

0.126cc 水素ロータリーエンジンの自立駆動実験

吉葉 慧^{*1} 神崎 昌郎^{*2}

Experiment of Self-sustaining Operation of 0.126cc Hydrogen Rotary Engine

by

Satoshi YOSHIBA^{*1} and Masao KOHZAKI^{*2}

(Received on March 31, 2016 and accepted on May 12, 2016)

Abstract

Recently, compact and high output power sources are demanded for versatile portable devices. Such power sources need to be environment-friendly. In this study, a 0.126cc hydrogen rotary engine was developed as an environment-friendly ultra-small power source. The hydrogen rotary engine (HRE) has high energy density, high power density and environment-friendly properties. In this work, we developed a small spark plug for self-operation of the HRE. In addition, we produced an engine starting device by using a propeller for reducing the rotational resistance of the device. In a visualized 0.126cc HRE, we observed sparks and combustion flame. Even in that case, the self-operation of the HRE could not be achieved. However, the exhaust gas temperature rose and the rotation speed of the starting device connected to the HRE became about 1000 rpm higher than in the case without the discharge spark in the HRE. This may have been due to assistance by the combustion pressure generated in the HRE

Keywords: Rotary engine, Hydrogen fuel, Small power source

1. 緒言

近年、災害時や IT 機器使用時における汎用性の高い分散型電源の動力源に対して小型・高出力化が求められている¹⁾。このような動力源として、高出力密度および高エネルギー密度を有する小型内燃機関が適すると考えられる。特に、ロータリーエンジン (RE) は、部品点数が少なくシンプルな構造であるため、小型化に適している。また、回転機構である RE は、ピストンが往復運動をするレシプロエンジンに比べて低振動および低騒音であるという室内利用の多い小型動力源に必要な特性を有している。しかし、RE を含む内燃機関はガソリンをはじめとする化石燃料を使用するため、地球温暖化や資源枯渇問題が懸念されている。その問題の対策として、二酸化炭素などの地球温暖化ガスを排出しない水素の利用が注目され、内燃機関に適用するための研究が多く行われている^{2,3)}。また、水素を用いた内燃機関は希薄燃焼においても運転可能であり、NO_xを空気過剰率 2 以上でほぼゼロにすることが可能である。

本研究では、非常時にも使用できる携帯式小型電源や小型災害用ロボットなどの動力源としての応用を目指し、超小型の水素ロータリーエンジン (HRE) の開発を行っている。これまで報告されている自立駆動 HRE としては 0.348 cc が最小であり⁴⁾、本研究ではこれより排気量の小さい HRE (0.126cc HRE) での自立駆動を目指すこと

とした。

水素はガソリンよりも可燃範囲が広く、水素内燃機関においてバックファイヤをはじめとする異常燃焼が発生しやすいことが問題となっている。そのため、水素の燃焼制御が課題となっているが^{5,6)}、RE は作動室が移動することで吸気、圧縮、膨張、排気を行うため、吸気室と燃焼室が分離していることから異常燃焼が発生しにくい。また、RE の構造上、高温となる排気バルブがないため、異常燃焼の対策が容易である。さらに、RE の燃焼室は扁平かつ膨張行程中に強い流れが生じるなど極めて独特であるため、可燃範囲が広く燃焼速度の速い水素燃料との相性は優れている⁷⁾。また、燃料電池に比べ水素内燃機関は低純度の水素においても運転が可能という点も大きなメリットである。しかし、水素内燃機関は、炭化水素燃料を用いた場合と比較して冷却損失が大きいため、熱効率向上などが課題となっている^{8,9)}。

これまでの研究において、0.126cc HRE の自立駆動を目的に、水素の理論空燃比の混合気を供給し、モータを直結させてエンジンを回転させた 0.126cc HRE モータ駆動実験 (モータ駆動実験) に取り組んだ。0.126cc HRE は自立駆動に至らなかったが、排気温度は上昇し、混合気が燃焼した時に発生したと考えられる燃焼音を断続的に観測した。自立駆動に至らなかった原因は、モータを直結させたエンジン始動方法および 0.126cc HRE の燃焼室壁面による熱損失であると考えられる。まず、エンジン始動方法として、外部電源より 0.126cc HRE に直結させたモータを回転させていた。始動後は外部電源を切る

^{*1} 工学研究科機械工学専攻修士課程

^{*2} 工学部機械工学科教授

ため、駆動実験時において燃焼室より発生した燃焼圧力のみでエンジンおよびモータを回転させる必要がある。しかし、発生した燃焼圧力ではモータの抵抗が大きいため、回転させるほどの圧力は得られず、自立駆動に至らなかったと考えられる。また、超小型の 0.126cc HRE の燃焼室においては、火炎核に対する燃焼室壁面の面積は大きくなるため、燃焼時に発生した熱エネルギーが燃焼室壁面に奪われ、断続的に燃焼したと考えられる¹⁰⁾。

本稿では、0.126cc HRE の始動方法における抵抗の低減および燃焼室壁面の熱損失を低減させ、燃焼の連続発生を目指して取り組んだ 0.126cc HRE 自立駆動実験について報告する。

2. 実験方法および実験装置

2.1 水素ロータリーエンジン

本研究では日東工作所に依頼し、製作して頂いた 0.126cc HRE を使用した。Fig.1 に 0.126cc HRE の内部構造を示す。材質は鋳鉄であり、重量は 65 g である。ローターは 1 円玉より小さいため、加工・組付け上の難しさから、通常の RE に備えられているサイドシール、コーナーシールはない。しかし、ステーションナリーギアやアベックスシールなども機械加工によって製作されている。Fig.2 に 0.126cc HRE の連通孔および吸排気ポートを示す。連通孔径は 1 mm、吸排気ポートの直径は 2 mm である。ポート形式は、吸排気ポートがローターハウジングの内周面に位置するため、高回転時に高出力を得られるペリフェラルポートである。

エンジンオイルには、市販されている RE 用オイルより低粘度である潤滑剤の呉工業製 5-56 を使用した。0.126cc HRE の構造上エンジンオイルを外部から供給することは困難であるため、駆動実験中にはエンジンオイルを供給せず、0.126cc HRE を組み立てる際に、構成部品に塗り付けた。

2.2 0.126cc HRE 用ローター放電型プラグ

RE の燃焼室には、ローターの回転方向に強い流れが生じるため、点火プラグのスパークによって形成された火炎核が消失することがある。これを防ぐために、プラグホールと燃焼室の間に連通孔を設けることで、新規の混合気が連通孔を通り、混合気の流れの影響を受けずにプラグホール内にて火炎核を形成できる。しかし、0.126cc HRE において、連通孔がエンジンオイルによって塞がれるため、新規の混合気をプラグホールに取り込むことができない。そこで、燃焼室に火炎核を形成させるため、中心電極とローター間で放電するローター放電型プラグ (Fig.3 参照) を製作した。主体金具には SUS304 製 M2.6 キャップボルト、絶縁体にはアルミナ絶縁管 (Al_2O_3 : 純度 99.6%)、中心電極にはカーボン抵抗体 (3 k Ω) を使用した。そして、抵抗体に配線コードを取り付け、電子制御式点火装置 (Capacitor Discharge Ignition: CDI) と接続した。Fig.4 に 0.126cc HRE におけるローター放電型プラグの取り付け位置を示す。ローター放電型プラグの中心電極を連通孔に通し、アベックスシールと

接触しないようにローターハウジング内周面から 0.1 mm のところで固定する。これにより、プラグの中心電極からローターのリセスに向けてスパークを発生させることができ、0.126cc HRE の燃焼室内に火炎核を形成さ

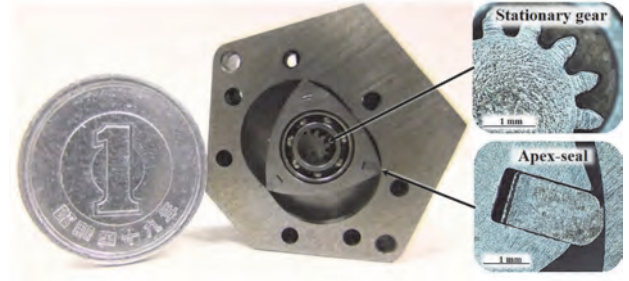


Fig. 1 Internal structure of 0.126cc HRE.

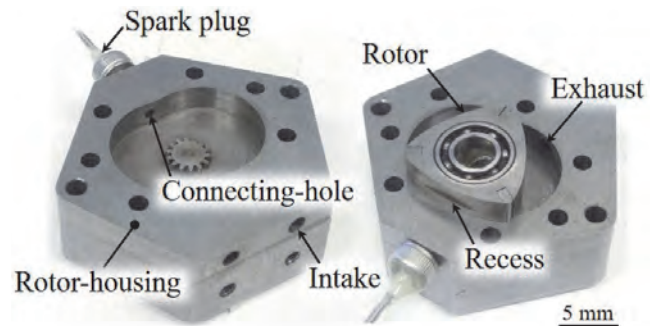


Fig. 2 Connecting-hole, intake and exhaust ports of 0.126cc HRE.



Fig. 3 Rotor discharge spark plug for 0.126cc HRE.

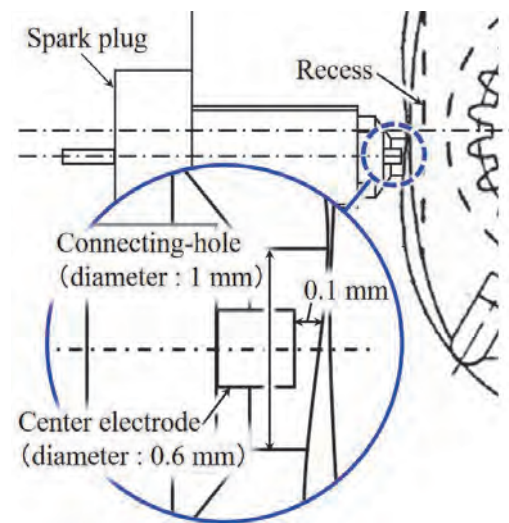


Fig. 4 Plug mounting position of rotor discharge spark plug in 0.126cc HRE.

せることができる。したがって、連通孔を通してプラグホール内に新規の混合気を取り込む必要がないため、着火性が向上すると考えられる。

2.3 0.126cc HRE 用テストベンチ

Fig.5 に 0.126cc HRE 用テストベンチの全体図を示す。水素および空気の供給にはマスフローコントローラ（フジキン製 FCST1005FC）を使用した。マスフローコントローラの制御には、パソコンを用いて専用の制御ソフトウェア（FCS-T シリーズ 9ch Monitor）を使用した。マスフローコントローラとエンジンとの間に逆止弁（TAIYO 製 CV104）および乾式安全器（日酸 TNAKA 製 FA-220-H）を設置することで、気体の逆流および逆火の発生を防いだ。Fig.6 に 0.126cc HRE と周辺機器との接続の様子を示す。エンジンが自立駆動した場合におけるエンジン始動装置の抵抗を低減させるために、モータを使用した始動方法ではなく、エキセントリックシャフトに取り付けたプロペラに圧縮した空気（最大：0.6 MPa）を吹き付けてエンジンを回転させた。圧縮空気の吹き付けにはエアークンプレッサを用いているため、時間経過と共に空気の圧力は低下するため、エンジンの回転数も低下した。また、バックファイヤの発生を抑制させるために、吸気管の直径は、水素の消炎距離¹¹⁾を参考に 0.5 mm とした。さらに、エンジンの回転数および点火タイミングの検出には、スリットカムディスクおよびフォトセンサを用いた。また、エンジンの排気管に熱電対を取り付けて排気

温度を測定した。

2.4 0.126cc HRE 用可視化フロントハウジング

Fig.7 に製作した可視化フロントハウジングを 0.126cc HRE に取り付けた様子を示す。材質には、耐熱性に劣るが、加工が容易で透過性に優れることから、アクリルを用いた。また、通常のフロントハウジング使用時と同様にベアリングを 2 個使用することで、エキセントリックシャフトの偏心を防いだ。また、可視化実験においては Fig.8 に示すように、点火タイミングの検出方式をマグネット方式に変更して可視化領域を拡大させた。エキセントリックシャフトにネオジム磁石を取り付け、ネオジム磁石がホールセンサ上を通過したタイミングにて点火信号を CDI に送る構造となっている。ネオジム磁石の固定位置は、スリットカムディスクのスリットと同じ位置であるため、点火タイミングはスリットカムディスク方式と同じである。また、可視化実験に使用する際は、エンジン内部の気密性を高めるため、ローターハウジングと可視化フロントハウジングの間にガスケットを取り付けた。

2.5 0.126cc HRE 用加熱装置

緒言で既述したように、燃焼室壁面による熱損失の低減を目的に、0.126cc HRE の内部温度を上昇させた。Fig.9 に 0.126cc HRE に加熱装置を取り付けた様子を示す。0.126cc HRE の周りをプラスチック製キャップで囲い、

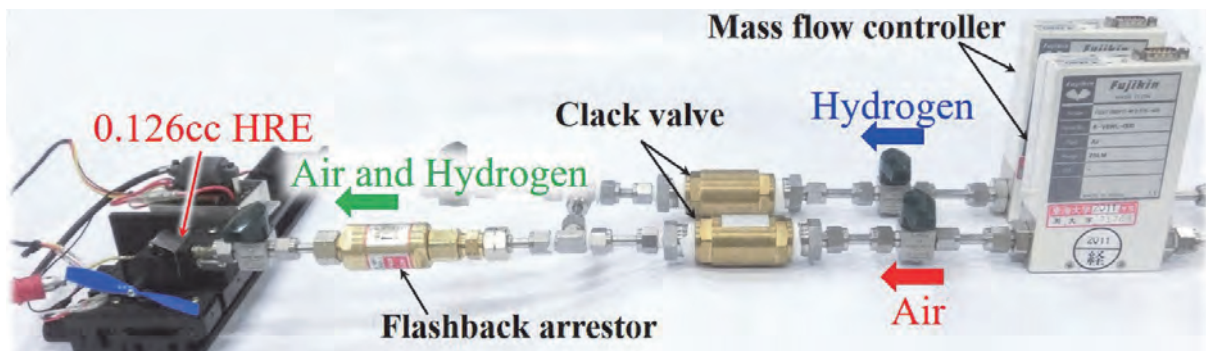


Fig. 5 Test bench for 0.126cc HRE.

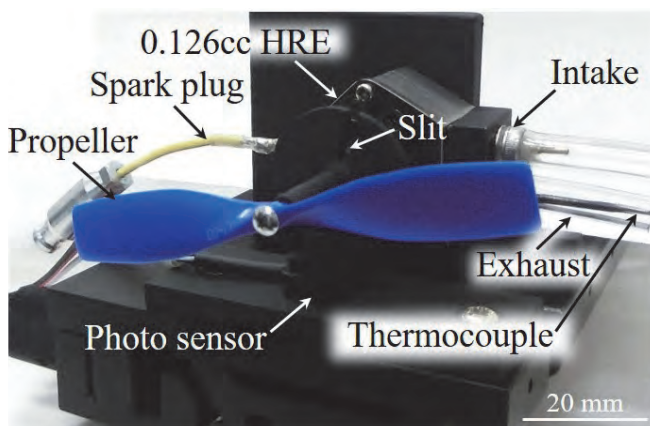


Fig. 6 Operation system of 0.126cc HRE.

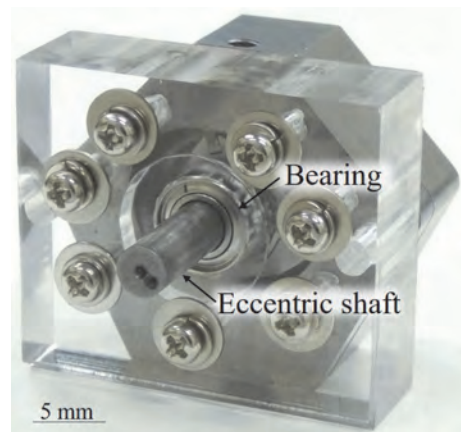


Fig. 7 Visualized 0.126cc HRE.

吸気管および排気管，試作ローター放電型プラグ，始動用プロペラをキャップ外部に設置した．ファンを用いて熱風をダクトからエンジン側を送ることで，エンジンの内部温度を 50°C まで上昇させることができた．なお，本実験においては，排気温度測定用熱電対にて測定した温度をエンジンの内部温度とした．

3. 実験結果

3.1 0.126cc HRE 燃焼室におけるスパークおよび燃焼火炎の発生の様子

Fig.10 に試作ローター放電型プラグを使用した 0.126cc HRE 可視化プロペラ駆動実験におけるスパークおよび燃焼火炎の発生の様子を示す．試作ローター放電型プラグのスパークは，中心電極からローターに向けて連続して発生した．また，スパーク発生箇所から排気側に燃焼火炎が発生したことから，0.126cc HRE の燃焼室に火炎核を形成させることができたと考えられる．また，燃焼火炎の色が赤いことから，純粋な水素の燃焼ではないことがわかる．これは，0.126cc HRE の構造上，混合気の燃焼と共にエンジンオイルが燃焼するため，赤い火炎が観察されたと考えられる．以上のことから，試作ローター放電型プラグは，0.126cc HRE の燃焼室においてスパークを連続して発生させ，混合気を燃焼させた．

3.2 スパークの発生が 0.126cc HRE の運転特性に及ぼす影響

Fig.11, Fig.12 にプロペラ駆動実験におけるスパーク未発生時および発生時の 0.126cc HRE の回転数，排気温度を示す．スパーク発生時の回転数は，未発生時に比べて約 1000 rpm 高く，最高回転数は 7200 rpm であった．排気温度は，スパーク未発生時では 16°C でほぼ一定であったのに対し，スパーク発生時の最高排気温度は 49.5°C まで上昇した．また，スパーク発生時において，実験開始から 120 s 経過後に温度が急上昇したのは，排気管内のエンジンオイルが燃焼したためである．

スパーク発生時において，40 s 経過後，排気温度および回転数は低下した．これは，測定開始から 40 s まで断続的に発生した燃焼により劣化したエンジンオイルが連通路を塞ぎ，失火したことが要因と考えられる．その後，100 s 経過時に排気温度の上昇と共に，わずかではあるが回転数も上昇した．これらのことから，測定開始から 40

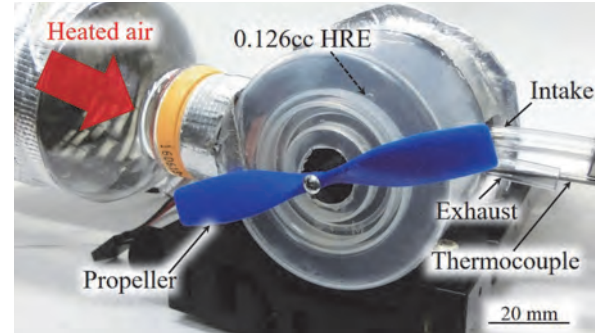


Fig. 9 Heating system for 0.126cc HRE.

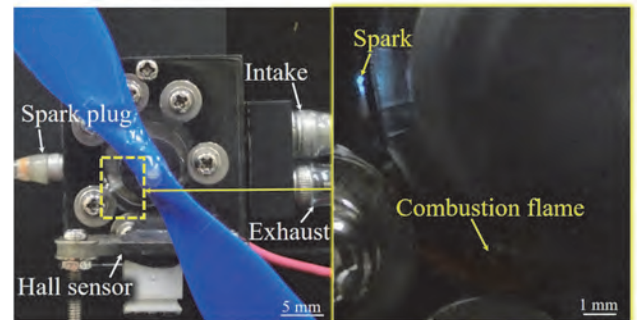


Fig. 10 Spark and combustion flame in Visualized 0.126cc HRE.

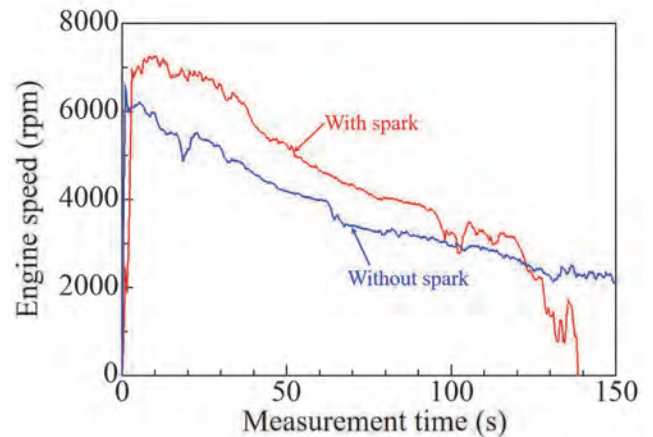


Fig. 11 Engine speed of 0.126cc HRE with or without spark.

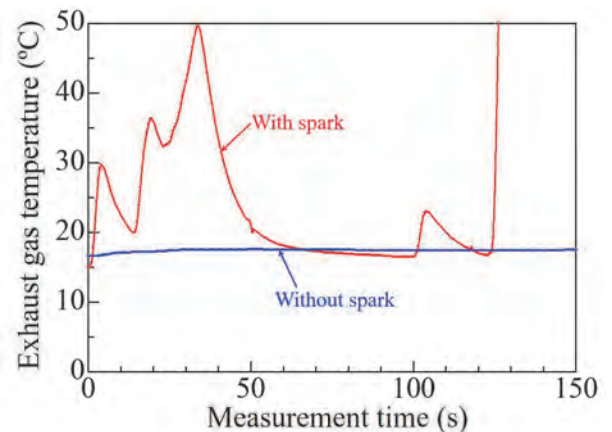


Fig. 12 Exhaust gas temperature of 0.126cc HRE with or without spark.

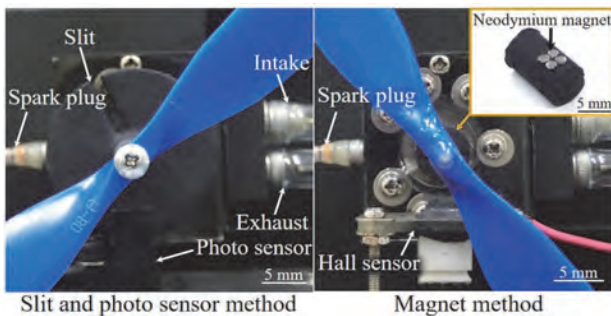


Fig. 8 Spark-timing detection methods of 0.126cc HRE.

sまでの間および100 s経過時において発生した燃焼は、エンジンの回転を補助していたと考える。しかし、自立駆動に至らなかったのは、連続して燃焼が発生しなかったため、この時に生じた0.126cc HREの燃焼室における燃焼圧力は、ローターを回転させるに十分な圧力でなかったと考えられる。また、燃焼音が断続的に観測されたことから、燃焼火炎の発生は断続的であったと考えられる。これより、0.126cc HREの燃焼室に形成された火炎核の熱エネルギーが、燃焼室壁面による熱損失により奪われたと考えられる。そのため、3.4項では熱損失を低減させ、連続燃焼の発生を目的とした実験について記述する。

3.3 0.126cc HREの駆動実験前後の内部観察

Fig.13に0.126cc HRE自立駆動実験前後のローターハウジング内周面における連通孔および吸排気ポートを示す。実験後のローターハウジングの連通孔側の内周面には、燃焼したエンジンオイルが付着しており、連通孔を塞いでいた。これより、駆動実験の後半においては、スパークが燃焼室内にて発生せず、混合気を燃焼させることができなかったと考えられる。また、実験後のローターハウジングの吸排気ポート側の内周面に燃焼したエンジンオイルが付着し、排気ポートが完全に塞がれた。これより、駆動実験の後半では排気ポートが塞がれて排気抵抗が増加し、燃焼した排気ガスを効率よく排出できないため、新規の混合気を吸入できず、自立駆動に至らなかったと考えられる。ただし、エンジンオイルが燃焼したことから、試作ローター放電型プラグは、連通孔が塞がれるまで燃焼室内にてスパークを発生させ、混合気を燃焼させることができたと考えられる。

Fig.14に駆動実験前後の0.126cc HREのリセスを示す。実験後のリセスの表面には燃焼したエンジンオイルが付着していた。また、リーディング（L）側の方がトレーディング（T）側に比べて、エンジンオイルが多く付着していた。これは、REの燃焼室が扁平であり、ローターが回転するため強い流れが存在していることが要因であると考えられる。そのため、0.126cc HREの燃焼室における火炎伝播を観察すると共に、0.126cc HREの燃焼室形状の最適化に取り組む必要がある。

3.4 0.126cc HREを加熱させたことによる影響

燃焼室壁面による熱損失を低減させるために、エンジン内部温度を50℃まで加熱してから、実験を開始した。Fig.15に0.126cc HRE加熱プロペラ駆動実験における回転数および排気温度を示す。加熱しない時（Fig.11のスパーク発生時）に比べて最高回転数に差は無かった。ただし、加熱した場合の最高排気温度は208℃であり、加熱しない時に比べて約150℃高かった。測定開始10 sから40 sまでの間において、排気温度は200℃近傍で一定となり、連続した燃焼が発生したと考えられる。ただし、加熱することにより回転時間は短くなった。これは、連続燃焼を実現したことでエンジン内部の温度が上昇し、エンジンオイルの劣化が促進され、潤滑性が低下したためと考

えられる。以上のことから、エンジンを加熱することで燃焼室壁面の熱損失を低減させ、連続燃焼を実現させたと考えられる。

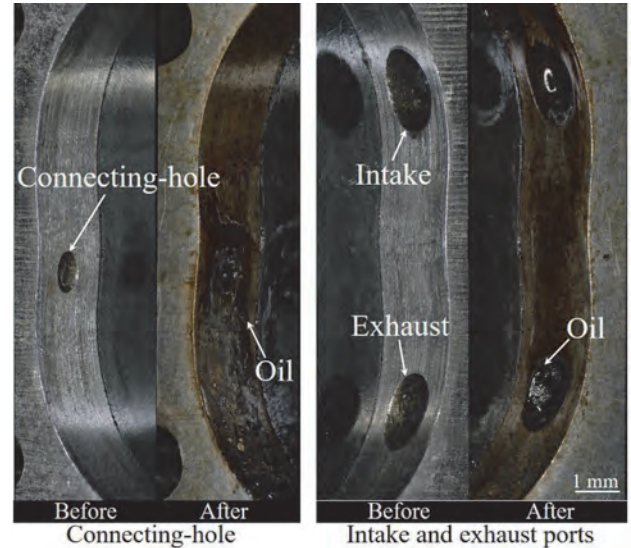


Fig. 13 Connecting-hole, intake and exhaust ports of 0.126cc HRE before and after experiment.

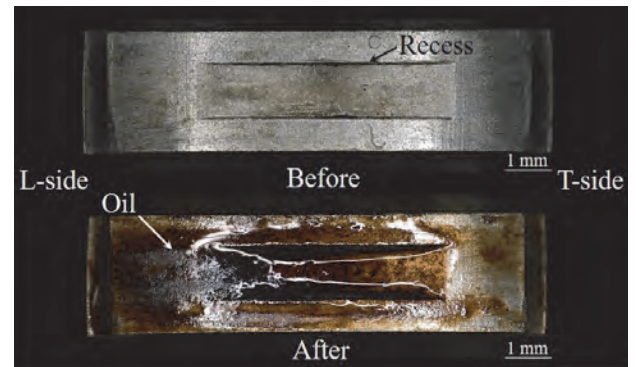


Fig. 14 Recess of 0.126cc HRE before and after experiment.

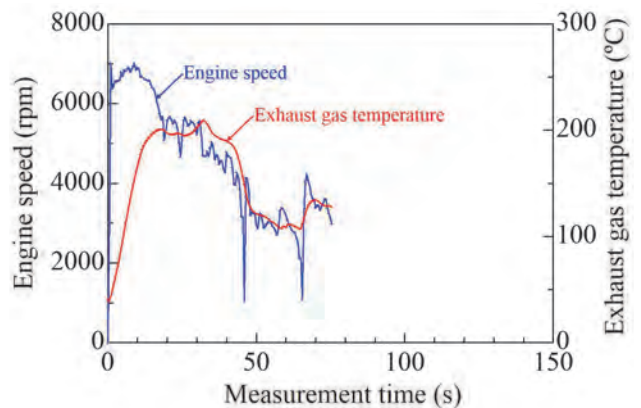


Fig. 15 Engine speed and exhaust gas temperature of heated 0.126cc HRE.

4. 結言

アクリル製 0.126cc HRE 用可視化フロントハウジングを製作し、燃焼室におけるスパークおよび燃焼火炎を観察した。また、エンジン始動方法における抵抗低減を目的に、プロペラを用いた始動方法を考案した。さらに、エンジンの熱損失を低減させるために、エンジンを加熱させてプロペラ駆動実験に取り組んだ。それぞれの実験において、回転数、排気温度および空気・水素流量を測定した。

1. アクリル製フロントハウジングを用いることにより燃焼室において燃焼火炎を観察することができるようになり、現状の 0.126cc HRE の周辺機器を用いることで理論空燃比の混合気への着火が可能であることが確認できた。
2. プロペラを用いた始動方法において、エンジンの回転を補助する燃焼を発生させることができたが、断続的な燃焼となり 0.126cc HRE は自立駆動に至らなかった。
3. 熱損失低減を目指して 0.126cc HRE を加熱させてプロペラ駆動実験に取り組み、自立駆動には至らなかったが、連続した燃焼を発生させることができた。

参考文献

- 1) 石野洋二郎, 手嶋啓介, 藤井博之, 山本優作, 齋木悠, 日本機械学会論文集 B 編, 79-805, 1805-1815 (2013).
- 2) 池田哲史, 日本エネルギー学会誌, 93-1, 46-51 (2014).
- 3) 関根花南, 及川昌訓, 高木靖雄, 佐藤 由雄, 日本機械学会論文集 B 編, 79-808, 274-281 (2013).
- 4) S. B. Sprague, S.-W. Park, D. C. Walther, A. P. Pisano and A. C. F-Pello, Int. J. Alternative Propulsion, 1, 275-293 (2007).
- 5) 石野洋二郎, 手嶋啓介, 藤井博之, 山本優作, 齋木悠, 日本機械学会論文集 B 編, 79-805, 1805-1815 (2013).
- 6) 近藤卓, 飯尾秀一, 昼間勝, 古濱庄一, 日本機械学会論文集 B 編, 63-610, 2209-2214 (1997).
- 7) 中島聖, 尹正虎, 本郷均, 植木信也, 香川良二, 横畑英明, マツダ技報, 31, 149-154 (2013).
- 8) 木戸口善行, 池田大志, 嘉本耕治, Ali Mohammadi, 三輪恵, 日本機械学会論文集 B 編, 70-699, 2922-2927 (2004).
- 9) 寺本隆文, 森本賢治, 水素エネルギーシステム, 31, 1 (2006).
- 10) 首藤登志夫, 二口貴之, 中島泰夫, 日本機械学会論文集 B 編, 66-644, 1223-1228 (2000).
- 11) 福田正志, 大道寺達, 坂本雅夫, 是松孝治, 燃料協会誌, 61-658, 118-125 (1982).