

天然ガスエンジンにおけるフランジ付き点火プラグの有効性の検証

氏家康成 (機械工学科)

野村浩司 (機械工学科)

1 緒言

地球温暖化抑制に関する京都議定書(COP3)が発効して、CO₂排出量削減の要求は日増しに強まっている。我が国におけるCO₂排出量の約21%が交通運輸部門からのものといわれており、国内で多用されている火花点火機関の対策が強く求められている。CO₂排出低減策は、基本的に熱効率を向上させるか、単位発熱量あたりの含有炭素比率が少ない燃料を使用することになる。前者の熱効率向上は、当然ながら化石燃料枯渇化の対策にも共通する有効な技術である。その方策として、圧縮比の増大と希薄燃焼が熱力学上、自明であるが、その実用化には確実な点火と火炎伝播促進が必須である。一般的には燃焼室内に旋回流に伴う強い乱れを生成しつつ、大きな火花エネルギーを付与する方法が取られる。しかしながら火花エネルギーの増大は、電磁波障害や点火系の耐久性を考えると、あまり得策ではない。

一方、CO₂排出量削減に有効な燃料として天然ガスが注目されている。しかしながら、これを普及させるには、車載容量の問題は他の研究に譲るとして、燃焼研究の立場からは、点火特性の劣性を解決する必要がある。

これらの問題に対する一つの回答として、著者らはフランジ付き点火プラグを提案してきた。これは、火花放電経路近傍の強い混合気流動を抑制し、かつ放電時に、衝撃波発生に費やされて散逸するエネルギーを熱として回収することにより、従来よりも小さな火花エネルギーで点火を成立させ、その後、火炎伝播を促進させる働きを狙ったものである。本報ではフランジ付き火プラグの有効性と点火特性改善効果の機構を解明するために実施された基礎実験から応用実験に至る一連の経過を報告する。

2 定容旋回流動燃焼容器を用いた基礎実験

2.1 フランジ付き電極の点火特性

静止混合気場および旋回流動場においてフランジ付き電極の点火実験を行った。概略を Fig.1 に示す。ノズル手前の弁を閉じて噴流を止めれば静止場となる。使用したフランジ付き電極の概略を Fig.2 に示す。フランジ付き電極の最小一次電流と主流の平均流速の関係を Fig.3 に示す。まず静止場において最小一次電流が低減していることがわかる。これより、フランジ付き電極には、流動抑制効果以外の点火エネルギー低減機構が存在することが示唆された。旋回流動場では、流速が増大するほどフランジによる流れの抑制効果が加わり、通常電極との差が開いた。フランジ

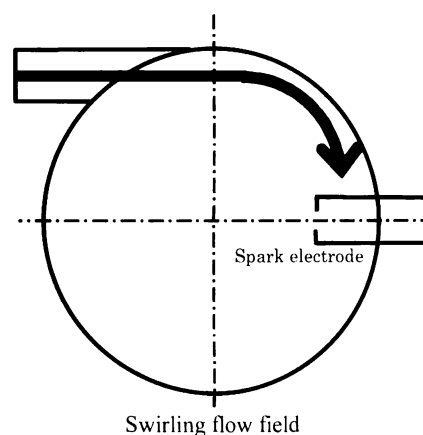


Fig.1 Combustion chamber.

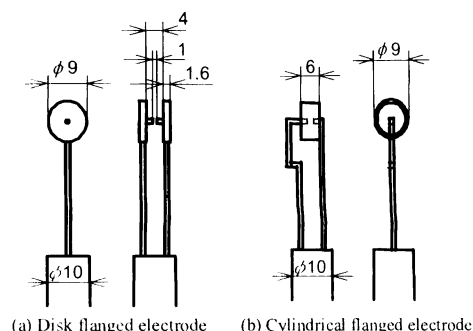


Fig.2 Flanged electrode.

付き電極の点火エネルギー低減機構を解明するため、シュリーレン法を用いて火炎核の成長過程を撮影した。火炎核の成長と共に衝撃波の進行が確認でき、これがフランジで反射されて中心部に戻る様子が確認できた。このときフランジ中心部の混合気が断熱圧縮されて昇温し、火炎核を保炎するものと考えられる。LDV を用いた流速測定および数値解析では、フランジの流れ抑制効果も確認されている。

2.2 フランジ付き電極の燃焼特性

燃焼時間と主流の平均流速の関係を Fig.4 に示す。これより、フランジには火炎核から熱を奪い、障壁となる負の作用が考えられるが、火炎核が成長してフランジ外部に出た後には燃焼の促進に寄与するものと考えられる。

3 フランジ付き点火プラグの高圧縮希薄燃焼機関への適用

3.1 実験装置

定容燃焼容器を用いた基礎実験で、フランジ付き電極の有効性が確認された。そこで実用化に向けたフランジ付き点火プラグを検討するため、急速圧縮機を用いて点火実験を行った。装置の概略を Fig.5 に示す。これはピストンの背面に、急速に高圧作動油を導いて実機の圧縮・点火過程を模擬するもので、圧縮比は可変である。

3.2 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.6 に示す。これは市販の点火プラグ(NGK 製 B4ES)のねじ部内側に、外形 9 mm のステンレスパイプ (SUS304) を差し込んで銀ロウ付けし、フランジ高さ $h=5\text{ mm}$ のものを製作した。

3.3 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.7 に示す。このプラグは、市販の点火プラグから接地電極を取り去り、そこに $\phi 1.6\text{ mm}$ のステンレス線 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 $\phi 1.6\text{ mm}$ のステンレス線を取り付け、新たな接地電極とした。フランジ、ステンレス線および接地電極の材質は耐久性や耐熱性、考慮し

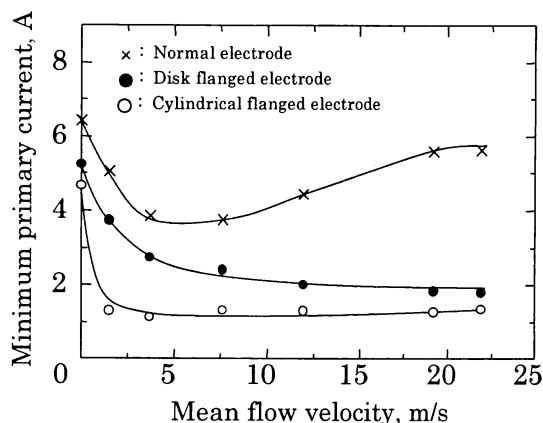


Fig.3 Minimum primary current change.

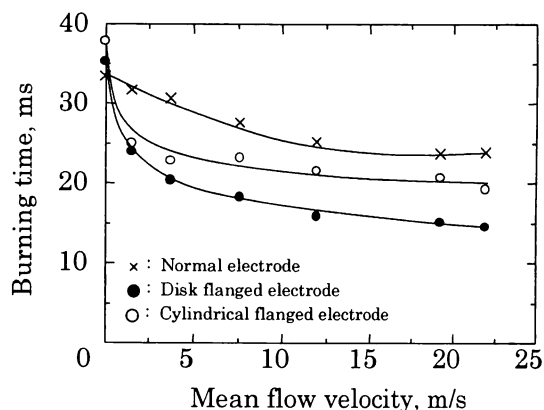


Fig.4 Effect of mean flow velocity on burning time.

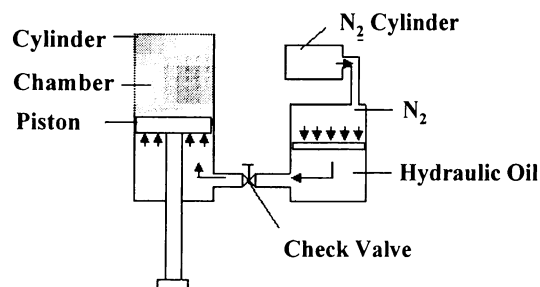


Fig.5 Concept of rapid-compression machine.

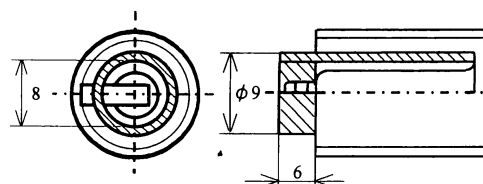


Fig.6 Cylindrical flanged spark plug.

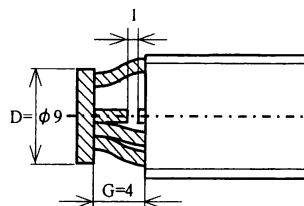


Fig.7 Disc flanged spark plug.

て、円筒形フランジと同様のSUS304を使用した。接合にはねじ切りと銀ロウ付けを併用し、フランジ直径 $D=9\text{ mm}$, フランジ間隔 $G=4\text{ mm}$ のものを製作した。

3.4 急速圧縮機におけるフランジ付き点火プラグの点火・燃焼特性

各フランジ付き点火プラグの当量比と最大燃焼圧力の関係を Fig.8 に示す。当量比が 0.9 以上の最大燃焼圧力に大きな違いは見られない。当量比 0.7 および 0.8 では、円板形フランジ付き点火プラグを用いたときに最も高い最大燃焼圧を示した。これはピストン上昇に伴う混合気の上昇流をフランジで遮って消炎を防ぐと共にフランジ外周辺の乱れが強くなり、火炎伝播を促進したためと考えられる。また、当量比 0.7 において円筒形フランジ付き点火プラグでは燃焼が確認できなかった。円筒形フランジの場合、ピストン上昇時に発生する混合気流を直接火花間隙部に受けたため失火したと考えられる。

4 天然ガスエンジンへの応用

4.1 実験装置

急速圧縮機においてもフランジ付き点火プラグの優位性が確認できた。そこで実用化に向け、本来の目的である天然ガスエンジンを用いて点火特性を調べた。実験装置の概略を Fig.9 に示す。燃料には天然ガス(13A)を用いた。

4.2 円筒円板組み合わせ形点火プラグ

希薄燃焼において、円板形および円筒形フランジ付き点火プラグが優位な場合があることを確認できたが、フランジ形状にはさらに工夫の余地が残されていることが示唆された。そこで、新形状として円筒円板組み合わせ形点火プラグを製作した。その概略を Fig.10 に示す。Fig.6 の円筒形フランジの外側に $\phi 1\text{ mm}$ のステンレス線 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 Fig.7 と同様に新たな接地電極として $\phi 1.6\text{ mm}$ のステンレス線を取り付け、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

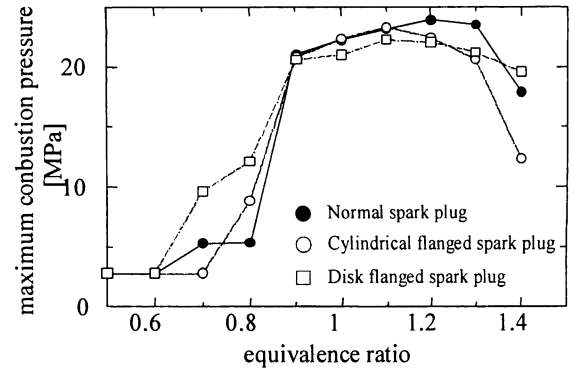


Fig.8 Relation between equivalence ratio and maximum pressure.

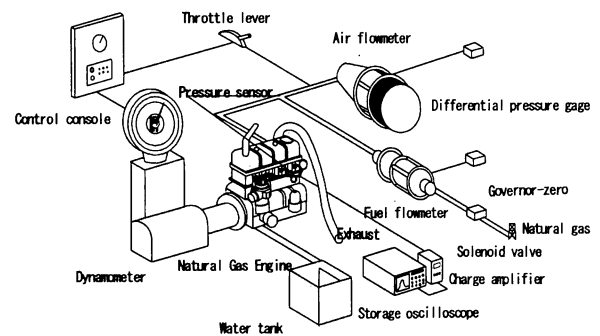


Fig.9 Experimental apparatus.

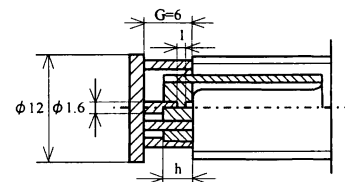


Fig.10 Cylindrical flanged and disc flanged combination spark plug.

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 4, 5 mm としたものを製作した。接合方法にはねじ切りと銀ロウ付けを併用した。

4.3 天然ガスエンジンにおけるフランジ付き点火プラグの点火特性

各フランジ付き点火プラグについて、当量比と点火確率の関係を Fig.11 に示す。いずれの回転速度においても、円筒部フランジ高さが高いほど点火確率が向上した。また低速回転速度では、フランジ高さの低いものは、通常プラグより点火確率が下回るものがあった。これはフランジ高さが低

いと、フランジ端面に衝突し巻き込まれた混合気が、火花間隙周辺の流動を増幅し、熱損失が増大したためと考えられる。逆に高い場合、フランジ端面に衝突し巻き込まれた混合気が火花間隙まで到達しにくく、十分な流動抑制効果が得られたためと考えられる。

一方、回転速度で比較をすると、低速回転域では円板形フランジ付き点火プラグの点火確率が高いことがわかる。高速回転域では、円筒形フランジ付き点火プラグは円板形よりも高い点火確率が得られている。その理由として、低速回転速度において円筒形フランジは、衝撃波エネルギーの回収効果よりもフランジへの熱損失が大きくなるために点火確率が通常プラグと同等、またはそれよりも低い結果になったと考えられる。高速回転域では、円筒形フランジの方が円板形フランジよりも流動抑制効果が高いため、円筒形の点火確率が向上したものと考えられる。

円筒円板組み合わせ形点火プラグにおいては、円筒部の高さが高いほど点火確率が向上した。これは、円筒形フランジと円板形フランジの組み合わせによる流動抑制効果の向上と、フランジ面の増大による衝撃波エネルギーの回収効果の向上によるものと考えられる。低速回転速度でも点火確率が向上した理由として、フランジや電極への熱損失増大よりも衝撃波エネルギーの回収効果が上回ったためと考えられる。本実験範囲では、低速回転および高速回転域双方で、組み合わせ形($G=6, h=5$)点火プラグが有効に機能した。

5 結言

地球温暖化抑制に有効である希薄燃焼天然ガスエンジンの点火特性改善を目的としてフランジ付き点火プラグを提案し、その有効性を基礎実験から実機実験に亘って調べた結果、以下の知見を得た。

1. 静止場および旋回流動場において、円筒形および円板形フランジ付き電極による最小一次電流の低減効果が得られた。これは、火花放電時に衝撃波エネルギーに変換される無

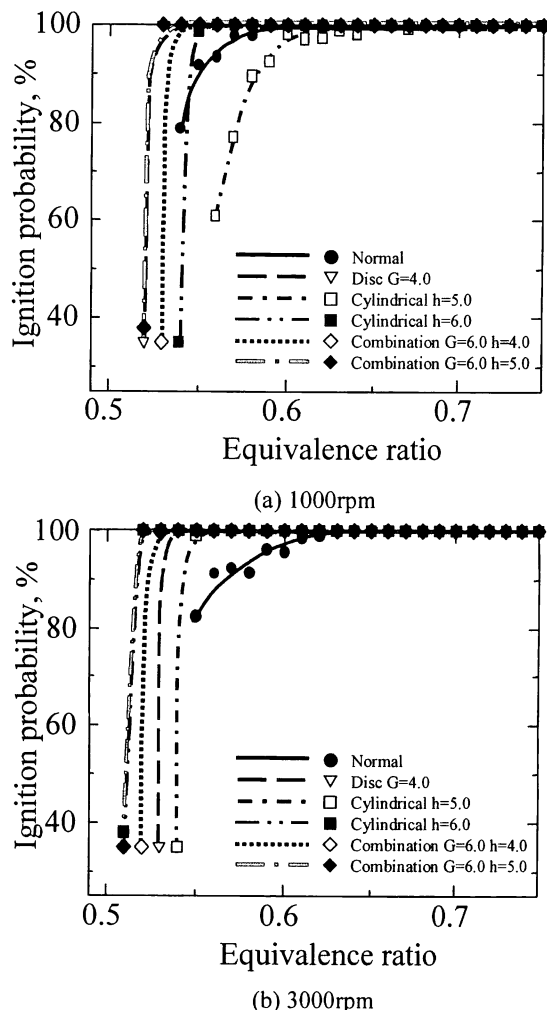


Fig.11 Relation between equivalence ratio and ignition probability.

効エネルギーを熱として回収すると共に、フランジが点火中心近傍の強い混合気流動を抑制するためと考えられる。

2. 旋回流動場において、フランジ付き電極は、フランジ端部のエッジ効果と思われる乱れ増幅により、火炎伝播を促進する効果がある。
3. 希薄領域において、フランジ付き点火プラグは通常プラグよりも高い点火確率が得られる。
4. 円板形と円筒形を比較すると、円板形は低速回転域で効果を発揮し、円筒形は高速回転域において有効である。
5. 円筒円板組み合わせ形点火プラグは、低速から高速運転まで、かつ希薄混合気条件で高い点火確率を示し、今後、実用化に向けたフランジ形状設計に関する指針が得られた。