エンジン開発における可視化適用事例の紹介*

森田 照義**

Application of optical measurement for engine development

Teruyoshi MORITA

1. 緒言

近年、地球温暖化やそれに伴う気候変動が大きな問題となっている。また、石油の枯渇問題、中国やインド等の BRICs をはじめとする国々での自動車保有台数の増加を背景として CO₂ 低減が大きく求められている。このような背景のもと、自動車に対する、燃費規制、排出ガス規制は年々厳しさを増しており、世界中の自動車メーカーが新しい技術開発を行っている。今回は、このような技術開発において、エンジン筒内可視化計測を用いた事例を紹介する。

2. エンジン技術の進化

ガソリンエンジンでの CO₂ を低減する手段として、リーン燃焼が挙げられる。Fig. 1 に本田が開発してきたリーン燃焼技術の進化を紹介する。1970 年代、最も厳しいとされた排ガス規制マスキー法に対応するため、CVCC (Compound Vortex Controlled Charge) 方式の開発から始まり、近年では直噴技術や電子制御技術の進化により、DISC (Direct Injection Stratified Charge) 燃焼方式を開発してきた。

DISC 燃焼方式は 1995 年頃から登場し始めたが、第 1 世代と呼ばれるウォールガイド式では、燃焼室内に直接噴射された燃料噴霧を、ピストン壁面を使って点火プラグに導く方式で、壁面により混合気が保持されて良好な着火性が確保される反面、壁面付着した燃料により、HC 排出量が増加するという課題があった。これに対し、第 2 世代と呼ばれるスプレーガイド式では壁面を使わずに、燃料噴霧を直接点火プラグ近傍に導く混合気形成を行う。この方式では壁面付着が少なく HC 排出量の低減が可能であり、燃焼コントロールの自由度が改善されることから Fig. 2 に示すように大きな燃費改善効果が期待される。

しかし、混合気を保持する壁面が無いため、着火性の

確保が課題であり、混合気を機械的なガイドが無い状態で適切に点火プラグに導く事が必要となり、インジェクタ噴霧に要求される特性や噴射制御がより高度になる。

前述のように、スプレーガイド式では燃料噴霧を直接点火プラグに導く必要があり、燃料噴霧の挙動そのものが着火性や燃焼に大きく影響する。実際のエンジンにおいては、圧力変化、温度変化、筒内流動など多くの外乱要因がありこれらの影響を考慮した上でインジェクタ噴霧や燃焼室形状などを設計する必要がある。今回は、スプレーガイド式 DISC 燃焼の実際の開発において、LIF

Fig. 1 Transition of gasoline lean burn technology.

Fig. 2 Improvement by sprayguide DI.

* 原稿受付 2010 年 4 月 23 日

** 株式会社 本田技術研究所四輪 R&D センター
(〒321-3393 芳賀郡芳賀町下高根沢 4630 番地,
E-mail: Teruyoshi_Morita@n.t.rd.honda.co.jp)

(Laser Induced Fluorescence) 法や LIEF (Laser Induced Exciplex Fluorescence) 法を適用した解析事例を紹介する。

3. 実験装置・方法

計測は、Fig. 3 に示すようなベースエンジンに基づいた、Fig. 4 に示す可視化エンジンを用いた。直噴インジェクタはペントルーフの中央付近、点火プラグは2つ

Fig. 3 Engine specification.

Fig. 4 Optically-accessed engine.

の排気バルブ間に配置している。直噴の燃料圧力は 10 MPa とした。

Fig. 5 に可視化エンジンにおける観測視野を示す。観察窓の取り付け部が必要なため、観測可能な範囲はエンジンのボア $\phi 86$ に対し幅で 60 mm 程度となっている。また、実験に用いた直噴インジェクタは Fig. 6 に示すようなピントルノズル構造を、単体での噴霧は Fig. 7 に示すフォームを持つ。

この噴霧の特徴は、噴射時期の筒内圧力条件により、フォーム変化が発生する事で、実際のエンジンでは様々な運転条件の下、燃料噴霧を確実に点火プラグに導く事が必要になる。参考として、Fig. 8 にインジェクタ単体での背圧違いでのフォーム変化の Mie 散乱画像を示す。背圧 1 MPa では、噴射後、噴霧が巻き上がる挙動を示している。スプレーガイド式 DISC 燃焼では多くの場合、この現象を利用し適切な空燃比、気化特性、流速となる

Fig. 5 Visible area of Optically-accessed engine.

Fig. 6 Schematic of injector nozzle.

Fig. 7 Spray form.

Fig. 8 Comparison of spray form between different back pressure.

ような位置に点火プラグが配置されている。

4. LIF による混合気分布評価

通常のエンジン開発では、インジェクタの単体評価を行った後、実機試験を行うが、スプレーガイド式 DISC 燃焼方式の様な筒内流動や温度等による影響を受けやすい場合には、インジェクタ単体評価のみでは十分な設計指針が得られない場合が発生する。高压容器での単体噴霧計測では、通常 Mie 散乱で燃料噴霧のフォーム形状、ペネトレーションなどの評価を行っているが、上記のような課題に対応するため、単体評価を高温・高压で行う場合がある。この場合、Mie 散乱のみの液滴分布では混合気全体の挙動評価はできず、ここでは実機との噴霧挙動比較を行う目的で LIF 法を適用し、気液相全体の評価を行った。

Fig. 9 に単体容器および、可視化エンジンでの LIF 画像を示す。単体容器ではレーザーを図の右方向から入射しており、可視化エンジンでは下方向から入射している。単体と実機では、噴霧形状が異なっていることが分

Fig. 9 Comparison of LIF result between constant volume chamber and optically-accessed engine.

Fig. 10 Exciplex system of Naphthalene/DMA.

かる。

高压容器では、背圧が一定であり、ほぼ対象な噴霧形状を維持しているが、可視化エンジンでは噴霧が点火プラグ方向に流されている様子が観察できる。実際のエンジンではピストンの圧縮により圧力・温度が変化するとともに、筒内流動の影響が大きい。特に良好な着火を得るためには、実機での噴霧挙動を把握した上で、適正な位置に点火プラグを配置する必要がある。

5. LIEF 法による混合気分布解析

スプレーガイド方式のような直噴による成層燃焼では、着火性や初期燃焼部分がその後の全体の燃焼を決めてしまうと言っても過言ではない。着火を大きく左右する点火プラグ近傍の空燃比や燃料の気化状態は、必要な点火エネルギーや層流燃焼速度による初期燃焼への影響の観点から十分把握されている必要がある。このような目的から、LIEF 法による蒸発特性解析を行った。

解析を行うにあたり、蛍光剤は Leach らの研究を参考にナフタレン（以下 Np）と N.N.ジメチルアニリン（以下 DMA）を選択した¹⁾。Fig. 10 にエキサイプレックス蛍光模式図を示す。

DMA とナフタレン（Np）は紫外レーザーでそれぞれ励起される。分子間距離が離れている気体中では DMA, Np はそれぞれ独立で 350 nm の蛍光波長を出しながら基底状態に戻る。分子間距離の小さい液相中では、励起された状態で両者が反応し $[DMA+Np]^+$ というエキサイプレックス錯体を形成する。 $[DMA+Np]^+$ は元のエネルギー準位に戻る際、440 nm をピーク波長とする蛍光をする。エキサイプレックス錯体にならなかった DMA と Np も多少存在し 350 nm の光を蛍光するが、液相中という高濃度場では分子間衝突のエネルギーに費やされ蛍光はほとんどない。

以上の原理から得られる Np と DMA から生じる蛍光波長分布および分光に用いたフィルタ特性を Fig. 11 に示す。液相からの蛍光と気相からの蛍光はピーク波長こそ離れているが、お互いの蛍光域がオーバーラップしている。これは気相・液相共に他方の影響を幾らか受ける

Fig. 11 Fluorescence spectra and transmission spectra of optical filter.

ことを意味するが、インジェクタの噴射時期違いや噴射率違いが燃料の蒸発拡散に与える影響を相対評価で把握するには十分な精度が得られると考える。Fig. 12 に光学システム図を示す。

Fig. 13 に LIEF 法で得られた液相・気相および比較として LIF 法により得られた画像を示す。Fig. 14 に Fig. 13 における 3 者の平均輝度を示す。LIEF 法により得られる蛍光強度は LIF で得られる蛍光強度に比べ低い。これは気液分離分光フィルタによる透過減衰と圧力依存性の影響を強く受けているからである。そのため、LIEF 法は LIF 法に比べ蛍光強度から AF（空気-燃料割合）推測精度はさらに低くなるので、液相・気相が存在する領域変化を評価するのが現状では適切な使用方法と考える。また、圧力依存を受けない蛍光剤の選定や光学系の感度を上げる手法等についても本計測法の今後の課題である。

Fig. 15 にスプレーガイド方式 DISC 燃焼の気相・液相の時間変化 LIEF 画像を、Fig. 16 に Fig. 15 における気相/液相面積比率の時間変化を示す。燃料の噴射時期は噴射終わり上死点前 45 deg. である。燃料噴射開始後 5 deg. では気相、液相ともに噴霧が観測されているが、噴

Fig. 12 Instruments of LIEF.

Fig. 13 Fluorescence images for liquid and vapor phases.

Fig. 14 Comparison of Mean fluorescence intensity of Exciplex and LIF.

Fig. 15 Comparison of gas and liquid phase 1500 rpm WOT, θ_{injend} 45 deg. BTDC, $T_i = 0.35$ ms.

Fig. 16 Evaluation of Vapor liquid ratio.

Fig. 17 Correlation between LIEF analysis and engine performance.

射後 10 deg.では液相は観測されておらず、噴霧の蒸発が急速に進行していることが分かる。燃料気相分布に対する液相分布を指標化しインジェクタのノズル仕様や噴

射率、運転条件違い等を解析する事と LIF 法による空燃比計測結果を合わせ、解析する事でエンジン諸元の決定を行っている。

Fig. 17 に本解析で得られたインジェクタ噴霧蒸発率と実機で得られた燃焼期間の相関を示す。LIEF 法で得られた気相面積に占める液相面積の割合を蒸発率と定義している。また、燃焼期間は質量燃焼割合の 10~90% の期間をクランク角で表している。図より LIEF 法で得られた気液相情報は主燃焼期間と強い相関があることがわかり、蒸発率が 90% 程度以上あれば等容度を損わない高効率燃焼が得られると伺える。

6. ま と め

LIEF 法をスプレーガイド直噴解析に導入し、気液相分布が燃焼に与える影響を調べた結果、噴霧蒸発率と主燃焼期間に強い相関が確認でき、最適噴霧仕様の指針設定が可能となった。今後の直噴開発においては有効な解析ツールの一つと考える。

今後さらに、HCCI などの高効率燃焼技術が求められ、燃焼ガス温度や EGR などの可視化計測の進化、開発への適用が望まれる。

参 考 文 献

- 1) B. Leach, et al, Characterization of in-cylinder fuel distribution from an air-assisted fuel injection system using advanced laser diagnostics, SAE 2003-04-0088, (2003).
- 2) Horie, K., Goto, H., Kohda, Y., Ogawa, K., SAE 2004-01-2941 (2004)