

論文・解説

16

直噴ガソリンエンジンのプラグくすぶり性評価法の開発 Development of the Measurement Method for the Spark Plug Fouling in a DI Gasoline Engine

内田 健児*¹ 藤川 竜也*² 檜山 謙二*³
Kenji Uchida Tatsuya Fujikawa Kenji Kashiyama
小野 裕史*⁴ 山川 正尚*⁵
Hirofumi Ono Masahisa Yamakawa

要 約

ガソリン筒内直接噴射は、熱効率を改善するための高圧縮比エンジンや過給エンジンにおいて、広く採用されている。これらのエンジンにおける重要な品質問題の一つに、空燃比が濃い冷間始動時や暖機運転時に、点火プラグに燃料液滴が飛散、付着することにより引き起こされるくすぶり失火が挙げられる。そこで、マツダは、透過光減衰を利用した点火プラグ型光学センサーを用いて、点火プラグ近傍の燃料液滴量を評価するための新しい計測方法を開発した。この計測方法を用いて、点火プラグ近傍の液滴量は、プリデリバリー試験におけるエンジン始動不能に至るまでのサイクル数や暖機運転時における失火回数と強い相関があることを明らかにした。本研究で開発した性能評価法により、点火プラグに飛散する燃料液滴量を抑制することで、点火プラグの耐くすぶり性を向上させることを実証した。

Summary

Gasoline direct injection (DI) has been widely applied to high-compression-ratio and supercharged engines for better thermal efficiency. One of the major quality concerns of a DI gasoline engine is spark plug fouling caused by dispersed fuel droplets at cold starts and warm-up operations in fuel-rich conditions. To solve this problem, a new method to measure the amount of the fuel droplets attached around the spark plug was developed, by means of a spark-plug-type optical sensor using optical transmission attenuation. It was found that the amount of the fuel droplets was strongly correlated with the number of cycles until the engine became unable to restart at a pre-delivery test and the number of misfires at a warming-up operation. As a result, the antifouling performance of the spark plug was able to be improved by controlling the amount of fuel droplets around the spark plug.

1. まえがき

近年、ハイブリッド車や電気自動車などの新しい電気デバイスを搭載した自動車の研究開発が盛んに行われ、市場への導入も活発化している。しかしながら、2030年においても自動車の大半は内燃機関を搭載していると予測されており⁽¹⁾、CO₂の総排出量を削減するためにも、内燃機関、とりわけ、広く普及しているガソリンエンジンの熱効率改善が極めて重要である。ガソリンエンジンの熱効率改善の手段として、高圧縮比化⁽²⁾や過給ダウンサイジング⁽³⁾などの技術が開発され、これらの多くのエンジンではノッキング改善のために筒内直接燃料噴射（以下、直噴）が採

用されている。

直噴ガソリンエンジンにおいては、冷間時にエンジンの始動停止を繰り返す場合や暖機中に、くすぶりによる失火を引き起こすことがある。この失火の原因は、冷間始動時や暖機中は燃焼場の温度が低く点火プラグが自己清浄温度に到達していないため、点火プラグに付着した燃料液滴がカーボンとなり、絶縁体表面に堆積し、絶縁抵抗が低下することによるものといわれている⁽⁴⁾。したがって、カーボン堆積の原因となる液体燃料の付着を防止できれば、失火は起こらないことになる。しかしながら、従来の評価法では、点火プラグの仕様や燃料噴射制御を変更しながら繰り返してモード試験するため、耐くすぶり性確保に多くの開

*1,2,5 パワートレイン技術開発部
Powertrain Technology Development Dept.

*3,4 エンジン性能開発部
Engine Performance Development Dept.

発時間を要していた。そこで、本研究では、点火プラグに飛散する燃料液滴量に着目し、直噴ガソリンエンジンの耐くすぶり性を短期間で評価できる定量的な手法を開発した。

2. 点火プラグ近傍の燃料液滴検出法の開発

2.1 計測装置概要

本研究では、点火プラグに飛散する燃料液滴量を計測するために、実機エンジンに大きな改造なしで取り付けることができる点火プラグ型光学センサー（LaVision社製。以下、プラグセンサー）を用いた。プラグセンサーの概略図をFig. 1に示す。計測部は点火プラグの中心電極の横に設置されている。光源からの光はサファイアファイバーを通り、サファイアウィンドウを介して計測部に入射する。その光は計測部先端のミラーで反射され、再度サファイアファイバーを通り受光部に導かれる。なお、光源にはハライドランプを用い、受光部には光学フィルターを取り付けた。

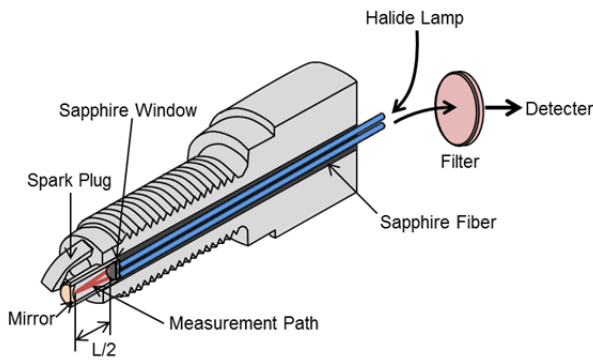


Fig. 1 Schematic of the Spark-Plug-Type Optical Sensor

2.2 計測原理

燃料液滴を検出するために、本研究では波長 λ が $2.7\mu\text{m}$ の赤外光を使用した。Fig. 2にメタンと二酸化炭素、水の赤外吸収スペクトルを示す⁽⁵⁾。赤外吸収スペクトルは原子間の結合の種類により決まるため、炭化水素燃料のC-H結合を持つメタンを代表として示している。図より、 $2.7\mu\text{m}$ の波長帯では燃料による光の吸収は起こらない。したがって、燃料液滴が存在するガソリン混合気中にハライドランプの光を照射し、光学フィルターにより $2.7\mu\text{m}$ の波長帯の光のみを取り出すと、その赤外光は混合気中に存在する二酸化炭素および水による吸収と燃料液滴による散乱によって透過光強度が減衰する。このとき、あるクランク角 θ において観測される入射光強度 I_0 [$\text{J}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]と透過光強度 $I(\theta)$ [$\text{J}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]の関係は、Bouguer-Lambert-Beerの法則⁽⁶⁾により次式で表される。

$$\ln\left(\frac{I(\theta)}{I_0}\right) = -\left\{\varepsilon_{\text{CO}_2} C_{\text{CO}_2}(\theta) + \varepsilon_{\text{H}_2\text{O}} C_{\text{H}_2\text{O}}(\theta)\right\}L - Q_{\text{ext}} A_f(\theta)L \quad (1)$$

ここで、 ε は気体のモル吸光係数 [$\text{m}^2/(\text{mol} \cdot \text{m})$]、 $C(\theta)$ はあるクランク角 θ における気体のモル濃度 [mol/m^3]、 L は光路長 [m]、 Q_{ext} は燃料液滴による減衰係数、 A_f は単位体積当たりの液滴表面積 [m^2]である。また、添え字 CO_2 と H_2O はそれぞれ二酸化炭素と水に対する値を表している。

式(1)の右辺第2項は、計測部を通過する燃料液滴で光が散乱することにより起こる透過光の減衰を表しており、粒径分布を持った液滴群に光が通過する場合、次式で表される⁽⁷⁾。

$$\ln\left(\frac{I(\theta)}{I_0}\right)_{\text{ext}} = -Q_{\text{ext}} A_f(\theta)L = -\sum\left\{R(\alpha_i, \phi) Q_{\text{ext}}(\alpha_i) \times \frac{\pi}{4} D_i^2 \Delta N_i(\theta)L\right\} \quad (2)$$

ここで、 R は光学定数、 α は粒子パラメーター ($=\pi D/\lambda$)、 D は粒子直径 [m]、 ϕ は透過光の検出角 [deg.]、 N は粒子数密度 [$1/\text{m}^3$]を表している。

Fig. 3に波長 λ が $2.7\mu\text{m}$ の時の粒子直径 D と減衰係数 Q_{ext} の関係の計算結果を示す⁽⁸⁾。減衰係数は燃料液滴の屈折率と粒径、光の波長により求まるが、ガソリンはさまざま

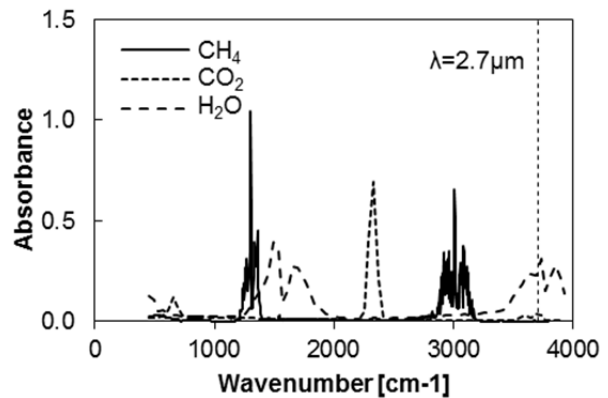


Fig. 2 IR Spectra of Methane, Carbon Dioxide and Water⁽⁵⁾

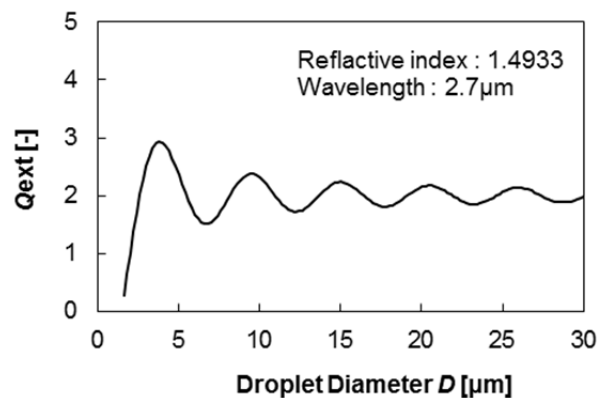


Fig. 3 Dependence of the Extinction Coefficient on the Droplet Diameter

まな炭化水素の混合物であるため、イソオクタン屈折率を代表値とした。今回計測を行った運転領域における噴霧の粒径は、位相ドップラー法を用いた粒径計測よりザウター平均粒径 D_{32} が $22\mu\text{m}$ 以上であることがわかっている。

したがって、 $Q_{\text{ext}} = 2.0$ とすることができ、 α_i は ϕ の変化に対して小さいので⁽⁷⁾ $\bar{\alpha} = \pi D_{32} / \lambda$ として、 $R(\alpha_i \phi) = R(\bar{\alpha} \phi)$ とおくことができる。更に、 $\gamma(\theta)$ をあるクランク角 θ における液滴質量濃度 $[\text{g}/\text{m}^3]$ 、 ρ を液滴の密度 $[\text{g}/\text{m}^3]$ とすると、

$$\gamma(\theta) = \rho \sum \frac{\pi}{6} D_i^3 \Delta N_i(\theta) \tag{3}$$

とおけるので、式(2)は

$$\ln \left(\frac{I(\theta)}{I_0} \right)_{\text{ext}} = -R(\bar{\alpha} \phi) Q_{\text{ext}} \frac{3}{2} \frac{\gamma(\theta) L}{\rho D_{32}} \tag{4}$$

となる。一方、点火プラグに飛散する全燃料液滴量 M_d $[\text{g}]$ は次式で表される。

$$M_d = V_{\text{sens}} \int_{\theta_1}^{\theta_2} \gamma(\theta) d\theta \tag{5}$$

ここで、 V_{sens} はセンサーの計測部体積 $[\text{m}^3]$ 、 θ_1 は燃料液滴が計測部に到達するクランク角、 θ_2 は燃料液滴が通過し終わるクランク角である。更に、式(4)と式(5)から点火プラグへの燃料飛散量 M_d と透過光減衰には次の関係が成り立つ。

$$M_d \propto \int_{\theta_1}^{\theta_2} -\ln \left(\frac{I(\theta)}{I_0} \right)_{\text{ext}} d\theta \tag{6}$$

よって、式(6)より点火プラグへの燃料飛散量 M_d は透過光減衰を液滴の通過した範囲で積分したものに比例するため、プラグセンサーの透過光減衰信号から点火プラグへ飛散する燃料液滴の傾向をつかむことが可能である。そのため、この燃料飛散量は点火プラグに付着する燃料液滴量と相関があると考えられる。

2.3 液滴信号の抽出方法

Fig. 4に本研究で使用したプラグセンサーから得られた透過光減衰波形の一例を示す。図中のスパイク状の信号が計測部を燃料液滴が通過した信号である⁽⁹⁾。式(1)で示したように、本研究で用いる波長帯では混合気中に存在する二酸化炭素と水蒸気により光の吸収が起こる。そのため、これらの気体の吸光による透過光減衰と燃料液滴の散乱による透過光減衰を切り分けなければならない。そこで、本研究では燃料液滴が通過する際に透過光が急激に変化する特徴を用いて、プラグセンサーから得られた信号を2階微

分した波形より燃料液滴の通過の検出を試みた。2階微分は信号の変化量が極端に大きくなっている部分を検出できるため、スパイク状の信号の立ち上がり位置を見つけるには有効である。Fig. 4には透過光減衰波形を2階微分した波形も同時に示している。図より、2階微分値が最大の位置でスパイク信号が立ち上がっていることがわかる。したがって、本研究ではこの位置を燃料液滴が計測部に到達するクランク角 θ_1 と定義した。一方、燃料液滴が通過し終わるクランク角 θ_2 は、モータリング時の2階微分値が ± 0.001 の範囲に収束していることから、 θ_1 以降で ± 0.001 の範囲に収束する最小のクランク角を θ_2 と定義した。この2点により燃料液滴信号の切り分けを行った。更に、この直線とスパイク信号で囲まれる領域を本研究では点火プラグへの燃料飛散量 M_d' と定義した。

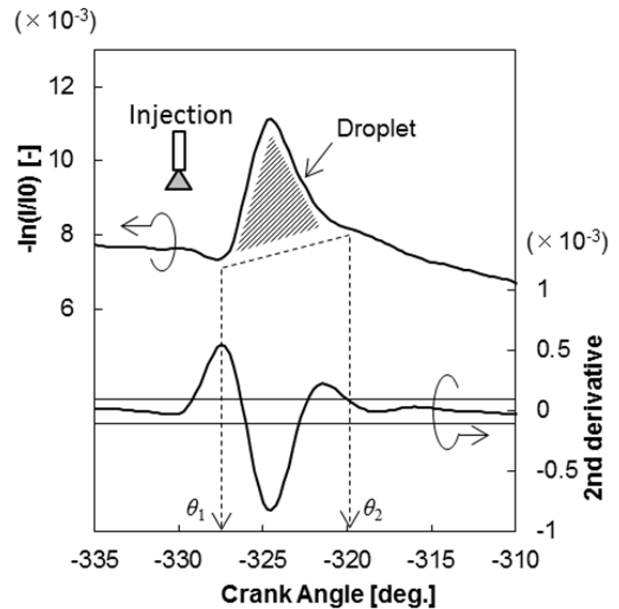


Fig. 4 Droplet Signal from the Spark-Plug-Type Optical Sensor and Detection Method of the Droplet Signal

2.4 可視化エンジンを用いた検証

プラグセンサーから得られる燃料液滴信号の妥当性を検証するために、可視化エンジンを用いて、噴霧を吸気バルブに当てることで意図的に点火プラグ近傍に燃料液滴を飛散させて撮影を行った。Fig. 5に噴霧の散乱光画像を示す。各クランク角における燃料液滴量は、プラグセンサーの計測部(φ3.3×6.5)が位置する場所に存在する燃料液滴の散乱光から、直接液滴の粒径と数を計測し、その粒径と液滴数をもとに算出した。Fig. 6に10枚の画像から得られた燃料液滴量の平均値とプラグセンサーから得られた信号を示す。両者の波形を比較すると、燃料液滴が検出される期間が一致しており、プラグセンサーの信号強度と可視化から得られた燃料液滴量の間に関係があることがわかる。したがって、プラグセンサーから得られる液滴信号を点火プ

ラグへ飛散する燃料液滴量と考えた。

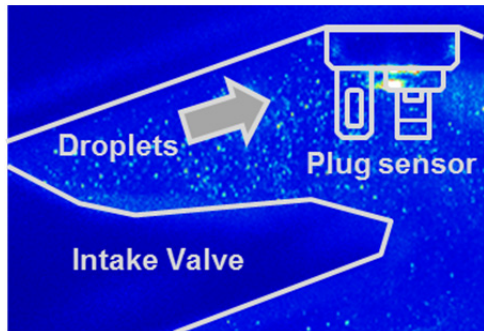


Fig. 5 Image from the Optical Research Engine

死点前320度の一括噴射であり、燃料噴射圧力は4MPaである。図より、燃料液滴が観測されるのはクランキング時

Table 1 Engine Specifications

Engine Type	In-line 4, DOHC
Bore x Stroke [mm]	83.5 x 91.2
Displacement [cc]	1,997
Combustion Chamber	Pentroof
Compression Ratio [-]	14
Fuel	Gasoline
Fuel Supply System	Side Direct Injection
Injector Type	Multi Hole (6H)
Spark Plug Type	Iridium Platinum Electrode
Heat Rating of Spark Plug	6

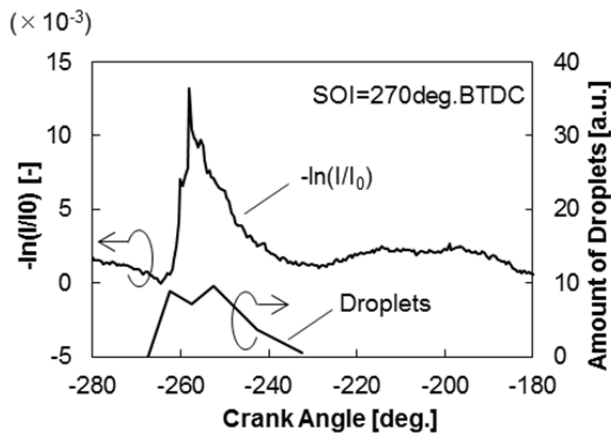


Fig. 6 The Amount of Fuel Droplets around the Spark Plug Estimated from Images and the Light Extinction Signal from the Plug Sensor

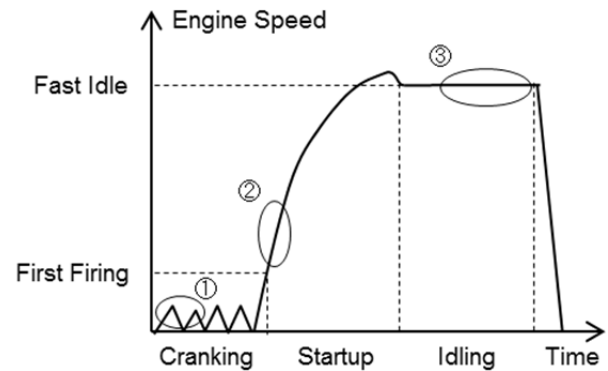


Fig. 7 Example of the Pre-Delivery Test Mode

3. 実機での点火プラグ耐くすぶり性開発

3.1 冷間始動運転時における耐くすぶり性開発

これまで、点火プラグの耐くすぶり性の品質確認として、くすぶりに最も厳しい冷間時において、エンジンの始動停止を繰り返すことにより始動不能に至るまでのサイクル数を評価する試験（プリデリバリー試験）を行ってきた。今回、プラグセンサーを用いて、プリデリバリー試験で点火プラグへの燃料飛散量 M_d' と始動不能に至るまでのサイクル数を調査した。Table 1に本研究で用いたエンジンの主要緒元を、Fig. 7にこの試験モードの一例を示す。図より、プリデリバリー試験モードは①クランキング、②スタートアップ、③アイドリングの3つの領域に分けられるので、それぞれの領域における点火プラグへの燃料飛散量を調査した。この時、プラグセンサーから得られるデータの①～③の所定サイクルの平均値を各領域における燃料飛散量 M_d' とした。

はじめに、空燃比の異なる3つの条件における燃料飛散量の計測結果をFig. 8に示す。噴射条件はいずれも圧縮上

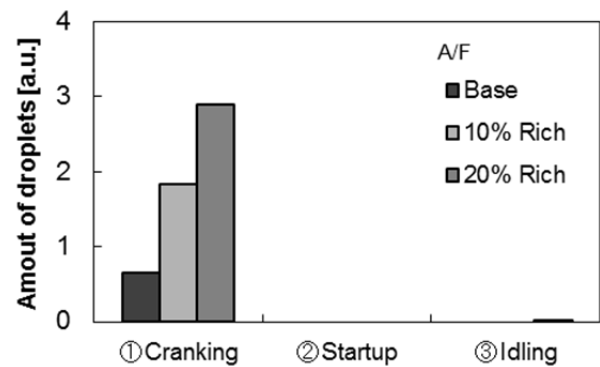


Fig. 8 The Amount of Fuel Droplets around the Spark Plug at the Pre-Delivery Test

のみで、スタートアップおよびアイドリング時にはほとんど観測されない。これは、クランキング時はスタートアップ時およびアイドリング時と比較して燃料の蒸発量が少なく、着火性を確保するために極めて空燃比の濃い条件で運転しているためと考えられる。したがって、プリデリバリー試験においてはクランキング時の燃料飛散量を管理すれば良い。

次に、噴射開始時期および空燃比を変えて燃料飛散量を計測した。この時の運転条件をTable 2に示す。燃料噴射圧力はいずれも4MPaである。また、Fig. 9にクランキング時の点火プラグへの燃料飛散量 M_d' と始動不能に至るまでのサイクル数との関係を示す。この図より、点火プラグへの燃料飛散量が少ないほど始動不能に至るまでのサイクル数は直線的に長くなるのがわかる。また、分割噴射することにより始動不能に至るまでのサイクル数も改善した。これは、空燃比を一括噴射に比べ薄くできたため燃料飛散量が減少したことと、分割噴射を行うことにより燃料の気化霧化が改善したことによると考えられる。一方、3分割噴射は始動不能に至るまでのサイクル数が悪化した。これは、ピストンが上死点に近い位置で燃料を噴射したため、ピストンに当たり跳ね返った噴霧が点火プラグ近傍に飛散したためと考えている。

最後に相似形で設計した排気量違いの燃焼室での影響を確認した。同様の条件で計測した結果をFig. 9に同時に示している。図より、点火プラグへの燃料飛散量 M_d' と始動不能に至るまでのサイクル数は排気量に関係なく成立していることがわかる。

以上の結果から、点火プラグへの燃料飛散量 M_d' を評価することで、相似形で設計した排気量違いのエンジン（コモンアーキテクチャー設計⁽¹⁰⁾）の始動不能に至るまでのサイクル数を予測することができる。これにより、燃料飛散量が少なかった条件で確認のためのプリデリバリー試験のみで済み、エンジン開発期間の短縮が可能となった。

Table 2 Operating Conditions during Cranking

ID	Start of Injection [deg.BTDC]			Split Ratio	A/F
1	250	-	-	-	Base
2	250	-	-	-	10% Rich
3	320	280	-	5:5	±0%
4	320	280	-	5:5	30% Lean
5	340	310	280	3:3:4	±0%

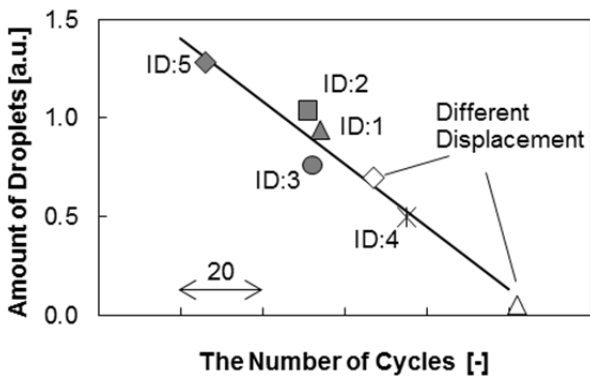


Fig. 9 Relationship between the Amount of Fuel Droplets

around the Spark Plug during Cranking and the Number of Cycles until the Engine couldn't Restart.

3.2 暖機運転時における耐くすぶり性開発

油水温が適正温度になるまでの負荷の低い暖機時は点火プラグ電極温度も低いため、液体燃料付着によるくすぶり失火が起きる条件となる。そこで、本研究では油水温が適正温度になるまでの各水温において、プラグセンサーを用いて点火プラグへの燃料飛散量 M_d' を計測した。計測に使用したエンジンは3.1節で用いたエンジンと同仕様である。

はじめに、エンジン回転数1000rpmの無負荷条件下で、噴射開始時期を圧縮上死点前350度、燃料噴射圧力を20MPaに固定し、水温を25, 40, 55, 70°Cに設定し、空燃比を変えて計測した。Fig. 10に点火プラグへの燃料飛散量 M_d' と200サイクル中の失火回数の関係を示す。図より、燃料飛散量がある値を過ぎた辺りから失火回数が増加する傾向が見られた。このことから、点火プラグへの燃料飛散量が所定の閾値以下になるように燃料噴射制御すれば、くすぶりによる失火を防ぐことが可能である。

次に、空燃比と噴射開始時期の影響を見るために、エンジン回転数1000rpmの無負荷条件下で、水温を40°Cに固定し計測した。燃料噴射圧力はすべて3MPaである。そ

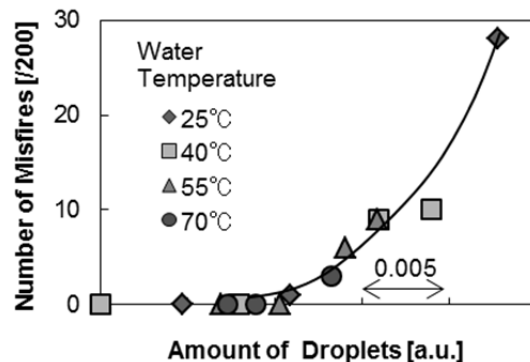


Fig. 10 Relationship between the Amount of Fuel Droplets around the Spark Plug and the Number of Misfires

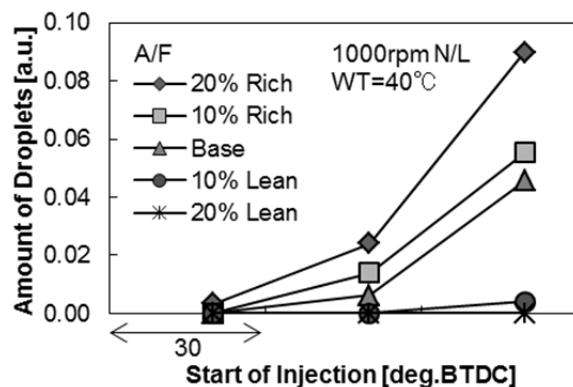


Fig. 11 Dependence of the Amount of Fuel Droplets around the Spark Plug on the Injection Timing

の結果をFig. 11に示す。図より、空燃比がBaseよりも薄い場合には噴射開始時期によらず点火プラグに飛散する燃料液滴はほとんど見られなかった。しかしながら、空燃比がBase以上の濃い条件では、噴射開始時期が上死点に近づくにつれ、燃料飛散量が増加する傾向が見られた。これは、ピストン位置が上死点に近づくに従い、ピストンと点火プラグの距離が短くなり、同時に、インジェクタとピストンの距離も短くなるため、噴霧がピストンで強く跳ね返りやすくなったことと、燃料噴射量の増加に伴い、噴射期間が延びたことによるものと考えられる。

開発した評価技術を用いて、点火プラグに飛散する燃料液滴量を所定の閾値以下になるように噴射開始時期と空燃比を調整することで、くすぶりによる失火を防げることを検証した。

4. まとめ

直噴ガソリンエンジンで点火プラグの耐くすぶり性評価方法を開発した結果、以下の結論を得た。

1. 透過光減衰を利用した点火プラグ型光学センサーを用いて、点火プラグに飛散する燃料液滴量を検出する方法を確立した。可視化エンジンで検証した所、このセンサーから得られる信号強度は、可視化から得られた燃料液滴量と良い相関を示した。
2. 点火プラグへの燃料飛散量を定量化することで、冷間時の始動不良と、暖機時の失火回数を予測可能にした。冷間時においては、燃料飛散量が減少するに従い、プリデリバリー試験でエンジンが始動不能に至るまでのサイクル数が延びることを明らかにした。一方、暖機時では、点火プラグへの燃料飛散量が所定の量を超えると失火回数が増加することを明らかにした。
3. くすぶり性評価法を用いて、燃料飛散量を所定の閾値以下になるように噴射開始時期、空燃比を制御することで、冷間時の始動不良や暖機時の失火を抑制できた。したがって、開発した評価法を今後のエンジン開発に適用することで、点火プラグくすぶり性能の開発期間を大幅に短縮できる可能性がある。

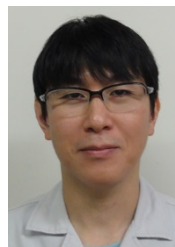
参考文献

- (1) 人見：内燃機関の将来展望，第21回内燃機関シンポジウム基調講演資料，p.7 (2010)
- (2) 山川ほか：高圧縮比ガソリンエンジンの燃焼技術の開発，自動車技術会論文集，Vol.43，No.1，pp.81-87 (2012)
- (3) E. Curtis, *et al.* : EcoBoost:Downsized Gasoline DI Turbo Engines as the Backbone of Ford's CO₂ and Fu

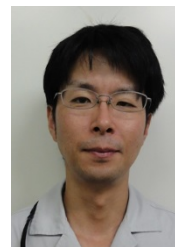
el Economy Product Strategy, FISITA2010 Proceeding s, F2010A130, pp.1-13 (2010)

- (4) 西尾：くすぶり汚損で機能消失，スパークプラグ，東京，山海堂，pp.65-78 (1999)
- (5) <http://webbook.nist.gov/chemistry/> (National Institute of standards and Technology Chemistry Web Book)
- (6) W.C. Hinds：光学的性質，エアロゾルテクノロジー，東京，井上書院，pp.303-333 (1985)
- (7) レーザ計測ハンドブック編集委員会：透過光減衰法，レーザ計測ハンドブック，東京，丸善，pp.235-238 (1993)
- (8) H. C. Van de Hulst, Formula for Practical Use, Light Scattering by Small Particles, United States, John Wiley & Sons, Inc., p.129 (1957)
- (9) 藤川ほか：高圧縮比ガソリンエンジンの掃気性改善と触媒早期暖機のための燃焼技術開発，自動車技術会論文集，Vol.43，No.2，pp.351-356 (2012)
- (10) 長津ほか：高圧縮比ガソリンエンジンにおける燃焼のコモンアーキテクチャー技術，自動車技術会学術講演会前刷集，No.30-12，pp.23-26 (2012)

■ 著 者 ■



内田 健児



藤川 竜也



榎山 謙二



小野 裕史



山川 正尚