

特集 高着火性イリジウムプラグの開発*

Super Ignition Plug with Fine Center & Ground Electrodes

堀 恒 円

Tsunenobu HORI

柴 田 正 道

Masamichi SHIBATA

岡 部 伸 一

Shinichi OKABE

橋 爪 勝 志

Katsushi HASHIZUME

Spark plugs with higher ignitability are as ever in great demand to realize high fuel efficiency and low emissions. To meet this demand, DENSO launched the Iridium Spark Plug in 1997, which realized high ignitability, low required voltage and a long life that had been difficult to achieve concurrently. The development of this product was enabled by miniaturizing the center electrode, produced using DENSO's original, highly wear-resistant iridium alloy (featuring a high melting point and excellent oxidation resistance). However, the effort to miniaturize the center electrode had reached its limit. Therefore, we focused on miniaturization of the ground electrode in addition to the center electrode, and have succeeded in developing the "Super Ignition Plug" that features excellent ignitability, lowered required voltage and a long life.

Key words : Iridium Spark Plug, Super Ignition Plug, Excellent ignitability, Lowered required voltage and a long life.

1. 序論

従来よりスパークプラグには、「高着火性」「低要求電圧」「長寿命」が求められている。着火性向上の基本的な考え方は、火炎核が生成し、成長する過程において電極による冷却損失を抑制することである。この考え方を基に、中心電極の細径化により着火性向上を図ってきた。また、中心電極の細径化は、電極先端部の電界が強められ、局所的な絶縁破壊が起こりやすくなるため、要求電圧低減にも有効な手段である。逆に、細径電極は火花エネルギーの集中による発熱と燃焼ガスからの受熱により、電極温度が上昇し、消耗を促進させてしまう。その結果、寿命を大幅に短縮させてしまうといった課題がある。この課題に対応するため、中心電極用材料として耐消耗性に優れたイリジウム合金材料を開発し、「高着火性」「低要求電圧」「長寿命」を併せ持つイリジウムプラグを商品化した^{1,2)}

しかしながら、長寿命はもとより近年の排出ガス規制強化、エンジン高圧縮比化に伴い更なる高着火性、低要求電圧が求められる中、中心電極の細径化はもはや限界となってきた。こういった状況の中、従来の細径中心電極に加え、接地電極の細径化に着目し、更なる高性能スパークプラグの実現を目指した結果、高着火性イリジウムプラグの開発に成功した。

本論文では、その開発経緯および特性について紹介する。

2. 細径接地電極の効果

2.1 着火性向上効果

従来の着火性評価手法は、実機評価主体であったが、本研究では「効率よく、メカニズムが解明できる」ということに注力し、従来からの評価手法を一新した。本手法では、独自開発の着火シミュレーション、可視化エンジンを駆逐することで細径接地電極による着火性向上のメカニズムを解明した。

2.1.1 着火シミュレーション評価

一般的に使用されている着火シミュレーションの大半は、火炎核を設定しておき、単に火炎の拡散を計算するもので、火炎核の生成過程、電極による冷却損失は計算されていない。一方、本研究に採用した着火シミュレーションは、火花ギャップ間に点火エネルギーに相当する熱源を設定し、電極への熱伝達を考慮した上で、ギャップ間の熱収支により火炎核の生成と火炎の拡散（化学反応）を計算するものであり、火花放電から火炎の拡散までの過程を実機と同様に現わすことができる³⁾。

Fig. 1は、中心電極および接地電極に流れる熱流束を積分し、電極による冷却損失を算出した結果である。乱流モデルとしてk- ϵ モデルを使用し、流れの乱れの影響も考慮した。縦軸は、従来形状プラグ（火花ギャップ=1.1mm）の中心電極による冷却損失をベースとした時の冷却損失比であり、小さいほど、着火性に優れていることを示している。

* (社)自動車技術会の了解を得て、2003年秋季大会学術講演会前刷集No. 94-03, 161より転載

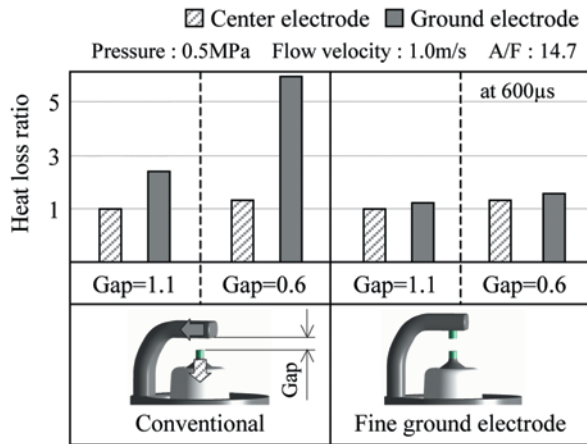


Fig. 1 Electrode shape's effect to heat loss

従来形状は、中心電極に対して接地電極による冷却損失が大きく、火花ギャップを縮小する（以後、狭ギャップ化）と接地電極による冷却損失が大幅に増加する。一方、接地電極の細径形状は狭ギャップ化による冷却損失への影響が小さく、狭ギャップでも従来形状と比較して接地電極による冷却損失が抑制されている。すなわち、接地電極の細径化は、狭ギャップでも従来以上の高着火性を実現できると考えられる。

Fig. 2に、火炎核の生成から火炎の拡散までのシミュレーション結果をアニメーション化し、放電開始後、同時間の火炎の大きさを記録した一例を示す。

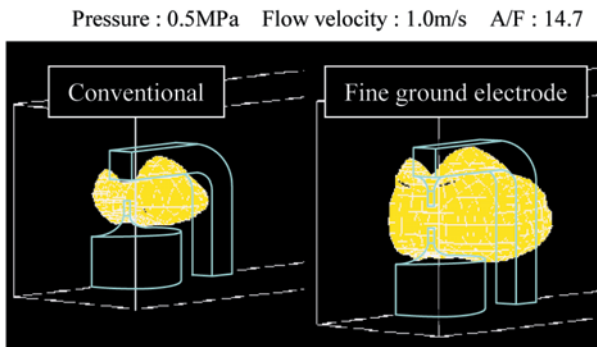


Fig. 2 Flame growth

接地電極の細径形状は従来形状に対して、大きく火炎が成長しており、着火性に優れていると言える。これは、シミュレーション結果から分かるように、接地電極の細径化は、接地電極による冷却損失を抑制できるため火炎の成長を妨げないからである。

2.2.1 可視化エンジンによる火炎成長の観察

従来よりシュリーレン撮影により火炎成長が観察されているが、従来の方法では、撮影機器の長時間露光等の問題があり、実機エンジンにおけるスパークプラグ近傍の火炎伝播解析にとどまり、電極近傍での火炎成長の様子を詳細に観察された例はなかった。本研究ではこれらの問題点を克服するために鋭意工夫し、新たな手法を開発した。以下、本研究で採用した可視化エンジンによる火炎の観察装置をFig. 3に説明する。

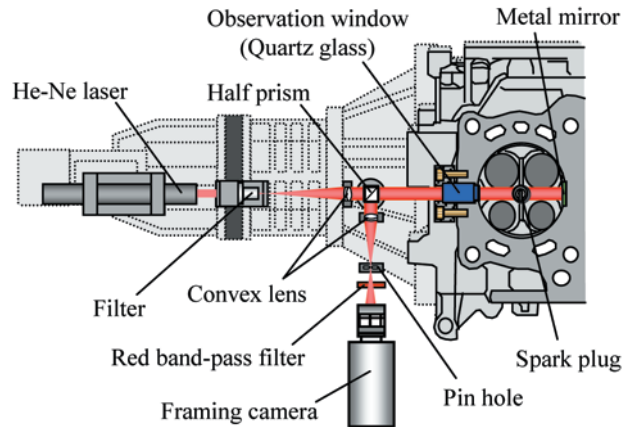


Fig. 3 Combustion visualizing engine

撮影方法は、He-Neレーザが凸レンズによる平行ビームに変換され、燃焼室内の金属ミラーで反射し、再度スパークプラグの発火部を通過した像をハーフプリズムにて光路変更させ、凸レンズ、ピンホールでシュリーレン像(密度差により平行ビームに乱れが発生し、それによりできる不均一な像)にし、撮影する反射式シュリーレン撮影を採用した。ここで、本装置の特徴を示す。

- ・従来用いられている高速度ビデオ（数万コマ/秒）は、感度が悪く、極めて短時間の現象は撮影できないが、フレーミングカメラ（数百万コマ/秒）の採用により、超高速、高感度撮影を実現した。
- ・フレーミングカメラの撮影速度と光量の適合を図り、光源として連続かつ屈折率の低いHe-Neレーザを採用することで、微小空間の高感度撮影を実現した。また、He-Neレーザは単色光であるため、軸上の色収差の影響がでない。
- ・従来のハーフミラーからハーフプリズムへ変更することで、透過光路のズレや複像の発生を抑制した。

- ・ He-Neレーザ以外の波長（放電の発光）をカットできる赤色バンドパスフィルタの採用により、鮮明な画像が得られる。
- ・ 集光レンズに顕微鏡レンズを採用することで、装置のコンパクト化を図った。

これにより、放電開始直後からの火炎成長の様子をスパークプラグの火花ギャップという微小空間で高速撮影することが可能となり、スパークプラグの電極形状が火炎成長に及ぼす影響を詳細に観察できるようになった。

ここで、本装置により観察した一例をFig. 4に示す。写真は、放電開始後200 μ s時の火炎を撮影したものであり、密度変化による火炎の様子が鮮明に観察できる。

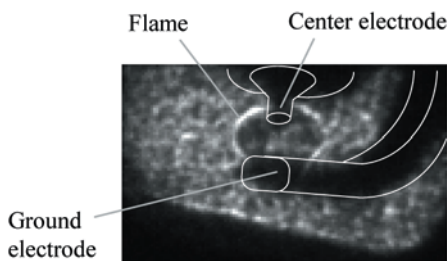


Fig. 4 An example of flame visualization

次に、電極形状が火炎成長に及ぼす影響を調べた結果をFig. 5に示す。なお、写真では火炎成長の差を明確にするため、点線にて強調した。従来形状は、狭ギャップ化により火炎成長が妨げられているのに対して、接地細径形状は狭ギャップでも従来形状以上の大きな火炎成長が認められる。

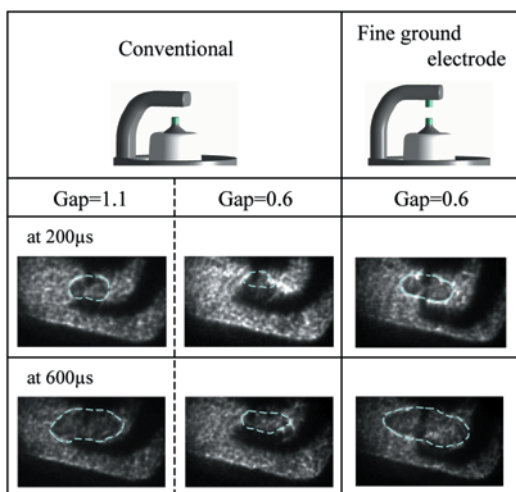


Fig. 5 Electrode shape's effect to flame growth

以上の結果は、着火シミュレーションの結果と合致しており、接地電極の細径化は、狭ギャップでも従来形状以上の高着火性を実現できるといえる。

2.2 要求電圧低減効果

中心電極の細径化は、高着火性を実現できるだけでなく、要求電圧の低減が可能になることは従来より知られている。しかしながら、接地電極の細径化については着火性への効果のみが注目され、要求電圧への影響は詳細に研究されていない。そこで、本研究では要求電圧への影響も詳細に調査した。

Fig. 6に、FEMによる電界強度解析結果を示す。

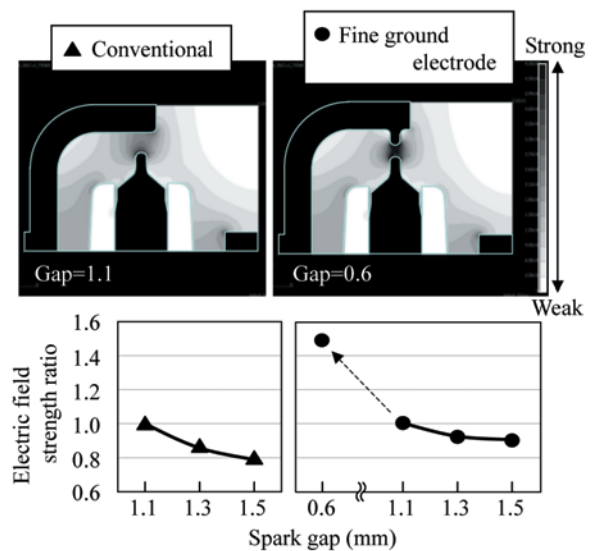


Fig. 6 Electric field analysis (FEM)

接地細径形状は、従来形状に対して、火花ギャップによる電界強度の変化量が少ない。すなわち、従来形状のスパークプラグでは電極が消耗し、火花ギャップが拡大すると電圧が大きく上昇するのに対して、接地細径形状は、火花ギャップが拡大しても電圧の上昇量が小さいと言える。これは、接地細径形状は、その形状効果により中心電極だけでなく、接地電極先端部の電界強度も強められるためであると考えられる。また、上述したように接地細径形状は、狭ギャップでも従来形状以上の高着火性を維持できるので、更に要求電圧の低減が可能となる。

3. 高着火性イリジウムプラグの開発

2章では、細径接地電極の効果およびそのメカニズムについて説明したが、本章ではその効果を最大限に

発揮する接地電極構成について詳細に調査し、スパークプラグ仕様の最適化を図った。

3.1 着火性への影響調査

3.1.1 細径部の突き出し方向

Fig. 7に細径部の突き出し方向の影響を調べたエンジン評価結果を示す。評価は、ISC (Idle Speed Control) を解除し、等スロットル開度での回転数を調査したものであり、回転数が高いほど、着火性が優れていることを示している。

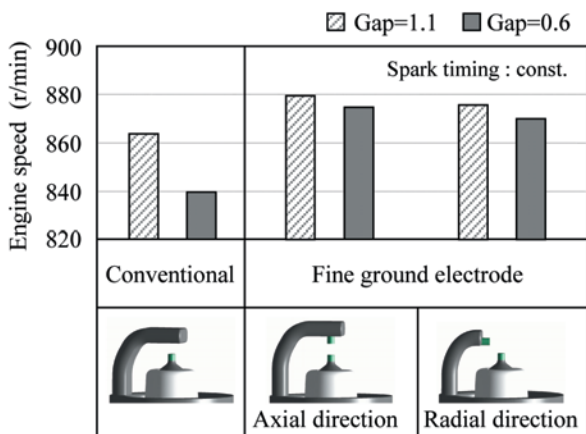


Fig. 7 Influence of miniaturized-portion protrusion direction to ignitability

突き出し方向にかかわらず接地細径形状は、従来形状に対して着火性が優れている。また、突き出し方向による影響をみても、軸方向に突き出した方が径方向よりも優位である。これは、径方向タイプは軸方向タイプに対して接地電極と碍子の空間部が狭く、火炎成長過程における冷却損失が大きくなってしまふためと推定される。

3.1.2 細径部の寸法

Fig. 8に細径部の寸法の影響を調べたエンジン評価結果を示す。従来形状は、狭ギャップ化により着火性が悪化しているのに対して、接地細径形状は、狭ギャップでも長さLが0.5mm以上、径 0.8mm以下であれば、従来形状よりも着火性に優れている。また、Lが大きい程、着火性に優れているのは、接地電極と碍子との空間部を広くでき、火炎成長の妨げを小さくできるからであり、Dが小さい程、着火性に優れているのは、初期火炎との接触面積を減少でき、接地電極による冷却損失を抑制できるからである。

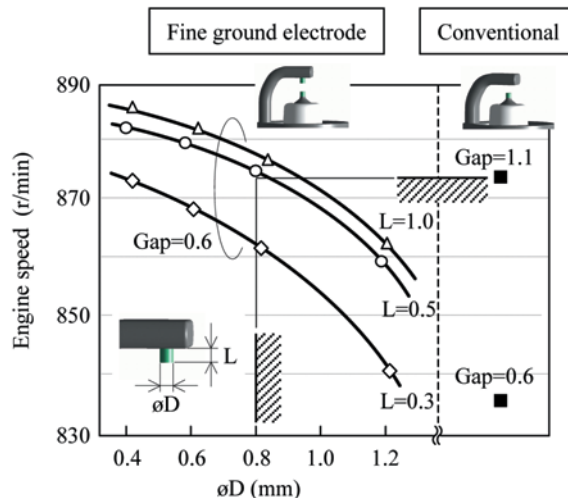


Fig. 8 Influence of miniaturized-portion dimensions to ignitability

3.2 要求電圧への影響調査

Fig. 9に要求電圧が最も高くなる条件（急加速）での要求電圧測定結果を示す。

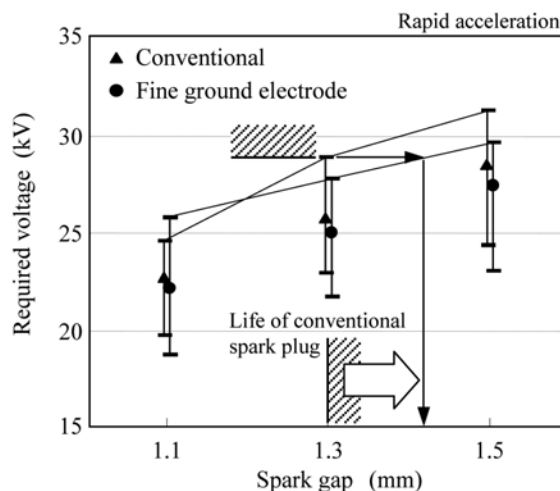


Fig. 9 Required voltage reduction

上述のFEM電界解析結果と同様に、接地細径形状は、従来形状と比較して火花ギャップ拡大に対する電圧上昇量が少なく、火花ギャップが大きい範囲では、要求電圧を低減できる。よって、接地細径形状は、従来形状よりも火花ギャップの拡大量が大きくても（消耗量が多くても）同等の寿命が確保できるということである。

3.3 高着火性イリジウムプラグの仕様

以上の研究から、従来形状のスパークプラグに対して更なる「高着火性」「低要求電圧」を実現する高着火性イリジウムプラグを開発した。Fig. 10に従来形状であるイリジウムプラグおよび本研究により開発した高着火性イリジウムプラグの基本仕様を示す。

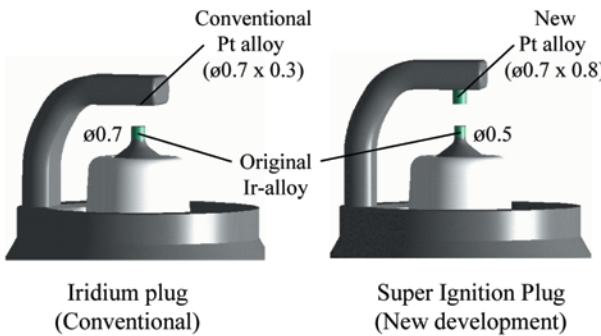


Fig. 10 Basic specification of Super Ignition Plug

イリジウムプラグの接地電極には円板形状のPt合金チップが埋め込まれているのに対し、高着火性イリジウムプラグは直棒状のPt合金チップを軸方向に突き出している。また、要求電圧の低減効果により従来形状のスパークプラグよりも消耗が多くてもよいことは先述したが、その効果により中心電極も更に径小化を図っている(0.7 → 0.5)。これにより、接地電極のみならず中心電極による冷却損失も抑制でき、更に着火性向上を実現している。

なお、本論文では詳細を述べないが、高着火性イリジウムプラグにおいては、接地細径部の使用環境に最適な貴金属合金材料として従来とは異なるPt合金チップを新たに開発し、採用している。これは、接地電極の細径化は、先端部の局所的な温度上昇を伴い、加速度的に消耗が増加するといった問題への対応であり、イリジウムプラグと同等の長寿命を実現するためのものである。

ここで、Fig. 11に高着火性イリジウムプラグの効果を示す。図では、それぞれ異なった火花ギャップを設定した場合の以下2タイプを示している。

- Type-1 (火花ギャップ=1.0mm)
究極の高着火性を実現したスパークプラグ
- Type-2 (火花ギャップ=0.6mm)
究極の低要求電圧を実現したスパークプラグ

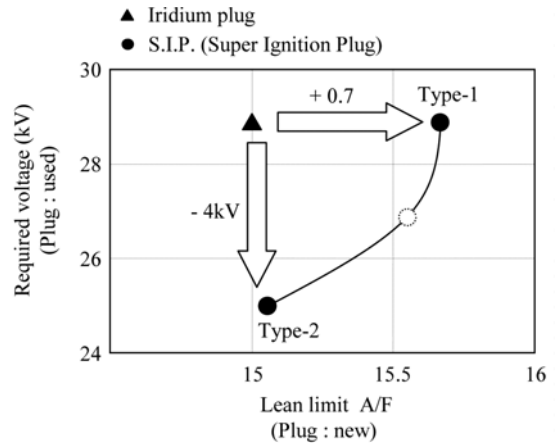


Fig. 11 Advantages of Super Ignition Plug

図のように、高着火性イリジウムプラグは、火花ギャップの設定のみで様々なエンジンニーズに対応できるフレキシブルなスパークプラグである。また、中心電極、接地電極の貴金属合金チップの寸法を変更させることで、更にバリエーションに富んだ仕様設定も可能である。

4. エンジン性能向上効果

本研究では、従来のスパークプラグでは達成できなかった高性能の実現を目指した。以下、高着火性イリジウムプラグの特性によるエンジン性能向上効果について説明する。

4.1 燃費向上

Fig. 12に、燃焼変動および燃焼消費量について調べた結果を示す。評価は、ISCを作動させ、平均回転数を800r/min(アイドリング)にセットした状態で実施した。

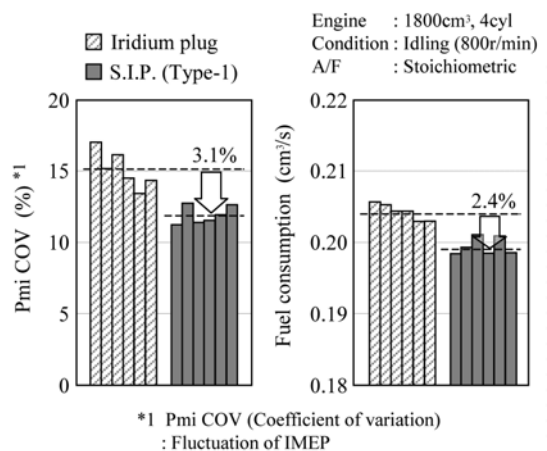


Fig. 12 Better fuel efficiency

高着火性イリジウムプラグは、イリジウムプラグに対して燃焼変動を約3.1%小さくでき、燃料消費量を2.4%少なくできる。この効果は、接地電極の細径化により着火性が向上し、燃焼効率が悪くなったためである。また、高着火性イリジウムプラグは燃焼変動が小さいためアイドリング回転数をより低くすることができるので、更なる燃費向上が期待できる。

4.2 エミッション低減

Fig. 13は、VVT (Variable Valve Timing) を用い、バルブタイミング進角時の燃焼変動とNOx 排出量について調べた結果である。

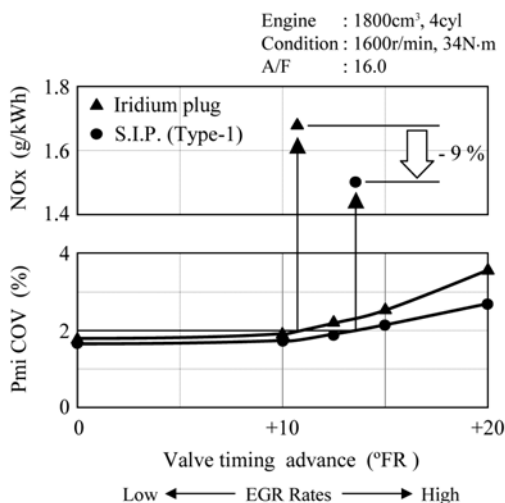


Fig. 13 Reduced emissions

高着火性イリジウムプラグは、イリジウムプラグに対して燃焼変動が小さいのでバルブタイミング進角が可能となる。よって、内部EGR (Exhaust Gas Recirculation) が増加するので、燃焼変動がイリジウムプラグと同等レベルになるまでバルブタイミングを進角させた時、NOx 排出量を約9%低減できる。

4.3 低温始動性向上

Fig. 14に低温始動性評価結果を示す。評価はスタータのON, OFFを繰り返して、始動までの回数を調査した。

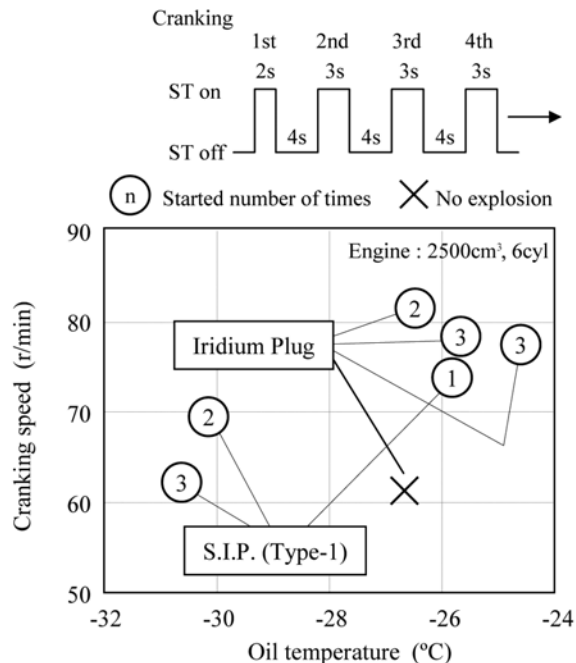


Fig. 14 Improved cranking performance at low temperature

高着火性イリジウムプラグは、イリジウムプラグよりも低い油温、低いクランキング回転数での始動が可能であり、低温始動性においても優位である。これは、接地細径形状の効果により、燃料ブリッジができにくく、確実な放電を可能にしているからである。

4.4 点火システム小型化

Fig. 15に投入エネルギー (エネルギー密度×放電時間) を変化させた時の燃焼変動について調べた結果を示す。

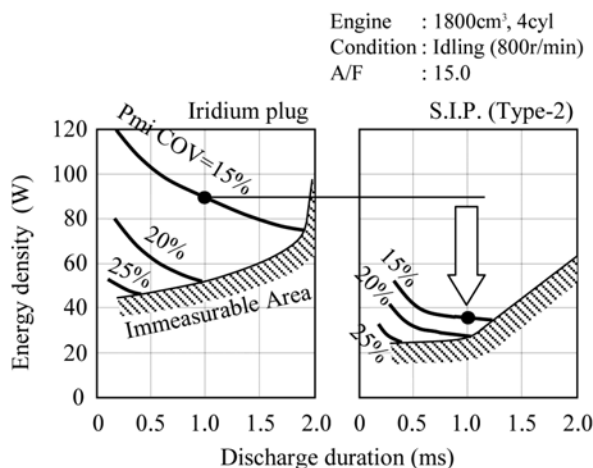


Fig. 15 Reduced required-energy for ignition

高着火性イリジウムプラグは、同等の燃焼変動（着火性）を確保するために必要な投入エネルギーをイリジウムプラグの半分以下にすることができる。よって、点火コイルの小型化を可能にする。また、Type-2は要求電圧を大幅に低減できるため、プラグ小型化の際に問題となる碍子耐電圧低下分の補完、およびハウジングとの絶縁空間縮小による横飛火を抑制することができる。以上から、点火システムの小型化が実現でき、それによりエンジン設計自由度の拡大が可能となり、バルブ径大化、冷却系の改良等によるエンジン出力向上の一助となる。

5. 結論

本研究では、従来のスパークプラグを超越する高性能を実現するために接地電極細径化の詳細研究に取り組み、以下の結果を得た。

- (1) 接地電極の細径化は、火炎が成長する過程において電極による冷却損失を抑制できるため着火性を大幅に向上できる。
- (2) 接地電極の細径化は、その形状効果により要求電圧を低減できるだけでなく、狭ギャップでも高着火性を維持できるので要求電圧を大幅に低減できる。

(3) これらの効果を最大限に発揮できる電極構成について詳細に調査した結果、イリジウムプラグ以上の「高着火性」「低要求電圧」を実現した。

(4) 接地電極細径部の使用環境に最適な貴金属合金材料としてPt合金チップを新たに開発し、イリジウムプラグと同等の「長寿命」を達成した。

今後、燃費・排ガス等の規制強化に対し、本研究により開発された『高着火性イリジウムプラグ』が燃焼改善の一助となることを期待して結びとする。

<参考文献>

- 1) H. Osamura : Development of New Iridium Alloy for Spark Plug Electrodes , SAE 1999-01-0796 (1999)
- 2) 長村弘法 : 高性能長寿命イリジウムプラグの開発 , 自動車技術会論文 , No.9939532 (1999)
- 3) 頼田浩 : 火花点火機関における点火・着火解析手法の開発 , 内燃機関シンポジウム論文 , No.20026072 (2002)
- 4) T. Hori : Super Ignition Spark Plug with Fine Center & Ground Electrodes , SAE 2003-01-0404 (2003)

<著者>



堀 恒円
(ほり つねのぶ)
セラミック技術部
スパークプラグ開発に従事



柴田 正道
(しばた まさみち)
セラミック技術部
スパークプラグ開発に従事



岡部 伸一
(おかべ しんいち)
(株)日本自動車部品総合研究所
第4研究室
点火システム開発に従事



橋爪 勝志
(はしづめ かつし)
トヨタ自動車(株)
第2エンジン技術部
点火系部品開発に従事