

天然ガスエンジンを用いたドーム形フランジ付き点火プラグの点火および燃焼特性

日大生産工(院) ○中西 正大

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

現代において、自動車は人々の生活に欠かせないものとなっている。しかし、その自動車から排出される二酸化炭素は地球温暖化を招き、また、ガソリンに代表される化石燃料枯渇が問題となっている。その解決策として、新しい動力源を持つ電気自動車や燃料電池自動車が開発されているが、広く一般には普及していないのが現状である。そこで、既存の内燃機関の高熱効率化が急務となっている。特に、国内で主流である火花点火機関において、熱効率の向上の手法として、高圧縮比化や希薄燃焼が有効であるとされている。本研究では希薄燃焼に着目し、実験を行った。希薄燃焼では、火炎伝ば速度の低下により有効仕事が減少する。スワール、タンブルなどによる強い乱れを燃焼室内に発生させて火炎伝ばの促進を図るが、火炎核から火花電極や未燃混合気への熱損失が増大し、点火確率が低下する。失火を防ぐために点火エネルギーを増大させると、点火系の早期劣化や電磁波障害につながる。以上より、希薄燃焼において、確実な点火と、点火エネルギーの低減の両立が重要である。本研究では、この相反する問題の解決のために、通常の点火プラグの先端に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、単気筒天然ガスエンジンを用いて実験を行った。このフランジは、火花放電時に発生する衝撃波を反射させることによる、衝撃波エネルギー回収効果および、燃焼室内の強い乱れによる火炎核から火花電極や未燃混合気への熱損失を防ぐ流動抑制効果を狙っている。過去の研究^{1), 2), 3)}では種々のフランジ形状が製作された。その中でもドーム形フランジは火炎核を覆う表面積が大きく、流動抑制効果および衝撃波エネルギーの回収効果が効果的に作用し、過去の実験³⁾で特に優れた点火確率を示した。そのドーム形フランジの穴の数を変更し、フランジ形状が点火確率に及ぼす影響について点火確率測定実験および燃焼時間測定実験を通して比較、検討した。

2 実験装置

2.1 供試機関および装置

実験装置の概略図をFig.1に示す。単気筒天然ガスエンジン、燃料系、点火装置、計測装置、動力測定装置から構成されている。単気筒天然ガスエンジンは、発電機の本田技研製EM600GNからエンジンのみを取り出して用いており、排気量389cc、ボア×ストローク88.0mm×64.0mm、圧縮比は8.0、点火時期は上死点前30°に固定されている。冷却方式は強制空冷式である。燃料は天然ガス13Aを用いている。主成分はメタンであり、エタン、ブタン、プロパンで構成されている。燃料供給方法は、Governor zeroにて大気圧まで減圧し、アジャストスクリューにより燃料流量を制御することで当量比の調整を行っている。点火装置はトランジスタマグネット方式を用いた。点火プラグにはフランジ付き点火プラグを用いている。燃焼圧力測定には圧力センサ(Kistler 6052A)、チャージアンプ(Kistler Type 5011B)を使用した。取得された燃焼室内圧力の信号をチャージアンプにより増幅し、ストレージオシロスコープに圧力波形を取り込んでいる。流量計測装置は空気、燃料ともに層流型流量計を用いている。動力測定装置は、日大工研式渦電流型電気動力計を用いており、この装置によって、供試機関に負荷を与えている。

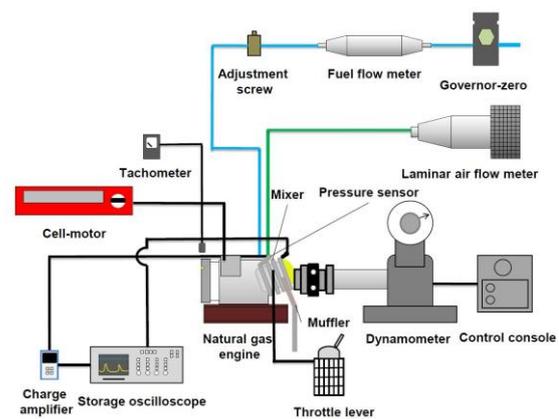


Fig.1 Experimental apparatus

Ignition and Combustion Characteristics of Dome Flanged Spark Plug in Natural Gas Engine

Masahiro NAKANISHI

Hiroshi NOMURA, Hiroshi YAMASAKI 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。ベースとなる点火プラグは NGK 社製 BPR6EIX (以降、通常点火プラグ)を用いた。フランジ部は SUS304 を用い、ドーム形フランジを通常点火プラグに銀ロウ付けした。Fig.2(a) に示すドーム形フランジ付き点火プラグ D3×3 は、過去の研究³⁾より優れた点火確率を示したフランジ形状である。接地電極は、通常点火プラグのものを取り払い、ドーム形フランジの頂点に $\phi 1.6\text{mm}$ のステンレス棒を新たに取りつけた。火花間隙は 1.0mm とした。120° おきに直径 3mm の穴を半球体の側面寄りに 3 か所開けた。Fig.3(b) に示すドーム形フランジ付き点火プラグ D3×4 はドーム形フランジ付き点火プラグ D3×3 に対し、穴の数が点火確率および燃焼時間に及ぼす影響を比較・検討するために製作した。90° おきに直径 3mm の穴を半球体側面寄りに 4 か所開けた。Fig.3(c) には、穴の数を少なくしたドーム形フランジ付き点火プラグ D3×2 を示す。ドーム形フランジ付き点火プラグ D3×4 と同じく、穴の数が点火確率および燃焼時間に及ぼす影響を比較・検討するために製作した。180° おきに直径 3mm の穴を半球体側面よりに 2 か所開けた。

3 実験方法

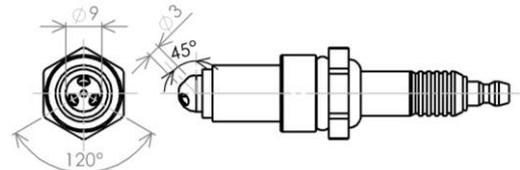
3.1 点火確率測定実験

エンジンの暖機運転を行った後、供試機関の負荷が平均有効圧 300kPa になるようにし、 1700rpm および 3000rpm の一定回転速度で実験を行った。これらの回転速度において、点火確率が 100% となる任意の当量比から当量比を 0.01 ごとに下げていき、エンジンが停止もしくは、指定した回転速度を維持することが困難に至るまで行った。圧力センサからチャージアンプで増幅された圧力信号をストレージオシロスコープで圧力波形を記録した。圧力波形をもとに 10 秒間の放電回数と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% 以上点火可能な最小当量比を求め比較した。

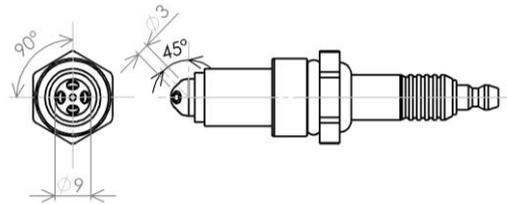
3.2 燃焼時間測定実験

点火実験と同様、エンジンの暖機運転を行い、供試機関の平均有効圧が 300kPa になるようにし、 3000rpm の回転速度を維持した状態で実験を行った。当量比はすべての点火プラグでほぼ 100% になる当量比 $\phi = 0.70, 0.57$ の2つの条件で実験を行った。この条件において、燃焼圧力波形と点火タイミングをストレージオシロスコープ

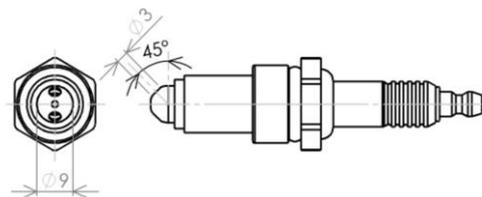
ープに記録し、各当量比、各点火プラグでの 10 サイクル分のデータから燃焼時間の平均を算出し、比較・検討した。Fig.3に燃焼時間の定義を示す。燃焼時間は点火タイミングから最大燃焼圧に至るまでの時間を燃焼時間と定義している。



(a) Shape of flange (D3×3)



(b) Shape of flange (D3×4)



(c) Shape of flange (D3×2)

Fig.2 Dome flanged spark plug

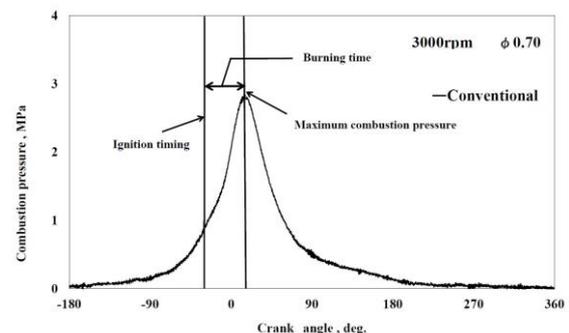


Fig.3 Definition of burning time

4. 実験結果および考察

4.1 点火確率測定実験

各ドーム形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速度の関係をFig.4に示す。通常点火プラグは、低速回転ではドーム形フランジ付き点火プラグに比べて当量比の高い側で運転停止に至った。しかし、高速回転ではドーム形フランジ付き点火プラグと同等の当量比まで点火が可能であった。

低速回転において、ドーム形フランジ付き点火プラグは通常点火プラグに対してより希薄領域での点火が可能である。ドーム形フランジ付き点火プラグD3×4は穴の数が最も多く、フランジ面による流動抑制および衝撃波エネルギー回収の効果は小さくなると考えられる。穴の数が多いため、生成された火炎核からフランジへの熱損失が小さくなるが、流動抑制効果および衝撃波エネルギーの回収が小さかったため他のドーム形フランジ付き点火プラグに比べ高い当量比で失火に至ったと考えられる。ドーム形フランジ付き点火プラグD3×2は、流動抑制効果および衝撃波エネルギーのためのフランジ面が最も大きいことからこれらの効果を最も発揮しやすいと考えられる。しかし、ドーム形フランジ付き点火プラグD3×3に比べて、フランジ面による流動抑制および衝撃波エネルギー回収の面積が大きいにも関わらず希薄領域での点火が困難になった。この理由として、穴の数が二つと少ないことから流動抑制効果と衝撃波エネルギーの回収は発揮できたと考えられるが、フランジ内部の既燃ガスと未燃混合気的气体交換が十分に行われなかったことが考えられる。ドーム形フランジ付き点火プラグD3×3は希薄域を最も拡大することが可能になった。この理由として、ドーム形フランジ付き点火プラグD3×2と比べて、流動抑制効果および衝撃波エネルギー回収のためのフランジ面が小さいので、これらの効果は弱くなることが考えられる。反面、流動抑制効果と衝撃波エネルギー回収のためのフランジ面が小さいため、フランジ面への熱損失が低減され、さらに、穴の数が増えたため、フランジ内部の既燃ガスと未燃混合気的气体交換が十分に行われたことが考えられる。流動抑制効果と衝撃波エネルギー回収、既燃ガスと未燃混合気的气体交換が十分に行われたため、この結果が得られたと考えられる。

高速回転において、ドーム形フランジ付き点火プラグD3×4は低速回転に比べ、当量比の高い側で回転の維持が難しくなり、流動抑制効果

と衝撃波エネルギーの回収が効果的に発揮できなかったことが考えられる。低速回転では点火可能な最小当量比が高かったドーム形フランジ付き点火プラグD3×2は高速回転側ではさらに低い当量比まで点火が可能であった。これは回転速度が大きくなったため、燃焼室内の乱れが大きくなり、穴の数が少なくても十分なガス交換が行われたものと考えられる。ドーム形フランジ付き点火プラグD3×3は、ドーム形フランジ付き点火プラグD3×2と比較して流動抑制の効果および衝撃波エネルギー回収のためのフランジの面積が小さいことから点火が難しいと考えられるが、フランジの面が小さくなったため熱損失が低減されたことと、フランジ内のガス交換が十分に行われたにより、同等の当量比まで点火することが可能であったと考えられる。

回転速度全体において、通常点火プラグに比べて、ドーム形フランジ付き点火プラグの方が最小当量比の回転速度に対する依存性を小さくすることが可能であることがいえる。これは、フランジ内部で火炎核の生成、火炎の成長が安定して行われていることが示唆される。特に、ドーム形フランジ付き点火プラグD3×3は最小当量比の回転速度に対する依存性を小さくすることができるので、穴径が3mmの場合ではこの形状が最も優れているといえる。

4.2 燃焼時間測定実験

Fig.5に3000rpm、当量比 $\phi=0.70$ のときの各点火プラグの燃焼時間の関係、Fig.6に3000rpm、当量比 $\phi=0.57$ のときの各点火プラグと燃焼時間の関係を示す。これらのグラフより通常点火プラグに比べ、ドーム形フランジ付き点火プラグ

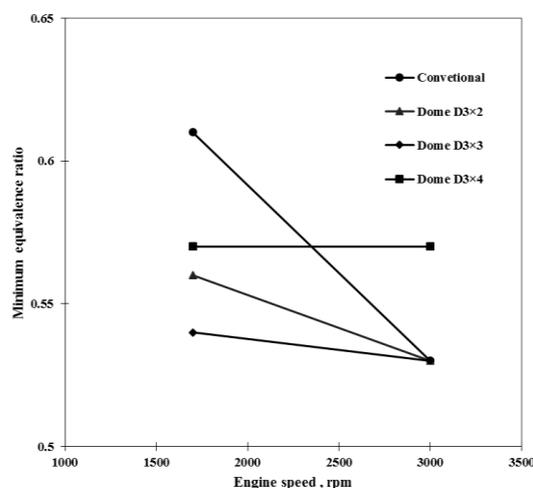


Fig. 4 Relationship between engine speed and minimum equivalence ratio

グのほうが燃焼時間を短くすることが可能であることがわかる。

$\phi=0.70$ において、通常点火プラグに比べてドーム形フランジ付き点火プラグはそれぞれドーム形フランジ付き点火プラグD3×2で約7.8%、ドーム形フランジ付き点火プラグD3×3で約5.8%、ドーム形フランジ付き点火プラグD3×4で約5.3%燃焼時間を短くすることが可能となった。この結果は、フランジ面による衝撃波エネルギー回収効果が有効に作用したためと考えられる。ここで回収されたエネルギーにより、火炎核の保炎し、火炎の成長に促進し、燃焼時間を短くすることが可能になったと考えられる。特に、衝撃波エネルギーの回収のためのフランジ面の大きいドーム形フランジ付き点火プラグD3×2は、衝撃波エネルギー回収効果が最も有効に作用し、また、穴からの吹き出し効果も強いので、最も燃焼時間を短くすることが可能になったと考えられる。ドーム形フランジ付き点火プラグD3×3およびD3×4の場合は既燃ガスと未燃混合気のガス交換用の穴の数が多いため、衝撃波エネルギー回収および吹き出し効果が弱くなり、ドーム形フランジ付き点火プラグD3×2と比較して燃焼時間が長くなったと考えられる。

$\phi=0.57$ の場合において、フランジ形状で比較すると、ドーム形フランジ付き点火プラグD3×2で約8.0%、ドーム形フランジ付き点火プラグD3×3とD3×4では約4.7%燃焼時間を短くすることが可能であった。これは、 $\phi=0.70$ の場合と同じく、フランジ面による衝撃波エネルギー回収が有効に作用したためと考えられる。フランジ形状による燃焼時間の短くなる傾向についても $\phi=0.70$ のときと同じ傾向であることから、通常点火プラグと比較して燃焼時間を短くするための影響は、フランジ形状のみに依存しているということがわかる。 $\phi=0.57$ のドーム形フランジ付き点火プラグの燃焼時間は、 $\phi=0.70$ の通常点火プラグと同等の時間で燃焼が完了していることがわかる。希薄燃焼においてドーム形フランジを付けることの有用性が示された。

点火実験において、ドーム形フランジ付き点火プラグD3×4は優れた点火特性を示すことはできなかったが、燃焼時間に関しては、通常点火プラグに比べ、燃焼時間を短くすることが可能になった。このことから、点火特性と燃焼時間には強い相関のないことが示唆された。本報では高速回転のみであるが、低速回転においても同様の傾向、結果が現れるか検討が必要である。

5. 結言

単気筒天然ガスエンジンを用いて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時間を調べた結果以下の結論を得た。

1. ドーム形フランジ付き点火プラグは、低速回転においてドーム形フランジがもたらす流動抑制効果と衝撃波エネルギーの回収が効果的に行われたため、より希薄領域での点火が可能になった。
2. 高速回転において、ドーム形フランジ付き点火プラグの優位性が小さいのでさらなるフランジ形状の改良が必要である。
3. ドーム形フランジ付き点火プラグD3×3は全回転速度において希薄領域においても優れた点火特性を発揮した。
4. 通常点火プラグと比較して、ドーム形フランジ付き点火プラグは、燃焼時間を短くすることが可能になった。
5. 点火特性と燃焼時間との間には強い相関性のないことが示唆された。

「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、第48回燃焼シンポジウム講演論文集、pp.132-133(2010)
- 3) 宮里・氏家ほか、第50回燃焼シンポジウム講演論文集、pp.120-121(2012)

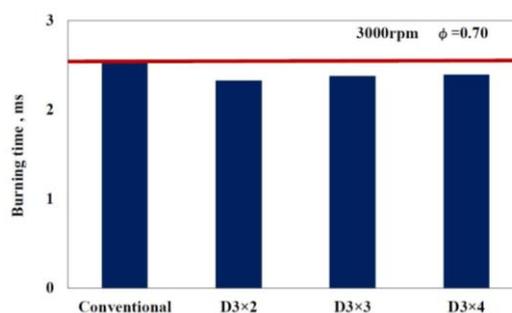


Fig.5 Burning time for various dome flanged spark plug ($\phi=0.70$)

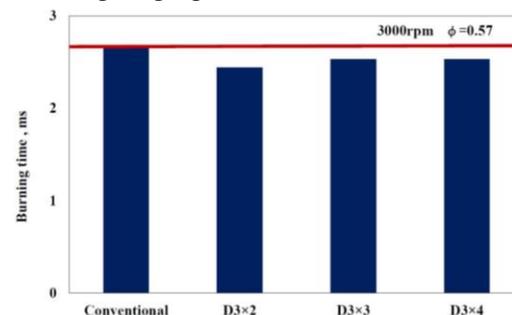


Fig.6 Burning time for various dome flanged spark plug ($\phi=0.57$)