

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2007～2008

課題番号：19560791

研究課題名（和文）パルスデトネーションエンジンに関する試作研究

研究課題名（英文）Experimental Study of a Pulse Detonation Engine

研究代表者

利光 和彦（TOSHIMITSU KAZUHIKO）

大分工業高等専門学校・機械工学科・教授

研究者番号：10180150

研究成果の概要：

小型パルスデトネーションエンジン（以下 PDE と略す.）と呼ばれる新しい発想の高い熱効率機関についての試作研究を行った。得られた成果としては、

- (1) PDE の基本設計仕様の決定、
- (2) 単一パルス PDE 装置の設計・製作、
- (3) 本試作実験装置でのデトネーション発生条件の把握、
- (4) 単一パルスエンジン推力と混合気との関係の把握、
- (5) CFD に基づく基礎的な超音速燃焼シミュレーションプログラムの作成と計算、
- (6) PIV 実験システムの構築

である。

以上、研究成果として、当初計画していた単一パルスデトネーション実験装置および計測システムを構築した。その装置を用いて小型 PDE 開発設計製作のための基礎データの蓄積を行い、多くの知見を得ることができた。

交付額

(金額単位：円)

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|--------|-----------|---------|-----------|
| 2007年度 | 1,500,000 | 450,000 | 1,950,000 |
| 2008年度 | 1,500,000 | 450,000 | 1,950,000 |
| 総計 | 3,000,000 | 900,000 | 3,900,000 |

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・航空宇宙工学

キーワード：推進，エンジン，PDE

1. 研究開始当初の背景

次世代の高効率エンジンとして有望視されるパルスデトネーションエンジン（PDE）は、定容燃焼であるため、ガスタービンエンジンのブレイトンサイクルよりも効率の良いハンフリーサイクルで近似できる熱力学的特性を持つ。現在、地球温暖化防止に役立つ新しい高熱効率熱機関として世界で実用化に向けて研究が進められている。

2. 研究の目的

小型の PIV 対応型 PDE 実験装置を製作し、出口部の形状と推力の関係、多気筒化とその干渉流について PIV 計測を実施し、流れと推進性能について熱流体力学的に解明することを目的とする。

また、数値流体力学（CFD）による計算結果と計測結果を比較検討し、計算手法の妥当性と有用性を検証する。

3. 研究の方法

新規にパルスデトネーションエンジン (PDE) 試験装置を設計・製作し作動方法を確立する。特に、PIV 対応型 PDE の動作条件と超音速流の速度場計測可能条件の関係を明らかにする。

(1) PDEの基本設計仕様の決定

本研究のPDEは10Hzでの作動を目標とし、既存のPIV計測が同期できるように設計仕様を決定する。この際、広島大学、埼玉大学などの他機関PDE実験装置に関する情報を収集し、設計の参考とする。

(2) PDEの設計・製作

PDE本体の実験装置を製作する。基本的には1mの内径30mmの単気筒エンジンとする。イオンプローブ、点火装置等を組み合わせ、単気筒デトネーション実験装置を製作する。また、ダンプタンクとの間に、薄壁円筒形推力測定装置を組み込む。

(3) PDEの連続作動方法の確立

PDE動作のためには製作する実験装置でのデトネーション基礎データが欠かせない。そこで、酸化剤と燃料の割合（等量比，酸素とメタンのモル分率），全体充填圧力を変化させ、発生できるデトネーション速度，推力との関係を把握し，数値計算による理論値との比較を行う。これにより，単気筒PDE最適作動条件を類推するデータベースを構築する。混合ガスとして，メタン-酸素デトネーション作動条件を明確にする。

(4) 数値計算デトネーション管内状態のCFDシミュレーション

既存の酸素-水素オイラーコードおよび汎用熱流体解析プログラム (ANSYS CFX) を用いて，デトネーション管内の状態および排気状態をシミュレーションし，PDEの設計指針並びにPIV適用のための条件確立する。

4. 研究成果

(1) PDEの基本設計仕様の決定及び(2)単一パルスPDE装置の設計・製作：単気筒PDE実験のための基本装置の設計製作：昨年度製作した部品等を組み合わせ，単気筒デトネーション実験装置を完成。また，ダンプタンクとの間に，薄壁円筒形推力測定装置を設計製作し完成させた。(図1)

(3) 本試作実験装置でのデトネーション発生条件の把握：メタン-酸素の混合比（当量比 ϕ ）を0.7~2.2で変化させデトネーション (DT) 速度を測定した。デトネーション速度と混合気の当量比の関係を図2に，燃焼

火炎噴出の状態を図3に示す。その結果，当量比1.7以下でDT速度は2300~2600[m/s]となり，DTの発生を確認した。また，理論速度 (CJ速度) と比較すると，誤差5%程度でDT速度は一致した。 $\phi \sim 2.0$ では速度が急激に小さくなるため， $\phi \geq 2.0$ ではDTとならずデフラグレーションと呼ばれる通常の燃焼状態となることが確認された。

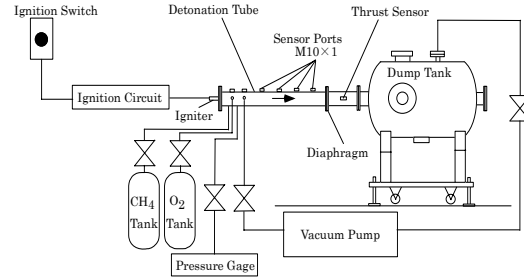


図1 装置概略

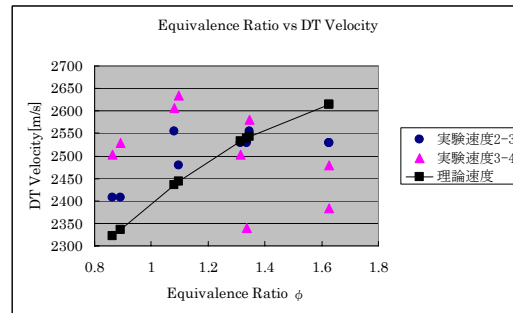


図2 当量比とDT速度

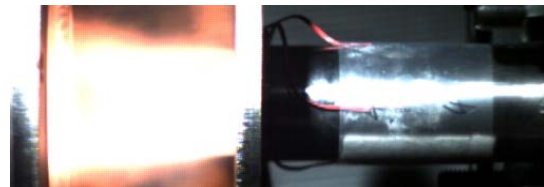


図3-1 DT発生時噴出火炎



図3-2 超音速燃焼状態で見られるダイヤモンド火炎



図3-3 DT未発生時噴出火炎

(4) 単一パルスエンジン推力と混合気との関係の把握：弾道振り子法に基づく推力測定装置とひずみゲージ法による推力測定装置（図4）を製作し、上記条件で推力測定実験を行った。当量比0.8~2.0の間では比推力 I_{sp} は1000-1400[s]であり、ラムジェットエンジン程度の比推力を実現した。ひずみゲージ法による推力測定値は弾道振り子法より10%大きくなり、今後精度の向上が必燃状態であり、今後改良すれば簡易に推力測定ができる可能性のあることが分かった。

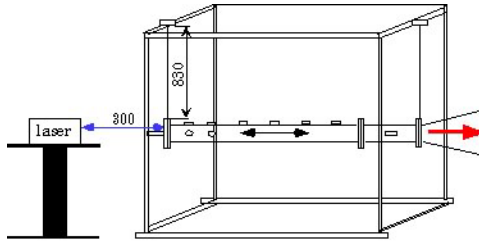


図4 弾道振り子法装置図

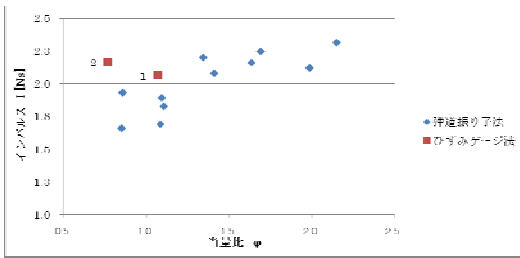


図5 弾道振り子法・ひずみゲージ法結果の比較

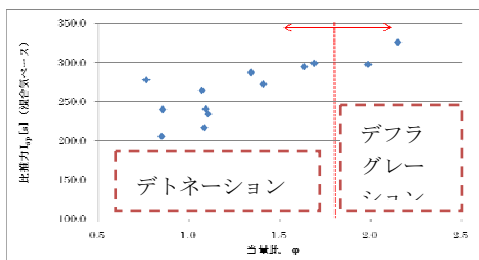


図6 比推力 I_{sp} (混合気ベース) と当量比 ϕ

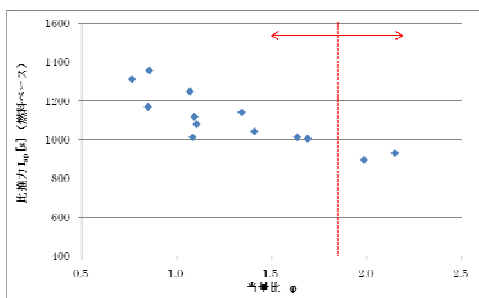


図7 比推力 I_{sp} (燃料ベース) と当量比 ϕ

(5) CFDに基づく基礎的な超音速燃焼シミュレーションプログラムの作成と計算：PDE管内の超音速燃焼を数値計算できるように、水素-酸素の混合気体超音速燃焼プログラム改良した。計算条件を表1に示す。計算モデルを図8に示す。計算負荷（時間）が小さいオ

表1 Calculation conditions without viscosity.

| No. | U (m/s) | p_∞ (atm) | T_∞ (K) | $H_2/O_2/N_2$ | Mesh Size |
|-------|--------------|---------------------|-------------------|-------------------|--------------|
| 1 (a) | 1800 | 0.5 | 300 | 10.0/5.0/ 85.0 | 151 × 151 |
| 1 (c) | 〃 | 1.0 | 〃 | 〃 | 〃 |

Projectile Diameter 19mm

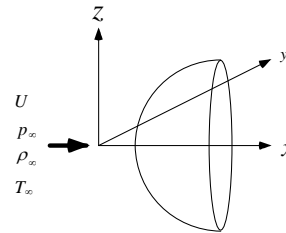
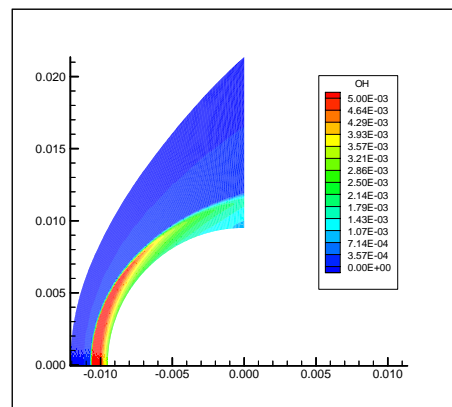
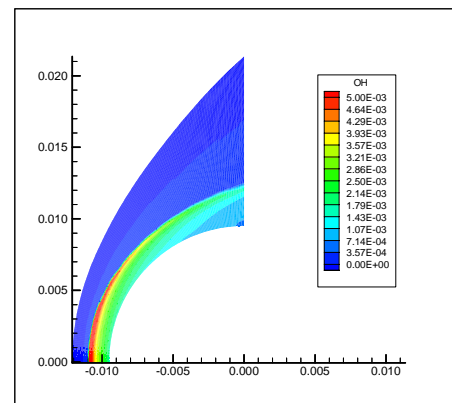


図8 Analytical Model



(a) $p_\infty = 0.5$ atm



(c) $p_\infty = 1.0$ atm

図9 Effect of upstream pressure on OH species distribution without viscosity.

イラーコードでの計算結果を図9に、層流粘性効果を考慮したナビエーストークスコードでの計算結果の一例を示す。

オイラー方程式に基づく化学反応数値解析コードのより、物体の直径、混合気体のモル分率、無限上流圧力を変化させ、燃焼場の圧力、温度、密度分布、OH 分布、マッハ数に対する影響を調べた。その結果、以下のことが言える。

- ・ 流れ場に対する影響は無限上流圧力が最も顕著で、無限上流圧力を $P_\infty = 0.5, 0.75, 1.0 \text{ atm}$ と大きくするにつれて、圧力、温度、密度、マッハ数いずれも大きい領域が増える。また、OH 化学種分布は逆に衝撃波に近い領域で狭い範囲での分布になる。OH 化学種は水素-酸素の反応領域を示すので、圧力が大きくなるにつれて、反応領域が狭くなると考えられる。

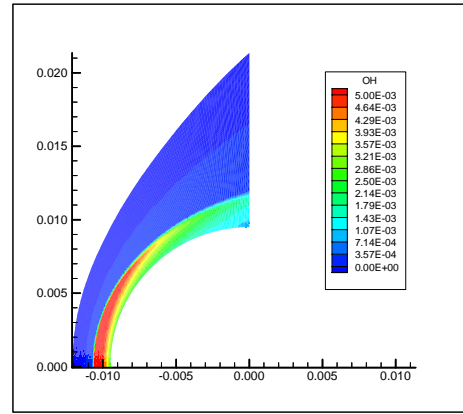
次に粘性効果を考慮した水素-酸素反応 N-S 方程式計算コードによる数値計算から、以下のことが言える。

- ・ 粘性効果を加えると、加えなかった場合より半球物体表面で温度の高い部分が薄く広がるが、最高温度は粘性、非粘性計算共に 2290K で同じになる。したがって、モデル表面の熱的な問題を考えなければならない場合には、高温表面積が広い結果を示す N-S コードのほうが、設計する上で安全と言える。
- ・ 半球体の直径、混合気体の水素モル分率、無限上流圧力をパラメトリックに変化させた場合の燃焼場の圧力、温度、密度分布に対する影響は、粘性がある場合とない場合とで、変わらず、無限上流圧力と $\text{H}_2/\text{O}_2/\text{N}_2$ のモル比は燃焼場に強く影響を与え、飛翔体の直径は結果にほとんど影響を与えない。

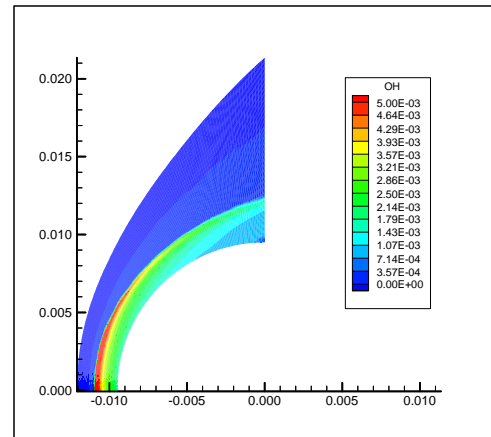
(6) PIV 実験システムの構築：PDE 管内の間欠現象を測定できるよう、PIV システムの光源発振制御システムを構築した。システム構築にあたり、先ず 10Hz 作動する PDE を想定し、それに同期できる PIV システムである必要がある。したがって、本研究では図 11, 12 に示すような翼（振動物体）を 10Hz で振動させながら PIV 実験できる計測・制御システムの構築を行った。

実験は、翼を $\pm 30^\circ$ と $\pm 60^\circ$ で振動させた場合について行った。一回の同期撮影で 35 枚の画像を連続で撮影し、得られた画像を解析ソフトウェアにより、2 枚を一組として、17 枚の解析画像を得た。その一例として、 $\pm 60^\circ$ で振動させた場合で迎え角 59° での翼前縁振上時と振下時の結果を図 13 に示す。

翼振動に同期して、流れ場の速度ベクトルを求めることが出来、同じ迎え角 59° であっ



(a) $p_\infty = 0.5 \text{ atm}$



(c) $p_\infty = 1.0 \text{ atm}$

図 10 Effect of upstream pressure on OH species distribution without viscosity.

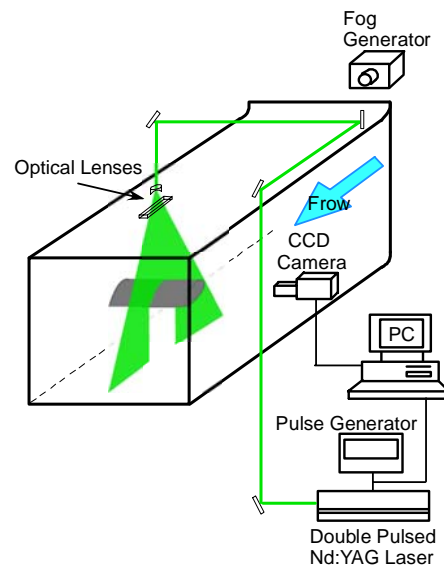


図 11 翼振動同期 PIV 計測システム

でも、流れ場は大きく異なる。振上時では翼背面で大きく剥離し、一方振下時では逆流が発生していることが分かる。

以上、研究成果として、当初計画していた単一パルスドットネーション実験装置および計測システムを構築し、PDEについての基礎データを蓄積した。これらに伴い前述の多くの知見を得ることができた。今後は、このデータを基に小型PDE & PIVシステムを開発する予定である。

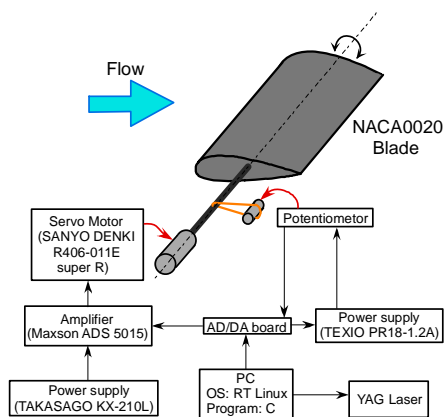
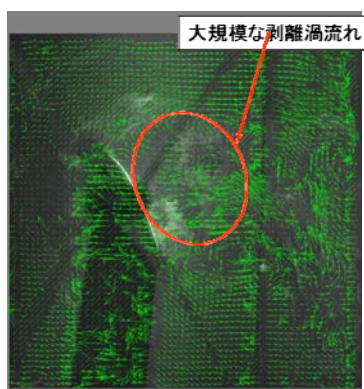
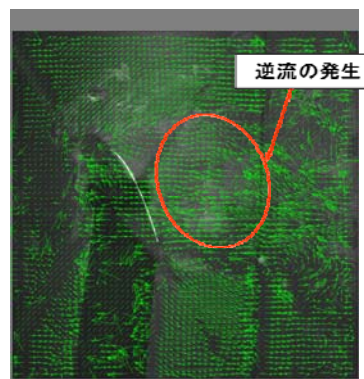


図 12 PIV システム制御系



(a) 振上迎え角 59°



(a) 振下迎え角 59°

図 13 10Hz 振動物体の PIV 計測の例

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 3 件)

(1) K. Toshimitsu, K. Nishikawa, W. Haruki, S. Oono, M. Takao and Y. Ohya, PIV measurement of Flows around the Wind Turbines with a Flanged-Diffuser Shroud, Journal of Thermal Science, Vol.17, No.4, 2008, pp. 375-380.

(2) 利光和彦, 春木 渉, 高尾 学, 大屋裕二, つば付きディフューザ風車後流の PIV 計測, 可視化情報学会論文集, 27 巻 10 号, 2007 年 10 月, pp. 84-89.

(3) 利光和彦, 高尾 学, 松田 淳, 安藤 亮, 案内羽根による直線翼垂直軸風車の性能向上と PIV 計測, 日本機械学会 2007 年度年次大会講演論文集 Vol. 2, 2007 年 9 月 11 日 (関西大学), pp. 359-360.

[学会発表] (計 3 件)

(1) 利光和彦, 古庄一樹, 岩本有輝, 水素一酸素一窒素混合気体中における半球物体周り衝撃波誘起燃焼流れ場の数値解析, 日本機械学会講演論文集 No. 085-2 (2008-10, 中国四国支部・九州支部合同企画 岡山講演会), 2008 年 10 月 22 日, pp. 211-212.

(2) K. Toshimitsu, K. Nishikawa, W. Haruki, S. Oono, M. Takao and Y. Ohya, PIV measurement of Flows around the Wind Turbines with a Flanged-Diffuser Shroud, Proceedings of The The 2nd Asian Joint Workshop on Thermophysics and Fluid Science (Luoyang, China), 2008, pp.264-270.

(3) 利光和彦, 高尾 学, 松田 淳, 安藤 亮, 案内羽根による直線翼垂直軸風車の性能向上と PIV 計測, 日本機械学会 2007 年度年次大会講演論文集 Vol. 2, 2007 年 9 月 11 日 (関西大学), pp. 359-360.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

利光 和彦 (TOSHIMITSU KAZUHIKO)
大分工業高等専門学校・機械工学科・教授
研究者番号: 10180150

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし