

単気筒天然ガスエンジンを用いたフランジ付き点火プラグの点火特性および燃焼特性の検証

日大生産工(院) ○宮里 真吾

日大生産工 野村 浩司 日大生産工 山崎 博司 日大生産工 氏家 康成

1. 緒言

近年、環境問題の深刻化や化石燃料の枯渇が懸念されており、内燃機関への早急な対策が求められている。火花点火機関においては排気ガス中の有害物質の低減や燃料消費率の改善には希薄燃焼が有効であると考えられているが、希薄燃焼による燃焼速度の低下は有効仕事の減少を招く。その対策として、燃焼室内にスワールやタンブルに伴う強い乱れを発生させることで火炎伝播速度の促進を図っている。しかし、この強い乱れによって火炎核から電極および混合気への熱損失が増大し失火が起きやすくなる。このため、点火エネルギーを増大させることで失火を防いでいるが、その結果、点火系の早期劣化や電磁波障害といった問題が生じる。したがって、希薄燃焼においては点火エネルギーの低減と確実な点火という、相反する問題の両立が重要な課題である。

本研究ではこの双方の問題の両立を目指し、火花放電時に発生する衝撃波エネルギーの回収と火花間隙周辺の流動抑制に着目した。その手法として通常の点火プラグの先端に数種類のフランジを取り付けたフランジ付き点火プラグを製作して点火実験および燃焼実験を行い点火確率、点火時の燃焼時間および最大燃焼圧力を調べ、各フランジ形状が点火特性と燃焼特性に及ぼす効果を比較、検討した。

2. 実験装置

2.1. 供試機関および装置

実験装置の概略を Fig.1 に示す。実験装置の大きな構成は以前用いていた 4 気筒天然ガスエンジン¹⁾のものと様々に供試機関、燃料系、点火装置、計測装置、動力測定装置からなる。供試機関は Honda 製 EM6000 型天然ガス発電機のエンジン本体のみを使用する。主な諸元は単気筒、排気量 389cc、ボア×ストローク 88.0mm×64.0mm、圧縮比 8.0 である。冷却方法はシロッコファンを用いた強制空冷式である。

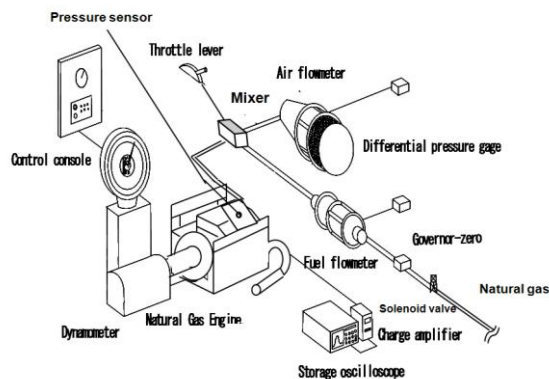


Fig.1 Experimental apparatus

燃料供給装置は、天然ガスの供給・停止用電磁弁、天然ガスを大気圧に調整する Governor zero、当量比を変化させるために燃料流量の調整を行うメイン・アジャスト・スクリューで構成される。点火装置は標準装備のマグネット方式およびフランジ付き点火プラグを使用する。燃焼圧力測定装置は圧力センサ、チャージアンプ、スリーブ、ウォータージャケットから構成される。流量計測装置は層流型空気流量計および層流型燃料流量計を使用する。動力測定装置は、日大工研式渦電流型電気動力計、コントロールコンソール、スロットルレバーから構成される。圧力センサ (Kistler 6052A) はエンジンのシリンダヘッドに穴を開けてスリーブを差し込んで取り付け、増幅器を通してストレージオシロスコープに圧力波形を記録する。

2.2. フランジ付き点火プラグ

2.2.1. 円筒形フランジ付き点火プラグ

円筒形フランジ付き点火プラグを Fig.2 に示す。円筒形フランジ付き点火プラグは、通常の点火プラグ (NGK 製 BPR6ES) のねじ部内側の筒状になった部分に内径 8 mm のステンレスパイプを銀ロウ付けして製作した。円筒形フランジの材質は、耐久性、耐熱性を考慮して SUS304 を使用し、過去の研究で最も点火確率の優れたフランジ高さ $h=6$ mm のものを比較対象とした。

Verification of Ignition and Combustion Characteristics of Flanged Spark Plug in Single Cylinder Natural Gas Engine with Lean Mixture
Shingo MIYAZATO

Hiroshi NOMURA, Hiroshi YAMASAKI and Yasushige UJIIE

2.2.2. 円板形フランジ付き点火プラグ

円板形フランジ付き点火プラグを Fig.3 に示す。円板形フランジ付き点火プラグは通常の点火プラグから接地電極を取り去り、 $\phi 1.6 \text{ mm}$ のステンレス棒 3 本を用いて円板形フランジを支持した。そして、フランジの中心に $\phi 1.6 \text{ mm}$ のステンレス棒を取り付け新たな接地電極とした。フランジ、ステンレス棒および接地電極の材質は耐久性や耐熱性を考慮して、円筒形フランジと同様の SUS304 を使用した。点火プラグとフランジは銀ロウ付けし、過去の研究で最も点火確率の優れたフランジ直径 $D=9 \text{ mm}$ 、フランジ間隔 $G=4 \text{ mm}$ のものを比較対象とした。

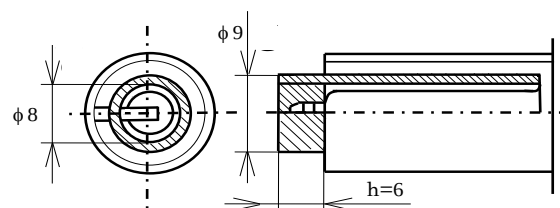


Fig.2 Cylindrical flanged spark plug.

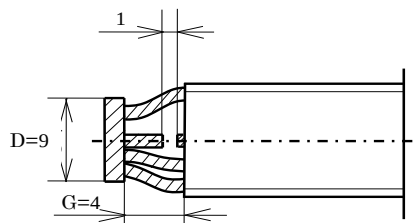


Fig.3 Disc flanged spark plug.

2.2.3. 円筒円板組み合わせ形点火プラグ

円筒円板組み合わせ形点火プラグを Fig.4 に示す。接地電極を取り去った通常の点火プラグ (NGK 製 BPR6ES) のねじ部内側に内径 8 mm、肉厚 0.5 mm の円筒形フランジ (SUS304) を差し込み、外側に $\phi 1 \text{ mm}$ のステンレス棒 3 本を設置して円板形フランジ (SUS303) を支持した。円板形フランジの円板中心には新たな接地電極として $\phi 1.6 \text{ mm}$ のステンレス棒を取り付け、火花間隙を 1.0 mm とした。また、円板形フランジのフランジ直径 $D=12 \text{ mm}$ およびフランジ間隔 $G=6 \text{ mm}$ 、円筒形フランジの高さ h は、過去の研究で最も点火確率の優れた 5 mm としたものを製作した。接合方法には銀ロウ付けを使用した。

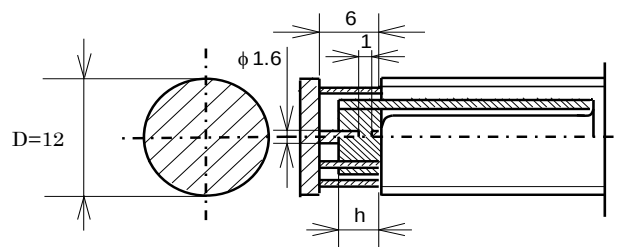


Fig.4 Cylindrical and disc flanged combination spark plug.

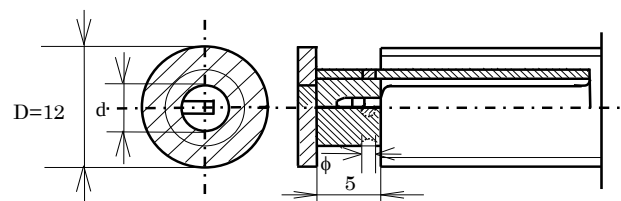


Fig.5 Cavity spark plug.

2.2.4. キャビティ形点火プラグ

キャビティ形点火プラグを Fig.5 に示す。これは円筒円板組み合わせ形点火プラグと同様に円筒形フランジを差し込み、上部にフランジ直径 $D=12 \text{ mm}$ の円板形フランジを取り付けた。取り付け方法は、円筒形フランジの上部 3 箇所と円板形フランジの上面端 3 箇所に $\phi 1.25 \text{ mm}$ の穴を開け、その穴に針金を通して固定し、銀ロウ付けで接合した。円板形フランジの中心部に $d=3 \text{ mm}$ 、5 mm と 2 種類の穴を開けた。これだけでは既燃ガスと新気の交換が不十分なので、円筒形フランジの下部端 4 箇所 90°おきに $d=3 \text{ mm}$ には $\phi 1.5 \text{ mm}$ 、 $d=5 \text{ mm}$ には $\phi 2.5 \text{ mm}$ の穴を開けた。接地電極は通常の点火プラグのものをそのまま使用した。

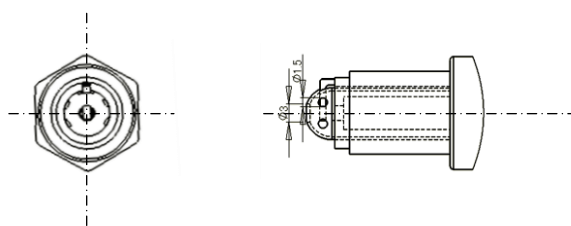


Fig.6 Dome flanged spark plug.

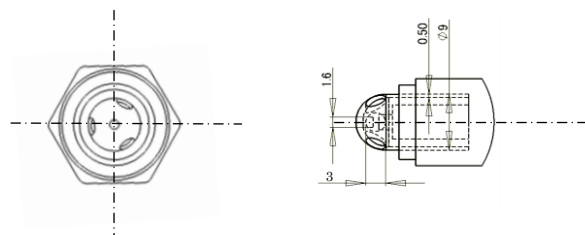


Fig.7 New Dome flanged spark plug.

2.2.5. ドーム形点火プラグ

ドーム形点火プラグを Fig.6 に示す²⁾。SUS304 を用いて、切削加工にて製作したドーム形フランジを、通常の点火プラグに銀ロウ付けした。寸法は半球部直径 9mm, 肉厚 0.5mm, 頭頂部に開ける穴 D が $\phi 3\text{mm}$ および $\phi 5\text{mm}$ の 2 種類のものを製作した。なお、キャビティ形と同様に新気と既燃ガスの交換が不十分なため、半球体側面にガス交換用の穴を 90° おきに 4 箇所開けた。寸法は $D=3\text{mm}$ の際は $\phi 1.5\text{mm}$ および $D=5\text{mm}$ の際は $\phi 2.5\text{mm}$ のものを作成した。穴の大きさは過去に製作したプラグとの性能比較を行うため、キャビティ形と同一である。なお、接地電極は市販品のままである。

2.2.6. 新ドーム形点火プラグ

新ドーム形点火プラグを Fig.7 に示す。従来のドーム形同様、SUS304 を用いて、切削加工にて製作したドーム形フランジを通常の点火プラグに銀ロウつけた。接地電極を取り払い、新たに接地電極として $\phi 1.6\text{mm}$ のステンレス棒を取り付け、火花間隙を 1.0mm とした。穴の開口面積低減とガス交換作用のバランスを考慮して、 120° おきに $d=3\text{mm}$ の穴を半球体の側面寄りに 3 ヶ所開けた。

3. 実験方法

供試機関の平均有効圧力を 0.3 MPa に合わせ、初期回転速度を $1000 \sim 3000\text{ rpm}$ までも 500 rpm ごとに变化させて実験を行った。各回転速度において、点火確率が 100% となる任意の低い当量比に調整し、そこから当量比を 0.01 刻みずつ下げていった。これをエンジンの停止寸前まで行い、ストレージオシロスコープに記録した圧力波形を基に 10 秒間の放電回数における点火回数の割合として点火確率を算出した。なお、圧力履歴において最大燃焼圧力が 1.6 MPa 以下を失火と判定した。さらに、各フランジ付き点火プラグにおいて 1500 rpm , 2500 rpm および 3000 rpm 時の燃焼時間と最大燃焼圧力を当量比 $\phi=0.70, 0.57$ について 10 回ずつ計測し、その平均を求めた。

4. 実験結果および考察

各フランジ付き点火プラグについて 99% 以上点

火可能な最小当量比と各回転数の関係を Fig.8 に示す。ここで、既報¹⁾である、円板形などの各フランジ付き点火プラグは最も点火確率の優れた寸法のことを比較対象として記載した。どの回転速度においてもフランジ付き点火プラグは通常の点火プラグより希薄領域での確実な点火に優れている。特にドーム形点火プラグは他のフランジ付き点火プラグと比較し、低速から高速回転速度の広い範囲において優れた結果が得られた。これは、フランジ面形状による衝撃波エネルギー回収効果と、流動抑制効果が有効に働いたためと考えられる。新たに採用したドーム形は衝撃波エネルギーの回収効果、適度な流動抑制効果、およびフランジへの熱損失等の影響が有効に作用した結果、超希薄の領域でも点火可能になったと考えられる。キャビティ形点火プラグは、低速回転速度での点火可能な最小当量比は他のフランジ付き点火プラグと比較してあまり優れた結果が得られなかった。これは、混合気の流動抑制効果が過大となり、火炎核がキャビティ内に滞留する期間が長くなるため、フランジへの熱損失が増大したと考えられる。また、高速回転速度時には燃焼室内において強い乱れが発生するため、流動抑制効果が有効に働き、点火可能な最小当量比が希薄側に拡大されたと考えられる。全体を眺めると、低速回転速度においては、フランジへの熱損失の影響が大きくなることから、フランジ付き点火プラグと通常点火プラグの最小当量比はさほど大きくないが、本実験範囲において回転速度が大きくなるほど両者の差は大きくなり、フランジ付き点火プラグでは、運転可能範囲がより希薄域まで拡大された。これは、火炎核がフランジ内部に長時間存在しないことにより、火炎核からフランジへの熱損失の低減や衝撃波エネルギーの回収効果と混合気の流動抑制効果が有効に働いたためであると考えられる。

各フランジ付き点火プラグと燃焼時間の関係を Fig.9 に、最大燃焼圧力の関係を Fig.10 にそれぞれ示す。紙面の関係で回転速度 1500 rpm , $\phi=0.70$ の結果のみを掲載した。一般的には、燃焼時間が短くなるほど最大燃焼圧力が高くなる傾向にあるとい

われているが本実験結果では必ずしもそうとはいえない。ドーム形点火プラグの場合は、フランジ面増大のためフランジへの熱損失が増大し、燃焼時間および最大燃焼圧力にあまり優位性が見られなかった。円板形フランジ付き点火プラグにおいては1500rpmの $\phi=0.70$ で燃焼時間が大幅に短くなった。これは、火炎伝播を阻害しにくい形状と、フランジ端部における乱れ生成により、燃焼時間が短縮したためと考えられる。また、キャビティ形点火プラグは円板形フランジ付き点火プラグに続き、燃焼時間が短くなった。これは、パルスジェットイグナイタと同様の効果で、小孔から火炎が勢いよく噴出し、乱流燃焼が促進されたためであると考えられる。円筒円板組み合わせ形点火プラグの場合、流動抑制と衝撃波エネルギー回収効果が有効に働いて、フランジ内部で火炎核が成長するものの、円板形単独の場合より、円板、円筒双方に囲まれているために火炎伝播を阻害しているものと考えられる。しかしこの場合でも、通常の点火プラグと比較して火炎伝播は促進されている。Fig.8よりドーム形点火プラグは他のフランジ付き点火プラグと比較して最も確実に点火することがわかるが、燃焼時間を見ると全体の平均的な位置となっている。したがって、確実な点火と点火後の火炎成長過程には相関がないことが示唆された。

5. 結言

天然ガスエンジンを用いてフランジ付き点火プラグの点火特性と燃焼特性を調べた結果、以下の結論を得た。

1. フランジ付き点火プラグは通常の点火プラグより希薄領域での確実な点火に優れている。
2. 本実験範囲において、通常の点火プラグは回転速度が大きくなるほど希薄運転領域が狭まるのに対し、フランジ付き点火プラグは運転範囲がより希薄域まで拡大された。
3. ドーム形点火プラグは他のフランジ付き点火プラグと比較しても確実な点火という観点で優れた結果が得られた。

4. ドーム形点火プラグにおいて穴位置を変更することにより衝撃波エネルギー回収効果、流動抑制効果およびフランジへの熱損失等がバランスし、希薄域拡大に有効な穴位置および穴径のことが示唆された。
5. 確実な点火と火炎伝播の促進効果に強い相関はない。

参考文献

1. 末岡・氏家ほか、第47回燃焼シンポジウム講演論文集、pp.354-355 (2009)
2. 佐藤・氏家ほか、機学 関東支部 第18期総会講演論文集、pp.241-242(2012)

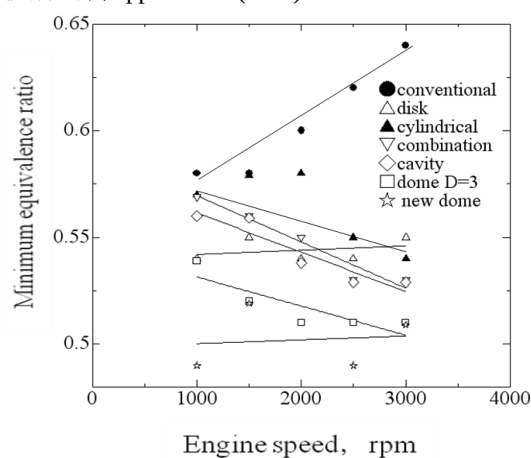


Fig.8 Relation between engine speed and minimum equivalence ratio.

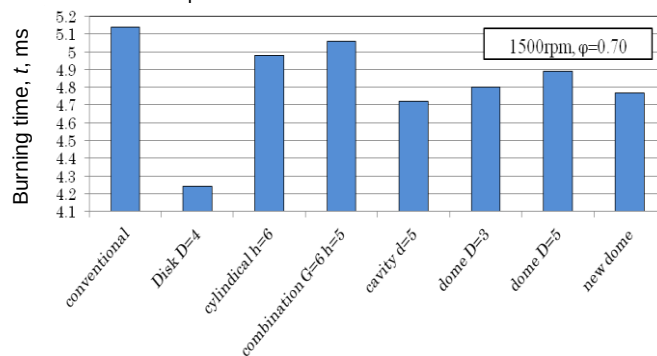


Fig.9 Burning time for various flanged spark plug

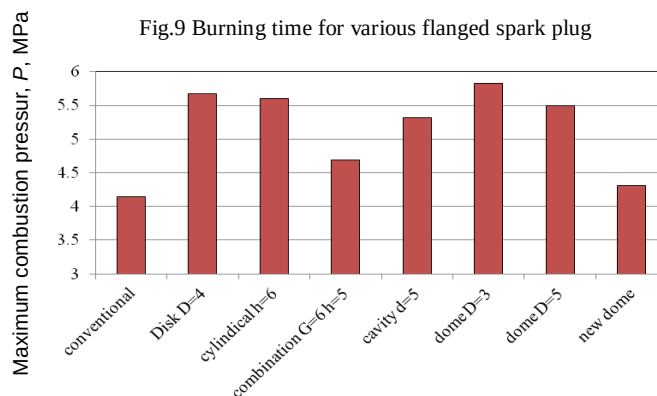


Fig.10 Maximum combustion pressure for various flanged spark plug