点火プラグ一体形燃焼光検出器による放電火花の計測*

大須賀 稔^{*1}, 黒岩 弘^{*2}
大山 宜茂^{*1}, 斎藤 孝志^{*3}

Measurement of Spark Light Emission Using an Optical Combustion Sensor

Minoru OHSUGA, Hiroshi KUROIWA, Yoshishige OHYAMA and Takashi SAITO

Achieving expected future exhaust emission and fuel consumption standards for passenger cars will require fundamental improvements in the combustion process for spark ignition engines. Improvements must be made in not only fuel-injection but also spark-ignition devices based on precise studies of the engine-combustion process. Real-time measurement of light emission of spark and ignition kernel in an actual automotive engine is currently very few. In this paper, a real-time method using an optical combustion sensor that combines fiber optics with a conventional spark plug is presented. It is shown that intensity of light emission of spark is related to the spark voltage, and is changed according to the mixture temperature and engine load.

Key Words: Spark-Ignition Engine, Ignition, Light Emission from Spark, Optical Combustion Sensor, Ignition Device

1. 緒 言

自動車の排気浄化と燃費の向上を達成するには、エンジンの燃料供給系のみならず、点火装置および点火方式の改良も重要な課題である⁽¹⁾。改良に際しては、放電現象の実エンジンでの観察が必須であるが、現在では二次電圧、電流を計測するという間接的な方法が一般的に用いられているにすぎない。また、放電火花の可視化には、エンジンを模擬した透明なチャンバで撮影する方法が用いられている^{(2)~(4)}。しかし、放電は数百 ns~数 ms 間の高速現象であることや、点火プラグ電極間での小さな現象なので可視化のための装置が複雑になり、実エンジンでの測定は困難である。

本報告では、点火プラグの中心電極に石英のガラスファイバを埋込み放電、燃焼時の光を外部に導く燃焼光検出器を試作し、放電火花を実エンジンで簡便に観察できるようにした。今回は、この検出器による仕様

の異なった点火装置の放電火花の計測結果と着火遅れ時間の比較結果を報告する。

2. 実験装置と方法

2.1 実験装置 図1に加圧定容容器を用いた実験装置の概略を示す。この加圧定容容器に点火プラグ一体形の燃焼光検出器(後述)を取付けた。ポンペから加圧空気を定容容器に供給し、火花放電電極部分の圧力を変化させた。また、電気ヒータにより空気温度を

図1 実験装置の概略(加圧定容容器)

* 平成3年7月18日 第9回内燃機関合同シンポジウムにおいて講演, 原稿受付 平成3年12月2日。

^{*1}正員, (株)日立製作所 日立研究所(●312 勝田市高場 2520, 自動車機器事業部内)。

^{*2}正員, (株)日立製作所 自動車機器事業部(●312 勝田市高場 2520)。

^{*3}自動車機器技術研究組合(●312 勝田市高場 2520, 自動車機器事業部内)。

変化させた。ディストリビュータを用いた点火装置により、燃焼光検出器に放電用の電圧、電流を供給した。放電時の二次電圧は高電圧プローブで測定され、燃焼光検出器からの光出力は光電変換器に導かれ、電気信号に変換される。光電変換器は波長 800 nm にピーク感度を持つフォトトランジスタで構成されている。実験では、ポンプによる加圧圧力、電気ヒータへの供給電圧を変えて、静止空気中で放電させたときの光出力、二次電圧を測定した。

図 2 にエンジンを用いた実験装置の概略を示す。本装置では、四サイクル、四シリンダ、行程容積 1.8 L、ターボ過給機付の二吸気弁式エンジンを用いた。吸気ポートはストレート形で、特にスワールを形成する構造にはなっていない。点火プラグ一体形の燃焼光検出器をエンジンの一つの気筒に取付け、放電時の光出力を測定した。また、電圧、電流計により、放電時の二次電圧、電流を測定した。点火装置として、一次電流 I_1 がそれぞれ 6 A と 10 A の点火コイル、点火プラグが直結されている DIS (Direct ignition system) と、コンデンサ放電式 CDI を用いた。エンジンの回転数、負荷を変えた場合の光出力、二次電圧、電流をオシロスコープで測定した。

2・2 燃焼光検出器⁽⁵⁾ 図 3 に点火プラグ一体形の燃焼光検出器の構造を示した。点火プラグの中心電極である高圧端子を貫通するように直径 1.2 mm の

石英ガラスファイバ(コア直径 1.1 mm, クラッド厚さ 0.05 mm)を配置した。この石英ファイバをガラス封着剤で固定し機密性を確保した。高圧端子から放電用の高電圧を供給し、混合気点火する。この点火時の光を、石英ガラスファイバにより外部に取出す。

図 4 に燃焼光検出器の検出部の構造を示した。石英ガラスファイバの先端を中心電極先端より燃焼室側に突出し、さらに凸レンズ状にすることにより視野角を 120° と大きくした。図 4 (a) のタイプ A は、接地電極が中心電極の側方に配置されていて、燃焼火花が広がる様子が観察できるように構成されている。また、図 4 (b) のタイプ B では、接地電極が中心電極の上側に配置されている。さらに、放電火花が石英ガラスファイバの検出面上を確実に通過するように、

図 4 検出部の構造

(a) タイプ A

(b) タイプ B

図 5 放電火花の状況

図 2 実験装置の概略 (実エンジン)

図 3 燃焼光検出器の構造

図 6 放電時の光出力 V_0 と二次電圧 V_2 の変化

接地電極の検出面に対向する位置に白金チップを配置した、放電火花は、白金チップから図中の矢印(点線)のように検出面近傍を通り中心電極に向かって形成される。このような構成により、着火直後における電極近傍の初期火炎の光が観察できる。

3. 実験結果と考察

3.1 静止空気中における放電火花の計測 図5に常温、常圧で測定された放電火花の状況を示した。タイプAの配置では、中心電極の側方に放電火花が形成されているので、石英ガラスファイバはこれを検出しない。一方、タイプBの配置では、石英ガラスフ

ァイバ上を放電火花が通過しているの、火花を検出できる。

図6に図1の実験装置を用いて、タイプBの燃焼光検出器で測定された放電時の光出力 V_o と二次電圧 V_2 の変化を示す。二次電圧 V_2 が立下がり、約 -10 kV 前後で絶縁破壊が生じ、この瞬間から光出力 V_o が遅れなしに急速に立上っている。静止空気中では、立上がった光出力 V_o は、その後単調に減少している。絶縁破壊直後の容量放電時の光強度が最も高く、その後の誘導放電時の光強度は二次電流の減少とともに減少する。絶縁破壊時の二次電圧 V_{2p} 、および光出力 V_o のそれぞれの値を V_{2p} 、 V_{oi} とする。

図7に加圧定容容器内圧力 P と V_{2p} 、 V_{oi} の関係を示す。空気温度を $24^\circ(\text{常温}) \sim 300^\circ\text{C}$ の範囲で変化させて測定した。また、各測定点は256回の放電時の V_{2p} 、 V_{oi} を平均して求められたものである。 P が増加するに従って、絶縁破壊電圧である V_{2p} と V_{oi} は増加している。しかし、 P に対して V_{2p} は単純な一次の関係にあるが、 V_{oi} はそうではない。本装置では、光電変換器として 800 nm の波長の光にピーク感度を有するフォトランジスタが用いられているので、火花光の波長が変化した場合には見かけ上光強度が変化してしまう。また、空気温度が上昇するに従って V_{2p} 、 V_{oi} は減少している。これは、圧力が一定の場合、空気温度が上がると、空気密度が減少して、放電電圧が下がるためと考えられる⁽⁶⁾⁽⁷⁾。例えば、 0.5 MPa の乾燥空気の場合、 100°C で密度が 4.73 kg/m^3 、 200°C で 3.73 kg/m^3 となり大きく変化する。

図8に図7の同じ空気温度での V_{2p} と V_{oi} の関係を示す。 V_{2p} が増加するに従って V_{oi} も増加しているが、単純な一次の関係ではない。また、空気温度が高いほど、 V_{oi} は小さくなっている。

3.2 実エンジンにおける放電火花の計測 図9

図7 加圧定容容器内圧力 P と V_{oi} 、 V_{2p} の関係

図8 加圧定容容器を用いた場合の V_{oi} と V_{2p} の関係

図9 燃焼サイクル中の V_o と二次電流 I_2 の変化(130 サイクル)

図10 放電時の V_o と I_2 の変化 図11 CDI, DIS を用いた場合の放電時の V_o と I_2 の変化

に燃焼サイクル中の光出力 V_o と二次電流 I_2 の変化を示した。エンジン回転数 2000 rpm, 吸気管内圧力 87 kPa, 点火時期 20° BTDC, 空燃比 13 とし, 点火装置として一次電流 I_1 が 6 A の DIS を用いた。測定に際しては, 130 サイクル分の出力を重ね書きした。図 9 (a) のタイプ A の燃焼光検出器を用いた場合, 絶縁

図12 吸気管内圧力 P_b と V_{oi} , V_{2p} の関係

破壊時には, V_o がほとんど検出されない。しかし, その後に V_o は現れ, これが燃焼による光である。図 9 (b) のタイプ B の場合には, 絶縁破壊と同時に火花光とこれにより形成される火炎核が検出される。 I_2 が減少し火炎核が小さくなるに従い, V_o はいったん減少する。その後, 自立伝ば火炎の成長とともに再び V_o は増加する。このように, タイプ B のような検出部の構成にすることにより, 実エンジンにおいて放電火花による火炎核の形成とその後の自立伝ば火炎の成長過程を計測することができる。しかし, 混合気の流動により火炎核の成長方向が変動するので, 今回のように複数のサイクルを計測し, 統計的な処理をする必要がある。

図 10 にタイプ B の燃焼光検出器で測定された放電時の V_o と I_2 の変化を示した。ここでも絶縁破壊時の光出力を V_{oi} とした。図 10(a) にはエンジン運転中に, 燃焼光検出器が取り付けられている気筒への燃料供給をやめたときの V_o と I_2 , 図 10(b) に燃料供給した場合のものを示した。燃料供給をしかい場合の V_{oi} は, 燃料を供した場合に比べて大きくなっている。この原因としては, 点火プラグ電極間のガス温度の低下と電極間に混合気が存在しないことが考えられる。燃料供給をやめた後, 排気温度が一定になってから測定したので, 燃焼室壁面の温度が低下し, シリンダ内のガス温度が燃焼時に比べ低くなり図 7 のように V_{oi} が大きくなった。また, 電極間に混合気が存在する場合は, イオン化が早まり低い電圧で絶縁破壊が生じ, V_{oi} は混合気のない場合より小さくなる。さらに, 図 10(a)

図13 点火時期と V_{oi} , V_{2p} の関係

(a) エンジン回転数: 1200 rpm

(b) エンジン回転数: 2000 rpm

(c) エンジン回転数: 3000 rpm

図14 エンジン回転数を変えた場合の V_o と I_2 の変化

の場合、静止空気中の特性と同じように、 V_o は容量放電後の誘導放電時期に I_2 の減少とともにほぼ単調に減少しており、 I_2 が零になると V_o も零になる。一方、図10(b)の場合、絶縁破壊後の V_o が増加しており、 I_2 が零になった後も続いている。これは、電極間に混合気が存在しているために生じたもので、混合気への着火に伴う発光と考えられる。 V_o がサイクルごとに変動しているのは、圧力、温度の変動のほか空気流による放電経路の変動に、さらに、燃料を供給した場合には点火プラグ周りの混合気濃度の変動に、起因していると考えられる。

図11に点火装置を変えた場合の放電時の V_o と I_2 の変化を示した。図11(a)はCDIを用いた場合の結果である。CDIでは、容量放電が支配的で誘導放電の期間がほとんどないので、発光期間が短い。図11(b)に、DIS($I_1=6A$)を用いた場合の結果を示す。 I_2 のピーク値が30mA程度であり、誘導放電の持続時間は600 μ sである。放電初期の容量放電時の V_o (V_{oi}) が最も大きく、その後は減少しており、静止空気中での結果に似ている。図11(c)にDIS($I_1=10A$)を用いた場合の結果を示す。 I_2 のピーク値が80mA程度、誘導放電の持続時間は1msと、6Aの場合より大きくなっている。一方、 V_{oi} は6Aの場合に比べて小さくなっ

(a) 空燃比: 14.7

(b) 空燃比: 16.6

図15 点火時期と着火遅れ時間の関係

ている。また、誘導放電の期間では、 V_o は大きく、かつ変動している。これは、点火プラグの電極近傍に形成された火炎核が大きいためと考えられる。

図 12 に点火装置として DIS を用いた場合の吸気管内圧力 P_b と V_{oi} , V_{2p} の関係を示す。 P_b が大きくなるに従って V_{oi} , V_{2p} も大きくなっている。また、10 A の場合のほうが 6 A のものより V_{2p} , V_{oi} の両者とも小さくなっている。これは、図 7, 8 の静止空気中の結果から考えると電極、燃焼温度などの雰囲気温度が 10 A の場合のほうが高くなったためと考えられる。

図 13 に点火時期と V_{oi} , V_{2p} の関係を示す。吸気管内圧力 P_b は、60 kPa である。点火時期を早めると V_{oi} , V_{2p} も小さくなる。 V_{oi} , V_{2p} は電極間のガス圧力が小さくなると減少し、温度が低くなると増加する。点火時期が早いほうが、放電時の気筒内圧力が小さく、ガス温度は低くなる。ここでは、圧力の影響が大きく、 V_{oi} , V_{2p} が小さくなったと考えられる。また、この運転状態では I_1 の影響はほとんどない。

図 14 にエンジン回転数を 1200, 2000, 3000 rpm とした場合の V_o , I_2 の変化を示す。吸気管内圧力 P_b は、60 kPa である。容量放電時の V_{oi} はエンジン回転数により、ほとんど変化していない。しかし、その後の V_o の変化は回転数に影響される。1200 rpm では、誘導放電時の V_o が大きく、かつ変動している。一方、3000 rpm では、誘導放電時の V_o は小さくなっている。これは、エンジン回転数が大きくなると、気筒内の混合気流の乱れが大きくなり、点火プラグ電極間に形成された火炎核が速く移動するためと考えられる。

3.3 着火遅れ時間の比較 図 15 に点火装置として I_1 が 6 A と 10 A の DIS を用いた場合の、点火時期と着火遅れ時間の関係を示す⁽⁶⁾。着火遅れ時間はタイプ A の燃焼光検出器を用いて測定されており、絶縁破壊が起こってから V_o が立上がるまでのクランク角度 (degree) として定義されている。図 15(a) は空燃比を 14.7 とした場合の結果で、着火遅れ時間は点火時期が 25° BTDC あたりのとき最小になる。また、 $I_1=10$ A の場合のほうが着火遅れ時間が小さい。図 15(b) に空燃比が 16.6 の場合の結果を示す。空燃比が大きくなると、6 A と 10 A の着火遅れ時間の差が大きくなる。これは、図 11 に示したように、10 A のほうが放電時の光出力強度が大きく、かつ放電期間中持続しているの

で大きな火炎核が形成されているためと考えられる。

4. 結 言

点火プラグの中心電極に、石英ガラスファイバを貫通するように配置した点火プラグ一体形の燃焼光検出器を用い、実エンジンでの放電火花の計測法を検討して以下の結果を得た。

(1) 燃焼光検出器(点火プラグ)の接地電極を、中心電極と対向するように配置し、さらに接地電極上の対向部に突起部を設け、放電火花が常にファイバ面を通るように形成することにより、放電火花が計測できる。

(2) 絶縁破壊時の二次電圧が大きくなるに従って、放電火花の光強度が大きくなる。

(3) 上記(1)の構成により放電期間中、点火プラグ電極近傍に形成される火炎からの光出力が計測できる。この期間の光出力は、点火エネルギーが大きく、エンジン回転数が小さいほど大きくなる。

(4) 放電期間中の光出力が大きい点火装置の場合、着火遅れ時間は短くなる。

本研究の遂行にあたり御協力いただいた、(株)日立製作所自動車機器事業部、自動車機器技術研究組合の関係者各位に深く感謝の意を表する。

文 献

- (1) Ziegler, G. F. W., The Influence of Spark Plug Orientation on Flame Kernel Formation in Flowing Mixture, *SAE Paper* 865031, (1968).
- (2) Ishii, K,ほか4名, Analysis of Ignition Mechanism of combustible Mixtures by Short Duration Sparks, *International Symposium COMODIA '90*, (1990)153-158.
- (3) Herweg, R. and Ziegler, G. F. W., Flame Kernel Formation in a Spark-Ignition Engine, 文献(2)の173ページ.
- (4) Herweg, R., Flow Field Effect on Flame Kernel Formation in a Spark Ignition Engine, *SAE Paper* 881639, (1988).
- (5) Ohya, Y.,ほか2名, Study on Mixture Formation and Ignition Process in Spark Ignition Engine Using Optical Combustion Sensor, *SAE Paper* 901712, (1990).
- (6) 武田, 気体放電の基礎, (1973), 71, 東明社.
- (7) 花岡, ほか2名, 点火プラグ要求電圧におよぼす要因について, 自動車技術会論文集, 15(1978), 30-35.
- (8) Ohsuga, M.,ほか2名, Study on Engine Combustion Analysis, *Hitachi Review*, 39-5(1990), 299-306.