

天然ガス機関を用いたドーム形フランジ付き点火プラグの点火特性および燃焼変動

日大生産工(院) ○中村 和貴 日大生産工 野村 浩司 日大生産工 氏家 康成

1. 緒言

内燃機関を動力源とする自動車は広く普及しているが、近年では、化石燃料の枯渇や排ガスに含まれる二酸化炭素による地球温暖化が問題視されている。このことから、燃料電池自動車や電気自動車などの次世代自動車の開発が進められているが、広い普及には至っておらず、2050年頃でも内燃機関が自動車の動力源として多く利用されていると考えられている。そのため、内燃機関の早急な改善が求められている。

国内に広く普及している火花点火機関における理論熱効率向上の手法の一つに希薄燃焼が挙げられるが、この手法では火炎伝ば速度の低下による有効仕事の減少が問題となる。そこで、燃焼室内にスワールやタンブルなどに伴う強い乱れを発生させ、火炎伝ばの促進を図っているが、この強い乱れは火炎核から火花電極や未燃混合気への熱損失を増大させるため、点火が困難となる。点火エネルギーを増大することでこの問題を防ぐことができるが、点火系の早期劣化や電磁波障害を引き起こす可能性がある。以上のことから、希薄燃焼において、確実な点火と点火エネルギー低減の両立が重要とされている。

本研究では、これらを両立するため、従来の点火プラグ先端にドーム形フランジを設置した。これにより、火花放電時に発生する衝撃波のエネルギーを熱として回収する効果や火花間隙周辺の流動を抑制し、燃焼室内の強い乱れによる火炎核からの熱損失を防ぐ効果が働き、点火および燃焼特性の改善が確認された^{1),2)}。しかし、その改善効果にはドーム形フランジの形状が影響を与えていることが示唆されていた。そこで本稿では、単気筒天然ガス機関を用い、ドーム形フランジ付き点火プラグの更なる優位性を明らかにするとともに、穴径、穴数が点火特性および燃焼変動に及ぼす影響について検討した。

2. 実験装置

実験装置の概略図を Fig.1 に示す。供試機関である単気筒天然ガスエンジンは、本田技研製の発電機 EM6000GN からエンジン本体のみを取り出して用いた。主な諸元は、排気量 389cc、ボア×ストローク 88.0mm×64.0mm、圧縮比 8.0、点火時期は上死点前 30° である。冷却方式は、強制空冷式である。また、実験時には機関回転速度を任意に調整する必要があるため、非接触式のタコメータを新たに取り付けるとともに、スロットルレバーにてミキサーのスロットルバルブを直接制御できるように変更した。

燃料にはメタンを主成分とする天然ガス 13A を用いており、ゼロガバナで大気圧に減圧し、アジャストスクリューにて燃料流量を調整したのち、ミキサーを通して供給される。

流量計測装置には空気、燃料ともに層流型流量計を用い、当量比の算出を行った。

点火装置には、トランジスタマグネット式点火回路およびドーム形フランジ付き点火プラグを用いた。

燃焼圧力測定は、圧電式圧力センサで取得した信号をチャージアンプにて増幅し、ストレージオシロスコープに出力し、記録した。

また、日大工研式渦電流型電気動力計を用い、供試機関に規定の負荷を与えた。

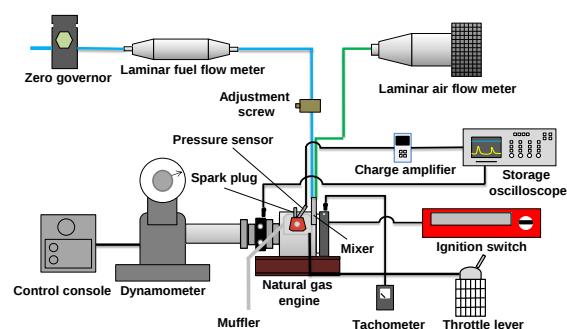


Fig.1 Experimental apparatus

Ignition Characteristic and Combustion Fluctuation of Dome Flanged Spark Plugs using a Natural Gas Engine

Kazuki NAKAMURA, Hiroshi NOMURA and Yasushige UJIIE

2.2. ドーム形フランジ付き点火プラグ

ドーム形フランジ付き点火プラグを Fig.2 に示す。ドーム形フランジ付き点火プラグは、NGK 社製 BPR6EIX (以降、通常点火プラグ) をベースとし、SUS304 で製作したドーム形フランジを通常点火プラグ先端に銀ロウ付けしたものがある。これにより、火花放電時に発生した衝撃波がドーム形フランジ内壁で火花間隙中心部に向かって反射され、そのエネルギーを最も回収できる形状となっている。また、通常点火プラグの接地電極を取り払い、 $\phi 1.6\text{mm}$ のステンレス棒を接地電極として新たに取り付け、火花間隙を 1.0mm とした。

まず、フランジの穴数の影響を比較するため、三種類のドーム形フランジ付き点火プラグを新たに製作した。Fig.2(a) に示す D2.4 $\times$ 3 は、過去の研究で優れた燃焼特性を示した D3 $\times$ 2 のフランジ表面積が保たれるよう $\phi 2.4\text{mm}$ の穴を 120° おきに三ヶ所開けたものである。Fig.2(b), (c) に示す D3.7 $\times$ 2, D2.6 $\times$ 4 は、過去の研究²⁾で優れた点火特性を示した D3 $\times$ 3 のフランジ表面積が保たれるよう穴径、穴数を変更したもので、それぞれ $\phi 3.7\text{mm}$ の穴を 180° おきに二ヶ所、 $\phi 2.6\text{mm}$ の穴を 90° おきに四ヶ所開けたものである。また、穴の中心軸は火花間隙中心部をねらいドーム頂点から 45° 傾けて加工した。

次に、フランジ表面積の影響を比較するため、Fig.2(d) に示す D1.8 $\times$ 3 を製作し、実験を行った。これは、D2.4 $\times$ 3 と同様の三つ穴形状であるが、さらに穴径を小さくし、フランジ表面積を増加させたものである。

3. 実験方法

供試機関の暖機運転終了後、正味平均有効圧力が 0.3MPa となるよう負荷を与え、規定回転速度(1700, 2500, 3000, 3600rpm)を維持した状態で以下の実験を行った。

3.1. 点火実験

規定回転速度において確実に点火可能な当量比 $\phi=0.70$ から当量比を 0.01 刻みで下げていき、規定回転速度の維持が困難になるまで、適宜、燃焼圧力履歴を記録し、最小当量比について検討した。また、本実験では規定回転速度を維持できる最も低い当量比を最小当量比と定義した。

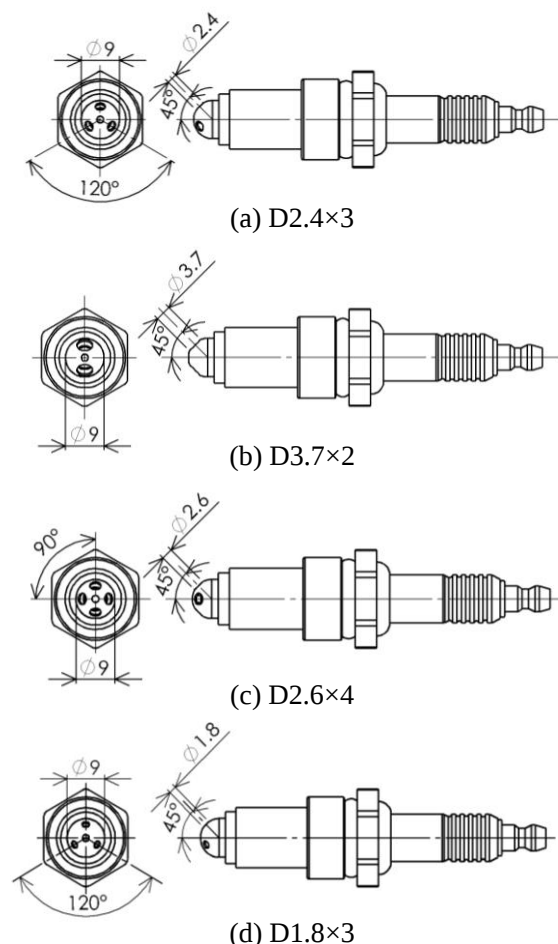


Fig.2 Dome flanged spark plugs

3.2. 燃焼変動測定実験

規定回転速度および当量比 $\phi=0.70$, $\phi=0.60$ において燃焼圧力履歴を 500 サイクル分取得した。これらのデータから最大燃焼圧力のばらつき($\sigma_{P_{\max}}$), 平均値($\bar{P}_{\max}$)を算出したのち、以下の式にて最大燃焼圧力の変動率($\text{COV}_{P_{\max}}$)を算出し、点火プラグごとに比較、検討した。

$$\text{COV}_{P_{\max}} = \frac{\sigma_{P_{\max}}}{\bar{P}_{\max}} \times 100 \quad [\%]$$

4. 実験結果

4.1. 点火実験

Fig.3(a) に D3 $\times$ 2 と D2.4 $\times$ 3, Fig.3(b) に D3 $\times$ 3 と D3.7 $\times$ 2, D2.6 $\times$ 4 の各規定回転速度における最小当量比を示す。また、Fig.3 には過去の研究²⁾にて取得した通常点火プラグの結果を比較対象として記載した。

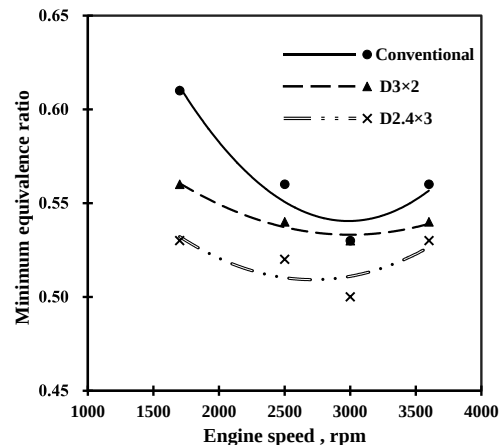
Fig.3 より、ドーム形フランジを設置することで点火特性が改善されることが確認できる。

まず、同一のフランジ表面積を持つドーム形フランジ付き点火プラグの最小当量比を比

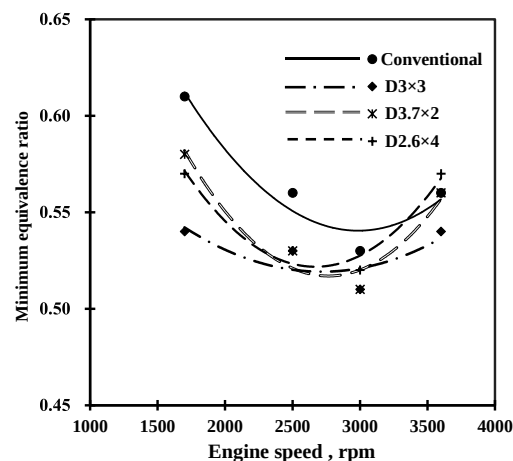
較する. $D3 \times 2$ と $D2.4 \times 3$, $D3 \times 3$ と $D3.7 \times 2$, $D2.6 \times 4$ はそれぞれフランジ表面積が等しいため, 理論上はフランジ部への熱損失や衝撃波エネルギー回収効果の影響は等しいと考えられる. しかし, どちらのフランジ表面積の場合においても三つ穴形状のものが幅広い回転速度において優れた結果を示した. 本研究で使用した供試機関の燃焼室形状では, スキッシュが働きやすく, 点火プラグは多方面から混合気流動の影響を受けると考えられ, そのため, 穴数の多い形状では, 流動抑制効果が働きにくいと考えられる. 一方で, 穴数の少ない形状では, フランジ内部のガス交換が十分に行われていないことが考えられる. また, 本実験では, 点火の成否だけでなく規定回転速度を維持できる最も低い当量比を最小当量比と定義しており, 点火後の火炎伝ぱが規定回転速度の維持に影響を与えている. ドーム形フランジ付き点火プラグでは, フランジ穴から吹き出した火炎がフランジ外の未燃混合気へと火炎伝ぱするため, 穴数が少ないものでは火炎伝ぱしにくく熱損失や圧力損失がより影響し, 比較的高い当量比で規定回転速度の維持が困難になったと考えられる. 三つ穴形状では, これらのバランスが取れていたため, 同一のフランジ表面積をもつドーム形フランジ付き点火プラグの中で優れた結果を示したと考えられる.

次に, 三つ穴形状だが穴径が異なるドーム形フランジ付き点火プラグを用いて実験を行い, 最小当量比を比較した. Fig.3(c) より, 同じ三つ穴形状だが穴径, フランジ表面積が異なる $D3 \times 3$ と $D2.4 \times 3$, $D1.8 \times 3$ では, $D2.4 \times 3$ が幅広い回転速度において優れた結果を示した. フランジ表面積が大きいほど衝撃波エネルギー回収効果や流動抑制効果はより有効に働くが, 一方ではフランジ部への熱損失が増加することやフランジ内部のガス交換が不十分になるなどの負の効果が作用する. 最もフランジ表面積が大きい $D1.8 \times 3$ では, この負の効果が結果に大きく影響したため, $D2.4 \times 3$ ほど希薄燃焼領域を拡大することができなかったと考えられる.

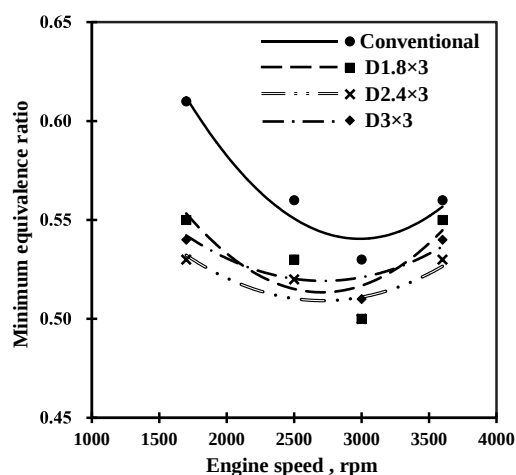
以上より, 点火特性の向上には三つ穴形状のドーム形フランジを設置することが効果的であり, その穴径は 2.4mm 程度が良いことが示唆された. しかし, 詳細な穴径については今後の検討を要する.



(a) Comparison of $D3 \times 2$ and $D2.4 \times 3$



(b) Comparison of $D3 \times 3$, $D3.7 \times 2$ and $D2.6 \times 4$



(c) Comparison of $D3 \times 3$, $D2.4 \times 3$ and $D1.8 \times 3$

Fig.3 Relationship between engine speed and minimum equivalence ratio

4.2. 燃焼変動測定実験

規定回転速度および当量比 $\phi=0.70$, 0.60 における各点火プラグの最大燃焼圧力の変動率を Fig.4 に示す. また, 通常点火プラグの 1700rpm における最小当量比は $\phi=0.61$ であるため, Fig.4(b) にはその条件での変動率を参考値として記載した.

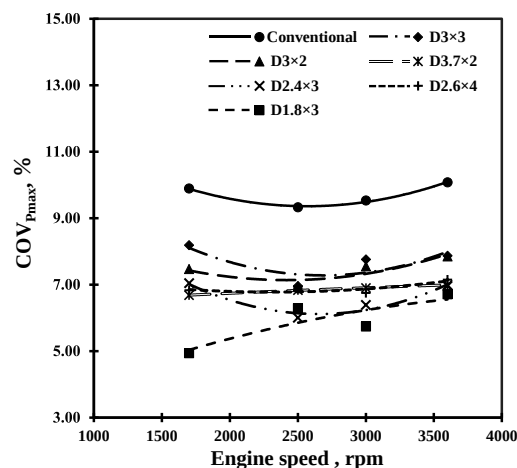
Fig.4 より, 一般に知られているように希薄域では燃焼変動が大きくなるが, どちらの当量比条件においても通常点火プラグと比較して, どの形状のドーム形フランジ付き点火プラグでも燃焼変動が低減されたことが確認できる. 通常点火プラグの場合では, 燃焼室内の乱れによる熱損失のため火炎核の成長にむらができる. それに対し, ドーム形フランジを設置した場合は, 初期火炎核が形成されたのち, フランジで反射された衝撃波が火花間隙周辺の混合気を断熱圧縮によって昇温するため, 火炎核が保温されることや流動抑制効果により未燃混合気への熱損失が低減されたことで火炎核の成長が安定したと考えられる. この燃焼初期における安定性が燃焼変動に影響を与えていると考えられる. すなわち, ドーム形フランジ内部で十分に成長した火炎がフランジ外の未燃混合気に火炎伝ばした結果である.

本実験にて使用したドーム形フランジ付き点火プラグの中では, $D1.8\times 3$, $D2.4\times 3$ が比較的優れた結果を示したが, フランジ表面積や穴数, 穴径が燃焼変動に及ぼす影響には特段の傾向がみられない. これは, 燃焼初期の安定性のほか, 混合気流動や乱れの変動なども燃焼変動に影響を与えているためであると考えられ, 今後さらに検討を重ねていく必要がある.

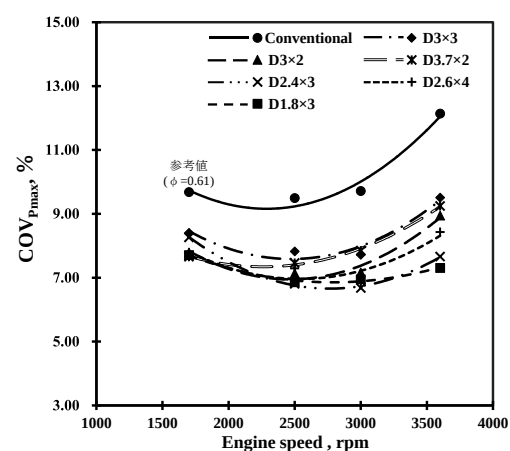
5. 結言

天然ガス機関を用い, ドーム形フランジ付き点火プラグの穴径, 穴数が点火特性および燃焼変動に及ぼす影響について検討した結果, 以下の知見を得た.

1. 点火特性はドーム形フランジの穴径, 穴数の影響を大きく受ける.
2. 同一のフランジ表面積を有するドーム形フランジ付き点火プラグの中では, 三つ穴形状が最も希薄燃焼領域を拡大することが可能である.



(a) $\phi = 0.70$



(b) $\phi = 0.60$

Fig.4 Effect of dome flanged spark plugs on combustion fluctuation

3. ドーム形フランジの穴径は 2.4mm 程度が適切であることが示唆されたが, 詳細な穴径については今後の検討を要する.
4. ドーム形フランジ付き点火プラグでは, 衝撃波エネルギー回収効果や流動抑制効果により火炎核の成長が安定し, 燃焼変動を低減することが可能である. しかし, ドーム形フランジの穴数, 穴径が燃焼変動に及ぼす影響には特段の傾向がみられず, 今後の検討を要する.

参考文献

1. 宮里・野村・山崎・氏家, 第 50 回燃焼シンポジウム講演論文集, 120-121 (2012).
2. 中西・野村・山崎・氏家, 日本機械学会 2015 年度年次大会 DVD 論文集, G0700703 (2015).