

特集 ポート噴射インジェクタの噴霧微粒化の開発*

Development of Atomization in Port Injection

原田 明典

Akinori HARATA

沢田 行雄

Yukio SAWADA

今竹 信夫

Nobuo IMATAKE

青木 文明

Fumiaki AOKI

Fuel atomization carried out by the fuel injector is a key factor in reducing the exhaust emissions of internal combustion engines. We have focused on a multiple-hole nozzle as a cost effective atomization method that does not require any auxiliary devices or an external energy source to provide greater atomization.

We have established a definite relationship between fuel flow inside the nozzle hole and fuel atomization. As a result, we have achieved fine atomization by developing a new configuration nozzle hole which produces a liquid film inside the nozzle hole.

Key words : Port injection, Spray, Atomization, Nozzle, Plate, Flow analysis

1. まえがき

本研究の目的は、自動車用ガソリンエンジンに用いられるガソリン吸気管噴射用のインジェクタの噴霧微粒化を改良することである。

排気規制強化、燃費向上、運転性向上への要求が更に厳しくなる市場環境の中、始動時の未燃焼HCの低減、過渡応答性向上への対応のため、燃料噴霧の更なる微粒化改良が望まれている¹⁾

これまで様々な微粒化の手法が検討され、実用化されているが、今回、従来の微粒化手法のなかでも、低コストで良好な微粒化が得られる多孔ノズル方式²⁾に着目した。Fig. 1に、2方向噴射タイプの12孔ノズルの構成を示す。12孔タイプは6孔ごとに一つの噴霧を形成し、ノズルの形状は、上流から下流まで、ストレートな円筒形状となっている。Fig. 2は、多孔ノズルプレートにおける微粒化プロセスを図示したものである²⁾。バルブシートを通過した流れは、ノズルプレート上面に衝突することにより、擾(じょう)乱が誘起される。擾乱が誘起された流れは、ノズルプレート上面に沿って、ノズルへと向い、ノズル直上で等方的に対向する流れ同士の衝突が起こる。流れはノズル入口端部から剥離すると共に、急激に曲げられ圧力が一気に解放される。そこで液流はノズル上流で得たエネルギーにより、自ら分裂する。従って、ノズル上流で発生した擾乱エネルギーを有効に使って、燃料を噴射することが、微粒化にとって重要であると考えられる。このように従来の研究では、ノズル上流の流れの影響を明らかにし、ノズル数、配置を最適化することで微粒化向上を図ってきたが、単純な円筒形状のノズルでは微粒化レベルに限界があった。

そこで本研究では、微粒化が向上するノズル内流れを明らかにし、ノズル形状を改良することで、更なる高微粒化噴霧を実現するノズルを開発したので、以下その内容について報告する。

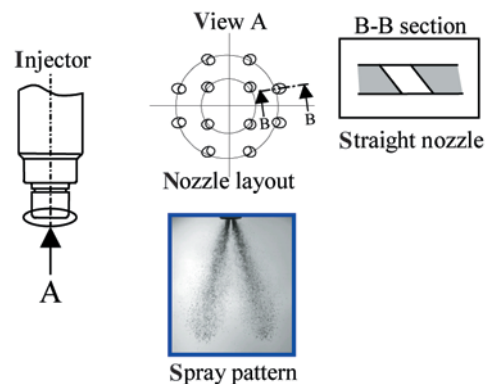


Fig. 1 Nozzle layout and spray photo

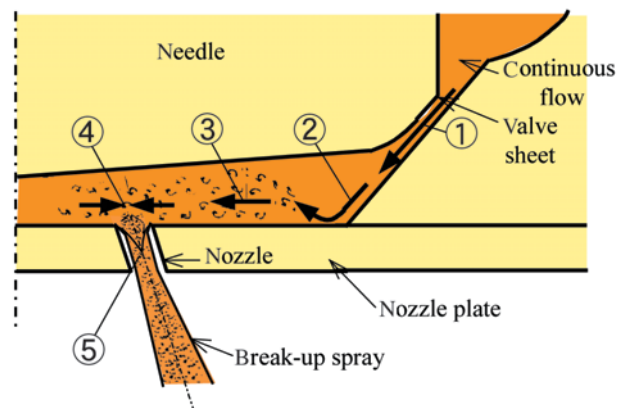


Fig. 2 Schematic representation of atomization

* (社)自動車技術会の了解を得て、2002年秋季大会学術講演会前刷集No.77-02、12より転載

2. 微粒化開発の着目点

2.1 多孔ノズルの噴霧分裂状態の評価

今回、ノズルから噴射された噴霧と微粒化の関係を明らかにするために、まず、円筒形状のストレートノズルの1孔から噴射される噴霧の分裂状態を評価した。Fig. 3に一つのノズルから噴射される噴霧の分裂状態を評価する実験装置の概要を示す。12孔の各ノズルから噴霧が噴射された状態で一つのノズルに着目し、その他のノズルからの噴霧の影響を受けることなく分裂状態を観察した。噴霧粒径は、画像処理により定量化した。

Fig. 4に観察結果及び粒径評価結果を示す。ノズル直下での噴霧は、液柱状になっている部分が多く存在し、この液柱部の分裂は下方にいくに従っても荒い粒子が残った状態であるのに対し、液柱部以外の液膜状になっている噴霧は、分裂が促進し、微小な粒子となっていることが観察された。この噴霧を特徴づける液柱状態と液膜状態自体は直上流であるノズル内の流れに支配されていると考えられる。そこで、CFD解析を用いた流れ解析を実施し、ノズル内の流れを明らかにすることとした。

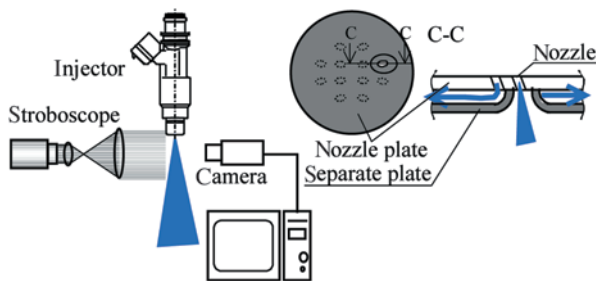


Fig. 3 Observation test set-up

2.2 ノズル内流れの微粒化への影響

Fig. 5に解析モデルの例を示す。解析には、有限体積法CFDコードStar-CD (Ver. 3.1A) を用い、高レイノルズ数型K-モデルを適用して、非定常解析した。解析条件は、主としてノズル内の流れ解析をするため(噴孔内は燃料が剥離するため、気体と液体が混在する流れとなる)、燃料と空気の気液2相流解析とした。Fig. 6に解析結果を示す。ノズル入り口部では、ほとんどが燃料で満たされているのに対し、ノズル中心部での流れは、剥離が生じて縮流している様子が分かる。更にノズル下流部の出口部では、縮流した流れがノズル内壁面を伝い液膜状になっている様子が確認でき

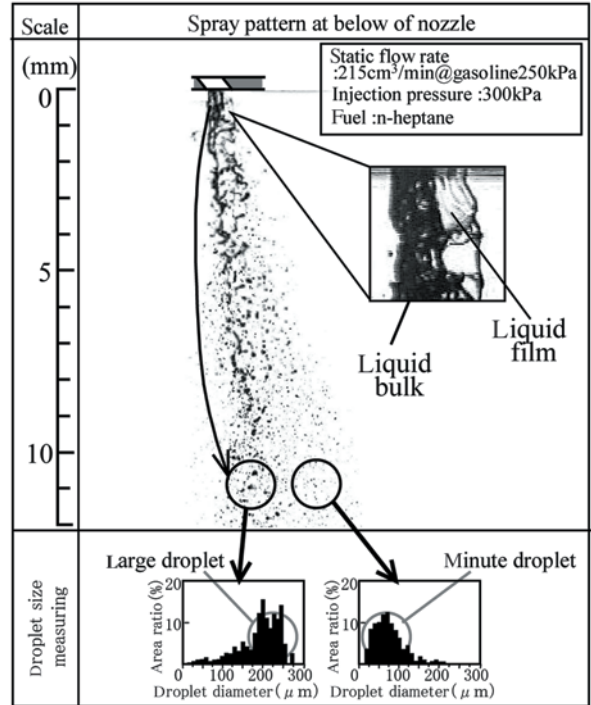


Fig. 4 Observation result of break-up spray

た。ここで、ノズル出口部での流れの方向に着目すると、出口部では、垂直な軸線に対し横方向の成分をもった流れが多く存在し、この流れが液膜状の流れを形成していることが分かった。

そこで、ノズル入口から出口にかけて横流れ成分がどのように変化するかを調べてみた。Fig. 7にノズル入り口部、中心部、出口部の流れにおいて、横方向成分と縦方向成分の比率を評価した結果を示す。この結果から、ノズル入り口部に対して出口部では横方向成分の流れが強く発生していることが分かる。

以上の結果より、液柱部に対して分裂が促進した部分の噴霧は、横方向の成分をもったノズル内壁面の流れが広げられることにより液膜化した部分であると考えられる。そこで、これらのデータを元にノズル内の流れと微粒化の関係を推定してみた。

バルブシートを通過した流れは、ノズルプレート上面に沿って流れノズルへと向う。流れはノズル入り口部から剥離すると共に急激に曲げられノズル壁面に押し付けられる。この時、ノズル内の流れの一部が、下流にいくに従い横方向成分の強い流れとなり、壁面で押し広げられ液膜状となる。液柱状で噴射される噴霧では、液柱部が分裂しにくく噴霧に荒い粒子が残るが、液膜状となった流れは、燃料の表面積が増え、ノズル上流で発生した擾乱エネルギーによる分裂が促進され

るため、噴霧は均質な微小粒子となり微粒化が向上する。従って、多孔ノズルにおける微粒化向上には、ノズル内壁面に沿う横流れを効率的に発生させ、液膜生成を促進することが重要であると考えられる。

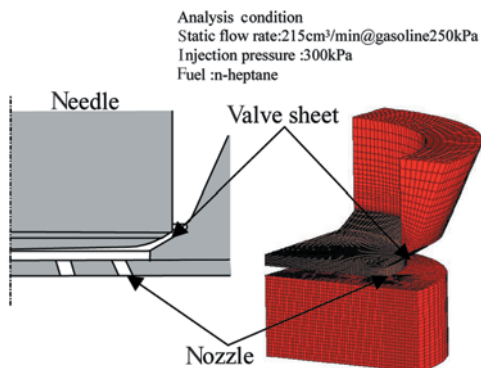


Fig. 5 Analysis model

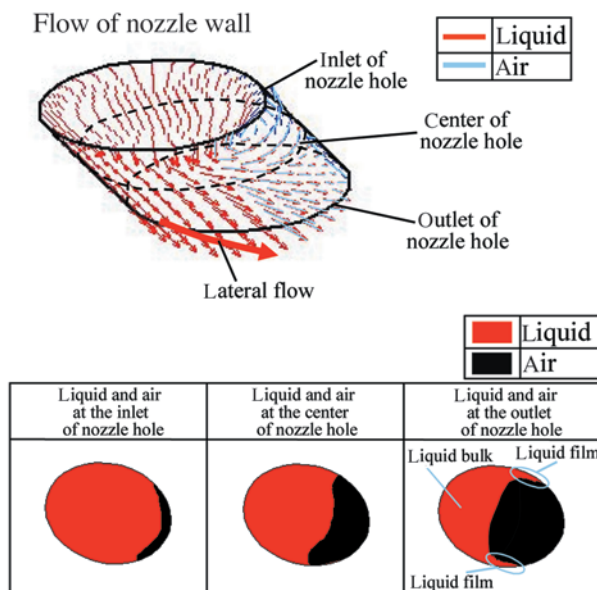


Fig. 6 Result of flow analysis inside nozzle hole

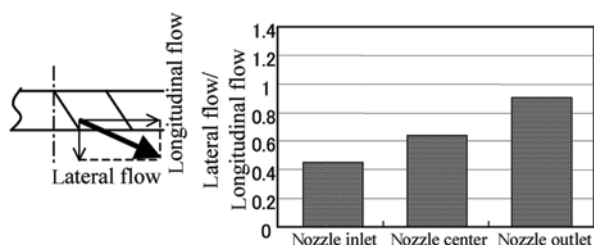


Fig. 7 Ratio of lateral flow and longitudinal flow

3. ノズル形状の改良による微粒化向上検討 - ノズルのテーパ化 -

3.1 ノズル形状の改良

この節では、前章で得られた知見をもとにノズル形状を改良した結果を示す。

ノズルに流入し、急激に曲げられ壁面に押し付けられた流れを、より効果的に液膜状にするには、下流にいくに従い壁面の面積が徐々に広がっていく形状が有効であると考えられる。そこで、液膜生成を促進するノズル形状として、末広がりテーパノズル形状のノズル内流れ及び噴霧分裂状態の評価を行った。Fig. 8に従来の円筒ストレートノズルとテーパノズルの形状を示す。評価条件としては、ノズル角度、ノズル径を同一として、円筒ストレートノズルに対して、テーパ角度のみを付与したノズル形状とし、ノズル内流れの変化及びノズル直下での噴霧分裂を評価した。なお、今回の評価では、ノズル以外（バルブ部分）の形状はすべて同じものを使用し、ノズル上流の条件を同一とした。

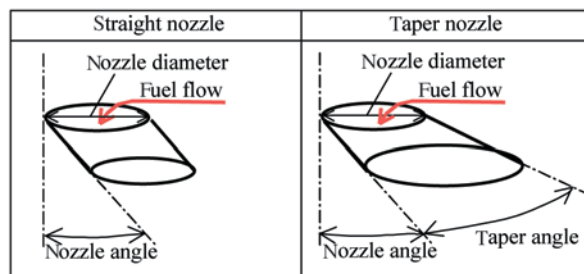


Fig. 8 Taper nozzle

Fig. 9にノズル内流れ解析結果、Fig. 10にノズル直下での噴霧分裂状態及び噴霧粒径の評価結果を示す。解析結果より、円筒ストレートノズル内の流れに対して、テーパノズル内の流れは、ノズル出口部において狙いどおり横流れ成分の強い流れが発生し、壁面に沿う流れが液膜状になっていることが確認できた。更にノズル直下の観察及び粒径評価より、テーパノズルではノズル直下に液膜状の噴霧が観察され、粒径分布も、荒い粒子が減少した、より均質な微粒化噴霧となっていることが確認できた。

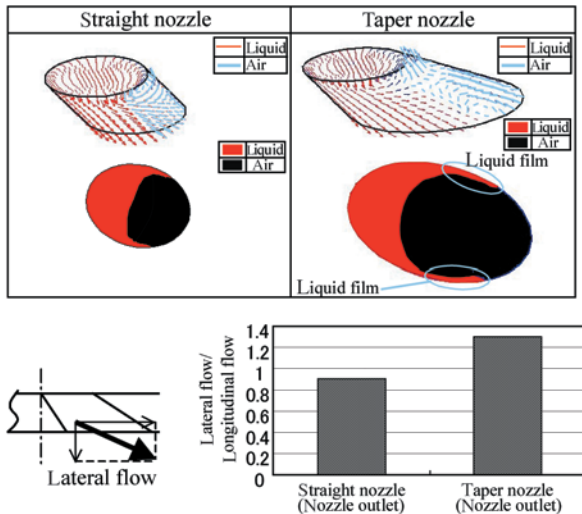


Fig. 9 Result of flow analysis inside nozzle hole

効に発生させるためには、最適テーバ角度が存在することが分かった。

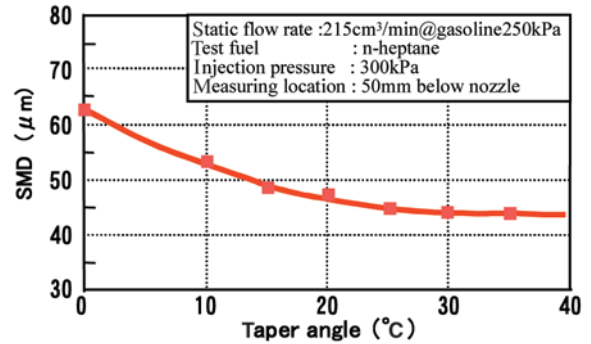


Fig. 11 Influence of taper angle on SMD

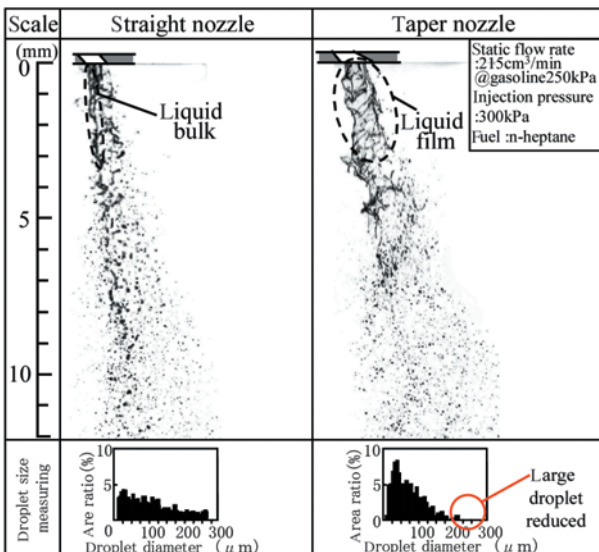


Fig. 10 Observation result of break-up spray

3.2 テーバ形状の最適化

次に、ノズル内での液膜形成を最適化するためにテーバの角度の影響を調査した。Fig. 11にテーバ角度と噴霧粒径の関係を示す。テーバ角以外のパラメータはすべて同一として、テーバ角度が噴霧粒径に与える影響を評価した。また、噴霧粒径は、一つのノズルから噴射された50mm下方での噴霧を画像処理により評価したものとする。テーバ角度が大きくなるに従い噴霧粒径は小さくなるが、テーバ角度が25°より大きくなると噴霧粒径の減少はサチュレートしてしまう。これは、テーバ角度がある値より大きくなると、壁に沿う横流れが増加しなくなり、液膜の生成が促進されなくなったためと考えられる。以上の結果より、液膜を有

3.3 開発品の評価結果

テーバ角度を最適化した開発品にて、噴霧性能の評価を実施した。開発品及び従来品の噴霧写真、粒径評価結果をFig. 12に示す。

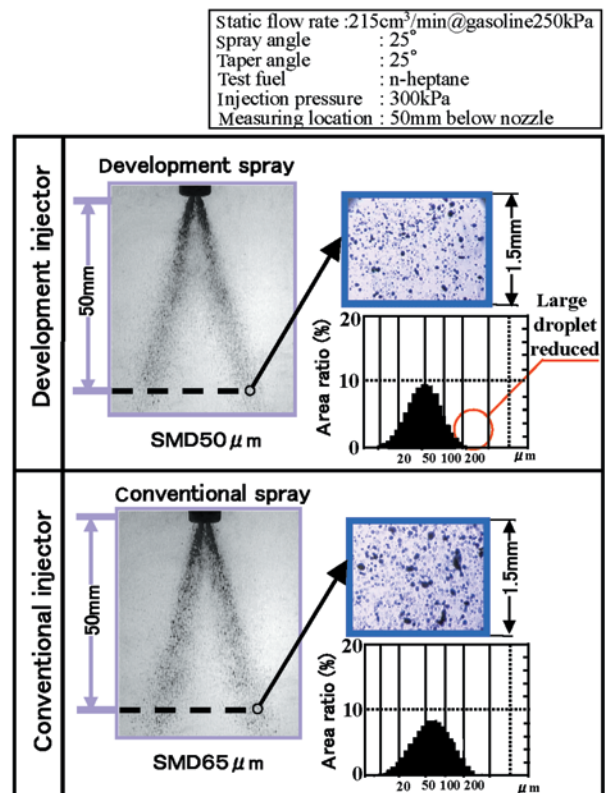


Fig. 12 Photo of spray and SMD

開発品のノズルプレートのノズル数は12孔とし、ノズルの配置及び角度は、噴霧干渉による噴霧粒径の悪化が生じない設定とした。なお、以後の噴霧粒径評価

は、レーザ回折法により、自動光軸調整機能を有するMalvern社Mastersizer-Sで測定した値とする。

ノズル形状をテーパ化することにより従来品に対して、SMDが、65 μm から50 μm に改良された微粒化ノズルを開発することができた。また、荒い粒子が減少することにより噴霧の均一性についても、従来品の噴霧に対して向上していることが確認できた。

4. テーパノズルインジェクタの微粒化特性

この節では、開発品のノズルプレートにおいて、微粒化に影響の大きいと考えられる因子について調べた結果を示す。

4.1 燃料圧力の影響

テーパノズル内で液膜が発生する過程において、流速は重要な因子の一つと考えられる。また、ノズル上流の擾乱エネルギーも流速により大きく影響されると考えられる。そこで、今回ノズル内の流速を変化させるために、燃料噴射圧力を変化させ、微粒化との関係を調べた。Fig. 13にテーパノズルを用いた開発品において、燃料噴射圧力と噴霧粒径の関係を示す。燃料噴射圧力が大きくなるに従い噴霧粒径が小さくなっていることが分かった。これは、噴射圧力が増加するに伴い、シートを通過する流速及びノズル内の流速が増加し、擾乱エネルギー及び液膜生成の促進が起こったためと考えられる。また、この場合、噴射圧力の増加に伴い噴射流量が増加しているにもかかわらず噴霧粒径が小さくなっていることを考えると、ノズル径を小さくし、噴射量一定とすれば、更に微粒化が向上することが推定される。

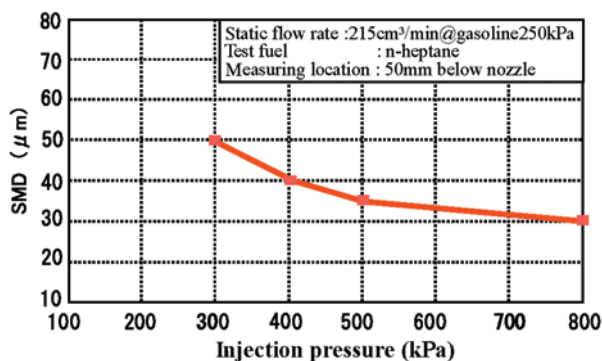


Fig. 13 Influence of injection pressure on SMD

4.2 雰囲気圧力の影響

多孔ノズルでは、上流の擾乱エネルギーを利用して、雰囲気圧が微粒化に及ぼす影響は小さいことが知られている。そこで、テーパノズルにおいても、エンジンのアイドルから全開加速までの吸気管圧条件を参考として、雰囲気圧0 ~ -65 kPaでの噴霧粒径の変化を調べた。Fig. 14にテーパノズルを用いた開発品と円筒ストレートノズルを用いた従来品において、雰囲気圧力と噴霧粒径の関係を示す。この結果よりテーパノズルの微粒化噴霧は、従来品と同様に雰囲気圧の影響は小さいことが分かった。

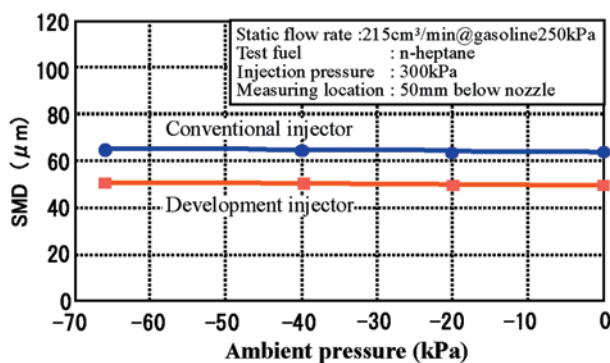


Fig. 14 Influence of ambient pressure on SMD

5. おわりに

- (1) 12孔ノズルにおいて、一つのノズルからの噴霧分裂状態を拡大観察することにより、ノズル内の流れが微粒化に影響することが分かった。
- (2) ノズル内流れにおいて、壁面に沿う流れが押し広げられることにより、液膜状噴霧が生成されることが分かった。
- (3) ノズル下流での液膜の分裂は液柱の分裂に対して、荒い粒子の頻度が減少し、均質な微小噴霧となることを明らかにした。
- (4) ノズル形状を、従来の円筒ストレート形状に対して、未広がりテーパ形状とすることにより、液膜生成が促進し、より微粒化が向上することが分かった。その結果、エンジンにおける未燃焼HC低減により有効となる、SMD50 μm の均質微粒化噴霧を開発した。

< 参考文献 >

- 1) K.Takeda, T.Yaegashi, K.Sekiguchi, K.Saito, N.Imatake
“ Mixture Preparation and HC Emissions of a 4-valve Engine with Port Injection during Cold Starting and Warm-up ” SAE Paper 950074 (1995)
- 2) Y.Tani, Y.Mori, K.Mochizuki, A.Suzuki
“ Fuel Atomization of Multiple-hole Nozzle Injection ” SAE Paper 1999-01-0564



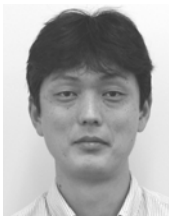
< 著 者 >



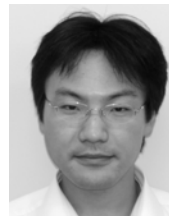
原田 明典
(はらた あきのり)
ガソリン噴射技術部
ガソリンインジェクタ開発に従事



沢田 行雄
(さわだ ゆきお)
ガソリン噴射技術部
ガソリンインジェクタ開発に従事



今竹 信夫
(いまたけ のぶお)
(株)日本自動車部品総合研究所
第4研究室
パワートレイン分野の研究に従事



青木 文明
(あおき ふみあき)
(株)日本自動車部品総合研究所
第1研究室
パワートレイン分野の研究に従事