴射時間より1サイクル当たりの水素質量流量は $m_{H_2}=0.042$ [g/cycle]と求められる．水素の低位発熱量(LHV) $H_{H_2}=1.2092 \times 10^5$ [kJ/kg]であるから，供給した単位時間当たりの熱量は

$$H_{I(II)} = \frac{H_{H_2} \times m_{H_2}}{t_{\text{cycle}}} = 100.83 \quad [\text{kW}]$$

ここで t_{cycle} は1サイクルの時間である．また，当量比が1.7と過剰である点を考慮し空気の供給量として $m_{\text{air}}=0.831$ [g/cycle]を元に当量比1.0に換算した場合の供給熱量を求めると，

$$H_{I(III)} = \frac{H_{H_2} \times m_{\text{air}}}{34.3 \times t_{\text{cycle}}} = 58.60 \quad [\text{kW}]$$

この結果，PDTEによる熱効率は

$$\frac{W_c}{H_{I(II)}} \leq \eta \leq \frac{W_c}{H_{I(III)}}$$

$$2.78 \% \leq \eta \leq 4.78 \%$$

と求められる．

各実験結果について表2にまとめ，また充填率による熱効率の変化を図5に示す．この図において充填率が低下すると，効率も低下している．充填率と水素の供給量は比例するため，充填率が下がるほど水素の供給量も低下する．そのため供給熱量も小さくなり，タービンに流入するデトネーションは減衰することになる．このためにタービンになされる仕事は低下すると考えられる．これは理想的なPDEにおける推力の傾向³⁾と一致する結果であり，熱効率は約2.2-4.7%の範囲で変化していた．

5. まとめ

PDEに自動車用ターボチャージャーを取り付けたPDTEにおいて作動周波数20 Hzで30秒間の安定した連続作動実験を行い，充填率を変化させた場合についての熱効率を求めた．その結果，充填率の低

下とともに熱効率が減少するという結果を得た。これはタービンへと流入するデトネーションの強さに大きく影響されていると考えられる。

この実験によって得られた熱効率は約2.2- 4.7 %の範囲で変化しており理想的なPDEにおける推力の傾向と一致していた。しかしながら理論値に比べ低い。これはデトネーションによる間欠的な流れに対してタービンの形状が適したものではないことや、タービンへの熱損失が影響しているのではないかと考えられる。そのためさらに長時間、高温条件下でPDTEを作動させ熱損失の少ない状態にすることによって熱効率の改善が見込めると考えられる。

Table 2 Thermal efficiency

Fill Fraction	0.80	0.88	0.96
TIT [K]	932.3	959.8	955.4
COP [kPa]	119.0	119.0	122.0
COT [K]	333.3	337.6	341.3
Mass flow rate [kg/s]	0.0621	0.0696	0.0727
Compressor work, W_c [kW]	1.89	2.42	2.80
Mass of Air [g/cycle]	0.6860	0.7680	0.8311
Mass of H_2 [g/cycle]	0.0354	0.0384	0.0417
Heat release (I) [kW]	85.71	92.94	100.83
Heat release (II) [kW]	48.36	54.15	58.60
Thermal efficiency [%] (min)	2.21	2.60	2.78
(max)	3.92	4.47	4.78

参考文献

- Schauer, F., Stutrud, J., and Bradley, R., Detonation Initiation Studies and Performance Results for Pulsed Detonation Engine Applications, AIAA2001-1129.
- 村山元英, 小原哲郎, 大八木重治, 発電用パルスデトネーションエンジンの成立性検討, 平成14年度衝撃波シンポジウム, pp. 365-366, 2003.
- 遠藤琢磨, 八房智頭, 滝史郎, パルスデトネーションエンジンの性能に関する熱力学的解析, 平成15年度衝撃波シンポジウム, pp. 109-112, 2004.
- 中島勝哉, 松尾亜紀子, 村山元英, タービン特性を考慮した発電用PDE内部流れの数値解析, 第35回流体力学講演会, pp. 315-318, 2003.
- 桜井毅司, 小原哲郎, 大八木重治, 発電用PDEにおける接続形状に関する数値解析, 第42回燃焼シンポジウム, pp. 391-392, 2004.
- Schauer, F., Bradley, R., Hoke, J., Interaction of a Pulsed Detonation Engine with a Turbine, AIAA 2003-0891.
- 前田慎市, 笠原次郎, 松尾亜紀子, 遠藤琢磨, 自動車用ターボチャージャーを用いたパルスデトネーションエンジンの熱効率計測, 平成16年度衝撃波シンポジウム, pp. 363-366, 2005.
- 吉永公一, 大深健嗣, 越智亨, 八房智頭, 遠藤琢磨, 滝史郎, 青木修一, 梅田良人, 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-, 平成16年度衝撃波シンポジウム, pp. 353-356, 2005.
- 桜井毅司, 吉橋輝夫, 小原哲郎, 大八木重治, 埼玉大学におけるパルスデトネーションエンジンの研究, 日本機械学会誌, 第47巻140号, pp. 17-24, 2005.
- Kailasanath, K., Recent development in the research on pulse detonation engines, AIAA 2002-0470.
- Perkins, H. D., Sung, C.J., Effects of Fuel Distribution on Detonation Tube Performance, Journal of propulsion and power vol. 21, No.3, 2005.
- 大八木, 小原, 桜井, 村山, “パルスデトネーションエンジン連続作動特性の研究”, *CRCSU Report*, 4, pp.44-47(2004).
- 南雲, 桜井, 小原, 大八木, 村山, “パルスデトネーションタービンエンジンの部分充填効果”, 第37回流体力学講演会講演集, pp.325-328 (2005).
- Sakurai T., Ooko A., Yoshihashi T., Obara T., Ohyagi S., Investigation of the Purge Process on the Multi-Cycle Operations of a Pulse Detonation Engine, Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Vol.48, No.160, pp.78-85, 2005.