

天然ガス機関の希薄域におけるフランジ付き点火プラグの形状効果

日大生産工(院) ○末岡 大佑

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に伴い内燃機関への早期対策が求められている。火花点火機関において、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。しかし、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が、逆にこの強い乱れによって火炎核からの熱損失は増大し失火が起きやすくなる。このため、火花エネルギーを増大させることで失火を防いでいるが、点火系の早期劣化や電磁波障害等の問題が発生する。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の両立が重要な課題である。

本研究ではこの相反する問題の解決を目指し、火花放電時に発生する衝撃波の反射と火花間隙周辺の流動抑制に着目した。衝撃波エネルギーの回収効果と混合気の流動抑制効果の向上を目的として、通常の点火プラグの先端にフランジを取り付けて実機での点火実験を行った。通常の点火プラグと既報^{1,2}の各フランジ付き点火プラグにおいて、点火確率改善効果、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

実験装置は Fig.1 に示されるように供試機関、燃料系、点火装置、計測装置、動力測定装置より構成されている。供試機関は日産工機製 H25 型エンジンで、燃料には天然ガス (13A) を使用した。主な諸元は直列 4 気筒、排気量 2472 cc、ボア×ストローク 92.0

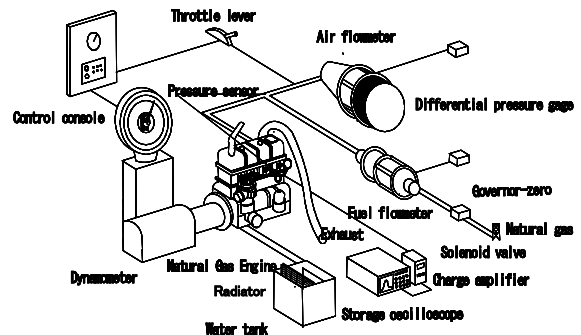


Fig.1 Experimental apparatus.

mm ×93.0 mm、圧縮比 8.9 である。また、冷却方法は水冷式でラジエターを用いて冷却液を循環させる方法を用いた。燃料系は混合器、当量比を変化させるために燃料流量を調整するメイン・アジャスト・スクリュー、天然ガスを大気圧と同じ圧力に調整する Governor zero で構成される。点火装置はフランジ付き点火プラグ、コイル内蔵型フルトランジスター式点火回路を用いた。計測装置は、圧力センサ、層流型空気流量計、層流型燃料流量計で構成される。圧力センサ (Kistler 6052A) はエンジンのシリンダヘッドの 1 つ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出力した。

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 B4ES) 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。

The Shape Effect of Flanged Spark Plug in Natural Gas Engine with Lean Mixture

Daisuke SUEOKA

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、そこに $\phi 1.6 \text{ mm}$ のステンレス棒 3 本を設置しフランジを支持した。また、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。

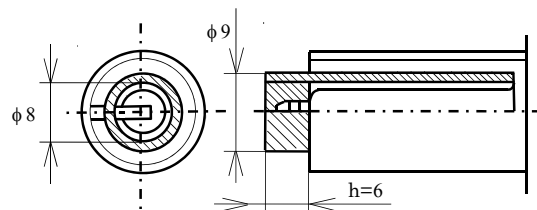


Fig.2 Cylindrical flanged spark plug.

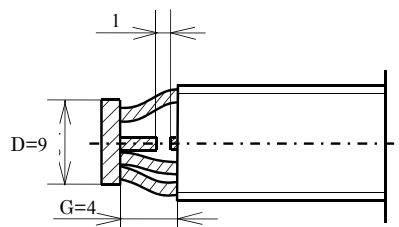


Fig.3 Disc flanged spark plug.

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 B4ES) 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、電極間距離を 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 $G=6 \text{ mm}$ を一定とし、円筒形フランジの高さ h を 2 mm, 3 mm, 4 mm, 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。

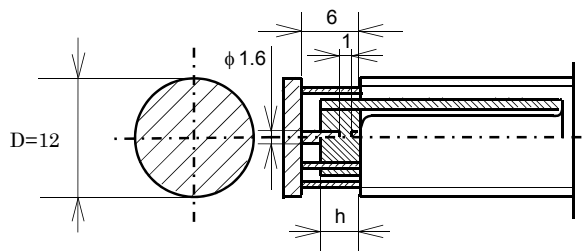


Fig.4 Cylindrical and disc flanged combination spark plug.

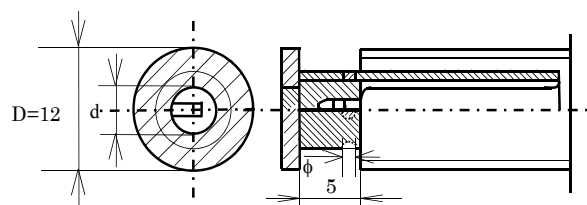


Fig.5 Cavity spark plug.

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。

3. 実験方法

通常の点火プラグおよび各フランジ付き点火プラグを用いて点火実験を行った。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 800, 1000 ~ 3000 rpm までを 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出力された圧力波形を基に 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。その中で点火確率が 99 % 以上持続可能な最小当量比をフランジ付き点火プラグごとに比較した。なお、圧力履歴において 2 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, 2000, 3000 rpm 時の燃焼時間と最大燃焼圧力を当量比 $\phi=0.70$ と $\phi=0.57$ について 20 回ずつ計測し、その平均を求めた。 $\phi=0.57$ で失火の場合はデータからはずした。

4. 実験結果および考察

各フランジ付き点火プラグと点火確率が 99 % 以上持続可能な最小当量比の関係を Fig.6 に示す。ここで、円板形フランジ付き点火プラグおよび円筒形フランジ付き点火プラグは既報¹⁾より、最も点火確率の優れた $G=4$ mm と $h=6$ mm のプラグを比較対象とした。本実験範囲において (a) 1000 rpm を低速回転速度とし、(b) 3000 rpm を高速回転速度とする。

どちら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。円筒円板組み合わせ形点火プラグは他のフランジ付き点火プラグと比較し、低速回転速度と高速回転速度の両方において優れた結果が得られた。これは、フランジ面が多いことにより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。キャビティ形点火プラグは $d=3, 5$ mm の両方において、低速回転速度での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、フランジへの熱損失が増大したためと考えられる。高速回転速度時には強い流れとなるため、流動抑制効果が有効に働いて最小当量比が希薄側に拡大された。また、各フランジ付き点火プラグにおいて回転速度と点火確率が 99 % 以上持続可能な最小当量比の関係を Fig.7 に示す。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の点火プラグには顕著な差が見られなかったが、本実験範囲において回転速度が大きくなるほど差は大きくなり、フランジ付き点火プラグでは、運転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る火炎核からフランジへの熱損失の低減や衝撃波エネ

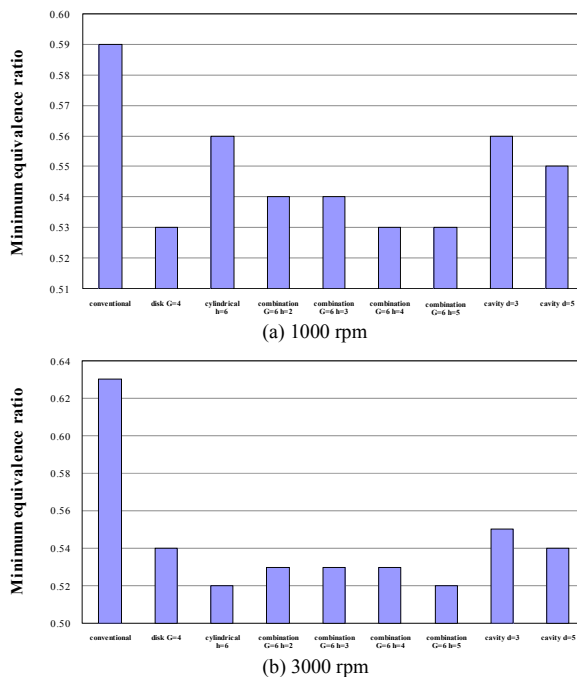


Fig.6 Minimum equivalence ratio for various flanged spark plug.

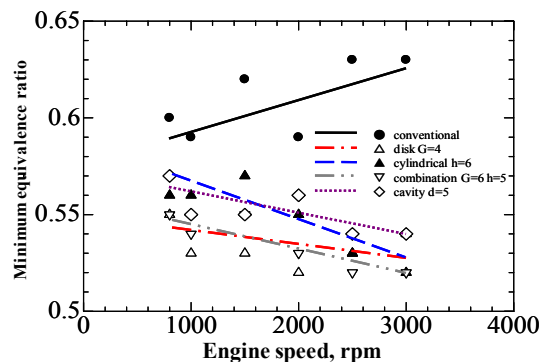


Fig.7 Relation between engine speed and minimum equivalence ratio.

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.8 に、最大燃焼圧力の関係を Fig.9 にそれぞれ示す。紙面の関係で回転速度においては 1500 rpm および 3000 rpm, 当量比に関しては $\phi=0.70$ の結果のみを掲載した。全体として、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ことがわかる。円板形フランジ付き点火プラグにおいては当量比 $\phi=0.70$ と $\phi=0.57$ の両方で燃焼時間が短くなった。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と考えられる。キャビティ形点火プラグの場合は、前

述の熱損失増大のため、1500 rpm の $\phi=0.57$, $\phi=0.70$ および 2000 rpm の $\phi=0.57$ のとき、 $d=3$, 5 mm 共に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。しかし、2000 rpm の $\phi=0.70$ および 3000 rpm の $\phi=0.57$, $\phi=0.70$ のとき、 $d=3$, 5 mm 共に他のフランジ付き点火プラグと比べて燃焼時間は短くなり、最大燃焼圧力は高くなった。これは、パルスジェットイグナイタと同様の効果で、小孔から火炎が噴出し、乱流燃焼が促進されたためであると考えられる。Fig.6 より円筒円板組み合わせ形点火プラグの $G=6$ mm, $h=5$ mm は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。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、組み合わせ部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。

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. 円筒円板組み合わせ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、特に円筒円板組み合わせ形点火プラグの $G=6$ mm, $h=5$ mm はどの回転速度においても最も確実に点火することを示した。
4. キャビティ形点火プラグは、高すぎる流動抑制効果および消炎効果のため、確実な点火という観点では有効ではないが、当量比が大きい場合

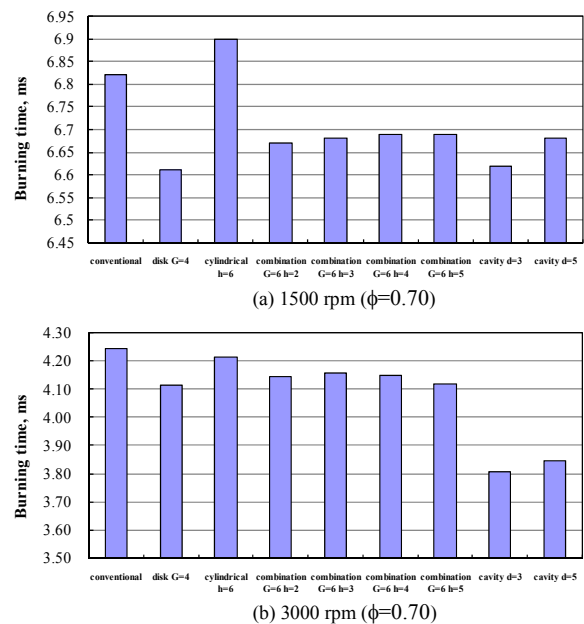


Fig.8 Burning time for various flanged spark plug.

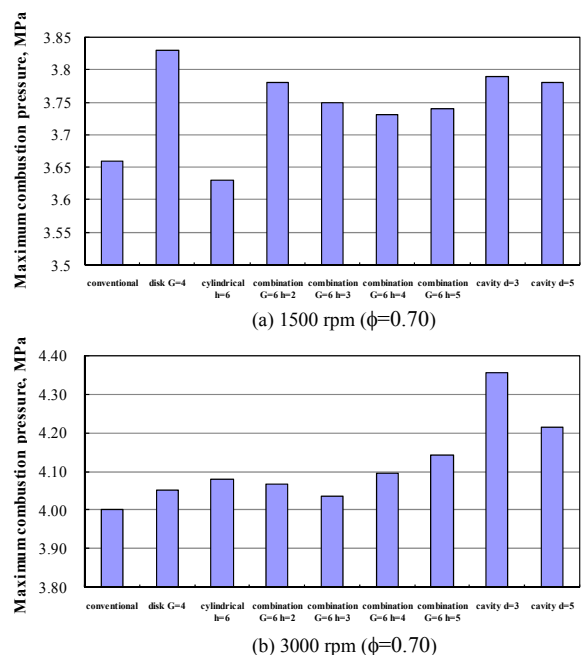


Fig.9 Maximum combustion pressure for various flanged spark plug.

もしくは高速回転速度において顕著な燃焼促進効果を発揮する場合がある。

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. 太田・氏家ほか, 第 44 回燃焼シンポジウム講演論文集, pp.82-83 (2006)
2. 菊池・氏家ほか, 第 46 回燃焼シンポジウム講演論文集, pp.468-469 (2008)