

# 特集 赤外カメラによる点火プラグの温度計測\*

## Spark Plug Temperature Measurement Using an IR Camera

岡部 伸一

Shinichi OKABE

守野 哲也

Tetsuya MORINO

堀 恒円

Tsunenobu HORI

端無 憲

Ken HANASHI

We have developed a technique to measure the spark plug temperature in an engine combustion chamber. Under this technique, an infrared image of a spark plug in a visualization engine is captured using a high-speed IR camera and the image is converted into an image of the spark plug temperature. In order to measure temperature under a high driving load, we developed a new visualization engine. Furthermore, some additional techniques to capture spark plug images using an IR camera were developed. As a result, it is possible to measure spark plug temperature per cycle under various driving loads. In this paper we introduce this measuring technique and the results of various temperature measurements.

**Key words:** Spark plug temperature, IR camera, Visualization

### 1. まえがき

点火プラグの燃焼室へ露出している部分の温度特性は、点火プラグの設計・開発において重要な指標の一つである。碍子部へのカーボン付着防止（耐くすぶり性向上）のため意図的に温度を上げたい反面、この温度がある値以上になるとホットスポットとなりプレイグニッション（過早着火、以下プレイグと呼ぶ）を引き起こす。そのため、各エンジンに最適な温度特性をもつ点火プラグを選定することが必要である。しかし適当な温度の計測手段がないため、熱価と呼ばれる耐プレイグ性を表す尺度をSAE等で定められた試験法で評価し、その熱価をプラグメーカーは管理している。

一方、点火プラグは「耐くすぶり性」「耐プレイグ性」の他に、「高着火性」「長寿命」「小型化」といった要求に応えるため、電極の細径化、小型プラグの開発を進めてきた<sup>1)2)</sup>。耐消耗性に優れた電極材料の開発等において電極温度を知ることは非常に重要である。しかしながら点火プラグの温度計測は、熱電対をプラグ内部に埋め込んだ測温栓と呼ばれる特殊プラグによる計測しなく、細径電極や小型プラグにおいては熱電対を埋め込むことができないなど、点火プラグ開発において大きな問題となっていた。

そこで我々は、可視化エンジンを使って筒内の点火プラグを赤外カメラにより撮影し、点火プラグ温度を可視化計測する技術を開発した<sup>3)</sup>。本技術は、高負荷運転に耐える燃焼室内観察窓をエンジンに装着し、点火プラグからの赤外放射を赤外カメラで撮影、点火プラグの碍子、電極の温度分布を同時に計測するものである。本技術により点火プラグが高温となる全負荷運転

時やプレイグ発生時の点火プラグ各部の温度まで計測できる。高速赤外カメラをしているためエンジン過渡運転時でサイクルごとに計測することも可能である。

本論文では、開発した可視化計測技術とその計測例を紹介する。

### 2. 点火プラグ温度の可視化計測技術

本章では、開発した点火プラグ温度の可視化技術について説明する。Fig. 1に、本計測技術の構成図を示す。可視化エンジンの観察窓からエンジン燃焼室内の点火プラグを赤外カメラで撮影し、温度分布を計測するものである。点火プラグが高温になる全負荷（WOT）運転まで計測できるようにするため、可視化エンジンの観察窓部を新たに開発した。また赤外線を撮影するための光学系、撮影系、さらに赤外線を温度値に校正するための技術も開発した。ここでは、本技術の成立のために開発した「可視化エンジンの観察窓」「光学系、撮影系」「温度校正法」の三つの主要技術について紹介する。

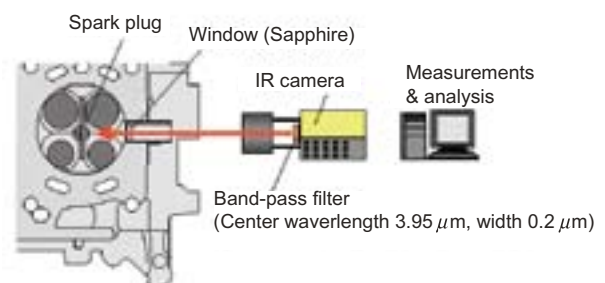


Fig. 1 Thermal analysis system

\* 2008年2月12日 原稿受理

### 2.1 可視化エンジンの観察窓

高負荷運転での点火プラグ温度を計測できるようにするため、可視化エンジンの観察窓部を新たに開発した。従来の観察窓は、高負荷運転で熱ひずみ等の原因により窓割れが発生し、計測することができなかった。しかし今回開発した窓構成では、6000 r/min, WOTの運転条件でも破損しないことを確認している。窓部の構成を Fig. 2 に示す。サファイア製の窓を、エンジンに挟み込む形で装着している。特徴は三つある。

#### (1) 小型薄型窓

サファイア製φ20 mm, t6.5 mmの薄型窓を採用している。赤外線透過率が高いサファイアを使い、さらに窓形状を薄型にすることで、エンジン運転時に窓ガラス内部に形成される温度勾配の低減を狙った。これにより熱ひずみによる割れを防止している。また小型の丸型形状にすることで、燃焼圧力に対しても十分な強度が保たれている。

#### (2) ガラス面先端のテーパ形状

ガラスの燃焼室側の先端面がテーパ形状になっている。観察窓を装着する時にガラス位置が固定され、ホルダーとの隙間管理が容易になる。そのため、窓割れの原因の一つとなるホルダーと観察窓の接触を確実に防止できるようになっている。

#### (3) ねじ込み式のガラス押え

ガラスを外側からホルダー内に押え込む筒状のガラス押えをねじ込み式にしている。これによりガラスの押え力を均一化し、局所的な力がガラス窓に加わりにくい構造にしている。

以上の結果、点火プラグが高温となる全負荷までの全運転領域で、燃焼室内を観察できるようになった。

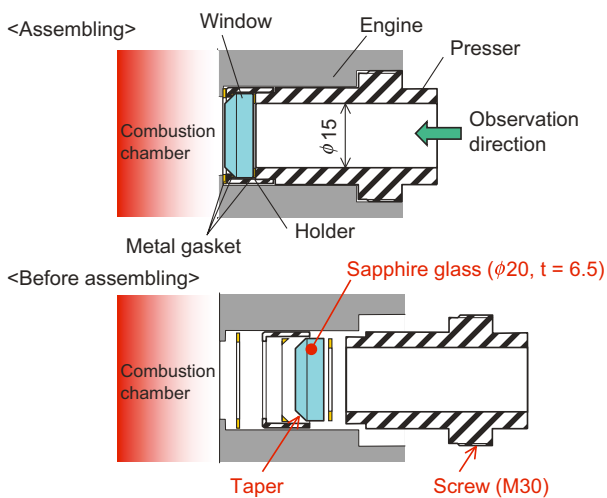


Fig. 2 The window to observe a spark plug

### 2.2 光学系, 撮影系

次に光学系, 撮影系について説明する。カメラは Indigo 社製高速赤外線カメラ Phoenix-Mid, レンズは Indigo 社製 MWIR100 mm を使った。高感度カメラを使用しているため、非常に短いシャッターで撮影できる。シャッター時間は、点火プラグから放出される赤外放射量に対し最適な時間を選ぶ必要がある。本計測では、0.3 ~ 1.0 ms のシャッターで撮影している。また赤外カメラの前にはバンドパスフィルタ（中心 3.95 μm, 半値幅 0.2 μm）を挿入している。以下、撮影する際に考慮した「撮影タイミング」「撮影波長」の二つについて説明する。

#### (1) 最適な撮影タイミング

赤外カメラで点火プラグを撮影するタイミングについて、Fig. 3 を用いて説明する。エンジンは吸気、圧縮、燃焼、排気の工程を繰り返すため、点火プラグを撮影できないタイミングが発生する。吸気や排気工程はバルブが開弁するため、バルブが点火プラグの観察視野に入り込み撮影の障害物となる。また燃焼行程は、点火プラグが火炎に包まれ火炎が障害物となる。そのため圧縮工程の撮影が最も適する。そこで撮影タイミングは圧縮工程の点火前 90° BTDC で行い、観察視野へのバルブの侵入や燃焼火炎の影響を受けないタイミングを選んでいく。

#### (2) 撮影波長の選択

赤外カメラにより点火プラグから放射される赤外線を撮影する際、赤外線は燃焼室内に存在する CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, HC などの成分に吸収されるという問題がある。つまり赤外線は点火プラグからこれらガス成分に吸収されながらカメラへ届く。そのため、点火プラグが同じ温度であっても燃焼室内のガス状態でカメラに届く赤外放射量は影響を受け、正確に点火プラグから放射される放射量を計測できない。そこでカメラの前にバンドパスフィルタを設置し、特定波長のみを撮影す

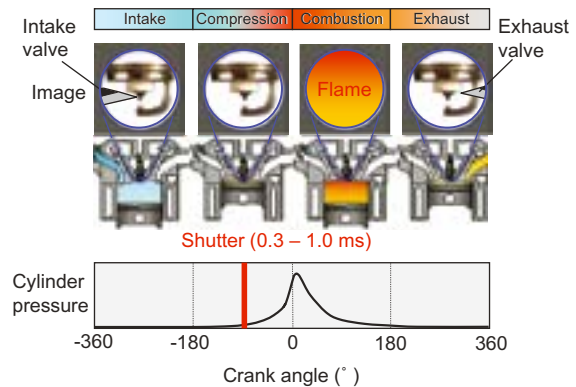


Fig. 3 Camera shutter

るようにした。Fig. 4 に各ガス成分の透過波長と撮影波長を示す。4 μm 近傍にどのガス成分に対しても透過率が高い波長領域がある。バンドパスフィルタを使って 3.95 μm の波長を選択することで、吸収ガスの影響を受けにくい波長のみを撮影している。

2.3 温度校正法

赤外カメラで撮影した点火プラグの赤外映像を、温度値に校正する必要がある。より正確に温度を計測するため、本計測では以下の二つのことを実施している。

(1) 正確な放射量計測

すべての物体からは温度に依存した赤外線が放射されているため、計測対象以外の周りの物体からも赤外線は放射されている。そのため、測定対象からの放射量は周りの物体からの放射の影響を受ける。一般に放射エネルギーは絶対温度の 4 乗に比例する（ステファン・ボルツマンの法則）ため、測定対象の温度が周りの温度に比べかなり高い場合は大した問題にはならない。しかし点火プラグの場合は、高温の碍子や接地電極が近接しているため、お互いの放射が干渉する。例えば接地電極で放射された赤外線は碍子表面で反射され、実際の碍子表面の赤外放射量に上乗せされるという問題が発生する。Fig. 5 にそのときの赤外映像の一例を示す。碍子、中心電極において接地電極側の赤外放射量が不

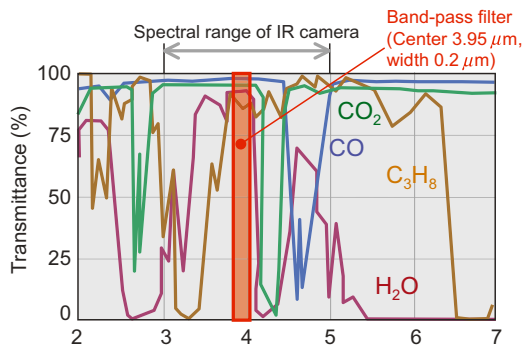


Fig. 4 Transmission spectra

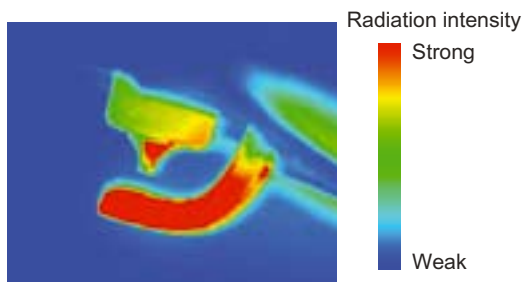


Fig. 5 Infrared image (Without black body)

自然に多い。これは、高温の接地電極からの放射が、碍子、中心電極で反射し本来の放射量に上乗せされるためである。

またもう一つの問題として、電極材はエンジン運転とともに材料表面の酸化が進み、放射率が変化していくというものがある。時々刻々と放射率が変化していくため、同じプラグ温度でもカメラに届く赤外放射量が変化していく。そのため、温度校正は非常に困難となる。

そこでこれらの問題を解決するため、点火プラグに黒体（ジャパンセンサ製 JSC-3号、放射率 0.94）を塗布した。これにより点火プラグ各部を高放射率で一定にし、近接するプラグ各部の放射干渉の抑制、金属材料の酸化に伴う放射率変化を回避している。黒体を塗布したときの赤外映像を Fig. 6 に示す。プラグ各部の放射量に不自然な分布がなくなっていることが分かる。

黒体を塗布したことによるプラグ温度への影響についてエンジンで調査した。中心電極に熱電対を埋め込んだプラグで、黒体を塗った場合と塗っていない場合で、熱電対の温度を同一エンジン条件で比較した。Fig. 7 にそのときの結果を示す。両者はほとんど同じ温度であり、黒体がプラグ温度に与えている影響は少ないと判断した。

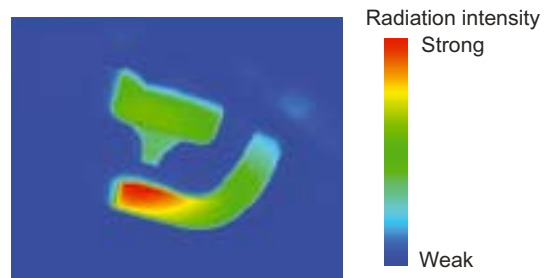


Fig. 6 Infrared image (With black body)

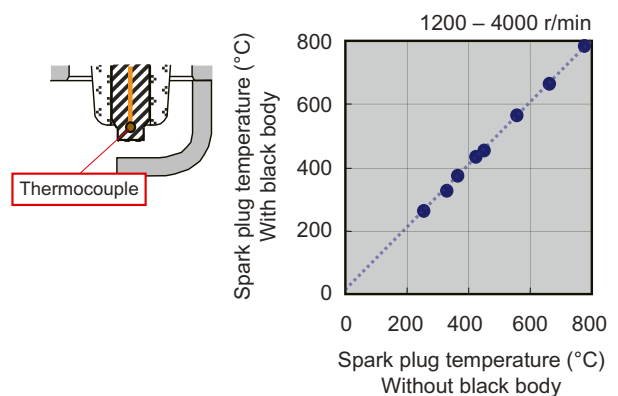


Fig. 7 Effect of black body to spark plug temperature

(2) 温度校正手段の開発

放射量を温度値へ校正するためには、放射量と温度の関係を知る必要がある。その関係は Fig. 8 に示す実験装置を製作し、計測して求めた。光学系はエンジンでの計測と同じレイアウトにし、黒体を塗布した点火プラグの先端部を電気炉内に配置、そのプラグには熱電対を取り付けてある。電気炉により点火プラグの温度を加熱し、熱電対が所定の温度に達したときに、プラグからの放射量を赤外カメラで計測した。計測時は、電気炉からの放射が点火プラグの放射へ干渉することを回避するため、計測直前に常温の放射遮断用カバーを電気炉内に挿入してプラグ周りをカバーで覆った。測定した放射量と温度の関係を Fig. 9 に示す。カメラのシャッター時間を変えた時の放射強度と温度の関係を示している。本関係を使ってエンジン運転時における点火プラグの赤外映像を温度映像に変換した。変換した

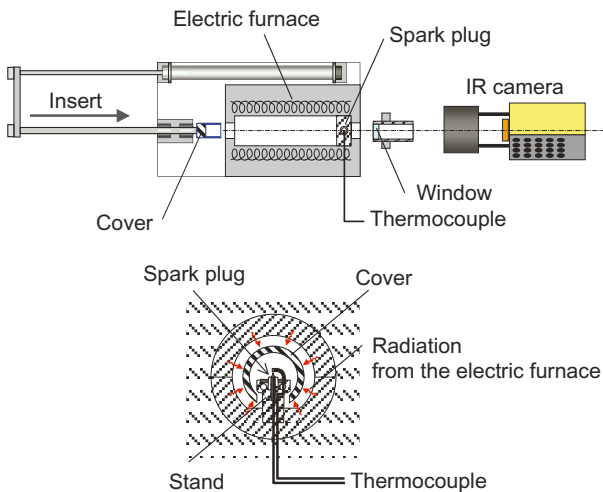


Fig. 8 An apparatus for the radiation intensity measurement

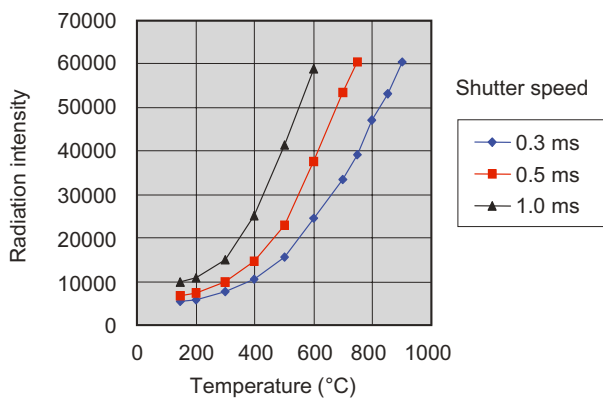


Fig. 9 Relation between temperature and radiation intensity

映像例を Fig. 10 に示す。プラグ各部の温度分布が鮮明な映像で計測できていることが分かる。

3. 計測結果

本章では、開発した点火プラグの温度計測技術を使った計測例を紹介する。

3.1 定常運転時の点火プラグ温度

Fig. 11 に本技術を使って計測した結果の一例を示す。様々なエンジン条件での点火プラグの各部温度を計測したものである。評価したプラグは、デンソーのイリジウムプラグ (SK20R11) である。中心電極の温度は、従来の熱電対では計測できない先端チップ ( $\phi 0.7$ ) の部分を計測している。どの運転条件でも接地電極の温度が最も高く、4000 r/min, WOT で接地電極は 850 °C 程度まで上昇していることが分かる。一方中心電極は先端部でも最高 650 °C 程度であり、接地電極に比べ 200 °C ほど温度が低い。そのため、接地電極の方がより耐酸化性に優れた材料選定が必要になることが分かる。5000 r/min 以上でプラグ温度は低下するが、これは空燃比がリッチ制御され、燃焼温度が低下したことが主な原因であると考えられる。

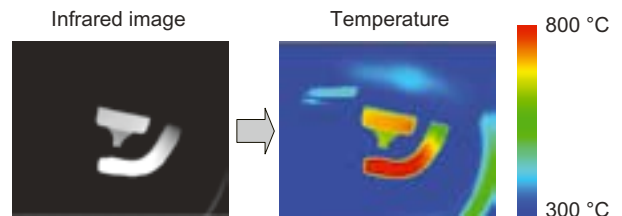


Fig. 10 Temperature image

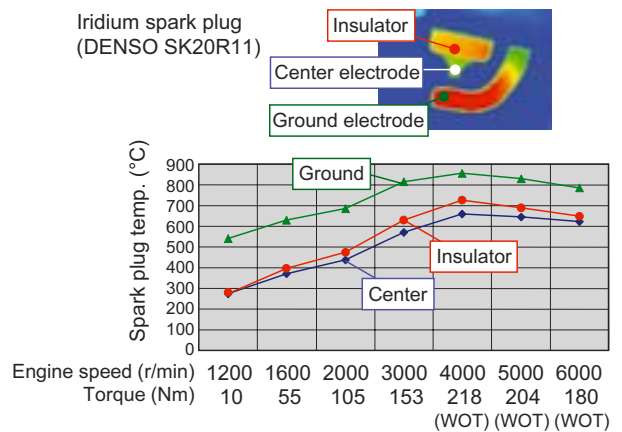


Fig. 11 Spark plug temperature at various engine conditions



本計測技術は、熱電対を埋め込むなど特殊プラグを製作する必要がなく、細径電極プラグや小型プラグなどでも製品そのままの状態でも温度計測が可能であるため、プラグ開発における重要なデータを収集できる。

### 3.2 過渡運転時の点火プラグ温度

本計測は、高速赤外カメラを使っているため、毎サイクル計測が可能である。そのため、過渡運転時のプラグ温度の推移が計測できる。過渡運転時の計測例として、無負荷でエンジン回転数を上下させた運転状態の碍子先端温度を Fig. 12 に示す。標準サイズ (M14) のプラグと小型サイズ (M10) のプラグを比較している。標準プラグに比べ小型プラグはエンジン回転数に対する温度の応答性が早く、回転数の上昇に伴い急激に温度上昇していることが分かる。そのため瞬間のピーク温度は小型プラグの方が約 60 °C 程度高温になる。これは碍子先端部の熱容量が小さいため、燃焼ガスの温度変化に対し敏感になるためと考えられる。

本特性を活用して、デンソーは碍子の先端熱容量をできるだけ下げた小型点火プラグを開発している。<sup>2)</sup> 本プラグでくすぶり試験をしたときの結果を Fig. 13 に示す。小型プラグはエンジン過渡運転時に瞬時に高温に至るため、碍子先端に付着したカーボンが焼失する。そのため、耐くすぶり性に優れた点火プラグとなっている。

### 3.3 電極材料による点火プラグ温度の違い

接地電極の温度特性は、電極の耐消耗性に大きく影響する。そのため、電極材開発においても、本技術は有効な開発ツールとなる。電極材の違いによる温度の違い

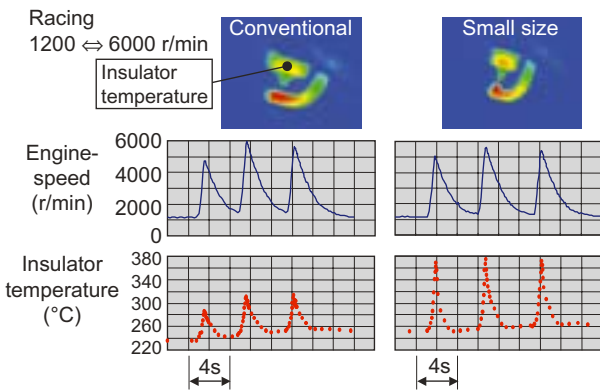


Fig. 12 Spark plug temperature at transient engine condition

いを調査した結果を Fig. 14 に示す。従来から接地電極材として使われているニッケル合金 (Ni-Cr) やインコネル材に比べ、デンソーが新しく開発したニッケル合金 (Ni-Y-Si-Ti) の温度が低いことが分かる。この開発材を利用してデンソーは新しい点火プラグを最近開発している (Fig. 15)<sup>4)</sup> 電極温度を下げることで、高価な貴金属を使わずして耐消耗性の向上が可能な材料開発に成功し、低コストで着火性に優れた点火プラグを実現させている。

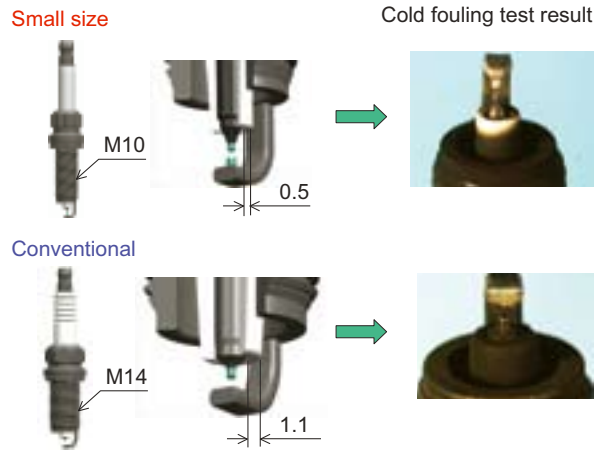


Fig. 13 Cold fouling test result

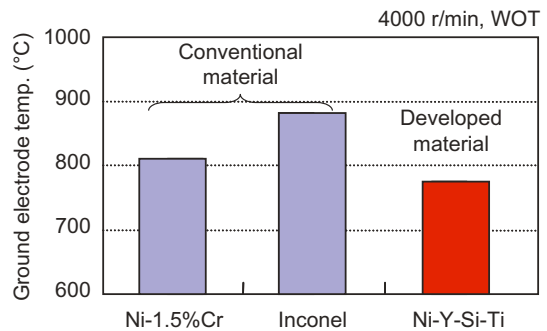


Fig. 14 Effect of ground electrode material to its temperature

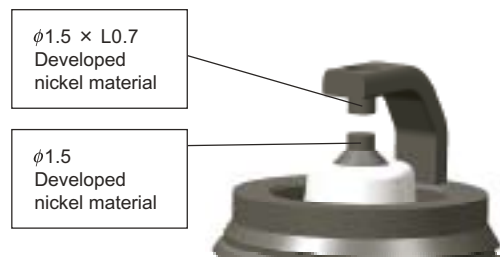


Fig. 15 New spark plug

### 3.4 プレイグ発生時の点火プラグ温度

最後にプレイグ発生時の点火プラグ温度を紹介する。プレイグ発生は、エンジンの損傷に至ることがあり、点火プラグの選定における重要な指標である。一般的に燃焼室内で最も高温である点火プラグが、プレイグ発生ホットスポットになることが多い。今回開発した可視化エンジンは、プレイグを発生させても観察窓部は損傷することはないため、プレイグ発生時の点火プラグの温度計測をはじめ、着火状況の観察もできる。

低熱価(焼け型)の点火プラグでプレイグを発生させ、そのときのプラグ温度を計測した。プレイグ発生時のプラグ温度を赤外カメラで計測し、それと同時に ICCD カメラにより点火時期直前の着火の様子も撮影した。Fig. 16 にプレイグ発生時の着火の様子とそのときのプラグ温度を示す。着火映像からプレイグは碍子先端部で発生していることが確認できる。またそのときの碍子温度は 1000 °C であった。Fig. 11 を見ると本条件である 4000 r/min, WOT では、碍子温度は標準プラグで 720 °C 程度であり、プレイグが発生した碍子温度 1000 °C に対し 280 °C の余裕があることが分かる。

耐プレイグ性の確保は現在車両メーカーで開発が進む高効率エンジンで、一段と難しくなることが予想され、本技術を活用して今後の点火プラグの開発課題を見極め、新型点火プラグの開発を実現させていきたいと考えている。

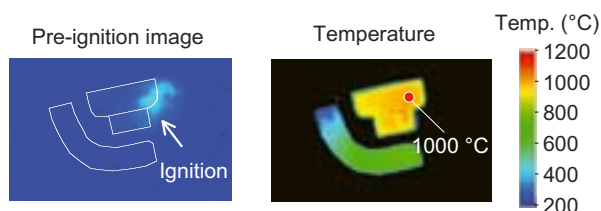


Fig. 16 Spark plug temperature at pre-ignition occurrence

### 4. むすび

赤外カメラを使って、エンジン燃焼室内の点火プラグ温度を可視化計測する技術を開発した。本技術により、従来未知であった燃焼室内の点火プラグの各部温度が、エンジンの高負荷運転時、さらには過渡運転時でサイクルごとに計測できるようになった。その結果、点火プラグ各部の温度特性をはじめ、電極材の温度特性や耐プレイグ性などの詳細解析が可能になった。

今後も現在車両メーカーで開発が進む将来エンジンに対して、最適な点火プラグの提案を目指し、本技術を有効活用していきたいと考えている。

#### <参考文献>

- 1) T. Hori, M. Shibata etc: Super Ignition Spark Plug with Fine Center & Ground Electrodes, SAE2003-01-0404 (2003).
- 2) H. Ishiguro, K.Kanao etc: Super Carbon Fouling Resistive Small Size Spark Plug, SAE2005-01-1158 (2005).
- 3) 岡部伸一, 藤城修 他: 赤外カメラによる点火プラグの温度計測, 可視化情報学会 2006 年全国講演会論文集, Vol. 26 Suppl. No. 2 C113.
- 4) S. Nishioka, K. Hanashi etc: Super Ignition Spark Plug with Wear Resistive Electrode, SAE2008-01-0092 (2008).



<著 者>



岡部 伸一  
(おかべ しんいち)  
(株)日本自動車部品総合研究所  
研究1部  
パワトレイン分野の研究に従事



守野 哲也  
(もりの てつや)  
(株)日本自動車部品総合研究所  
試作試験部  
可視化関連の試験に従事



堀 恒円  
(ほり つねのぶ)  
セラミック技術部  
セラミック関連の製品開発に従事



端無 憲  
(はなし けん)  
セラミック技術部  
点火プラグの設計, 開発に従事