

特集 | イオン電流失火検出システム用スパークプラグの開発*

Development of a Spark Plug for an Ion Current Misfire Detection System

土井 香 中村 義裕 端 無 憲 橋 爪 勝 志
 Kaori DOI Yoshihiro NAKAMURA Ken HANASHI Katsushi HASHIZUME

In this paper, the authors introduce a spark plug for a misfire detection system using an ion current. In order to realize highly accurate misfire detection, the signal of the ion current must be larger than that of any noise. Furthermore, in order to maintain the ion signal through its lifetime, the figure and the initial dimensions of the spark position are derived by experiment and consideration of the degradation in use. Additionally, by observations and a theoretical study, we show a relation between noise and the corona discharge on the insulator and indicate a method to efficiently inhibit noise. Finally, the effect of the developed spark plug with these two methods is confirmed with a target engine, and we propose the specifications of a spark plug that satisfies the conditions necessary to realize highly accurate detection using ion current.

Key words : Hot Engine, Spark Ignition Engine, Emissions Gas, Ion Current, Spark Plug

まえがき

近年、環境保護意識の高まりから、自動車のエミッション規制が厳格化されてきており、LEV (Low Emission Vehicle), ZEV (Zero Emission Vehicle) を中心として規制強化が進められている。これらのエミッション規制に対する取組の一つとして、OBD (On Board Diagnosis : 車載式故障診断) システムによるエンジン失火検出に対するニーズが高まっている (Fig. 1)。既に北米OBD2 (1994年～)、欧州E-OB

	2000	2010	2015
North America		OBD2	
Europe		E-OB	
Japan			J-OB

Fig. 1 Trend of OBD regulation

(2000年～) では規定の運転条件をモニタして失火を検出することが要求されており、日本でもJ-OB2 (2008年～) の制定で同様の対応が義務付けられている。特に北米では、1気筒失火の場合の失火気筒特定も求められている。

これらニーズに対応する失火検出技術として、現在主流である手法はエンジン回転変動方式であり、エンジンの回転状態をクランク角度センサにて常時計測し、検出パターンの時間変化量 (回転変動値) により間接的に失火有無を判定する手法である。しかし、10気筒以上の大型エンジンの場合1気筒失火時のトルク変動が小さくなるため、この手法では適正な失火検出が困難になる (Fig. 2)。

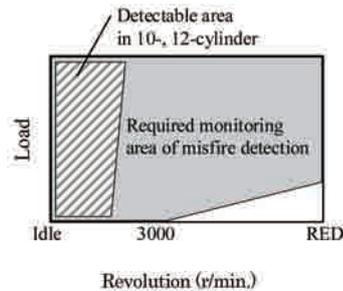


Fig. 2 Required monitoring area and detectable area by crankshaft speed fluctuation

そこで10気筒を超える多気筒数エンジンでは、スパークプラグをセンサとして用い、火炎中の燃焼イオンを電極部で捕集しイオン電流として検出するイオン電流検出法による失火検出が多く採用されている¹⁾。回転変動法がクランクシャフトの回転変動から間接的に異常失火状態を検出するのに対し、イオン電流検出法は着火源であるスパークプラグの火花部をセンサとすることにより、火炎発生の有無を気筒毎に直接検出するため、気筒毎の失火判定が容易である。

しかし、この手法で高精度の失火検出を実現するためには、イオン電流のS/N比確保、即ち、イオン出力信号(S)の確保とノイズ(N)の低減を実現する技術が必要となる。我々の調査では、既存のイオン電流検出システム採用のエンジンに装着されているスパークプラグにおいて、イオン出力信号確保とノイズ低減双方に対応したものはなかったが、もしプラグ自身にこれらの対策を行うことができれば、システムのロバスト性や検出精度の更なる向上が期待できる。本報では、これらの条件を兼ね備えたイオン電流失火検出システ

* (社)自動車技術会の了解を得て「2012年自動車技術会論文集」Vol. 43 No. 4, 811-20124564より転載

ム専用スパークプラグの開発経緯について紹介する。

1. イオン電流検出法の概要

1.1 システム構成と原理

Fig. 3にイオン電流検出システムの構成概要を、Fig. 4にスパークプラグ火花部でのイオン検出原理の概要を

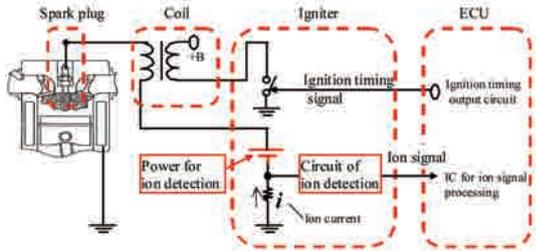


Fig. 3 Schematic view of ion detection system

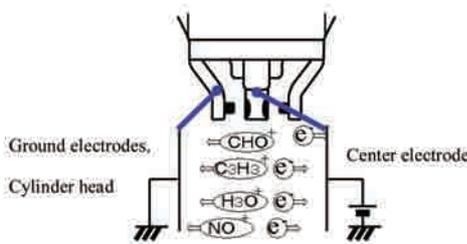


Fig. 4 Outline drawing of ion current detection system

示す。イオン電流検出システムは、通常の点火システムに対し、イグナイタにイオン検出用電源と回路を、ECUにイオン信号処理ICを備えた構成となっている。イグナイタ内のイオン検出電源からスパークプラグの中心電極と接地電極の間に検出電圧を印加して、燃焼時に発生するプラスイオン (C₃H₃⁺, CHO⁺, H₃O⁺, NO₂⁺) を捕集し電流として検出する²⁾。この燃焼イオンの有無を示すイオン信号を検出回路からECUに出力し、信号の波高値を基に着火、失火を判定することができる (Fig. 5)。

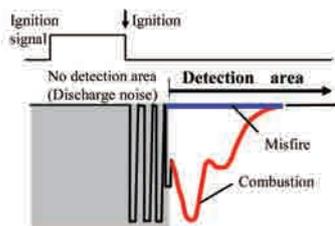
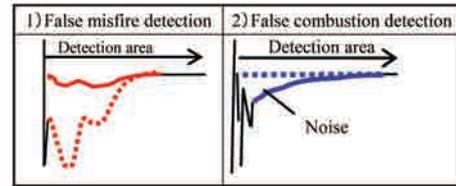


Fig. 5 Outline of ion signal waveform

Table 1 Pattern examples of false detection



1.2 イオン電流検出法の課題

正確なイオン電流による失火検出を実現するためには、各運転条件下でのイオン出力信号 S が各条件でのシステム判定閾値 I_{th} より高く、且つノイズ N がその時の S より小さくなくてはならない。今回のシステムでは、正常検出のための必要条件は式 (1) となる。

$$\begin{aligned} S &> I_{th} \\ S/N &> 2 \end{aligned} \quad (1)$$

S/N は余裕度を考慮し2以上としている。この式から、高精度に失火を検出するためには、 S を如何に大きく確保し、 N を如何に抑制するかが重要である。式 (1) を満足できず、誤判定が生じる場合は大きく次の二つに分けられる (Table 1)。

- 1) イオン出力信号 S がシステム判定閾値 I_{th} より小のため、着火有り→失火とする誤判定
 - 2) ノイズ N 大により失火→着火有りとする誤判定
- 1) は燃焼が生じていても検出波形が小さく、燃焼と判断する閾値を満足出来ないことで失火と誤判定してしまう場合である。一方 2) は検出区間にノイズが出現することで、失火時に関わらずスレッショレベルを超えてしまい着火と誤判定してしまう場合を指す。1) に関してはイオン出力信号が燃焼イオンの検出部である中心電極の露出表面積と関係する点に着目し、電極自身の消耗や燃焼残渣物での汚損などによる検出力低下を考慮した初期仕様について検討した。2) に関しては、スパークプラグは高電圧を印加して火花放電を発生させるため、自身がノイズ源となることがある。今回は、より詳細に、プラグのどの部分で生じている現象がノイズ源となっているのかを解明し、それを抑制する仕様検討に取り組んだ。次節より、これら2点の課題を解決する具体的な手法について説明する。

2. イオン出力信号 S の確保

2.1 必要表面積の設定検討

イオン出力信号 S は、火炎内に存在する燃焼イオンを、中心電極をセンサとして捕集することにより、電流が流れイオン信号波形として検出する。そのため、出力の大きさは検出面である中心電極の露出表面積 A に比例すると考えられる。ここで、システム要求の必要出力下限値を S_{th} 、中心電極の必要最小表面積を A_{th} とすると、

$$S_{th} \leq f(A_{th}) \quad (2)$$

を満足する必要がある。そこでまず、中心電極で碍子外部に露出している部分の表面積 A が異なるスパークプラグを用意し、 S_{th} を確保するための必要表面積 A_{th} を実機評価にて定めることとした。表面積 A は既存のスパークプラグの中から、露出部分の高さが異なるものや、先細となった略円錐形状のものを用いた。試験エンジンは開発対象の 12気筒エンジンを用い、運転条件は S 出力が最も小さいことが知られているアイドル (500r/min.) とした。その試験結果を Fig. 6 に示す。

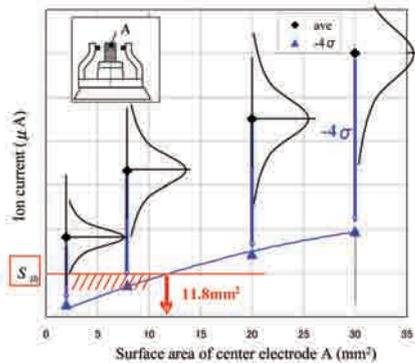


Fig. 6 Relation between surface areas of center electrode and ion current

中心電極露出表面積が増加するにつれ、イオン出力信号レベルも上昇しており、所定の露出表面積を確保することで、一定値以上のイオン出力信号レベルを確保できることを示している。そこで、部品寸法や組付けのバラつきだけでなく、検出バラつきも考慮し、測定されたイオン出力信号の $\bar{X}-4\sigma$ 値から中心電極露出表面積の下限値 A_{th} を 11.8mm^2 と設定した。

2.2 表面積減少を考慮した基本形状の選定

エンジンで使用時間が増すにつれ、イオン出力信号は低下していく。この原因は、大きく二つの要因が考えられる。一つは、スパークプラグの電極消耗により

Table 2 Electrode type and surface reduction of center electrode

Type of spark plug	A	B	C	D
	1 electrode (Overhang) End-face discharge	1 electrode Side-face discharge	2 electrodes Side-face discharge	2 electrodes Side-face discharge
Purpose	Enlarge initial area	Burn out deposit by spark discharge	Burn out deposit by spark discharge	Burn out deposit by spark discharge
Surface reduction by wear	7%	12%	10%	10%
Surface reduction by deposit	80%	65%	30%	30%

露出表面積そのものが減少するためである。火花放電や燃焼室内の高温雰囲気での酸化による電極の消耗は避けられず、寿命期間内でイオン出力信号の必要値を確保するためには、消耗による表面積減少を考慮した初期露出面積の設定が必要である。一方、燃料添加剤やエンジンオイルに由来する燃焼デポジットが電極表面に付着した場合にも、燃焼イオンの捕集を阻害し出力を低下させる。この影響についても電極消耗と同様に初期寸法に反映させる必要がある。

そこで、火花部形状による電極消耗とデポジットの残留状態の差異を市場回収プラグより確認した (Table 2)。電極消耗による表面積減少率は、火花部形状の違いは大きく影響していないのに対しデポジットの残留率には差が認められ、Aの一般的な接地1極のようなオーバーハングタイプのプラグよりもB及びCのような側面放電タイプのプラグの方がデポジット残留は少ない。これは、火花放電によりデポジットが清浄されているためである。Aのタイプは放電面である中心電極端面付近でしかデポジットが清浄されないが、BやCのタイプは放電面が中心電極側面でありオーバーハング形状よりも放電範囲が広く、デポジットの清浄範囲が大きく確保できる。また、BとCでは、Cの方が左右で放電し中心電極全体を清浄するため、より高い清浄効果が期待できる。これらの特徴をまとめると、Fig. 7のようになり、清浄な中心電極表面積の

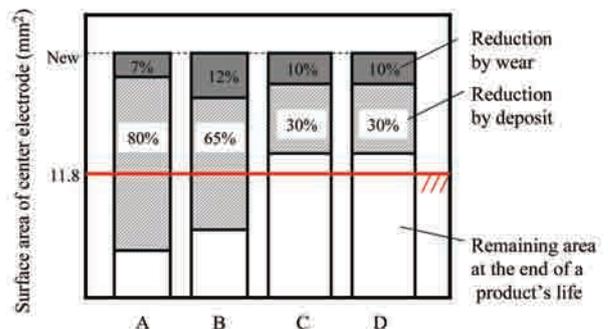


Fig. 7 Surface reduction ratio of center electrode

残率はCが最も優れていることがわかる。今回はこのCの形状をベースに、同等の中心電極消耗とデポジット清浄効果を持ち、着火性と耐消耗性向上を目的として中心電極と接地電極に白金合金チップを配設したDの形状を選定した。Fig. 8にその一例（初期表面積

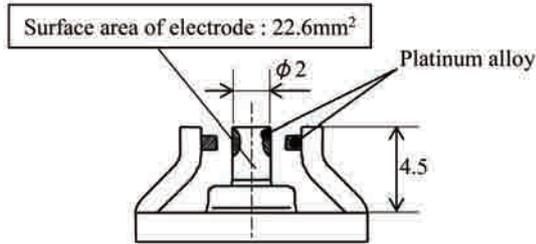


Fig. 8 Surface area of electrode

22.6mm²)を示す。火花部の詳細寸法は、中心電極の消耗、デポジットによる汚損に加え、製造バラつきに対する余裕を見込んで設定した。

3. ノイズNの抑制

前章で、イオン出力信号*S*について、初期状態から設計寿命までの間に渡り必要レベルを確保するための検討結果について述べた。しかし、出力*S*を確保してもそれを上回るノイズ*N*が発生すると、実際は失火しているにもかかわらず着火と誤判定してしまい正確な失火検出ができない。この場合、失火状態を着火と誤判定するため、OBD規制不適合となり未燃ガスの排出による大気汚染や触媒溶損など車両へのダメージを発生させる可能性がある。このように、高精度要求のイオン失火検出システムに使われるスパークプラグは、イオン出力信号*S*とあわせてノイズ*N*の抑制に対応する必要がある。次項で、ノイズが発生する原因特定の検討結果について説明する。

3.1 ノイズ発生原因の検討

Fig. 9にイオン電流検出波形に生じたノイズの一例を示す。これは燃料カット時の波形であるから、本来Fig. 9の破線のような波形となるべきものである。し

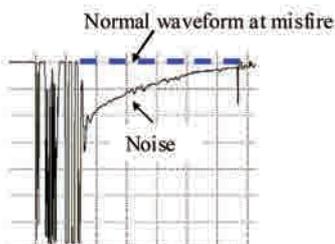


Fig. 9 Example of noise waveform at misfire

かし、ノイズによりイオン電流が検出されたような波形を示している。このノイズの波高値がイオン出力信号*S*を超えると、正しい失火判定ができない。この対策のため、まず初めにノイズの発生源について確認した。イオン信号の検出区間にノイズが発生するということは、どこかの部位で電位差が生じ、燃焼室で捕集すべきイオンとは別の電荷の移動が発生していると考えられる。この電荷の移動は二つ考えられる。一つは着火のための火花放電である。しかし、Fig. 5のイオン出力波形の例にあるように、火花放電のタイミングはイオン電流による失火検出区間とは異なるため、ノイズになるとは考えられない。一方、もう一つの可能性として、碍子が帯電することで生じるコロナ放電が考えられる³⁾。コロナ放電は火花放電のための高電圧を印加することで碍子が帯電することによって生じる。コロナ放電の発生箇所は大きく頭部(A)、中段部(B)、脚部(C)の3箇所が考えられる(Fig. 10)。

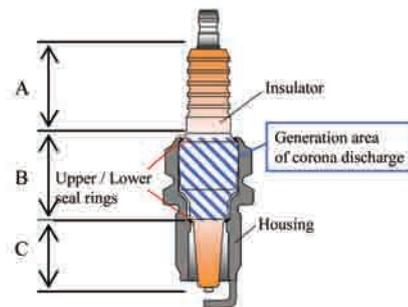


Fig. 10 Schematic view of spark plug

このうち、頭部(A)はコイルブーツとの間に生じ、中段部(B)と脚部(C)はハウジングとの間で生じる。今回のノイズは波高値が大きい場合があることから、より短い放電距離の部分、つまり中段部(B)でコロナ放電が多発しているのではないかと考えた。そこで、ハウジング一部をカットし碍子表面を可視化したプラグを用いて火花放電後のイオン電流検出区間中に碍子の状態を観察した所、特に中段部(B)全域で碍子とハウジングの隙間に生じるコロナ放電を確認できた(Fig. 11)。以上から、(B)部の碍子とハウジ



Fig. 11 Corona discharge between insulator and housing

グの間で生じるコロナ放電による電荷の移動がノイズの原因と考え、次のような検討を行った。

3.1.1 コロナ放電発生時の回路構成

Fig. 9のノイズ波形の形状がCR回路（抵抗-コンデンサの直列回路）での一次遅れ系の形状に類似している点に着目し、コロナ放電発生部位周辺の状態を電気回路で模擬することを試みた。まず回路は、碍子をコンデンサC、碍子とハウジングの隙間の電離空間を抵抗Rとにおいて、スパークプラグを表す回路にCとRを追加したFig. 12のような構成とし、各定数の値を算出

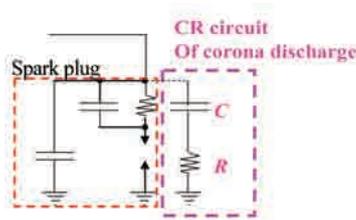


Fig. 12 CR circuit of corona discharge

した。碍子の静電容量は、碍子の寸法、比誘電率から算出し $C = 5 \text{ pF}$ 、電離空間の絶縁抵抗値は文献値より $R = 100 \text{ M}\Omega$ とした。これらの条件で作成した回路シミュレーションにより、実測の波形をほぼ再現することができた (Fig. 13)。以上から、ノイズの原因は碍子

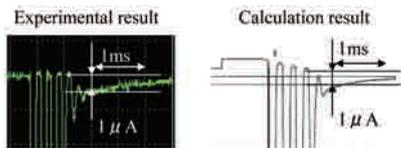


Fig. 13 Experimental results and calculation

とハウジングとの間で生じるコロナ放電により生じる電荷の移動であると判断した。次項より、コロナ放電の抑制手法について説明する。

3.1.2 コロナ放電抑制手法の検討

CR回路によるコロナ放電の発生を抑制するためには、回路要素のR、あるいはCが無い状態にできればよい。碍子の静電容量Cは碍子の材質や寸法の大幅な変更が難しいため、電離空間の抵抗Rを変える方向で検討を進めた。

コロナ放電を気中で発生させないために、次の二つの手法が考えられる (Table 3)。

Table 3 Inhibition methods of corona discharge

	Solution idea	Method
(1)	Inhibit ionization of the space between insulator and housing 	Infill the space with electrical insulation oil
		Infill the space with resin
(2)	Reduce voltage between insulator and housing 	Metallic plating
		Metallic evaporating
		Printing conductor paste

(1) 空間の電離を起こさせない

(2) 空間に電位差を生じさせない

(1) は電離が生じる空間そのものをなくす、つまり、抵抗RをコンデンサCに変えるということである。この場合、碍子とハウジングのクリアランスをゼロにすることは製造上難しいため、液状物体など（例えば絶縁油や樹脂油）を充填する方法が有効と考えられる。しかし、気泡などで充填されない部分が残った場合、その場所でコロナ放電が発生してしまうため、気泡を生じさせずに充填する手法の検討が必要になる。また、該当部位はエンジン運転時に温度が 300°C 近くなる環境である。このような環境下でプラグの交換寿命までの間、充填状態を維持する必要がある。これらの条件を満足する、耐熱性、耐久性を有する材料はコスト、技術共に実現が難しい。

一方、(2) は碍子とハウジングが成す空間に電位差を生じさせないことでコロナ放電を抑制するという方法である。これは、碍子表面を導体化することで、帯電した電荷をアースするという考え方である。具体案として、金属ペーストの塗布やめっき、あるいは金属蒸着などによる導体被膜の形成が考えられる。ただし、碍子の基本機能として、コイルブーツとの勘合部や火花放電部近傍は表面の絶縁性も確保する必要がある。従って、塗布範囲はコロナ放電が発生する、ハウジングに覆われた中段部 (B) のみでなくてはならない。そのためには、めっきや金属蒸着では塗布不可部分をマスキングする必要があり、製造コストの大幅アップが懸念される。一方で、金属ペーストを塗布する方法は凹版印刷などの定型版で所定の形状、寸法を狙うことが容易であることから、製造コストも安価に押さえることが可能である。課題である耐熱性や耐久性においても、焼成タイプの金属ペーストは耐熱性が 400°C 以上のものが多く存在し対応可能と考えられる。以上

から、導体ペースト塗布による被膜形成を対策手法として選定し、具体的な仕様について検討を進めた。

3.1.3. 導体ペーストの選定と効果確認

導体の抵抗値 R は次式 (3) で表される。

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (3)$$

それぞれ、 ρ は導体の電気抵抗率、 L は導体の長さ、 A は導体の断面積を表す。導体被膜の塗布長さ L は既定であり、断面積 A も碍子外径寸法とハウジング内径寸法により制限され自由度は少ない。従って、初めに導体ペーストの選定は材料の電気抵抗率 ρ を基に検討を進めた。Table 4 に今回選定対象とした導体ペーストの例を示す。ここでは材料特性として、電気抵抗率 ρ に代わりシート抵抗値 R_s (Ω/square ：単位面積当たりの面積抵抗率) で示している。選定に当たって、抵抗値 R 以外の必要特性として耐熱温度 (300°C 以上)、およびコストも評価項目とした。その結果、抵抗値、耐熱温度、材料コスト、製造コスト共にバランスよく優れていることから、銀 (Ag) が主成分のペーストを選定した。

次に、導体被膜の抵抗値とノイズの発生関係について確認した。導体被膜の範囲は、コロナ放電が発生する範囲をカバーし、且つハウジングと確実にアースを取るため、上下シールリングと接する中段部 (B) の碍子表面全体とした。また、被膜のシールリング間両端抵抗値は $0.01\Omega \sim$ 数百 $M\Omega$ の間とした。この際、抵抗値はペーストの塗布膜厚や希釈率を変えて調整した。また、未塗布品も抵抗値が無限大のサンプルとして併せて評価した。これらの試作品を用いた評価結果を Fig. 14 に示す。この結果から、導体被膜の両端抵抗

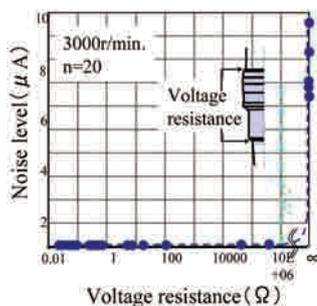


Fig. 14 Relation between resistance of conductor and noise level

値は数 $M\Omega$ 以下であればノイズ抑制効果を持つことがわかる。このことから、空気の絶縁破壊を生じさせな

Table 4 Examples of conductor paste

Main material	Sheet resistance R_s (/square)	Temperature limit	Cost ratio	
			Material	Production
Ag	2-5m Ω	550°C	1	1
Ag	2-5m Ω	850°C	0.65	4
Ag-Pd	20-30m Ω	850°C	2.5	1
Pt	10-55m Ω	930°C	2.3	4
Ag-Pt	2-10m Ω	850°C	2.3	4
Au	200-300m Ω	600°C	>10	1
Ru-O	10M Ω	300°C	0.67	2

い程度に碍子表面の帯電電荷を除去することができれば、必ずしも低いアース抵抗は必要ないと考えられる。この結果を基に、選定した銀ペーストで必要な抵抗値特性を満足するための塗布条件を検討した。ここで、式 (3) の断面積 A を導体の幅 W と厚さ t で変換すると次式のようになる。

$$R = \rho \frac{L}{W \times t} \quad (4)$$

今回は塗布範囲が決められているため L 、 W は固定される。従って、銀の抵抗率は $\rho = 1.59 \times 10^{-8} \Omega \text{m}$ としてこの式を基に塗布部分に当たる碍子中段部 (B) の抵抗値 R と被膜厚さ t の関係を算出した。Fig. 15 に、膜

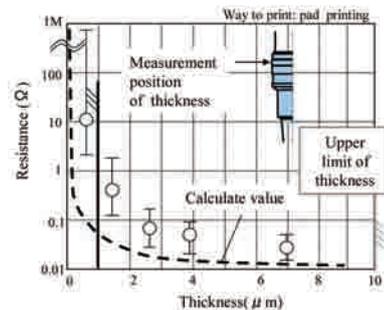


Fig. 15 Relation between resistance and thickness of conductor film

厚値と両端抵抗値の理論値と実測結果を示す。膜厚は代表で Fig. 15 に示す位置で測定した。計算上は必要抵抗値 $1M\Omega$ 以下を満足するための被膜厚さは非常に薄くてよいことになるが、実際は膜厚が薄くなるほど抵抗値バラつきが大きくなった。これは碍子表面の凹凸のために膜厚が薄いほど印刷ムラなどの抵抗値不良が生じやすくなったものと考えられる。そこで、製造ロバスト性を確保するため、膜厚 $1\mu\text{m}$ 以上を銀ペースト塗布設定値とした。火花放電中の碍子表面状態を観察した結果と、その時のイオン電流波形を Fig. 16 に示す。銀被膜ありの場合、碍子表面のコロナ放電は発生しておらず、ノイズも抑制されていることが確認できた。

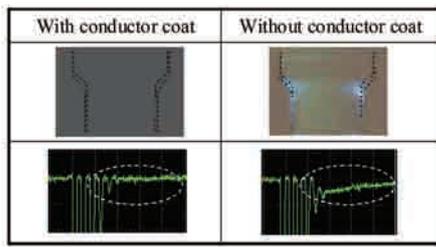


Fig. 16 Effect of conductor coating

4. 開発品でのS/N効果確認

これまで検討してきた結果を基に、イオン出力信号Sを確保できる電極形状、及びノイズN抑制のための銀被膜を有するイオン電流検出システム用スパークプラグを設定した。概要をFig. 17に示す。被膜厚さは4章で定

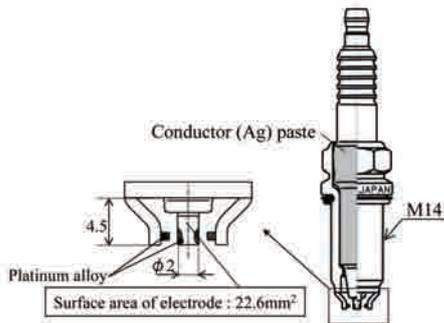


Fig. 17 Schematic view of developed spark plug

めた条件で製作した。この開発プラグを用いて、10気筒エンジンでOBD規制要求の検出範囲条件のS/Nを確認した結果、S確保、N低減対応により運転条件全域でS/N>2を満足していることが確認できた (Fig. 18)。

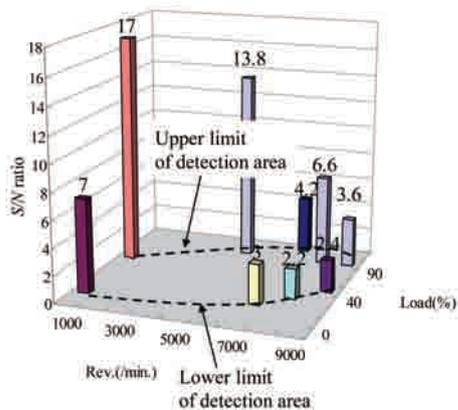


Fig. 18 Results of tests with the developed plug

むすび

イオン電流検出システム用スパークプラグの開発として、イオン電流出力SとノイズNに対し、それぞれ運転条件全域でS/N>2を満足するべく、イオン出力信号Sの確保とノイズNの低減手法について検討し、以下の知見を得た。また、これらの知見をベースにした開発プラグにより、対象となる多気筒数エンジンにおいてOBD規制要求の検出区間全域でS/N>2を達成することを確認した。

- ・ 電極消耗や燃焼デポジット付着などによるイオン電流出力Sの経年劣化を考慮した火花部形状、及び初期寸法を設定することより、設計寿命期間中を通して必要出力を確保することができる。
- ・ ノイズNはプラグへの高電圧印加時に電極表面が帯電することにより、電極とハウジング間の電荷が集中する部分で生じるコロナ放電が原因である。このコロナ放電は、電極表面に導体被膜 (例: Ag) を配しアースすることで抑制することができる。

これからの開発エンジンの排ガス規制対応に、本研究により見出したイオン電流検出法に特化したスパークプラグの知見が一助となることを期待し、結びとする。

<参考文献>

- 1) Anson Lee, Jan S. Pyko : Engine Misfire Detection by Ionization Current Monitoring, SAE Technical paper, SP-1082, 950003 (1995)
- 2) John Auzins, Hasse Johansson and Jan Nytomt : Ion-Gap Sense in Misfire Detection, Knock and Engine Control, SAE Technical paper, SP-1082, 950004 (1995)
- 3) 電気学会 : 高電圧工学 第2次改訂版, 東京, 社団法人電気学会, (1981), p230.

<著 者>



土井 香
(どい かおり)
エンジン機器技術部
スパークプラグの設計、開発に
従事



中村 義裕
(なかむら よしひろ)
エンジン機器技術部
スパークプラグの設計、開発に
従事



端無 憲
(はなし けん)
点火製造部
スパークプラグの生産技術に
従事



橋爪 勝志
(はしづめ かつし)
トヨタ自動車(株)エンジン制御
システム開発部
エンジンマネジメントシス
テムの設計、開発に従事