

# ガソリン噴射ノズルのデポジット生成解析

木下雅夫，斎藤昭則

## Mechanism of Deposit Formation on Gasoline Injection Nozzle

Masao Kinoshita, Akinori Saito

### 要 旨

近年，燃費向上を目的とした直噴ガソリンエンジンが実用化され始めた。直噴ガソリンエンジンの燃料噴射ノズルはエンジン筒内に臨んでいるため，高温の燃焼ガスや，すすにさらされる。このような環境では燃料噴射ノズルにデポジットが堆積しやすく，燃料噴射弁の流量低下や噴霧形状の変化が懸念される。直噴ガソリンエンジンの燃料噴射ノズルに堆積するデポジットは，燃焼生成物や燃料の変質等の複合的な要因により生成するものと推測されるが，その生成機構の詳細はまだ明らかにされていない。

ここでは，燃料噴射弁を電氣的に加熱した状態で単体駆動させて，燃焼ガスの影響のない場でデ

ポジット生成状況を評価するとともに，種々の運転条件でエンジン試験を行ってデポジットの堆積要因を調べた。

その結果，燃料にはデポジット前駆物質が含まれており，ノズル先端温度が高くて，噴口内に残留した燃料のほとんどが蒸発する条件では，このデポジット前駆物質が噴口内壁面に凝集するため，デポジットの堆積が進行するというノズルデポジットの生成機構を明らかにした。そして，ノズル温度を燃料の90%蒸留温度より低くする事により，噴口内でのデポジット生成を抑制できる事を示した。

### Abstract

Nozzles in fuel injectors for direct injection gasoline engines are exposed to high temperature combustion gases and soot. In such rigorous environment, it is feared that the decrease in fuel flow rate and the change in spray shape in the injector are caused by deposit accumulation on the nozzle. Fundamental factors of nozzle deposit formation in the nozzle hole were investigated through injector bench tests and engine dynamometer tests, and deposit accumulation processes were observed by scanning electron

microscope. The investigation results reveal the nozzle deposit formation mechanism and the way how to suppress the deposit in the nozzle hole. In order to suppress the deposit in the nozzle hole, the nozzle temperature is required to be lower than the 90% distillation temperature of the fuel. In such a state, the residual fuel in the nozzle hole is maintained to be in a liquid state, and the deposit precursors are easily washed away with a fuel injection, so that the deposit formation is restrained in the nozzle hole.

キーワード

ガソリンエンジン，筒内噴射，燃料噴射弁，ノズル，デポジット，燃料流量，温度

## 1. まえがき

燃料噴射ノズルにデポジットが堆積すると、燃料噴霧の特性や燃料流量が変化して、エンジン性能に悪影響をもたらす。そのため、従来から燃料噴射ノズルへのデポジットの堆積に関して種々の解析が行なわれており、その抑制方法も研究されている<sup>1-4)</sup>。

近年、燃費向上を目的として、直噴ガソリンエンジンが実用化され始めた<sup>5-7)</sup>。直噴ガソリンエンジンの燃料噴射ノズルはエンジン筒内に臨んでいるため、高温の燃焼ガスや、すすにさらされる。このような環境では燃料噴射ノズルにデポジットが堆積しやすく、燃料噴射弁の流量低下や噴霧形状の変化が懸念される<sup>8)</sup>。

直噴ガソリンエンジンにおけるノズルデポジットの生成要因は、大きく二つに分類できると考えられる。一つは、燃焼室内で生じたすす等の燃焼生成物がノズル表面に堆積したり噴口内に侵入してデポジット化するもの、もう一つは燃料が熱分解してガム質状に変質し、デポジット化するものである。直噴ガソリンエンジンの燃料噴射ノズルに堆積するデポジットは、これらの二つの要因が複合的に作用して生成するものと推測されるが、そのデポジット生成機構の詳細は、まだ明確にされていない。

本研究では、燃料噴射弁を電気的に加熱した状態で単体駆動させて、燃焼ガスの影響のない場でデポジット生成状況を評価する。さらに、種々の運転条件でエンジン試験を行って、デポジットの堆積過程とその堆積要因を調べる。そして、直噴ガソリンエンジンの燃料噴射ノズルに流量低下を生じさせるデポジットの生成機構を明らかにする。

## 2. 実験方法

### 2.1 燃料噴射ノズル

燃料噴射弁には高圧スワールノズルを用いた。ノズル内にはスワラーとニードルバルブが挿入されており、ニードルバルブは電磁ソレノイドで駆動している。ノズルならびにニードルバルブの材質はSUS440Cで、その硬度はHRC60である。

### 2.2 加熱単体試験

燃焼の影響がなく、熱的な要因のみが加わる系で燃料噴射ノズルのデポジット生成状況を調べるため、直噴ガソリンエンジン用の噴射弁を電気的に加熱して単体駆動させた。噴射弁を加熱するためのヒーターの設置状況をFig. 1に示す。これらのヒーターはボディとノズルを独立に温度制御できるようにした。Table 1に示す試験条件で、30時間の単体試験を行った。規定時間ごとに噴射弁の静的流量を測定して、流量の低下状況を把握した。燃料は90%蒸留温度が150°Cのレギュラー仕様のガソリンを用いた。

### 2.3 エンジン試験

ノズルデポジットの堆積要因を調べるために、単筒エンジン試験を行った。エンジンは、エンジンヘッドに場所的な制約が少ない側弁式4サイクル単筒エンジン（富士重工製、EY44-2DS / 排気量433cc）を直噴仕様に改造したものをを用いた。エンジンヘッドには80°Cの水を循環させて、エンジンヘッドの温度を一定に保った。さらに、ノズル

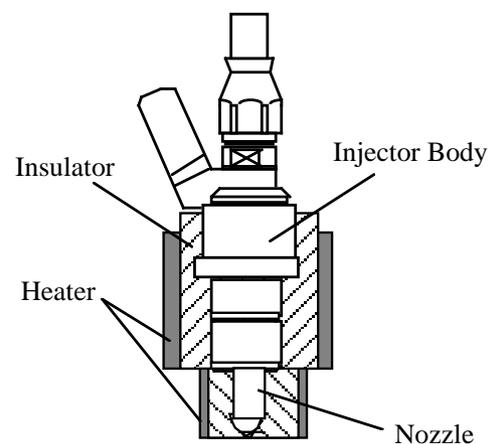


Fig. 1 Injector for bench test.

Table 1 Injector bench test conditions.

Nozzle Temp.	100 ~ 300°C
Body Temp.	80°C
Fuel Pressure	6 ~ 10MPa
Injection Duration	1.0ms
Frequency	5Hz

ル周囲には独立の冷却水路を設けて、ノズル温度を制御できるようにした。ノズル温度は、噴口から1mm離れた場所に直径0.25mmの熱電対を取り付けて測定した。そのエンジンの基本構成をFig. 2に、エンジン運転条件をTable 2示す。このエンジンを用いて、Table 3に記したA～Eの5種類の条件でそれぞれ30時間の試験を行い、すす発生の有無等の燃焼雰囲気の影響、ノズル温度の影響、燃料の蒸留性状の影響を調べた。規定時間毎に噴射弁の静的流量を測定して、流量の低下状況を把

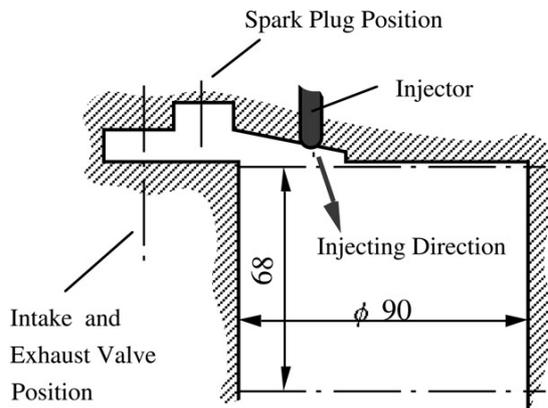


Fig. 2 Schematic diagram of engine.

Table 2 Engine operating conditions.

Fuel Pressure	6MPa
Injection Timing	BTDC 180°CA
Spark Timing	BTDC 25°CA
Engine Speed	1000rpm

Table 3 Engine dynamometer test conditions.

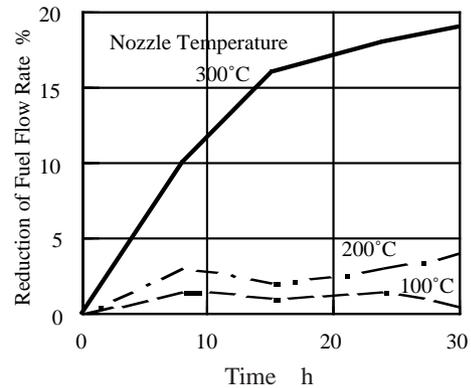
Symbol	Nozzle Temp.	Air Fuel Ratio	Smoke	Fuel 90% Distillation Temp.
A	165°C	12	0 B.S.U.	150°C
B	100°C	12	0 B.S.U.	150°C
C	154°C	10	1 B.S.U.	150°C
D	155°C	15	0 B.S.U.	150°C
E	165°C	12	0 B.S.U.	168°C

握した。さらに、デポジットの堆積過程を明らかにするため、Scanning Electron Microscope (以下SEM)を用いてノズル表面と噴口内面のデPOSIT堆積状況を観察した。明瞭な写真を得る目的でSEM観察の際にはデPOSIT表面に少量の金を蒸着したが、金蒸着の有無により燃料流量の経時変化に差がないことを確認した。燃料はレギュラー仕様で、90%蒸留温度が150°Cと168°Cの2種類のガソリンを用いた。

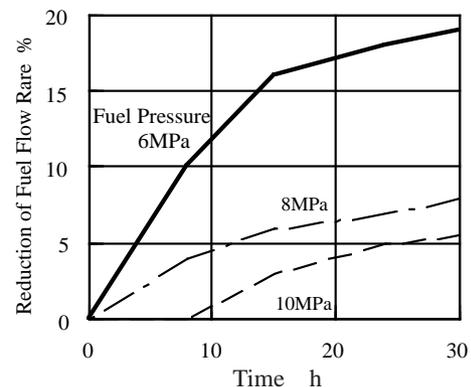
### 3. 実験結果

#### 3.1 加熱単体試験の流量低下状況

ノズル温度と燃料圧力とを変化させて、30時間の加熱単体試験を行った。その時の噴射弁の流量低下状況をFig. 3に示す。Fig. 3(a)は燃料圧力6MPaで、ノズル温度を100～300°Cに変化させた時の噴射弁の流量低下状況を示している。一方、



(a) Effects of Nozzle Temperature (Fuel Pressure 6MPa)



(b) Effects of Fuel Pressure (Nozzle Temperature 300°C)

Fig. 3 Reduction of fuel flow rate in injector through injector bench tests.

流量測定直後に行ったSEM観察により，流量低下が大きくなると噴口内により多くのデポジットが堆積している状況が確認された。このように燃焼をとまなわない系でも，ノズル温度を高くすると噴口内面にデポジットが堆積して，流量低下が生ずる事がわかる。

ノズル温度を300°Cに固定して，燃料圧力を6～10MPaに変化させた時の流量低下状況をFig. 3(b)に示す。燃料圧力の増加にともなって流量低下率は小さくなっている。デポジット抑制の観点からは，燃料圧力の高い方が望ましい事がわかる。

### 3.2 エンジン試験の流量低下状況

Table 3に示すA～Dの条件で，30時間のエンジン試験を行った時の噴射弁の流量低下状況をFig. 4に示す。いずれの試験条件においても，試験開始から数時間では流量低下は発生しなかった。試験開始から2時間程度経過した時点から流量が低下し始め，8時間程度まで流量低下が進行した。しかし，10時間以降では流量低下が飽和し，大きな変化は見られなかった。流量低下が最も大きくなる条件は，ノズル温度が一番高い試験条件Aであった。

### 3.3 デポジットの堆積過程の観察

試験条件Aにおけるノズルデポジットの堆積過程をSEMを用いて観察した。その観察結果をFig. 5およびFig. 6に示す。Fig. 5は30時間のエンジン試験を終えて，10%の流量低下が生じた状態でのノズルの写真である。ノズル表面全体が，なめら

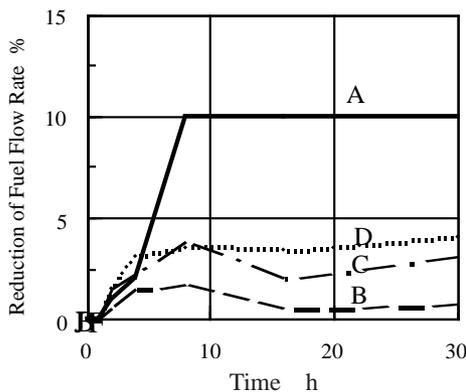


Fig. 4 Reduction of fuel flow rate in injector through engine dynamometer tests.

かで均一な層で覆われている。噴口近傍はカルデラ状に窪んでいて，その周囲にはサンゴ状のデポジット塊が存在する。表面には直径が数 $\mu\text{m}$ オーダーの粒子状の物質が集積しており，その状態は噴口内へもつながっている。

試験条件Aにおける噴口周囲部と噴口内面のデポジット堆積過程をFig. 6の(a)～(c)に示す。Fig. 6(a)は試験前の状態で，ノズル外表面および噴口内面ともに非常になめらかに仕上げられた金属面が確認できる。試験を開始すると，デポジットはまずノズル外表面に堆積し始める。しかし，ノズル噴口内面には，実験開始から2時間経過するまで，デポジットの堆積は認められなかった。Fig. 6(b)は試験開始から4時間経過して2%の流量低下が生じている時点での写真である。ノズル外表面は既にデポジットで覆われているが，噴口内面は既にデポジットで覆われているが，噴口内面はその出口部に少量のデポジットが堆積し始めているのみである。さらに時間が経過すると，噴口内面のデポジットの堆積は上流に進行した。Fig. 6(c)は試験開始から8時間経過した状態である。ノズル表面では，デポジット層の一部が脱落している様子が認められる。噴口内面では，壁面全体がデポジットに覆われている。この状態では流量低下率が10%に達していた。

他の条件でも同様な観察を行ったが，いずれの条件でも流量低下率と噴口面積の低減率はほぼ一致していた。なお，いくつかの実験例の中で，噴口内面に加工痕跡等の凹凸がある場合には，その

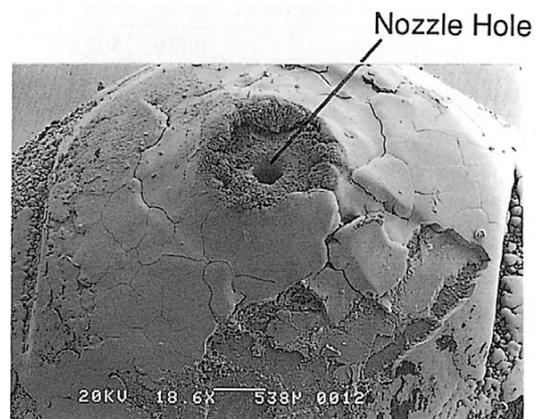
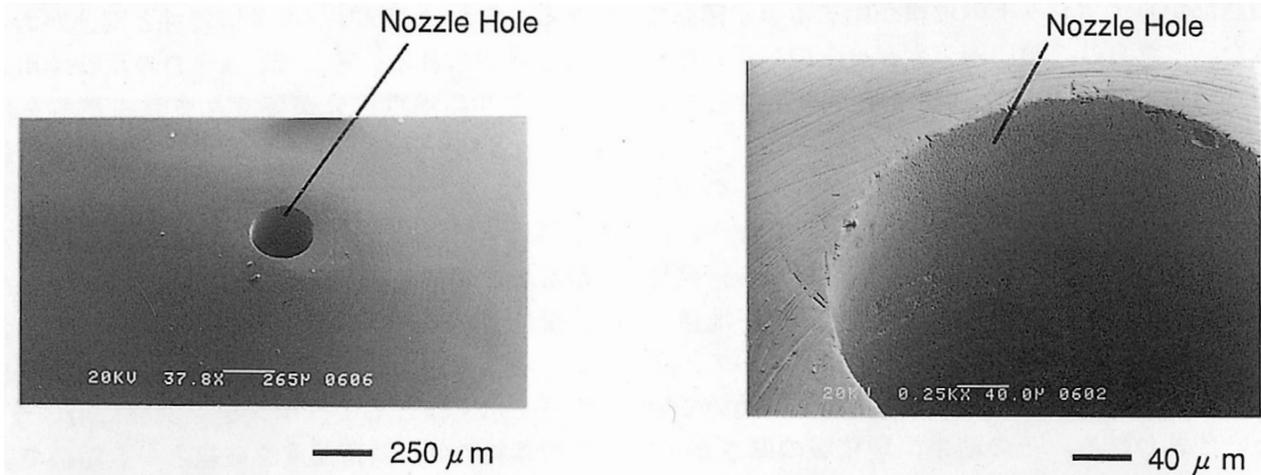
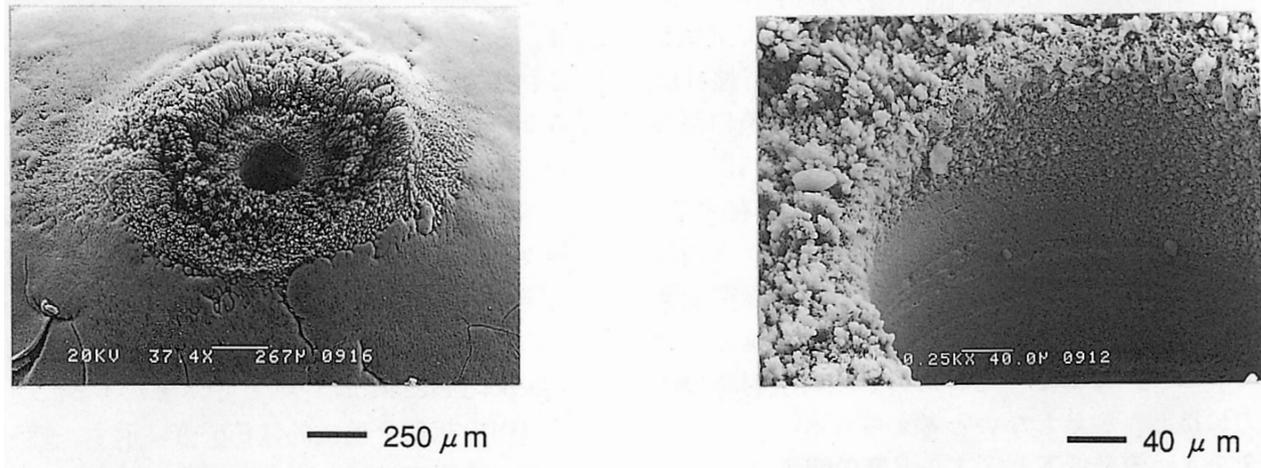


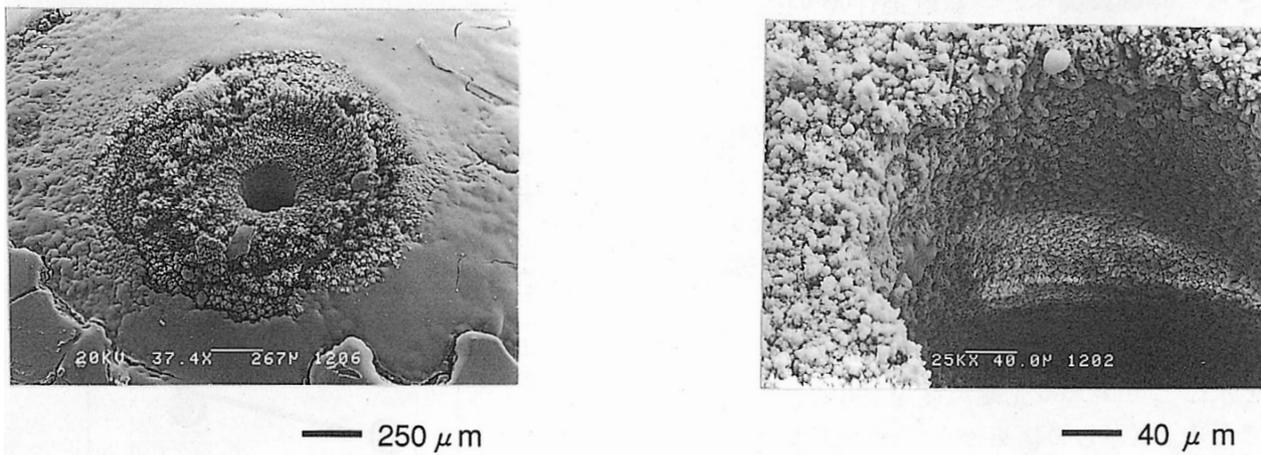
Fig. 5 Photograph of nozzle surface at 30h pass through engine dynamometer tests.



(a) Before Engine Dynamometer Test



(b) 4h Pass through Engine Dynamometer Test



(c) 8h Pass through Engine Dynamometer Test

Fig. 6 Photographs of nozzle surface and nozzle hole.

凹凸部からデポジットの堆積が始まる事が確認できた。これらは、噴口内デポジットの堆積が燃料の残留しやすい部位から始まる事を示唆している。

これらの観察結果を踏まえて、ノズルへのデポジットの堆積過程をまとめると以下ようになる。ノズル外表面には、試験開始直後から、燃焼室内で生成されたすす等の燃焼生成物が堆積する。これらの燃焼生成物は厚く堆積して、ノズル表面とデポジット間に強い凝集力は働いていないと思われる。その結果、堆積層の厚さが0.2~0.4mm程度になると、デポジット層の一部が脱落する事もある。

一方、噴口内面に堆積したデポジットは、主に噴口内に残留した燃料が熱的影響を受けてデポジット化したものであると考えられる。残留燃料は、噴口周囲部のデポジット層が厚くなって噴口部へオーバーハングした際に作られる噴口出口部のよどみ域や、噴口内面の加工痕跡などに滞在する。そして、その部位が起点となってデポジットの堆積が進行する。噴口内面のデポジットは緻密であり、噴口内面とデポジット間には強い凝集力が働いているようである。そのため、燃料噴射時の流体力に抗し、脱落しないと考えられる。

### 3.4 流量低下とノズル温度の関係

噴口内面のデポジット生成がノズル温度に強く影響される事から、ノズル温度と流量低下の関係をさらに詳細に調べた。試験条件A~Eで、30時間のエンジン試験を終えた時の流量低下とノズル温度の関係をFig. 7に示す。

CとDはノズル温度がほぼ同じであるが、Cはすすの発生するエンジン運転条件である。これらCとDには流量低下に大きな差は見られない。この結果は、すすの発生が必ずしも流量低下につながらない事を示している。

BはAと同じエンジン運転条件であるが、ノズルを水冷してノズル先端温度を100°Cに下げた場合である。A~Dの結果から、エンジン試験においてもノズル先端温度と流量低下の関係が強い事がわかる。

ところで、Fig. 7からはノズル温度が160°Cを超えると流量低下が急激に大きくなっている事がわ

かる。これはガソリンの蒸留特性と関連があるものと考えられる。そこで、A~Dの試験で用いた燃料より高沸点成分が多く含まれる燃料を用いて、Aと同一運転条件で試験を行った。その結果がEである。すなわち、高沸点成分が多く含まれる燃料を用いると、流量低下は小さくなる事がわかる。この結果は、デポジットの堆積にともなう流量低下がノズル温度と燃料の蒸発のしやすさにより決まる事を示している。Fig. 7に蒸発のしやすさを示す値として、エンジン試験に用いた2種類の燃料の90%蒸留温度を破線と一点鎖線で表した。この図から、ノズル先端温度が燃料の90%蒸留温度より低い場合には、流量低下が小さい事がわかる。

### 3.5 ノズルデポジットの生成メカニズム

これまでの実験結果を踏まえて、噴口内に堆積するデポジットの生成機構を考える。一般に燃料の熱分解初期には、脱水素反応や熱分解反応が生じる事が知られている<sup>9)</sup>。しかし、それらの反応は種々の条件によって異なるため、その反応過程を特定する事はむずかしい。ここではデポジット生成の核となる物質を総称してデポジット前駆物質 (Deposit Precursors)<sup>10)</sup>と呼ぶ事にする。

噴口内の状態を模式的にFig. 8に示す。燃料噴射の後、噴口内にはわずかな燃料が残留し、その残留燃料中にはデポジット前駆物質が分散しているものと考えられる (Fig. 8(a))。この状態で高温

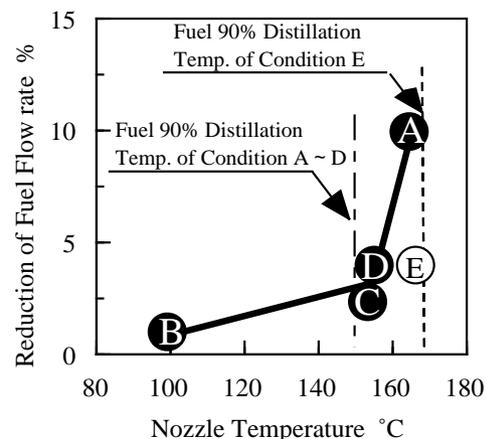


Fig. 7 Relation between nozzle temperature and reduction of fuel flow rate in injector.

のまま時間が経過すると、デポジット前駆物質の凝集が進行するとともに、残留燃料も蒸発していく。

ノズル先端温度が燃料の90%蒸留温度より低い場合には、噴口内に残留した燃料は多少蒸発するものの、高留分の燃料が残るため、液相状態を保つ。このため、デポジット前駆物質は燃料中に分散している状態を維持するものと考えられる ( Fig. 8(b) )。このような状態では、次の噴射の際にデポジット前駆物質も燃料とともに噴口内から洗い流される。

一方、ノズル先端温度が90%蒸留温度より高い場合には、噴口内に残留した燃料のほとんどが蒸発するため、デポジット前駆物質が噴口内壁面に凝集すると考えられる ( Fig. 8(c) )。このような状

態の前駆物質は、次の噴射の際に洗い流されにくく、噴口内に残留する。その結果、噴口内でデポジットの堆積が進行する。

このようなメカニズムで、噴口内にデポジットが生成、堆積していくものと考えられる。

一方、デポジットの生成を抑制するという観点で考えると、噴口内に残留する燃料を常に液相の状態に保つ事が必要となる。このために燃料の90%蒸留温度が、ノズルデポジットの生成を抑制するための指標となる事が本実験結果からわかる。

#### 4.まとめ

直噴ガソリンエンジン用噴射ノズルに流量低下をもたらすデポジットの生成について、加熱単体試験とエンジン試験を行い、以下の結論を得た。

(1)ノズル噴口内でのデポジット生成は、燃焼室内で生成されたすす等の燃焼生成物の堆積が主原因ではなく、噴口内に残留した燃料が熱的な作用を受けて変質するためである事を示した。

(2)燃料にはデポジット前駆物質が含まれており、ノズル先端温度が高く、噴口内に残留した燃料のほとんどが蒸発する条件では、このデポジット前駆物質が噴口内壁面に凝集する。このような状態の前駆物質は噴射の際に洗い流されにくく、噴口内に残留する。その結果、噴口内でデポジットの堆積が進行するというデポジット生成機構を明らかにした。

(3)噴口内に堆積するデポジットを抑制するためには、噴口内に残留する燃料を常に液相の状態に保つ事が必要となる。このような状態では、デポジット前駆物質は燃料中に分散しており、次の噴射の際にデポジット前駆物質も燃料とともに噴口内から洗い流され、デポジットは堆積しにくい。燃料の90%蒸留温度はノズルデポジットの生成を抑制するための指標となり、ノズル温度を燃料の90%蒸留温度以下にすると、噴口内面でのデポジット生成を抑制できる。

謝辞

本研究を進めるにあたり御協力いただいたトヨタ自動車(株)、(株)日本自動車部品総合研究所、(株)デンソーの方々に感謝いたします。

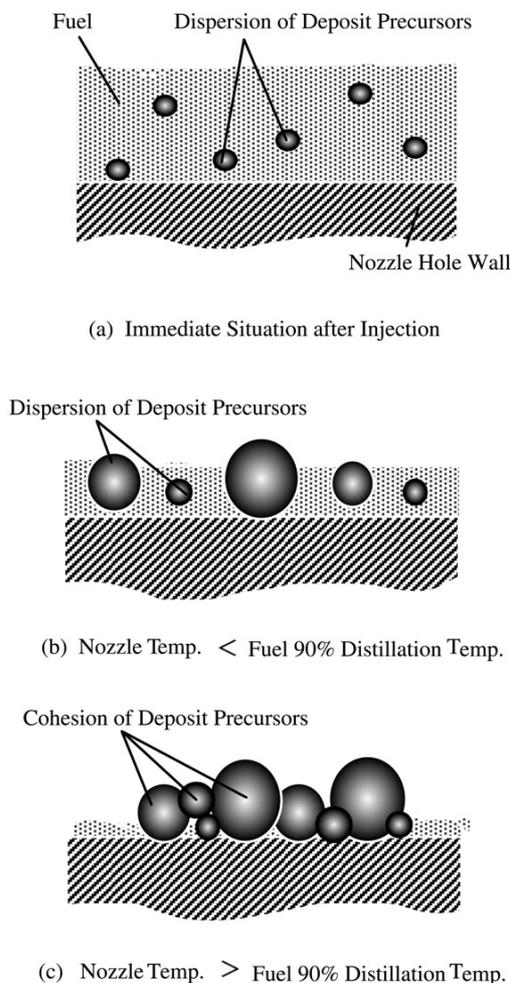


Fig. 8 Deposit formation model in nozzle hole.

## 参 考 文 献

- 1) Harrington, D. L., et al. : "An Experimental and Analytical Investigation", SAE Tech. Pap. Ser., No.892123, (1989)
- 2) Kalghatgi, G. T. : "Deposits in Gasoline Engines - A Literature Review", SAE Tech. Pap. Ser., No.902105, (1990)
- 3) Herbstman, S., et al. : "Use of Dispersants/Detergents in Diesel Injector Keep Clean and Clean Up Studies", SAE Tech. Pap. Ser., No.912330, (1991)
- 4) Winterbone, D. E., et al. : "The Effect of DI Nozzle Fouling on Fuel Spray Characteristics", SAE Tech. Pap. Ser., No.922232, (1992)
- 5) 松下宗一, ほか3名 : "筒内噴射ガソリンエンジンの燃焼特性", 自動車技術会学術講演前刷集965, (1996), 101 ~ 104
- 6) Kume, T., et al. : "Combustion Control Technologies for Direct Injection SI Engine", SAE Tech. Pap. Ser., No.960600, (1996)
- 7) Fraidl, G. K., et al. : "Gasoline Direct Injection, Actual Trends and Future Strategies for Injection and Combustion Systems", SAE Tech. Pap. Ser., No.960465, (1996)
- 8) 松下宗一 : "直噴ガソリンエンジン(D-4)の開発", JSAE SYMPOSIUM 9733440, (1997), 33 ~ 38
- 9) 長尾不二夫, ほか2名 : "ディーゼル機関における燃焼室内炭素付着の温度依存性", 日本機械学会論文集, 31-230(1965), 1533 ~ 1538
- 10) Changsoo Kim, C., et al. : "Deposit Formation on a Metal Surface in Oxidized Gasolines", SAE Tech. Pap. Ser., No.872112, (1987)

## 著 者 紹 介



木下雅夫 Masao Kinoshita

生年：1956年。

所属：燃料制御研究室。

分野：エンジン燃料供給系の研究・開発。

学会等：日本機械学会，日本トライボロジ学会，自動車技術会会員。



斎藤昭則 Akinori Saito

生年：1948年。

所属：燃料制御研究室。

分野：エンジンの燃料噴射系，直噴ガソリンエンジンなどの研究・開発。

学会等：日本機械学会，自動車技術会，日本液体微粒化学会会員。

1988年 Tanasawa Award。

1994年 自動車技術会論文賞受賞。

1996年 SAE Award for Research on Automotive Lubricants。

1997年 自動車技術会技術開発賞受賞。

工学博士。