希釈トンネル法によるディーゼル微粒子の研究*

池上 詢**, 三輪 恵**, 仲山 善裕***
Makoto IKEGAMI, Kei MIWA, Yoshihiro NAKAYAMA

Key Words: Internal Combustion Engine, Combustion, Diesel Engine, Diesel Particulates, Black Smoke, Smoldering, Dilution Tunnel Method

1. ま え が き

ディーゼル機関の排気微粒子の性状ならびに低減については現在各方面で活発な研究が進められているが、その測定はろ紙の黒化度の光電的測定や排気中の光の透過率測定などの定性的評価がほとんどで、量的評価はあまり行われていなかった。このようなことから希釈捕集による定量測定の必要性が高まり、希釈トンネルを用いる測定法が開発されている。この方法は高濃度の排気エアロゾルを清浄空気で薄め、大気に放出した状態を模擬し、水分の影響を除いて固相ならびに液相分を捕集しようとするものである。測定には排気全量を試料とする方法があるが⁽¹⁾⁽²⁾、装置が大がかりなため、排気の一部だけを試料に使うミニ希釈トンネル方式が提案されている⁽³⁾⁽⁴⁾。この方法は排気およびトンネル内の二酸化炭素濃度を比較して試料の量を定めるので、全量を試料とする方式に比べて精度が劣る心配は少ない⁽⁴⁾。また、こうした希釈捕集法について微粒子濃度と従来の測定法でのフィルタ黒化度との関係が検討され⁽⁵⁾、微粒子に含まれる可溶有機成分(SOF)の抽出・定量が行われた⁽⁶⁾。しかし、この希釈捕集法はまだ日が浅いために、実際のディーゼル微粒子の生成傾向についての系統的な調査報告はみあたらない。

そこで本研究ではミニトンネル方式により、単シリンダディーゼル機関の微粒子量の測定を行って、その発生傾向を系統的に調べるとともに、それに及ぼす各種因子の影響について考察した。

2. 微粒子の測定方法

2・1 希釈トンネル本体 本研究に使用したミニトンネルの概要を図1に示す。トンネルは希釈空気の導入部、排気を希釈空気と混合するスロート部、混合気の冷却部、ならびに微粒子を捕集するフィルタ部から成る。スロート部では高速の気流を作って負圧を発生し、それにより排気の一部を吸込むとともに、強い乱流をつくって希釈空気との混合を図る。混合気の冷却部はステンレスで作りその内面は鏡面仕上げを施して、微粒子が管壁に付着するのを防止するとともに、十分な希釈空気を与えて混合後のガスがよく冷却されるように努めた。ガスの一部をスロート部より十分下流に設けた捕集管によって採取し、管路内のフィルタに微粒子を捕集した。その際ガスはダイヤフラムポンプで吸引し、その流量はガスメータによって測定した。同時にフィルタ前後の差圧をはかって目づまり状況を監視した。希釈空気流量と排気流量との比、すなわち希釈率 γ は、排気管内の CO_2 濃度と希釈後の CO_2 濃度との比により定め、その測定には非分散赤外

本体内径 70 mm, 全長 1 700 mm, 混合部長さ 630 mm,
スロート径 14 mm, 排気サンプル管外径 10 mm

図1 ミニトンネルの概略

* 昭和57年7月22日 第3回内燃機関合同シンポジウムにおいて講演、原稿受付、昭和57年9月27日。

** 正員、京都大学工学部 (〒606 京都市左京区吉田本町)。

*** 学生員、京都大学大学院。

形 CO₂ 計 (柳本, AIR-203) を用いた。

2.2 捕集フィルタの選択 捕集フィルタの材質ならびに孔径は微粒子の捕集に影響し、とくに湿度変動に対して重量変化の小さい耐吸湿性に優れた材質と、微粒子の捕集効率の高い孔径を選ぶ必要がある。そこで一般にフィルタ材質としてよく使われるテフロンとセルロースについて、吸湿性を調べたところ温度 30°C において相対湿度が 40 % から 80 % に変動するとき、水分吸収によるフィルタの重量変化は、テフロンが 0.045 %, セルロースが 3.4 % で、テフロンが優れている⁽⁷⁾。

つぎにテフロン単体およびテフロン被膜ガラス製フィルタの 2 種類について、微粒子の捕集効率を検討した。捕集効率は 2 枚のフィルタを直列にとりつけて測り、上流部フィルタの微粒子重量と捕集された全微粒子重量との比と定義した。表 1 にその結果を示す。孔径 3 μm のテフロンフィルタでは、捕集効率が 85 % で低い値を示し、孔径 0.5 μm のテフロンフィルタとガラスフィルタとは、それぞれ 94, 92 % の高捕集効率を示した。これ以下の孔径では、さらに高い捕集効率が予想されるが、目づまりが早くおこる可能性があるため、ここでは孔径 0.5 μm のテフロンフィルタを選んだ。

2.3 てんびんによるひょう量 希釈後の微粒子量は微量であるため、湿度および温度の影響を受けやすい。そこで捕集前後のフィルタを、恒温 (20 $\pm$ 2 °C)、恒温 (50 $\pm$ 5 %) のひょう量室で 10 h 以上放置した後、微量てんびん (Sartorius 2474, 読取り限度 0.01 mg) で測定し、その重量差を微粒子の正味捕集重量とした。なお、この操作で生ずる総合誤差は最大 $\pm$ 0.025 mg であった。

2.4 測定条件の設定 微粒子捕集に際してはサンプルガスの温度、希釈率、ならびに捕集時間の設定が重要となるので、これらについて検討した。

まず捕集管先端でのサンプルガスの温度については、揮発性微粒子の気化を防ぐため、EPA ではこれを 52°C 以下と定めている⁽¹⁾。本研究では、フィルタ部に取付けた熱電対温度計を使ってつねに監視し、機関が高速高負荷時においてもフィルタ部でのガス温度が

52°C 以下であることを確認した。

つぎに希釈率については、後述の単シリンダ間接噴射式機関の全速時 (回転速度 2 400 rpm) において、正味平均有効圧 BMEP が各々 0.35 MPa {3.57 kgf/cm²} と 0.90 MPa {9.18 kgf/cm²} のもとで、捕集時間を 9 min に固定し希釈率 γ を変えて、フィルタ前後の圧力差 ΔP 、微粒子の重量濃度、ならびに正味捕集重量を比較した。図 2 にその結果を示す。希釈率を小さくするにしたがって、微粒子の重量濃度は非直線的に増加する。これはトンネル内の微粒子濃度が増し、その結果各微粒子間のファンデルワールス力が強まって粗大化した微粒子が形成され⁽⁸⁾、フィルタの目づまりをおこすことによるもので、この傾向は希釈率が小さくなると ΔP が大きくなることから明らかである。希釈率 γ が大きくなると、微粒子濃度ならびに ΔP は一定値となるが、 $\gamma=20$ において、微粒子濃度が若干低いのは、正味捕集重量が小さいためにひょう量誤差が現れたことによる。この条件を除くと γ がおよそ 8 以上では微粒子濃度が一定しているといえる。そこでひょう量誤差も考慮して γ を 8 から 12 に設定した。

つぎに前述と同じ条件のもとで、捕集時間について検討した。希釈率を一定 ($\gamma=8$) に固定し、捕集時間を変えたときのフィルタ前後の圧力差 ΔP 、微粒子の重量濃度、ならびに正味捕集重量を調べた結果を図 3 に示す。正味平均有効圧が 0.90 MPa {9.18 kgf/cm²} の場合の ΔP は、捕集時間が増すとともにほぼ直線的に増加するが、0.35 MPa {3.57 kgf/cm²} では、24 min をこえると ΔP は急激に増加する。低負荷では未燃炭化水素を主体とした液状の揮発性微粒子が多く、これ

図 2 微粒子測定に及ぼす希釈率 γ の影響

表 1 捕集効率の比較 (直接噴射式, 回転速度 2 400 rpm, BMEP 0.75 MPa)

ろ紙材料	孔径 μm	微粒子濃度 mg/m^3	捕集効率 %
テフロン	0.5	32.8	94.4
テフロン	3.0	31.6	85.4
ガラス(テフロン膜)		33.2	92.4

がフィルタをおおって目づまりをおこすため ΔP が急増したと考えられる。以上の結果よりひょう量誤差も考慮すると、捕集時間は 9 min が適当とみられ、本研究はすべてこの時間に設定した。なお、機関状態の変動や、ひょう量系を含めた微粒子濃度の全測定精度を直接噴射式機関について、機関回転速度 2400 rpm 当量比 0.45 のもとで調べた結果、 $14 \pm 1.5 \text{ mg/m}^3$ であった。

3. 実験装置および方法

供試機関は、水冷単シリンダ四サイクルディーゼル機関（ヤンマーディーゼル NS 180 C, シリンダ径 102 mm, 行程 106 mm, 行程容積 0.866 L）で、シリンダヘッドおよびピストンを交換することによって、直接噴射式あるいは間接噴射式として運転した。表 2 にその燃焼系諸元を示す。直接噴射式は強スワール形深皿燃焼室で、定常流リグより求めたスワール比は 2.1（回転速度 2400 rpm）である。また間接噴射式は

図 3 微粒子測定に及ぼす捕集時間の影響

表 2 噴射-燃焼系の諸元

燃 焼 方 式	直接噴射式 (深皿形)	間 接 噴 射 式 (渦流予燃焼室形)
圧 縮 比	17.0	20.6
動的噴射時期	12° BTDC (2400 rpm)	4° BTDC (2400 rpm)
噴 射 ノ ズ ル	DLA-155 S 314	DN 4 S 1
噴射開始圧力 MPa	20.0	12.0
燃焼室容積比 %	78.7	45.8
そ の 他	口径比 50.0%	連絡孔面積比 0.70% 平ピストン

1 MPa = 10.2 kgf/cm²

渦流予燃焼室で、燃料ポンプには両者ともにプランジヤ径 8 mm のボッシュ形ポンプ (PFR1A 80 形) を使用した。燃料にはディーゼル軽油 (比重 0.829) を用いた。基準とする噴射時期は、標記回転速度 2400 rpm にて最低燃料消費率が得られる条件を選び、特記しないかぎり、この回転速度で設定した噴射時期とした。冷却水温度は 80°C を基準とした。また、吸込空気量は層流流量計で測定し、これにもとづいて燃料空気当量比を求めた。排気は排気弁後方約 1000 mm の排気管から採取し、ミニトンネルのほか各成分の分析計に導いた。排気煙濃度はボッシュ式スモークメータで測定し、未燃炭化水素 HC はシリンダならびにサンプルガスの流路を 190°C に保温し FID (柳本高速ガスクロマトグラフ HSG-1 形) により 190°C の定温分析をおこなって求め、CH₄ 換算値で示した。一酸化窒素 NO の測定には非分散赤外分析器 (堀場製作所 MEXA-420) を用いた。以下ではこれらの濃度は乾き状態基準で表してある。

4. 実験結果および考察

4.1 燃焼方式の比較 まずはじめに、直接噴射式機関 (DI) および間接噴射式機関 (IDI) において、基準運転条件にて回転速度 2400 rpm のもとで、正味燃料消費率 (BSFC)、排気煙濃度、正味微粒子排出率 (BSPAPT)、ならびに正味 NO₂ 排出率 (BSNO₂) を正味平均有効圧 (BMEP) を変えて調べた。その結果を図 4 に示す。正味燃料消費率は、直接噴射式が間接

図 4 燃焼方式による燃料消費率と排出率の比較

噴射式に比べどの負荷でも 5～10 % 低い。排気煙濃度は直接噴射式のほうが低い平均有効圧から増大している。BSPART は直接噴射式、間接噴射式ともに中負荷域で極小値を示し、高負荷域と低負荷域とで増大する。高負荷域での増加は、排気煙濃度との比較より、黒煙の影響であり、直接噴射式のほうが BSPART は高い。これに対して低負荷域では、間接噴射式のほうが高い BSPART を示している。この領域では、青煙、白煙が多いことが認められ、とくに間接噴射式では、負荷が減るにしたがって顕著に増加している。

4・2 回転速度の影響 図 5 と 6 はそれぞれ直接噴射式および間接噴射式において回転速度 N と燃料空気当量比 ϕ について、微粒子濃度ならびに NO 濃度を図示したものである。図中の破線はボッシュ式による排気煙濃度を 4 とした発煙限界、ならびにアイドリング時の当量比を示す。これによると全体として次のことがわかる。

(1) 一定の回転速度において当量比を変えると、微粒子濃度が極小になる点がある。それより高い当量比では黒煙、低い当量比では青煙、白煙が主体になる。後者は、壁面ならびに空気流動による冷却⁽⁹⁾で部分的に失火するのが一つの原因とみられ、捕集される微粒子は黄色を呈している。

(2) 高い当量比における微粒子濃度は直接噴射式、間接噴射式ともに、回転速度 1800 rpm でもっと

も低い値を示し、それより高速側でも低速側でもその濃度は増加する。高速側では燃焼時間の不足のため不完全燃焼となり、低速側では噴射や気流のマッチングが不適当であるため高濃度となったと思われる。直接噴射式の場合、とくに低速の高い当量比で微粒子が高い濃度を示す。

(3) 低い当量比における微粒子濃度は、直接噴射式の場合には回転速度にあまり依存しないが、間接噴射式では高速になるほど増加する傾向がある。

(4) NO は中間の当量比で極大となる。直接噴射式では回転速度が増すほど濃度は低下し、間接噴射式では低速側および高速側で二つの高濃度領域が存在する。また同じ回転速度、当量比では直接噴射式のほうが高い。

以上のようにこの実験機関では、直接噴射式の低速側の高い当量比で、間接噴射式では高速側の低い当量比で、微粒子が高濃度を示すことが注目される。そこで噴射特性について噴射弁揚程波形および Bosch の方法による噴射率波形の観察で調査したところ、さらにつぎのことがわかった。

(5) 直接噴射式の場合、低速側の高い当量比では多段噴射をおこなっているが、クランク角でみるかぎり高速側に比べて噴射期間は長くない。いいかえればこの領域では、噴射圧力の低いことが問題で、そのため燃料の微粒化が損われ、さらに気流も弱まり壁面との

図 5 直接噴射式の微粒子および NO 濃度

図 6 間接噴射式の微粒子および NO 濃度

干渉が強くなって不完全燃焼をおこしたものと思われる。発煙限界の排気煙濃度が4のところでも、低速側では微粒子濃度は150~200 mg/m³を示しており、高速側の傾向とは大きく異なる。したがってその領域では黒煙までに至らない可溶有機分(SOF)を含む高沸点炭化水素が多く排出されていると考えられ、高速になるとこのような成分が黒煙に転じて、低微粒子濃度が高い当量比まで続くようになる。

(6) 間接噴射式における高速側の低い当量比での高微粒子濃度に関連して、当量比ならびに回転速度の全域にわたって噴射特性を調査した結果によると、当量比0.25一定の条件では、噴射は回転速度600 rpmから800 rpmで二段モードとなり⁽¹⁰⁾、高速になるほど前の山が肥大するが、回転速度1800 rpm以上の回転速度ではほぼ一段噴射であった。高速側の低い当量比では、噴射特性にとくに異常はなく、高速低当量比で微粒子濃度が高いのは、間接噴射式に固有な現象と考えることができる。これは直接噴射式に比べ、噴射時期が遅いため、可燃混合気の一部が酸化するまでに低温度になってバルク冷却⁽¹¹⁾をおこしたためではないかとみられる。

4.3 噴射時期の影響 直接噴射式において回転速度2400 rpmおよび600 rpmにて3種類の噴射時期 θ_i で測定した微粒子濃度、排気煙濃度、ならびにNO濃度をそれぞれ図7、8に示す。回転速度2400 rpmで基準の12° BTDCから18° BTDCに噴射時期を進めると、とくに高い当量比にて微粒子濃度が低くなる。低当量比側では基準条件とあまり変化がない。一方噴射時期を6° BTDCに遅らせると微粒子濃度は、

高当量比および低当量比でともに著しく増加する。このことから直接噴射式で噴射時期を遅くすると、高負荷域における黒煙のみならず低負荷域の青煙、白煙が増加するといえる。なお、NOは微粒子と相反する傾向を示し、噴射時期を進めるにつれて増加する。つぎに図8をみると、回転速度600 rpmの低速では回転速度2400 rpmとは逆に、噴射時期を進めると微粒子濃度が高くなっている。このように高速時において低微粒子濃度を実現するために噴射時期を早く設定すると、低速時の微粒子濃度が増加し、逆に低速時の微粒子を減ずるように遅く噴射すると、高速時に高い濃度を示す。なお、図8によれば低速時の高い当量比では、

図8 直接噴射式低速時における噴射時期の影響

図7 直接噴射式における噴射時期の影響

図9 直接噴射式における未燃炭化水素濃度

微粒子濃度と排気煙濃度とのあいだに相関はみられず、未燃炭化水素分の影響が大きい。

図9は上記の二つの回転速度について、未燃炭化水素の排出傾向を調べた結果である。回転速度2400 rpmでは、高い当量比で噴射時期によるHCの差は認められないが、低い当量比では回転速度2400 rpmに比べHCが多いことから低速側では未燃燃料が微粒子の主成分を占めることがわかる。微粒子濃度と排気煙濃度との相関がみられないのはそのためである。低速側で噴射時期を遅くするとHCが減少するのは、圧縮終わりに近づくため噴霧が高い空気温度を受けて着火遅れが短くなることと、空気密度も大きくなるため壁面への燃料付着量が少なくなることによると思われる。

つぎに間接噴射式の回転速度2400 rpmにおける微粒子濃度に及ぼす噴射時期の影響を図10に示す。当量比が0.2よりも小さい範囲では、基準の噴射時期の4° BTDCから-2° BTDCに遅らせると、微粒子濃度は直接噴射式と同様に著しく増加する。また噴射時期を10° BTDCに進めても、微粒子濃度はほとんど変化しない。しかし当量比が0.2以上の領域では、噴射時期を遅らせるにしたがって微粒子濃度は減少し、直接噴射式とは逆の傾向を示す。なお燃料消費率はここに示していないが、この噴射時期では基準条件よりかなり高い。また、噴射時期を10° BTDCに進めると、低い当量比の領域を除いて、微粒子濃度は全体に高く、とくに当量比0.4付近でいちど極大点が見れる。噴射時期を進めるにつれて、高い当量比で微粒子濃度が増加するのは、既報⁽¹²⁾で示したように燃料の主燃焼室への流出が流入気流によって阻止されるためである。ま

図10 間接噴射式における噴射時期の影響

た噴射時期が早いと中間の当量比で微粒子濃度が極大を示すのは、それ以上の当量比で燃焼の様式が変わって副室上部で着火が起こるようになるためとみられる。これについては副室上部にわざとガスポケットを設けると、ある負荷以上で着火が促進され、副室から主燃焼室へのガス噴出が強められて性能に変化がもたらされる事実がある⁽¹³⁾。

4.4 冷却水温度の影響 ふたたび直接噴射について冷却水温度 T_w を変え、微粒子濃度、排気煙濃度、ならびにHC濃度を調べた。図11は回転速度1200 rpm、噴射時期12° BTDCで得られた結果を示す。これによると、排気煙濃度に対しては冷却水温度の影響はほとんどないが、微粒子濃度にはかなりの差を生じることがわかる。すなわち、冷却水温度20°Cでは当量比0.25で微粒子濃度は $T_w=80^\circ\text{C}$ と同程度の値を示すが、それより当量比の高い側でも低い側でも増加する。この傾向はHCの変化とおよそ一致しており、高沸点未燃炭化水素が、微粒子の増加分として加わることが原因と思われる。また当量比零、すなわち無噴射時の微粒子は潤滑油成分のみであり、その濃度は10 mg/m³程度である。この値は当量比0.3付近での運転時の濃度とほぼ等しい。それ以下では微粒子濃度が極端に高い値を示すことからみて、低負荷時に排出される青煙、白煙はおもに燃料からの燃焼成分であり、潤滑油成分の寄与は少ないことがわかる。

5. む す び

以上、小形高速ディーゼル機関における微粒子生成傾向をミニ希釈トンネル捕集系を用いて系統的に調査

図11 直接噴射式における冷却水温度の影響

した結果より次のことが示唆される。高負荷時では黒煙が微粒子の主要部分を占めるが、低負荷時には高沸点炭化水素類を主体とする青煙、白煙の排出が顕著で黒煙と同レベルの排出量を示す。そのため微粒子濃度は、燃料空気当量比のある点で極小値を示す。この当量比は現用の直接噴射式の圧縮比では、0.15~0.25の範囲にあり、無負荷時よりわずかに高い当量比に相当する。しかし間接噴射式の高速時においてはこの当量比はかなり高い側にずれ、高速低負荷時の青煙、白煙の排出が増す。この種の軽質微粒子は燃焼室壁温が高いほど少ないが、回転速度と噴射時期にも依存する。それらの影響は複雑で高速時では低い当量比で噴射時期が遅いほど微粒子濃度は増加するのに対し、直接噴射式の低速では逆に噴射時期の早いほうが濃度は高い。この違いは、高速では膨張にともなう混合気全体の冷却、いわゆるバルク冷却が主因であるのに対し、低速では燃料の壁面付着が微粒子発生の主要原因となるためと思われる。とくに間接噴射式での高速低負荷時の高微粒子濃度はこのバルク冷却が、連絡孔を通過する強い気流によって助長されている可能性があり、間接噴射式の今後の課題であろう。直接噴射式の低速高負荷域では、燃料の壁面への衝突と付着が高沸点炭化水素を含む高微粒子濃度の原因とみられ、今後

解決を図る必要がある。

終わりに実験機関につきご援助をいただいたヤンマーディーゼル(株)と測定にご便宜をいただいた本学機械工学教室機械材料科学研究室に謝意を表します。また実験に協力いただいた高橋 歩、樺田輝生両氏(当時学生)に感謝いたします。

文 献

- (1) *Federal Register*, 45-45(1980).
- (2) Firisch, L. E., ほか 2 名, *SAE Trans.*, 88-2(1979), 1511; Paper 790417.
- (3) MacDonald, J. S., ほか 3 名, *SAE Trans.*, 89-1(1980), 1045; Paper 800186.
- (4) 井上・ほか 3 名, トヨタ技術, 31-1(昭56), 78.
- (5) Greeves, G. and Wang, C. H. T., *SAE Paper*, 810260(1980).
- (6) Cambell, J., ほか 6 名, *SAE Paper*, 810996(1981).
- (7) 滝沢, 繊維便覧(原料編), (昭44), 242, 繊維学会.
- (8) Plee, S. L. and MacDonald, J. S., *SAE Trans.*, 89-1(1980), 1057; Paper 800186.
- (9) Henein, N. A., *Prog. Energy Combust. Sci.*, 1(1976), 165.
- (10) 長尾・池上, 内燃機関, 6-55(昭42), 29.
- (11) Yu, R. C., ほか 2 名, *SAE Trans.*, 89-1(1980), 324; Paper 800048.
- (12) Miwa, K., ほか 2 名, *SAE Trans.*, 89-1(1980), 104; Paper 800026.
- (13) Nagao, F. and Kakimoto, H., *SAE Trans.*, 70(1962), 680.

討 論

〔質問〕 遠 藤 真〔日野自動車工業(株)〕

ミニトンネル方式を用いてディーゼル微粒子の系統的な調査をなされたことに敬意を表す。

(1) 測定装置について、下記の2点について計算されていたら教えて頂きたい。

(i) ミニトンネル内の空気流量またはレイノルズ数。

(ii) ミニトンネル内の粒子の滞留時間。

(2) スロートを用いて粒子の拡散を図っているが、粒子への未燃炭化水素の凝集・吸着のパターンが、スロートを用いない場合に比べ、変化するということがないか、ご見解を教えてください。

〔回答〕 (1) (i) 本報では希釈率をほぼ一定に保つために、機関回転速度や当量比の変化に対して、そのたびごとにミニトンネル内の空気流量を変化させた。そのため各条件で空気流量、ならびにスロート部のレイノルズ数は異なる。一例を挙げると、回転速度2400 rpm, 当量比0.6の運転条件では、空気流量は約 $5.2 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$, レイノルズ数は約 4.6×10^4

である。

(ii) 上記の条件におけるトンネル内の微粒子の滞留時間は0.47 sである。

(2) トンネル法でスロートを用いるのは、乱流混合をおこなって排気エアロゾルが速やかに清浄空気と混合し、トンネル内での微粒子の凝集、吸着を防ぎ、かつすみやかにサンプルガスを冷却して水分を大気状態と同じレベルにするためである。もし、スロートを用いずに低いレイノルズ数で微粒子を捕集すると、高濃度エアロゾルがトンネル内で長時間保たれて、凝集、吸着がおり、また可溶有機成分などの炭化水素類にも変化を及ぼす。

〔質問〕 廣 安 博 之〔広島大学工学部〕

(1) 排気のサンプリングを排気弁後方約1000 mmの位置の排気管から行っているが、この採取位置の決定はどのようにして行ったか説明してほしい。

(2) 図7, 8において噴射時期をおくらせると全体的に微粒子濃度が高くなり、かつ当量比の影響を受けやすくなっている。この理由をおたずねしたい。

(3) 図10で $\theta=10^\circ$ BTDCの場合に $\phi=0.4$ にて微粒子濃度に極大点が現れる理由をおしえてほしい。

(4) 冷却水温度の影響は燃焼室壁面温度の変化やバルブ冷却の変化などを通じて微粒子濃度に影響していると考えますが、この点に関する貴殿の考え方を教えてください。

【回答】 (1) 本研究は、燃焼系の諸要因が微粒子生成に及ぼす影響を比較するために行ったもので、排気管系の影響をできるだけ除くよう排気弁より1 mの位置で排気をサンプルした。排気管の影響も無視できないので以後検討を要するが、文献(付1)によると微粒子はシリンダ内および排気マニホールド内で主に生成され、排気温度が550 K以下ではサンプル位置は微粒子濃度にあまり影響しないという結果も報告されている。

(2) 図7と図8は微粒子濃度に対する噴射時期の影響が高速時と低速時とで逆の傾向にあることを示す。高速で噴射を遅らせると微粒子濃度は増加するが、これは高負荷側では黒煙の増加、低負荷側では膨張行程での局部的失火により可溶有機成分などの燃焼分が増加するためと考える。低速では噴射時期を早めると噴霧が壁に付着しやすくなるため、全負荷域で微粒子濃度が増すと思われる。

(付1) Laresgoiti, A., ほか, *Environ. Sci. Technol.*, 11-10(1977), 973.

付図 1

(3) 副室式で中位の当量比で微粒子濃度に極大点が現れるのは、本文でものべたように熱的な影響と解積できる。これは文献(13)にも示されているように、負荷を低い側から高い側へ変化させたときの燃料消費率BSFCの極大位置が、付図1のように高負荷から低負荷に切換えたときと異なることから、熱的な影響であると推定できる。この熱的效果のため、着火遅れに変化がもたらされ燃料と壁面との接触の度合いが異なり微粒子濃度に不連続が現れたものと思われる。

(4) 微粒子濃度に対する燃焼室壁温の影響には二つの作用が考えられる。第1は壁温が低いと噴霧が冷たい壁面に直接衝突して燃料成分に近い状態で排出すること、第2は噴霧が壁面付近の冷たい空気と接触して、局部的な失火、いわゆるバルク冷却により燃料の中間成分が排出することが考えられ、いずれに対しても着火遅れが重要な因子となると考えている。