

水素ロータリエンジンのガス燃料噴流と燃焼火炎の可視化計測

Visualizations of Gas fuel Jet and Combustion Flame on Hydrogen Rotary Engine

研究代表者 工学部機械工学科 教授 田端 道彦
 Michihiko Tabata
 共同研究者 マツダ株式会社 主幹 香川 良二
 Ryoji Kagawa

In this paper, it is a purpose to obtain basic information of a hydrogen jet and combustion flame characteristics of the hydrogen rotary engine. The jet characteristics of the hydrogen gas injector were measured by using the high-speed shadowgraph method. As the result, the jet penetration of the low density gas was weak. The mixing of the direction of the jet axis was disturbed for the low jet pressure. Next, the combustion flame propagation of the hydrogen rotary engine was visualized by high-speed camera system with a transparent engine. The flame propagation was fast in the hydrogen combustion. It became clear that the end gas burn quickly at upstream combustion chamber.

1. はじめに

地球的規模の環境問題と化石エネルギー枯渇が大きな社会問題となっている。そのためCO₂削減の観点から、石油系の燃料を使用しない自動車に注目が集まっている。本研究ではその中で水素エネルギーの活用に注目した。水素の燃焼はCO₂を排出しないという特徴がある。水素を自然エネルギーから循環的に取り出せれば、水素を自動車用エンジンの燃料とした場合には、クリーンかつサステナブルな自動車となる^{(1),(2)}。

ロータリエンジンは吸気と燃焼行程が別室で行われるため、従来のレシプロエンジンと比較して水素燃焼とは相性が良いことは明らかになっている。しかしながら、実機の水素ロータリエンジンでの燃焼火炎状態を観察した例は少ない⁽³⁾。本研究では、ガス燃料噴流の挙動と水素ロータリエンジンの燃焼火炎を可視化計測して、ロータリエンジンでの水素燃焼の基礎的な現象を把握した。

2. ガス燃料噴流の計測

2.1 実験装置及び方法

図1にガス燃料噴流の実験装置の概略を示す。噴流の計測は焦点距離1.0 mの2枚のアクロマートレンズを用い、シャドウグラフ光学系を構成して行った。光源にはHe-Neレーザを用いた。噴射流体は、安全上の問題から、今回は水素の代わりにヘリウム

を用いた。水素ガス燃料噴射弁から容器内に噴射圧力0.2, 0.4, 0.6 MPaで、噴射期間を0.2 msとしてヘリウムを噴射する。噴流の発達過程は 1.0×10^4 コマ/s、シャッタ速度は 3.0×10^{-6} sで高速度カメラにより撮影した。雰囲気圧力は大気圧である。

2.2 ガス燃料噴流の挙動

シャドウグラフ法により撮影した噴射圧力0.2 MPaのガス燃料噴流の一例を図2に示す。水素ガス燃料噴射弁の先端は画像の上端より1.5 mm上部にある。噴射後、噴流先端では混合が進み、きのこ状に広がっていることがわかる。これはヘリウムが軽く、動粘度が高いために空気と混ざりにくいことが原因であり、水素でも同様な現象が起こっているものと考えられる。時間とともに、混合の進んだ先端部は移動し、半径方向に広く広がる。それに対して噴流根本付近は定常的になり、噴流への空気導入も

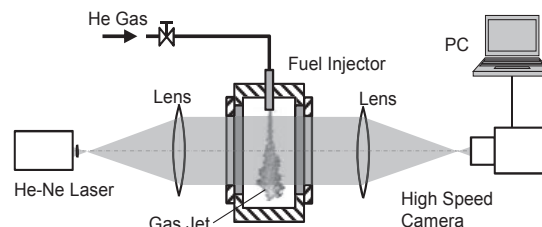


図1 ガス燃料噴流の実験装置概略

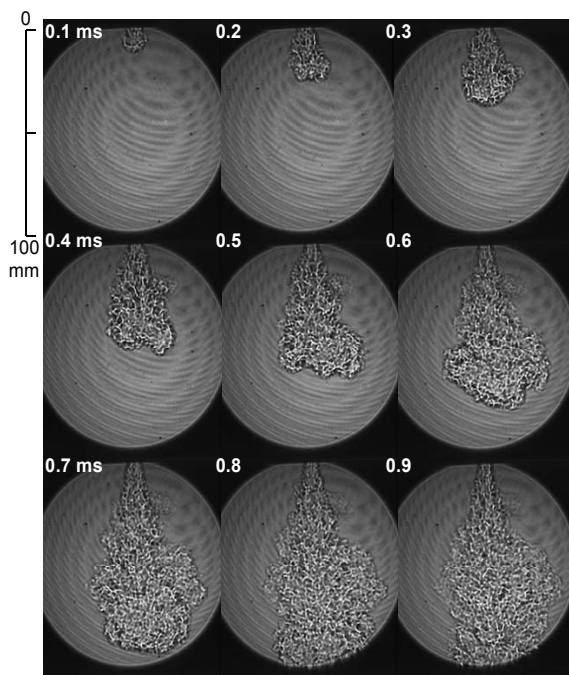


図2 ガス燃料噴流の挙動 ($P_{inj}=0.2$ MPa, He Gas)

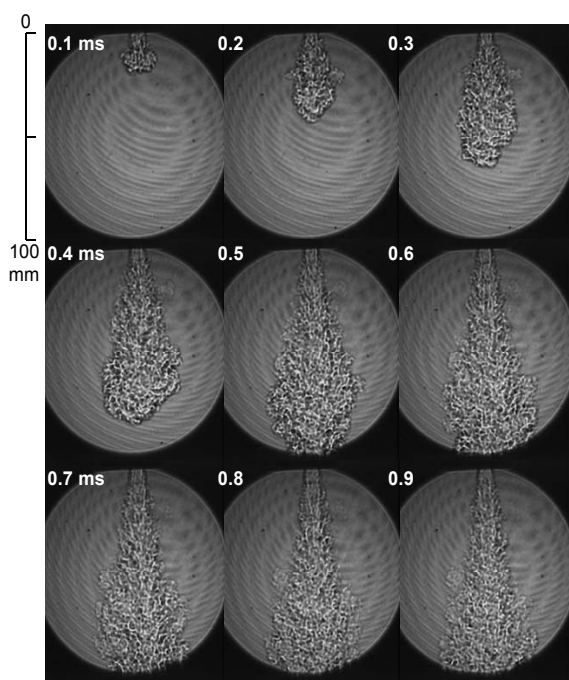


図3 ガス燃料噴流の挙動 ($P_{inj}=0.6$ MPa, He Gas)

定常化している。

図3は噴射圧力が0.6 MPaで噴射した場合の撮影結果の一例である。図2の0.2 MPaの場合と同様に先端はきのこ状に発達するが、噴射圧力が高くなる

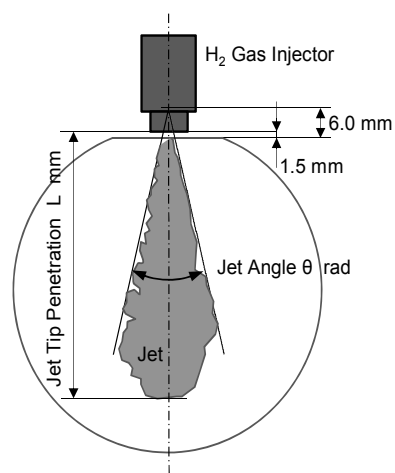


図4 噴流先端到達距離と噴流角

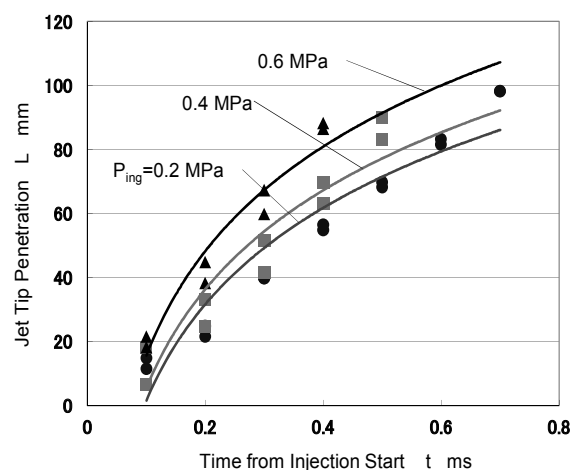


図5 噴流到達距離に及ぼす噴射圧力の影響

と、噴流の噴射方向への噴出速度が速く、噴流半径方向への広がり方が抑えられていることがわかる。また噴射後、噴孔近くに形成される定常的な部分も長くなるのがわかる。

これらの撮影結果を噴流特性値として、図4に示すような、噴流先端到達距離と噴流角で整理した。噴射弁出口から噴射後噴流が到達した距離を噴流先端到達距離 L とした。また、噴流角 θ は噴流中心軸上で画像上端から 6.0 mm の所に仮想頂点を取り、噴流の両側に頂点から線を引きその角度を測定した。

噴流先端到達距離に及ぼす噴射圧力の影響を図5に示す。時間が進むごとに噴流の到達距離は減衰する。実験雰囲気の大気圧下では、到達距離は 1.0 ms 程度で 100 mm 程度に達することがわかる。また、噴射圧力が増加するほど到達距離が増すことがわか

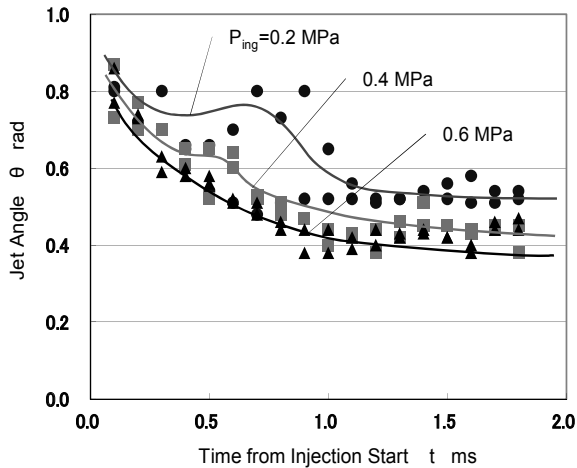


図6 噴流角に及ぼす噴射圧力の影響

る。

図6に噴流角に及ぼす噴射圧力の影響を示す。図より全体として、噴流角は噴射後小さくなり、その後はほぼ一定となる。噴射圧力が低い0.2 MPaの場合には、噴射直後に噴流角は大きくなる箇所があるが、これは噴流先端のきのこ状に広がったガスが速度を失い、後続のガス噴流に半径方向に押しつけられるためである。噴射圧力が増加するにつれ、そうした現象は抑えられることがわかる。また、噴射圧が増加するほど噴出速度が増加し、噴流角は小さくなる。噴射圧力が低い場合、ガス密度の低い噴射流体では、動粘度が高いために噴射直後の噴流先端の噴射方向への移動が妨げられる。そのため噴流先端の到達距離が抑制され、噴流半径方向への広がりが大きくなることから、低圧で水素を噴射させる場合には、噴射圧力をある程度高くしないと、噴射方向への混合を促進させることが難しいことがわかった。

3. 水素ロータリエンジンの燃焼火炎計測

3.1 実験装置及び方法

前述のガス燃料噴射弁を水素ロータリエンジンに設置して、水素ガスを噴射し燃焼室内の水素燃焼の火炎伝播状態を調べた。表1に実験で用いた可視化ロータリエンジンの主要緒元を示す。また、図7は燃焼室内の水素ガス燃料噴射弁および点火プラグの配置を示す。ロータ頂上の水素ガス燃料噴射弁から水素を吸気行程に燃焼室内に直接噴射し、LプラグとTプラグの2本の点火プラグを用いて点火を行う。

図8に燃焼火炎可視化計測装置の概略を示す。水素燃焼の混合状態および、燃焼状態を計測するため

表1 水素ロータリエンジンの主要緒元

Engine type	13B - MSP
Displacement	0.654L
Compression Ratio	10.0:1
Plug position	L-plug:23mm
	T-plug:30mm

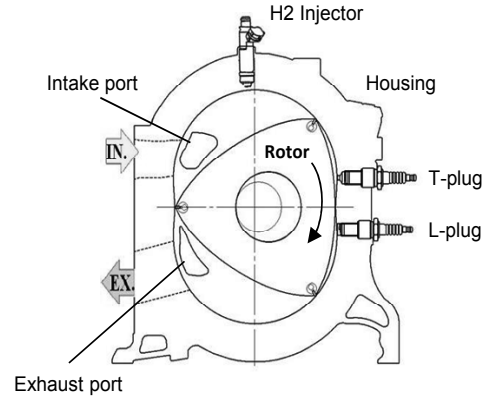


図7 水素ロータリエンジンの概略

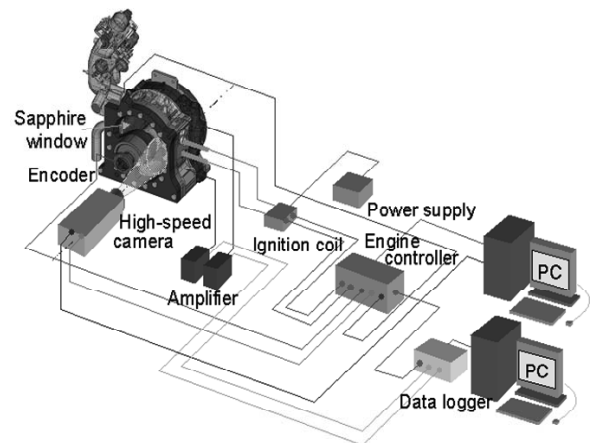


図8 水素ロータリエンジン燃焼火炎計測装置概略

に、単ロータのフロントサイドをサファイア窓に変換した可視化水素ロータリエンジンを試作し用いた。水素ロータリエンジン内の燃焼状態は、高速度ビデオカメラにより撮影する。燃料噴射時期、点火時期、高速度カメラでの撮影の同期はエンジンコントローラを用いて制御した。燃料は水素100%とし、エンジン回転数を1000 rpm、吸気スロットル全開、燃料噴射時期をABDC 30 deg., 噴射圧力0.6 MPa, 噴射パルス幅5.0 msとし、混合比は空気過剰率 $\lambda =$

2.0 程度である。燃料噴射圧力は、噴流の観察結果から、噴射方向への混合の促進を考えて、噴射弁の噴射圧力の上限である 0.6 MPa と設定した。点火時

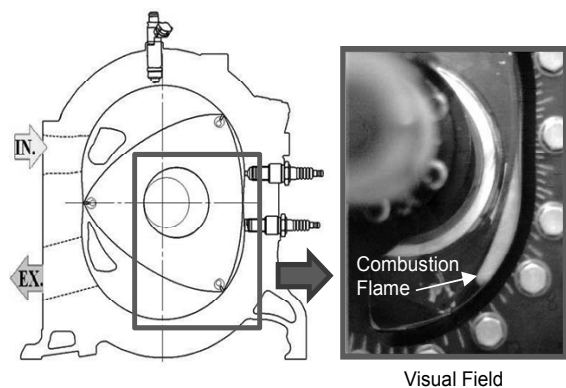


図9 水素ロータリエンジン燃焼火炎計測領域

期は BTDC 5.0 deg. とし2本の点火プラグ (T, L プラグ) で同時点火した。図9に高速度カメラによる撮影領域を示す。図に示すように燃焼室内での燃焼火炎が観察できる領域とした。水素燃焼火炎の撮影は 4.0×10^3 コマ/s にて撮影した。

3.2 水素ロータリエンジンの燃焼火炎の挙動

水素燃焼火炎の撮影結果の一例を図10に示す。圧縮上死点 (TDC) から出力軸回転角度 6.0 deg. 刻みで ATDC 102.0 deg. までの画像を示している。ATDC 6.0 deg.の画像からLプラグからの火炎の伝播が観察できる。Tプラグのからの火炎伝播は少し遅れ、ATDC 12.0 deg.の画像で確認できる。これは、点火時期は両点火プラグともに同時であるが、Tプラグがロータリエンジンの構造上、図7に示すようにプラグホールを介して少し燃焼室より奥まった位置にあるためである。

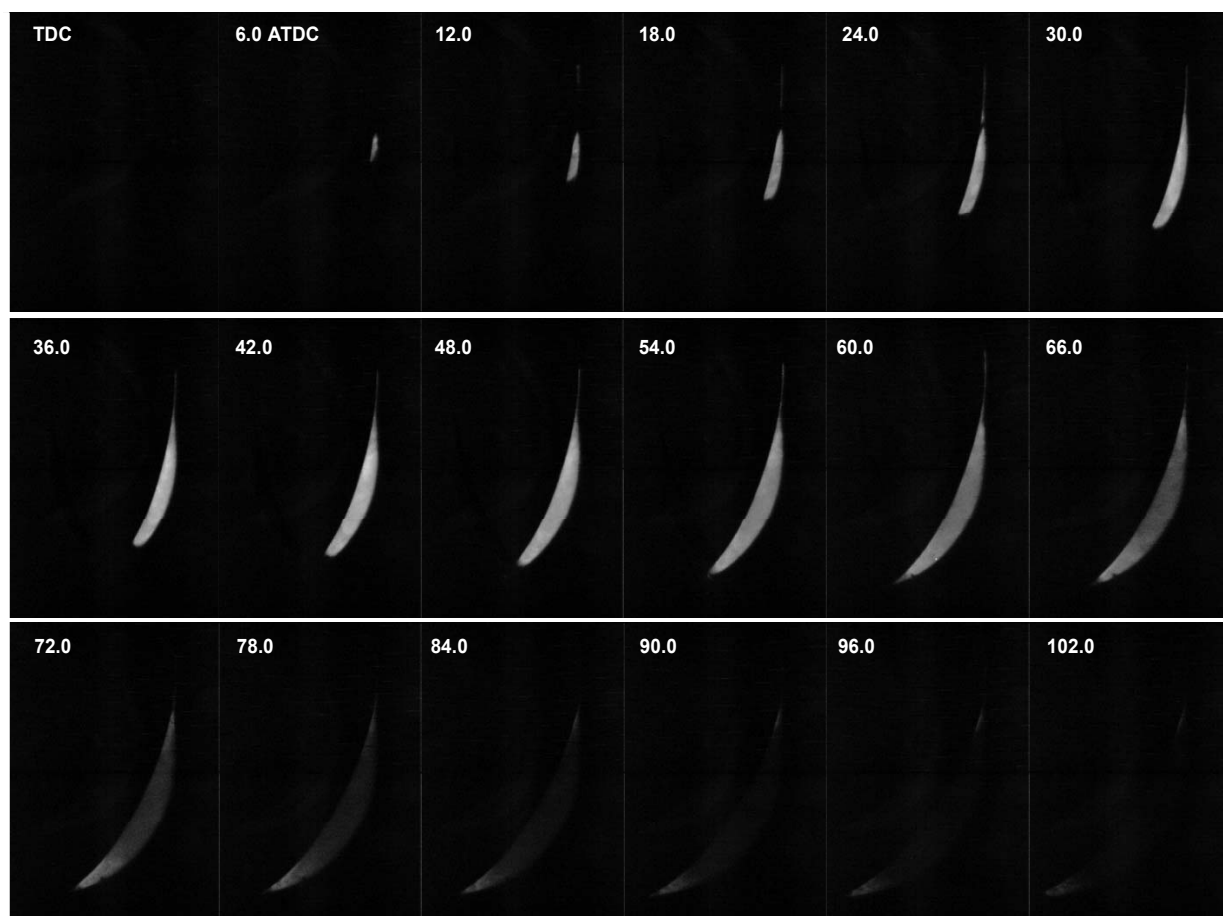


図10 水素ロータリエンジンの燃焼火炎の挙動

H_2 100 %, $N=1000$ rpm, $I_g=BTDC$ 5/5 deg.(L/T), Open throttle, $\lambda=2$,
 $t_{inj}=ABDC$ 30 deg., $P_{inj}=0.6$ MPa, $Inj.Puls=5.0$ ms

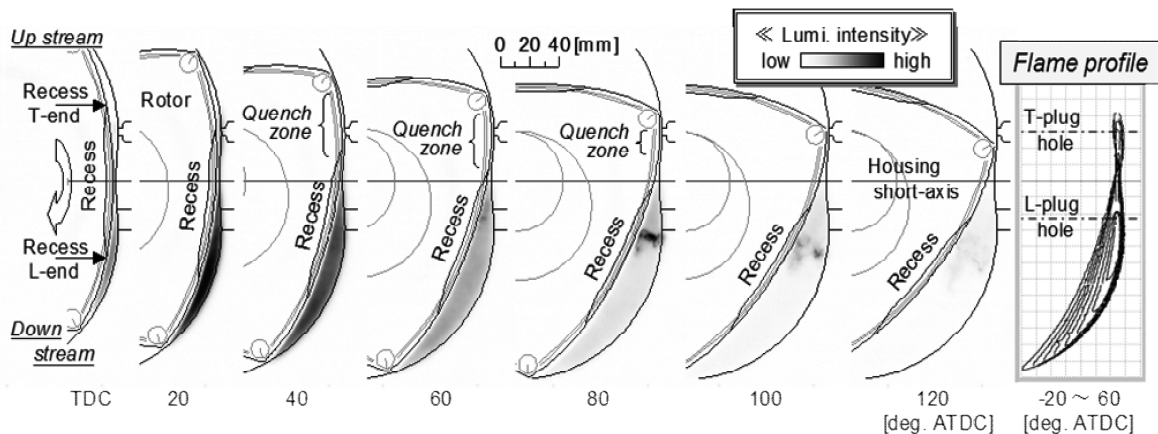


図 11 ガソリンロータリエンジンの燃焼火炎の挙動⁽⁵⁾

Gasoline, N=1500 rpm, I_g =BTDC 20/15 deg.(L/T), P_i =294 kPa, λ =1

火炎は時間とともに両点火プラグからロータ回転方向に向けて広がることが確認できる。これはロータリエンジンの燃焼室内において、点火時期近傍で、ロータの回転方向に沿った強い空気流動が存在するためである⁽⁴⁾。両プラグから伝播する火炎の速度は同程度であり、ATDC 24.0 deg. 後、Tプラグからの火炎は、Lプラグ近傍でLプラグからの火炎に接し、一体となってロータ回転方向の燃焼室に広がることがわかる。

その後、ATDC 50.0 deg.程度から、ロータの逆回転方向への火炎の広がりが観察でき、燃焼室全体に火炎が伝播する。これは燃焼の進行に伴い、燃焼室内のロータ方向の空気流動が抑制され、ロータ逆回転方向のエンドガスが燃焼していたためである。空気過剰率 λ =2.0 相当の火炎伝播としては、かなり速く燃焼室内に火炎が伝播しており、水素の燃焼速度の速さがうかがえ、水素による高速な火炎伝播の特性を示している。

比較のため、以前ロータリエンジンのガソリン燃焼火炎を同様に高速度撮影し解析した結果を図 11 に示す。ガソリンでは空気過剰率 λ =2.0 では燃焼できないため、実験条件は一般的な部分負荷燃焼の回転数 1500 rpm, 平均有効圧力 294 kPa, 点火時期, BTDC 20/15 deg. (L/T)である。この条件では BTDC 60 deg.程度までは、ロータ逆回転方向のエンドガスの燃焼は観察されず、その後ゆっくりとエンドガスが燃える。条件によっては、エンドガスがクエンチングを生じることもあり、ロータリエンジンでの火

炎伝播の大きな課題である。エンドガスの遅い燃焼が効率的な燃焼の妨げとなっている⁽⁵⁾。これに対して、前述の水素の燃焼では比較的早い段階でエンドガスの燃焼が生じ燃焼が終了する。ガソリン燃焼に対して、水素燃焼は火炎伝播の観点からはかなり良好な燃焼が期待できることがわかった。

4. まとめ

ガス燃料噴流の計測および、水素ロータリエンジンの燃焼火炎計測を行い以下のことが明らかとなり、水素ロータリエンジンの燃焼状態の基礎的情報を得ることができた。

- 1) 低密度ガスの噴流は噴射後、噴流先端がきのこ状に発達する。その後、噴射口付近は定常化する。
- 2) 噴流は時間とともに減衰し、噴射圧が増加するほど噴流の到達距離は長くなる。
- 3) 噴射圧力が低い場合には、噴流先端の速度が低下し、噴流半径方向に広がるため、噴流角は噴射後増加するが、その後減少し一定となる。また、噴射圧が増加するほど噴流角は小さくなる。
- 4) 燃焼初期は、ロータリエンジンの強いロータ回転方向の流動により、水素燃焼火炎は下流に発達する。
- 5) 火炎伝播速度は速く、ガソリン燃焼で問題となる燃焼後半でのロータ回転の逆方向のエンドガス用域への火炎の伝播も速く生じ、エンドガスの燃焼も良好である。

謝辞

本研究の遂行にあたり，実験に協力された本学4年生の岡村，増田君に謝意を表す。

参考文献

- (1) 森本, “水素ロータリエンジンの開発”, *Motor ring*, No.24, (2007-3).
- (2) 森本, 水島, 定平, 堂園, 内田, “RX-8 ハイドロジェン RE の紹介”, *マツダ技報*, No.22 (2004-4) pp.132-138.
- (3) 堤, 山村, 香川, 中倉, 橋本, 森上, 村瀬, “可視化ロータリエンジンを用いた水素燃焼に関する基礎研究”, 第 48 回燃焼シンポジウム講演論文集 (2010-12) p.238-239.
- (4) 槇, 森吉, 奥井, 田端, “ロータリエンジン燃焼室内流れ場の可視化”, 第 36 回可視化情報シンポジウム講演論文集 (2008-7).
- (5) Okui, N., Takahashi, Y, Kagawa, R., Tabata, M., Moriue, O., Murase, E., “Ignition and combustion of Rotary Engine -Effect of spark-plug arrangement affected flame propagation -”, *Review of Automotive Engineering*, No.30 (2009-10) pp.379-385.