

# 特集 高温高圧雰囲気におけるディーゼル噴霧特性の解析\* —蒸気濃度の定量解析—

## Research of the DI Diesel Spray Characteristics at High Temperature and High Pressure Ambient – Quantitative Analysis of Fuel Vapor Concentration –

山下 勇人

Hayato YAMASHITA

増田 誠

Makoto MASHIDA

鈴木 隆

Takashi SUZUKI

松岡 弘芝

Hiroshi MATSUOKA

北野 康司

Koji KITANO

Quantitative analysis method of fuel vapor concentration was developed in order to clarify mixture formation process of DI diesel spray. This method corrects fluorescence intensity in consideration of the effect of ambient pressure and temperature. Using this method, the influence of nozzle hole diameter on mixture formation process was investigated. As a result, larger nozzle hole diameter delayed vaporization of fuel and formed richer mixture at the end of injection.

**Key words** : Diesel engine, Fuel injection, Spray, Laser, Vapor phase/Liquid phase, Visualization, Laser induced exciplex fluorescence, Quantitative analysis

### 1. まえがき

乗用車用の小型ディーゼルエンジンにおいて比出力・静粛性・排気性能等の向上が要求され、これらの要求に対し、燃料噴射装置にはコモンレール噴射システムが採用されている。ディーゼルエンジンでは、その噴霧の質がエンジン性能（比出力・静粛性・排気性能等）に大きく影響するため、エンジン・噴射系開発において、エンジン筒内または同等環境場での噴霧挙動の詳細解析（蒸気濃度分布解析、混合気形成過程の解析など）が求められている。近年それだけでなく、開発期間の短縮化から、噴霧の定量的な解析によるエンジン・噴射系への開発指針、方向性の提案が望まれている。ディーゼル噴霧の混合気形成過程の解析としては、LIEF（Laser Induced Exciplex Fluorescence）法を用いた蒸気濃度の定量化があるが、蛍光強度の圧力・温度依存性や、蛍光剤の熱分解、レーザの減衰等が精度のよい計測を困難にしている。<sup>1)2)3)</sup>

そこで本研究では、小型ディーゼルエンジンにおける混合気形成過程の解明及び、これを考慮したエンジン・噴射系への開発指針・方向性提案を目指し、蛍光強度の圧力・温度依存性を考慮した蒸気濃度の準定量化手法を構築した。また、定容燃焼容器を用い、<sup>4)</sup>エンジン筒内と同等の環境場での、ディーゼル噴霧の混合気形成過程について考察を行なった。

### 2. 蒸気濃度検定<sup>2)</sup>

#### 2.1 試験装置及び手法

LIEF法を用いて蒸気濃度を定量化するには、既知濃度の均一蒸気を作成し、蒸気濃度と蛍光強度との関係、及び圧力・温度依存性などを求めていく。ここで、①蒸気の均一性、②蛍光剤の熱分解の二つが誤差要因となる。この二つは均一性をあげるため、長時間攪拌すると蛍光剤が熱分解し、熱分解を抑えると均一性が上がらないという相反するものである。この問題を解決するため、蛍光剤の熱分解が少ない温度にて均一蒸気を作成し、これを検定セル内で急速加熱する手法を用いた。Fig. 1に試験装置の概略図を示す。混合セルで、均一蒸気を作成し、電気炉（2.2kW）内の検定セルで急速加熱し、撮影を行なう。検定セルは光学的特性を同じくするため、噴霧観察時の容器と同じ光路長で設計され、レーザ、カメラ等の光学系も噴霧観察時と同じである<sup>4)</sup>。また、雰囲気ガスには酸素によるクエンチング及び燃焼を防ぐため、窒素を用いた。燃料には軽油に沸点が近く、蛍光を発しない直鎖系燃料のn-ドデカン（C<sub>12</sub>H<sub>26</sub>）を用い、蛍光剤としてTMPD（1 wt%）とナフタレン（9 wt%）を溶解させた。

\*（社）自動車技術会の了解を得て、「2005年春季大会学術講演会前刷集」No. 46-05, 235より転載

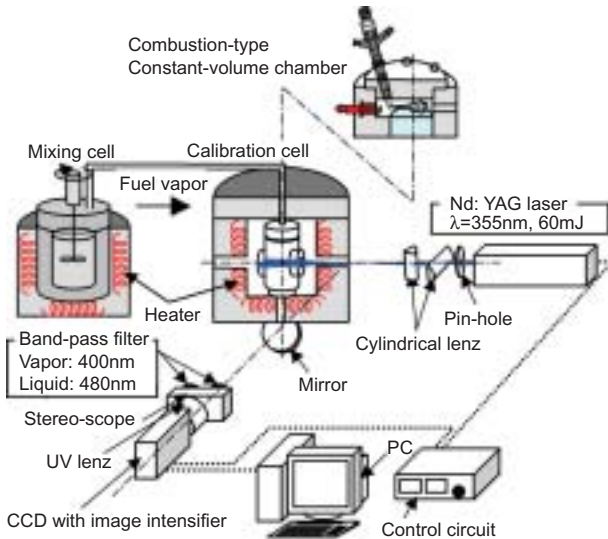


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

### 2.2 蒸気濃度検定結果

Fig. 2に5MPa, 543Kの雰囲気場で蒸気濃度（蛍光剤の濃度）と発光強度の関係を検定した結果を示す。図の縦軸はTMPDのモル濃度が $0.25\text{mol/m}^3$ の時の発光強度で無次元化したものである。ここで、Lambert-Beerの法則により、蛍光強度  $F$  と蛍光物質の濃度  $C_{\text{TMPD}}$  の関係は次の式で表わされる。

$$F = K I_0 \{1 - \exp(-\epsilon L C_{\text{TMPD}})\} \quad (1)$$

ここで、 $K$ ：光学系の装置定数、 $I_0$ ：入射レーザー強度、 $\epsilon$ ：モル吸光係数、 $L$ ：光路長である。Fig. 2の検定結果を元に、Eq. (1)の係数を求めると、

$$F/F_{\text{max}} = 15.02 \{1 - \exp(-0.278 C_{\text{TMPD}})\} \quad (2)$$

となる。ここで本試験装置では、 $L = 4.27 \times 10^3 \text{m}$ であり、Meltonら、千田らの結果を参照し、 $\epsilon = 65.0 \text{m}^3 / (\text{mol} \cdot \text{m})$ とした<sup>3,4)</sup>しかし、実際のディーゼル噴霧の環境はパイロット噴射とメイン噴射で雰囲気圧力が異なることや、蒸発潜熱により、噴霧内部の温度が低下することから、Eq. (2)に圧力・温度の依存性の補正を追加する必要がある。Fig. 3にTMPDモル濃度 $0.125 \text{mol/m}^3$ 、雰囲気温度543Kにおける雰囲気圧力の影響を調査した結果を示す。T. Kimらの結果と同様に、雰囲気圧力の影響は小さい<sup>1)</sup>よって、温度依存性のみを考慮すればよく、Eq. (2)は

$$F/F_{\text{max}} = 15.02 \cdot K_T \{1 - \exp(-0.278 C_{\text{TMPD}})\} \quad (3)$$

となる。 $K_T$ ：温度依存性補正係数とする。

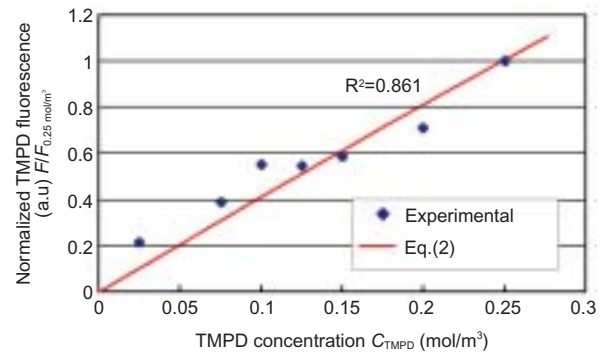


Fig. 2 Calibration result between TMPD concentration and TMPD fluorescence (Pa=5MPa, Ta=543K)

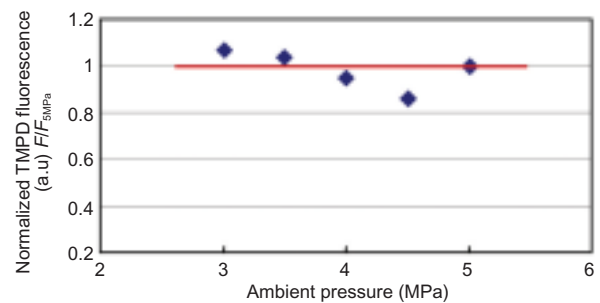


Fig. 3 TMPD fluorescence dependence on ambient pressure ( $C_{\text{TMPD}} = 0.125 \text{mol/m}^3$ ,  $T_a = 543 \text{K}$ )

### 2.3 温度依存性調査

蛍光の温度依存性については、一般に温度が上昇すると蛍光強度は減少することが分かっている（温度消光）<sup>1,2)</sup>この要因としては励起されたエネルギーが熱振動へ内部転換することによる場合と、蛍光物質自身や他の分子との衝突により励起した蛍光分子が失活する場合がある<sup>2)</sup>更に、温度依存性を調査するため、蛍光剤を高温場にて放置すると、蛍光剤が熱分解を起こすことが分かっており<sup>2)</sup>これらをそれぞれを分離して測定することは困難である。

そこで、噴霧観察時は噴射から撮影まで1msと短く熱分解の影響は小さいと考え、熱分解による消光以外が、噴霧観察時における温度消光となるとして補正を行なう。Fig. 4に各雰囲気温度における、蛍光強度の時間変化を示す。時間経過に対し、蛍光強度は減衰していき、その勾配は雰囲気温度が増加するにつれ大

きくなる。このとき、時間経過に対する蛍光強度の減衰は熱分解のみにより起こるものとし、これが雰囲気温度に強く依存していることから、アレニウスの法則を適用し、蛍光強度と蛍光物質の濃度の関係には Lambert-Beerの法則を適用すると、Fig. 4の現象は次式で表わすことができる。

$$F = k_2 \{1 - \exp(-\epsilon LC_0 \cdot e^{-E/RT})\} \quad (4)$$

$$k_1 = A \cdot \exp(-E/RT) \quad (5)$$

$F$ ：発光強度、 $\epsilon$ ：モル吸光係数、 $L$ ：光路長、 $C_0$ ：初期濃度、 $A$ ：定数、 $E$ ：活性化エネルギー、 $R$ ：ガス定数である。ここで、熱分解後の物質は蛍光しないものと仮定している。Fig. 4の結果をもとに係数を実験的に求め、熱分解のない0s時の蛍光強度の温度依存性を求めた結果をFig. 5に示す。この結果より、Eq. (3)の温度依存性係数は

$$K_T = 1 / K_T' = 1 / (F / F_{543K}) \quad (6)$$

となり、この補正係数を用いて温度依存性の補正を行なう。Fig. 6に蒸気濃度算定のためのフローチャートを示す。撮影した画像に対し、各ピクセルごとに順次計算を行なう。雰囲気温度は容器内圧力から算出した平均温度で一定とし、混合気温度は千田らの手法を参照し、混合気平均温度 $Tr$ として求めている。<sup>2)</sup> 計算は蒸気濃度と混合気平均温度が収束するまで行なう。なお本手法で求まる蒸気濃度は、いくつかの仮定を含んだ準定量的な値である。

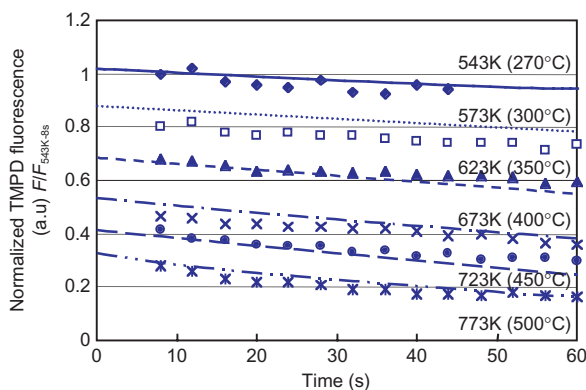


Fig. 4 Temporal change in TMPD fluorescence ( $C_{TMPD}=0.125\text{mol/m}^3$ ,  $Pa=5\text{MPa}$ )

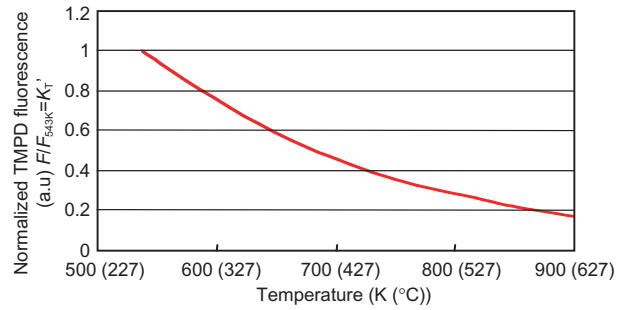


Fig. 5 TMPD fluorescence dependence on ambient temperature ( $C=0.125\text{mol/m}^3$ ,  $Pa=5\text{MPa}$ )

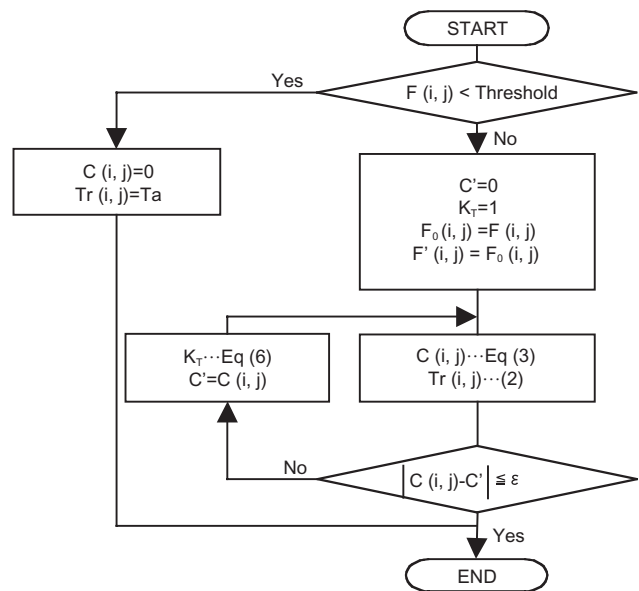


Fig. 6 Flow chart for estimation of vapor concentration

### 3. 混合気形成過程の解析

#### 3.1 評価ノズルおよび試験条件

Table 1に評価ノズルの仕様及び噴射条件を示す。排気量3L(1気筒あたり0.75L)のエンジンで用いられる一般的な噴孔形状を基準とし、これと同じサックボリューム、噴孔長を持ち、噴孔径の異なる2種類のノズルを用意した。それぞれMS(Mini Sac)形状である。噴射圧力は80MPaに設定した。それぞれの噴射率特性をFig. 7に示す。各条件とも噴射量を $30\text{mm}^3/\text{st}$ で固定したため、噴射終了時期は異なっている。雰囲気条件はTDC付近での筒内環境をねらい、5MPa、873K、 $\rho=23\text{kg/m}^3$ とした。なお、ここでの雰囲気温度は容器内圧力から算出した平均温度である。

Table 1 Nozzle hole specification and condition used

Hole diameter (mm)	$\phi$ 0.100	$\phi$ 0.130	$\phi$ 0.155
Hole length (mm)	0.8		
Hole number	8		
Nozzle cone angle (deg)	155		
Nozzle type	MS (Sac Vol. 0.9mm <sup>3</sup> )		
Injection pressure (MPa)	80		
Injection quantity (mm <sup>3</sup> /st)	30		

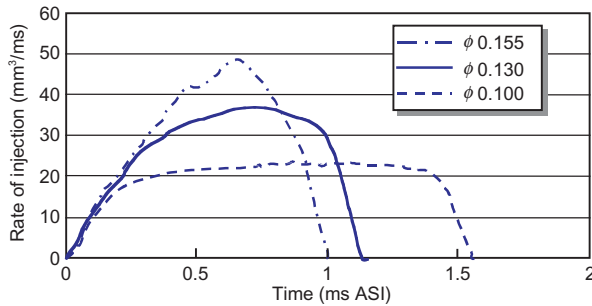


Fig. 7 Rate of injection profiles (80MPa-30mm<sup>3</sup>/st)

### 3.2 結果及び考察

Fig. 8に今回構築した手法を用い撮影画像を変換した、当量比分布画像を示す。各噴孔径で同一噴射量としているため、噴射終了時期は異なっている (Fig. 7参照)。図中の色は当量比を示し、黒塗部は液相部を示している。また、レーザーシートは8噴孔のうち、1噴孔の噴霧軸のみに水平に照射しており、その撮影領域は図中の赤枠部となる。噴孔径が小さいほど、噴射早期から液相のまわりに蒸気が出現し、当量比2以上の濃い混合気は少ない。噴射後0.7msにおいて、噴孔径 $\phi$ 0.100mmでは噴孔下20mm以上の噴霧先端部で拡散がよく、希薄な混合気が形成される。逆に噴孔径 $\phi$ 0.155mmでは噴霧先端部まで濃い混合が続いており、拡散は悪いが、噴霧先端まで大量の燃料を運ぶことができる。

Fig. 9は撮影された噴霧が軸対象と仮定し、Fig. 8の断面画像を噴霧軸を中心に回転させ、8噴孔分の蒸気量として求めた時の、各当量比における蒸気量の分布を示している。各噴孔径でその時刻までの噴射量が異なるため、蒸気量をそれまでの時刻で噴射した燃料量で無次元化してある。噴孔径 $\phi$ 0.100mmでは、噴射初期から着火前とされる噴射後0.5msまでに多くの燃料が蒸発し、かつ噴射方向に十分拡散しているため、当量比2以上の濃い混合気は少ない。逆に噴孔径 $\phi$ 0.155mmでは微粒化の悪化により蒸発が遅れ、噴射後

0.3ms以降は他のノズルと同程度、蒸発量は増えてくるが、着火後とされる噴射後0.7ms以降においても当量比2以上の濃い混合気が残っており、拡散は悪い。噴孔径 $\phi$ 0.130mmはその中間の傾向を示す。

### 4. まとめ

蒸気濃度と蛍光強度の検定、及び蛍光強度の圧力・温度依存性の調査を行ない、蒸気濃度の定量化手法を構築した結果、以下の知見が得られた。

- (1) 本研究で蛍光剤として用いたTMPDは、ディーゼル機関筒内相当の雰囲気圧力下では、雰囲気圧力の増加に対する、蛍光強度の変化は小さい。
- (2) ディーゼル機関筒内相当の雰囲気温度領域ではTMPDの蛍光強度は雰囲気温度の上昇とともに減衰する。
- (3) 噴孔径 $\phi$ 0.100mmは噴射初期より蒸発量が多いが、噴射後0.5ms以降では、濃い混合気を形成しにくく、拡散が良好である。また拡散は噴孔下20mm以上の噴霧先端部でよく、希薄な混合気が形成される。
- (4) 噴孔径 $\phi$ 0.155mmは噴孔径小に比べ、蒸発が遅れ、その後は蒸発量も増加するが、噴射後0.5ms以降でも濃い混合気が多く存在し、噴霧先端まで分布する。

### <参考文献>

- 1) T. Kim, et al., SAE Paper 2001-01-3495
- 2) 千田二郎, 他: 機論B63巻607号 (1997-3)
- 3) 神田知幸, 他: 機論B63巻607号 (1997-3)
- 4) 山下勇人, 他: 2004春季学術講演会前刷集, No.48-04 (2004), pp.7-10.

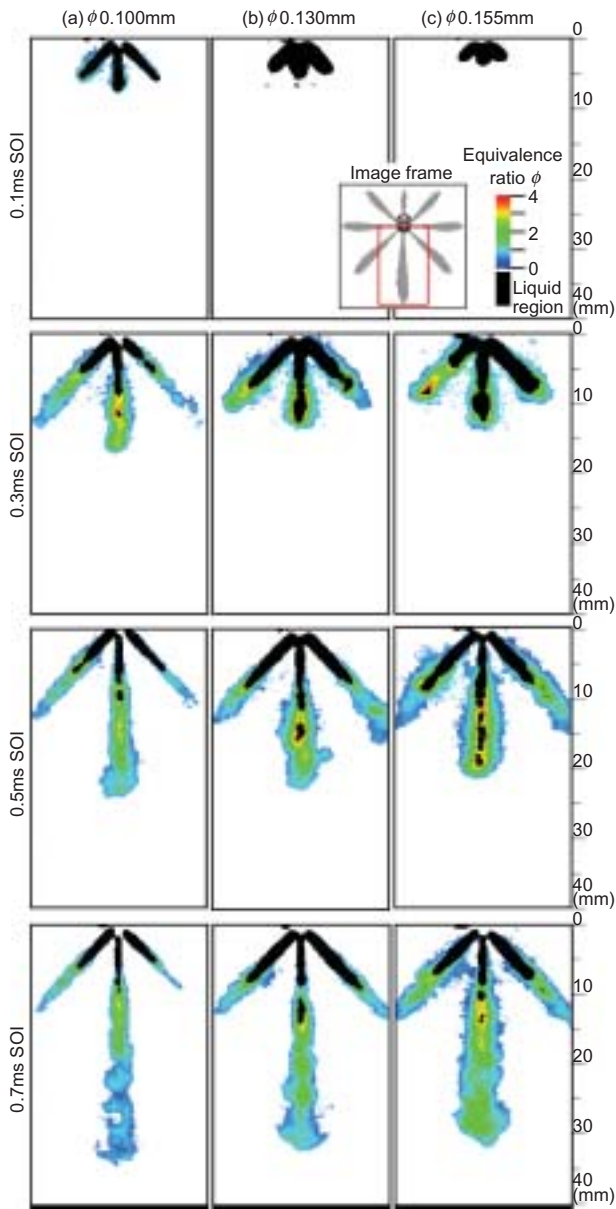


Fig. 8 Images of equivalence ratio distribution.  
(Injection 80MPa-30mm<sup>3</sup>/st, Ambient: 5MPa-600°C)

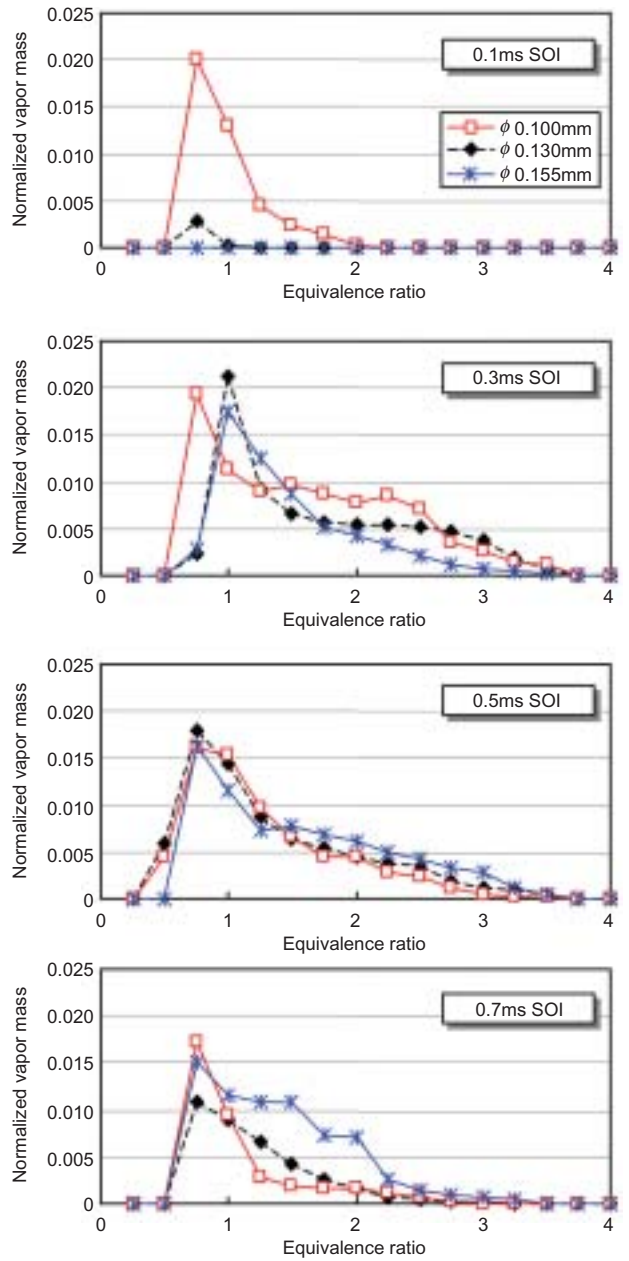


Fig. 9 Distribution of vapor mass in equivalence ratio.  
Vapor mass is normalized by injected fuel.



<著 者>



山下 勇人  
(やました はやと)  
(株)日本自動車部品総合研究所  
研究1部  
パワートレイン分野の研究に従事



鈴木 隆  
(すずき たかし)  
(株)日本自動車部品総合研究所  
研究1部  
パワートレイン分野の研究に従事



松岡 弘芝  
(まつおか ひろし)  
(株)日本自動車部品総合研究所  
研究1部  
パワートレイン分野の研究に従事



北野 康司  
(きたの こうじ)  
トヨタ自動車(株)  
パワートレイン本部 第2パワ-  
ートレイン開発部  
ディーゼルエンジン代替燃料の燃  
焼技術開発に従事



増田 誠  
(ましだ まこと)  
パワートレイン機器事業グループ  
特定開発室  
ディーゼル噴霧燃焼解析に従事