



Title	ディーゼル排気微粒子の簡易・連続測定技術に関する研究
Author(s)	斉藤, 敬三
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	乙第3932号
Issue Date	1991-06-28
DOI	<a href="https://doi.org/10.11501/3085851">https://doi.org/10.11501/3085851</a>
Doc URL	<a href="https://hdl.handle.net/2115/49715">https://hdl.handle.net/2115/49715</a>
Type	doctoral thesis
File Information	000000242523.pdf



ディーゼル排気微粒子の  
簡易・連続測定技術に関する研究

齊藤敬三

ディーゼル排気微粒子の  
簡易・連続測定技術に関する研究

斉藤敬三

本論文で使用した主な記号

- C : 濃度 ( $\text{mg}/\text{m}^3$ )
- D : 粒径 ( $\mu\text{m}$ )
- f : 振動天秤の濾紙振動周波数 (Hz)
- I : 光強度
- K : 煙減光度
- L : 有効光路長 (mm)
- N : 不透過率 (%)
- M : 単位走行距離当たりの排出重量 ( $\text{mg}/\text{km}$ )
- Q : 減衰係数
- T : 温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )
- $\eta$  : 捕集効率 (%)
- $\lambda$  : 光源の発光波長 (nm)
- $\rho$  : 粒子密度 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )

## 目 次

第 1 章	序 論	1
1. 1	本研究の目的と得られた成果の概要	1
1. 2	ディーゼル排気微粒子に関する計測 技術の背景と研究の動向	6
1. 2. 1	ディーゼル排気規制の動向	6
1. 2. 2	ディーゼル排気成分の特性	10
1. 2. 3	排気微粒子計測法の現状	12
1. 2. 4	ディーゼル排気微粒子の計測 技術に関する研究の動向	15
第 2 章	微粒子処理装置、および実験設備	22
2. 1	緒 論	22
2. 2	共通試験設備の構成	22
2. 3	台上試験装置	24
2. 3. 1	供試車輻と試験運転モード	24
2. 3. 2	負荷試験装置	27
2. 4	希釈風洞装置	29
2. 4. 1	希釈風洞による微粒子の採取	29
2. 4. 2	希釈風洞装置の仕様	29
2. 5	微粒子トラップ装置の選定	31
2. 5. 1	微粒子トラップの種類と特徴	31
2. 5. 2	微粒子トラップの捕集性能	35

2. 5. 3	微粒子の再燃焼条件に 関する検討	39
2. 6	本章における結論	44
第3章	排気微粒子の重量濃度の測定	45
3. 1	緒    論	45
3. 2	微粒子採取装置、および計測方法	46
3. 3	希釈・フィルター捕集法の信頼性向上	49
3. 3. 1	濾紙の選定	49
3. 3. 2	微粒子試料の秤量方法に 関する検討	50
3. 3. 3	最適採取条件の決定	52
3. 4	微粒子濃度の測定	62
3. 4. 1	測定の再現性と繰り返し誤差	62
3. 4. 2	運転条件と排出濃度特性	65
3. 4. 3	各種測定法の比較	67
3. 5	本章における結論	71
第4章	振動天秤法による微粒子濃度の連続測定	73
4. 1	緒    論	73
4. 2	振動天秤法による微粒子濃度の測定	74
4. 2. 1	振動天秤法の原理と特徴	74
4. 2. 2	データ処理システムの構成	77
4. 3	捕集濾紙の温度条件に関する検討	81
4. 3. 1	試験項目と装置の構成	81

4. 3. 2	濾紙温度の影響	83
4. 3. 3	サンプリング管温度の影響	84
4. 4	微粒子濃度の測定	85
4. 4. 1	定常運転における濃度の測定	85
4. 4. 2	過渡応答性に関する検討	89
4. 4. 3	濾紙捕集法との比較	91
4. 5	本章における結論	95
第5章	光透過法を利用した排気煙濃度の連続測定	97
5. 1	緒論	97
5. 2	微粒子測定における光透過法の適用	98
5. 2. 1	光透過法における測定原理	99
5. 3	ディーゼル排気微粒子の分級	100
5. 3. 1	粒径範囲と分級装置の種類	101
5. 3. 2	各種分級測定法における 比較試験	102
5. 3. 3	排気微粒子の分級試験結果	104
5. 4	光透過法の高感度化手法に関する検討	106
5. 4. 1	光源波長が測定濃度に対して およぼす影響	107
5. 4. 2	光透過式スモークメータに おけるノイズ	112
5. 4. 3	高感度化の概念	114
5. 4. 4	信号重畳式スモークメータ の開発	115

5. 4. 5	10連式スモークメータに おける信号重畳効果	119
5. 4. 6	多重反射式スモークメータ の試作	122
5. 5	光透過式スモークメータによる微粒子 濃度の測定	125
5. 5. 1	不透過率から重量濃度への 変換	125
5. 5. 2	運転条件と微粒子の排出特性	128
5. 5. 3	過渡運転時の連続測定	131
5. 6	光透過法と重量濃度測定法との比較	133
5. 6. 1	比較試験装置の構成	133
5. 6. 2	定常運転時の比較試験	134
5. 6. 3	過渡運転時の比較試験	135
5. 7	本章における結論	137

第6章	光透過透過式スモークメータによる捕集 効率の簡易・迅速測定	139
6. 1	緒論	139
6. 2	捕集効率の測定方法	140
6. 2. 1	インライン式スモークメータ の試作	141
6. 2. 2	試作スモークメータの諸特性	144
6. 3	過渡運転時における捕集効率の測定	147
6. 3. 1	実験装置	147

6. 3. 2	定常運転時における測定	148
6. 3. 3	過渡運転時における測定	150
6. 4	光透過法で測定した捕集効率の妥当性 に関する検討	153
6. 4. 1	重量捕集率と捕集効率の関係	153
6. 4. 2	各種測定法による捕集効率の 比較	154
6. 5	本章における結論	157
第7章 結 論		159
引用文献		165
謝 辞		174

## 第1章 序 論

### 1.1 本研究の目的と得られた成果の概要

本論文は、ディーゼル排気微粒子に関する各種対策技術の研究に寄与するために、ディーゼルエンジンから排出される粒子状物質を簡易・連続測定する方法の開発を目的として行なった研究の結果について、論述したものである。

近年、自動車保有台数の増加にともない、排気ガスによる大気環境の悪化は一段と厳しい状況となってきている。とくに最近では、ディーゼル排気粒子状物質による汚染が深刻化してきており、その汚染物質としての特性の解明はもとより、測定法の確立と排出抑制対策の開発が強く望まれるようになってきた。しかしながら、ディーゼルエンジンでは $\text{NO}_x$ と微粒子の排出はトレードオフの関係にあり、燃焼改善の方法だけで両者の同時低減を図ることは非常に困難な状況にある。このため、燃焼の改善に加えて、排気後処理による微粒子除去技術の開発が必要不可欠となってきており、ディーゼルパーティキュレートフィルター(DPF: Diesel Particulate Filter)に粒子状物質を捕集する、いわゆる微粒子トラップ法の研究が盛んに行なわれている。

また、これら対策技術の研究に寄与するためのディーゼル排気微粒子の測定方法に関する研究は、その重要度をますます高めてきている。このために、排気微粒子濃

度の正確な測定を可能とする基準測定方法の確立が急務であると同時に、効率的で簡便な測定を可能とする簡易・連続測定技術の開発が切望されている。

これらの理由から、まず最初に、ディーゼル排気微粒子の基準となる測定方法を確立するために、希釈・フィルター捕集法の信頼性向上に関する基礎的な研究を行なった。つぎに、基準測定における試験手順の煩雑さを解消し、効率的でしかも簡便な計測手段を提供するために微粒子濃度の簡易・連続測定方法の開発を試みた。さらに、光透過式スモークメータによる捕集効率の簡易・迅速測定方法についても一連の研究を実施した。

論文は、7章31節から構成されている。すなわち、第1章においては、本研究の目的と得られた成果の概要について記述するとともに、ディーゼル排気微粒子の規制、対策技術、成分特性、ならびに計測法の現状および計測技術に関する研究の動向について記述した。

第2章では、微粒子処理装置および微粒子濃度の測定に使用した主な試験設備について記述した。すなわち、低濃度域での測定試験を行なう際に使用した微粒子トラップの種類ならびに特徴を記述するとともに、その捕集性能ならびに捕集微粒子の再燃焼条件などについて明らかにした。また、微粒子濃度の測定試験に拘わる主な試験設備として、供試試験車輛、負荷試験装置、あるいは希釈風洞装置などに関する概要ならびに仕様を示すと

もに、本研究で確立した台上測定における効率的な試験手順について論述した。

第3章では、基準的な濃度測定方法、すなわち希釈・フィルター捕集法によるディーゼル排気微粒子の重量濃度測定方法について、その手法の確立と信頼性向上とを目的とした、微粒子試料の最適採取・秤量条件、ならびに微粒子濃度の測定試験結果について記述した。すなわち、フィルター捕集法における捕集時間、捕集温度など試料採取条件が測定濃度におよぼす影響について検討を行ない、微粒子試料の最適捕集、ならびに秤量条件を明らかにした。さらに、種々の運転条件下において濃度測定試験を行なうとともに、 $\beta$ 線吸収法、圧電天秤法、あるいは光散乱法などの間接測定方法との比較測定を行なった。その結果、秤量時の濾紙調湿時間、微粒子採取期間、捕集濾紙温度などの最適捕集・秤量条件を明らかにすることができた。また、測定方法の異なる各種間接測定方法の特性、ならびに問題点などについても明らかにした。これらの研究の結果、希釈・フィルター捕集法による測定が確立され、測定の繰り返し誤差を最終的には平均で $\pm 3\% \sim 5\%$ 程度に収めることが可能となった。

第4章では、振動天秤法による微粒子濃度の連続測定に関して、振動天秤の原理と特徴、フィルター捕集法との比較測定の結果について記述するとともに、捕集温度条件の影響、ならびにモード運転時における連続測定結果、および過渡応答性に関する検討などの結果について

論述した。

近年、試験手順が煩雑であるという欠点のあった希釈・フィルター捕集法に代替する測定装置の一つとして、振動天秤の原理を利用したT E O M (Tapered Element Oscillating Microbalance) 装置が用いられるようになってきた。これは、希釈・フィルター捕集法と同様に、希釈風洞装置内に導入された排気微粒子を一定時間濾紙に捕集して、その堆積重量を振動天秤により連続的に秤量する方式である。

本章では、振動天秤法によるディーゼル排気微粒子の簡易・連続測定の可能性について、実験的な検討を行なった結果について記述した。すなわち、振動天秤法の秤量精度、あるいは濃度検出限界など基本的な性能を明らかにしたほか、モード運転時の過渡応答性、フィルター捕集法との相関、捕集濾紙の温度変化が測定濃度に与える影響などを実験的に解明して、振動天秤法によるディーゼル排気微粒子の簡易・連続測定が可能であることを実証することが出来た。

第5章では、光透過法による低濃度排気煙の連続測定方法について記述した。すなわち、光透過法にもとづく高感度化手法を提示して、排気微粒子の分級測定を行ない、ディーゼル排気微粒子の粒径範囲を特定した。つぎに、これにもとづいた試作スモークメータによる測定実験を行なって、光透過法と重量濃度測定法との比較により両者の相関を明らかにした。

それらの結果、光透過式スモークメータの高感度化手法に基づき試作した信号重畳式スモークメータによって、約 $1\sim 2\text{mg}/\text{m}^3$ 相当までの煙濃度が検出可能となり、低濃度排気煙の簡易・連続計測が可能なることが実証された。

第6章では、光透過式スモークメータによる捕集効率の簡易・迅速測定方法について記述した。すなわち、高感度型光透過式スモークメータを応用・発展させた、インライン式スモークメータにより過渡運転時に使用することが出来る捕集効率測定装置を開発した。

まず最初に、光透過法を利用したDPF捕集効率の簡易・迅速測定方法を提案し、それにもとづく装置の試作を行なった。つぎに、その基本特性を明らかにするとともに、種々の運転条件下における捕集効率の測定実験を行なった。最後に、その他の方法による捕集効率の測定結果との比較・検討を行なうことにより、今回提示した方法の妥当性を検証した。

それらの結果、インライン式スモークメータを利用した光透過式の捕集効率測定装置によって、排気微粒子濃度、ならびに過渡運転時における捕集効率の迅速かつ簡便な測定が可能となった。そして、このことにより従来の方法では不可能であった低濃度域における瞬時濃度の連続測定、エンジンならびにDPFの過渡的な微粒子排出特性の評価・解析を可能とすることができた。

第7章は結論であり、本研究で得られた成果を総括した。

## 1.2 ディーゼル排気微粒子に関する計測技術の背景 と研究の動向

### 1.2.1 ディーゼル排気規制の動向

近年、大気汚染の状況は一段と深刻になり、先進諸国における環境改善のための施策はより一層強化されつつある。わが国における自動車排出ガス規制は、昭和41年ガソリン車に対する一酸化炭素(CO)規制に始まるが、今日の自動車排出ガスによる大気環境の悪化に対応して、炭化水素(HC)、窒素酸化物(NO<sub>x</sub>)などについても逐次規制の強化が図られてきた。そして、昭和53年には、NO<sub>x</sub>規制値0.25g/kmという世界でも最も厳しい規制が実施されるに至っている<sup>(1)</sup>。

さらに、昭和63年には、大気汚染防止法の改正により固定型内燃機関のばい煙規制が実施されるとともに、平成元年12月には、ディーゼル車を中心としたNO<sub>x</sub>や排気微粒子の規制に関する具体的スケジュールが、中央公害対策審議会から答申されている<sup>(2)</sup>。表1.1はその内容を示したものであるが、NO<sub>x</sub>の大幅低減とともに排気微粒子(PM)対策の抜本的な見直しが答申され、平成5年度には、米国のパティキュレート規制と同様、排気微粒子の全量に対する定量的規制の導入が求められている。

米国では、1977年に制定された大気浄化法にもとづき、規制強化に関する検討が開始された。EPA (Environmental Protection Agency: 米国環境保護局)

表 1.1 自動車排出ガス規制スケジュール

車種	排出ガス	現行規制	短期目標		長期目標		
		平均値	目標値	削減率	目標値	削減率	
軽量トラック・バス	NO <sub>x</sub>	0.9g/km	0.6g/km	△33%	0.4g/km	△56%	
	PM	—	0.2g/km	—	0.08g/km	△60%	
中量トラック・バス	NO <sub>x</sub>	直噴	1.3g/km	△35%	0.7g/km	△65%	
		副室		0%		△46%	
	PM	—	0.25g/km	—	0.09g/km	△64%	
重量トラック・バス	NO <sub>x</sub>	直噴	6.0g/kWh	△17%	4.5g/kWh	△38%	
		副室	260ppm	5.0g/kWh		△2%	△12%
	PM	—	0.7g/kWh	—	0.25g/kWh	△64%	
乗用車	NO <sub>x</sub>	直噴	0.7g/km	0.5g/km	△29%	0.4g/km	△43%
		副室	0.9g/km	0.6g/km	△33%		△56%
	PM	—	0.2g/km	—	0.08g/km	△60%	
全車種	黒煙	50%	40%	△20%	25%	△50%	

表 1.2 米国の排出ガス規制状況

年次	乗用車	軽量トラック・バス	重量車
1982	0.60 g/mile	0.60 g/mile	
1987	0.20	0.26	
1988	↑	↑	0.60 g/bhp・hr
1991	↑	↑	0.25
1994	↑	↑	0.10

表1・3 E E Cにおける重量車規制案

規 格	CO	HC	NO <sub>x</sub>	微粒子	
従来規格 ECE R49	14.0	3.5	18.0	-	-
ECE R 49-01	11.2	2.4	14.4	-	-
1992-3年規制案	4.5	1.1	8.0	0.35* <sup>1</sup>	0.63* <sup>2</sup>

\*<sup>1</sup>:85kW以上、\*<sup>2</sup>:85kW以下 (単位は全てg/kWh)

は、1981年からLight Duty Engineのパティキュレート規制を導入するとともに、1985年には、微粒子トラップなどの後処理技術の完成を前提とした、Heavy Duty Engineの規制値ならびに規制スケジュールを公表した<sup>(3)</sup>。最終的な規制の状況を表1・2に示す。

欧州では、E E C諸国と非E E C諸国とで採用する規制が異なるほか、E E C諸国においても、採用する規制値が各国で相違するなど複雑な事情となっており、1992年の市場統合へ向けてさらに検討が成されている段階である<sup>(4)</sup>。表1・3は、E E CにおけるHeavy Duty Dieselの1992～3年規制案(ECE R 49: 1992-3)の内容である。

以上のように、わが国および欧米各国において自動車排気ガス規制の焦点は、今日ではディーゼル車からのNO<sub>x</sub>と排気微粒子の低減とに集約されている。従って、現在はこれら両汚染成分の同時低減を図ることが急務である。しかしながら、図1・1に示すようにNO<sub>x</sub>と微粒

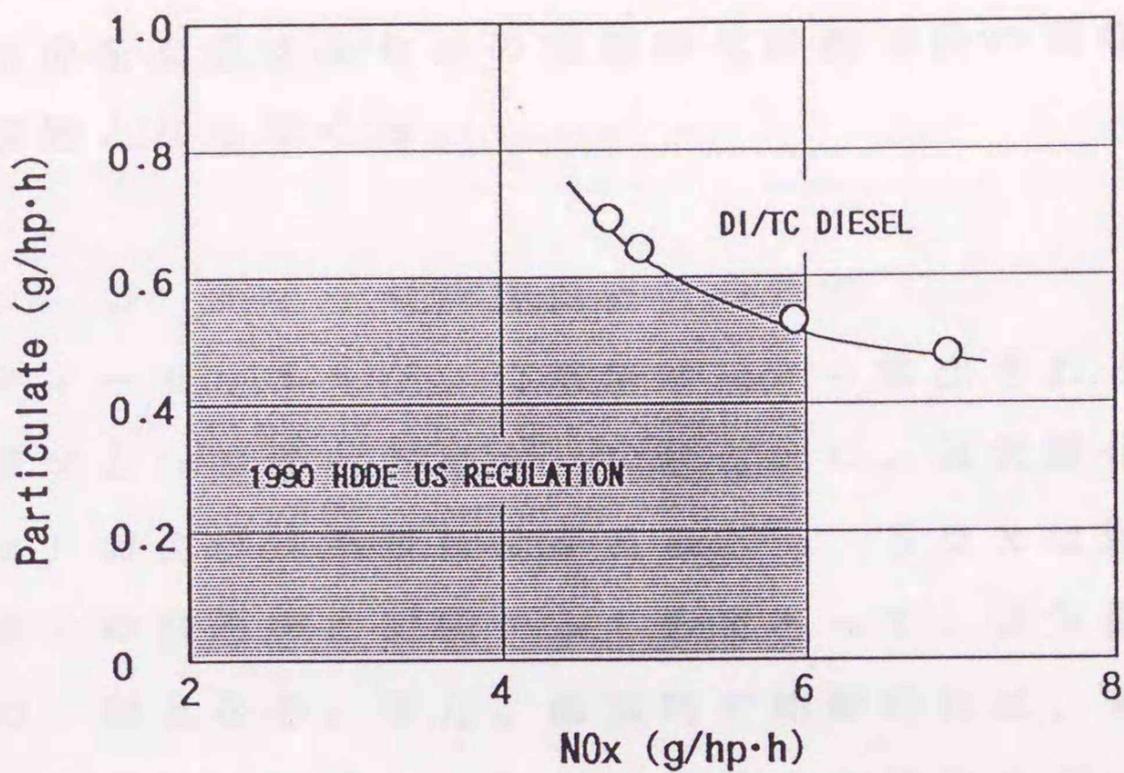


図1.1 NOxと微粒子の排出特性<sup>(5)</sup>

子の排出はトレードオフの関係にあり、燃焼改善の方法だけで両者を同時に低減することは極めて困難な状況にある<sup>(5)</sup>。

例えば、NOxの排出低減に効果のあるEGR法も排気微粒子に対してはその排出を増大する結果となる<sup>(6)</sup>。また、噴射時期の遅延による初期燃焼の抑制方法は、直接噴射式エンジンの場合、その後続く拡散燃焼に遅延を生じさせるため、排気微粒子やHCの悪化の原因となる<sup>(7)</sup>。

結局は、燃焼室形状の改善、過給器の採用、燃料噴射の高圧化などの燃焼改善の方法により微粒子の低減を図ると同時に、微粒子トラップなどの後処理装置による微

粒子除去方法の開発を進めることが重要であり、それらの研究を支援するための機能的な計測手段の開発が重要な課題となってくる。

### 1.2.2 ディーゼル排気成分の特性

ディーゼルエンジンの燃焼過程から排出される主な汚染成分としては、 $\text{NO}_x$ 、 $\text{CO}$ 、 $\text{HC}$ 、硫黄酸化物 ( $\text{SO}_x$ ) および排気微粒子がある<sup>(8)</sup>。  $\text{SO}_x$  は燃料中の硫黄分の含有率に起因するものであって、排気微粒子増加の一因となる。また、低温時や始動時には、未燃あるいは部分的に酸化した燃料の液滴や水蒸気などで構成される青白煙の排出が多くなる<sup>(9)・(10)</sup>。

図1.2に各排気成分の排出特性を示す。測定対象あるいは測定の方法によって、ばいじん、スモーク（または排気黒煙）、粒子状物質（パーティキュレート）などに呼称されるディーゼル排気微粒子は、エンジンの燃焼方式、燃焼室形状、あるいは運転条件などにより、性状、濃度および粒径や粒径分布などが変化するが<sup>(11)</sup>、その生成の機構については未だ不明な点が多い<sup>(12) - (16)</sup>。ディーゼル排気微粒子は、主としてドライスート（Dry Soot：固形炭素粒子）と $\text{SOF}$ （Soluble Organic Fraction：可溶性有機物質）により構成されていることが知られている。中でも、発ガン性などの重大な生体影響を持つとされる $\text{SOF}$ 中には、多環芳香族炭化水素（PAH：Polycyclic Aromatic Hydrocarbons）、ニトロ化合物、潤

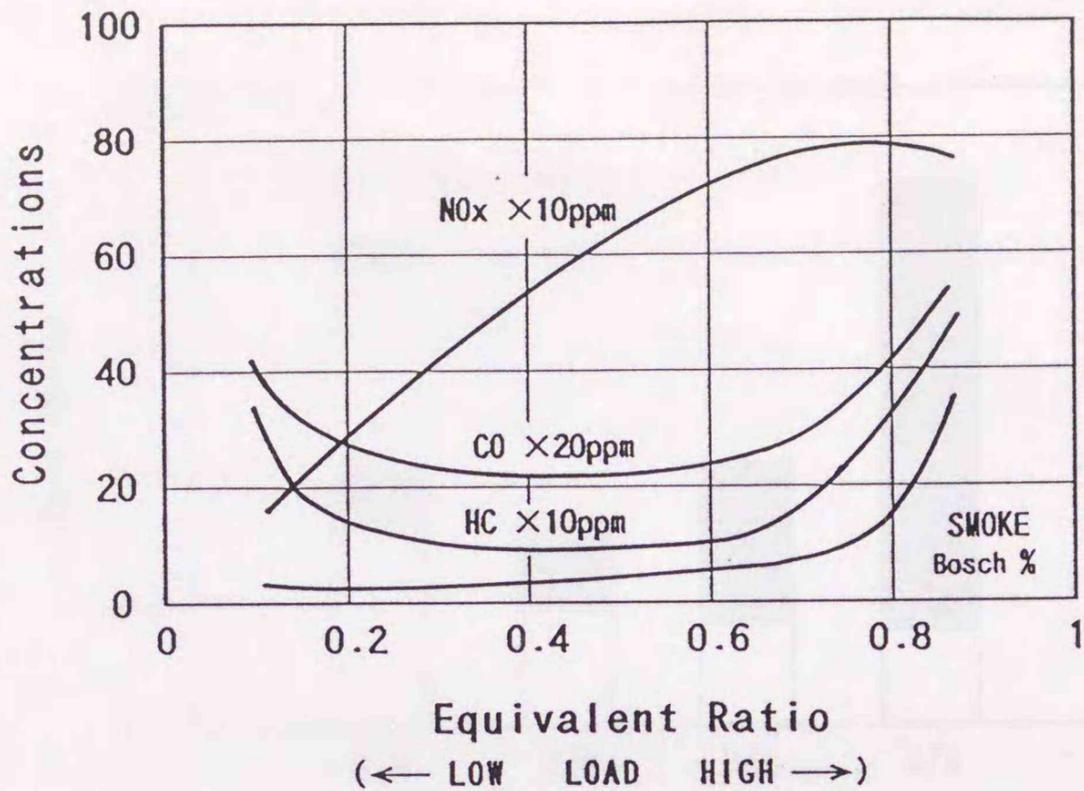


図1.2 当量比と各排気成分の排出特性

滑油派生成分などが含まれている<sup>(17)</sup>、<sup>(18)</sup>。さらに、その中にはベンゾ・a・ピレン (BaP: Benz (a) Pyrene) などの変異原性を持つ成分も含まれており、疫学的な立場からの研究も行なわれている<sup>(19)</sup>。

一般に、ドライスートは高負荷運転時に排出が多くなるのに対して、SOFは低負荷時に排出が多くなるという異なった特性を持つ<sup>(20)</sup>。図1.3はエンジン負荷率を変化させた時の排気微粒子およびSOFの排出濃度を示したもので、低負荷運転時には主に燃料派生SOFの排出が多く、逆に高負荷時にはドライスートの排出が多くなることを示している<sup>(21)</sup>。

このように、運転条件により排出特性や排出形態が異なることが、ディーゼル排気微粒子の正確な測定を困難

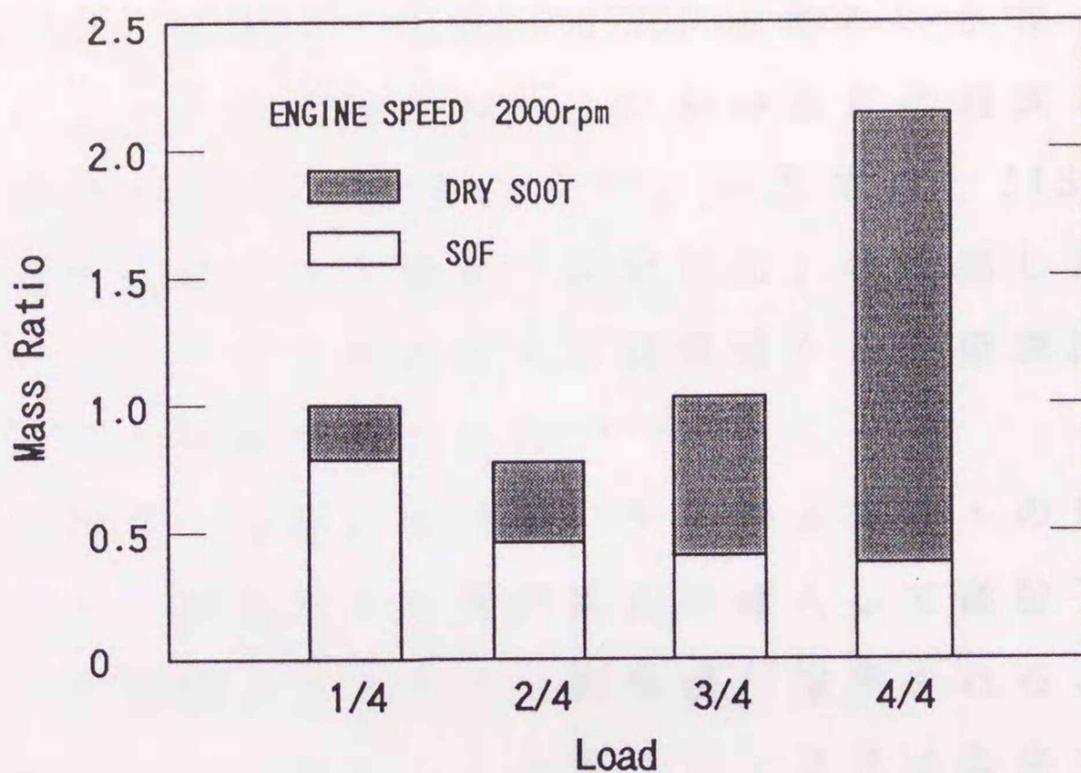


図1.3 S O F の排出に及ぼす負荷の影響<sup>(21)</sup>

なものとしている一因と考えられる。このため、広範な実験データの蓄積などにより、測定の信頼性向上を図っていくことが極めて重要な課題である。

### 1.2.3 排気微粒子計測法の現状

従来、排気微粒子の計測にはディーゼル黒煙規制に対処する目的から、ディーゼル排気中の黒煙濃度を専ら測定する方式の光反射式スモークメータ（一般にはボッシュ式スモークメータ）が広く利用されてきた<sup>(22)</sup>。これは、JIS D 1101「自動車用ディーゼルエンジン排気煙濃度測定方法」に規定されるように、エンジンの排気管から直接試料を濾紙に採取、捕集する方法である<sup>(23)</sup>。また、米国およびEECで実施されてきたスモーク規制に

対しては、P H S 式スモークメータやハートリッジ式スモークメータに代表される、いわゆる光透過式スモークメータが用いられてきた<sup>(24)</sup>。一方では、JIS Z 8808「排ガス中のダスト濃度の測定方法」に準拠した方法により、ディーゼル排出ガスを排気管から直接濾紙に採取する方法も実施されてきた<sup>(25)</sup>。

近年では、米国におけるパティキュレートの重量規制に対して、排気ガスを希釈風洞に導入して微粒子の採取を行なう希釈・フィルター捕集法が採用されるようになってきた。わが国でも、平成元年12月の中央公害対策審議会の答申において、この測定法が提案され、本測定方法の確立が急務となっている。

上述した各測定方法の中で、スモークメータ法と呼ばれる測定方法では、一般に、排気ガスを希釈せずに直接測定装置に導入する直接採取法を採用する。これは大型設備を必要とせず簡便な方法で測定を行なえるため、ディーゼル排気微粒子の簡易・連続測定には必要不可欠な方法であるが、水分の凝縮や温度変化の影響を受けるために、その実用に際しては、種々の対策方法を併せて研究する必要がある。

また、後者の希釈・フィルター捕集法としては、米国E P Aが規定する大型希釈風洞を利用したディーゼル排気微粒子の測定方法がある。これによれば、自動車から排出される排気ガスの全量を大型希釈風洞に導入して、清浄空気で希釈することにより大気に放出した時と同様

表1・4 希釈・フィルター捕集法の要求性能<sup>(26)</sup>

希釈排気温度 排気導入管	51.7°C以下(±11°C) 365cm以下(断熱なし) 610cm以下(断熱あり)
トンネル内Re数 トンネル内径	4000以上 20.3cm以上
ノズル内径 吸引孔位置	1.27cm以上 約10D
ホルダまでの距離 トンネル内 トンネル外	プローブ径の5倍以上 102cm以下
フィルター材質 フィルター直径	テフロン系メンブレン φ47mm以上
計量室温度 計量室湿度	20~30°C(±6°C) 30~70%(±10°C)
秤量用天秤精度 フィルター放置時間 捕集前 捕集後	1μg 8時間以上56時間以内 1時間以上56時間以内

の状態を模擬するものであって、濾紙に微粒子を捕集する際に水分の影響を少なくすることができる。表1・4はEPAの規定する希釈・フィルター捕集法の主な要求性能を示す<sup>(26)</sup>。なお、大型の希釈風洞装置を必要とする全量希釈法に代わって、部分希釈法による小型風洞装置の開発が試みられているが、現在確立した方法がなく、全量希釈法との相関や過渡特性などに問題を残しており、今後の研究開発が期待されている<sup>(27) - (30)</sup>。

以上のように希釈・フィルター捕集法は、現時点で最も基準的な方法とされているにも拘わらず、希釈排気ガス温度の影響など、細部について不明な点が多く、測定の再現性に問題を残している<sup>(31)、(32)</sup>。今後、基準測

定方法として確立していくためには、信頼性向上のための研究をさらに継続して行なっていくことが重要となる。

#### 1.2.4 ディーゼル排気微粒子の計測技術に関する 研究の動向

現在、ディーゼル排気微粒子の計測技術に関する研究の動向としては、主に、(1) 重量濃度測定の標準的な方法である希釈・フィルター捕集法を、より高精度で信頼性の高い基準測定方法とするための研究と、(2) 光の透過や反射を利用した光学的方法、あるいは振動天秤法、差圧トレース法、光音響法など簡便な装置、測定原理により効率的な測定を行なうための簡易・連続測定方法に関する研究とに大別される。他に、排気微粒子中のドライストやSOFの分離測定を目的とする研究や、従来から大気中の浮遊微粒子の測定に用いられてきた微粒子計測器を、粒径分布測定や連続モニタ装置としてディーゼル排気微粒子の測定に適用するための研究なども、上述した測定法を補完することを目的として行なわれている。

##### (1) 基準測定方法の確立に関する研究

希釈・フィルター捕集法を基準測定方法として確立するために、測定誤差要因や再現性を追求する研究が行なわれている。Liesら<sup>(33)</sup>は、測定の信頼性について、同一エンジンからの排気微粒子を4つの試験機関で測定して比較検討を行なっている。その結果、通常で±10%前

後の誤差を含むこと、測定のバラツキについては32~43%と大きく変動する場合があることなどを指摘している。

希釈・フィルター捕集法は、希釈風洞に導入した排気微粒子を清浄空気で希釈した後濾紙に捕集するもので、捕集微粒子の重量濃度はJIS Z 8808の方法と同様精密天秤で秤量する。希釈方式には、排出ガス全量を希釈する全量希釈法と、排出ガスの一部を希釈して測定に用いる部分希釈法とがある。この方法では、試料採取部における希釈排ガス温度を51.7℃以下に設定する必要があり、設備の大型化を余儀なくされるという欠点がある。また、測定に際しては煩雑な手順を必要とするほか、測定が間欠的で結果を得るまでに長時間を要するなどの欠点がある。このため、これを基準測定方法として確立して行くためには、希釈排気ガス温度の影響や微粒子採取条件の検討など信頼性向上のための研究や、希釈方式の確立などの研究が必要とされている。

## (2) 簡易・連続測定方法に関する研究

振動天秤法 近年、振動天秤の原理を利用して、微粒子重量の連続測定を可能としたTEOM (Tapered Element Oscillation Microbalance) 装置が使用されるようになってきた<sup>(34)</sup>。

図1・4に示すように、テーパ状のエレメントの先端に取付けたカートリッジ式の濾紙に微粒子を捕集して、その質量変化を濾紙を含む等価質量とエレメントの弾性との関係による共振周波数の変化として連続測定する。

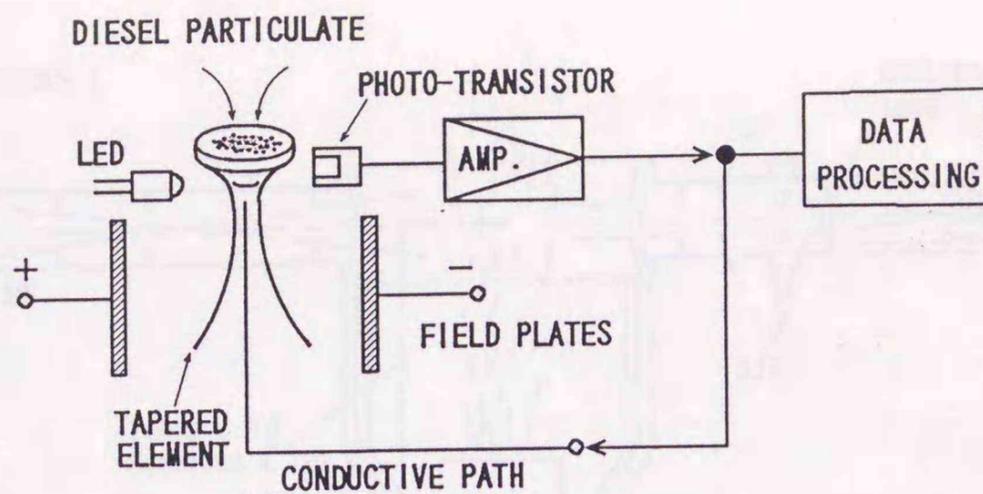


図1・4 TEOM装置の構成

測定が連続的で結果の判定に殆ど時間を要しないという長所を持つが、希釈・フィルター捕集法と同様、希釈風洞装置などの付帯設備が必要であるほか、低濃度域での検出感度などに問題がある。

Shoreら<sup>(35)</sup>は、濾紙温度、吸引速度、およびSOF含有量の違いなどにより、TEOM法の結果はフィルター捕集に比べ、例えば、アイドリング時で23%も低い値を示すことを指摘しており、今後は、種々の試験条件下での適応性や基準測定方法との相関などについても確認しておく必要があるものと考えられる。

光透過式スモークメータ法 光路中に存在する排気煙の光の不透過率を測定する光透過式スモークメータは、排気管から排出される排気煙に直接光を照射し、光の不透過率（あるいは透過率）を検出することによって、汚染度を測定する。これには、図1・5に示すように、光路中を通過する全排気ガスに光を照射するフルフロー型の

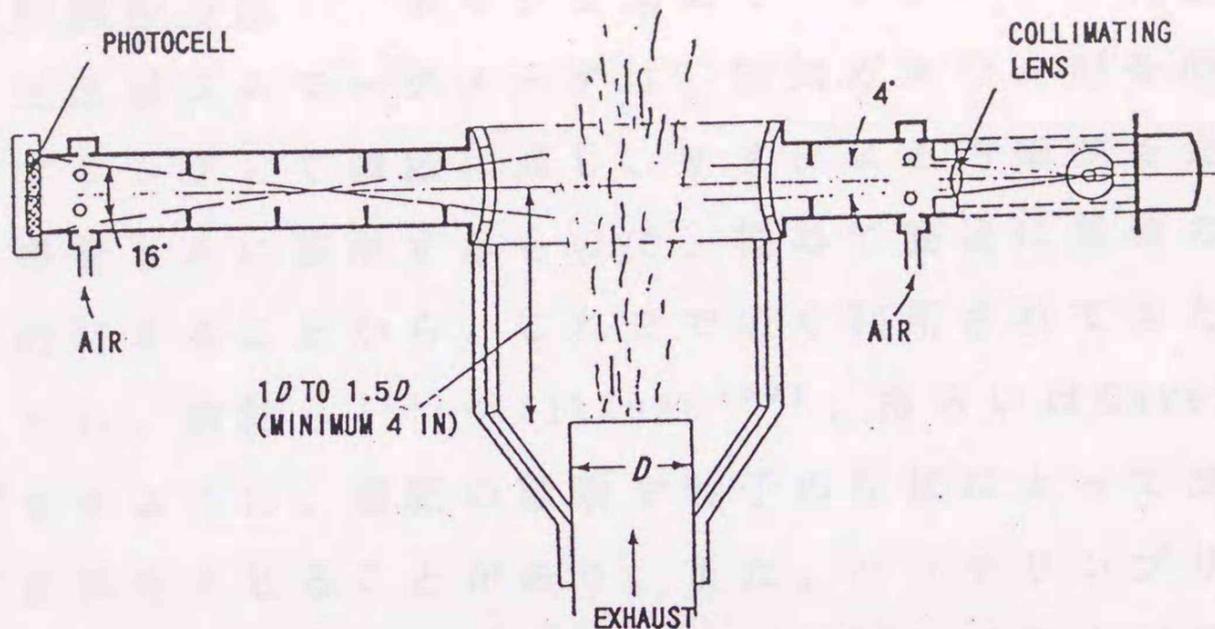


図1.5 PHS方式のスモークメータ

ものが多く採用されている。他に、排気の一部をサンプリングして測定を行なうパーシャルフロー型のものであるが、いずれも連続測定が可能で比較的簡便な方式のため、過渡運転時のモニター装置としての利用が有効と考えられる。

Gerke<sup>(36)</sup>は、定常運転時の測定において、光透過法による結果はフィルター捕集法の結果と比較的良好な一致を示すが、SOF含有率が変化した場合の相関は不明であるなどの結果を報告している。

本測定方式は、ディーゼル排気微粒子の簡易・連続測定を実現する上で最も効果的な方法と考えられることから、今後は、基準測定方法との相関を把握していくとともに、低濃度煙を対象とするための高感度化のための研究が重要となってくる。

その他の方法 ボッシュ式スモークメータに代表される光反射式スモークメータは、排気ガスの一部を直接サンプリングして濾紙に通し、すすによる汚染度を光の反射率をもとに表示するもので、極めて簡便に黒煙の測定を行なえることから、これまで広く利用されてきた<sup>(37)</sup>。しかし、倉林ら<sup>(38)</sup>やAlkidas<sup>(39)</sup>、あるいはCarey<sup>(40)</sup>が示すように、濾紙の種類や粒子の性状によって測定値に差異を生じることがあり、また、バッチサンプリング方式のために過渡運転時の測定や排気微粒子中のS O Fの計測は不可能である。

井上ら<sup>(41)</sup>は、濾紙による微粒子捕集の際の圧力損失と微粒子捕集量との関係から、微粒子濃度の測定を行なうフィルター差圧トレース法を提案している。しかし、実験の結果、濾紙差圧と捕集量とが比例するのは捕集質量が増加した後であり、捕集開始初期にやや問題があるほか、粒径が小さかったり、S O Fが多いという条件のもとでは目詰まりし易く、同じ重量濃度でも差圧が大きくなることなどを指摘している。この方法は極めて簡便に行なえる点に大きな利点を有するほか、微粒子トラップなどのフィルター捕集の原理による測定に対しても適応可能であり、例えば、微粒子トラップ量の推定をフィルター差圧の上昇から推定できることを示唆している。しかし、温度や捕集効率の変化などの誤差要因も多く、精度的には十分な吟味が必要である。

Roessler<sup>(42)</sup>やOsadaら<sup>(43)</sup>は、赤外線などの、光と

粒子の衝突・吸収時などに発生する音から微粒子濃度を検出する、光音響法に関する研究の中で、この方法では比較的高感度が得られるものの、現状では測定値のバラツキが多いことを報告している。

竹内ら<sup>(44)</sup>は、排気ガスの導電率を測定してドライスートの質量濃度を連続的に定量する電率法について実験を行なっている。また、Kremple<sup>(45)</sup>らは赤外吸収量が黒煙に比例することを利用して、黒煙を直接、連続測定する2波長NDIR法を試みている。いずれも排気微粒子中のドライスートを選択的に測定するもので、SOFの測定は他の手段による必要がある。古林ら<sup>(46)</sup>は、排気微粒子中のドライスートとSOFの温度による蒸発・燃焼特性の違いを利用して、雰囲気ガスおよび温度を変えたときに発生するガスを炭酸ガス濃度として測定する炭酸ガス濃度変換法について研究を行なっている。しかし、この方法では、SOFを蒸発成分としてとらえるため、溶媒抽出法によるSOFの測定結果との関係を把握しておく必要がある。

なお従来、大気中の浮遊微粒子あるいはクリーンルーム中のパーティクル個数の計測用として光散乱法、 $\beta$ 線吸収法、圧電天秤法、EAA（静電式微粒子計測器）、あるいはCNC（凝縮核カウンター）などの微粒子計測器が利用されてきた<sup>(47)</sup>。これらの装置を排気微粒子の粒径分布測定や連続モニター装置として適用することも可能と考えられる。しかし、粒径や濃度の測定範囲、あ

るいはディーゼル排気微粒子の測定に特有の検出部における汚染の問題などが最大のネックとなるために、用途を限定せざるを得ないであろう。さらに、これら間接測定の結果では、重量濃度との相関が常に問題となるために、適用に当たってはさらにデータの蓄積を行なうことが必要である。

以上のことから、ディーゼル排気微粒子の簡易・連続測定を実現するためには、光透過式スモークメータの高感度化を図り、これを供用するのが最も可能性の高い方法と思われる。さらに、これに加えて、振動天秤法などの新技術の追求や、基準となる希釈・フィルター捕集法の信頼性向上を追求して行くことにより、開発した技術の有効性を確認し、ひいては、ディーゼル排気微粒子の各種対策技術の研究に貢献し得るものと考えられる。

## 第2章 微粒子処理装置、および実験設備

### 2.1 緒 論

本章では、研究において使用した主要な実験装置について論述する。

まず第1に、微粒子濃度の測定に拘わる主な試験設備として、供試車輛、負荷試験装置などを含む台上試験装置、ならびに希釈風洞装置の概要およびその仕様などについて記述した。

つぎに、研究の中で使用した微粒子処理装置について記述した。すなわち、ディーゼル排気ガス規制の強化にともない、微粒子トラップなど排気後処理による微粒子除去装置が必要となる。本研究の目的とするディーゼル排気微粒子の簡易・連続測定においても、微粒子処理装置の装着車輛からの低濃度排気微粒子を測定することを前提としており、測定実験に際してはセラミックフィルターを用いた微粒子トラップを排気系に装着して低濃度域での実験を行なった。ここでは、微粒子トラップ装置の選定と、その捕集性能ならびに再生条件などを検討した結果について論述する。

### 2.2 共通試験設備の構成

まず初めに、共通的な試験設備の構成について記す。図2.1は、供試車輛、台上試験装置、希釈風洞装置、および濃度測定装置の概略構成である。

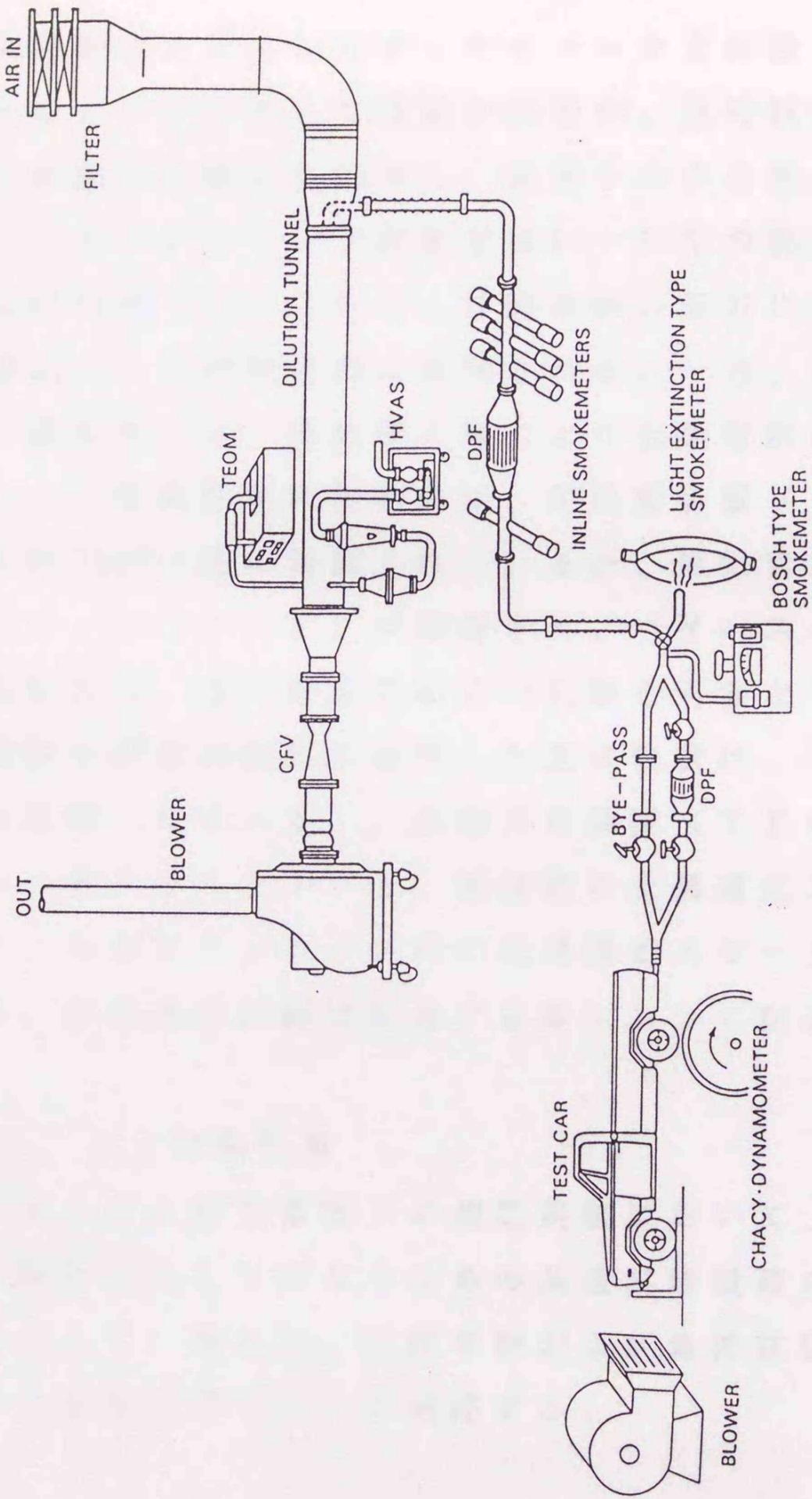


図 2・1 試験設備の構成

供試車輛はシャシダイナモメータ上に設置され、試験運転モードに従って運転されるが、負荷試験装置はローラ表面の駆動力を制御し、負荷トルクを発生する。シャシダイナモメータ試験室は10~30℃の範囲で設定可能な変温室となっており、試験車輛の前方に設置された送風器により試験室内に送風される。一方、試験車輛からの排気ガスは、排気導入管により全量希釈風洞に導入される。希釈風洞内の流量は、定流量装置(CFV)により約20m<sup>3</sup>一定に制御されているが、排気管系には微粒子トラップ(DPF)が装着され、バイパスバルブの切替えにより、高・低濃度域での実験を可能としている。

微粒子濃度の測定に使用した主な装置は、フィルター捕集装置(HVAS)、振動天秤装置(TEOM)、ボッシュ式スモークメータ、解放型の光透過式スモークメータ、およびインライン式の光透過式スモークメータである。各装置の詳細は関連する章において記述した。

## 2.3 台上試験装置

ディーゼル排気微粒子の測定実験において、車輛ベース試験を主として行なうための共通試験設備の中心的なものとして、始めに、供試車輛および負荷試験装置を含む台上試験装置について記述する。

### 2.3.1 供試車輛と試験運転モード

供試車輛としては、燃焼室形状および排気量などが異

なる小型ディーゼル乗用車2台、および小型ディーゼルトラック車3台の計5種類の車をそれぞれの実験に応じて使用した。各試験車輛の仕様を表2・1に、また、図2・2に走行実験中の試験車輛を一例としてそれぞれ示す。

排気微粒子の排出特性は、車輛の走行状況に依存するため、定常運転条件によりその基本排出特性を調べるとともに、都市内走行状況を反映した試験運転モードにより測定を行なう必要がある<sup>(48)</sup>。

図2・3は、代表的な試験運転モードである10モードサイクルの運転パターンを示す。1サイクル135secで平均速度は17.7km/hと低い特徴がある。本研究では、過渡運転時の微粒子排出濃度を連続測定する際には、専ら本運転パターンを利用した。

表2・1 供試試験車輛の主な仕様

車種	乗用車	乗用車	トラック	トラック	トラック	
表示記号	2.2-SC	1.8-SC	3.3-DI	3.3-SC	3.4-DI	
車 両	型式	K-R400	N-CE71V	K-TLD26NA	N-MH40	PBU-62MDD
	定員(人)	5	2/(5)	3	3	3
	車両重量(kg)	1350	985	1870	1915	1910
	最大積載量(kg)	—	400	2000	2000	2000
	車両総重量(kg)	1625	1495	4035	4080	4075
機 関	型式	SD22	1C	4BC2	ED30	13B
	燃焼室型式	渦流室式	渦流室式	直噴式	渦流室式	直噴式
	サイクル数	4	4	4	4	4
	総排気量(cc)	2164	1839	3268	3298	3431
	変速機	手動5速	手動5速	手動5速	手動5速	手動5速
	最高出力 (PS/rpm)	65/4000	65/4500	100/3500	96/3600	100/3400
最大トルク (kg·m/rpm)	14.2/1800	11.5/3000	23.5/2200	22.5/2000	24.0/2200	

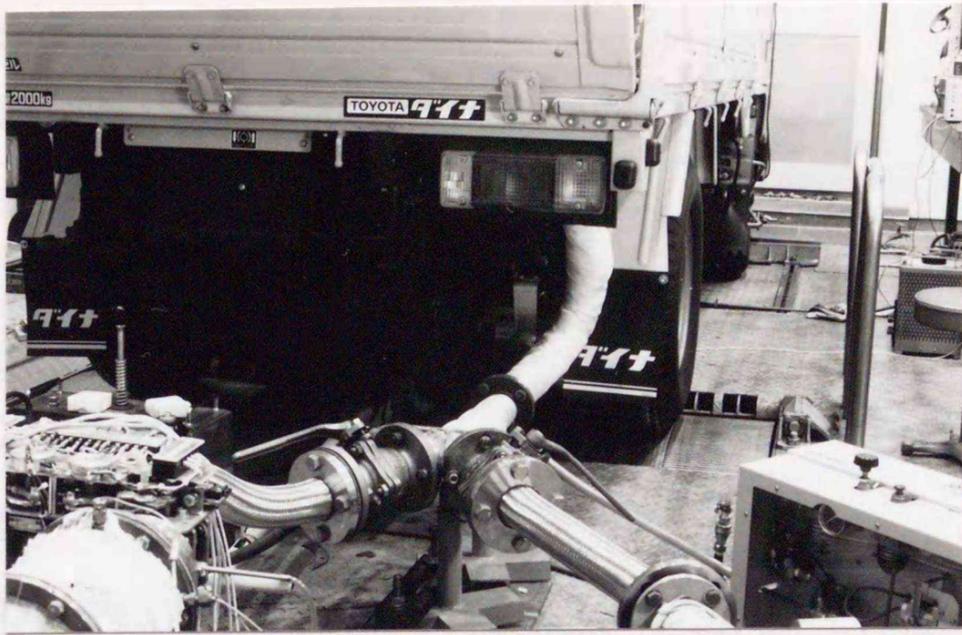


図2・2 台上運転中の試験車

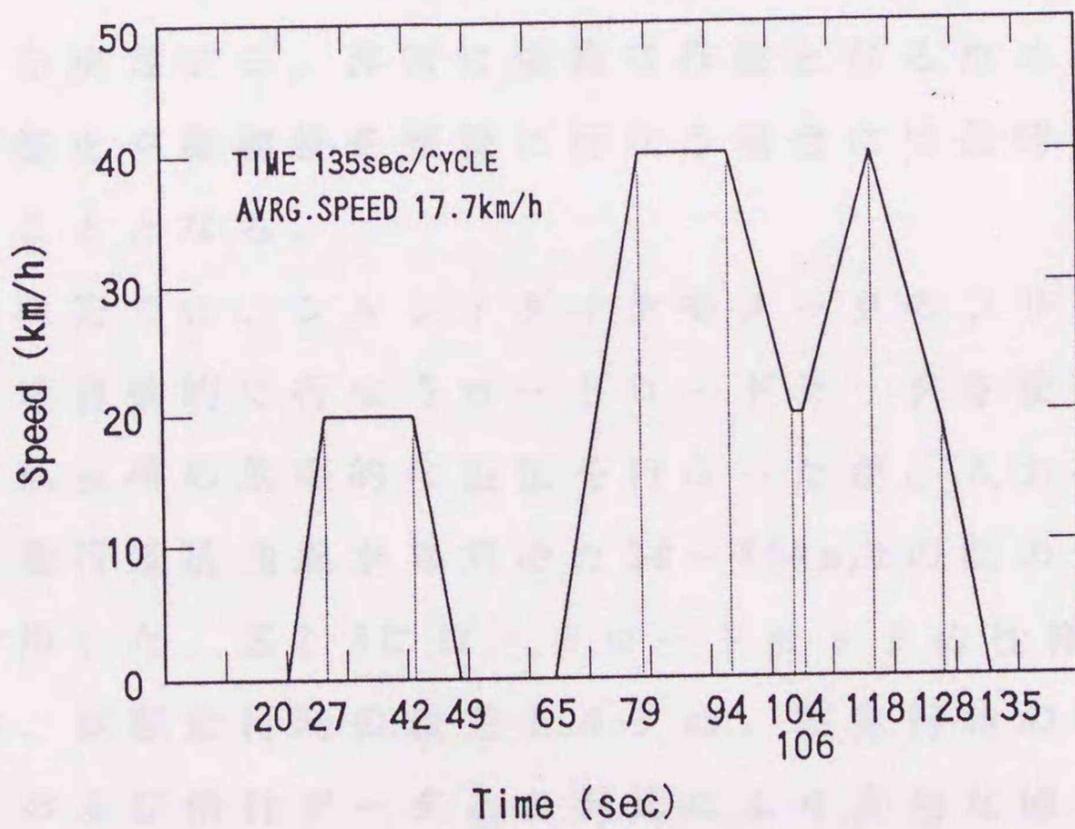


図2・3 10モードサイクルの運転パターン

### 2.3.2 負荷試験装置

本研究では、車輛ベースの測定試験を行なうための負荷試験装置としてシャシダイナモメータを使用した。これは、ドラム外径1591mmのシングルローラ式で、吸収動力40kWの直流電気動力計が接続されている。表2.2に、その主な仕様を示す。

シャシダイナモメータを用いた走行試験においては、路上で走行する車輛と同等の走行抵抗をローラに発生させるため、車輛に対する勾配抵抗、転り抵抗、空気抵抗、あるいは慣性抵抗を、動力計により補償する必要がある。一般には、試験車輛の重量、転り抵抗係数、空気抵抗係数、および全面投影面積などから、試験車の種類毎にロードロードカーブ（走行抵抗曲線）を算出して、設定トルクを決定する。非常に煩雑な作業となるために、設定値の修正や微調整を頻繁に行なう場合には長時間を消費することとなる。

本研究では、シャシダイナモメータのフリクション補正を自動的に行なうロードロードセッタを使用して、走行抵抗値の効率的な設定を行なったが、入力値としては、走行抵抗曲線から求めた20~80km/hの間の走行抵抗値を用いた。表2.3にロードロードセッタの仕様を示す。なお、試験走行時の設定トルクは、実走行時の燃料消費量、および惰行データとの対比により妥当な値であることを確認した。

表 2・2 シャシダイナモメータの仕様

項 目	設 定 範 囲
ドラム外径	1591mm
最高仕様速度	200km/h以下
動力計	直流電気動力計 吸収 40kW 駆動 35kW
被試験車	
車種	四輪装輪車
総重量	500~2500kg
軸重	1500kg以下
寸法	
軸距	1600~3000mm
軸距	1000~1800mm
全長	5550mm
全幅	2000mm
等価慣性重量	
高速側	530~1530kg
低速側	661~2661kg

表 2・3 ロードロードセッタの仕様

設定方式	多点設定式 (A)、方程式方式 (B)
設定数	(A) 15点, 32種類、(B) 30種類
設定単位	kgf、PS、kgm、sec、HP、N、kw
速度設定範囲	0~999.9km/h or mile/h
登降坂抵抗	0~±39.9deg.
慣性重量設定 慣性重量補正量	kg、lb (4桁) 0.00% (W×00.0%)
計測精度	速度分解度1/100km/h、時間精度1/100sec

## 2.4 希釈風洞装置

### 2.4.1 希釈風洞による微粒子の採取

現在、ディーゼル排気微粒子の最も基準的とされる測定法として、希釈・フィルター捕集法が一般に採用されている。これは、この方法が既にパーティキュレートの規制を実施している米国などにおいて実績を有していることのほか、希釈サンプリングを行なうことにより水などの凝縮防止と排出ガスの冷却効果とが同時に得られるためである<sup>(49)</sup>。また、本方法によれば、実際に自動車から排出された排気微粒子が大気中に拡散していく過程に近い状態での測定が行なわれることも利点の一つとなる。

本研究では、フィルター捕集法、および振動天秤法による微粒子濃度の測定において、排気微粒子の希釈サンプリングを行なう目的から、米国EPAの規格に準拠した大型希釈風洞を使用した。

### 2.4.2 希釈風洞装置の仕様

希釈風洞の満たすべき条件としては、希釈空気と排気ガスとが十分に混合すること、風洞内において希釈排気ガス中の水分が凝縮しないこと、微粒子が風洞内部に付着しないことなどが最も重要な事項となる。このためEPAでは、前章の表1.4に示すように、風洞内レイノルズ数、内径、捕集温度、および希釈混合距離などを規定している。本研究で使用した希釈風洞装置は、ほぼこれらの規定を満たすよう設計を行なった。

図2・4は、希釈風洞装置の概略構造を示したものである。直管部の長さは約3750mm、風洞の内径は400mmである。希釈用空気取入口には高性能フィルター、活性炭フィルター、および超高性能フィルターを備えている。加熱用ヒータの容量は30kwで、排気導入孔直前において希釈用清浄空気を加熱する。希釈風洞内流量は、吸引プロアとソニックノズルにより $20\text{m}^3/\text{min}$ 一定に制御されている。管内流速は約 $2.7\text{m}/\text{sec}$  ( $Re$ =約76000)で、EPAの規定を十分満たしたものである。

排気ガスは、加熱・保温された排気導入管により排気導入孔に導かれ、清浄空気により希釈される。本研究で使用した試験車輛の排気量範囲では、希釈比は7~20程度となる。希釈排気ガス温度は、希釈空気および加熱用ヒータにより約 $52^\circ\text{C}$ 以下になるよう制御される。そして、排気導入部には、導入した排気ガスの風洞内での拡散を促進するために、孔径300mmの混合オリフィスが配置されている。図2・5に希釈風洞装置の外観を示す。

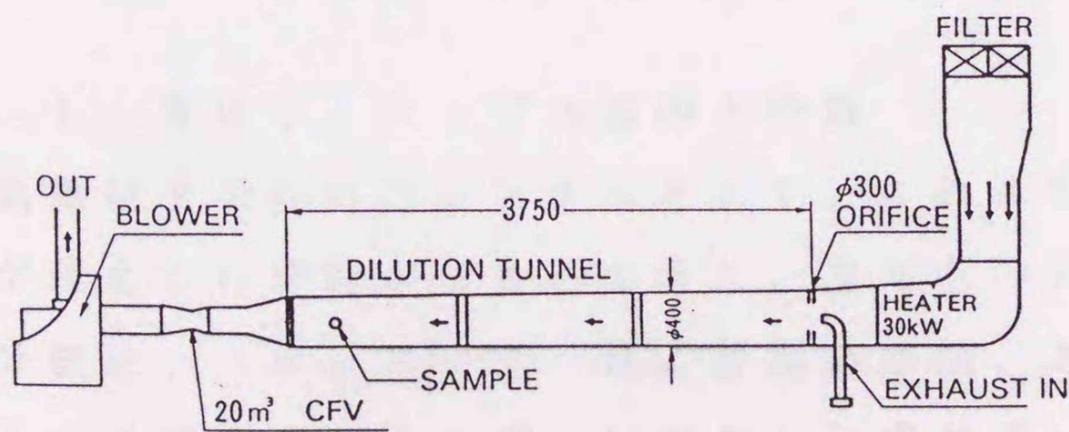


図2・4 希釈風洞の概略構造

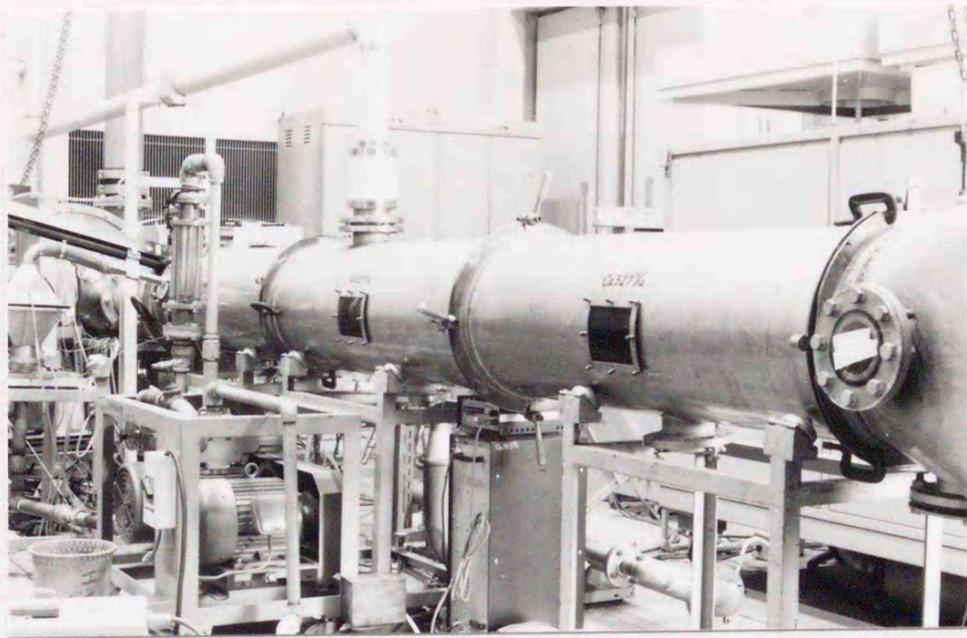


図2.5 希積風洞装置の外観

## 2.5 微粒子トラップ装置の選定

低濃度域での微粒子濃度測定に供試する微粒子トラップの選定を目的として、ここでは各種微粒子トラップの特徴や捕集性能について検討を行なった。また、微粒子トラップの代表的な実用条件である再燃焼時の温度や排気ガス中の酸素濃度などについて、供試車輻による運転実験を行なって検討した。

### 2.5.1 微粒子トラップの種類と特徴

排気微粒子の後処理システムとして、これまで種々の方法が考えられ研究がなされてきた。主なものとして、円心分離法、(水)スクラバ法、静電集塵法、あるいはオイルバス法などがあるが、いずれも効率が悪い、あるいはディーゼル車の排気処理装置としては実用的でない

などの理由から実用化には至らなかった。今日では、排気管系に挿入したフィルターに排気微粒子を捕集（トラップ）する微粒子トラップ法が開発され、現時点で最も有望な方法として多くの研究がなされるに至っている。

微粒子トラップ法におけるフィルターの材質には、セラミックファイバー、セラミックフォーム、ウォールフローセラミックモノリス、メタルメッシュなどが考えられている。そしてこれらの中で、微粒子の捕集効率、捕集微粒子の再燃焼時における耐熱性、触媒担持の容易性、サービス性などの理由からウォールフロータイプのセラミックモノリストラップが最も有望視されている<sup>(50)</sup>。

図2・6は、本研究の中で検討した形状、材質の異なる3タイプの微粒子トラップの外観である。図2・6(a)は、円筒型のコージライトハニカムタイプ（以下、CHタイプと略す）のものであり、図2・7に示すように、コージラ

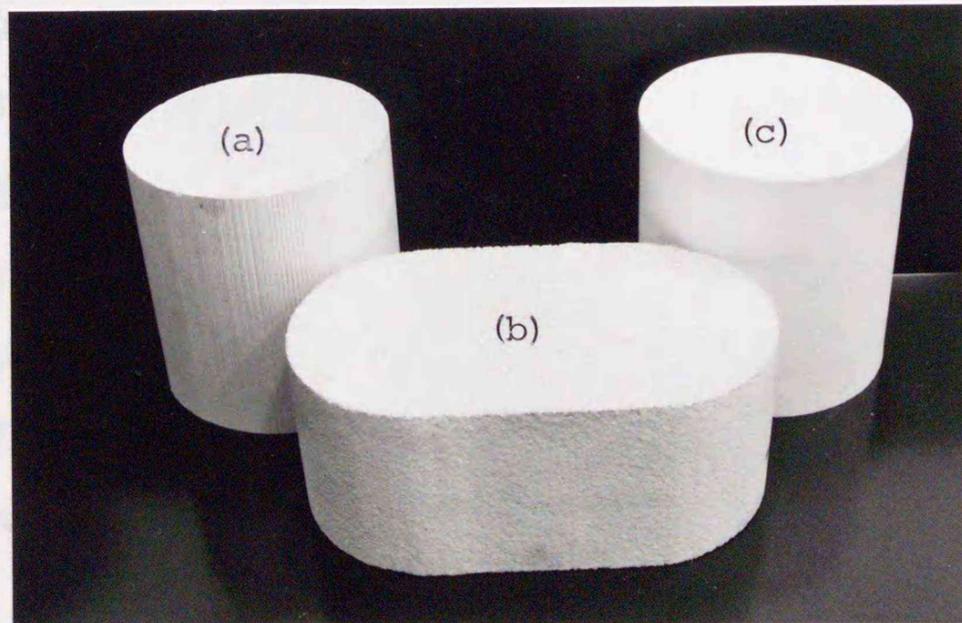


図2・6 微粒子トラップの外観

イト多孔質によるモノリス構造で、円筒型の内部は正方形の筒が多数並んだ形状をしており、それぞれの筒は両端部で交互に目詰めされた構造となっている。排気ガスは入口に開いた筒口より入り、薄壁（リブ）を通り抜けた後、出口側に開いた筒口より出ていく。排気ガス中の微粒子は、リブを通過する際にリブ内の細孔およびその表面に直接遮られ、あるいは拡散吸着により捕捉される。

図2・6(b)は、レーストラック型のコージライトフォームタイプ（以下、CF）のもので、厚みのあるスポンジ状セラミックであって差圧上昇が少ないという特徴がある。図2・6(c)は、円筒型のムライトファイバー（以下、MF）タイプのもので、ムライト繊維を紙状に漉いてハニカム構造としたものである。図2・8のように、円筒状の芯に波状に巻上げ、筒状のセルの両端部を交互に目詰めしている。このタイプの微粒子トラップは空隙率が大きく、しかも捕集効率が高いという特徴を持っている。

表2・4は、本研究でを使用した3タイプ7種類のセラミック微粒子トラップの主な仕様と特性を総括して示したものである。表中の記号CH-1、CH-2で示すグループの微粒子トラップは、セル形状が比較的小さくリブの薄い構造のものであり、CH-3、CH-4はそれよりセル形状が大きく（セル数が半分）、リブ厚さが約1.5倍のものである。

また、CH-1およびCH-3のグループはリブ細孔径が比較的大きく、CH-2およびCH-4のグループはそれに比べて細孔径が小さい。フォームタイプのCF-1およびCF-2は、比

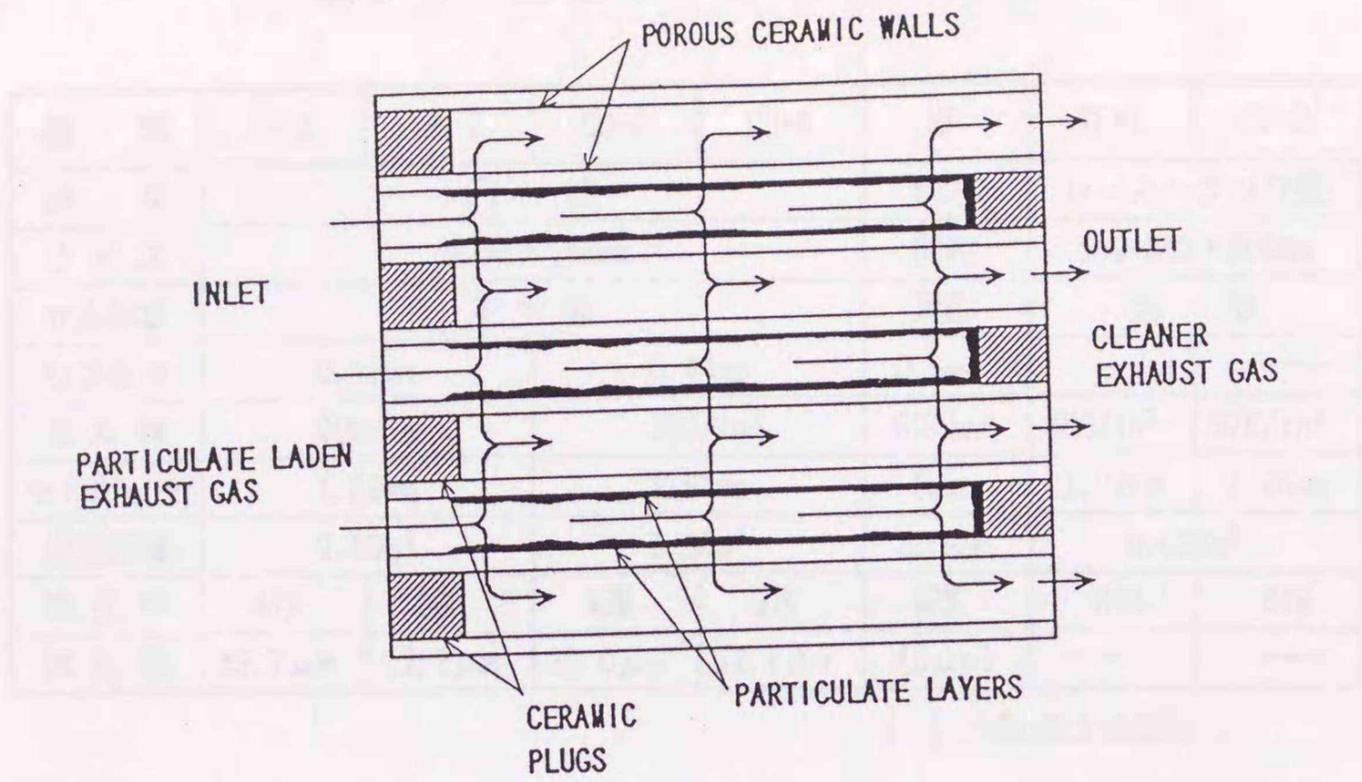


図 2.7 ハニカムタイプの内部構造

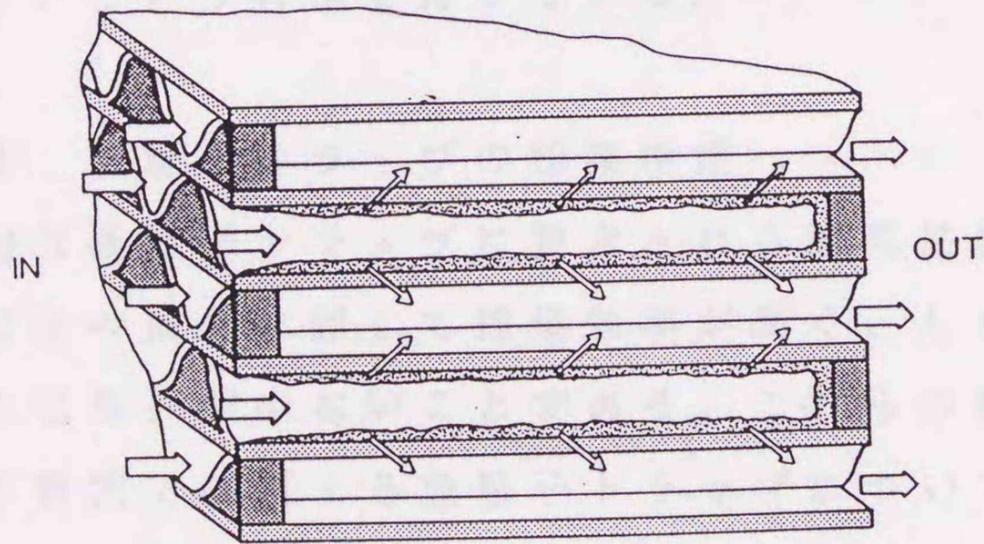


図 2.8 ムライトファイバータイプの構造

表 2・4 微粒子トラップの仕様

種類	CH-1	CH-2	CH-3	CH-4	MF	CF-1	CF-2
形状	円柱				同左	レーストラック型	
サイズ	φ144×178mm				同左	140-240×100mm	
セル形状	正方形				扇形	泡状	
リブ厚さ	0.32mm		0.44mm		0.5mm	—	—
セル数	200/in <sup>2</sup>		100/in <sup>2</sup>		80/in <sup>2</sup>	400/in <sup>2</sup>	576/in <sup>2</sup>
セルピッチ	1.82mm		2.54mm		5mm	1.27mm	1.06mm
濾過面積	2.60m <sup>2</sup>		1.88m <sup>2</sup>		2.09m <sup>2</sup>	0.025m <sup>2</sup>	
気孔率	47%	50%	46%	50%	89%	85%	84%
細孔径	53.7μm	12.1μm	33.0μm	12.1μm	(3μm)	—	—

( ) 内数値は繊維径

較的目の粗い構造のものであるが、CF-1はCF-2に比べてより粗な構造となっている。一方、MFタイプのもものは繊維を漉いた構造のため、他のタイプのものに比べて空隙率が大きいという特徴を持っている。

## 2.5.2 微粒子トラップの捕集性能

理想的な微粒子トラップに要求される捕集性能としては、微粒子の捕集に際して捕集効率が高く、しかも圧損（差圧の増加）が少ないことである。これらの観点から、以下、本研究で使用する微粒子トラップについて検討を試みた。

図 2・9は、各タイプの微粒子トラップについて、捕集時間と圧損の関係を示したものである。いずれの微粒子トラップも捕集開始直後に急激な差圧の上昇が見られる

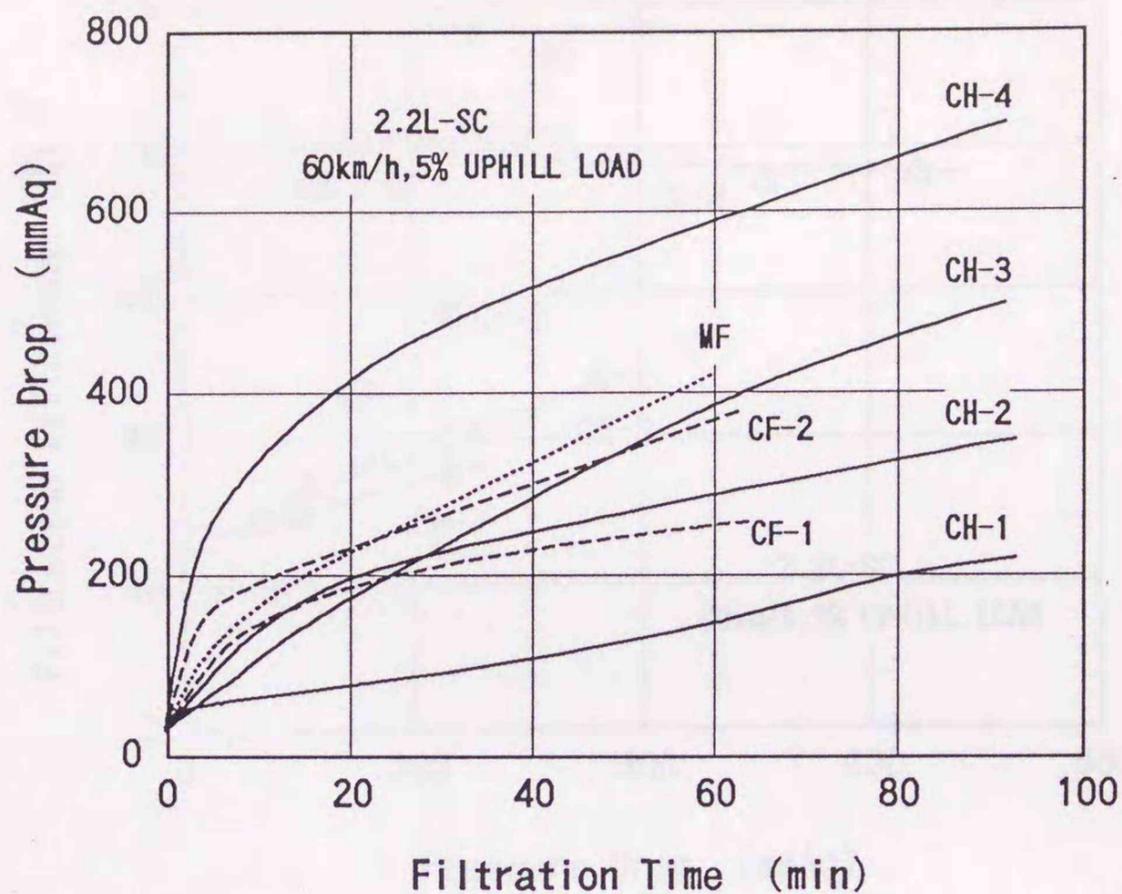


図2・9 捕集時間と差圧上昇

が、次第に緩やかになり、その後はほぼ一定の上昇率となる。とくに、リブが厚く細孔径の小さいCH-4では、初期差圧およびその後の差圧上昇が最も大きくなる。CHタイプの差圧上昇率について着目すれば、CH-3とCH-4が高くCH-1とCH-2が低くなる。また、それぞれのグループの上昇率についてはほぼ同様の値となる。この結果、差圧の増加が少ないという観点からは、CH-1、CH-2、あるいはCF-1の使用が適当と考えられる。

図2・10は、各微粒子トラップの差圧と捕集効率との関係を示したものである。MFタイプは捕集効率が最も高く、CH-2、CH-4がそれに続き、CH-1、CH-3は最も低くなる。

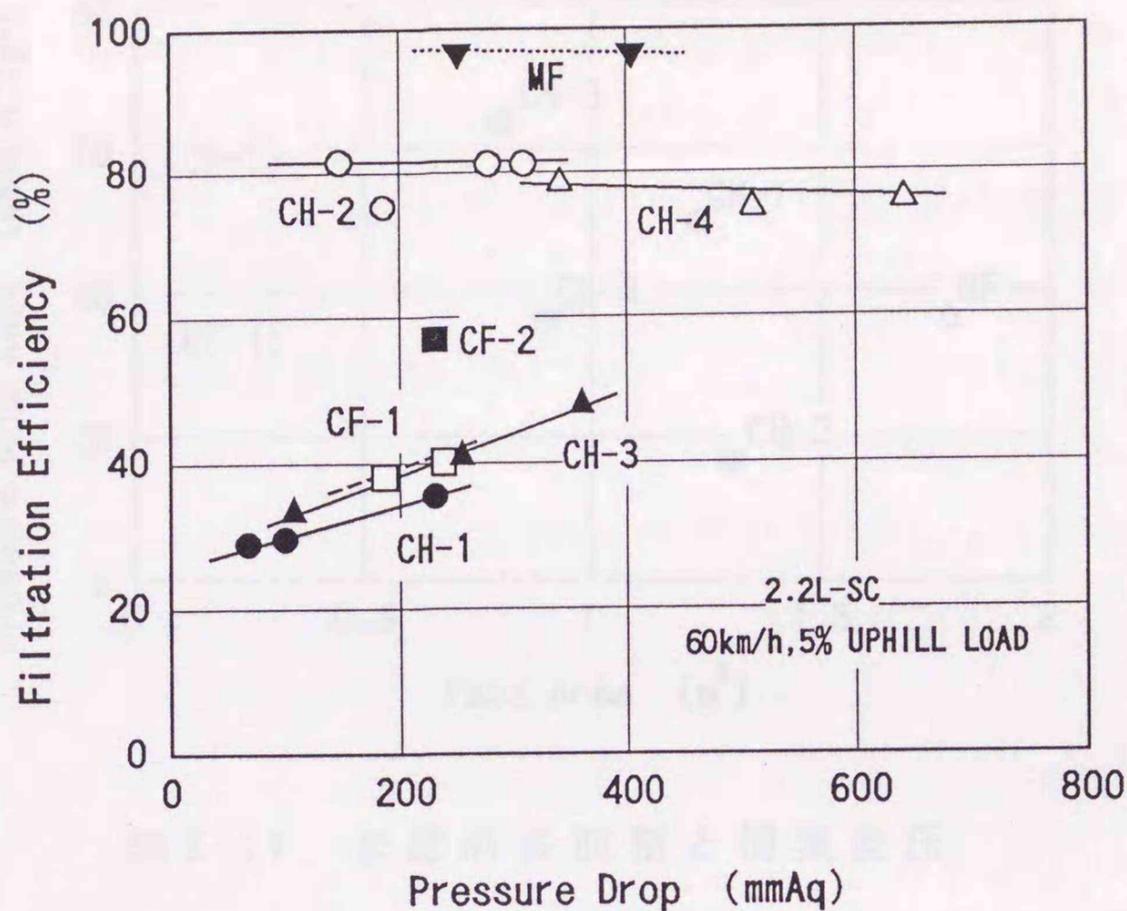


図2・10 各微粒子トラップの捕集効率

CFタイプはCHグループの中間に位置する。また、CH-2、およびCH-4のグループでは、差圧の変化に対して捕集効率が一定となっているのに対して、CH-1、CH-3のグループでは、捕集効率がさらに上昇する傾向にある。CHタイプの捕集効率について着目すれば、リブ細孔径の小さいCH-2およびCH-4が最も高い捕集効率を示す。

これらの結果、捕集効率の観点からはCH-2、CH-4およびMFタイプの使用が適当と考えられる。

以上の結果から、捕集効率および差圧上昇の両面において、供試した微粒子トラップの中では、CH-2が最も適当な選択と考えられる。図2・11は、この結果を検証する

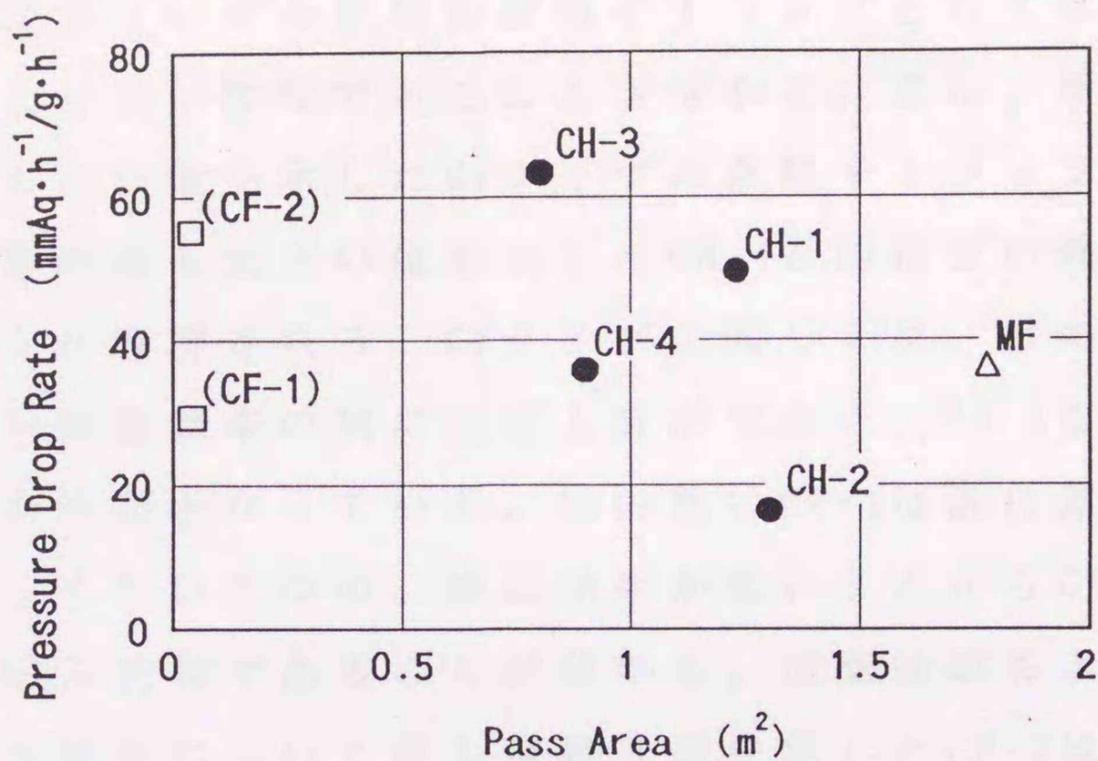


図 2・11 全濾過表面積と捕集差圧

ために、捕集効率および差圧上昇の両者を包括したパラメータにより、各微粒子トラップの性能を評価したものである。横軸に採用した全濾過表面積は、濾過面積と空隙率の積で求められ、微粒子トラップの代表的な特性を表すパラメータの一つである。縦軸は、差圧上昇率と単位時間当たりの捕集重量（捕集効率に等価）から求められる捕集差圧であり、微粒子トラップにおける差圧性能と捕集効率の両方を包括した値である。従って、理想的な微粒子トラップの性能としては、捕集差圧の小さいものすなわち縦軸の最も下方に位置するものが好ましい。

まず、CHタイプの性能について着目すると、濾過面積が大きく細孔径の小さいCH-2タイプが最も好ましい特性を有しており、反対に濾過面積が小さく細孔径の大きい

CH-3はディーゼル車用の微粒子トラップとしてはあまり好ましくない性能であることが分かる。また、捕集効率が最も高い値を示したMFタイプの微粒子トラップは、差圧上昇の最も大きい値を示したCH-4と同程度の性能であることが理解される。CFタイプに関しては、目の細かいCF-2が捕集効率の割に差圧上昇が大きく、CH-1とCH-3の中間の性能となっている。目の粗いCF-1は逆に差圧上昇は大きくないものの、捕集効率が低いことからCH-4を僅か上回る性能であることが分かる。捕集効率および差圧上昇の両面において最も良好な値を示したCH-2は、本図の結果からも最適な性能を保持しているものと判断される。

以上の検討結果を総合して、本研究では、排気微粒子の低濃度排出条件時の実験を行なうための排気処理装置として、コージライトハニカムタイプの微粒子トラップCH-2を選定して供試した。。

### 2.5.3 微粒子の再燃焼条件に関する検討

微粒子トラップを実用化するためには、捕集微粒子を再燃焼により除去する再生技術の確立が必要である。微粒子トラップに捕集された排気微粒子は、排気ガス中の酸素濃度と排気ガス温度とが微粒子の再燃焼条件を満たしたとき、トラップ上でそれらが燃焼して気体となって流出する。従って、ディーゼル車の運転条件と排気ガス中酸素濃度および排気ガス温度の間の関係を調べ、捕集

微粒子の再燃焼条件を検討することが重要となる。

図2・12は、ディーゼル排気微粒子の再燃焼条件を明らかにするために、その熱重量特性を調べた結果について示したものである。本方法では、微粒子試料を一定速度で加熱昇温して、その時の試料の重量変化を連続的に測定した。

雰囲気酸素濃度を変化させた場合には、酸素濃度が減少するにつれて重量減少が遅くなる傾向にある。昇温開始から400℃以下の温度の範囲では、排気微粒子中の蒸発成分のみの蒸発による重量減少が起こり、その後、約500℃前後の温度域においてすす（ドライスタート）の燃

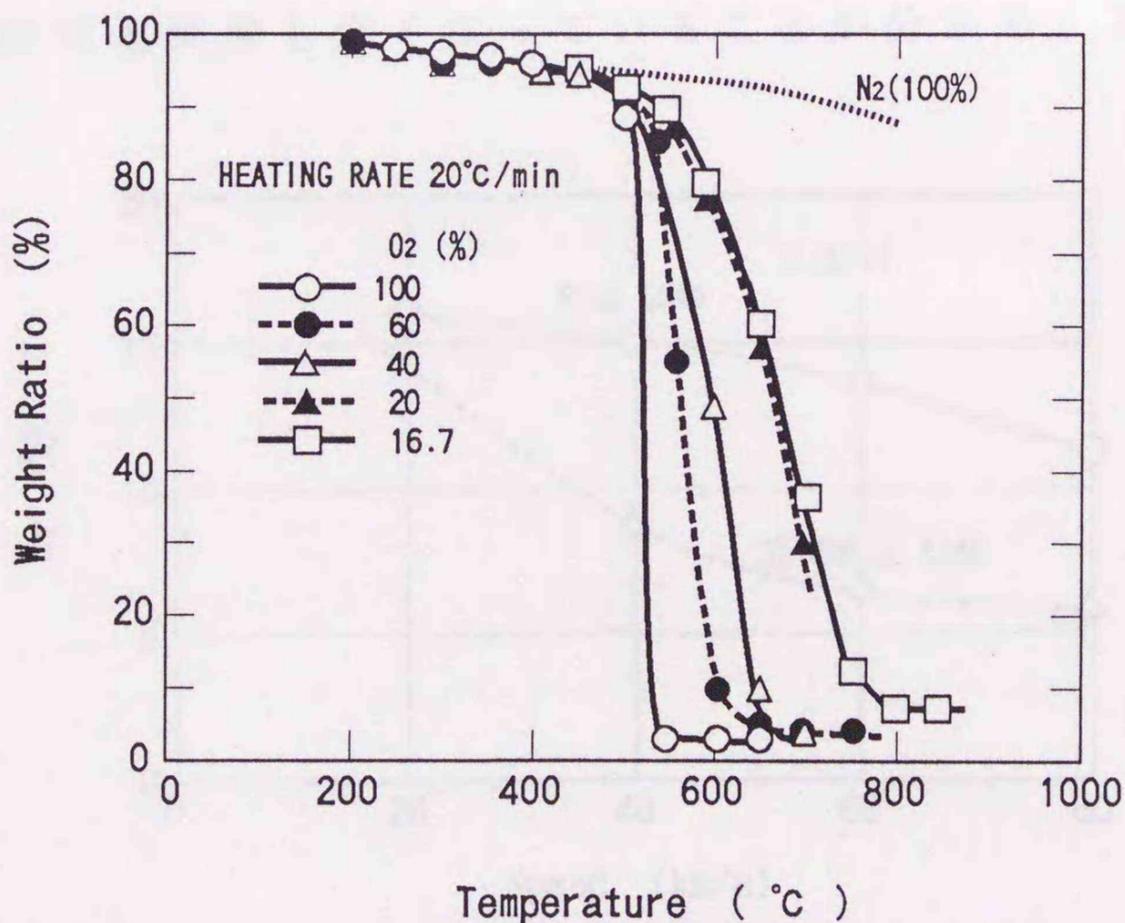


図2・12 排気微粒子の熱重量特性

焼に起因する重量減少が観察される。微粒子の燃焼開始温度は、酸素濃度には殆ど関係なく、ほぼ500~550℃であるが、燃焼速度は酸素濃度が低いときほど遅くなる傾向にある。これらの結果をもとに、本研究でを使用した試験車輛により、運転条件の変化と排気ガス温度および酸素濃度の関係について調べて見た。

図2・13は、運転条件を変化させたときの排気ガス中酸素濃度を調べた結果を示したものである。車速が高くなるに従い負荷が増加し、空気過剰率が小さくなる傾向にあるために酸素濃度は減少する。登板走行時の酸素濃度は道路負荷運転（平坦地走行）時の結果に比べて大幅に低下しており、このような運転条件のときには、負荷が高く空気過剰率も低くなっていることが分かる。この結

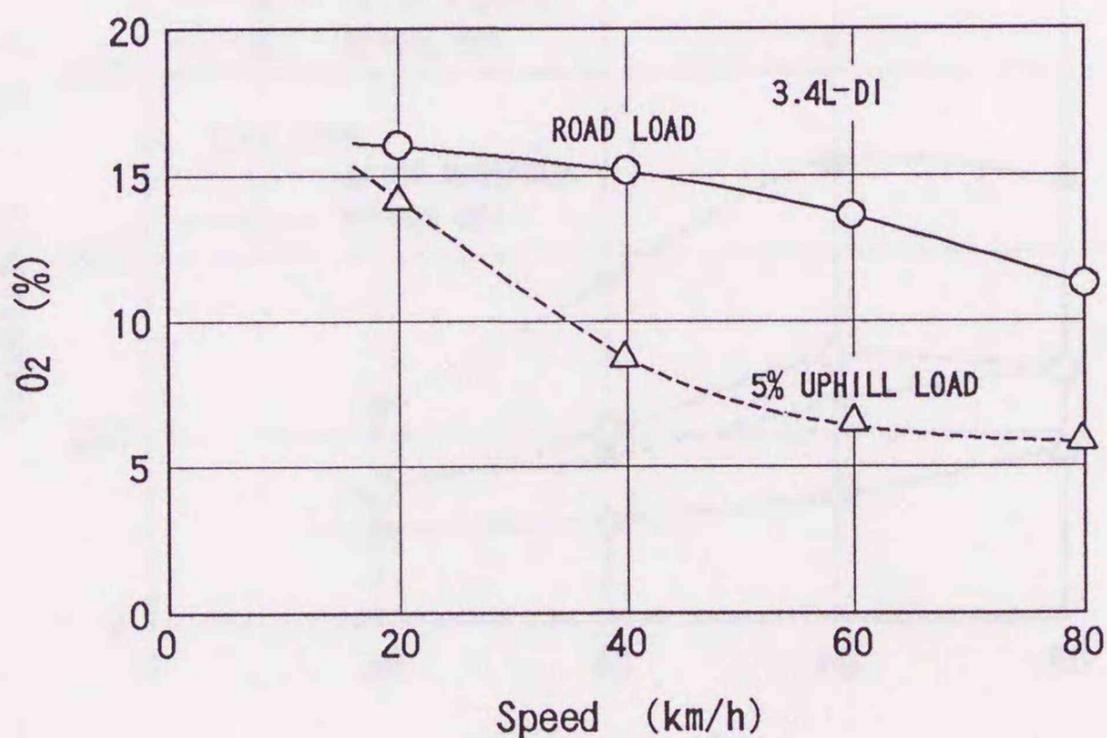


図2・13 運転条件と排気ガス中酸素濃度

果から、通常の走行条件においては排気ガス中酸素濃度は概ね5~15%程度であることが分かる。

図2・14はこの時の排気ガス温度の変化を示す。排気マニホールド直下およびテールパイプ後方約1mの位置に取り付けた微粒子トラップの入口側温度を測定したが、道路負荷運転時には、排気ガス温度はマニホールド直下で約200~300℃、トラップ入口部では100~200℃程度となる。登板走行時には、排気マニホールド直下において排気ガス温度が約500℃前後に達するが、トラップ入口部温度は250~300℃で、再燃焼開始温度には至っていない。

これらの結果から、本実験の運転中には、排気中には

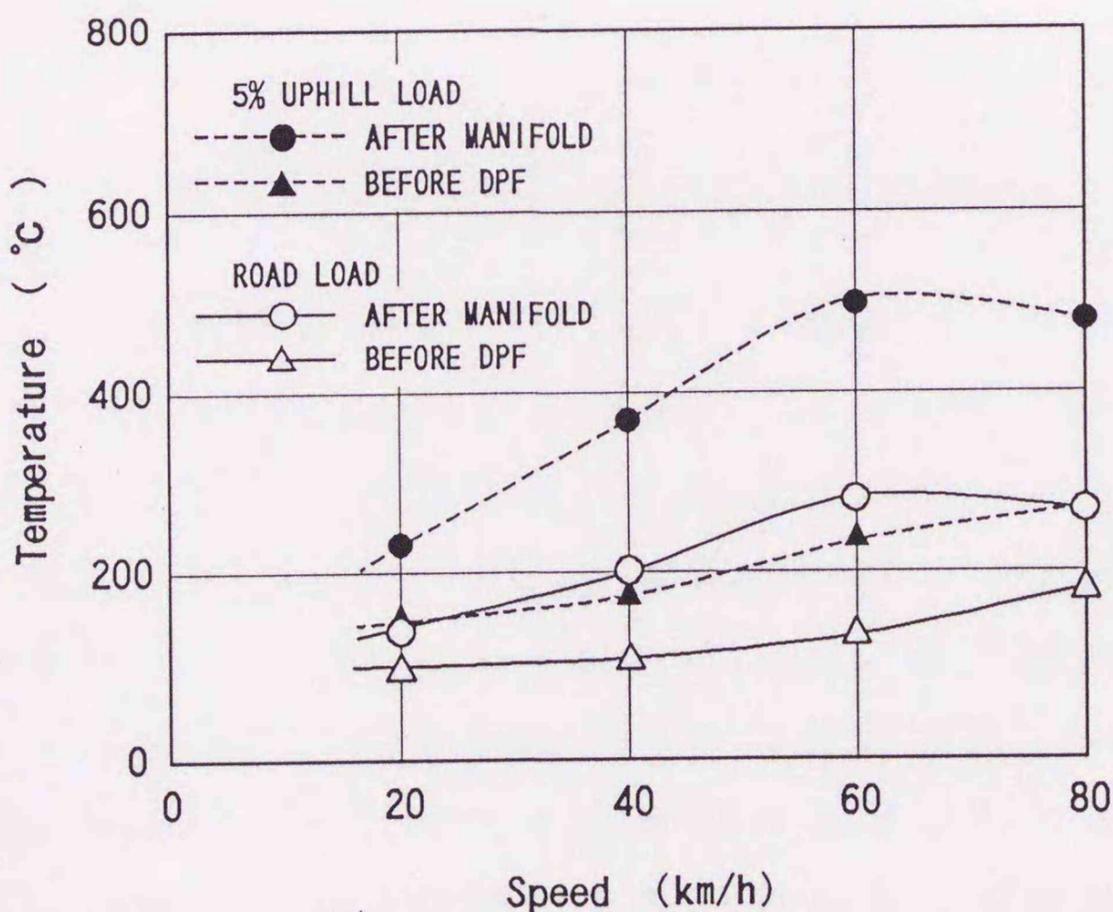


図2・14 運転条件と排気ガス温度

ほぼ十分な酸素濃度が存在しているものの、燃焼開始に必要な温度に至っておらず、捕集微粒子の再燃焼は起こっていないと判断される。従って、本研究では補助点火の手段として、加熱ヒータ方式を採用して供試した微粒子トラップを繰り返し再生使用することとした。

## 2.6 本章における結論

本章では、研究において使用した主要な実験装置について記述したが、研究を行なう上で予備的に実施した、いくつかの試験において得られた結論は、およそ以下の通りである。

- (1) 走行抵抗の制御方法に関して、シャシダイナモメータのフリクション補正を自動的に行なうロードロードセッタを使用した効率の良い走行抵抗の設定方法を提示した。
- (2) セラミックアップフィルターを用いた微粒子トラップ装置の捕集性能について種々の検討を行なった結果、低濃度排出条件時の測定を精度良く行なうための排気処理装置として、濾過面積が大きく細孔径の小さいコーヂライトハニカムタイプの微粒子トラップが適していることを見出した。
- (3) 微粒子トラップの再生条件に関する検討の結果、一度トラップに捕集された微粒子の燃焼が開始する温度は、酸素濃度には殆ど無関係で、ほぼ500~550℃となること。また、燃焼速度は酸素濃度が低いほど遅くなる傾向にあるが、排気中酸素濃度に関しては通常の運転条件の中でほぼ満足されること。しかし燃焼開始に必要な温度は、通常運転の負荷範囲では得られないことが確認された。従って、本研究では補助加熱ヒータ方式を採用して、供試した微粒子トラップを繰り返し再生使用することとした。

## 第3章 排気微粒子の重量濃度の測定

### 3.1 緒 論

ディーゼル排気微粒子の重量濃度を測定する方法として、現在、希釈・フィルター捕集法が一般に採用されている。この方法は、現時点で最も基準的な測定法とされているものの、大型設備や煩雑な手順を必要とするほか、測定が間欠的で結果を得るまでに長時間を要するなど、試験効率の低さが問題となっている<sup>(51)</sup>。このため、今日では、効率的な測定方法の開発を目的として、ディーゼル排気煙の迅速かつ簡便な測定方法の研究が行なわれるようになってきている。

しかし一方では、フィルター捕集法は、これら新しい測定法の評価ならびに性能の確認、あるいはディーゼル排気規制の導入に先立つ排出量評価や排気処理装置の開発ならびにそれらの性能確認など、基礎的な研究を行なっていく上で、最も信頼性のある基準測定方法として確立されていく必要がある。

第3章では、希釈・フィルター捕集法について、それらの装置の構成ならびに計測方法の詳細について記述するとともに、信頼性向上を目的として行なった基礎実験の結果、および種々の運転条件下における微粒子濃度の測定結果について論述する。

まず、使用する濾紙の選定や最適採取条件について検討し、次いで、検討結果をもとにしたフィルター捕集法

の測定例として、運転条件と微粒子排出濃度の関係について調べて見た。最後に、ディーゼル排気微粒子の簡易測定が可能な装置をいくつか選定して、フィルター捕集法との比較測定を行なった。

### 3.2 微粒子採取装置、および計測方法

希釈・フィルター捕集法によりディーゼル排気微粒子を採取する際の装置の外観を図3.1に示す。主な装置としては、吸引ノズル、濾紙および濾紙ホルダー、流量計、および吸引ポンプなどで構成されている。これは、希釈風洞に導入されたディーゼル排気微粒子を、風洞内に挿入された採取用吸引ノズルから濾紙上に吸引して、濾過捕集するものであって、捕集前後の濾紙重量を秤量して

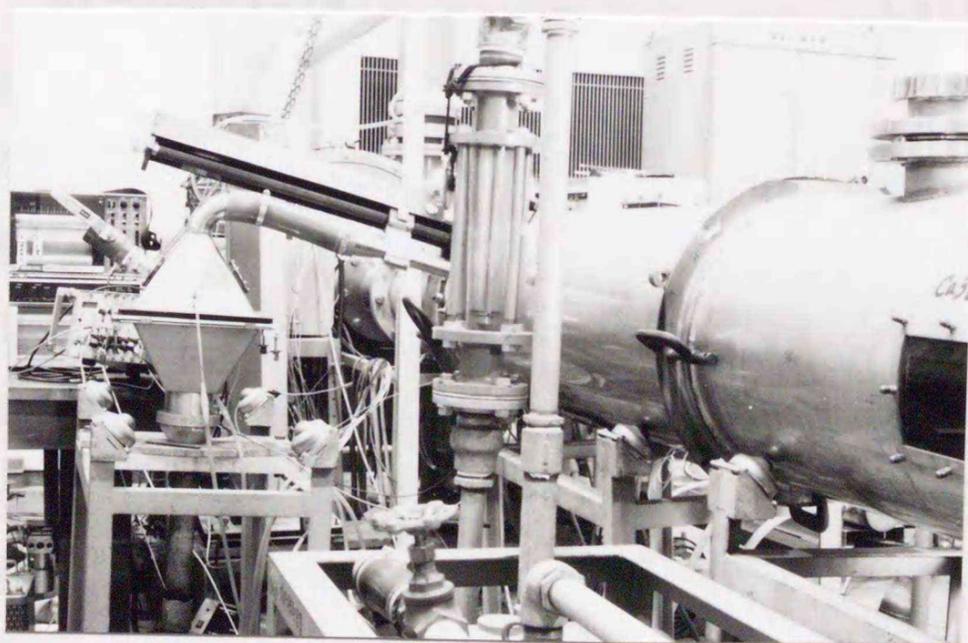


図3.1 微粒子採取装置の外観

求めた微粒子重量とこの時の試料採取量から、重量濃度を算出する。

すなわち、捕集前後の濾紙重量をそれぞれ $W_0$ 、 $W_1$ 、捕集微粒子重量を $W_c$  (Weight-collected)、濾紙吸引流量を $q_s$ 、採取時間を $t_s$ とすれば、希釈風洞内における重量濃度 $C_t$ は、

$$C_t = (W_1 - W_0) / q_s t_s \quad (3.1)$$

$$= W_c / q_s t_s \quad (3.2)$$

で算出される。また、希釈風洞の希釈率 $R$ から、直接重量濃度 $C_e$ は、

$$C_e = C_t R \quad (3.3)$$

となる。さらに、モード運転時の排出量評価に必要な単位走行距離当たりの排出重量 $M_e$  (Mass Emission Rate) は、希釈風洞内流量を $q_t$ 、モード運転時の走行時間および距離をそれぞれ $t_c$ 、 $d_c$ とすれば、

$$M_e = C_t q_t t_c / d_c \quad (3.4)$$

として求められる。

測定の手順は、(1)温度、湿度の管理された計量室内に一定期間放置された濾紙を秤量し、バックグラウンド重量を求める。(2)この濾紙をホルダーにセットして、一定時間、一定流量で排気ガスを吸引し、微粒子を濾過捕集する。(3)微粒子を捕集した濾紙を計量室内に一定期間放置した後、再び計量して捕集後重量を求める。(4)捕集前後の濾紙重量の差と、吸引流量と採取時間から求めた総吸引流量とから、排気微粒子の重量濃度を求める。

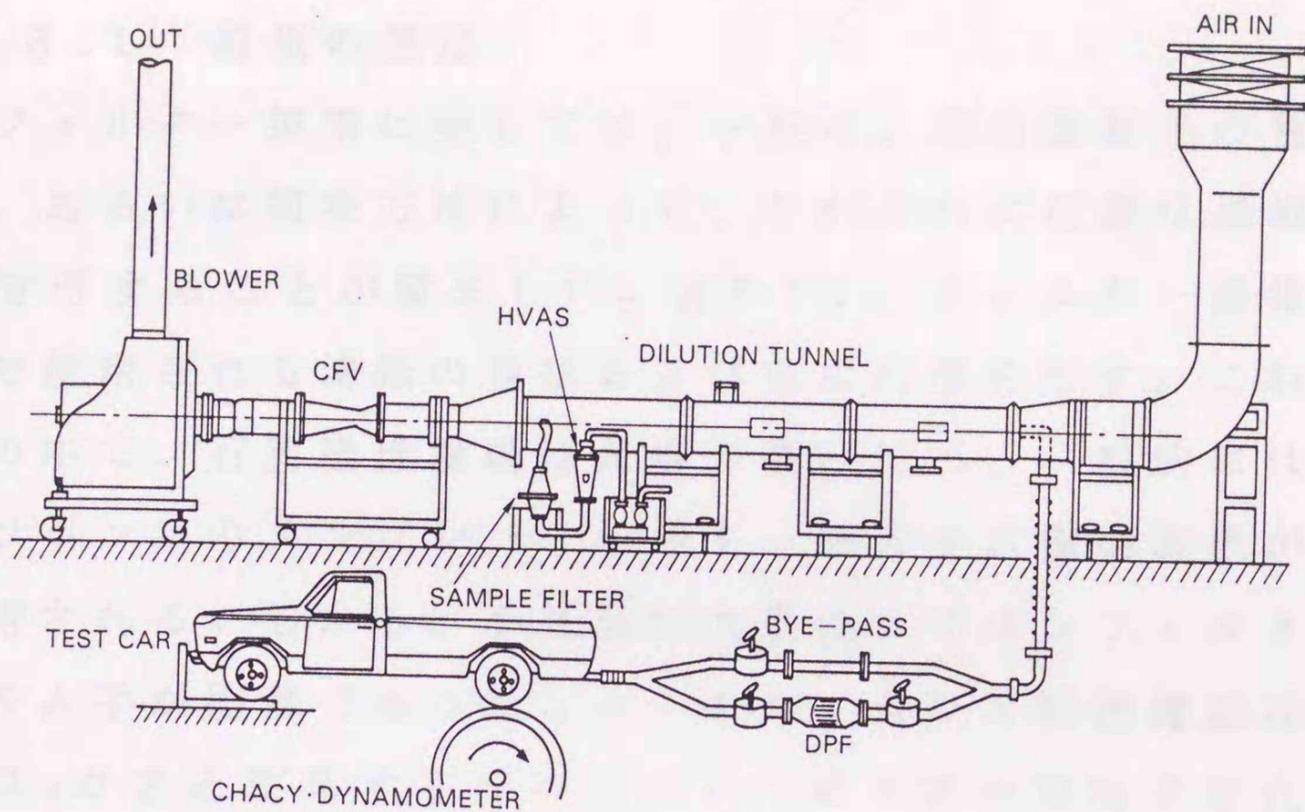


図3・2 微粒子採取装置の構成

濾紙の秤量は、温度、湿度の管理されている計量室内に設置された天秤を使用して行なう。

図3・2は、本希釈・フィルター捕集法により、微粒子採取実験を行なうための実験装置の構成である。捕集装置としては、直径47mmの円形濾紙を使用するロウボリウムエアサンプラ（LVA:Low Volume Air Sampler）と微粒子試料の大量採取を目的とした203×254mmの角型濾紙を使用するハイボリウムエアサンプラ（HVA:High Volume Air Sampler）とを採用した。

### 3.3 希釈・フィルター捕集法の信頼性向上

#### 3.3.1 濾紙の選定

フィルター捕集に際しては、一般に、捕集微粒子の種類、あるいは捕集方法によって、それぞれに最適な濾紙を使用することが望ましい。表3・1に、フィルター捕集法で使用される濾紙の種類および主な仕様を示す。これらの中で、石英繊維濾紙は価格が高いため、一般的には、テフロン系のメンブレンフィルターやガラス繊維濾紙が使用される。しかし、小孔径で大型のテフロンフィルターの入手が困難であったこと、また、ガラス繊維濾紙は $SO_2$ ガスと反応するため、ディーゼル排気微粒子を化学分析用試料として採取する場合には適当でないことなどの理由から、本研究では、吸湿性や耐熱性に優れ、化学的に最も安定な石英繊維濾紙を使用することとした。

表3・1 濾紙の種類およびその主な仕様

種類	繊維濾紙		メンブレン濾紙			
	石英繊維	ガラス繊維	セルロース	テフロン	ポリカーボネート	
寸法(mm)	203×254	φ47	φ55	φ47	φ55	φ47
厚さ(mm)	0.69	0.64	0.50	0.130	0.050	0.010
主な特徴	耐熱性・良 化学分析に適する 価格が高い	耐熱性・良 $SO_2$ と反応 入手容易	耐熱性に劣る 孔径が小さく捕集効率が高い 濾過抵抗が大きく目詰まりし易い			

### 3.3.2 微粒子試料の秤量方法に関する検討

フィルター捕集法により排気微粒子の重量濃度を測定するためには、捕集前後の濾紙の重量を正確に秤量することが必要である。しかし、濾紙の重量は測定室の温度、湿度あるいは捕集後濾紙に付着した水分、油分などの蒸発成分の影響を受けるために、その重量を安定して測定することが難しい。

捕集濾紙の秤量方法に関しては、例えばJIS Z 8808で規定する「排ガス中のダスト濃度の測定方法」においては、捕集前後に濾紙を105～110℃の温度で1時間乾燥後、デシケータ中で室温になるまで冷却し秤量することとしている。また、米国EPAが規定する「ディーゼル排気ガス中の粒子状物質の測定方法」においては、捕集前8時間以上56時間以内、計量室に放置した濾紙を秤量し、これを用いて捕集を行ない、捕集後は1時間以上56時間以内計量室に放置して、再び秤量することとしている。

本研究では、ディーゼル排気微粒子の正確で効率的な測定を行なう目的から、捕集前後の濾紙の調整を含めた秤量方法について詳細な検討を行なった。すなわち、捕集前濾紙の調整処理については、JISで規定する方法のほかに、計量室内に30分だけ放置した後に秤量する簡便法について、比較検討を行なった。その結果、いずれの方法によっても、質量変化割合は0.05%以内であったため、ここでは後者の簡便な方法を採用することとした。

捕集後濾紙の秤量方法に関しては、濾紙とそれに捕集

表 3・2 排気微粒子中の蒸発成分

車 速 (km/h)	微粒子捕集重量(mg)		排気微粒子中の 蒸発成分割合
	捕集直後	乾燥後*	
0	0.48	0.37	23.2 (%)
20	5.01	4.09	18.4
40	2.26	1.81	19.9
60	3.03	2.46	18.8

\*105°Cで1時間乾燥処理

された排気微粒子の重量とを測定することとなり、そこに含まれる水分など蒸発成分の影響が問題となる。

表 3・2は、排気微粒子中に含まれる水分がどの程度であるかについて、JIS Z 8808に準拠した方法で測定を行った結果を示す。定速走行条件での実験の結果では、約20%前後の蒸発成分が含まれていることが確認された。JISに規定される方法では、濾紙が十分に乾燥した状態で測定することとなっているが、水分、油分(SOFなど)を多量に含むディーゼル排気微粒子の付着した濾紙を完全に乾燥した状態にして測定することは容易でなく、実用的でない。そのため、ここでは排気微粒子に含まれる湿分が、大気中に放出されて平衡状態に達した時の状態と同一の条件で、その質量を測定することを基本とした。

図 3・3は、濾紙に排気微粒子を捕集した後の放置時間とその質量変化とを示すものである。採取時間が短く捕集量が少量の場合を除き、微粒子捕集後の濾紙の重量は、捕集後放置時間が約30min程度でほぼ一定となることが

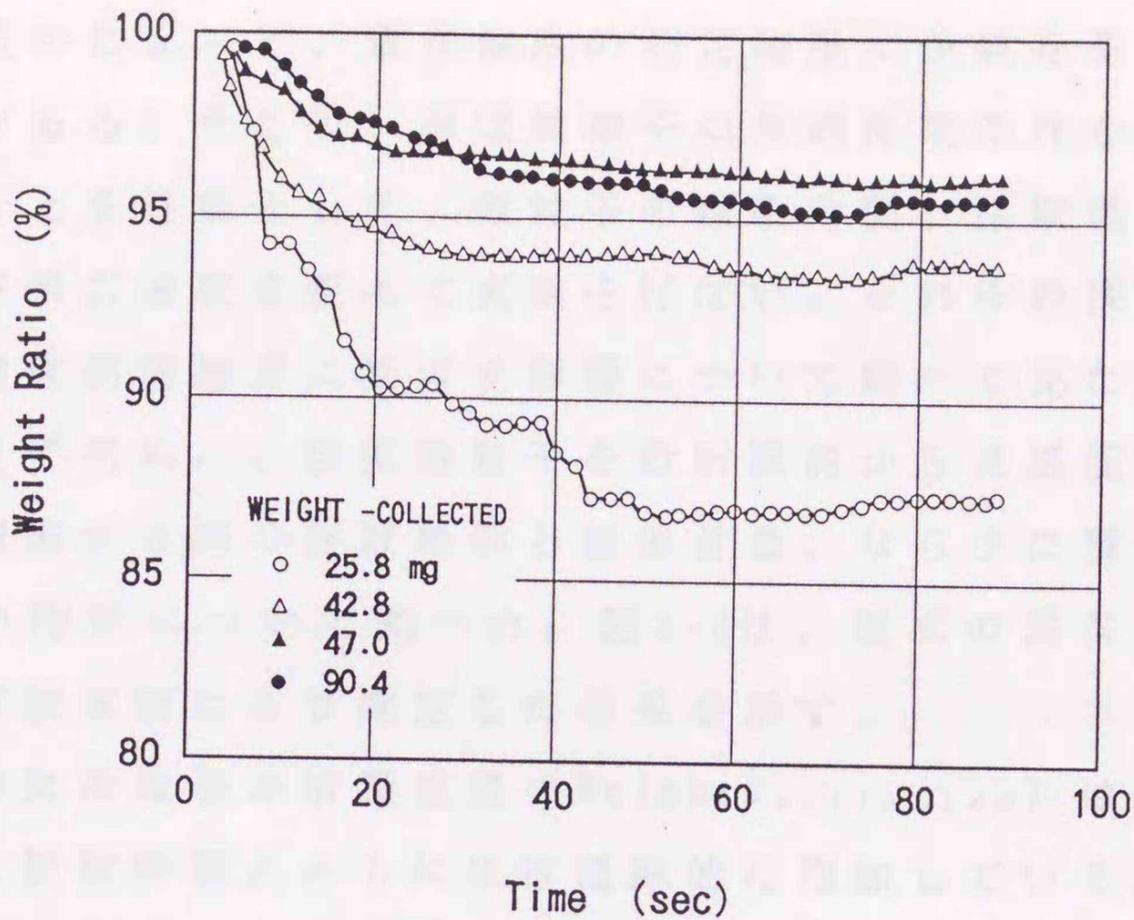


図 3.3 濾紙放置時間と質量減少率

認められた。なお、E P A の規定では、捕集後の濾紙を計量室内に1時間以上放置することになっているが、本実験の結果では、試料採取量が極端に少ない場合を除き、放置時間は30min程度で十分であることが分かる。従って、以後の実験では、試料採取量を多くして、捕集後の濾紙を30min以上測定室内に放置した後秤量を行なうこととした。

### 3.3.3 最適採取条件の決定

フィルター捕集法による微粒子濃度の測定方法においては、希釈風洞から濾紙に排気微粒子を捕集する際の採

取条件によって、重量濃度の測定結果に差異を生じることがある。そこで、排気微粒子の最適採取条件を見いだすことを目的として、微粒子の採取時間、採取温度、および吸引速度を変えて実験を行ない、それらの採取条件が濃度測定結果に及ぼす影響について調べて見た。

まず初めに、排気微粒子を希釈風洞から濾紙面上に濾過捕集する際の採取時間と捕集重量、ならびに重量濃度との関係について調べた。図3・4は、形式の異なる2台の試験車輻により測定した結果を示す。

排気微粒子の捕集重量 (Weight-collected) は、いずれも採取時間とともにほぼ直線的に増加している。重量

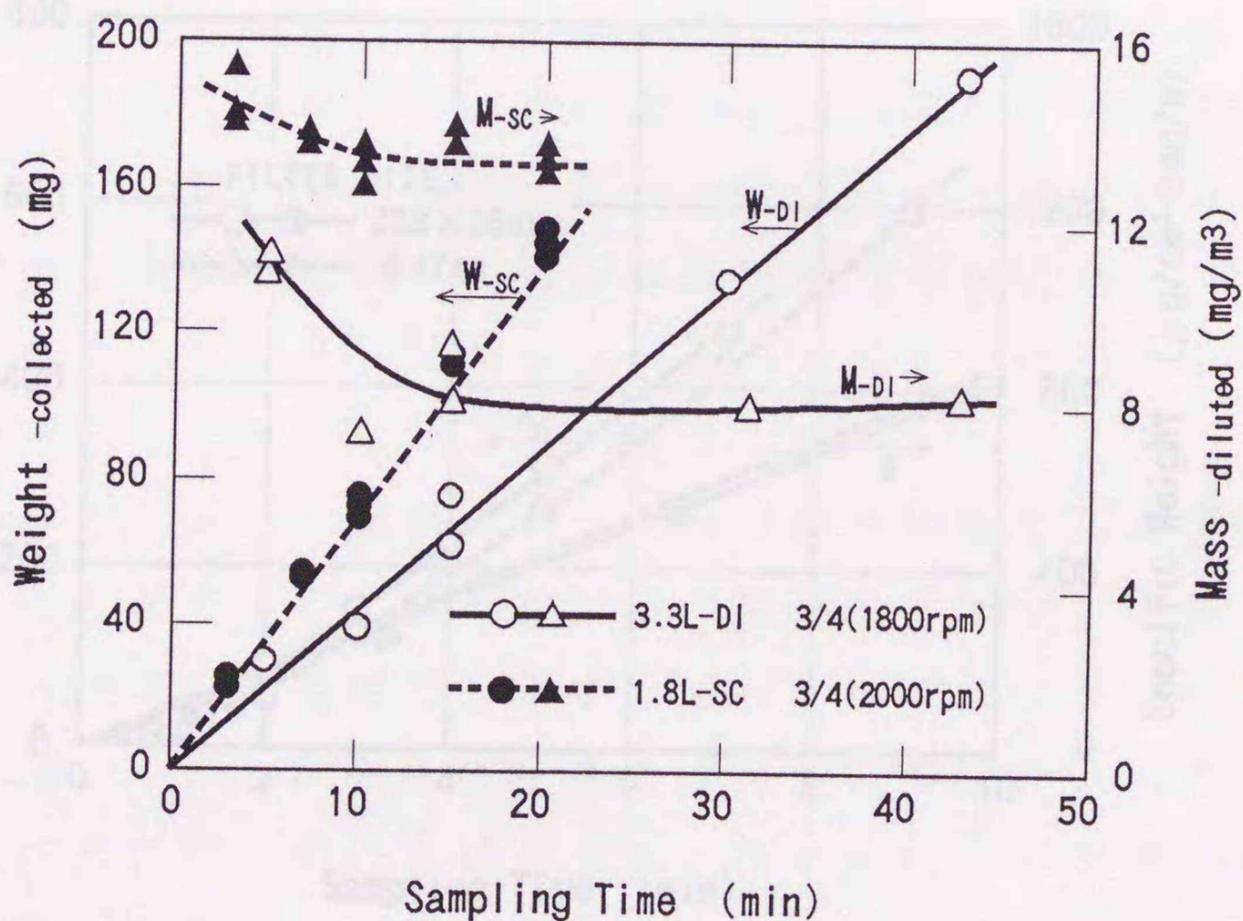


図3・4 採取時間と捕集微粒子重量

濃度 (Mass Concentration: 以下、図中では Mass で表記する。) は、採取時間が 5~7min 以下の場合に高く、それ以上の場合にはほぼ一定の値となってくる。このことから、濃度測定結果を安定させるためには、微粒子採取時間を最低 7~10min 以上とすることが必要と考えられる。

図 3.5 は、有効濾過面積の異なる 2 種類の濾紙を用いて、採取時間と差圧増加の割合、ならびに単位面積、および単位吸引速度当たりの微粒子捕集重量の関係について示したものである。捕集重量については、有効濾過面積の異なる濾紙を使っても測定結果に殆ど影響のないことを確認した。採取時間に対する差圧の増加は、2 種類

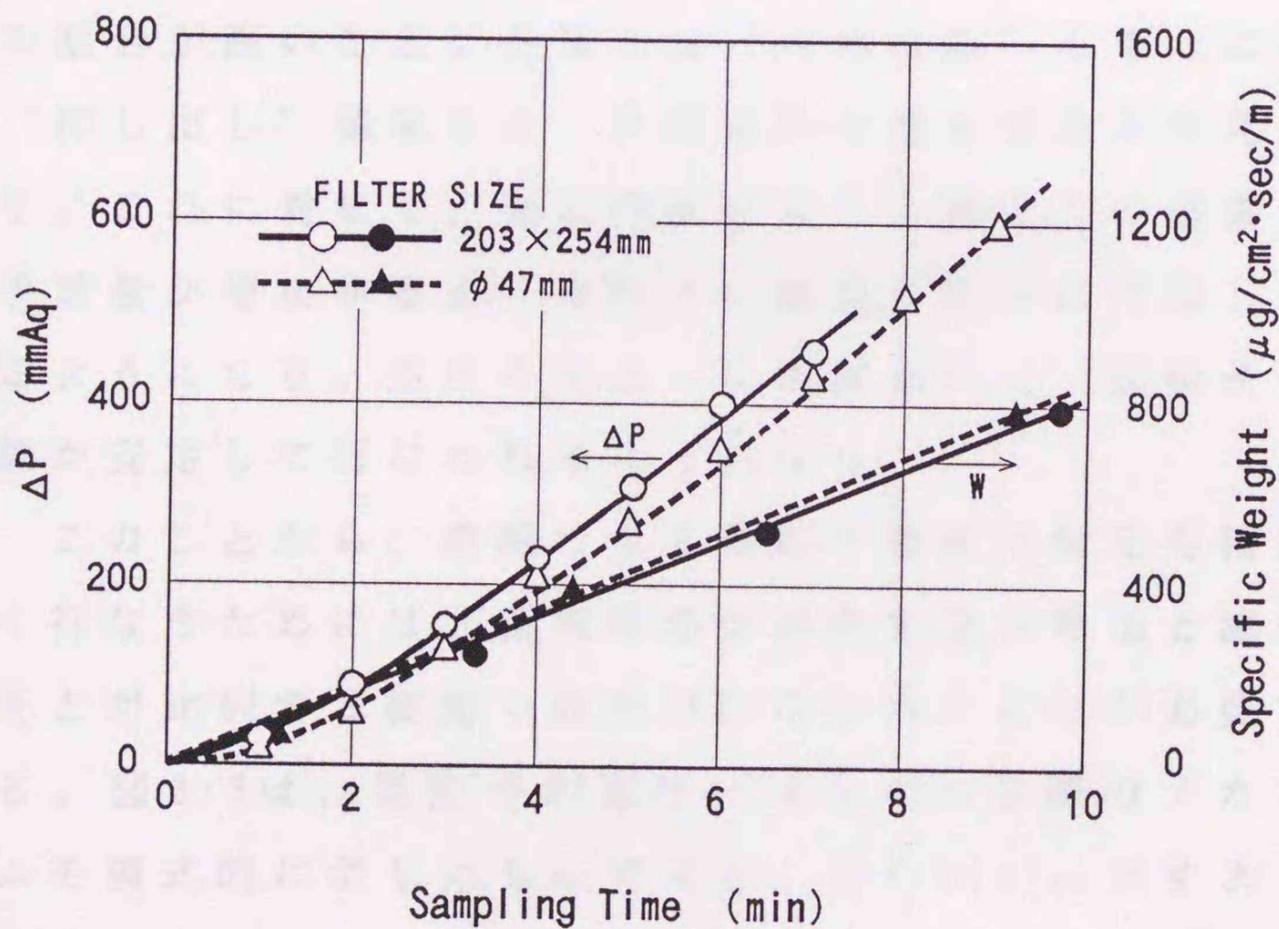


図 3.5 採取時間と差圧増加および単位捕集重量

の濾紙でほぼ同様の傾向となり、採取開始後約3~5minまでは差圧増加の割合が比較的少ないため緩やかな上昇カーブで変化し、その後は採取時間に比例してほぼ直線的に変化することが分かる。

この結果から、フィルター捕集法で一般的に使用される直径47mmの円形濾紙を使用した場合の測定と、微粒子試料の大量採取を目的として使用されるハイボリウムエアサンプラ (HVAS) 用の203×254mmの角型濾紙を使用した場合の測定とでは、ほぼ同一の条件のもとで微粒子の採取が行なわれているものと考えられる。

微粒子が濾紙に捕集される際の挙動として、捕集開始直後には、微粒子が濾紙を通り抜ける“吹き抜け”現象の割合が高いこと、あるいは“内部捕捉”とそれに伴う“押し出し”現象など、非定常的な濾過現象が考えられる。これに対して、採取時間が長く、濾紙上の捕集微粒子重量が増加すると、微粒子が濾紙に均一に付着してくるようになり、差圧の増加もほぼ直線的で、微粒子の捕集が安定して行なわれるようになる。

このことから、濾紙による微粒子濃度の測定を精度良く行なうためには、採取時間や捕集重量の増加と濾紙差圧とが比例する範囲で捕集が行なわれることが必要である。図3・6は、微粒子が濾紙に捕集される際のメカニズムを模式的に示したものである。図3・6(a)に示すように採取開始直後は、濾紙を構成する一本一本の繊維に微粒子が衝突、拡散吸着により沈着するが、この時、一部粒

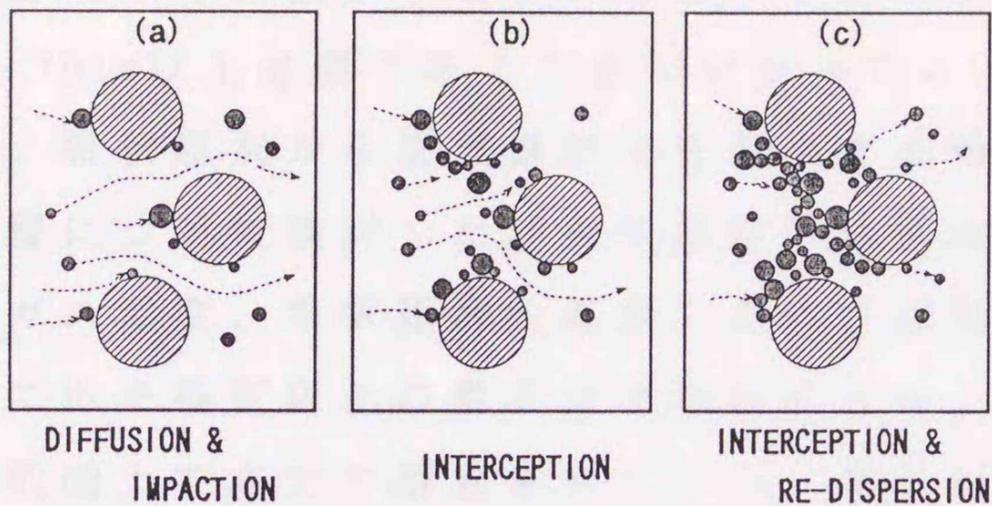


図 3・6 微粒子捕集メカニズム

子は繊維の間を通り抜ける。

その後、図 3・6 (b) で示すように、採取時間の経過とともに捕集される微粒子の量が増加し、微粒子が濾紙に均一に捕集されるようになってくると、濾紙面上にすでに捕集された微粒子が後続の微粒子を捕集するようになり、孔径の小さい高性能フィルターとしての働きを持つようになってくる。従って、濾紙の捕集効率もこの時期からは良好なものとなって行く。

しかし、採取時間がある程度以上になると、図 3・6 (c) に示されるように濾紙に目詰まりを生じる結果となり、同一吸引流量を確保しようとする、濾紙面前後の差圧が急激に増加し始め、すでに付着している微粒子が濾紙から吹き飛ばされる、いわゆる“粒子の再飛散”現象が起き、再び濾紙の捕集効率が低下し始めることになる。

以上の検討結果から、フィルター捕集法により排気微

粒子の重量濃度を測定する場合の最適な採取時間は、最低でも5~7min以上必要であることが分かった。

つぎに、希釈風洞から排気微粒子を採取する時の各部温度の影響について検討した。排気微粒子の採取に際して、排気ガス温度、希釈風洞内温度、および濾紙面温度などの間にある程度以上の温度差が存在すると、風洞の管壁や濾紙面上で水分の凝結を生じたり、あるいは逆に、蒸発が促進されたりする場合があります。希釈風洞や濾紙面温度の変化によっては、測定される排気微粒子の重量濃度に誤差の出ることが予想される。そこで、希釈風洞内温度および濾紙面温度が排気微粒子の重量濃度の測定値に対して及ぼす影響について調べて見た。

図3・7は、排気微粒子捕集時における濾紙上面温度お

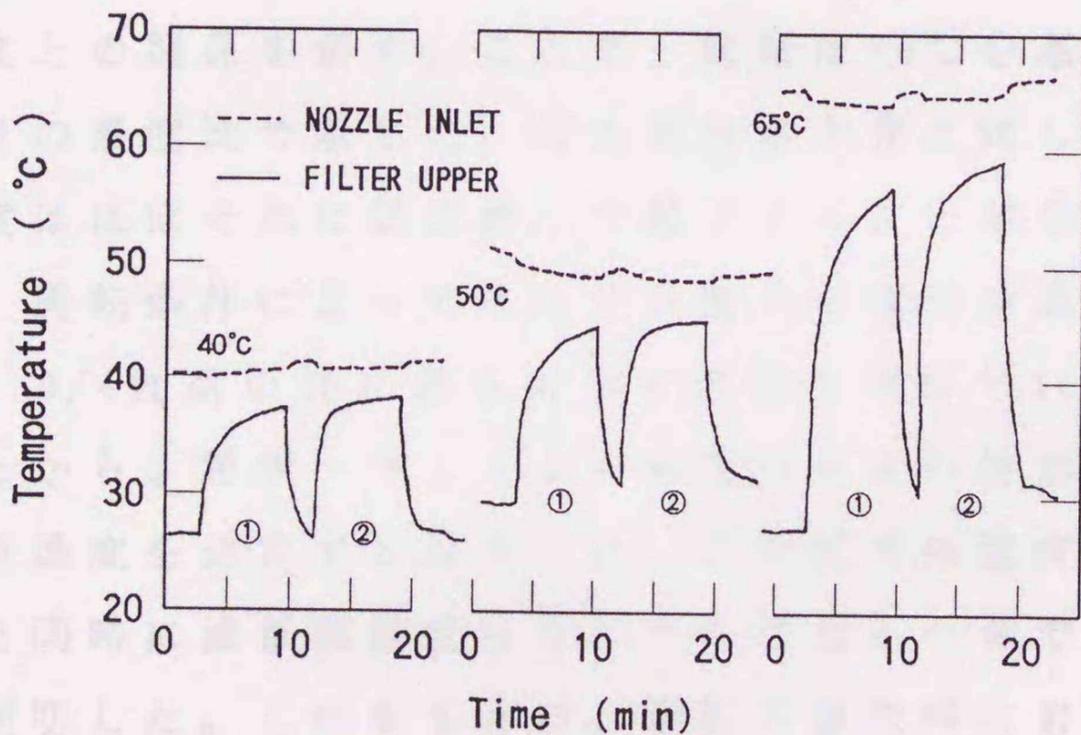


図3・7 微粒子採取時の濾紙温度変化

よび採取孔入口部温度の測定結果を示すものである。ここで、エンジンの負荷、および希釈空気加熱用のヒータ温度を変えることにより、採取孔入口部温度を40、50、65℃の3段階に変化させて測定を行なった。濾紙面温度は、実験開始前には実験室内の温度にほぼ等しくなっているが、捕集開始と同時に、濾過する排気ガスにより加熱され、濾紙および外部ホルダー温度が徐々に増加し始める。この結果、1回目の捕集と2回目の捕集とでは、ホルダーの熱容量により2回目の捕集はやや高い温度から開始され、さらに温度が上昇する傾向を示す。希釈風洞内温度が変化すると、濾過する排気ガス温度が変化するために濾紙面温度はさらに異なった温度変化の様態を示す。

図3・8は、濾紙上面温度すなわち採取ガス温度と重量濃度との関係を示す。ここで、縦軸は50℃を基準としたときの濃度比で示した。ガス温度の上昇に対して、重量濃度はほぼそれに反比例して減少することが分かる。また、運転条件によってそれぞれ変化の傾向が異なっており、0/4負荷の時に最も大きな影響を受けている。このことから、希釈・フィルター捕集法により排気微粒子の重量濃度を測定する場合には、希釈風洞内温度を制御すると同時に濾紙面温度をモニタしておくべきであることが判明した。これをもとに、微粒子採取時における温度変化の影響を低減することを目的として、図3・9に示す加熱・保温型フィルター捕集装置を試作した。ここで、

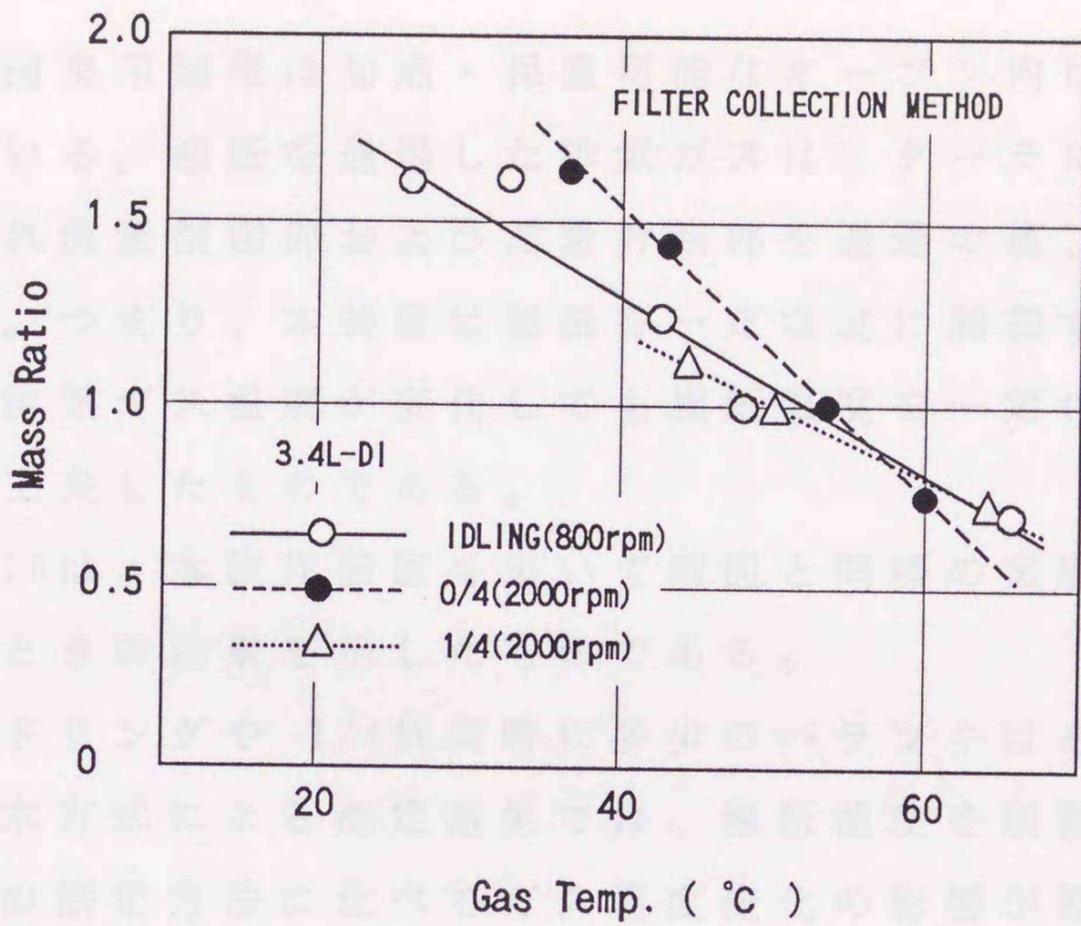


図 3・8 採取ガス温度と測定濃度

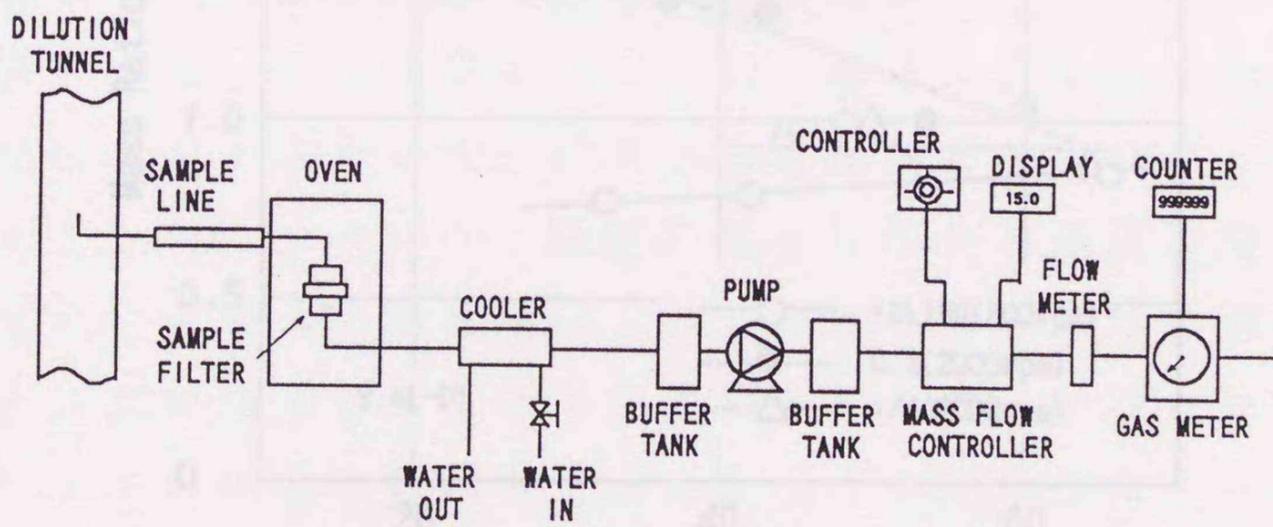


図 3・9 加熱・保温型フィルター捕集装置の概略

微粒子捕集用濾紙は加熱・保温可能なオーブン内に配置されている。濾紙を通過した排気ガスは、クーラにより冷却され流量制御部および流量計測部を通過の後、排出される。つまり、本装置は濾紙を一定温度に制御することで、排気ガス温度が変化しても濾紙温度を一定に保つように工夫したものである。

図3・10は、本試作装置を用いて前図と同様の実験を行ったときの結果を示したものである。

アイドリングや1/4負荷時に多少のバラツキはあるものの、本方式による測定結果では、濾紙温度を制御しない従来の測定方法に比べてガス温度変化の影響が軽減さ

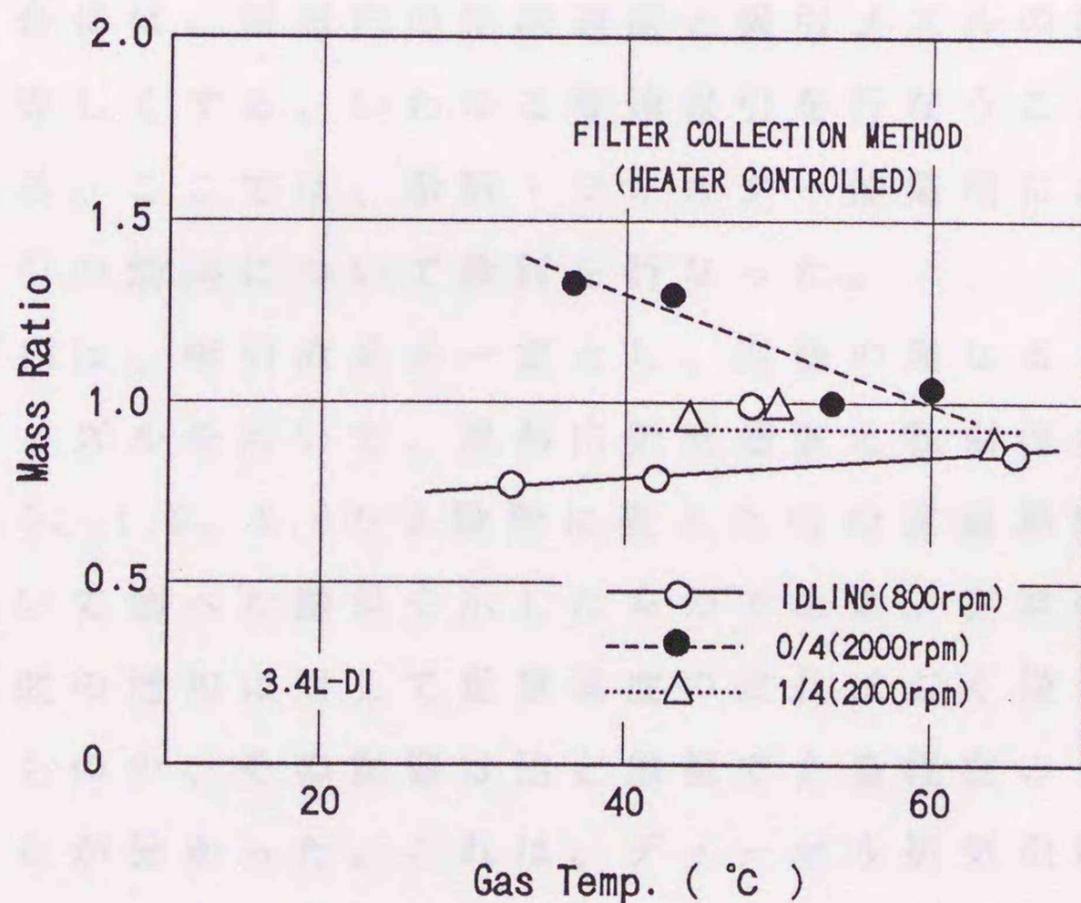


図3・10 採取ガス温度と測定濃度

れ、各採取ガス温度に対して、ほぼ一定の濃度値を示すようになっている。なお、前図において最も温度の影響が顕著であった0/4負荷時には、本方式の場合にも温度変化の影響を未だ受けており、濾紙の加熱方法などに関して改良の余地が残されているものと考えられる。しかし、このように濾紙温度を一定とするような対策などにより、採取ガス温度変化の影響を低減し、フィルター捕集法の測定精度を向上することが可能になるものと考えられる。

つぎに、微粒子採取時の吸引速度が測定濃度に与える影響について検討を行なった。一般に、希釈風洞内からサンプルノズルを通して、吸引により粒子を採取・捕集する場合には、風洞内の気流速度と吸引ノズルの吸引速度とを等しくする、いわゆる等速吸引を行なうことが必要である。ここでは、希釈・フィルター捕集法における、等速吸引の効果について検討を行なった。

図3・11は、吸引流量を一定とし、直径の異なる3種類の吸引ノズルを用いて、風洞内気流速度と吸引速度との比を0.5、1.0、2.0の3段階に変えた時の重量濃度の変化について調べた結果を示したものである。実験の結果、吸引速度の増加に対して重量濃度の変化はごく僅か認められるものの、その影響は殆ど無視できる程度のものであることが分かった。これは、ディーゼル排気微粒子の粒径が微小で、粒子速度と気流速度の差が無視できる程度のものであるためと考えられる。このことから、吸引

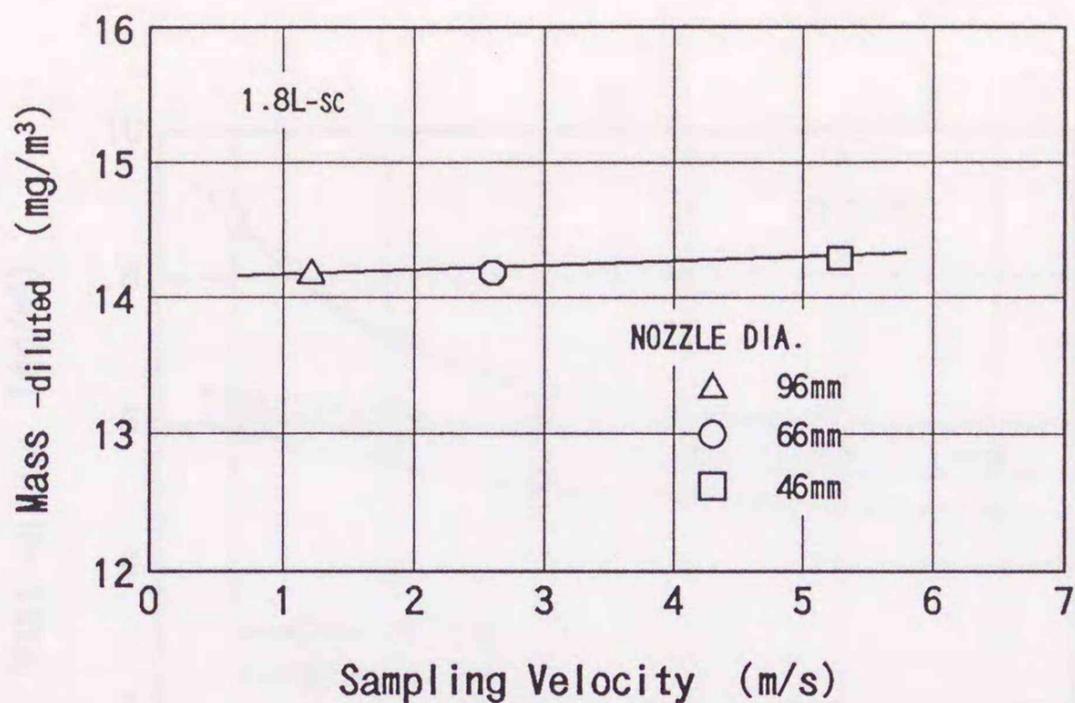


図3・11 吸引速度と測定濃度

流量については等速吸引を大きく逸脱しない範囲であれば、厳密な制御を行なう必要はないと考え、以後の実験においても、吸引速度は固定して厳密な制御は行なわないこととした。

### 3.4 微粒子濃度の測定

#### 3.4.1 測定の再現性と繰り返し誤差

希釈・フィルター捕集法は、現在、最も基準的とされている方法であり、測定の再現性および繰り返し性が最大の問題とされている。ここでは、まず初めにこれらの点について検討を行なった。

図3・12は、測定日時を変えて行なった排気微粒子の重量濃度測定の再現性を調べた結果の一例である。一日の測定のうちで、最初の回の測定時に、測定した微粒子の濃度が最も高くなるが、測定を繰り返す毎にその値は徐

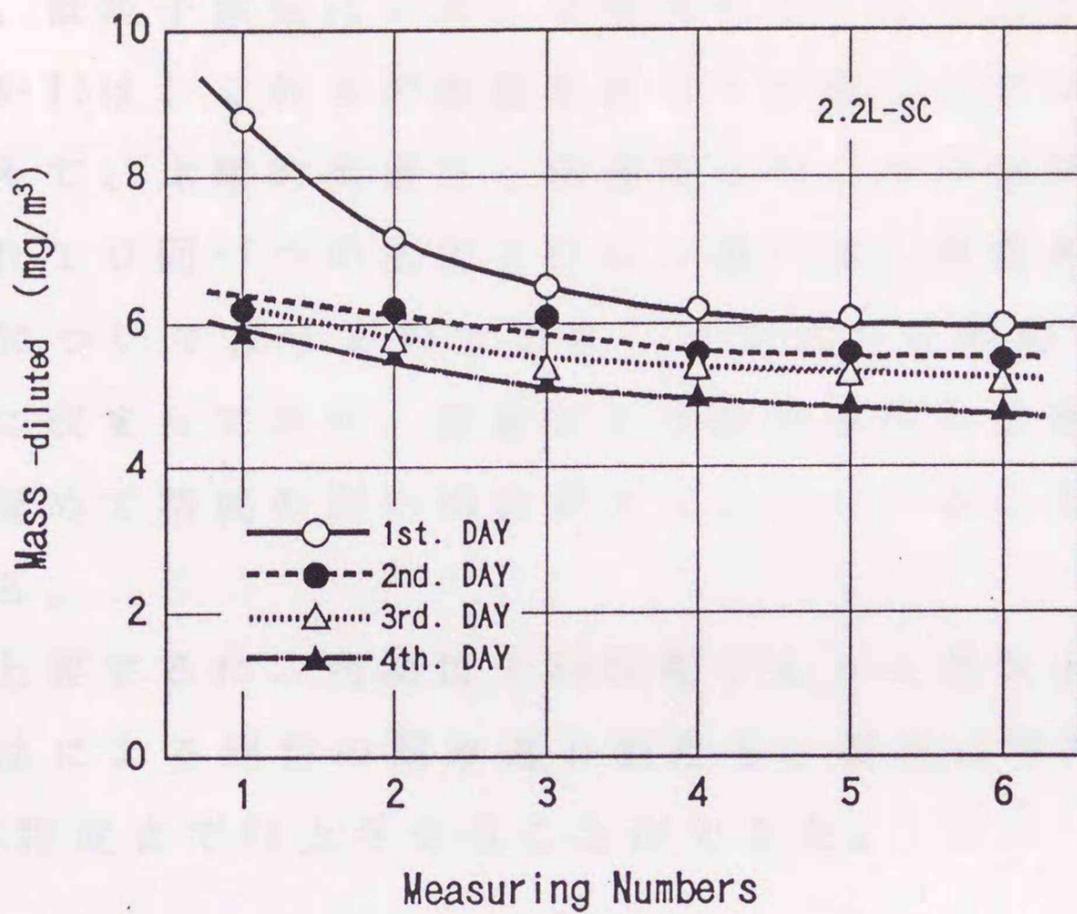


図 3・12 測定 の 再現 性

々に低くなって次第に安定してくるようになる。この現象は、測定日時に関係なく常に現れ、その変化の程度は測定日時によって異なったものとなっている。希釈風洞内壁、吸引ノズル、あるいはプローブなどに付着した微粒子の剥離が一定でないことも一因となるが、実験開始直後は濾紙やそのホルダーおよび風洞、吸引ノズル、あるいはプローブなどの排気導入系が全て室温に近い温度まで下がっているものが、採取回数と共にそれらの温度が上昇してくるため、最初に測定した微粒子濃度が最も高く、その後次第に低下してくるものと考えられる。従って、測定開始に先立ってはエンジンの暖気運転だけで

なく、微粒子測定系の全てを暖気することが必要である。

図3・13は、これらの配慮を行なった後エンジンの負荷を変えて、比較的高濃度と低濃度との二つの条件で、それぞれ10回づつの測定を行ない繰り返し精度を調べた結果について示すものである。いずれも変動幅は±3%以内に収まっており、秤量および採取条件の最適化により、極めて精度の高い測定が行なわれていることが確認される。

以上要するに、当初は±50%近くもあったフィルター捕集法による測定の繰り返し誤差を、現在は平均で±3～5%程度まで向上させることができた。

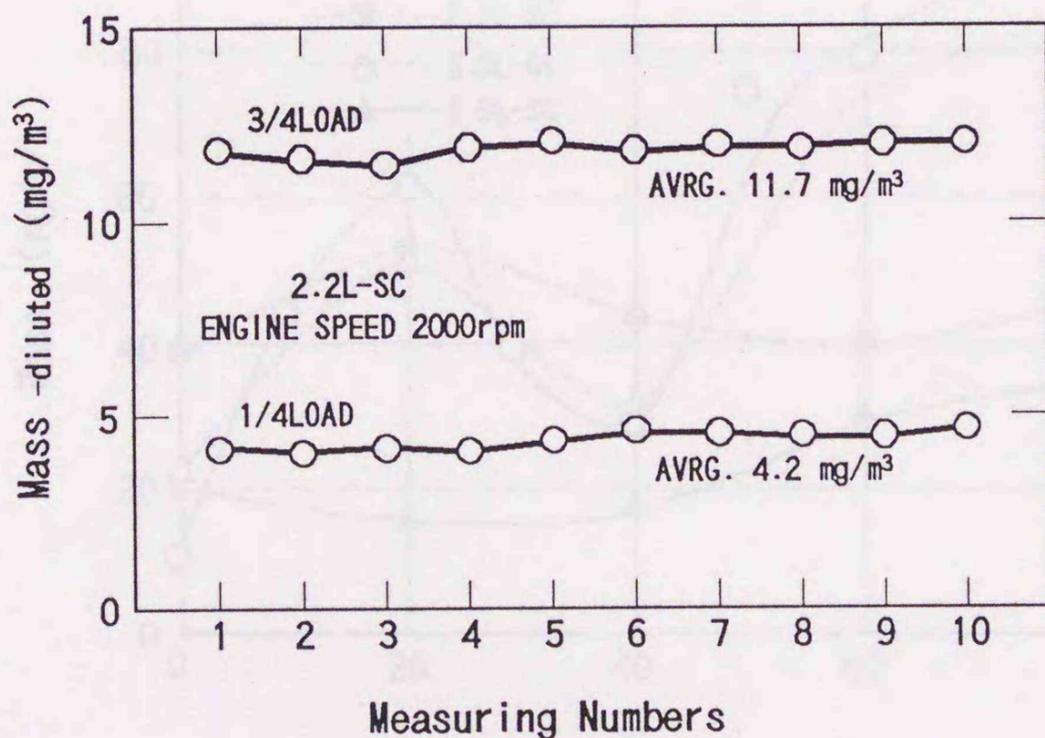


図3・13 測定の繰り返し性

### 3.4.2 運転条件と排出濃度特性

つぎに、これまで検討を行なってきた希釈・フィルター捕集法によりディーゼル排気微粒子濃度の測定を行なった。まず、排気量、および燃焼方式の異なる4台の試験車種を用いて、車速を変化させた場合の微粒子濃度について測定を行なった。図3・14は、道路負荷で定速走行させた時の車速と濃度との関係を示す。いずれの車種においても、車速の上昇とともに濃度が増加するが、20 km/hの低速走行時に一旦排出濃度が高くなる傾向にあるのは、ギヤ比によるエンジン回転数の増加が主な原因であり、各車種とも同様の傾向を示している。

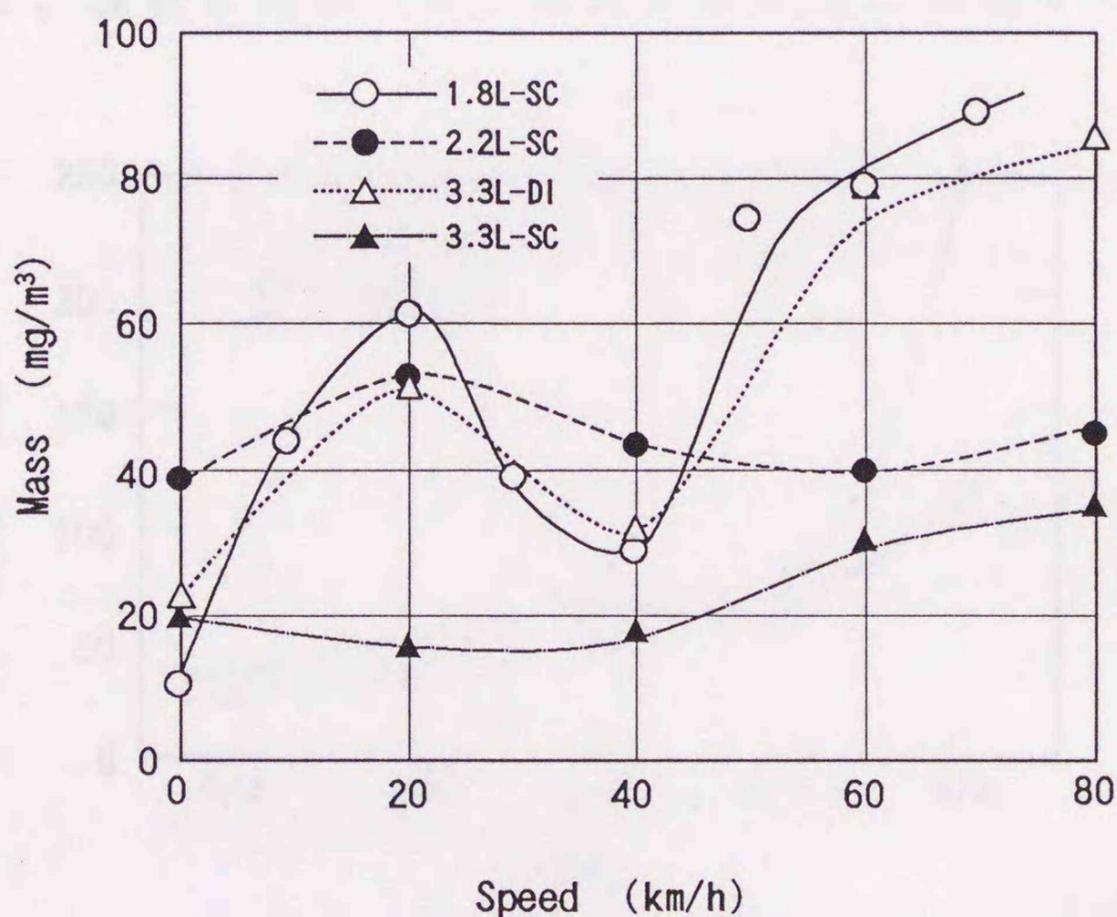


図3・14 車速変化と微粒子濃度

図3・15は、燃焼方式の異なる（渦流室式および直接噴射式）エンジンを搭載する2台の試験車輦を用い、エンジン負荷を0/4～4/4まで変えて運転した際の濃度測定の結果である。負荷の増加と共に微粒子濃度が高くなるが、渦流室式のエンジンでは2/4負荷の時に排出濃度が一旦高くなる傾向が示されるのに対して、直接噴射エンジンの場合には、低負荷では濃度が低いものの、3/4負荷以上になると大幅に濃度が増大する傾向が示されている。

図3・16は、過渡条件で運転される試験車輦の排出特性を検討するために、燃焼方式の異なるエンジンを搭載する2台の試験車輦により、10モード運転時の微粒子濃度、およびサイクル数と捕集重量との関係を調べたものである。濾紙に捕集される微粒子の重量は捕集サイクル

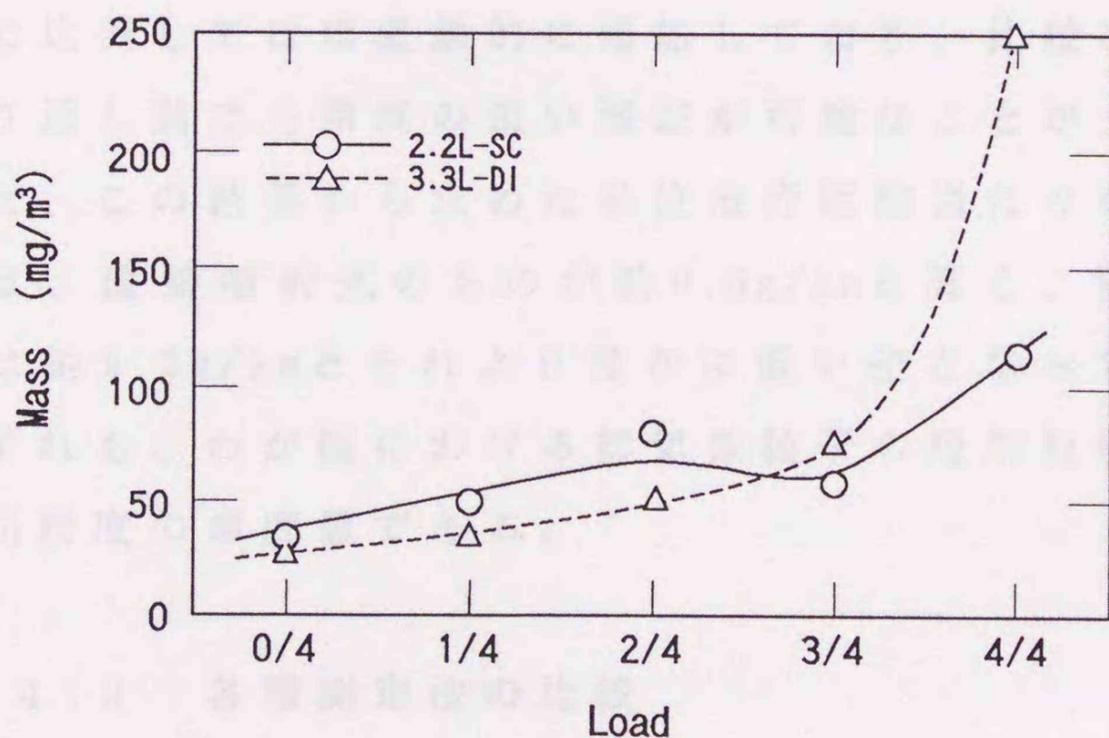


図3・15 負荷変化と微粒子濃度

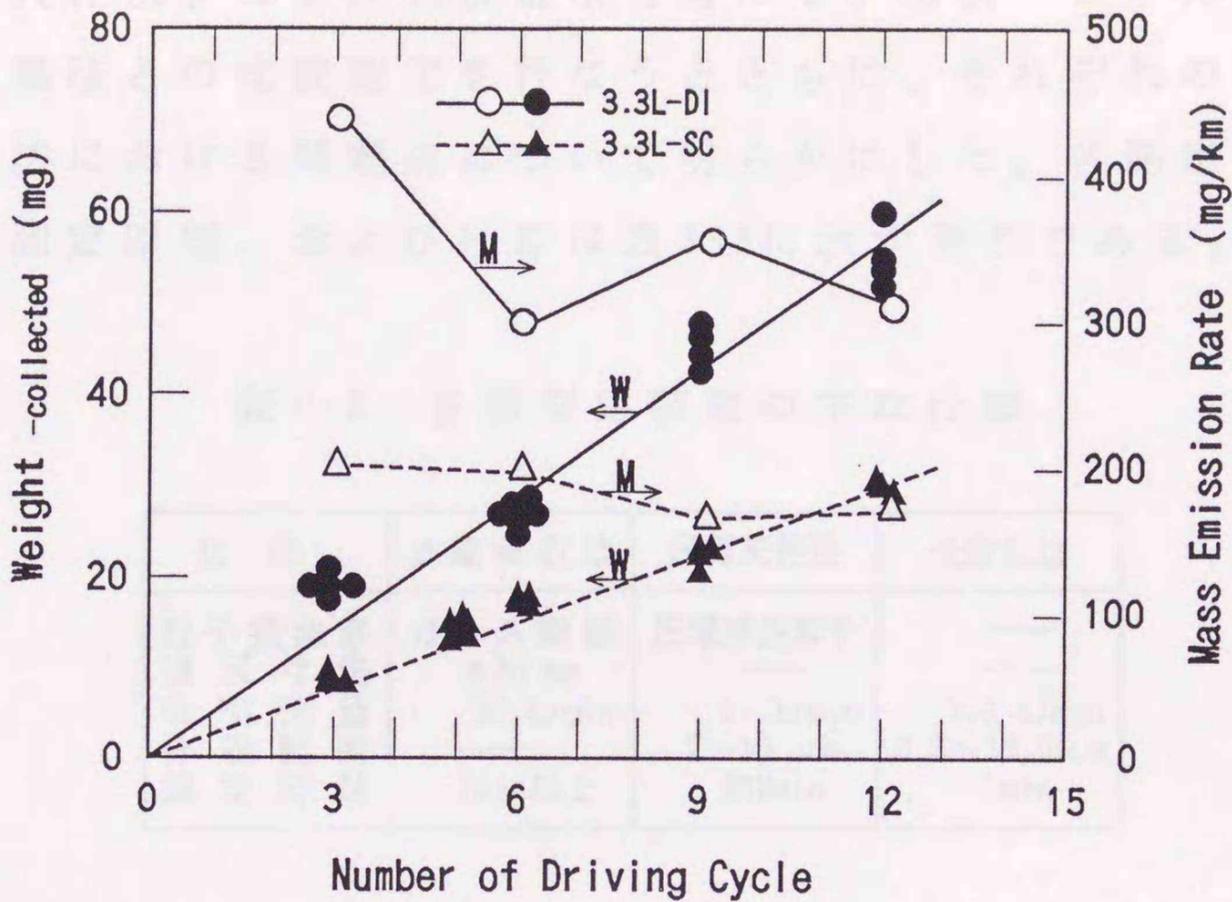


図 3.16 10モード運転時の微粒子濃度

数に比例してほぼ直線的に増加しており、比較的少ない繰り返し数でも精度の良い測定が可能なが分かる。また、この結果から求めた単位走行距離当たりの排出重量は、直接噴射式のものが約0.3g/kmと高く、渦流室式では約0.2g/kmとそれより僅かに低い値となっており、いずれも、わが国における排気微粒子の短期規制目標値と同程度の濃度値である。

### 3.4.3 各種測定法の比較

ここでは、現時点で排気微粒子の簡易測定が可能と考えられるいくつかの測定方式の中から、β線吸収法、圧

電天秤法、および光散乱法を選んで、希釈・フィルター捕集法との比較測定を行なうとともに、それぞれの測定方法における問題点について明らかにした。各測定装置の測定原理、および仕様は表3・3に示す通りである。

表3・3 各種測定装置の主な仕様

仕 様	$\beta$ 線吸収法	圧電天秤法	光散乱法
粒子捕集部	ガラス繊維	圧電結晶素子	—
濾紙寸法	$\phi 30$ mm	—	—
吸引流量	30 L/min	1 L/min	7.1 L/min
分級範囲	—	2~10 $\mu$ m	0.3~10.0 $\mu$ m
測定時間	7min以上	約2min	1min

図3・17に、定常走行時における排気微粒子の濃度を、各種測定法により比較測定した結果について示す。定常走行時の微粒子濃度は、高速になるに従い僅かずつ増加する傾向にあり、各測定方法とも定性的にはほぼ同様にこの傾向を捉えている。しかし、光散乱法では、フィルター捕集法に比べて低速側で測定濃度が低くなる傾向があり、 $\beta$ 線吸収法および圧電天秤法では、高速側で低くなる傾向を示している。

一般に、ディーゼル車から排出される粒子状物質の平均粒径は0.1~0.2  $\mu$ m前後で、エンジン負荷率などの増減に応じてこの値も増減するが<sup>(52)</sup>、<sup>(53)</sup>、光散乱法の粒径測定限界は約0.3~0.5  $\mu$ m以上であるために、エンジン負荷率が小さくなるような低速側では、光散乱法の

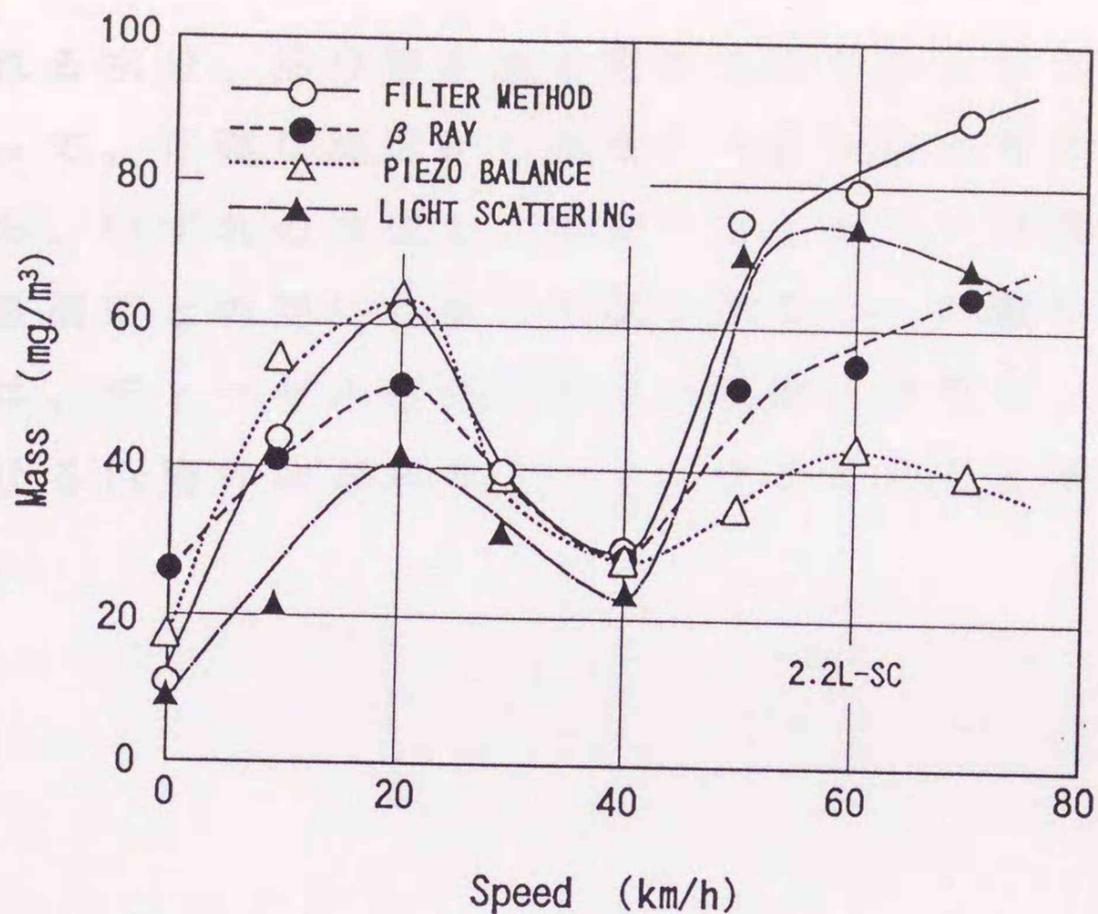


図 3.17 各種測定法の比較

測定感度が低下して、希釈・フィルター捕集法との誤差が大きくなるものと考えられる。また、β線吸収法の測定結果が高速側で希釈・フィルター捕集法と相違してくる理由としては、使用したβ線吸収法が大気モニタ用のものであり、測定可能な上限濃度範囲が低すぎたことが主な原因と思われる。

圧電天秤法に関しては、荷電された圧電結晶素子に微粒子を付着させ、その付着微粒子の重量変化による共振周波数の変化から重量濃度の測定を行なう原理であるために、微粒子の捕集・堆積が静電付着によることから、粒径の影響が無視できないこと、さらには微粒子中に含

まれる水分、油分等が悪影響を及ぼすことなどが原因となつて、正確な測定ができなかったものと考えられる。なお、いずれの方式も、希釈・フィルター捕集法による重量濃度との間に明確な相関を得ることが難しく、さらには、ディーゼル排気微粒子の測定に特有な、検出部における汚染の問題が最大のネックとなることが確認された。

(1) 重量濃度の測定精度を向上するためには、検出部を乾燥して前処理に對し化学的に最も安定な有機酸誘導基を用い、微粒子捕集効率を向上、また検出部と検出管内に湿度を十分に管理しておくことが必要である。

(2) 希釈・フィルター捕集法での測定は微粒子捕集条件に關する検討を必要とする。捕集効率に關する検討は、捕集効率の安定性が安定しないため、捕集効率の低下が測定精度の低下を招く可能性があることが確認された。

(3) 捕集効率の測定精度が測定精度に与える影響は非常に大きいので、測定精度に關しては、検出部と検出管内の湿度を制御すると同時に捕集効率をモニタリングしておく必要があることを確認した。

(4) 試作した希釈・捕集型フィルター捕集装置を用いて、捕集効率に關する検討を行った結果、捕集効率を一定に制御する対策などにより、捕集効率の向上を確認し、フィルター捕集法の測定精度を向上する

### 3.5 本章における結論

本章では、希釈・フィルター捕集法による質量濃度測定法に関して、装置の構成および計測方法と測定の信頼性向上を目的として行なった基礎実験の結果ならびにそれを利用した微粒子濃度の測定試験の結果について記述した。得られた結果を要約すると、およそ以下の通りである。

- (1) 濾紙重量の秤量精度を向上するためには、捕集用濾紙として耐熱性に勝れ化学的に最も安定な石英繊維濾紙を用い、微粒子捕集前後に温度、湿度の管理された計量室内に濾紙を30min程度放置しておくことが必要である。
- (2) 希釈・フィルター捕集法での最適な微粒子採取条件に関する検討を行なった結果、捕集直後は微粒子の吹き抜け現象により濾紙への捕集が安定しないため、濾紙前後の差圧がほぼ直線的に増加する時期まで採取をつづけることが必要である。
- (3) 捕集時の濾紙面温度が測定濃度に与える影響は非常に大きいので、測定開始に当たっては、希釈風洞内温度を制御すると同時に濾紙面温度をモニタしておく必要があることを確認した。
- (4) 試作した加熱・保温型フィルター捕集装置を用いて濾紙温度変化に関する検討を行なった結果、濾紙温度を一定に制御する対策などにより、採取ガス温度の影響を低減し、フィルター捕集法の測定精度を向上する

ことが可能なことを確認した。

- (5) サンプルノズルから微粒子を採取する際の吸引速度の影響に関しては、ディーゼル排気微粒子の粒径が微小なため、風洞内気流速度と吸引速度を等しくする等速吸引を厳守する必要は認められなかった。
- (6) これらの検討の結果、当初は±50%近くもあった希釈・フィルター捕集法による測定の一連返し精度を平均±3~5%程度まで向上させることができた。
- (7) 排気微粒子の簡易測定が可能なβ線吸収法、圧電天秤法、および光散乱法を選んで、希釈・フィルター捕集法との比較測定実験を行なった結果、各測定方式とも、定性的にはディーゼル排気微粒子濃度の測定が可能であるが、いずれも希釈・フィルター捕集法との相関が曖昧であり、かつ検出部の汚染が最大のネックとなるので、ディーゼル排気微粒子の測定には実用的でないことが明かとなった。

## 第4章 振動天秤法による微粒子濃度の連続測定

### 4.1 緒 論

ディーゼル排気微粒子の重量濃度を効率的に測定するために、近年、煩雑な手順と時間がかかって試験効率の低いフィルター捕集法に代替する測定装置の一つとして、振動天秤の原理を利用したTEOM (Tapered Element Oscillating Microbalance) 装置が用いられるようになってきた。すなわち、フィルター捕集法は、バッチサンプリングによる一定時間内の平均微粒子濃度を間欠的に測定する方法であるので、迅速な測定あるいはリアルタイムによる連続的な測定が不可能である。これに対して、振動天秤法は、フィルター捕集法と同様、希釈風洞装置内に導入された排気微粒子を一定時間濾紙に捕集して、その堆積重量を振動天秤により秤量するものであるが、サンプリング間隔を1.67secと極めて短時間に設定することが可能なため、ほぼ連続的な測定をリアルタイムで行なうことが可能となっている。

本章では、振動天秤法による微粒子濃度の連続測定方法について、振動天秤の原理と特徴ならびに基本的な性能に言及した上で、定常および過渡運転条件下における微粒子濃度の測定ならびに希釈・フィルター捕集法との比較測定の結果について記述する。

## 4.2 振動天秤法による微粒子濃度の測定

### 4.2.1 振動天秤法の原理と特徴

振動天秤法では、振動エレメントに取り付けた濾紙に微粒子を捕集・堆積するときの、振動系（振動エレメント、濾紙および堆積微粒子）の等価質量とエレメントの弾性との関係による共振周波数の変化から、堆積微粒子の重量変化を連続測定する。同様の原理による微粒子重量の測定方式として圧電天秤法があるが、第3章における実験結果から明らかのように、ディーゼル排気微粒子の測定には実用的でない。

図4.1は、振動天秤の原理にもとづくTEOM装置の

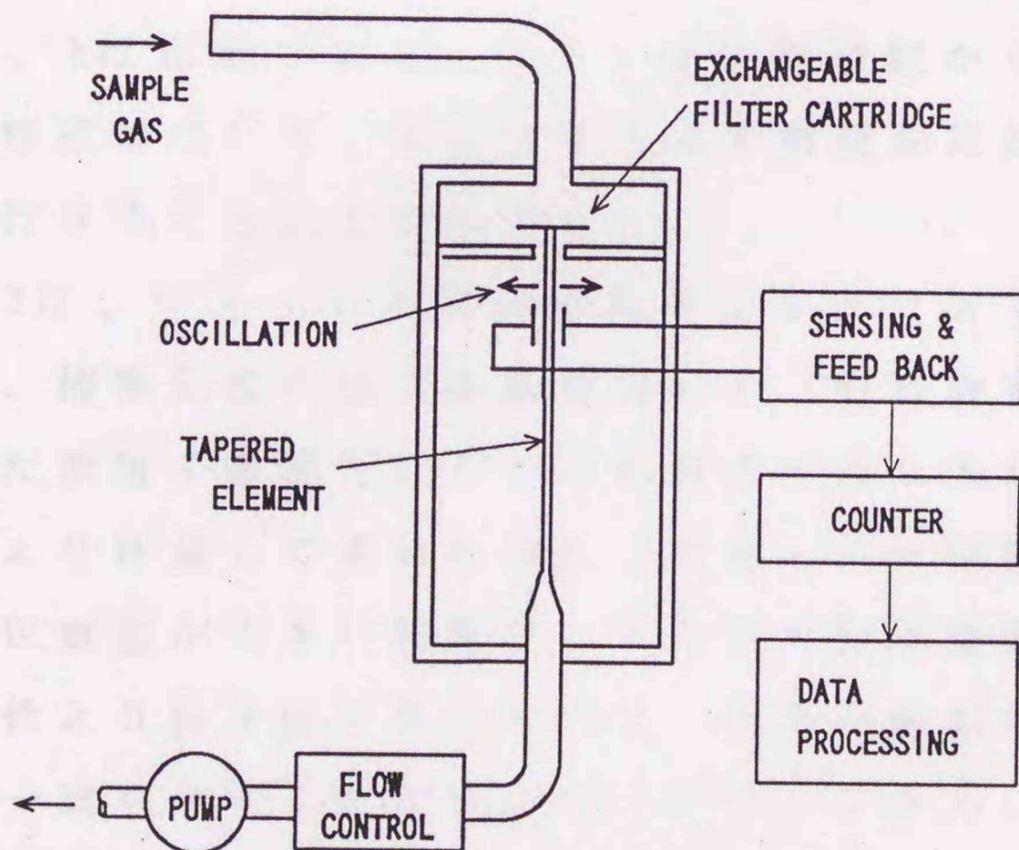


図4.1 TEOM装置のブロック構成図

ブロック構成図を示す。図において、振動体であるテーパーエレメントは、中空の細長いガラス管で作られており、先端部には濾紙（フィルターカートリッジ）が取り付けられていて微粒子を捕集する。濾紙を通過した試料ガスはガラス管の内側を通り流量コントローラ、およびポンプを経て排出される。テーパーエレメントは、先端部分を電磁的に加振されるとともに、フィードバック制御回路により常に共振周波数に制御されている。

振動天秤においては、微粒子が濾紙に捕集されて振動系の重量が増加すると、振動系の共振周波数は減少する。この時、濾紙に堆積した微粒子の重量 $W_t$ は、

$$W_t = k(1/f_1^2 - 1/f_0^2) \quad (4.1)$$

で表わされる<sup>(54)</sup>。ここで、 $f_0$ 、 $f_1$ は微粒子堆積前後の振動数、 $k$ は定数である。以下、振動周波数から求めた重量の精度について、精密天秤による重量測定結果との比較を行なうことにより検討した。

図4.2は、ディーゼル排気微粒子をTEOMで測定した際の、捕集前後の指示積算重量の差（周波数変化）から求めた微粒子重量と、その時の濾紙を取り外して精密天秤により秤量して求めた微粒子重量との比較結果である。測定重量が大きい領域で、TEOM指示重量が精密天秤の値より僅か低くなるものの、両者の結果は極めて良好な一致を示すことが分かる。このことから、周波数変化から求めた重量と精密天秤で測定した重量とはほぼ一致することが確かめられた。

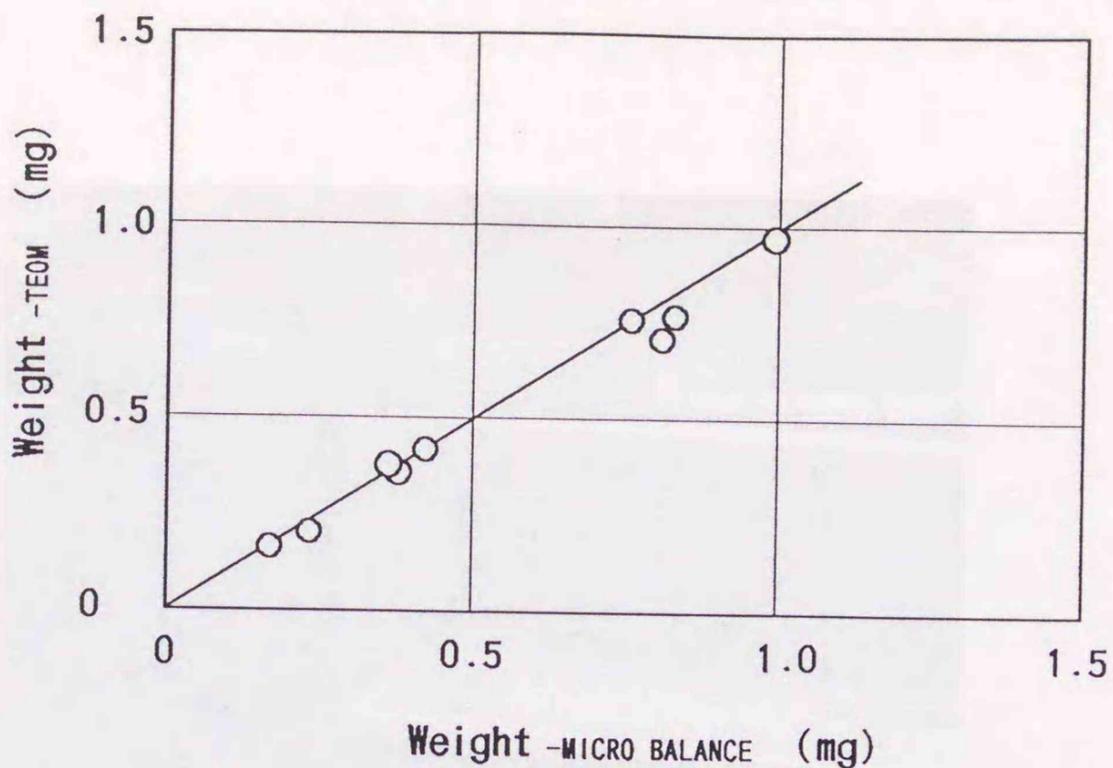


図4・2 精密天秤と振動天秤の重量比較

使用したTEOM装置では、フィルターカートリッジの初期重量は約50mg、振動系の横振動に対する等価質量は約200mg程度、そしてテーパーエレメントのばね常数は約0.8N/mm程度に構成されている。共振周波数は約250～350Hzの範囲にあり、kの値は個々の測定器毎に決定されている。また、共振周波数のサンプリング間隔、すなわち単位計測時間は1.67secに設定されている。表4・1に使用したTEOM装置の主な動作条件を示す。

表4・1 TEOM装置の主な動作条件

使用濾紙	Pallflex T60A20
設定温度	濾紙 (50°C)、導入管 (60°C)
吸引流量	3 L/min
計測間隔	1.67sec
計測項目	積算重量(mg)、重量濃度(mg/m <sup>3</sup> )



図4・3 TEOM装置の外観

使用濾紙は、テフロンコーティングのガラス繊維濾紙 (Pallflex Type T60A20) で、直径約14mmのものである。捕集濾紙部は約50℃に保温されるとともに、試料導入管路部も約60℃に保温されている。図4・3に装置本体、およびデータ処理部の外観を示す。

#### 4.2.2 データ処理システムの構成

TEOM装置では、測定条件の設定、制御、データの取り込み、および記録を付属のデータ処理装置で行ない、計測終了後、計測間隔1.67sec毎の周波数データを移動平均して、重量濃度および積算重量の結果を出力する。しかし、本研究では、TEOMによるデータ処理時間が長いこと、また汎用性が無いことなどの理由から、計算機によりデータの処理を行なうこととした。

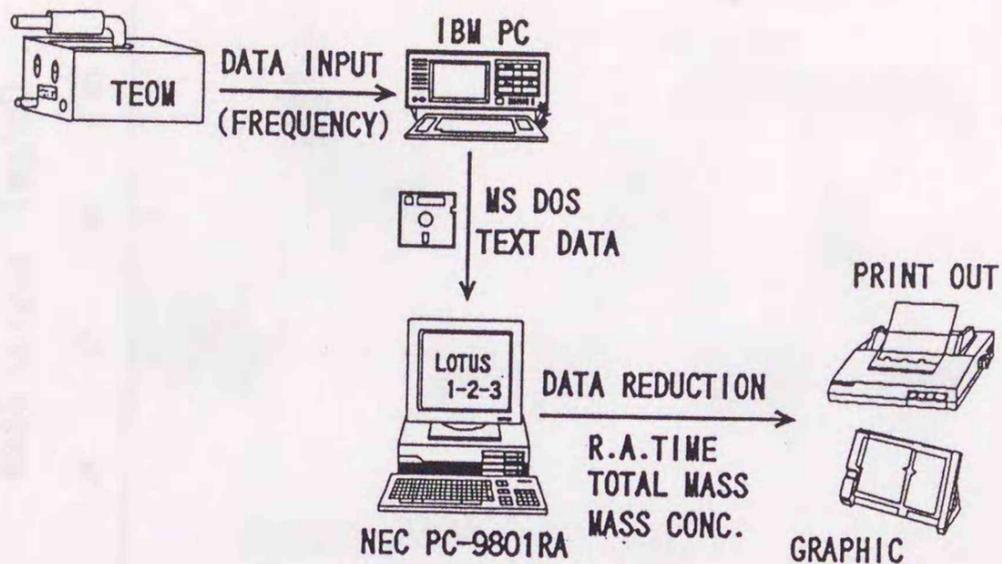


図4.4 データ処理のフロー図

図4.4は、データの取り込みから作図出力までの処理過程を示したものである。周波数データは計測間隔1.67 secで連続的に取り込まれるが、このような処理方法によれば移動平均値を種々に変更することが可能であって、検出精度あるいは応答性を向上するなど、目的に応じた演算処理を行なうことができる。以下はその一例として、移動平均処理時間を変化させた場合の出力例について示したものである。

図4.5および図4.6は、移動平均処理を行なわない場合と移動平均時間を15secとしたときの、定常運転時における出力データの相違を示す。また、図4.7および図4.8は、10モード運転時における測定結果の一例として、それぞれ移動平均処理を行なった場合と行なわない場合の出力データを比較して示したものである。定常運転時

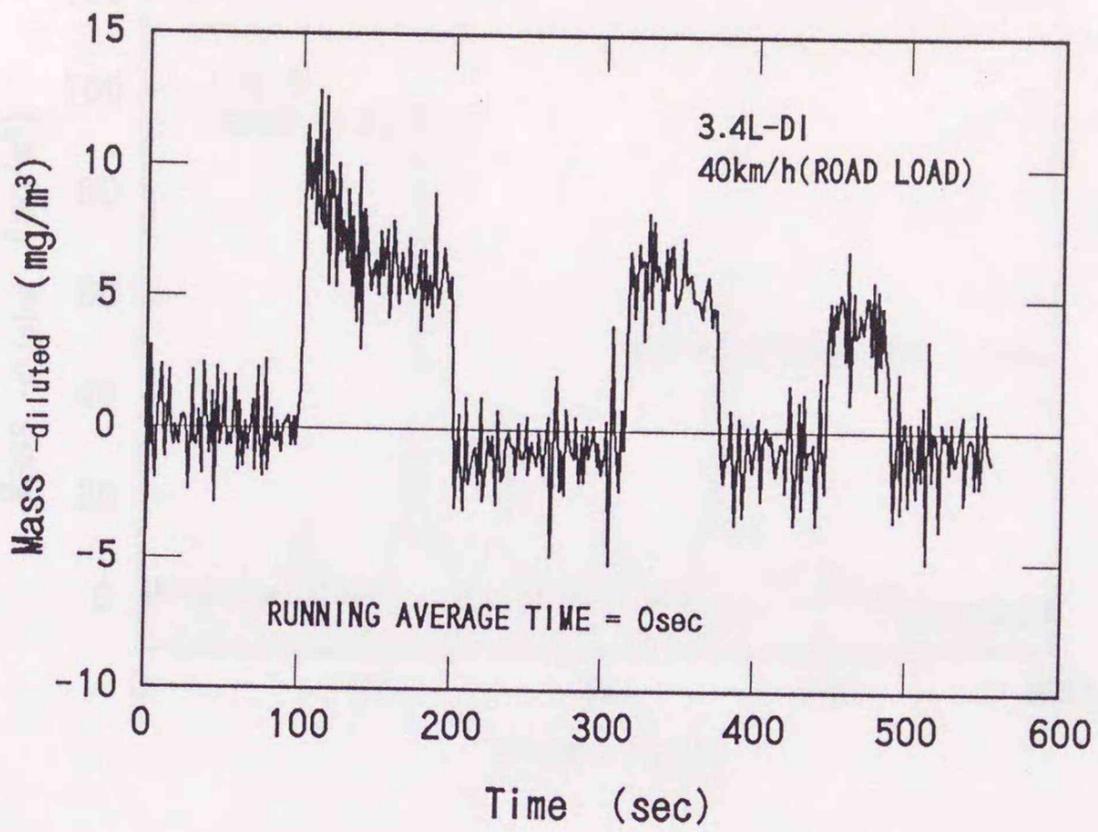


図 4・5 重量濃度の出力例 (移動平均無し)

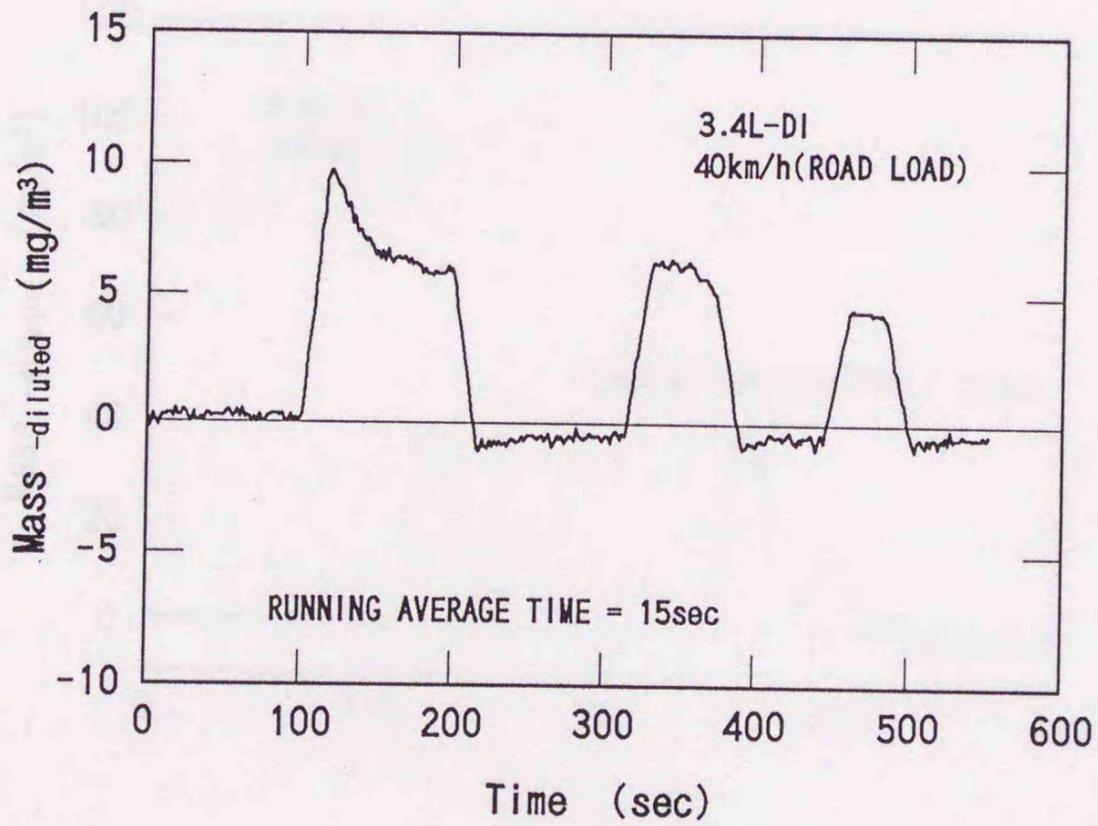


図 4・6 重量濃度の出力例 (移動平均時間 15sec)

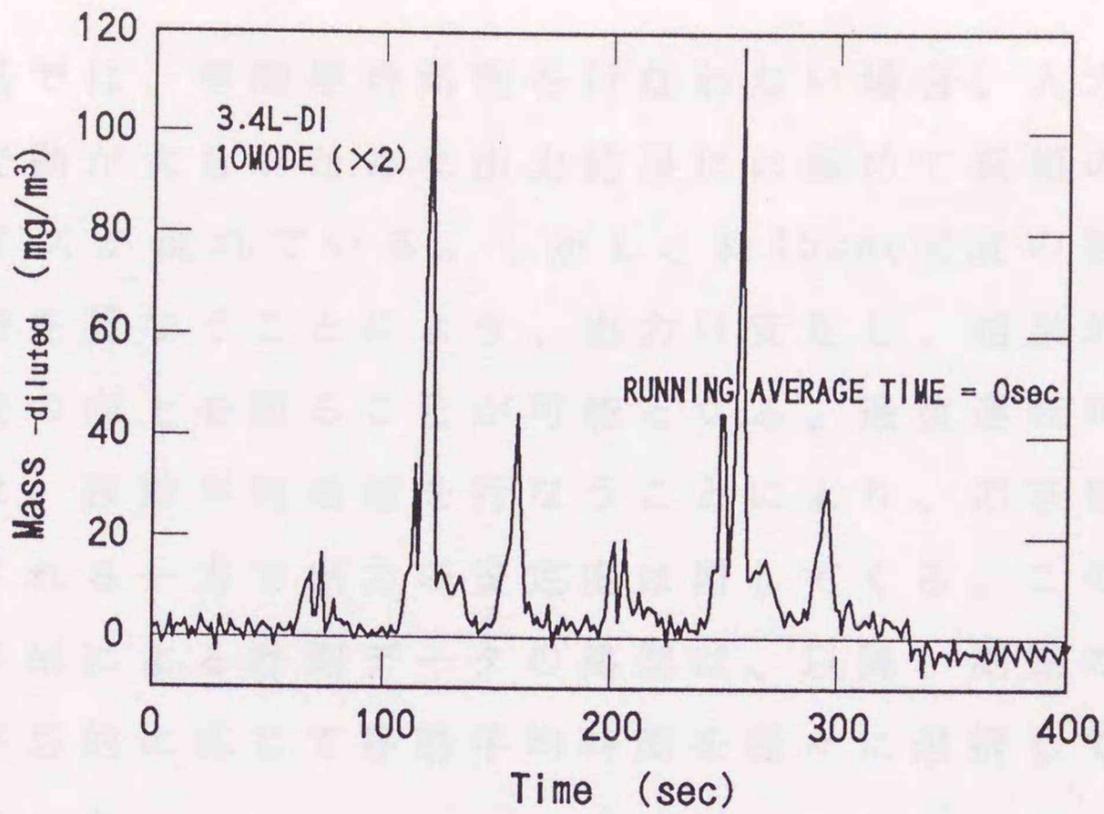


図4・7 10モード時の出力例（移動平均処理無し）

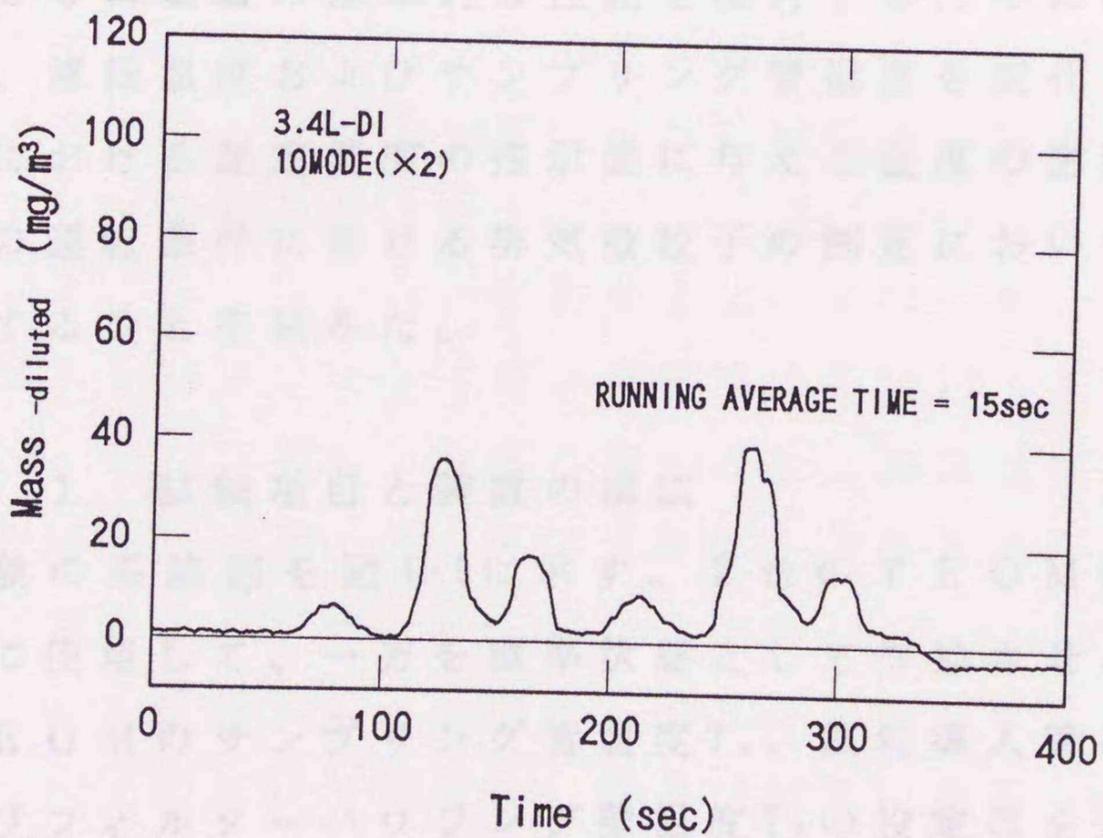


図4・8 10モード時の出力例（移動平均時間15sec）

の結果では、移動平均処理を行わない場合、入力データの変動が大きいため出力結果には極めて振幅の大きいノイズが現れている。しかし、約15sec程度の移動平均処理を行なうことにより、出力は安定し、結果的に検出精度の向上を図ることが可能となる。過渡運転時の場合には、移動平均処理を行なうことにより、応答性が犠牲にされる一方で出力の安定度は増してくる。このため、TEOMによる計測データの処理は、以降、測定の対象および目的に応じて移動平均時間を種々に選択して演算を行なった。

#### 4.3 捕集濾紙の温度条件に関する検討

TEOM装置の基本的な性能を検討するために、ここでは、濾紙温度およびサンプリング管温度を変化させた場合における測定濃度の指示値に与える温度の影響を、種々の運転条件における排気微粒子の測定において明らかにすることを試みた。

##### 4.3.1 試験項目と装置の構成

実験の系統図を図4.9に示す。2台のTEOM装置を並列に使用して、一方を標準状態として作動させ、他方のTEOMのサンプリング管温度 $T_s$ 、試料導入管温度 $T_1$ 、およびフィルターハウジング壁温度 $T_0$ の設定値を変えることによって、捕集濾紙温度およびサンプリング管温度を変化させた場合の濃度測定値に対する影響を調べた。

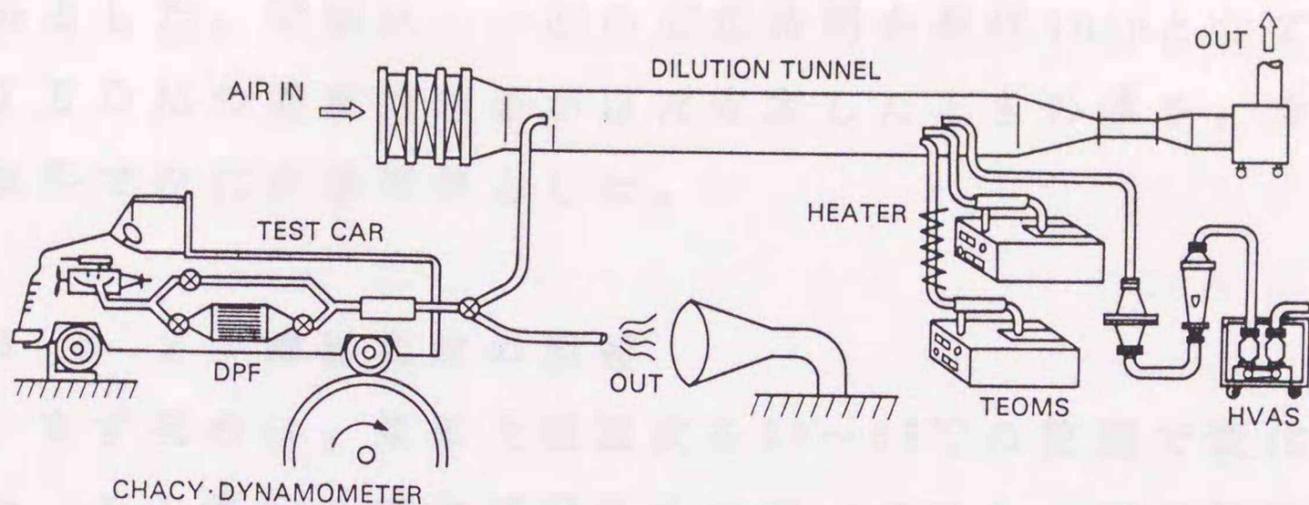


図4・9 実験の系統図

まず、濾紙温度変化に関する実験では、試料導入管温度およびフィルターハウジング壁温度の設定値を変えることによって濾紙上面温度を29～53℃の範囲で変化させ、その影響を定常運転条件で調べて見た。その際、基準側TEOMは、 $T_1=65^\circ\text{C}$ 、 $T_0=50^\circ\text{C}$ を標準として設定した。この場合、サンプリング管温度は両装置とも室温（約22～25℃）に放置した。

つぎに、サンプリング管温度変化の実験においては、比較側TEOMのサンプリング管温度を約22（非加熱、室温）、50、65℃の3段階に変化させ、測定濃度に及ぼす影響について調べた。そのために、比較側のTEOMには、加熱保温可能な長さ約2m、内径4mmのフッ素系ゴムホースを使用した。基準側TEOMのサンプリング管温度は、上記実験と同様に、室温（22℃）放置とした。

運転条件は、微粒子の排出特性が大きく異なるアイドリング（800rpm）、および3/4負荷（2700rpm）の定常運

転とした。実験は、一回の測定時間を最低4minとして、T E O Mの濃度指示値がほぼ安定したときの値を、その条件での代表濃度値とした。

#### 4.3.2 濾紙温度の影響

まず初めに、濾紙上面温度を29~53℃の範囲で変化させ、その影響を定常運転条件で調べて見た。測定結果を図4.10に示す。ここで、縦軸は比較側T E O M濃度/基準側T E O M濃度で示した。濾紙温度の変化によって、各運転条件での測定濃度は影響を受けるが、アイドリング条件では、濾紙温度の上昇とともに、標準条件での測定値に対し約1.8~0.9倍へと変化する。アイドリング運

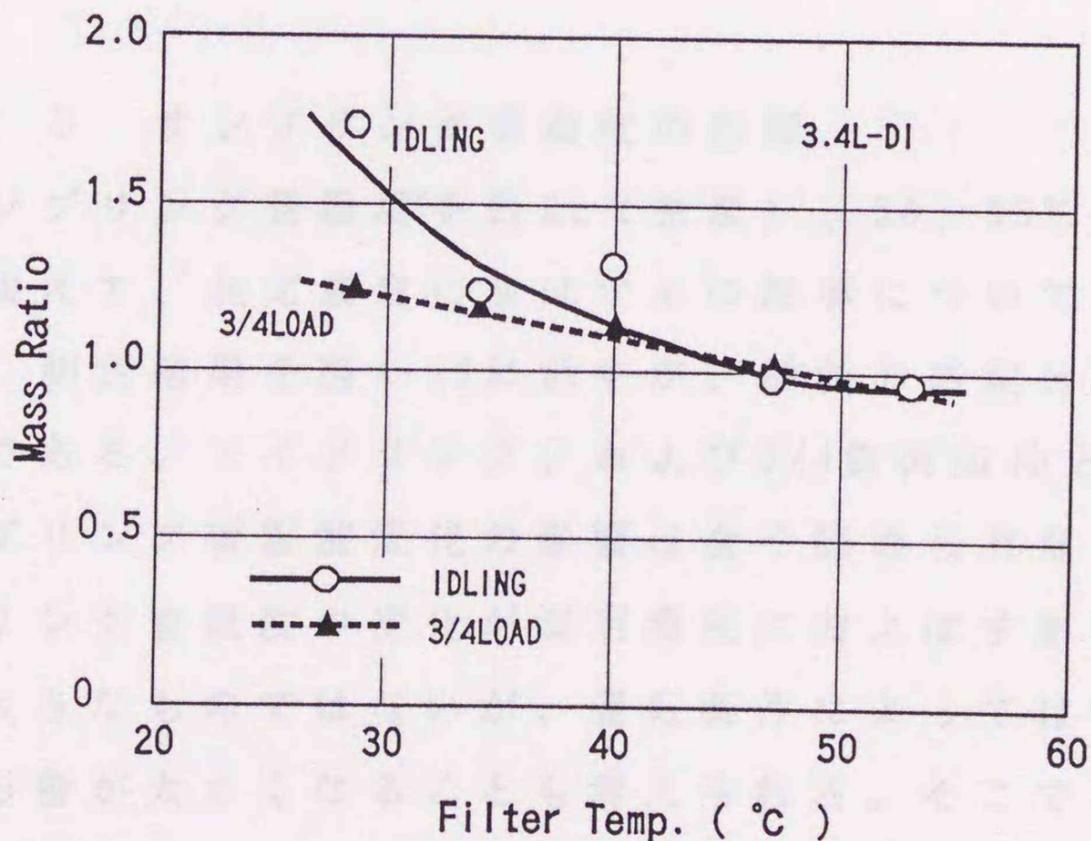


図4.10 濾紙温度変化と測定濃度

転の場合、微粒子の排出量が少ないために、濃度の絶対値が $2\text{mg}/\text{m}^3$ 程度と小さくなり、測定濃度の変動が大きくて、結果に大きなバラツキが生じたものと考えられる。3/4負荷条件においても、温度の上昇とともに測定濃度が減少するが、その変化幅は1.2~1.0倍と比較的小さい。アイドリング条件に比べ、蒸発成分の含有率が少ないことに一因があると考えられる。

これらの結果から、TEOMにおいても濾紙の温度が変化すると、フィルター捕集法と同様に測定濃度が影響を受けることが理解される。しかし、実際の測定に際しては、濾紙が恒温槽内で保温されているTEOM装置は、フィルター捕集法に比べて、その影響は比較的少ないものと判断される。

#### 4.3.3 サンプリング管温度の影響

サンプリング管温度を約22(室温)、50、65℃の3段階に変えて、測定濃度に及ぼすその影響について調べて見た。測定結果を図4.11に示すが、縦軸の表記は前図と同様である。アイドリング、および3/4負荷条件ともに、サンプリング管温度変化の影響は全く認められない。サンプリング管温度の変化が測定濃度におよぼす影響はさほど大きなものではないが、運転条件によっては管路温度の影響が大きくなることも考えられる。そこで、以降、管壁温度は試料ガスの露点以上に保つこととした。

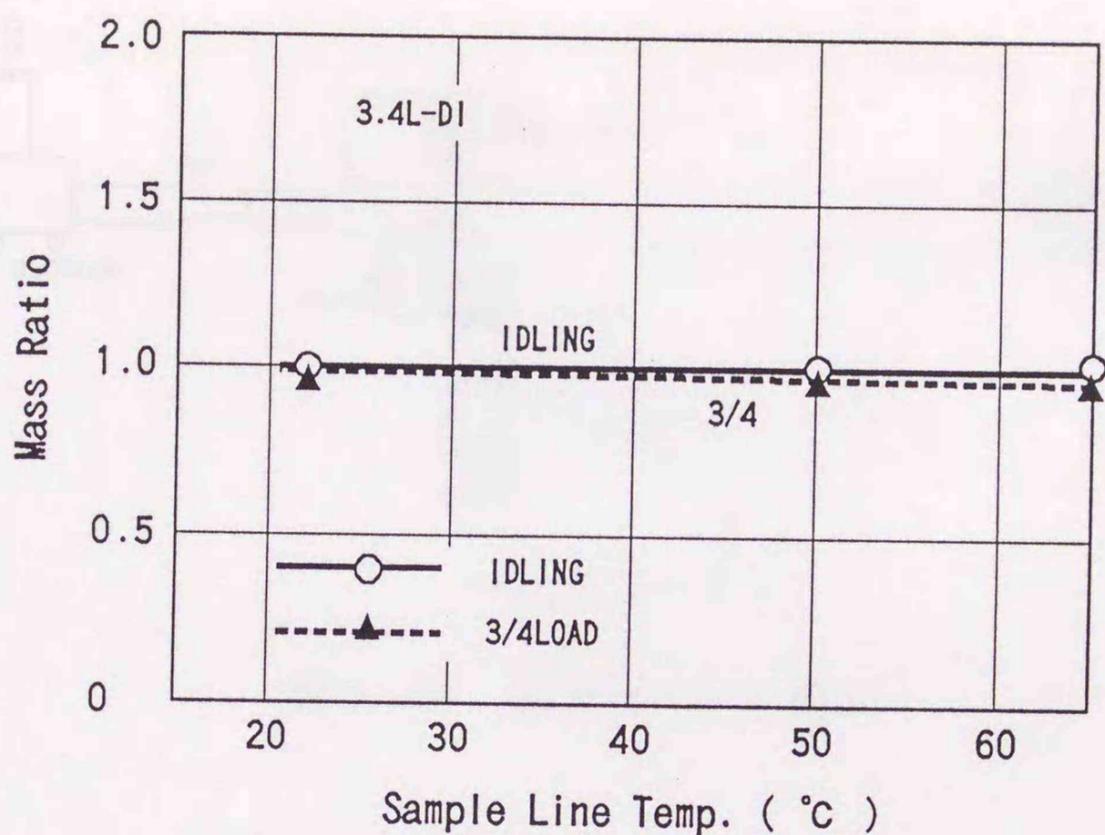


図4.11 サンプリング管温度変化と測定濃度

#### 4.4 微粒子濃度の測定

つぎに、TEOM装置の一般的な測定性能を明らかにするため、定常および過渡運転条件下での微粒子濃度の測定試験を行なうとともに、連続測定時の過渡応答特性についても考察を行なった。また、希釈・フィルター捕集法との比較測定実験を行ない、両者の相関とディーゼル排気微粒子測定におけるTEOM装置の特性について検討を加えた。

##### 4.4.1 定常運転における濃度の測定

図4.12に実験装置の概略を示す。供試車輛はシャシダイナモメータ上に設置された、排気量3.4Lの直接噴射

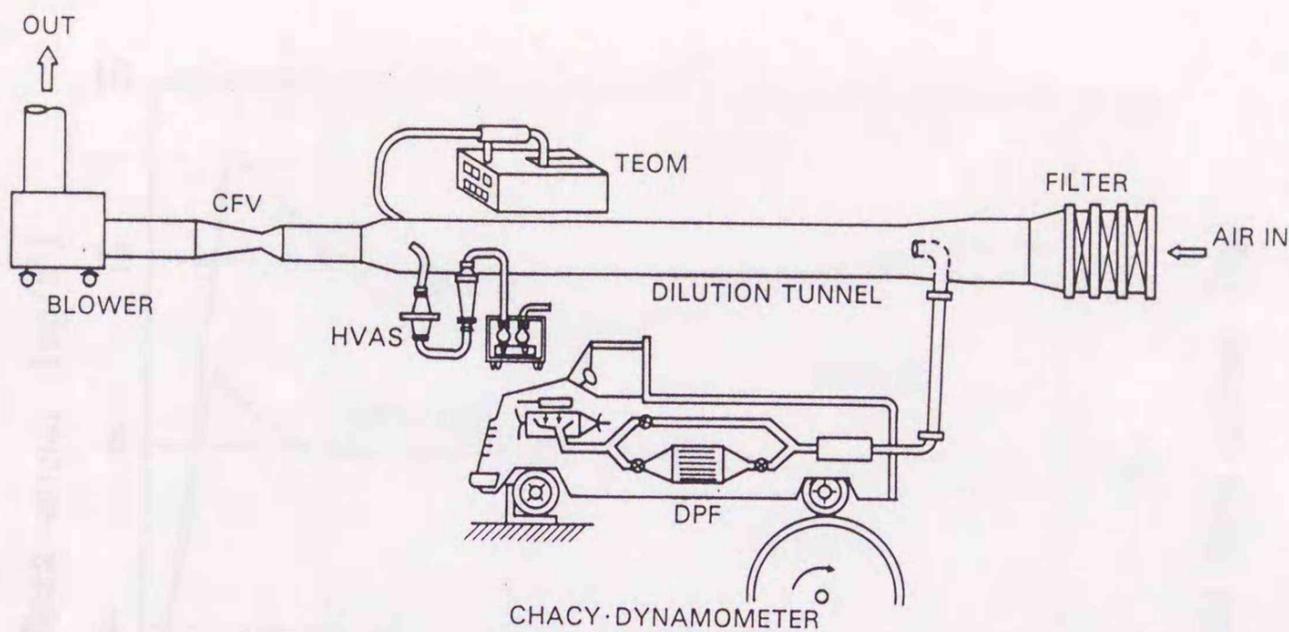


図4・12 実験装置の構成

式エンジンを搭載する小型ディーゼルトラックである。TEOM装置は、フィルター捕集法におけると同位置に配置された採取孔に接続され、フィルター捕集法との同時採取が行なえるように工夫した。

運転条件として、濃度差が明確にできるアイドリング(800rpm)、1/4負荷(2000rpm)、および3/4負荷(2700rpm)の3条件を選んで測定を行なった。排気微粒子は、希釈風洞内からステンレスパイプを通して採取し、これに対して長さ約2m、内径8mmのシリコンゴムホースを接続して、TEOMの試料導入部に連結した。

図4・13に、各運転条件下での測定濃度とその時の積算重量の変化を示す。アイドリング運転時には、計測開始直後から積算重量はほぼ直線的に増加するように見えるが、その勾配すなわち重量濃度は、時間の経過とともに僅かに増加して、その後安定する傾向が認められる。

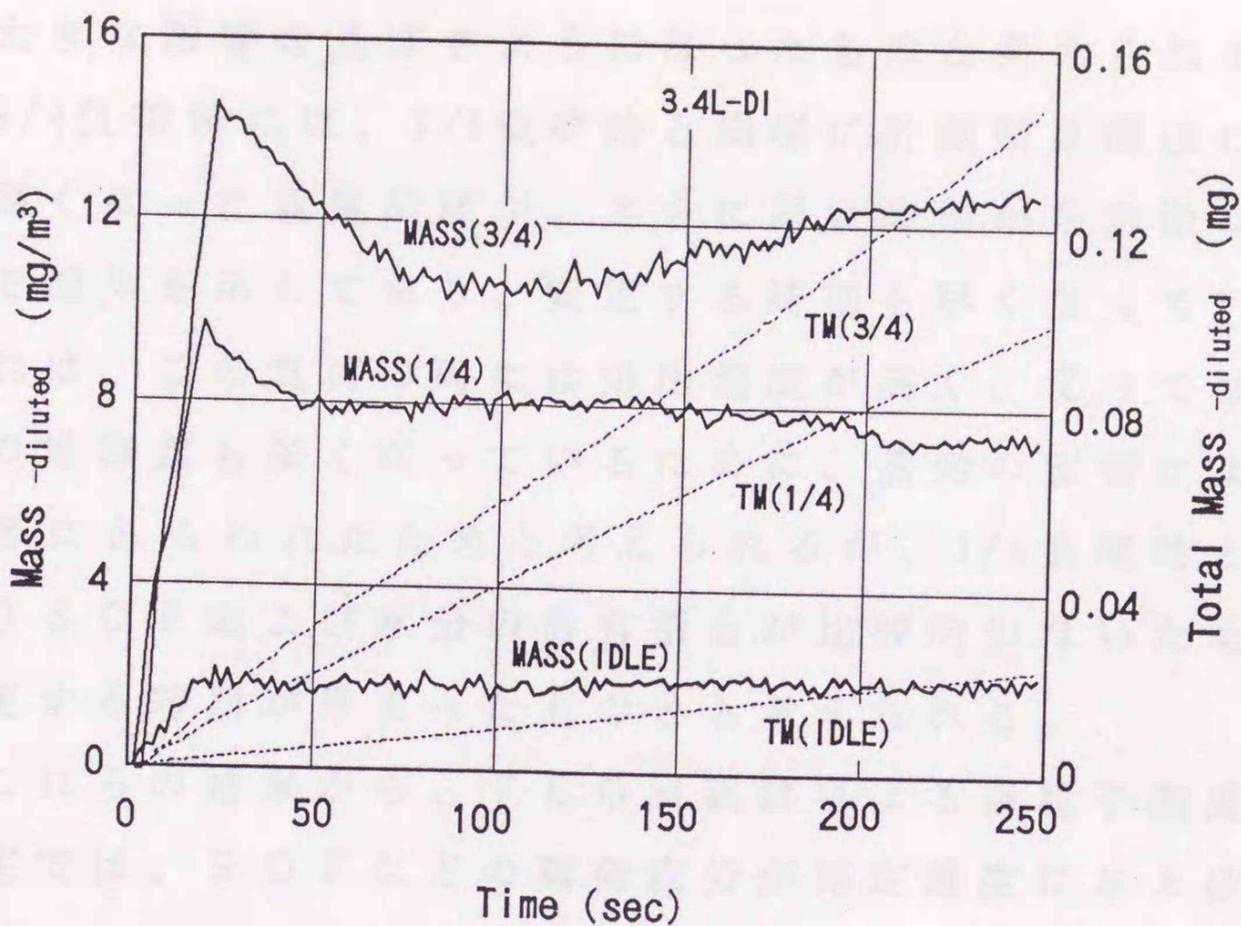


図4・13 T E O Mによる濃度測定結果

この運転条件では、排出濃度が低いために、濾紙への堆積量が少なく、計測開始直後は微粒子の吹き抜けによる影響のため捕集効率が低かったものが、堆積量の増加とともに捕集効率が増加して重量濃度も次第に高くなって行くものと思われる。1/4負荷時には、アイドリング時とは異なり、計測開始直後に重量濃度が最も高く、次第に濃度が低下して、その後安定する傾向を示す。この負荷の時には、実験に使用したエンジンの特性として、S O F および水分の含有割合が非常に高いために、捕集堆積量が少ない計測開始直後には、それほど大きくなかったそれら蒸発成分の影響が、堆積量が増すにつれ次第

に大きな影響を及ぼすようになったものと考えられる。

3/4負荷時には、1/4負荷時と同様に計測開始直後に最も高くなった重量濃度が、さらに早い時期から急激な勾配で減少を示しており、安定する時期も早くなっている。これは、この負荷の時には排出濃度が高く、従って濾紙への堆積量も多くなっているために、蒸発の影響がより顕著にあらわれたためと考えられるが、1/4負荷時と異なりSOFおよび水分の含有割合が比較的少ないために、安定する時期が早まったものとも考えられる。

これらの結果から、TEOM装置による微粒子濃度の測定では、SOFなどの蒸発成分が測定濃度におよぼす影響のあることが確認された。しかし、このような問題点は、同じ微粒子の捕集原理にもとづく、希釈・フィルター捕集法においても共通する事項であると考えられるが、TEOMによる連続測定が可能になって初めて指摘できるようになったものと言えよう。

図4・14は、排気処理装置を装着したときの、アイドリング時における重量濃度の測定例を示したものであり、種々な条件の中で微粒子排出濃度が最も低い時の測定結果である。移動平均時間を極めて長くしたことにより、重量濃度は約 $0.3\text{mg}/\text{m}^3$ 程度として読み取ることが出来るが、濃度はマイナス値となっており、実用的にはTEOM装置の分解能以下の濃度であると考えられる。なお、TEOM装置による高濃度条件時での測定では、濾紙堆積量が極めて多くなるために、比較的短時間で濾紙差圧

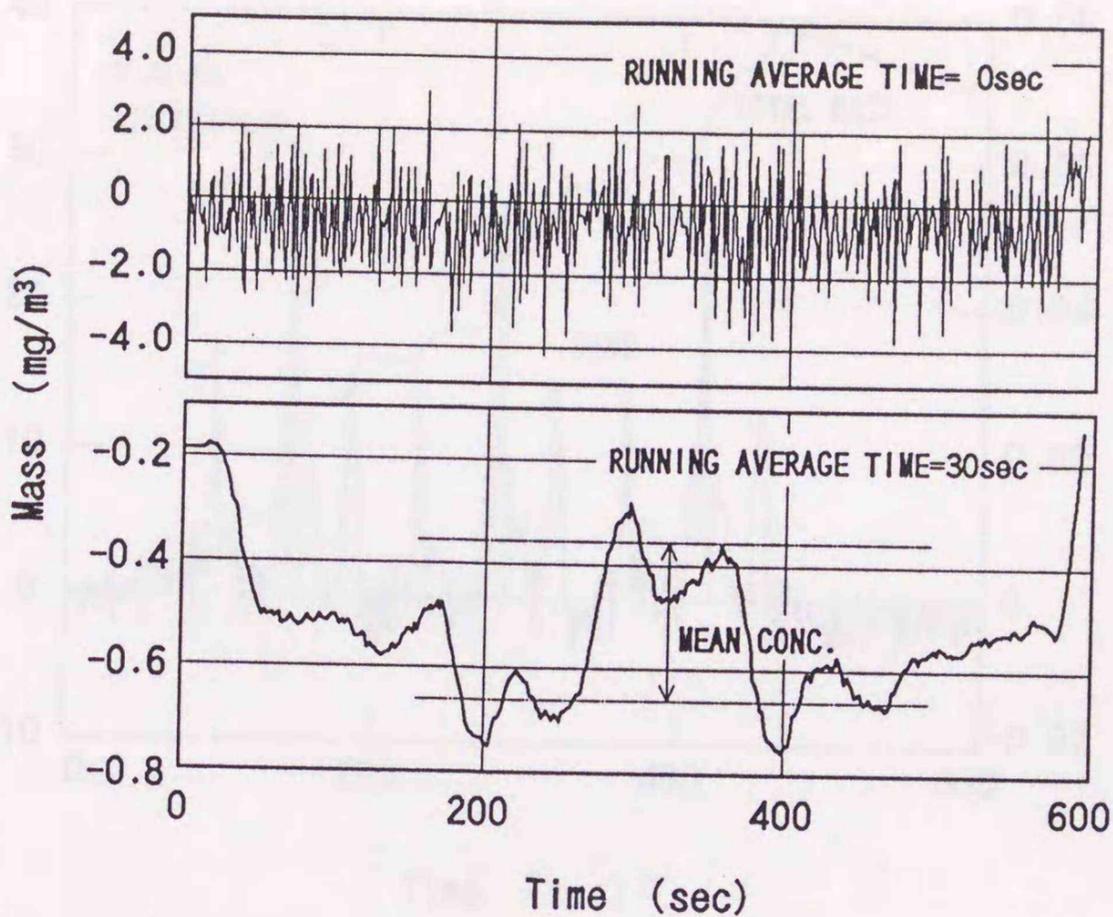


図4.14 D P F 装着による低濃度測定の場合

が上昇し、吸引ポンプの能力以上の差圧となってしまう。そのため、吸引時間が、重量濃度が安定する時間以上となるような場合には、サンプル流量を少なくして測定を行なうこととした。

#### 4.4.2 過渡応答性に関する検討

図4.15は、供試車輛を10モード運転させたときの重量濃度の連続測定結果、ならびにその時の積算重量を示したものである。過渡運転時には、加速時の濃度が極めて高くなり、一方、アイドリング、定速、減速時などでは極めて低い濃度となるが、T E O M 装置では、このよ

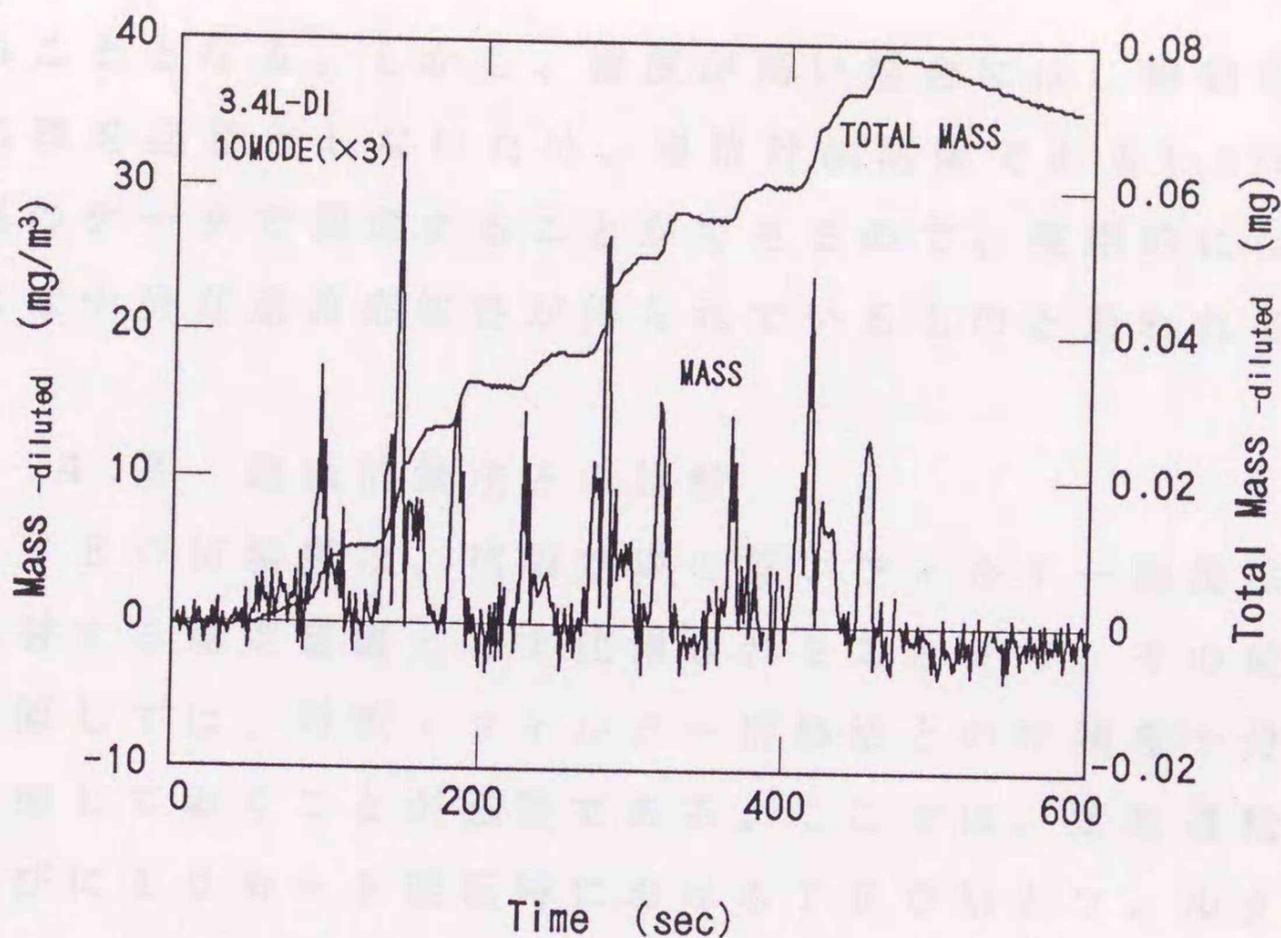


図4・15 10モード運転時の連続測定例

うな広範な濃度変化に対して良好な追随性を示している。積算重量の結果について見てみると、運転終了時のアイドリング時、あるいはエンジン停止後において、積算重量が減少傾向にあることが観察される。これは、明らかに一度堆積した微粒子からの蒸発成分の影響によるものであって、微粒子重量が減少しているためと考えられる。

TEOM装置は、原理的には積算重量値から重量濃度を測定する方式であるので、光透過法などに比べると応答性は劣っている。また、排出濃度条件が低くなってきた場合には、移動平均時間を徐々に長くしていくことが必要であり、TEOM装置の過渡応答性はさらに悪化す

ることとなる。しかし、濃度が高い場合には、移動平均処理を必要としないため、単位計測間隔である1.67sec毎のデータで測定することができるので、実用的には、ほぼ十分な過渡応答性が得られているものと思われる。

#### 4.4.3 濾紙捕集法との比較

TEOM装置は、試験効率の低いフィルター捕集法に代替する測定装置として使用されることから、その使用に際しては、希釈・フィルター捕集法との相関を十分に把握しておくことが必要である。ここでは、定常運転ならびに10モード運転時におけるTEOMとフィルター捕集法の比較測定を行ない、その結果について検討した。

図4.16は、比較的low濃度な条件の時の比較結果を示している。low濃度の場合には、蒸発成分の影響が大きく、ゼロレベルがマイナスとなる。このため、図中三角印のプロットで示したTEOM装置による重量濃度測定の結果は、フィルター捕集法に比べて多少低い値となっている。しかし、蒸発の影響によるマイナス分を濃度値に加えた結果で比較すると、両者はlow濃度域においても比較的近い値となることが分かる。

図4.17は、比較的高濃度の範囲で、TEOMとフィルター捕集法との比較測定を行なった結果である。濃度の高い範囲で、TEOMとフィルター捕集法の濃度に多少の差異を生じてはいるものの、15~20mg/m<sup>3</sup>以下の範囲では、両者はほぼ同様の濃度値を示している。フィルタ

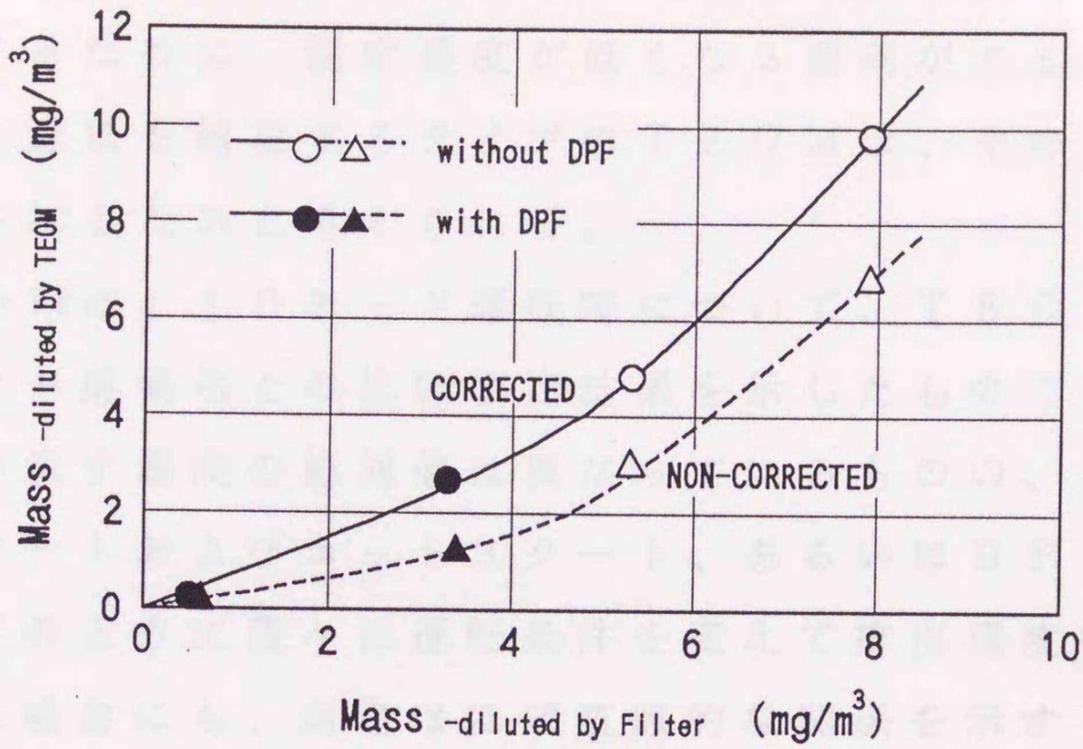


図 4.16 T E O M と フィルター 捕集法 (低濃度)

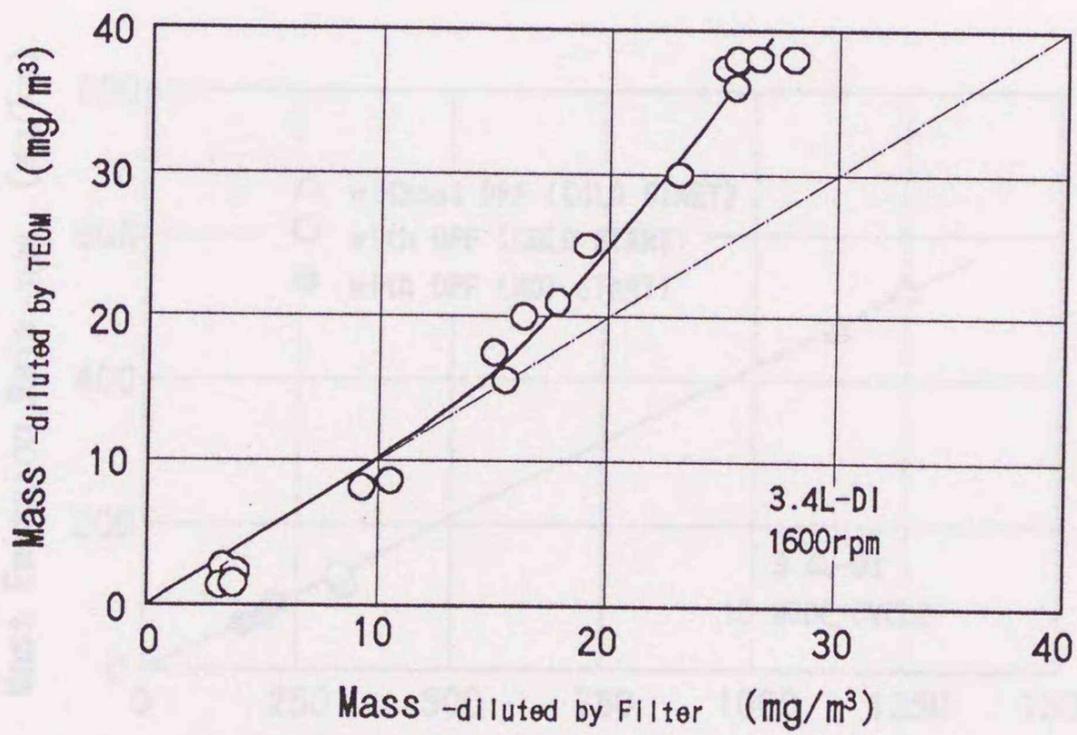


図 4.17 T E O M と フィルター 捕集法 (高濃度)

一 捕集法は、高濃度域での実験において捕集濾紙温度が上昇するために、測定濃度が低くなる傾向があるのに対して、濾紙を保温するタイプのTEOMは、その影響が軽減されるためと考えられる。

図4・18は、10モード運転時について、TEOMとフィルター捕集法との比較測定結果を示したものである。両者の示す濃度の絶対値は異なっているものの、コールドスタートおよびホットスタート、あるいはDPFの装着などのように種々に運転条件を変えて排出濃度を変化させた場合にも、両者はほぼ直線的な関係を示すことが分る。なお、10モード運転の場合には、フィルター捕集法の濾紙温度は、平均車速が低くて負荷が小さいために、TEOMの濾紙温度に比べて低くなる傾向がある。

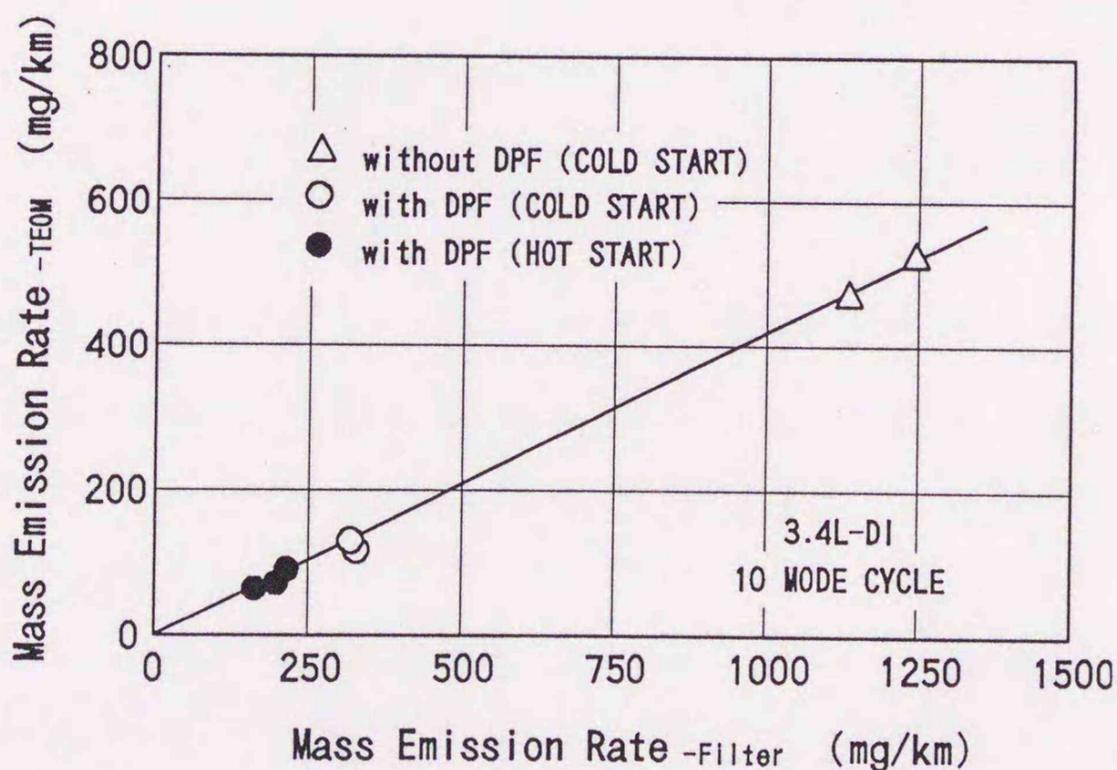


図4・18 10モード時の比較

このために、フィルター捕集法による測定濃度は、TEOMのそれに比べて高くなったものと考えられる。

これらの結果から、TEOMとフィルター捕集法とは、濾紙温度の相違に起因して、濃度の絶対値に多少の差異を生じるものの、両者の相関は良好であり、排気微粒子の簡易・連続測定装置として、TEOMは有用性の高い装置であると判断される。

#### 4.5 本章における結論

本章では、振動天秤法による微粒子濃度の瞬時測定方法について、定常および過渡運転条件下における微粒子濃度の測定実験ならびに希釈・フィルター捕集法との比較測定実験の結果について記述した。本章で得られた結論は、およそ以下の通りである。

- (1) T E O M 装置で得られた計測データの効率的な処理方法を提示し、定常運転時における T E O M 装置の指示する積算重量の差から求めた微粒子重量と精密天秤による秤量結果との比較を行なうことによって、周波数変化から求めた T E O M 指示重量と精密天秤で測定した重量とはほぼ一致することが確かめられた。
- (2) 濾紙温度変化の影響に関しては、濾紙の温度が変化すると、フィルター捕集法と同様に測定濃度は影響を受けるが、その影響は比較的少ないと判断される。また、サンプリング管温度に関しては、その影響は殆どないものと判断された。
- (3) 排気処理装置 ( D P F ) を装着した場合のアイドリング時の微粒子排出濃度は約  $0.3\text{mg}/\text{m}^3$  程度であって、実用的には T E O M 装置の分解能以下の濃度であると考えられる。
- (4) モード運転時の連続測定においては、濃度変化に対して良好な追随性を示すことが分った。また、濃度排出レベルが低い場合には、移動平均時間を長くする必要があり、過渡応答性が犠牲となるが、濃度が高い場

合には、実用的にほぼ十分な過渡応答性の得られることが分った。

- (5) T E O M とフィルター捕集法との比較測定実験により、両者の間には、濾紙温度の相違に起因する測定濃度の差異はあるものの、その相関は良好であり、排気微粒子の簡易・連続測定装置として、T E O M は有用性の高いものであることが確認された。

## 第5章 光透過法を利用した排気煙濃度の連続測定

### 5.1 緒 論

光透過式スモークメータは、Lambert-Beerの原理にもとづき、試料煙中を通過する透過光の減衰率から煙の濃度を測定するものであって、ディーゼル排気中の微粒子濃度の測定を迅速かつ簡便に行なうことが可能である。これは、処理装置通過後の低濃度排気煙を簡易・連続測定する装置として、最も実現の可能性が高い方式であって、ディーゼル排気微粒子を評価するための有効な計測手法の一つとして着目されている。

第5章では、まず初めに、この方法を微粒子測定に用いる際の問題点を指摘するとともに、その測定原理と高感度化の手法について論述した。ついで、排気微粒子の粒径および光源波長の変化が光透過法の測定結果に与える影響について検討するとともに、粒径分析器を用いた分級測定により、ディーゼル排気微粒子の粒径範囲の特定を行なった。

さらに、光透過式スモークメータの高感度化手法の概念にもとづいた信号重畳式スモークメータおよび多重反射式スモークメータの試作、ならびに測定実験を行なった。すなわち、試作した高感度型スモークメータの概略について記述するとともにその基本特性を検討した。また、不透過率から重量濃度への変換方法について論じるとともに、試作装置による種々の運転条件下での排気煙

濃度測定の結果についても記述した。

最後に、光透過法と重量濃度測定方法との相関について明らかにすることを目的として、光透過法、フィルター捕集法および振動天秤法による比較測定実験を行なった結果について記述した。

## 5.2 微粒子測定における光透過法の適用

これまで、ディーゼル排気煙の簡易測定方法として、光の透過・減衰を利用したスモークメータが実用されてきた<sup>(55)</sup>。この方法によれば、排気ガスの希釈を必要としない直接測定が可能であるが、簡便さを特長としている反面、従来は高濃度煙を対象としたものが主で、低濃度域での測定が難しい、あるいは基準とされる重量濃度との相関がはっきりしないなどの欠点も指摘されてきた<sup>(56)</sup>。また、連続測定が可能のため過渡運転時のモニタリング装置として利用される場合が多く<sup>(57)</sup>、長時間測定時のドリフトの影響、光学系の汚染なども注意を要する点であった。このため、本方式にもとづいたディーゼル排気微粒子の連続測定装置を開発していくためには、これらの問題点についてその原因の究明と対策法に関する詳細な考察を行なうことが必要である。本節では、上記問題点の解明を図るとともに、光透過法を利用した測定方法の開発を目的とした研究の結果について記述する。

### 5.2.1 光透過法における測定原理

光透過式スモークメータは、一対の光源と受光器とを備え、光路中を通過する試料煙の光の減衰（不透過）率から煙濃度を求める装置である。図5.1に光透過式スモークメータの測定原理を示す。図において、入射光および透過光の強度を $I_0$ および $I$ とすると、Lambert-Beerの法則から、

$$I = I_0 e^{-KL} \quad (5.1)$$

となる<sup>(57)</sup>。ここで、 $K$ は煙濃度に比例した試料煙の減光度、 $L$ は有効光路長である。また、試料煙の不透過率 $N$ は、

$$N = 1 - I/I_0 \quad (5.2)$$

$$= 1 - e^{-KL} \quad (5.3)$$

で示される。一方、測定対象とする試料煙が多分散粒子からなる場合には、粒子群の平均減衰係数を $Q$ 、ザウタ平均粒径（体積／面積平均粒径）を $D_{3,2}$ とすると、体積濃度 $C_v$ は、

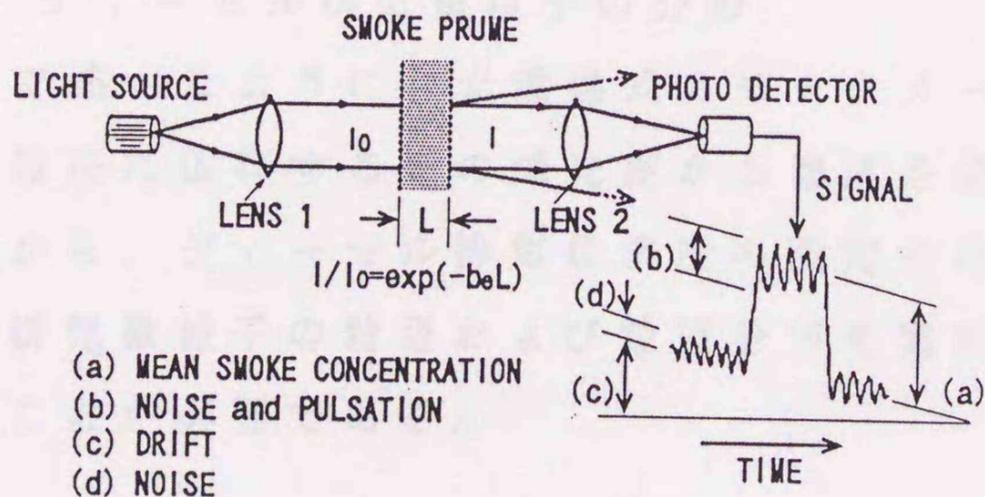


図5.1 光透過式スモークメータの測定原理

$$C_v = -(2D_{3.2}/3LQ) \ln(I/I_0) \quad (5.4)$$

で示される<sup>(58)</sup>。ここで、粒子の密度を $\rho$ とすれば、式(5.2)および式(5.4)から、試料煙の重量濃度 $C_g$ は、

$$C_g = -(2D_{3.2}/3LQ) \rho \ln(1-N) \quad (5.5)$$

となる。従って、光透過式スモークメータにより試料煙の不透過率 $N$ を測定すれば、その時の濃度 $C_v$ および $C_g$ などは、粒子群のザウタ平均粒径 $D_{3.2}$ とその値によって決定される減衰係数 $Q$ 、粒子密度 $\rho$ および有効光路長 $L$ などによって計算により求められる。しかし、煙の減光度 $K$ 、あるいは減衰係数 $Q$ は、光源の波長、粒子径、あるいは粒子の屈折率などにより変化する値であり、光透過式スモークメータで測定した煙濃度、すなわち不透過率は、それら因子の影響を受けることになる<sup>(60)</sup>。

実験に際しては、まず初めに、分級測定実験によりディーゼル排気微粒子の粒径範囲を特定するとともに、粒径および光源波長の影響について検討を行なった。

### 5.3 ディーゼル排気微粒子の分級

前節で述べたように、光透過式スモークメータは、試料煙の粒径に依存する煙の減光度から濃度を求める方式であるから、ディーゼル排気煙濃度の測定を行なうためには、排気微粒子の粒径および粒径分布を実験的に調べておくことが必要である。

### 5.3.1 粒径範囲と分級装置の種類

ディーゼル排気微粒子の粒径あるいは粒径分布の測定には、これまで、電子顕微鏡により観察する方法が採用されてきた<sup>(61)</sup>。しかし、液滴微粒子を含む粒子測定では、試料の採取および調整に高度の技術を要求されるため、近年では、大気中あるいはクリーンルーム内の浮遊微粒子の測定に使用される静電式微粒子分析計 (Electrical Aerosol size Analyzer: EAA)、レーザ光散乱分級分析計 (Laser Aerosol Spectrometer: LAS) あるいは、拡散バッテリー (Diffusion Battery: DB) で分級して凝縮核モニタ (Condensation Nuclei Counter: CNC) で計数する方法などが利用されるようになってきている。

図5.2に、ディーゼル排気微粒子の一般的な粒径範囲と上記3つの方法による粒径測定範囲とを簡略化して図示した。一つの計測器でディーゼル排気微粒子の全粒径

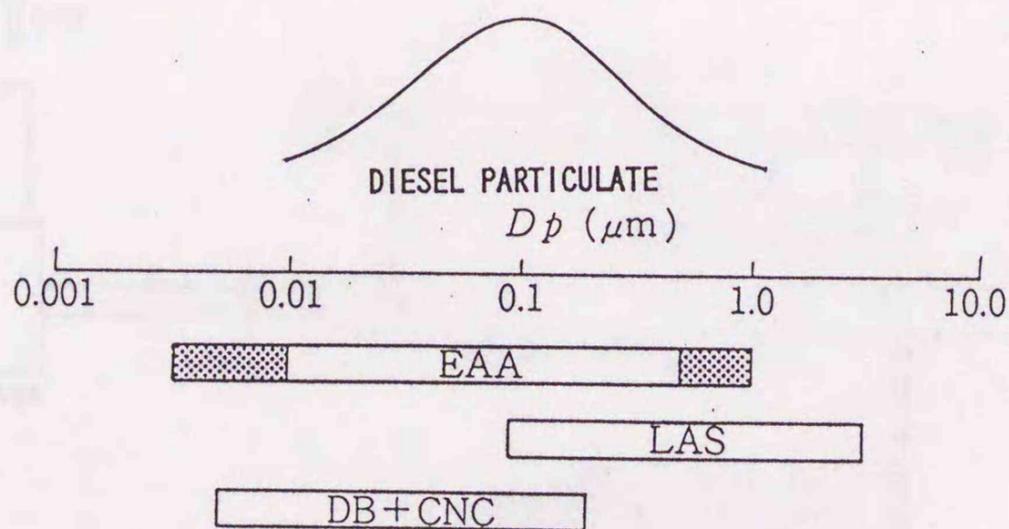


図5.2 各種分級分析器の分級範囲

範囲をカバーすることは難しいが、これら3種類の装置中では、EAAが比較的ディーゼル排気微粒子の粒径範囲に適合した装置といえよう。

### 5.3.2 各種分級測定法における比較試験

初めに、各種分級測定法の特徴について調べ、ディーゼル排気微粒子の分級分析器として最適な装置を選定するために、3種類の分級測定法（EAA、LAS、DB）の比較試験を行なった。図5.3に、実験装置の構成を示す。実験に際しては、排気微粒子濃度を分級測定器の適用濃度範囲まで希釈するために、図中に示した2段希釈装置を試作した。すなわち、大型希釈風洞の微粒子採取位置から希釈排気ガスの一部を2段希釈装置に導入する。1段目の希釈風洞で平均10倍前後に希釈された排気ガスは、

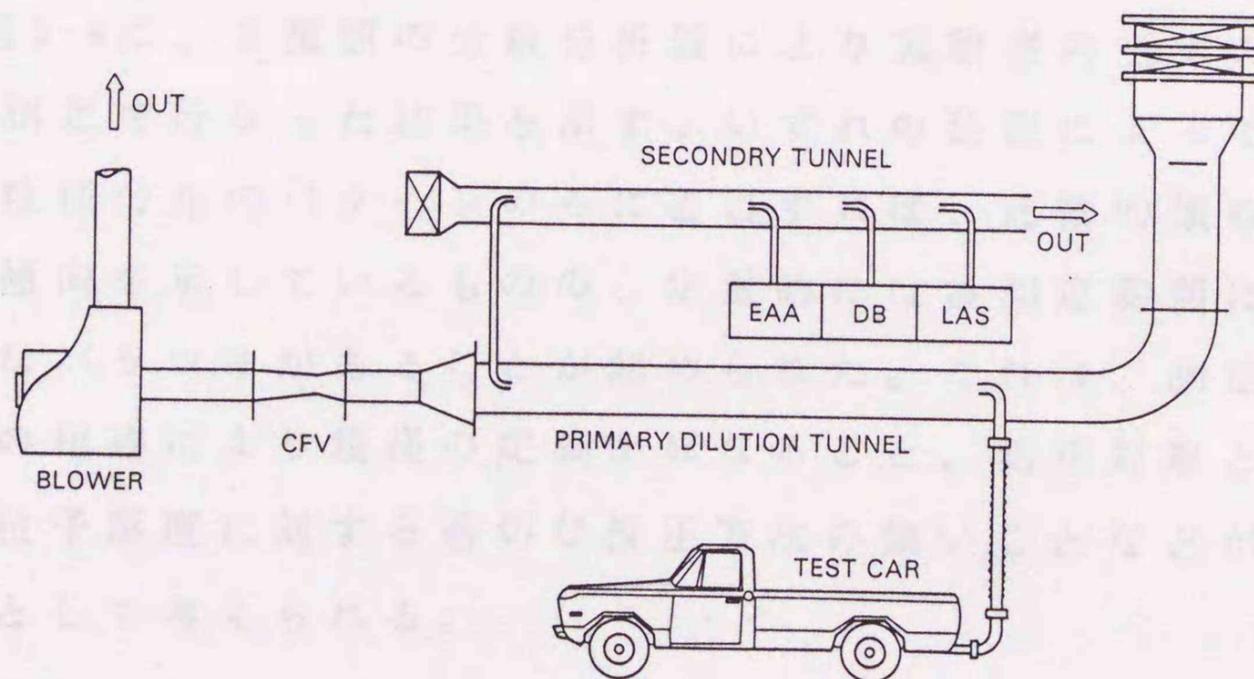


図5.3 実験装置の構成

2 段希釈装置でさらに10~40倍程度に希釈され、最終的に排気ガスは100~400倍前後にまで希釈される。分級分析結果はインターフェースを介してデータ処理装置に入力され、粒径分布、中位径などに関する演算が行なわれる。表5・1に、本実験に使用した3種類の分級分析器の主な仕様を示す。

表5・1 各種分級分析器の主な仕様

	EAA	LAS	DB & CNC
動作原理	静電気の荷電及びモビリティ分析	He-Neレーザ光による光散乱	拡散バッテリーと凝縮核カウンタ
粒径範囲	0.0032~1.0 $\mu\text{m}$	0.12~3.00 $\mu\text{m}$	DB:0.002~0.2 $\mu\text{m}$ CNC:0.0025 $\mu\text{m}$ 以上
試料流量	70 cc/sec	5~10 cc/sec	30~70 cc/sec

図5・4に、3種類の分級分析器により実験室内空気の方級測定を行なった結果を示す。いずれの装置によっても、粒径分布のパターンのみに着目すれば、比較的類似した傾向を示しているものの、定量的には各測定器間に大きなバラツキがあることが認められた。これは、測定原理の相違により粒径の定義が異なること、測定対象となる粒子感度に対する適切な校正方法の無いことなどが原因として考えられる。

しかし、ディーゼル排気微粒子の粒径および粒径分布範囲を定性的に調べるためには、計測可能な粒径範囲、

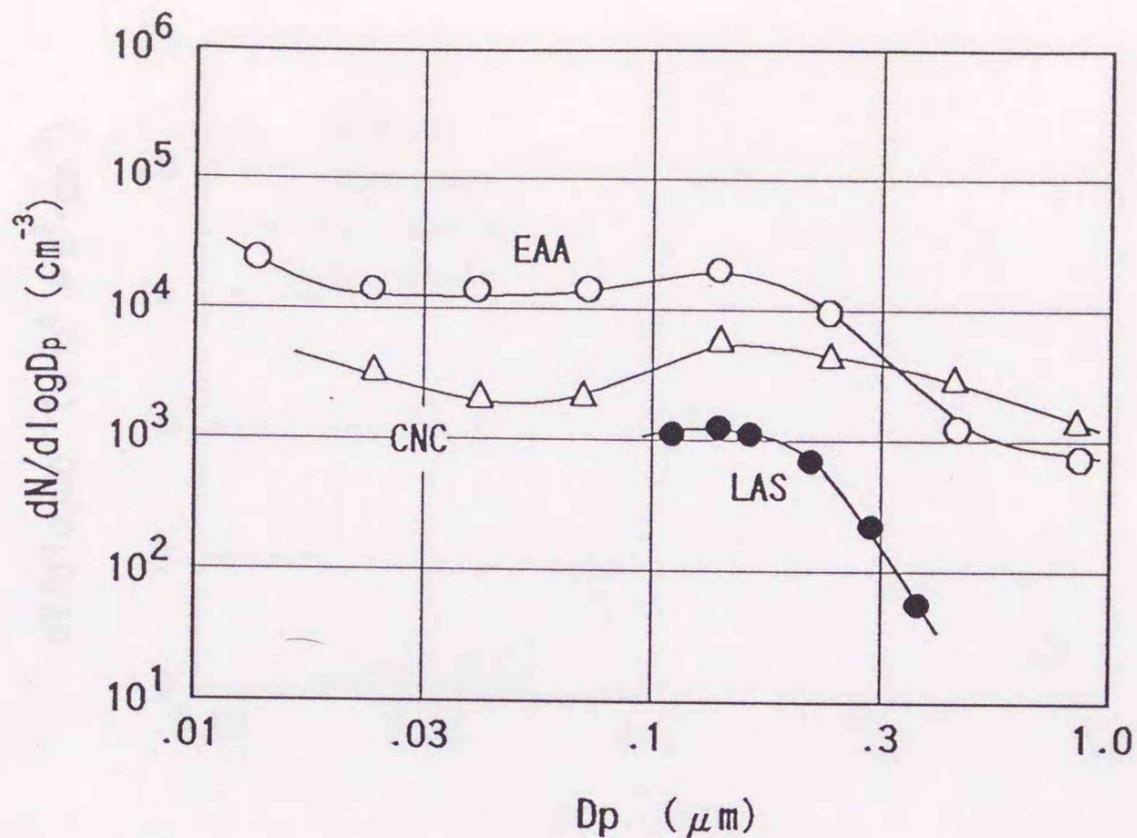


図5.4 各種分級装置の比較結果

あるいは検出部の耐汚染性などに関して、静電式微粒子分析計 (EAA) が、3者の中では最も適した装置であることが分かった。

### 5.3.3 排気微粒子の分級試験結果

上記の結果をもとに、ここではEAAを利用したディーゼル排気微粒子の分級測定を行ない、種々の運転条件下での粒径および粒径分布の変化について調べて見た。

図5.5は、ディーゼル排気微粒子の粒径分布をEAAで測定した結果の一例である。定速走行 (60、80km/h: 道路負荷) 時の体積 (質量相当) 濃度で示した粒径分布範囲は大凡0.01~1.0 μmであって、その時の平均粒径 (MASS

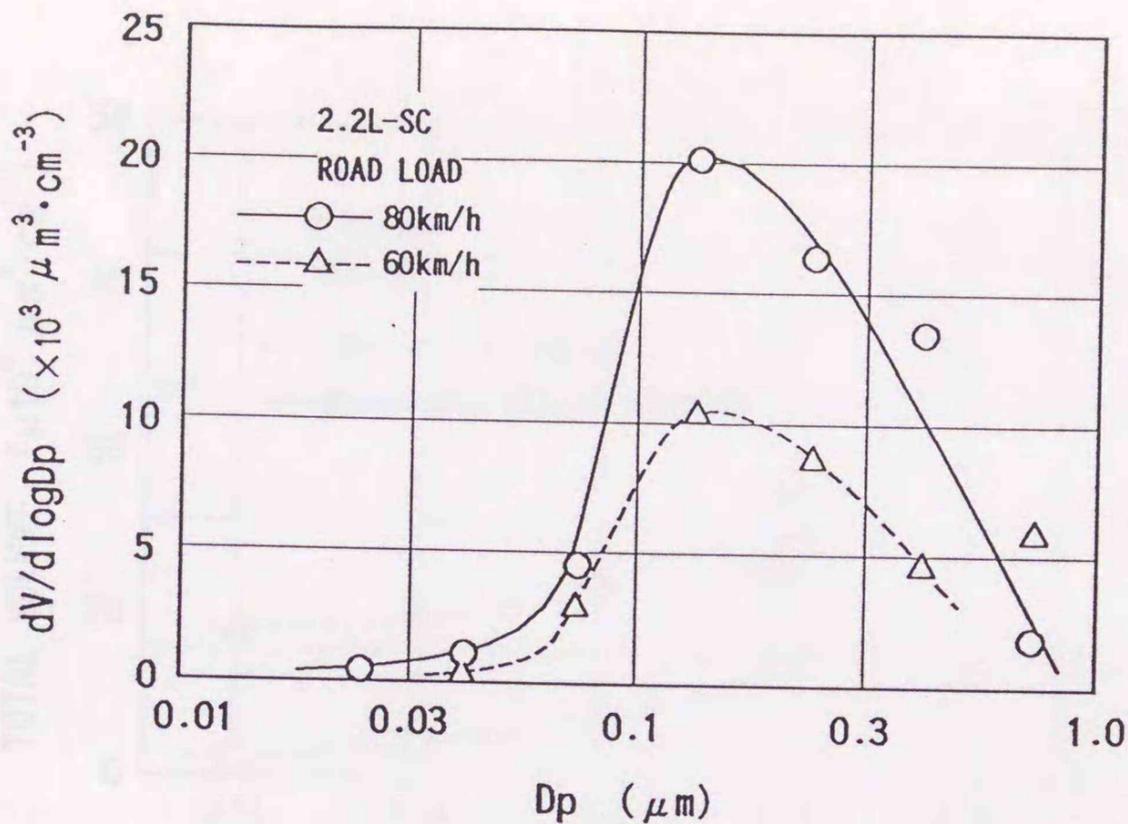


図 5.5 ディーゼル排気微粒子の分級測定例

MEDIAN DIAMETER: MMD) は約  $0.2 \mu\text{m}$  となっている。

図 5.6 は、エンジン負荷率を変化させたときの全体積濃度 (TOTAL VOLUME) および平均粒径の変化を示すものである。負荷率が大きくなるに従い全体積濃度は徐々に増加するが、 $3/4$  負荷を越えるあたりからはその濃度は大幅に増加する。これは、フィルター捕集法などによる濃度測定の結果と一致する。一方、平均粒径は負荷の増加とともに増大し、 $0.1 \sim 0.3 \mu\text{m}$  の範囲で変化することが確認された。すなわち、負荷条件によっては常にこの程度の粒径の変化が存在する。従って本研究では、光透過法による測定の結果から煙濃度を評価する場合、粒径変化による不透過率の変化について考慮した。

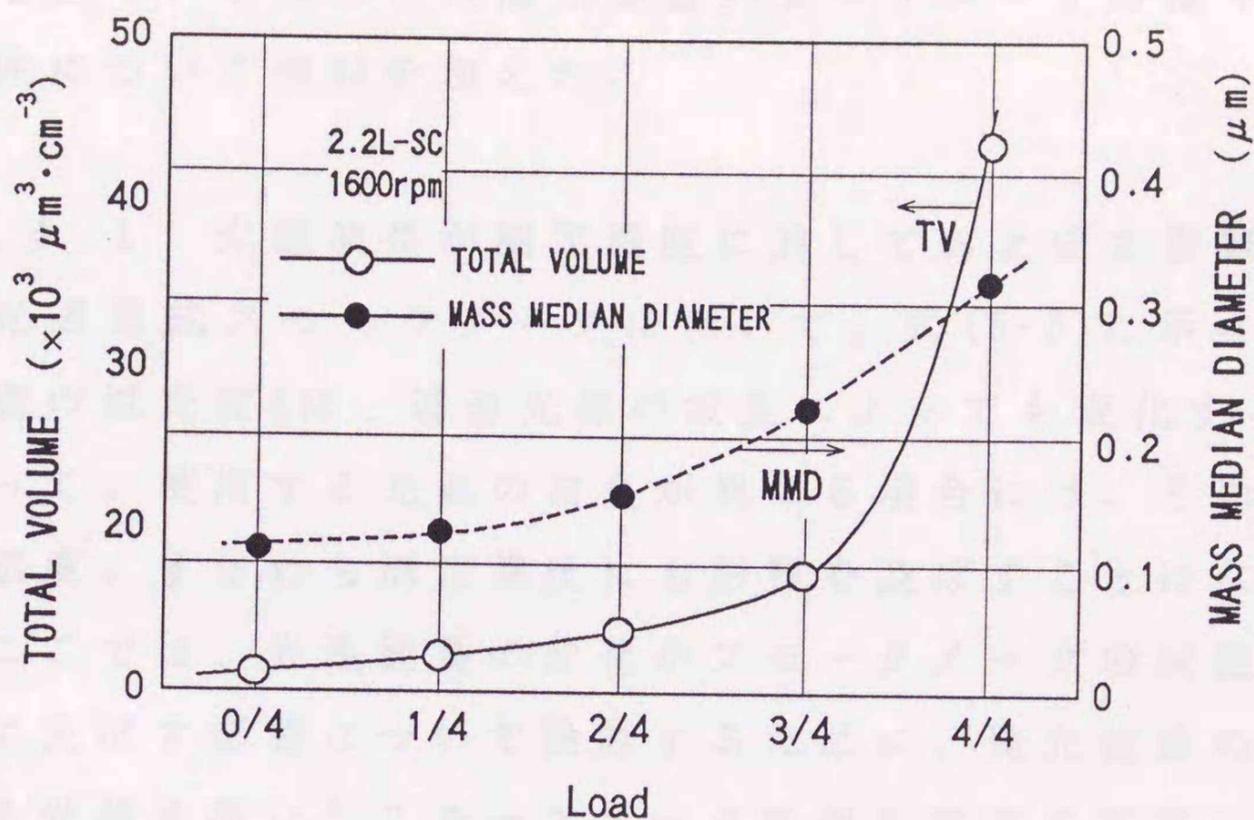


図 5.6 エンジン負荷率と粒径変化

#### 5.4 光透過法の高感度化手法に関する検討

ディーゼル排気煙濃度の簡易・連続測定を光透過式スモークメータで実施するためには、排気処理装置を通過した後の低濃度の排気煙から、高負荷で直接排気される高濃度の排気煙までを、一つの簡便な装置で連続的に測定することが必要となる。従来の光透過式スモークメータでは、高濃度域での測定は可能であるが低濃度域においては検出感度が低下し、殆ど実用に供し難いものであった。

ここでは、光源波長が測定濃度に対して及ぼす影響について調べるとともに、光透過式スモークメータを高感度化する手法について考察した。そして、それらの手法

にもとづいて試作した高感度型スモークメータの種々の特性について検討を加えた。

#### 5.4.1 光源波長が測定濃度に対しておよぼす影響

光透過式スモークメータにおいて、式(5.3)に示される煙の減光度 $K$ は、透過光源の波長によっても変化する。従って、使用する光源の波長が異なる場合には、その検出感度、すなわち測定濃度にも影響を及ぼすことになる。

ここでは、光源波長の変化がスモークメータの測定濃度に及ぼす影響について検討するために、発光波長の異なる光源を用いたスモークメータの相対感度の相違について調べて見た。図5.7に、波長変化の影響について調

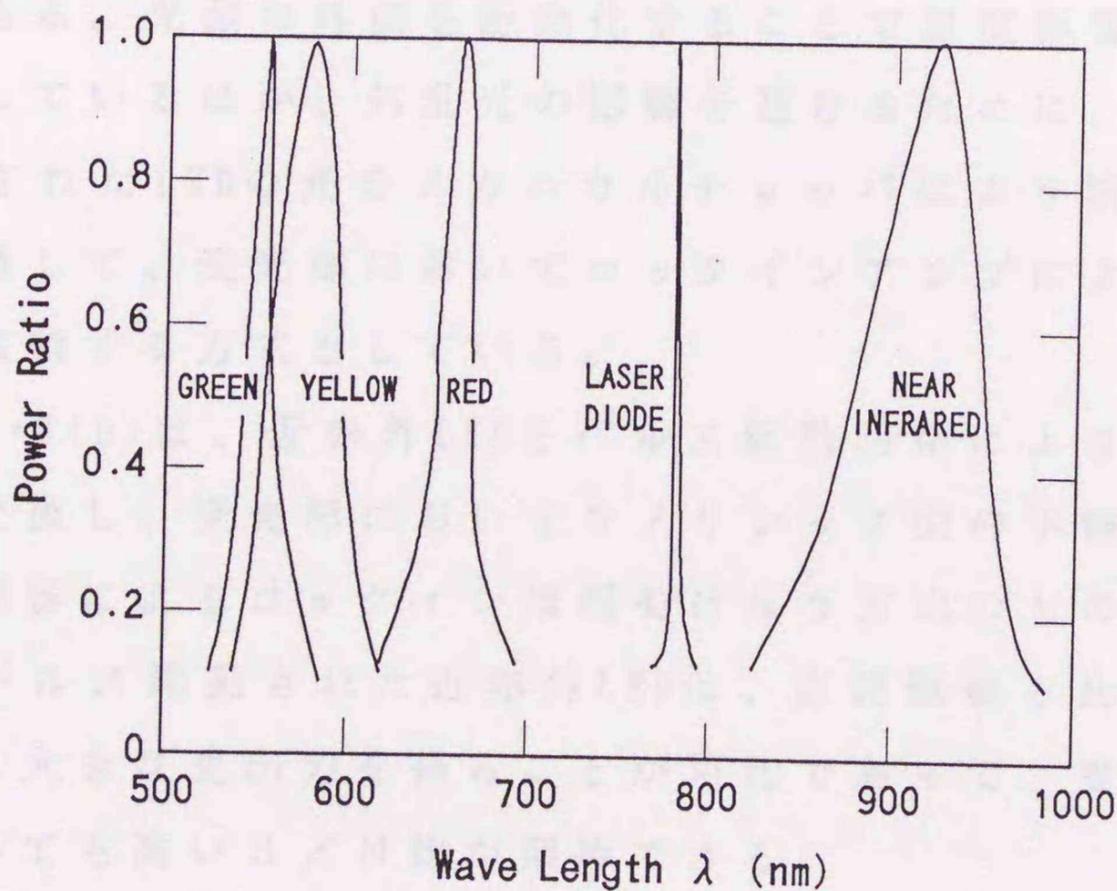


図5.7 各種半導体光源の波長スペクトラム

べるために使用した各種半導体光源の波長スペクトラムを示す。使用した光源は、緑、黄、赤の可視光域発光ダイオード（LED）、半導体レーザダイオード（LD）、および近赤外LEDである。可視波長域LEDは、安価で発光強度が比較的安定しているものが多く、近赤外LEDは、発光強度の大きいものが容易に得られる。また、半導体LDは温度ドリフトが大きいという欠点があるものの、小型で発光強度が強いという特徴を有する。

図5・8は、本実験のために試作したスモークメータの構成例であり、種々の光源に適した構成となるように配慮を加えてある。

図5・8(a)は、可視波長域LEDを光源に用いた装置の概略である。光源の外側を断熱化することで温度影響を少なくしているほか、外乱光の影響を避けるために、直流駆動されたLEDの光をメカニカルチョッパにより断続光に変換して、受光部においてロックインアンプにより復調・増幅する方式としている。

図5・8(b)は、近赤外LEDをパルス駆動回路により変調光に変換し、受光部においてモノリシック型の平衡変調／復調器によるロックイン増幅を行なう方式のものである。パルス駆動された近赤外LEDは、直流駆動と比べて非常に大きな光出力を得ることが可能であって、受光部においても高いS/N比が期待できる。

図5・8(c)は、半導体LDと自動光量調節回路による直流駆動方式を採用し、受光部において参照光による光量補

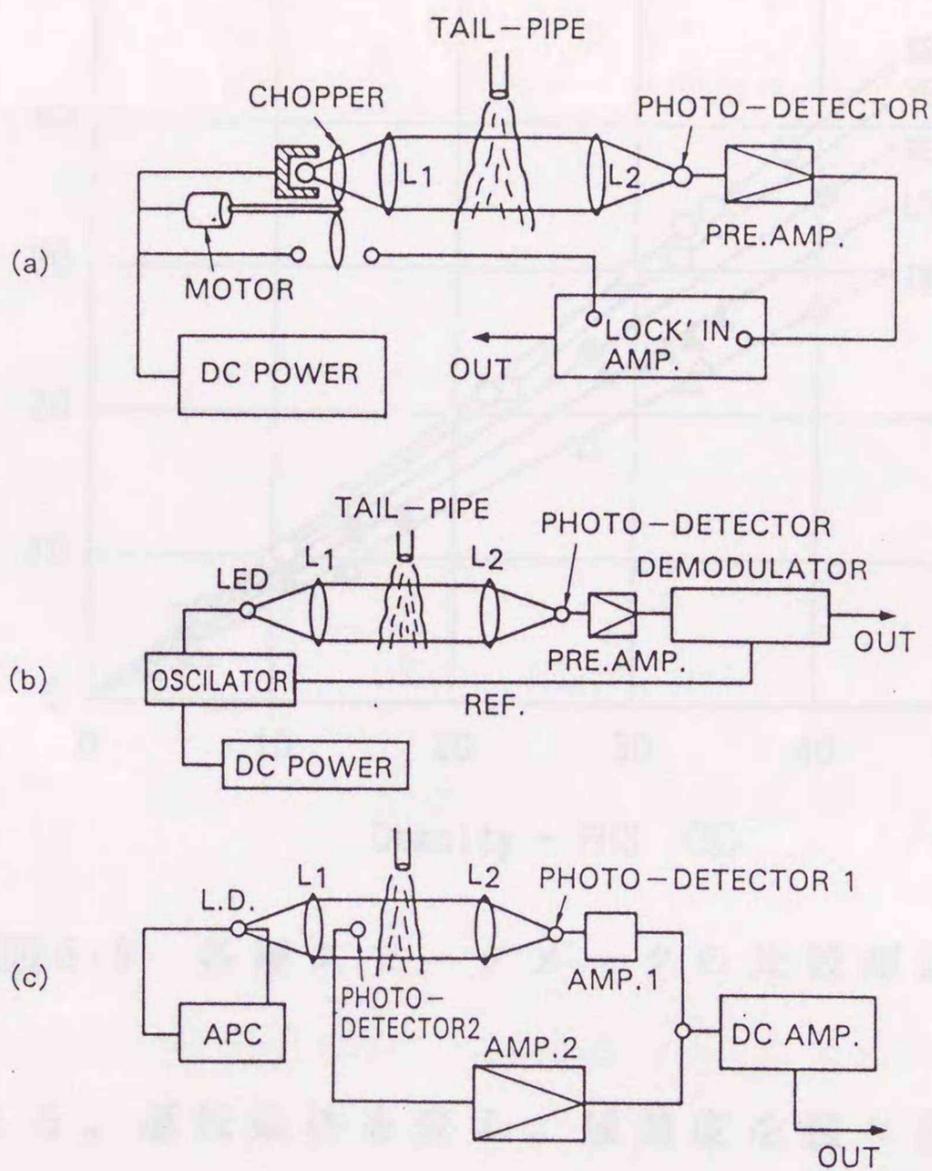


図5・8 試作スモークメータの構成例

正を行なう方式としたものである。半導体LDによれば、温度ドリフトが大きいという欠点はあるものの、小型で発光強度が強いという特徴を有するので、簡単な回路構成で高いS/N比を得ることが可能である。

図5・9は、タングステンランプ（白色光源：最大波長感度約550～570nm）を使用するPHS式スモークメータと、各種スモークメータとによる比較測定の結果を示す

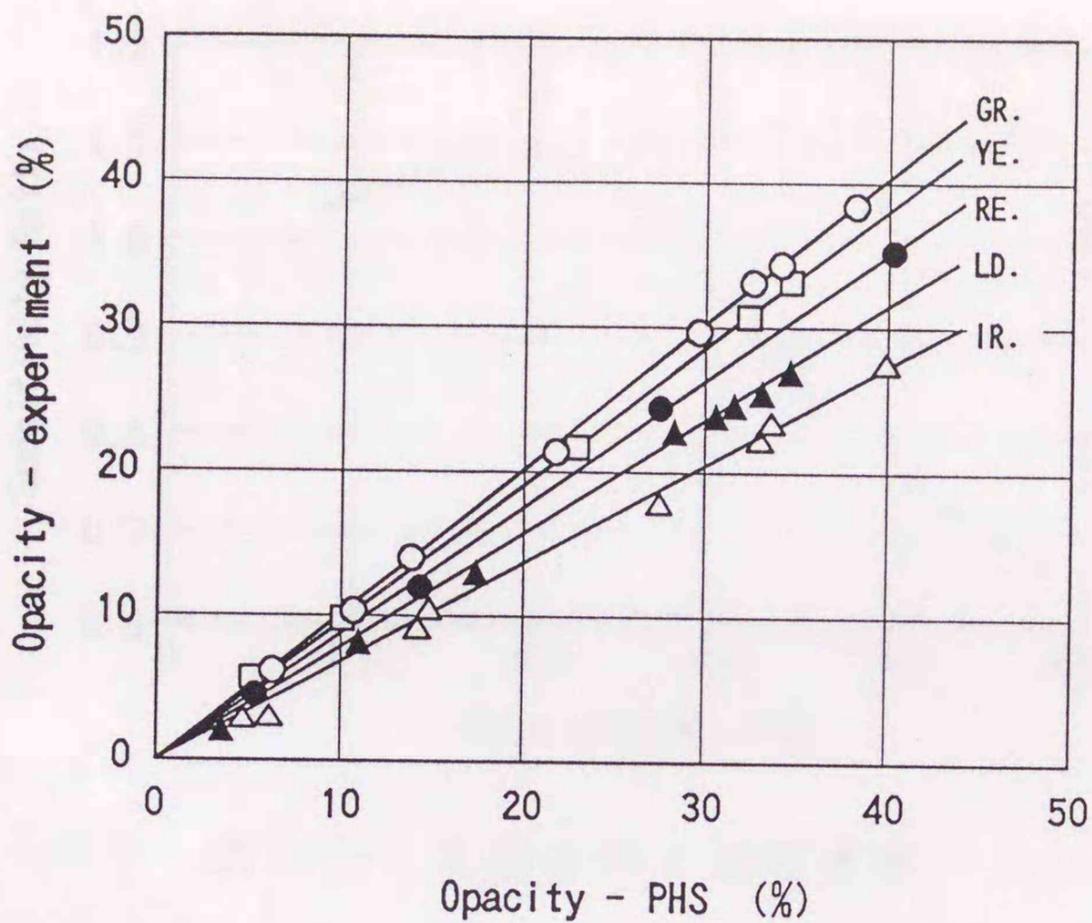


図5・9 各種スモークメータの比較測定

ものである。運転条件を変え、煙濃度を種々変化させて測定を行なっている。各装置で得られた不透過率の結果は、PHS式スモークメータに対してほぼ直線的な関係を示している。しかし、光源の種類により、指示濃度値は各々異なったものとなり、その値は発光波長の長いものほど低くなる傾向が認められる。

図5・10は、前図の結果から得られた光源波長とPHS式スモークメータとの相対感度の関係である。ここで、波長変化幅を紫外域まで広げて、それらの影響について調べるために、重水素ランプ（発光波長約200nm）での結果も併記してある。横軸の各波長は、供試した光源の

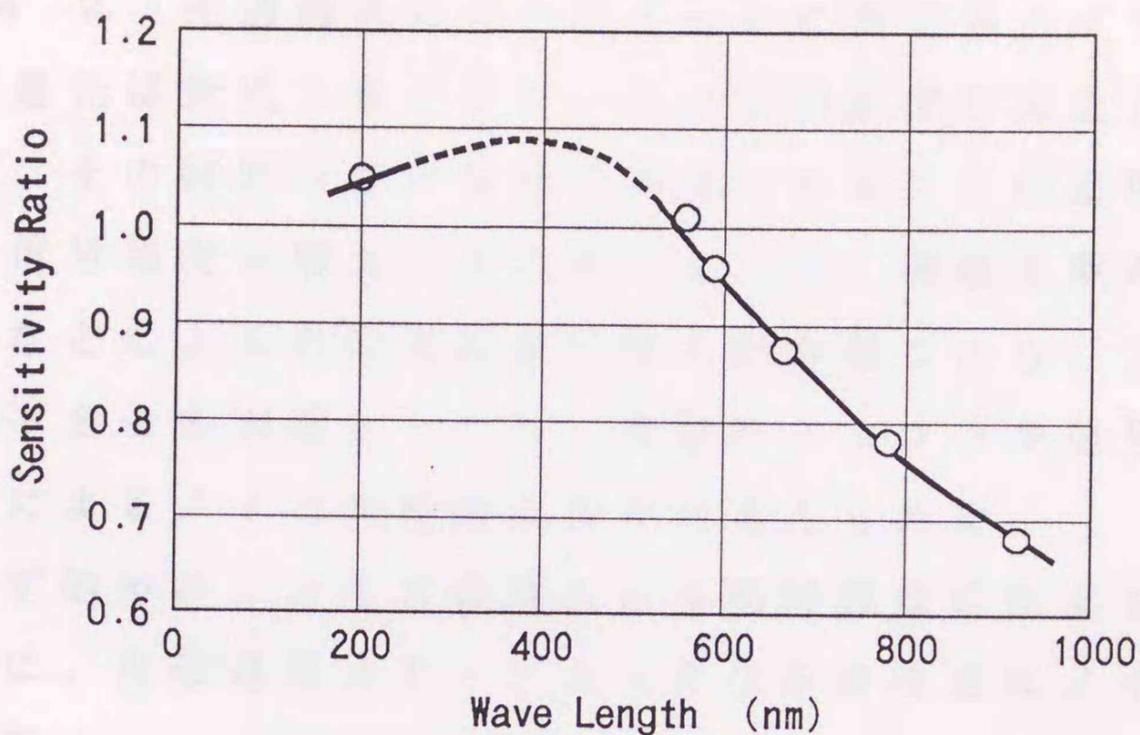


図5・10 光源波長と相対感度

中心波長である。

緑色光LED（波長565nm）を光源とするスモークメータの感度は、PHS式のものとはほぼ等しく、波長がそれより長くなるに従い感度は減少する。短波長の光源を利用することにより、一般には、粒径検出の下限を小さくすることが可能となるが、発光強度が低いために光路長の短い装置に適したものである。一方、長波長の光源は、感度の低下が存在する一方で発光強度が大きいことから、光路長を長くする必要のある装置での使用に適しているものと考えられる。なお、緑色光から紫外光にかけては感度の増加は極く僅かであった。これは、紫外域においては、受光素子の感度特性が低下することに起因するものと考えられる。

#### 5.4.2 光透過式スモークメータにおけるノイズ

透過光減衰式スモークメータの検出感度を向上させるには、その装置のS/N比を大きくすることが必要となる。信号強度を増大する方法としては、透過光束の多重反射などによる有効光路長の増大が有効であり、ノイズを低下させる方法としては、装置のドリフトや信号重畳方式によるノイズの相殺化などが考えられる。

まず始めに、ノイズ低減による相対感度の向上を図るために、光透過式スモークメータにおける主なノイズ発生原因について検討を行なった。

光透過式スモークメータの測定出力には、比較的大きなノイズやドリフトが含まれていることが多く、低濃度排気煙の測定時には、信号出力が微弱化するために、これらの影響が無視できなくなる。図5.11は、それらの原因の一主因と考えられるところのスモークメータ各部に生じる温度変化の影響について調べた結果を示すものである。

図の(a)は、室温20℃の雰囲気中に置かれたスモークメータの装置全体に対して、約30℃の温風を送風した時の結果である。同じく図の(b)、(c)、および(d)は、それぞれスモークメータの受光部、光路部、および光源部に、約40~50℃の温風を送風したときの結果である。これらの中で、図(b)における出力変動は、受光素子の温度ドリフトによる影響と考えられる。また、図(c)の出力変動は、光路中を通過する気流中に温度分布が生じて

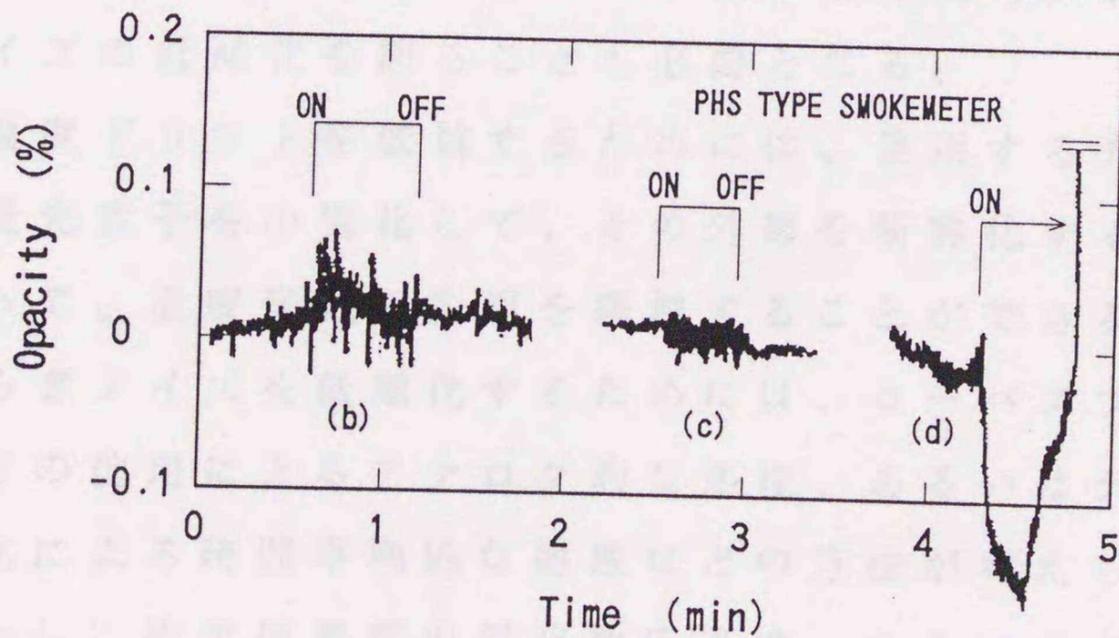
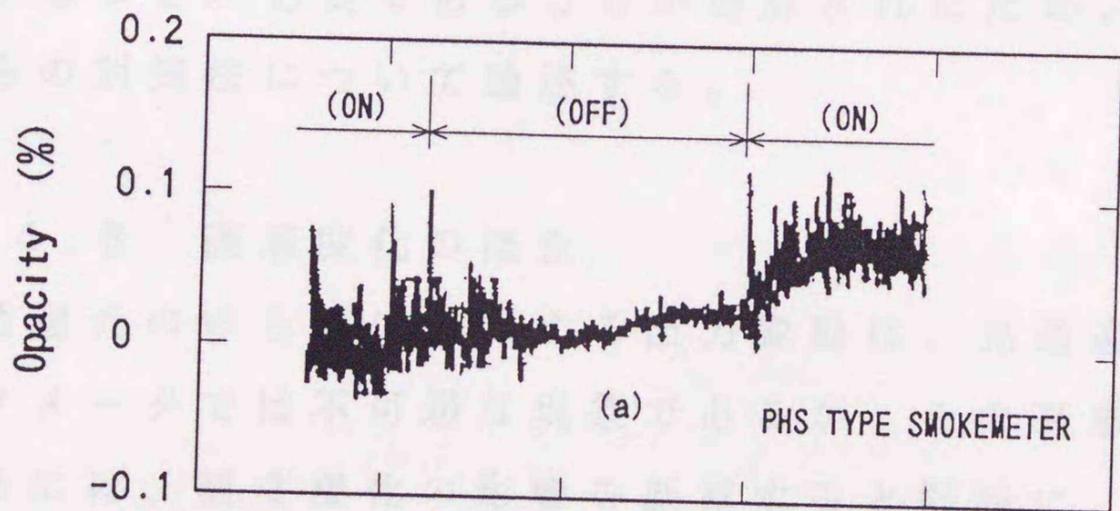
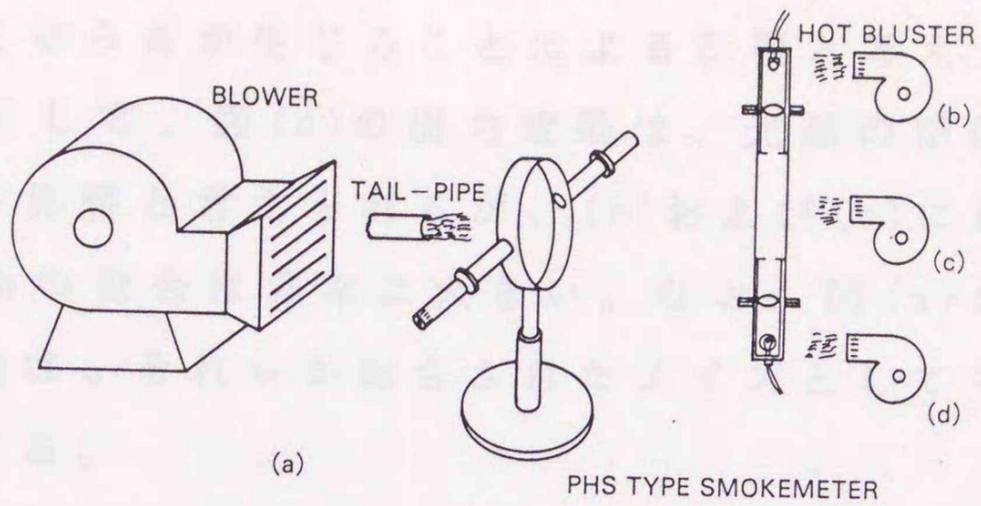


図5・11 光透過式スモークメータの温度影響

屈折率が変化した結果、透過光が本来の光軸からずれる、いわゆるゆらぎが生じることによる影響と考えられる。これに対して、図(d)の出力変動は、光源の温度ドリフトによる影響と考えられるが、(b)および(c)に比べて、その変動の割合は非常に大きい。なお、図(a)の場合の出力変動は、それらが総合されたノイズとして考えることができる。

以上の検討の結果、光透過式スモークメータの高感度化のためには、光源の温度ドリフトやゆらぎの影響を低減することが必要であることが理解されたため、以下それらの対策法について論述する。

#### 5.4.3 高感度化の概念

透過光のゆらぎに起因する出力変動は、光透過式スモークメータでは不可避な現象であるが、その高感度化のためには、温度変化の影響を低減すると同時に、ゆらぎノイズの低減化を図ることも必要となる。

温度ドリフトを低減するためには、使用する光源および受光素子を小型化して、その外部を断熱化することによって、温度変化の影響を軽減することができる。また、ゆらぎノイズを低減化するためには、ローパスフィルタなどの使用によるアナログ的な処理、あるいはデジタル化による時間平均的な処理などの方法が考えられる。しかし、排気煙濃度の周波数応答性、あるいはダイナミックレンジを考慮した場合に、このような電気回路的な

処理方法だけではノイズの低減化は困難である。

#### 5.4.4 信号重畳式スモークメータの開発

上述のような理由から、本研究では、煙の流れ方向に直列に配置した複数の検出素子からの信号出力を重畳する方法を考案した。図5.12はその概念図である。直列に配置した検出器からの信号は種々位相が異なるため、入力信号相互の相殺効果によって、重畳後の出力信号はそのノイズレベルが低下する。また、検出器の数を増して多連化を図ることによって大幅なノイズの低減も期待できる。

そこで、多連化によるノイズ低減効果を確認するために、3種類のスモークメータを排気管出口部の煙の流れ

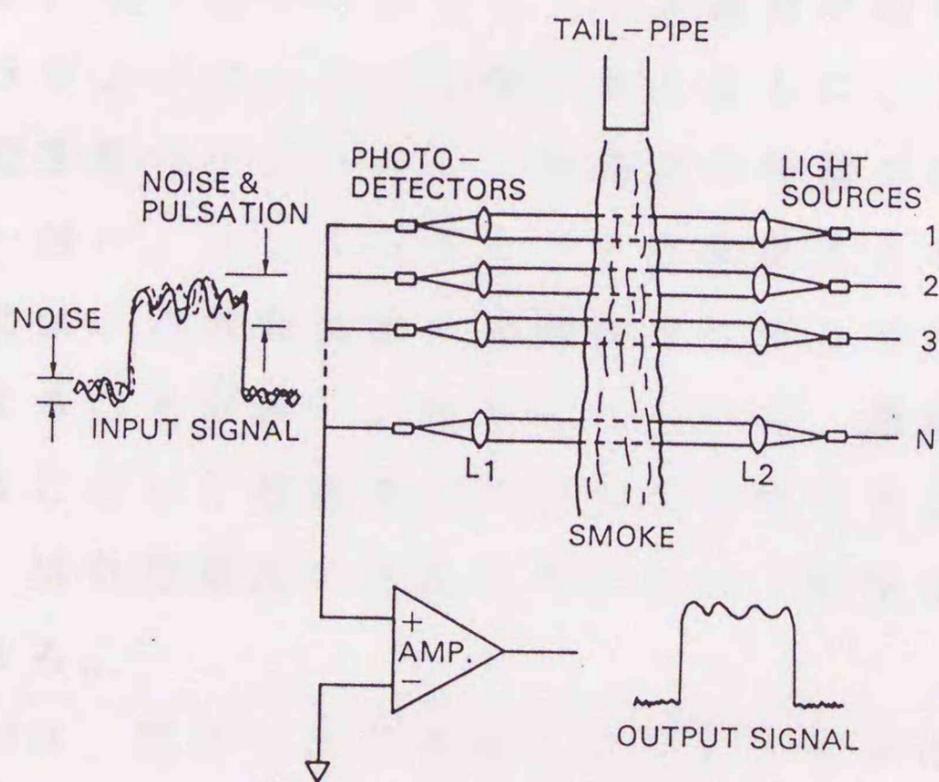


図5.12 高感度化のための概念図

方向に直列に配置して、それぞれの出力信号を加算アンプに入力して信号の重畳化を図った、三連式スモークメータを試作した。3種類のスモークメータには、5・4・1で光源波長の影響を調べる実験で使用した2台の試作スモークメータ（図5・8(a)、(b)）と、1台のPHS式光透過スモークメータを供試した。なお、二連システムでは、ノイズの同相成分による相乗作用が異相成分の相殺効果を減じるために、信号重畳の効果は僅かとなる。このため、本装置ではPHSタイプを追加して、三連式のスモークメータとして信号重畳効果を高め、高感度化を試みた。

図5・13は、三連式スモークメータとPHSタイプとの測定出力を比較して、信号重畳の効果を明らかにしたものである。種々位相の異なるノイズ成分が相殺され、バックグラウンドノイズが低減するとともに、システムの応答性能を損なうことなく、煙濃度の脈動が低減されている。一般に、エンジンのサイクル変動にともなう煙濃度の脈動は、排気煙濃度の連続測定に際しては、むしろ障害となることが多い。本方式によれば、過渡応答特性を損なうことなく煙濃度の脈動を平均化することが可能であり、排気煙濃度の連続測定における有効な一手段と考えられる。

図5・14は、試作した三連式スモークメータにより、排気処理装置通過後の低濃度排気煙を測定した結果を示すものである。PHSタイプによる測定では、シャシィダ

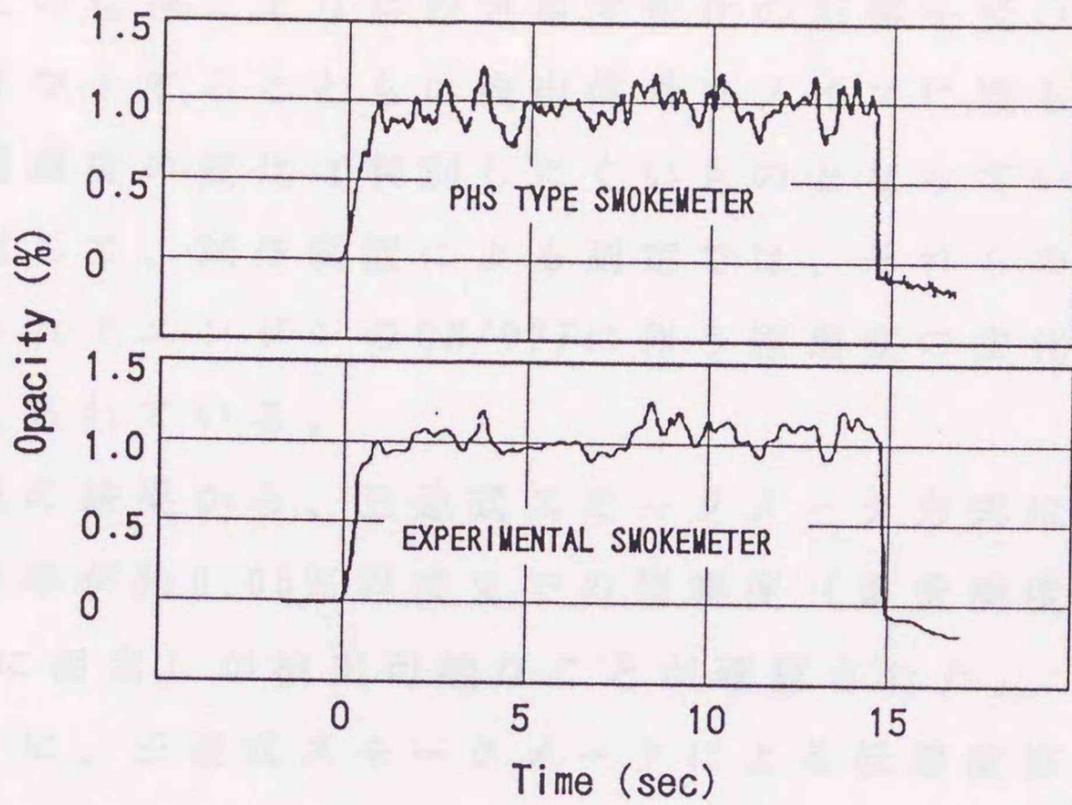


図 5・13 信号重畳方式によるノイズ低減効果の一例

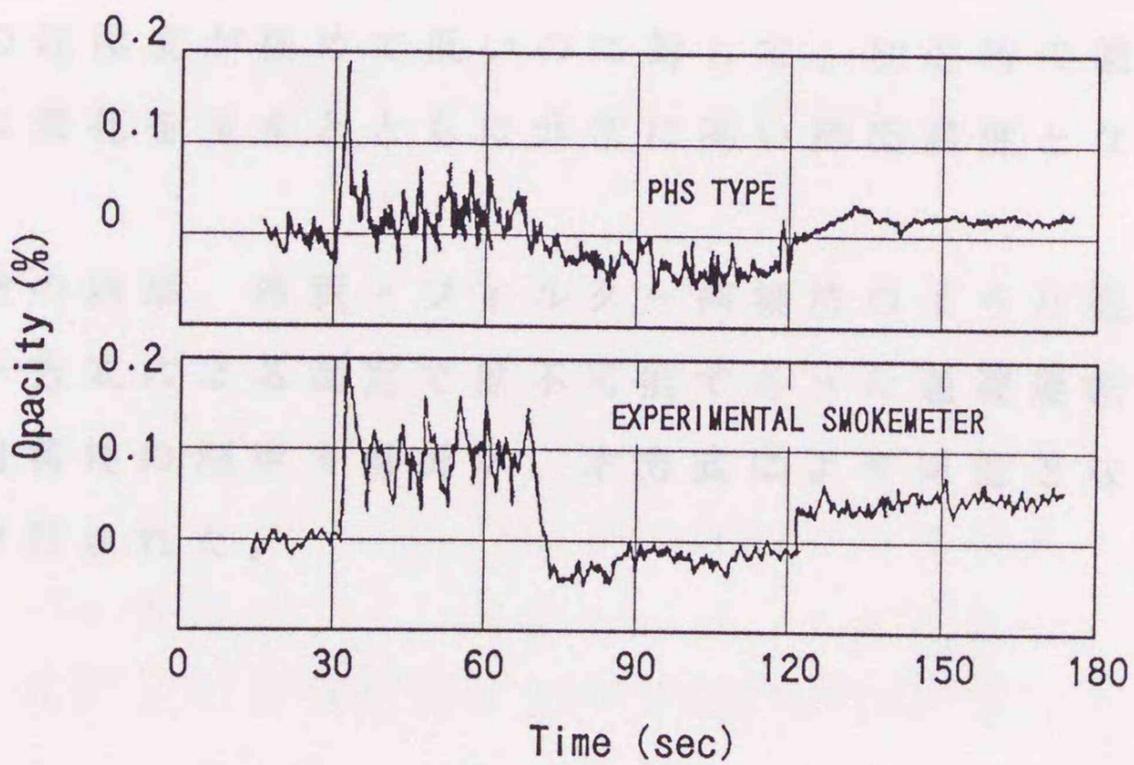


図 5・14 低濃度排気煙の測定例

イナモメータ実験室内に設置されたエンジン冷却用ファンなどの送風により雰囲気温度変化の影響を受け、出力がドリフトするとともに検出信号はノイズに埋もれるので、煙濃度の変化は判別しにくいものとなっている。これに対して、試作装置による測定では、それらの影響が軽減されてエンジンのON/OFFに伴う煙濃度の変化が明確に捉えられている。

実験の結果から、三連式スモークメータ方式により、不透過率が約0.05%程度までの煙濃度（重量濃度約1~2 mg/m<sup>3</sup>に相当）が検出可能なことが確認された。

つぎに、三連式スモークメータによる低濃度排気煙の連続測定を試みた。図5.15は、実験の一例として、微粒子トラップ装着車の10モード運転時における過渡排出特性を調べた結果である。アイドリング、および定速走行時の煙濃度が極めて低いのに対して、加速時の濃度は急激な変化を示すとともに非常に高い排出濃度となっている。

実験の結果、希釈・フィルター捕集法のような従来のバッチ方式による測定では不可能であった過渡運転時の煙排出特性の測定・解析が、本方式により可能となることが確認された。

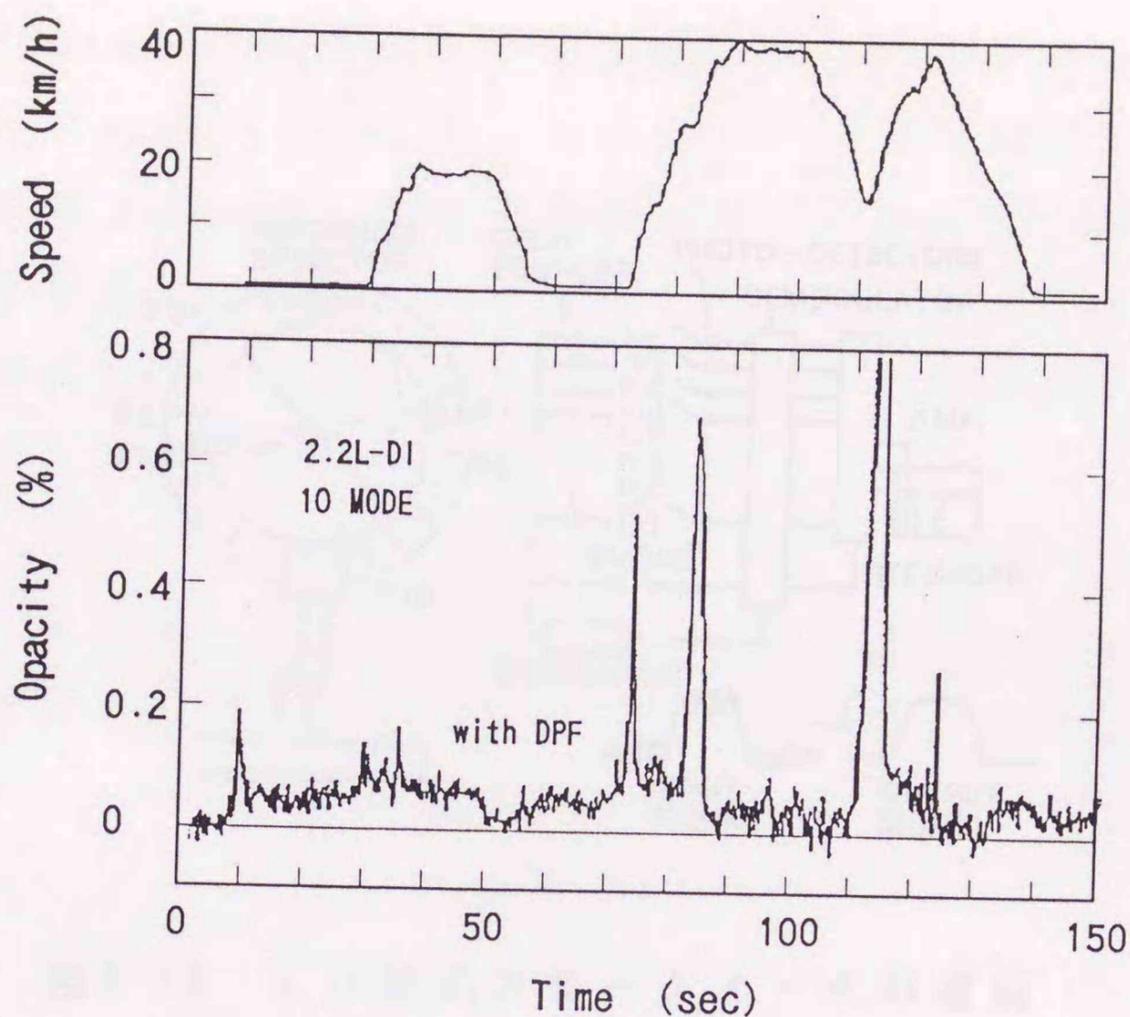


図5.15 10モード排気煙の連続測定例 (DPF装着時)

#### 5.4.5 10連式スモークメータにおける 信号重畳効果

上述のように直列3連式スモークメータによる信号重畳の効果を確認してきたが、さらに改良を加えた10連式スモークメータを試作して、その信号重畳効果について検討を行なった。図5.16は、試作した10連式スモークメータの構成を、そして図5.17は、その外観を示すものである。10組の光源および受光器を同一円周上に配置し、各々の検出器からの信号を加算増幅器において重畳するが、光源には感度特性が良好な緑色LED(発光波

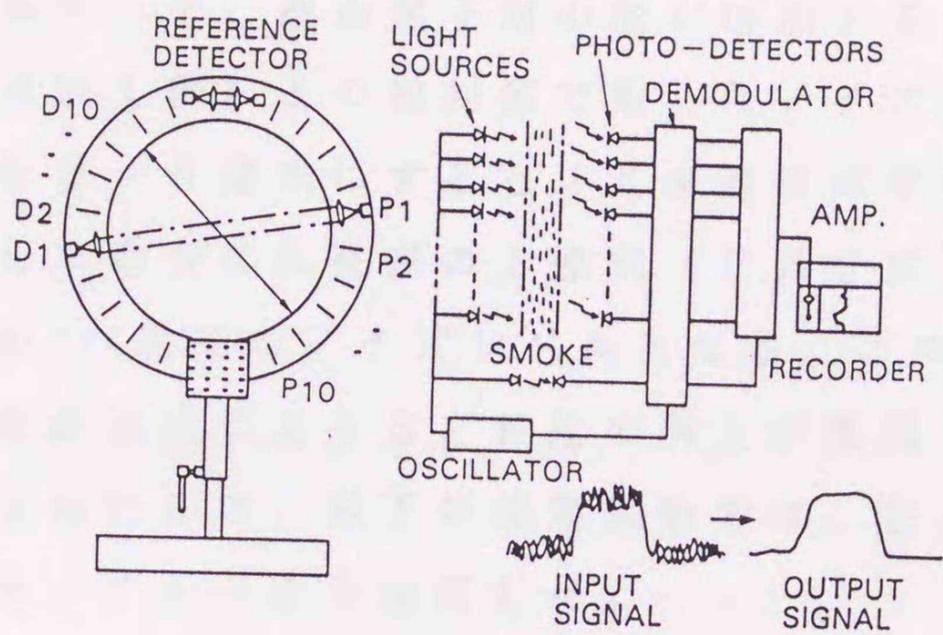


図5・16 10連式スモークメータの構成

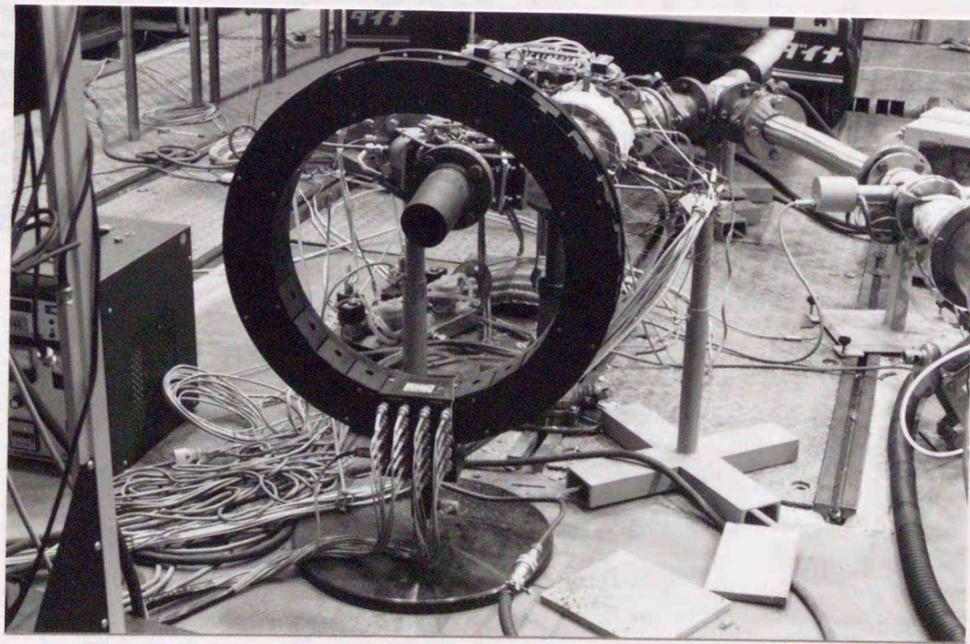


図5・17 10連式スモークメータの外観

長 565nm) を使用している。図 5・18 に、信号を重畳するための検出素子対の数とその時のノイズ振幅値 (脈動幅) との関係を示す。検出素子対の数が増加すると非重畳時 (素子対数 1 個) との相対値で表したノイズが減少する。検出器を 3 ~ 5 連式にするとノイズはほぼ半減し、10 連式とした場合には従来の 1 連式 (PHS 式) スモークメータの 1/4 程度のノイズレベルとなる。このことから、検出器の多連化により S/N 比の向上が実現されることが確認されたので、以下の測定実験では、主として 10 連式スモークメータを使用した。

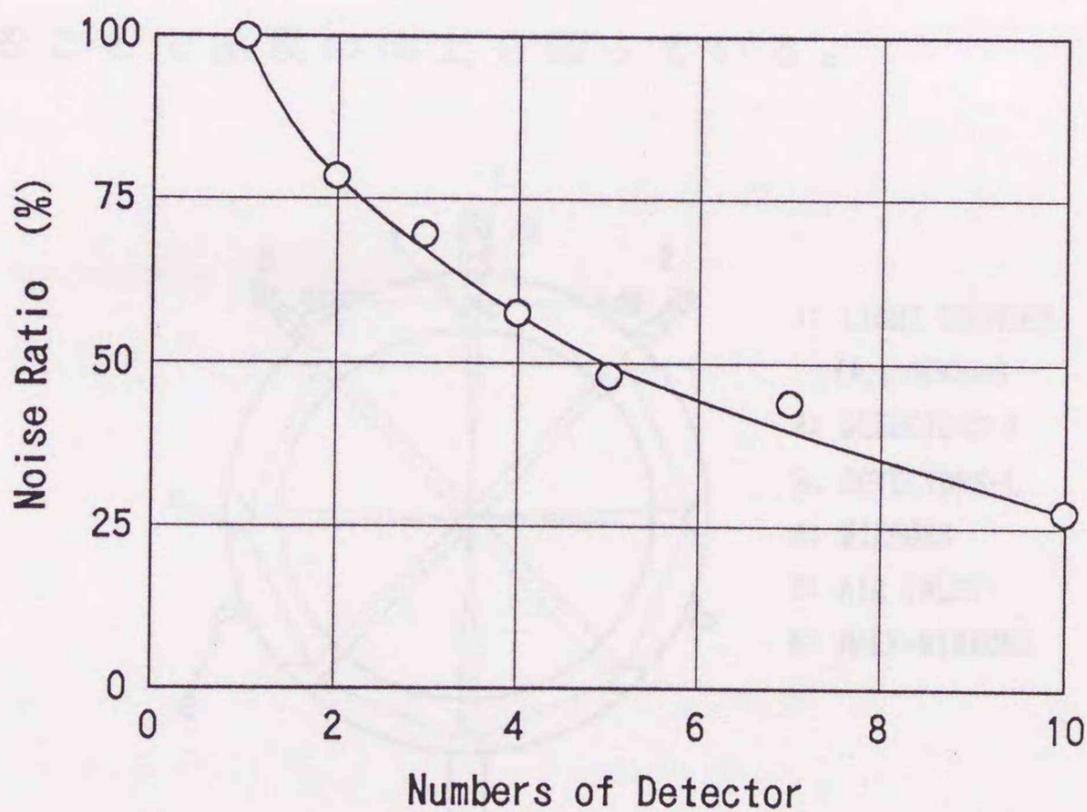


図 5・18 検出素子対数とノイズの低減

#### 5.4.6 多重反射式スモークメータの試作

ここでは、信号強度を増大する方法として、透過光束を多重反射することにより有効光路長を増加する方法について検討を行なった。図5.19および図5.20に、試作した多重反射式スモークメータの構成とその外観とを示す。図において、同一円周上に配置された光源、受光器、および反射鏡などにより二組の光学系が構成されているが、多重反射による光の減衰を考慮して、光源には発光強度の強い半導体レーザ（発光波長830nm）を使用した。光源から発した2本の透過光束は、それぞれ試料煙中を4回通過して、有効光路長を従来式スモークメータの4倍とすることで感度の向上を図っている。

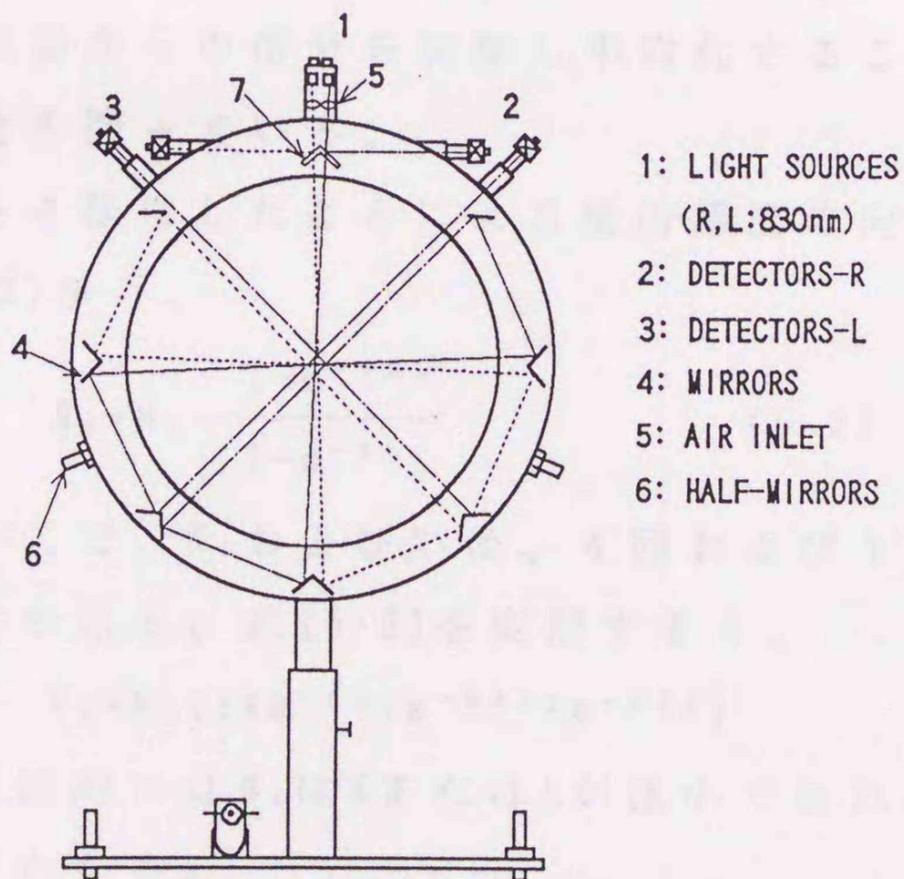


図5.19 多重反射式スモークメータの構成

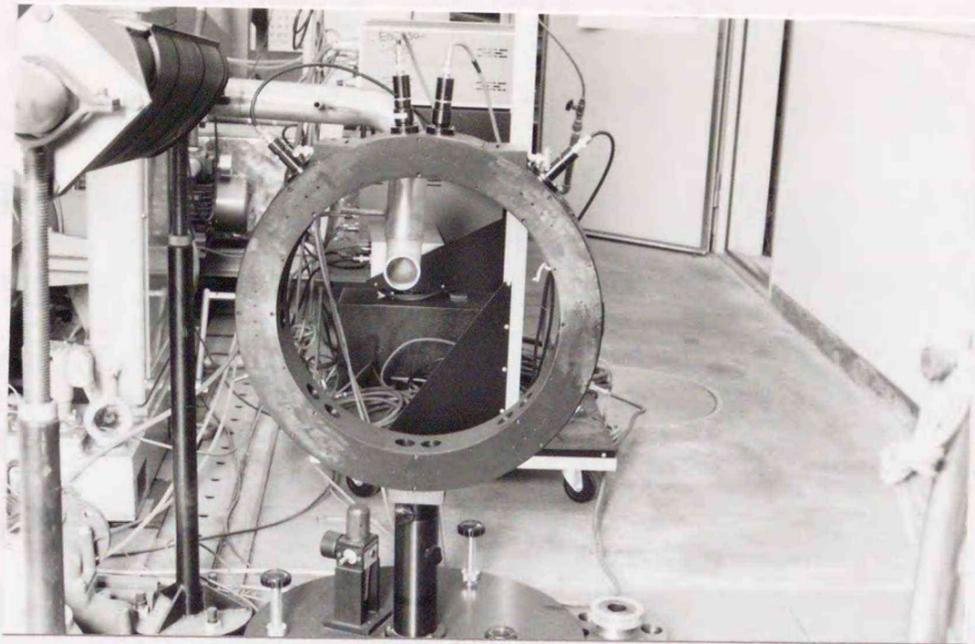


図5・20 多重反射式スモークメータの外観

この場合、周囲温度の変動による光源の発光強度の変化は、リファレンス検出器でモニタして補正する。また、二つの検出器からの信号を加算し平均化することで、出力の安定化を図っている。

光路長を4倍にしたことによる検出感度の向上は、前出の式(5・3)から、

$$N_4 = N_1 \frac{1 - e^{-4KL}}{1 - e^{-KL}} \quad (5.6)$$

となる。ここで、 $N_4$ および $N_1$ は、4回および1回通過時の不透過率である。式(5・6)を変形すると、

$$N_4 = N_1 (1 + e^{-KL} + e^{-2KL} + e^{-3KL}) \quad (5.7)$$

となり、原理的には $N_4$ は $K$ または $L$ が微小であれば $N_1$ の約4倍弱の値となる。

以下、本試作装置( $N_4$ )とPHS式スモークメータ( $N_1$ )

との不透過率の相違（相対感度）を実験により検討した。図5・21は、両装置で測定した不透過率（排気煙濃度）の比較測定結果である。試作スモークメータの感度は破線で示される理論値とほぼ一致しており、多重反射による感度向上の効果は概ね期待通りであることが分かった。

図5・22に、両スモークメータによる低濃度排気煙の測定例を示す。試作装置の出力はPHS式に比べ、信号強度および脈動のレベルとも増大している。ただし、透過光反射方式では、低濃度域での感度が增加する利点を得られる一方で、反射回数が多くなるに従い透過光のゆらぎの影響が大となり、光学系の調整が複雑になるなどの欠点も見受けられた。

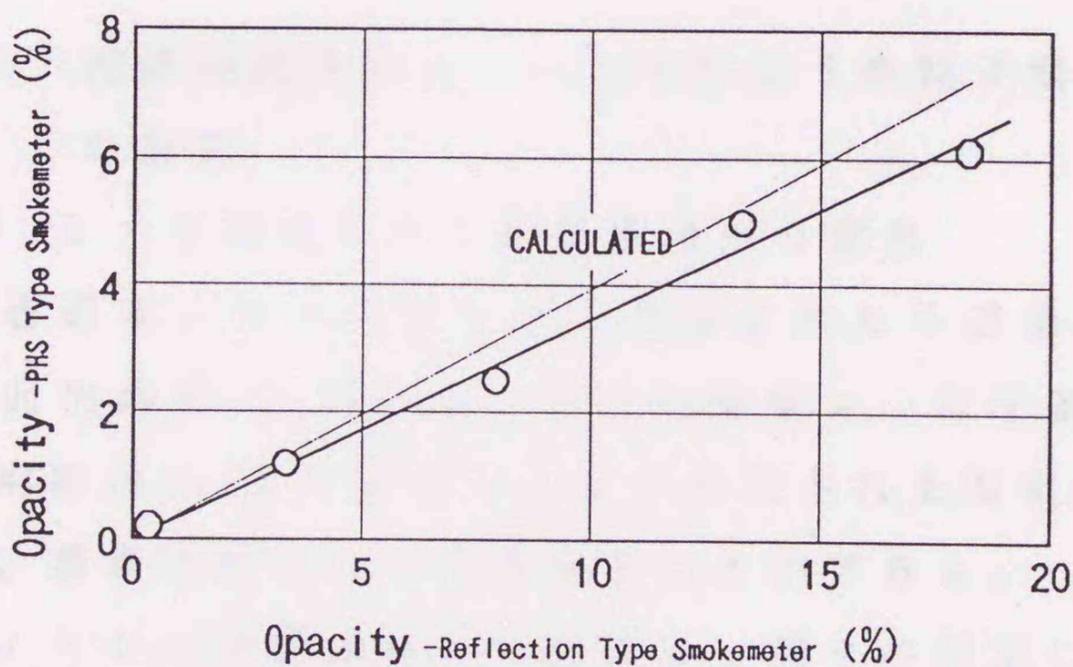


図5・21 PHS式スモークメータとの比較

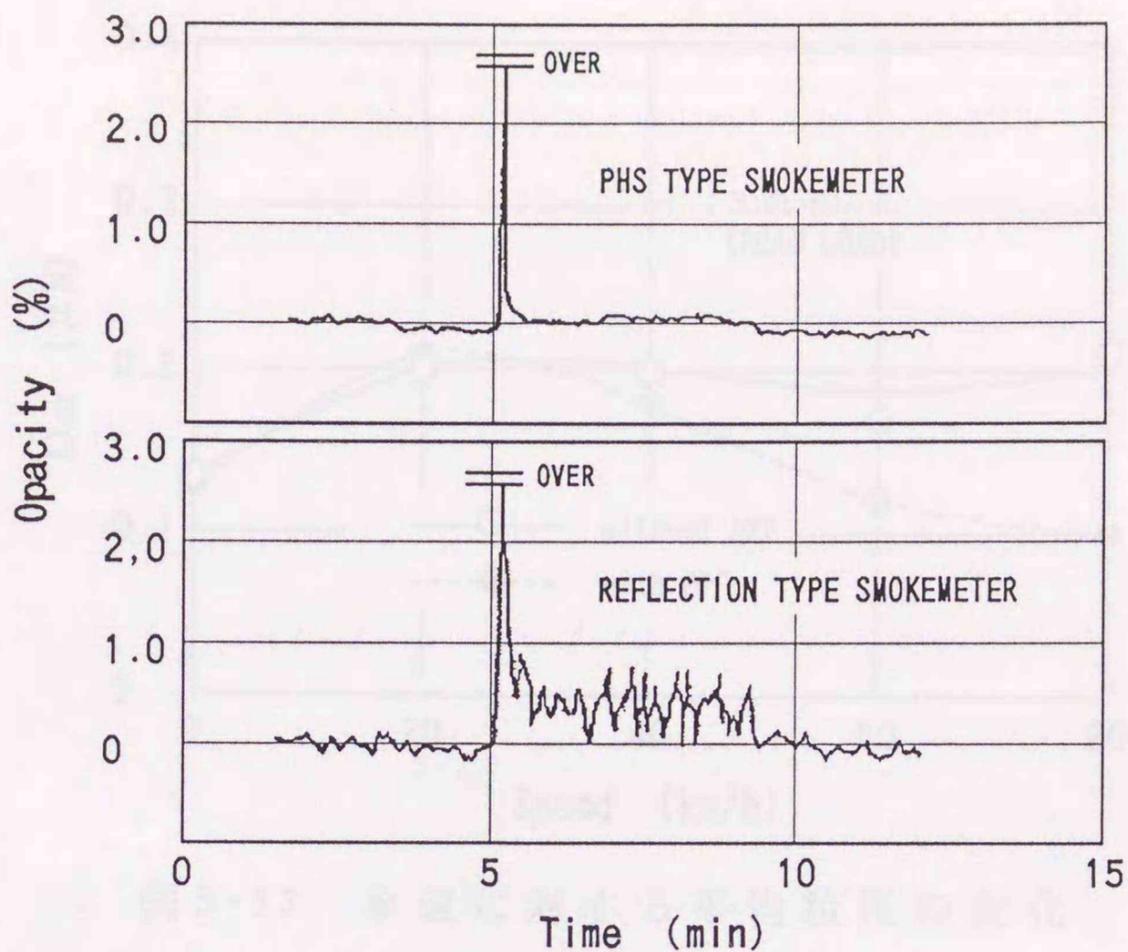


図5・22 低濃度排気煙の測定例

## 5.5 光透過式スモークメータによる微粒子濃度の測定

### 5.5.1 不透過率から重量濃度への変換

光透過式スモークメータで測定された不透過率  $N$  の値は、前出の式(5.5)から、粒子の密度  $\rho$ 、粒子群のザウタ平均粒径  $D_{3,2}$  とその値によって決定される減衰係数  $Q$  により、重量濃度  $C_g$  として求めることができる。

ディーゼル排気微粒子の粒径は、種々の仮定にもとづく値を用いる場合が多いが、本研究では粒径測定を行なった結果にもとづいて、その値を決定することとした。

図5・23に、車速とDPF(排気処理装置)通過前後の

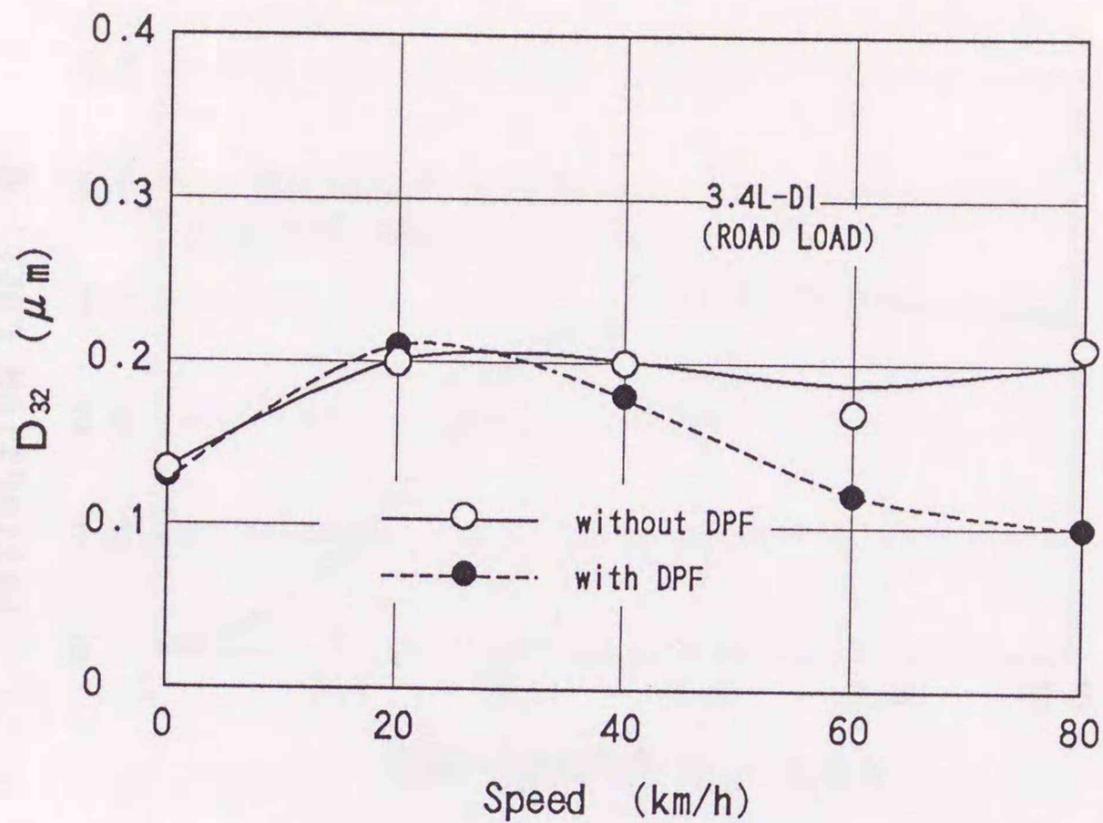


図5・23 車速に対する平均粒径の変化

平均粒径との関係を示す。粒径の測定には5.3で特性を検討したEAAを使用した。一般に、散乱光にもとづく粒子計測では、体積/面積平均粒径、すなわちザウタ平均粒径 $D_{3.2}$ が代表粒径となることから、本図の縦軸もザウタ平均粒径により示した。平均粒径の変化に関しては、アイドリング時を除きDPF通過前粒径が車速の変化に拘わらず約 $0.2\mu\text{m}$ と一定であるのに対して、通過後粒径は車速が高くなるに従い $0.2\sim 0.1\mu\text{m}$ へと減少する。これは、DPF通過速度の上昇に伴う小径粒子の再飛散が一因と考えられる。

本実験の結果から、通常の運転範囲においてはザウタ平均粒径を $0.2\mu\text{m}$ とし、比較的高速域( $40\sim 80\text{km/h}$ )におけるDPF通過後粒径に関しては、上記実験で得られ

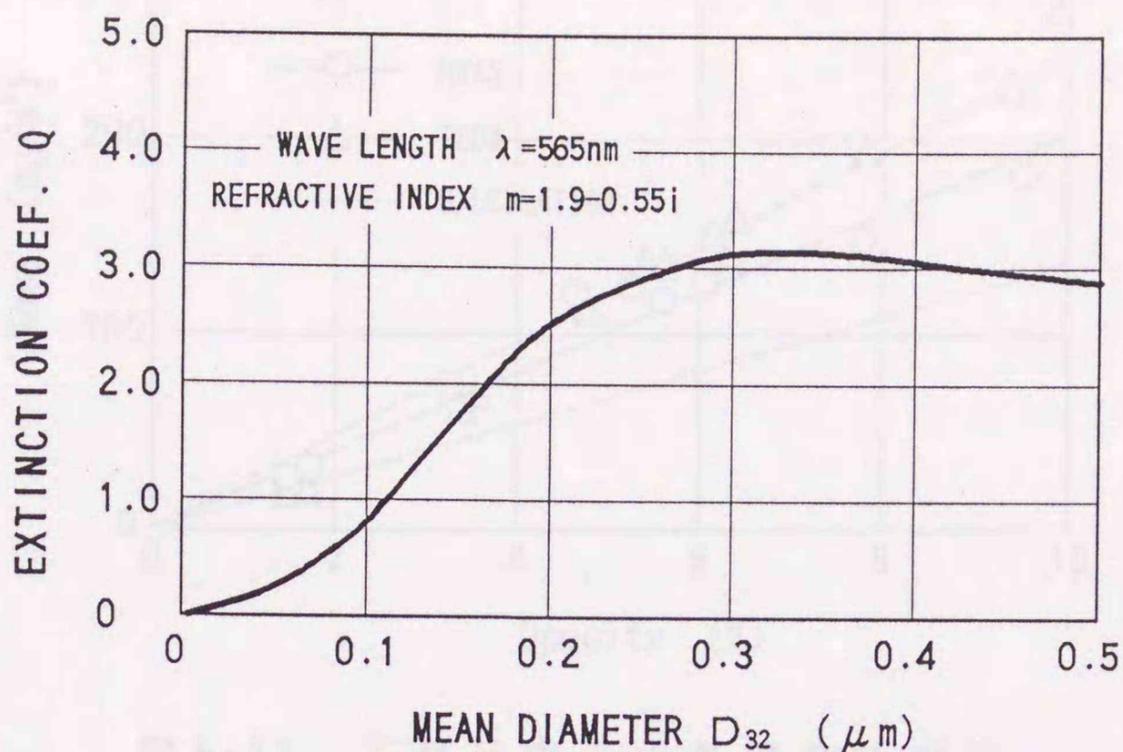


図5・24 粒径に対する平均減衰係数の変化

た各々の粒径値を用いることとした。また、粒径に対する平均減衰係数の関係に関しては、紺谷<sup>(62)</sup>が行なったディーゼル微粒子を対象とする詳細な計算結果にもとづいて、供試したスモークメータの光源（緑色LED）の中心発光波長（ $\lambda = 565\text{nm}$ ）を採用したときの粒径と平均減衰係数との関係を図5・24のように求めた。そして、各粒径に対する減衰係数の値はこの図から求めた。なお、平均減衰係数は、ザウタ平均粒径に対応する減衰係数で近似することとした。粒子密度に関しては、種々の報告例の中で $1\text{g}/\text{cm}^3$ と仮定している場合が多く<sup>(63)</sup>、本研究でもこの値を採用した。

上記の各数値を式(5・5)に代入することにより、不透過率の値を重量濃度に変換することができる。図5・25は、

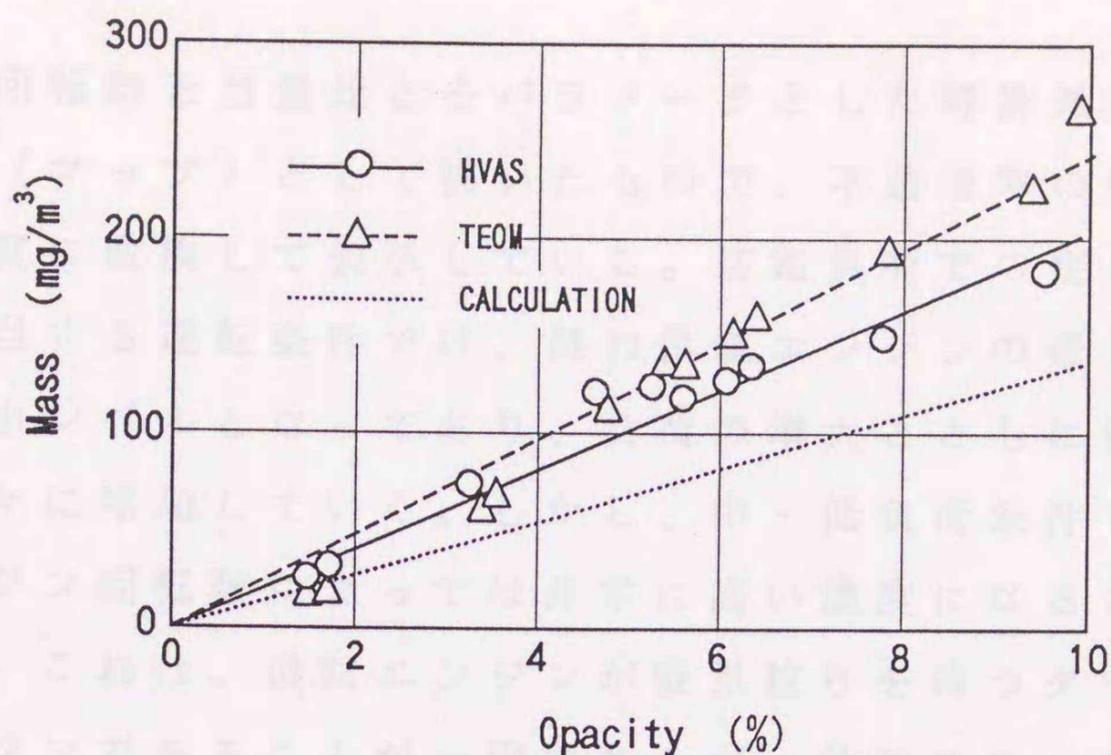


図5.25 不透過率と重量濃度の関係

粒径を $0.2\mu\text{m}$ 、有効光路長を $50\text{mm}$ として、本手法により求めた不透過率と重量濃度の関係について示すものである。なお、同図には定常運転条件時においてフィルター捕集法、およびTEOMで測定した重量濃度の結果も併記した。粒子性状の変化までは考慮していないが、計算の結果はこれらの実験結果と近似しており、その手法の妥当性が確認できた。そこで以後、重量濃度との対応を調べる場合には、光透過法で得られた不透過率の値を重量濃度値で表示することとした。

### 5.5.2 運転条件と微粒子の排出特性

試作した10連式光透過スモークメータにより、種々の運転条件下での測定試験を試みた。図5.26に、渦流室式ディーゼル機関の煙排出特性を示す。これは、エンジ

ン回転数と当量比とをパラメータとした等排気煙濃度曲線（マップ）として描いたもので、不透過率の値を重量濃度に変換して表示している。道路負荷での定速走行に相当する運転条件では、概ね供試エンジンの最も低い煙排出レベルとなっており、負荷の増大とともに煙濃度は徐々に増加していく。しかし、中・低負荷条件でも、エンジン回転数によっては非常に高い濃度になることがある。これは、供試エンジンが吸気絞りを持つタイプのエンジンであることが一因であるが、供試スモークメータが、SOFなどの黒煙以外の成分にも検出感度を有していることもその一因として考えられる。

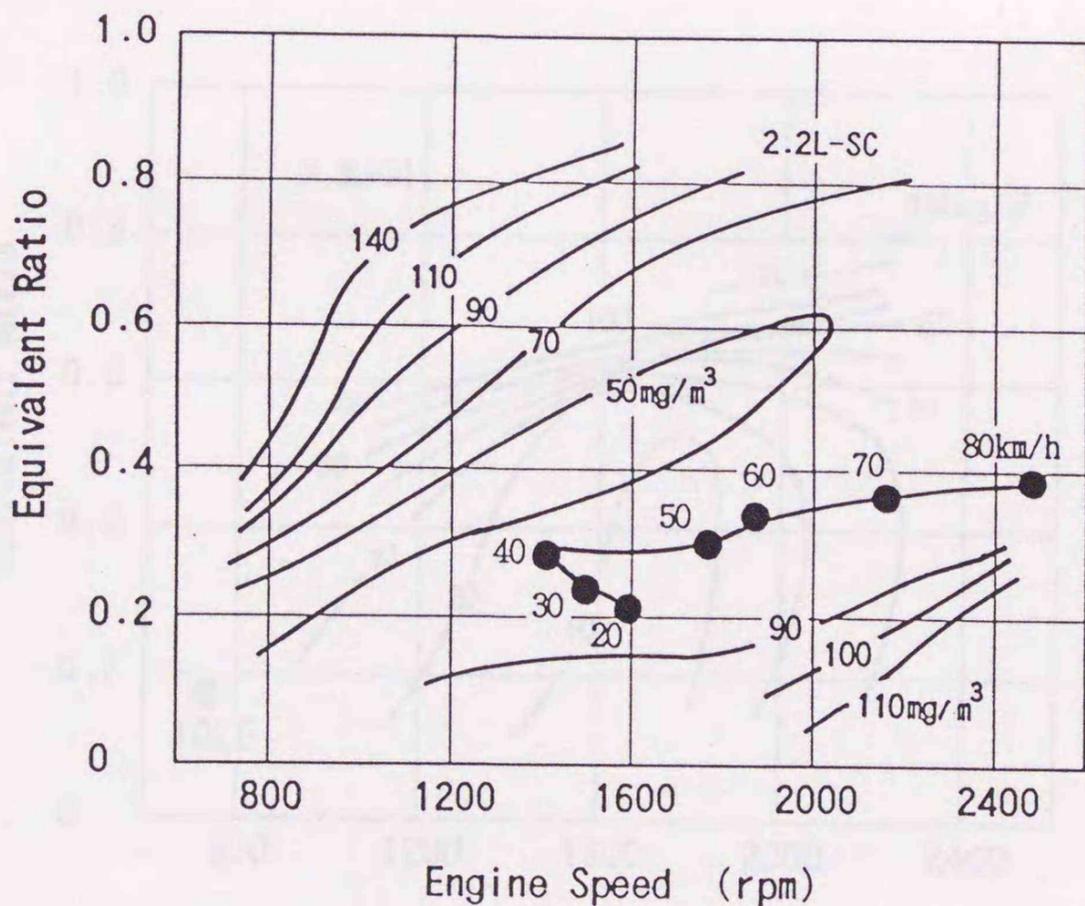


図 5・26 渦流室式ディーゼル機関の煙排出特性

図5・27に、直接噴射式ディーゼル機関について同様のマッピングを行なった結果を示す。供試エンジンの場合には、渦流室式に比べて、中・低負荷条件では非常に低い濃度となるが、スモークリミット近傍の負荷を超えるあたりから濃度は大幅に増加する。

従来、このようなマッピング作業を希釈・フィルター捕集法により行なおうとする場合には、極めて多大な労力と長時間を要するのが一般的であった。しかし、本研究で試作した低濃度域にも十分な検出感度を有するスモークメータを利用することにより、非常に簡便にそして短時間で同一の作業を行なうことが可能であった。

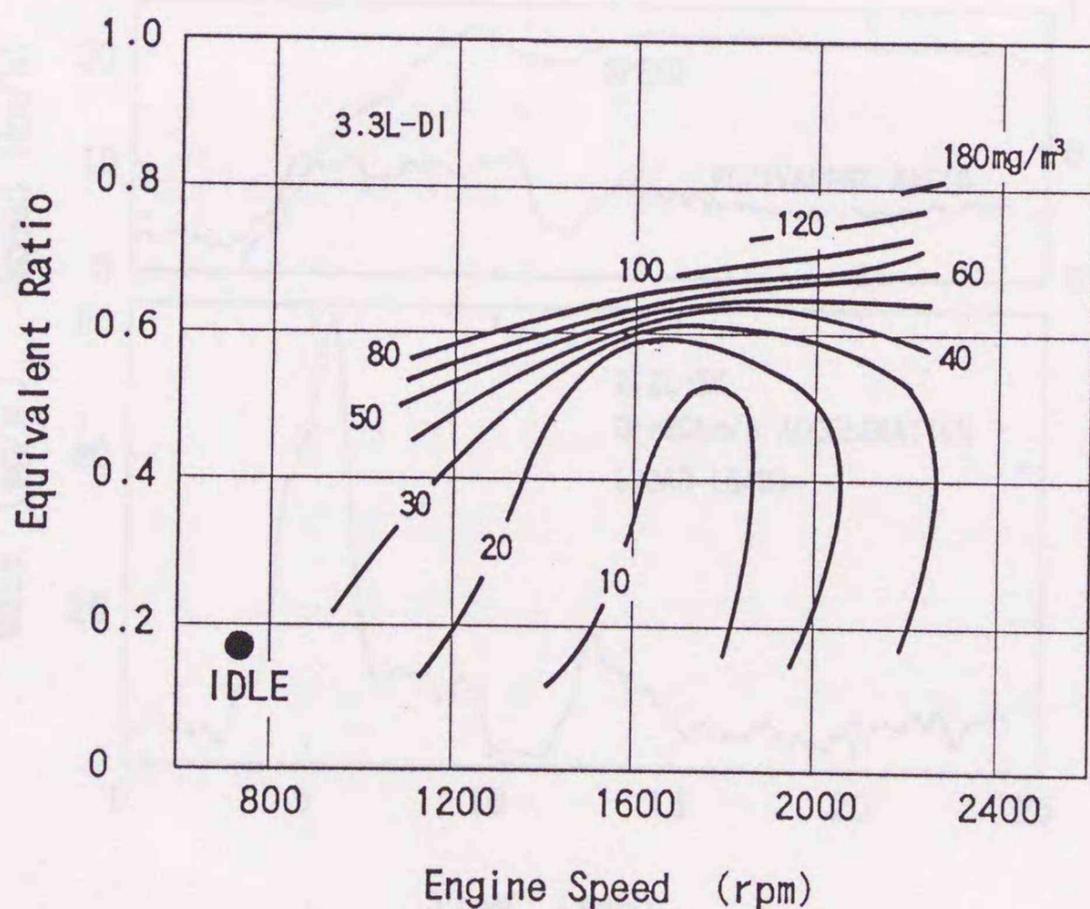


図5・27 直接噴射式ディーゼル機関の煙排出特性

### 5.5.3 過渡運転時の連続測定

光透過式スモークメータにより過渡運転時の連続測定が可能であることは、前節(5.4)においても記述した通りである。ここでは、光透過法の特質を生かした測定の一例として、加速中の排気煙濃度の解析を行なった結果について論述する。

図5.28は、10モード運転中の加速モード(0~20km/h)における車速、当量比、ならびに排気煙濃度の時間的経過である。ここで、当量比の測定は、容積式燃料流量計で測定した瞬時燃料流量と吸入空気量とにより行なった。加速中の当量比は約0.4程度で、標準的な加速を

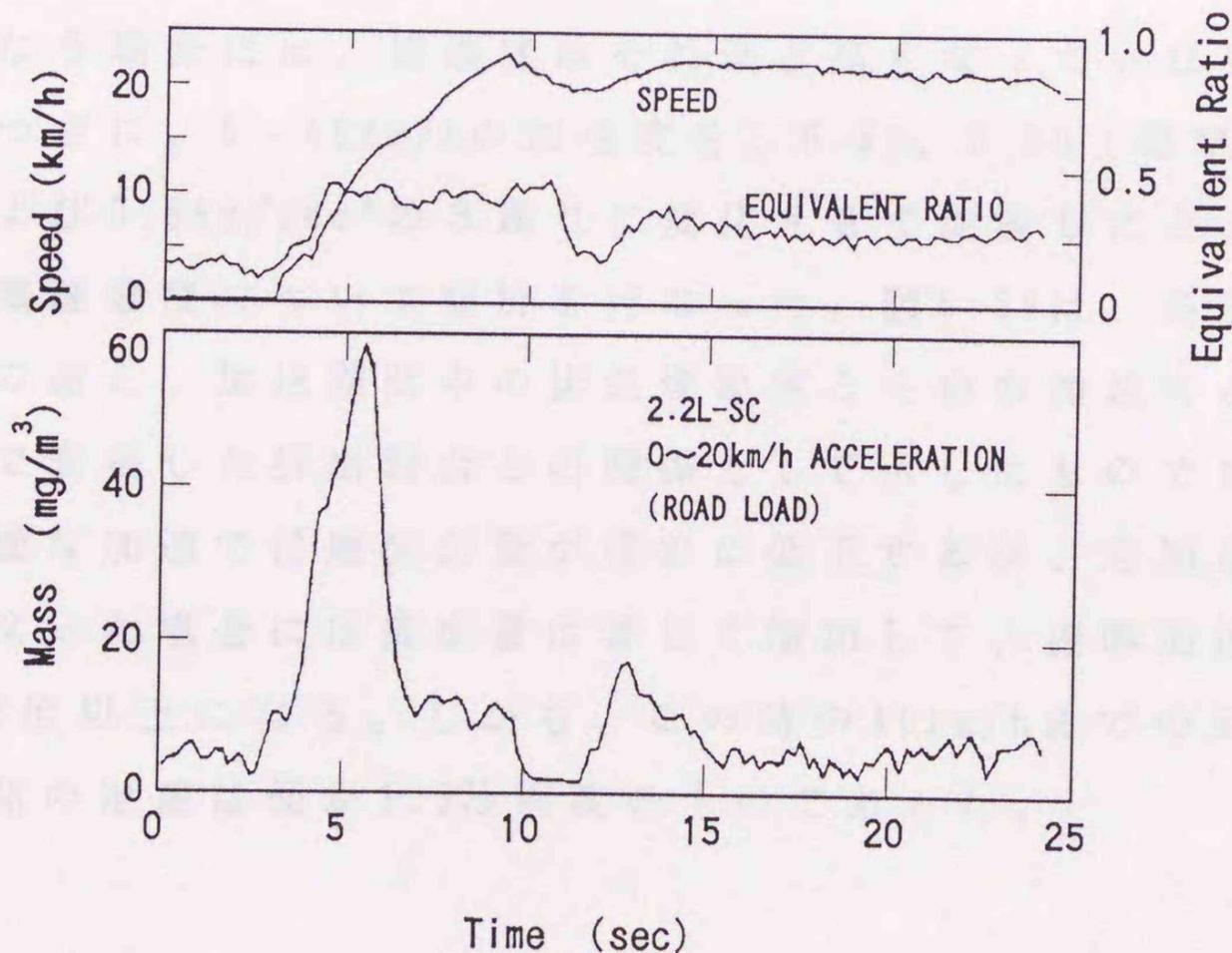


図5.28 加速期間中の煙濃度

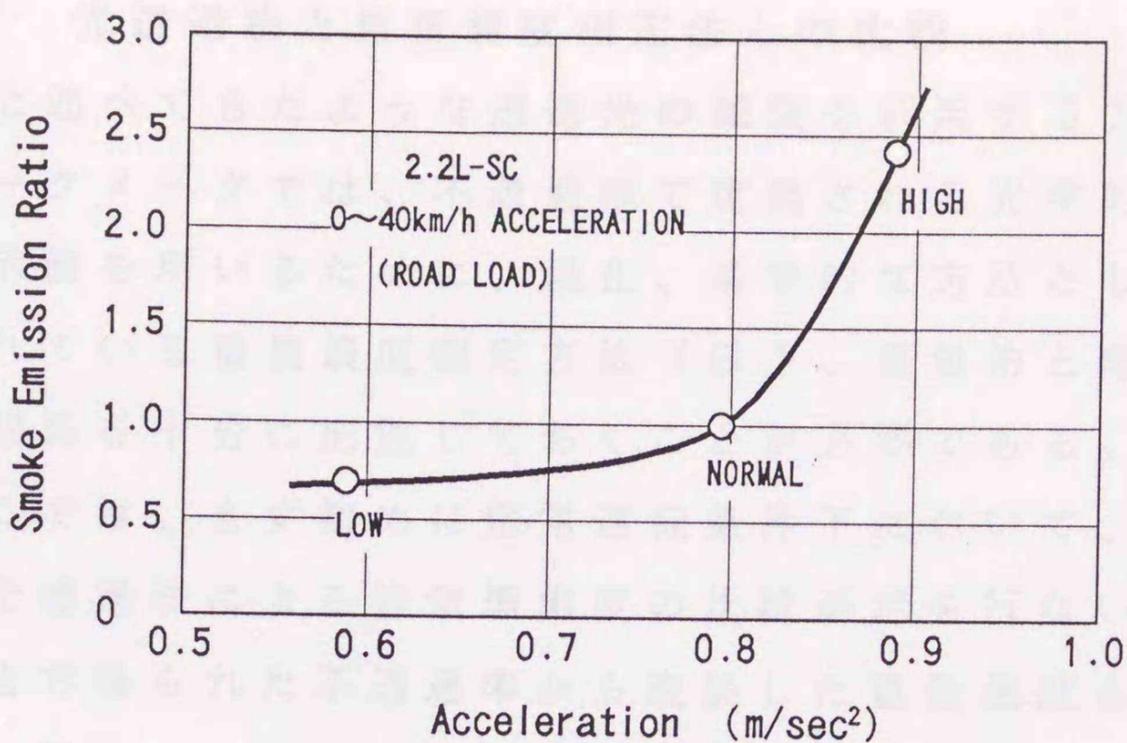


図5・29 加速度と煙濃度

行なう場合には、煙濃度はそれほど高くなっていない。

つぎに、0~40km/hの加速度を、0.59、0.80（標準）、および0.89m/sec<sup>2</sup>の3通りに変化させて加速したときの排気煙濃度について解析を行なった。図5・29は、各加速度の値と、加速期間中の排気煙濃度とを標準加速時との比で表示した排出割合との関係として示したものである。緩慢な加速では煙排出量が僅かに低下するが、急加速を行なった場合には排出量は著しく増加して、標準加速時の2倍以上になる。しかも、この時の40km/hまでの到達時間の短縮は僅か1.5秒程度のものであった。

## 5.6 光透過法と重量濃度測定法との比較

以上述べてきたような透過光の減衰を利用する方式のスモークメータでは、不透過率で定義される光学的な濃度指示値を用いるために、現在、基準的な方法として採用されている重量濃度測定方法（以下、重量法と略す。）との関係を十分に把握しておくことが必要である。

ここでは、まず初めに定常運転条件下において、重量法と光透過法による排気煙濃度の比較測定を行ない、光透過法で得られた不透過率から変換した重量濃度と、重量法で得られた重量濃度との関係について検討した。重量法には、標準的な方法としての希釈・フィルター捕集法と連続測定が可能なTEOM法とを採用した。つぎに、加・減速を含む過渡運転条件下での比較測定実験として、10モードサイクル運転時の排気煙濃度の連続測定を、TEOM法および光透過法により行なって、その結果について検討した。

### 5.6.1 比較試験装置の構成

図5.30に、光透過法と重量法との比較測定を行なうための実験装置の構成を示す。排気ガス流路を光透過式スモークメータ側（排気管出口部で直接測定）と希釈風洞側（希釈測定）に切換えて比較測定を行なうが、フィルター捕集法はハイボリウムエアサンプラ（HVAS）方式のものである。

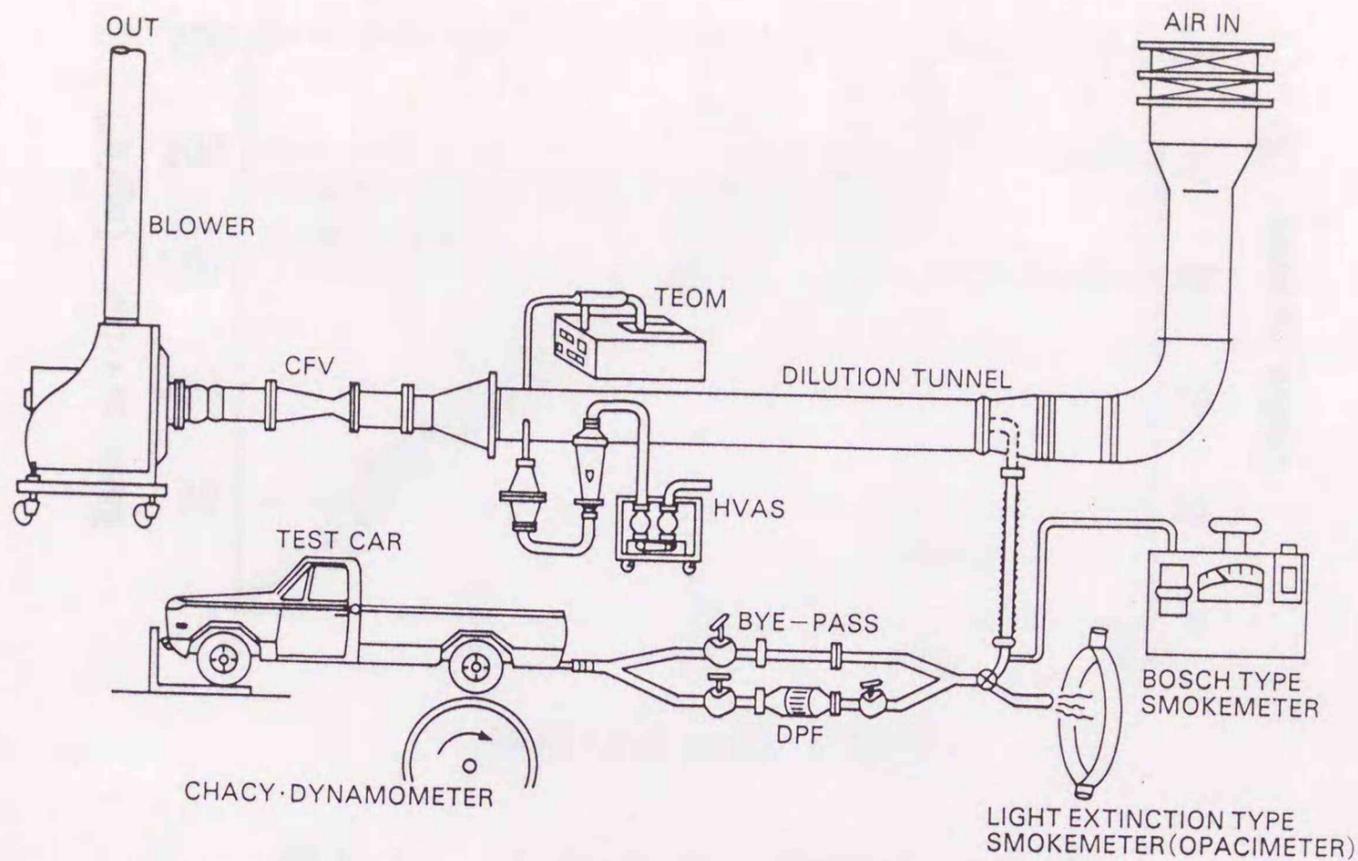


図 5・30 実験装置の構成

TEOMの測定条件は、捕集フィルター部温度 $50^{\circ}\text{C}$ 、サンプル流量 $3\text{L}/\text{min}$ であり、光透過法には試作した10連式光透過スモークメータを供試した。

### 5.6.2 定常運転時の比較試験

図5・31に、定常運転条件下における光透過法とフィルター捕集法、およびTEOM法との比較測定の結果を示す。本測定の範囲においては、光透過法と重量法との相関は良好で、ほぼ直線的な関係が得られている。ここで、実験はエンジン回転数 $1600\text{rpm}$ 一定のもとで、負荷のみを変えて煙濃度を変化させた。なお同図には、排気黒煙の代表的な簡易測定法であるボッシュ式スモークメータ

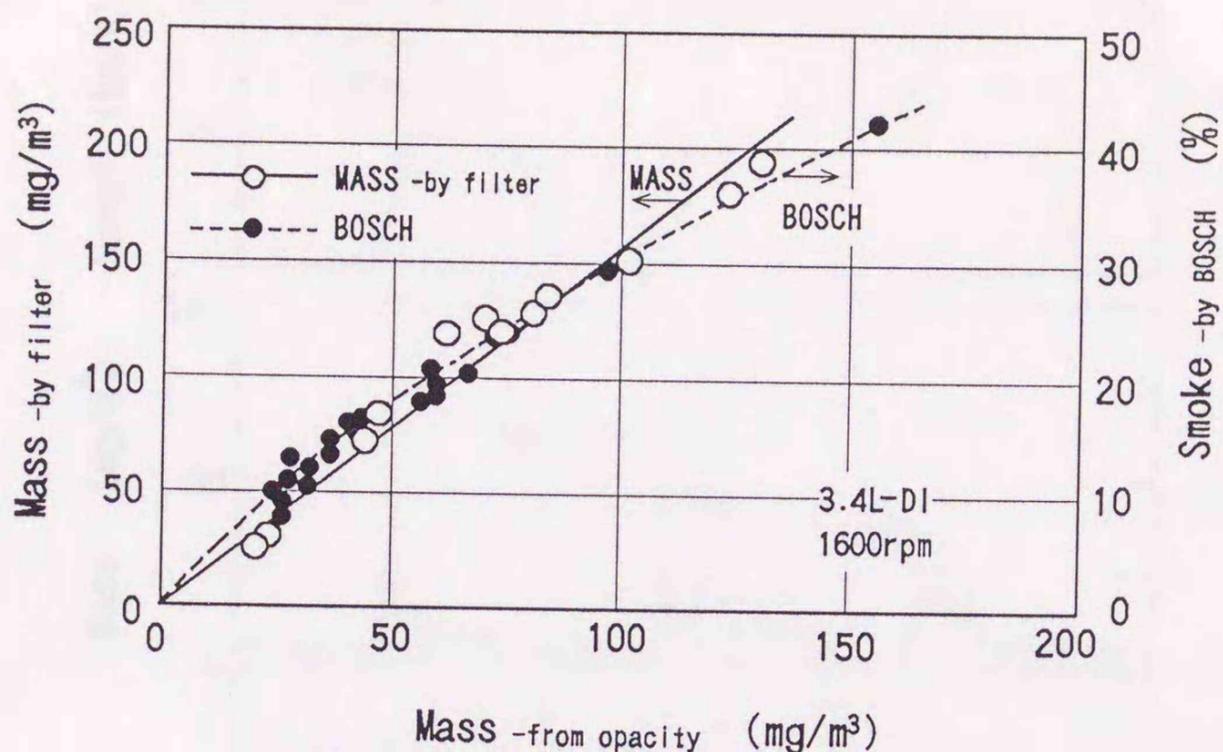


図5.31 光透過法と重量法の比較

による結果を、 $50\% \text{ smoke} = 250 \text{ mg/m}^3 \text{ MASS}$ と仮定して併記した。これは安価な装置であって広く使用されているが、原理的に高感度化が難しく、DPF通過後の低濃度の排気煙の測定には使用することができない。

### 5.6.3 過渡運転時の比較試験

つぎに、光透過法およびTEOM法により10モードサイクル運転時の連続測定を行なった。図5.32に、排気煙濃度の連続測定結果の一例を示す。両装置とも、過渡条件での連続測定が可能であって、加・減速に伴う急峻な濃度変化を良く追隨していることが分かる。しかし、TEOM法は原理的に積算重量を検出する方式であるために、光透過法に比べて、応答性および低濃度感度の点

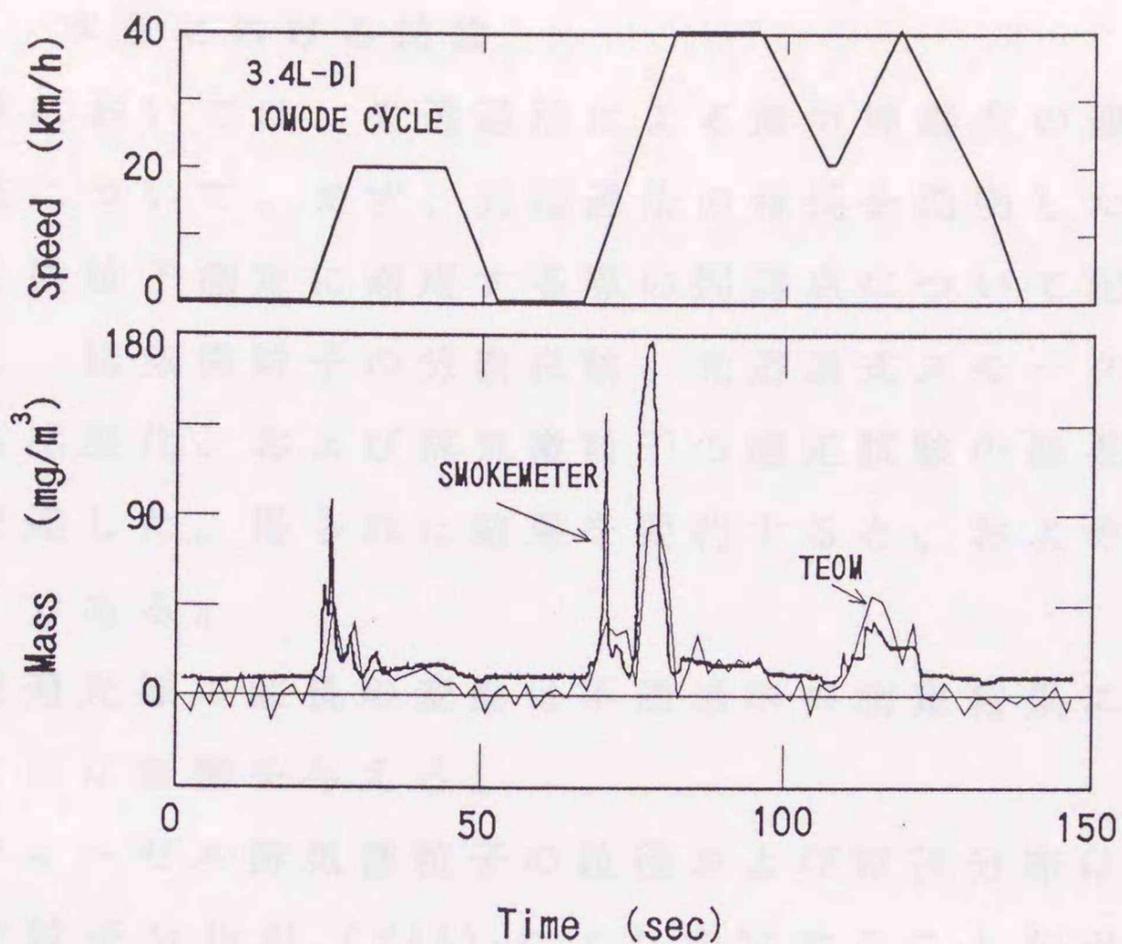


図5・32 連続測定結果の比較

で多少劣る傾向があらわれる。ここで、TEOMによる希釈測定の結果は直接濃度に、不透過率の値は重量濃度に変換して表示した。

従来、フィルター捕集法などの間欠測定方法では、単位サイクル当たりの平均濃度を求めるだけであったが、これら簡易測定装置により、瞬時濃度の連続的な変化まで計測できるようになり、エンジンならびにDPFの過渡特性などを評価・解析することが可能となった。とくに、高感度型光透過スモークメータの開発によって、振動天秤法やPHS式では得られなかった低濃度域でのデータの入手が容易となった。

## 5.7 本章における結論

本章においては、光透過法による排気煙濃度の連続測定方法について、まず、光透過法の特長を説明した上で、それを微粒子測定に適用する際の問題点について記述し、さらに、排気微粒子の分級試験、光透過式スモークメータの高感度化、および排気微粒子の測定試験の結果について記述した。得られた結果を要約すると、およそ以下の通りである。

- (1) 透過光源の波長の変動は不透過率の測定結果に対して大きな影響を与える。
- (2) ディーゼル排気微粒子の粒径および粒径分布は静電式微粒子分析計 (EAA) により測定することが可能であって、粒径範囲は大凡  $0.01 \sim 1.0 \mu\text{m}$ 、平均粒径 (MM D) は約  $0.2 \mu\text{m}$  程度であることが確認された。
- (3) 光透過式スモークメータにおけるノイズ発生の原因として、光源の温度ドリフトやゆらぎノイズが主なものであることを明らかにした。
- (4) 信号重畳式の3連式スモークメータでは、不透過率  $0.05\%$  までの煙濃度が検出できることを確認した。
- (5) 光路長の増大を図った多重反射式スモークメータでは、信号強度の増大とともにノイズの増加と光軸調整の複雑化が問題となることが分かった。
- (6) 試作した高感度型光透過式スモークメータによってディーゼル排気煙濃度の測定を行なった結果、エンジン回転数と当量比とをパラメータとした等排気煙濃度

曲線のマッピングが効率的に行なえるようになった。

(7) 光透過法と重量濃度測定法との比較試験では、エンジン回転数一定の条件のもとでは両者は良好な相関を示すことが分った。

(8) 本研究で開発した光透過法による測定によれば、瞬時濃度の連続的な計測が可能であるほか、振動天秤法やP H S式では不可能であった低濃度域でのデータの入手が容易となった。

## 第6章 光透過式スモークメータによる捕集効率の 簡易・迅速測定

### 6.1 緒 論

ディーゼル排気微粒子の低減を目的として、現在、各種対策技術の研究が盛んに行なわれているが、とくに、排気後処理方式の一つである微粒子トラップ(DPF)を利用する方法は、現時点において最も有望視される低減技術の一つであり、早期実用化が期待されている。

それら微粒子トラップの開発研究においては、捕集性能を表示する代表的なファクタの一つであるDPF捕集効率を、種々の条件下において把握することが必要である。

そこで第6章では、まず、捕集効率の定義およびそれにもとづいた従来からの捕集効率測定方法とその問題点について論じた。ついで、光透過法を利用したDPF捕集効率の簡易・迅速測定方法を提案し、それにもとづいて行なった捕集効率測定装置の試作の結果について記述した。これは、インラインタイプの光透過式スモークメータをDPFの上・下流側に配置して、捕集効率の実時間による連続測定を可能とするものである。

つぎに、試作した捕集効率測定装置の概要について記述するとともに、その基本的な諸特性を実験により明らかにした。また、定常および過渡運転条件下における捕集効率の測定を行なうことにより、試作装置の性能を確

認した。

最後に、光透過法による捕集効率の測定方法について、微粒子トラップに捕集される微粒子の重量割合（重量捕集率）や、フィルター捕集法および振動天秤法により求めた捕集効率の値などとの比較・検討を行なうことによって、提示した方法の妥当性について論述した。

## 6.2 捕集効率の測定方法

排気管系において排気微粒子の捕集、除去を行なうDPFの捕集効率 $\eta$ は、DPF上流側排気微粒子濃度を $C_u$ 、下流側濃度を $C_d$ とすると、

$$\eta = 1 - C_d / C_u \quad (6.1)$$

によって定義される。それ故、捕集効率を求めるにはDPF通過前後の微粒子濃度を正確に測定することが必要である。

従来、排気微粒子の重量濃度を測定する方法として希釈・フィルター捕集法や振動天秤法が用いられてきたが、いずれの方法も排気微粒子を一定時間濾紙に捕集して、その堆積重量を精密天秤あるいは振動天秤により秤量することが必要であり、しかも捕集に際しては希釈風洞などの大型実験設備を必要とした。また、それらの方法によって捕集効率を求める場合には、DPF装着時と非装着時の濃度をそれぞれDPF上・下流側濃度として別個に測定することが必要であり、試験手順が煩雑となって捕集効率の迅速な測定は不可能であった。

これに対して、ディーゼル排気煙濃度の簡易測定法として、従来から用いられてきた光透過式スモークメータは、排気希釈などの前処理を必要とせず、連続的な測定が可能であって捕集効率の簡便な測定に最も適した装置と考えられる。このことから、本研究では、光透過法を利用したDPF捕集効率の簡易・迅速測定方法を考案して、それによる装置の試作を行なった。すなわち、インラインタイプの光透過式スモークメータを排気管系に挿入されたDPFの上・下流側に配置して、その捕集効率を実時間で連続的に測定するものである。

#### 6.2.1 インライン式スモークメータの試作

DPF捕集効率の迅速測定を実現するために、本研究では、図6.1に示すインラインタイプの光透過式スモークメータ装置を試作した。これは、煙流路を挟む一対の光源と受光器とを排気管に直結したものであって、検出部を水冷化することにより高温の排気ガスから素子群を保護している。さらに、温度ドリフトの影響を軽減するために、温度補償用のリファレンス検出器を用意している。

比較的高濃度の排気煙を測定する上流側検出部は、1対の光源と受光器とを備えた標準的な光透過式スモークメータとなっているが、DPF通過後の低濃度排気煙を測定する下流側検出部としては、3個の検出器を直列に配した信号重畳方式を採用して、S/N比の向上を図っ

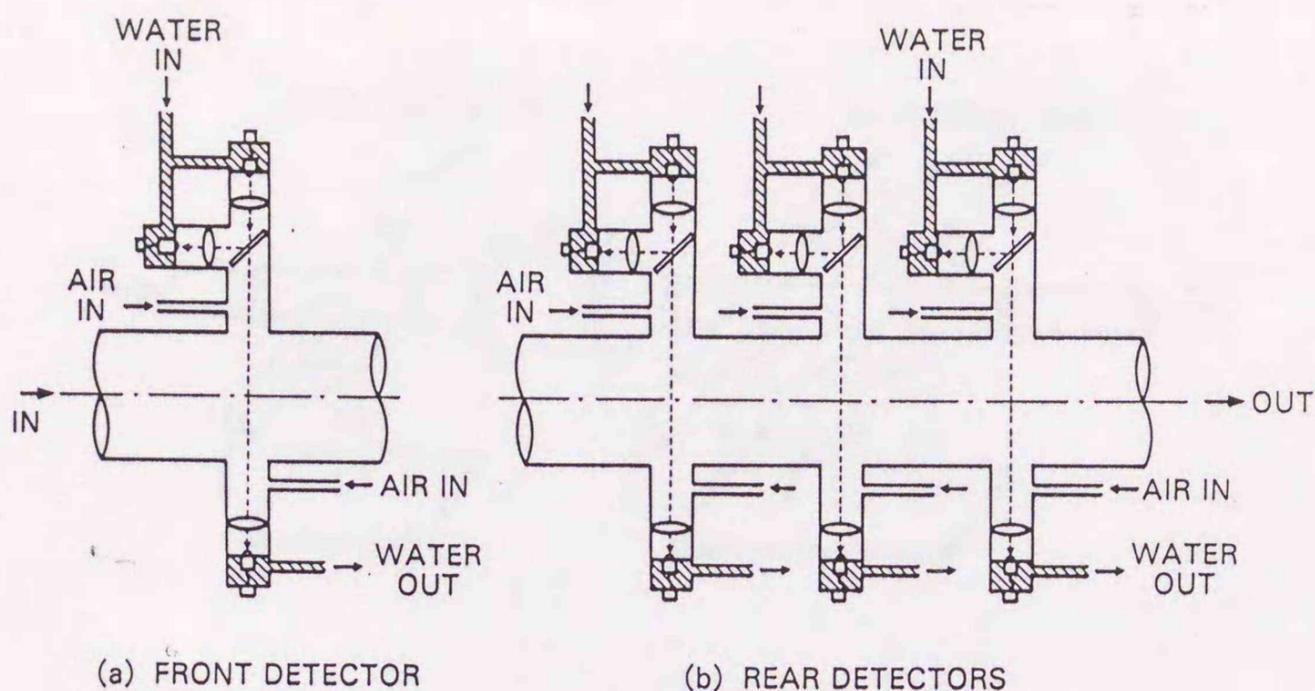


図6・1 インライン式スモークメータ

たものとなっている。

図6・2は、試作装置をDPFの上・下流部に配して構成した捕集効率測定装置を示す。それぞれのスモークメータによりDPFの上・下流側濃度を連続的に計測し、式(6・1)により捕集効率を実時間で算出する。図6・3は装置の外観を示したものであるが、図6・4に、信号処理部の構成ならびに処理方法について示した。すなわち各受光部からの検出信号と参照信号とを高速マルチプレクサによりデータ処理装置に取り込み、濃度および捕集効率を演算・出力する。

インライン式スモークメータは排気ガス温度の影響を直接受けるので<sup>(64)</sup>、信号処理部において発光強度の変

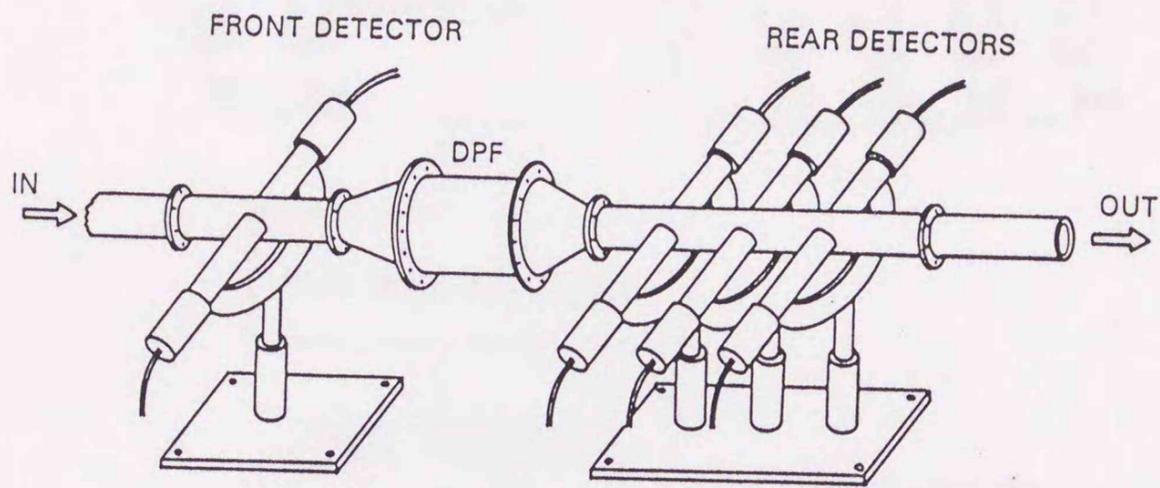


図 6・2 過渡捕集効率測定装置の構成

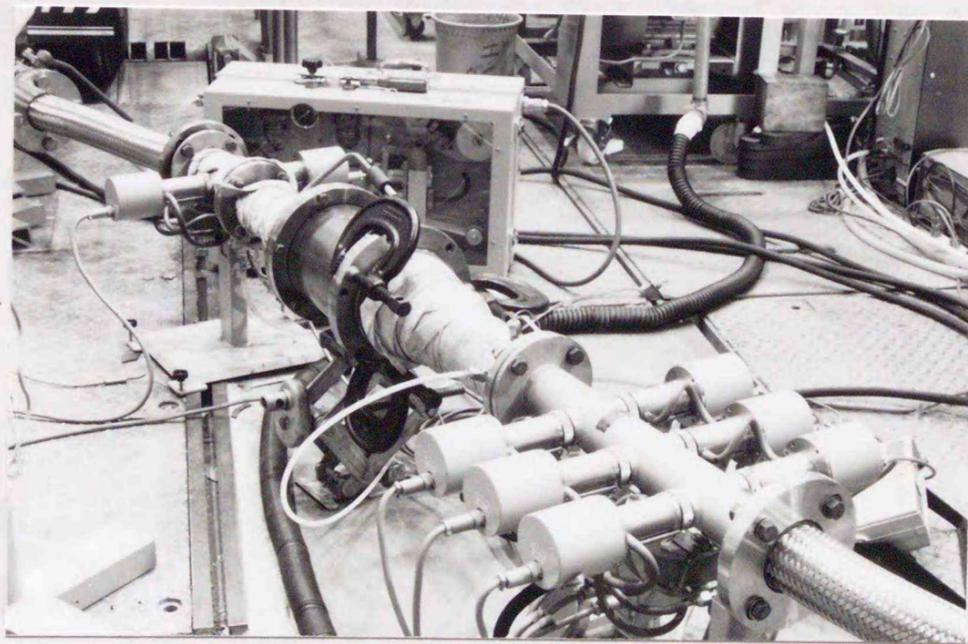


図 6・3 過渡捕集効率測定装置の外観

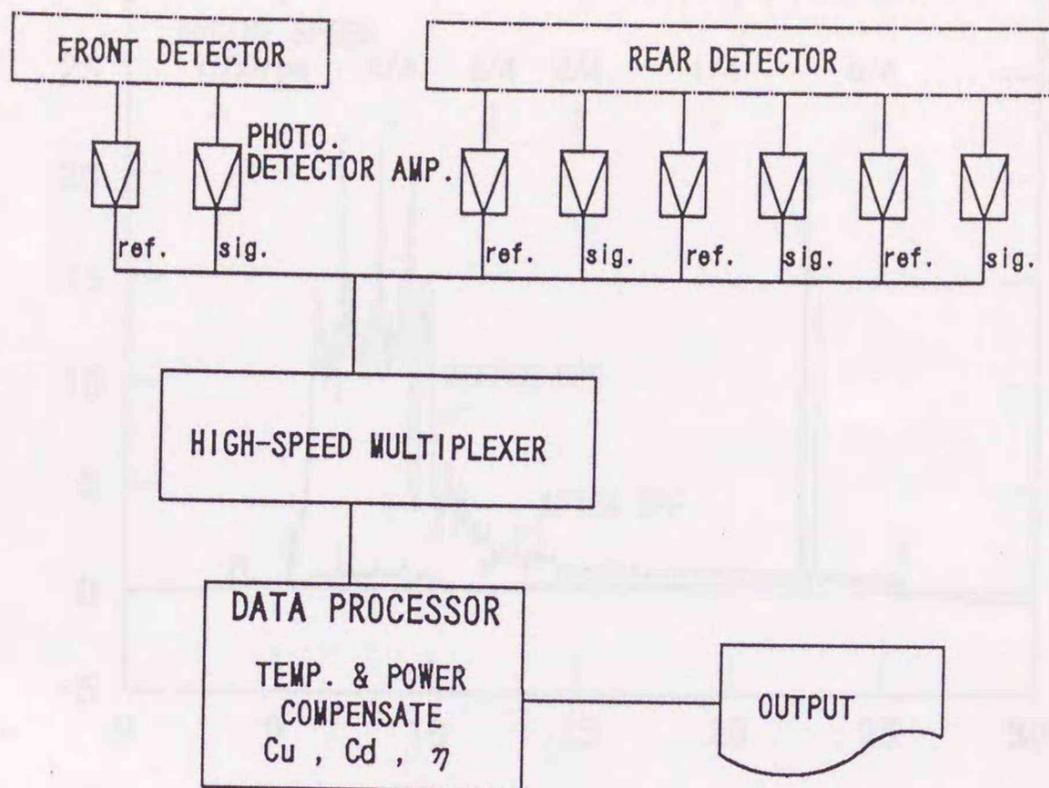


図6・4 信号処理部の構成および処理方法

化や温度ドリフトの補正を行なっている。また、DPFの上・下流側検出器からの信号は実時間でデータ処理装置に取り込まれ、式(6・1)により捕集効率が連続的に算出される。

### 6.2.2 試作スモークメータの諸特性

試作装置の基本的な性能を確認するために、ここでは、上・下流側スモークメータの温度ドリフトや測定精度について調べて見た。図6・5に試作スモークメータの温度ドリフト特性を示すが、これは、検出部での排気ガス温度を変化させるため、試験車輛のエンジン負荷を種々に

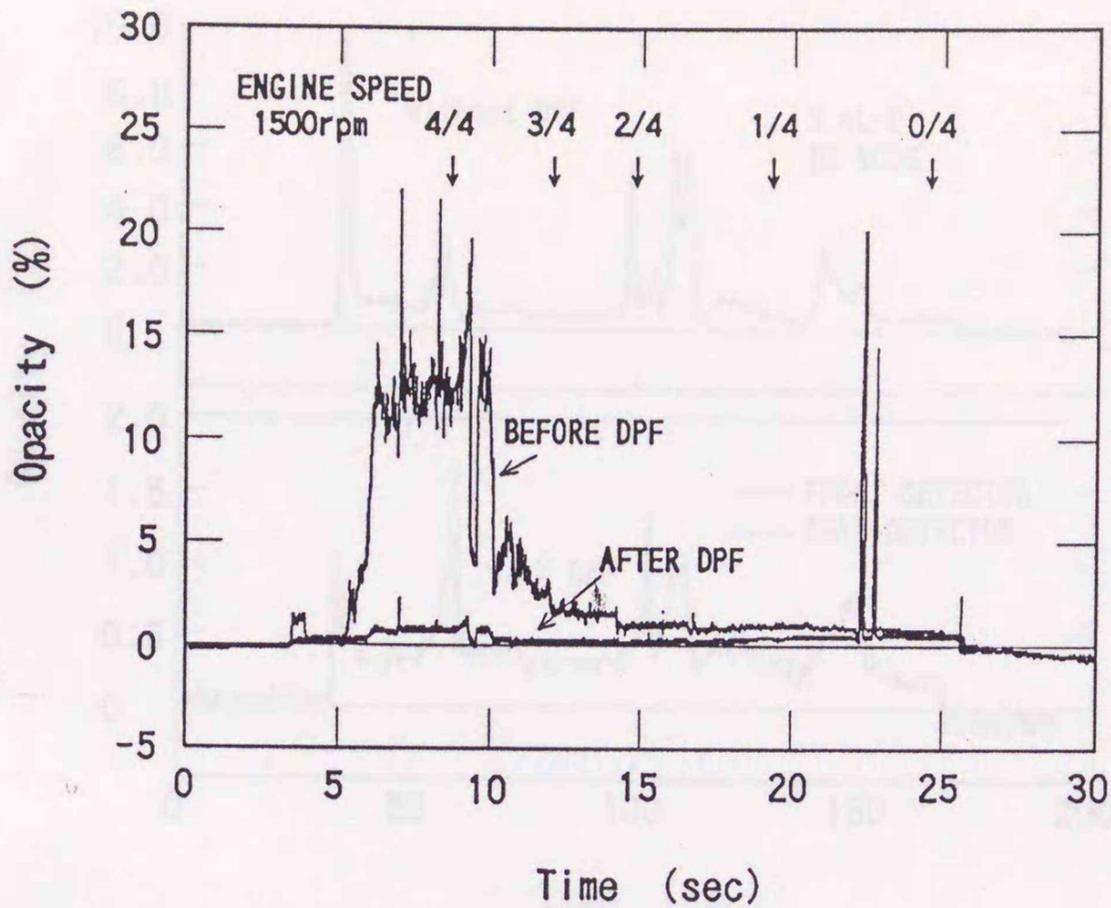


図6・5 温度ドリフトの影響

変えて運転して、試作スモークメータによる煙濃度の連続測定を試みたものである。検出部の水冷化と信号処理部における温度補正の効果とによって、温度条件が最も過酷となる全負荷（4/4）運転後も、上・下流側スモークメータは、長時間にわたってほぼ安定した出力が得られている。

図6・6は、1対の光源と受光器からなる上流側の標準的なスモークメータと信号重畳方式を採用した下流側の3連式スモークメータとを直結し、10モード運転時の排気煙濃度を同時測定したときの比較結果を示すものである。排気煙濃度が比較的高い場合（DPF非装着時）

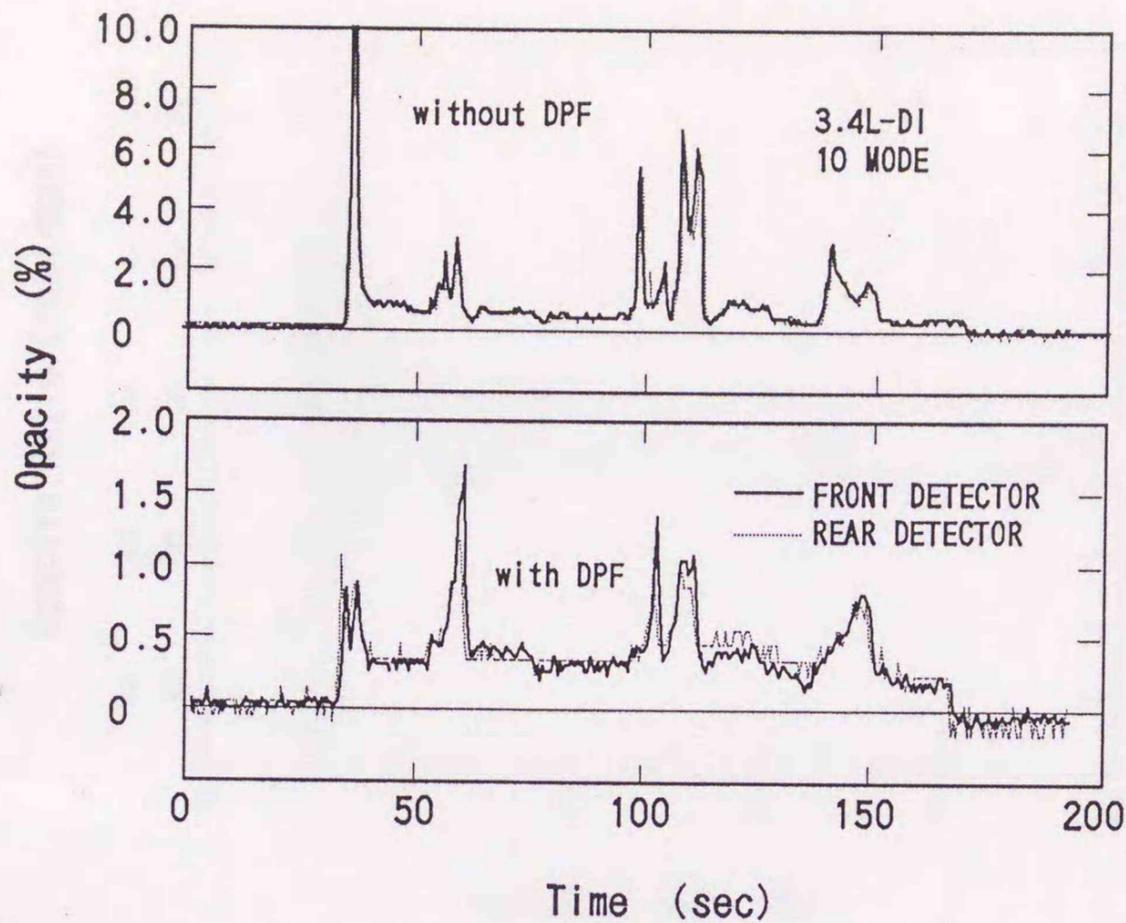


図6.6 上・下流側スモークメータの比較

には、両者の結果は殆ど一致しており、標準的な検出器で十分な精度が得られることが分かる。しかし、DPFの装着により排気煙濃度を低下させた場合には、データ処理部におけるA/D変換器の分解能以下での濃度変動に対する応答の違いから、両者の示す濃度経過には多少のズレが認められるようになる。

図6.7は、上・下流側スモークメータの検出精度の相違を、下流側スモークメータを基準として示したものである。図において、両スモークメータが指示する濃度の誤差範囲は、不透過率で0.5~1.0%以上の濃度域で大凡±10%以内となる。従って、両者の比の値から求められ

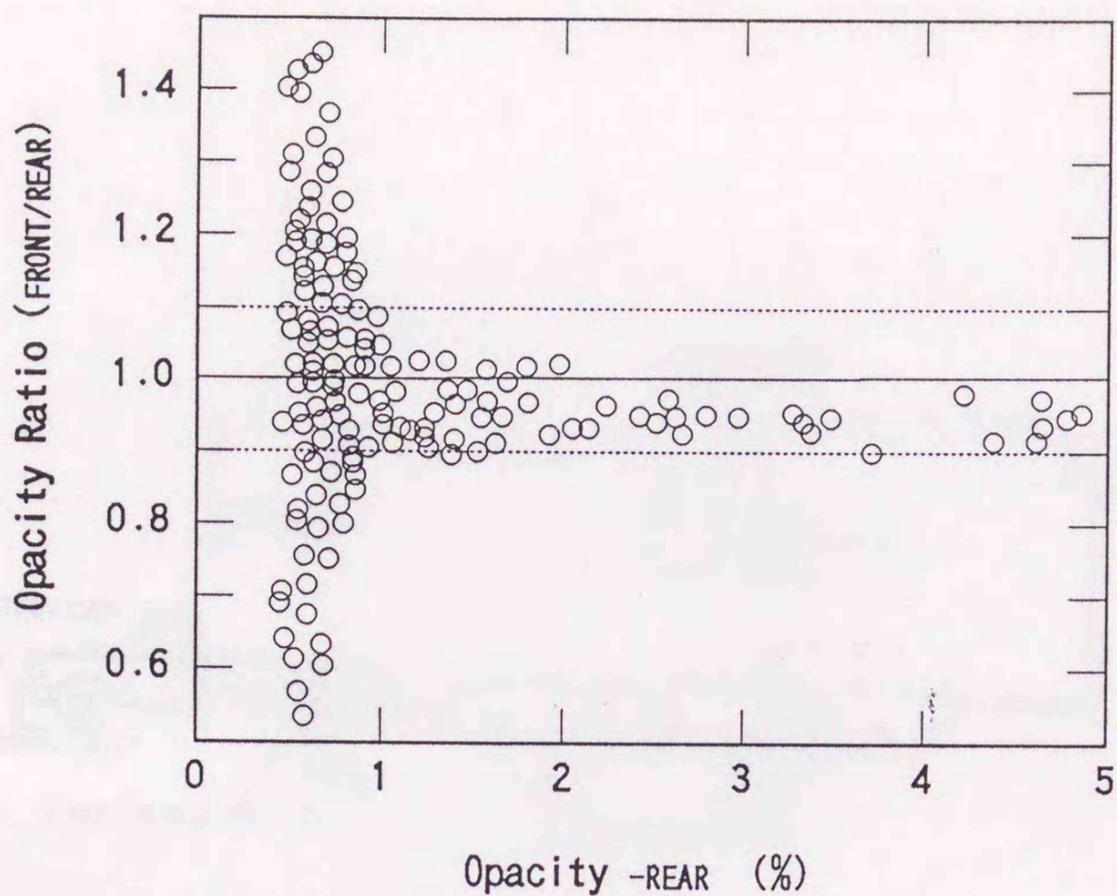


図6・7 上・下流側スモークメータの精度

る捕集効率は、これ以下の低濃度の場合には、その精度が低下するということが考えられる。

### 6.3 過渡運転時における捕集効率の測定

#### 6.3.1 実験装置

図6・8は、試作装置による過渡運転時の捕集効率測定のための装置の構成を示すものである。供試車輛には、小型ディーゼルトラック（総排気量 3.4L、直接噴射式）を使用して、シャシダイナモメータ上において定常運転試験（道路負荷、0～80km/h定速走行）、および10モード運転試験を行なった。

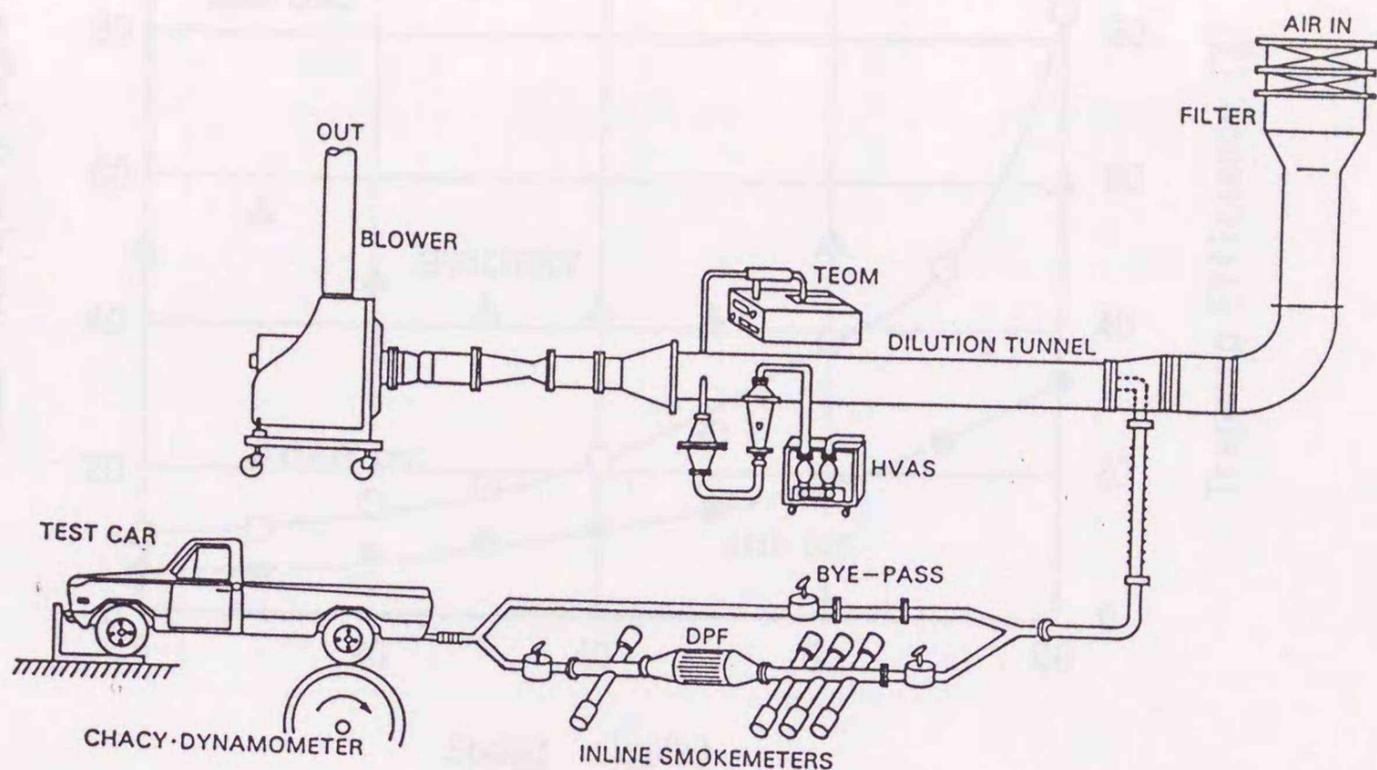


図6・8 実験装置の構成

D P F は、排気管出口部と希釈トンネルとをつなぐ排気導入管路の途中に取り付けて、その上・下流部に試作したインライン式スモークメータを配置した。試作装置による測定結果を重量法による結果と比較するために、T E O M による測定も並行して行なった。そして、D P F のバイパス流路を、T E O M により D P F 上流側濃度を測定する際に使用した。

### 6.3.2 定常運転時における測定

まず、試験車輻を0~80km/h (道路負荷) で定速走行させた時の捕集効率の測定を行なった。図6・9に、光透

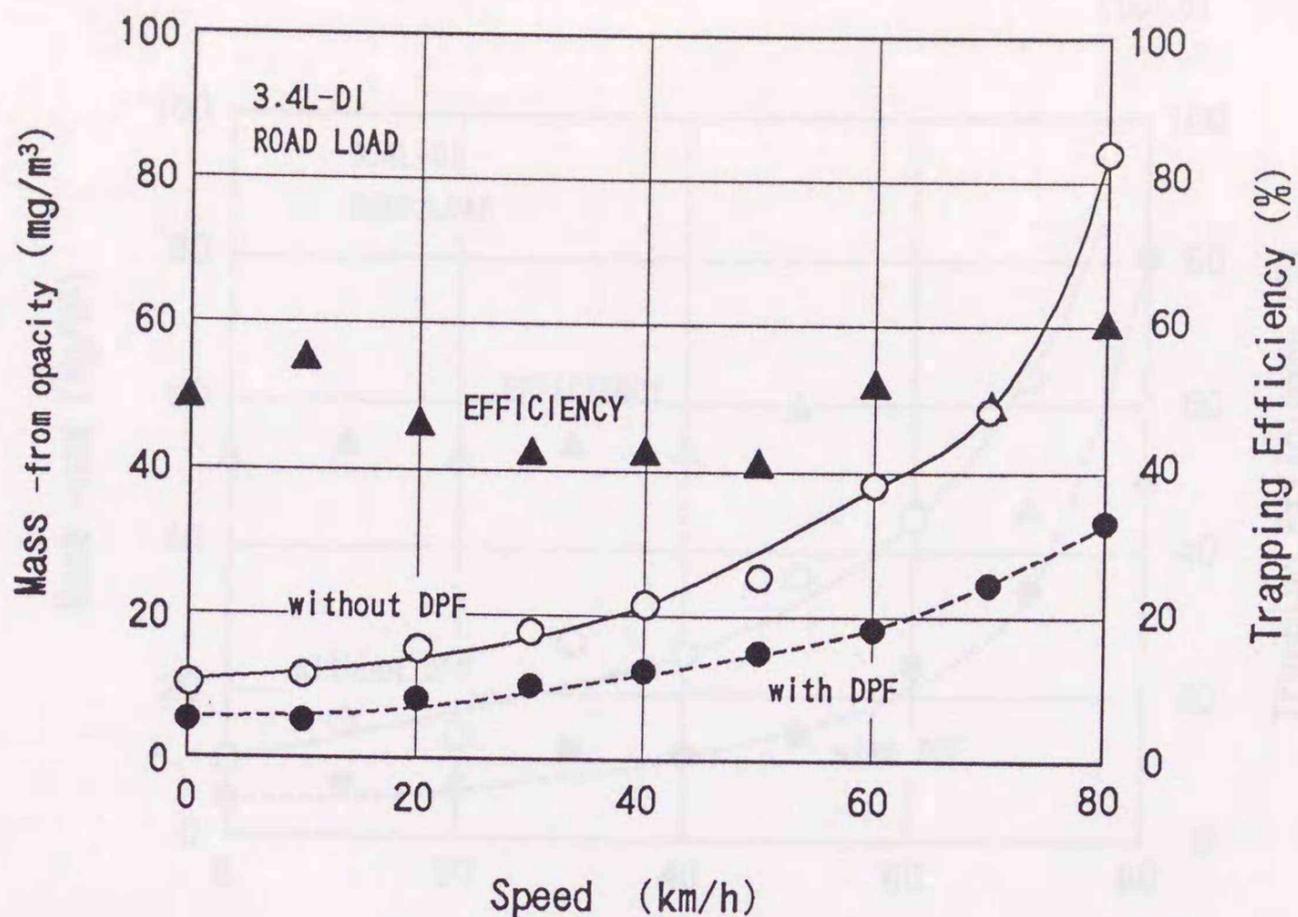


図6・9 光透過法で測定した濃度と捕集効率

過法で測定したDPF上・下流側濃度とその結果から求めた捕集効率とを示す。図6・10は、同様の測定をTEOMで行なった結果である。ここで、希釈トンネル内測定を行なったTEOMでは、DPFバイパス時を上流側濃度とするほか、各車速における希釈率により希釈濃度を直接排出濃度として換算した。

車速の上昇に伴い、排気微粒子の排出濃度、すなわちDPF上流側濃度は徐々に増加し、それに伴ってDPF下流側濃度もほぼ同様の上昇傾向を示す。両方式による濃度測定結果は、DPF上・下流側とも良好な一致を示しており、捕集効率に関しても、両者はほぼ同等の結果となっている。これは、光透過法で得られた不透過率の

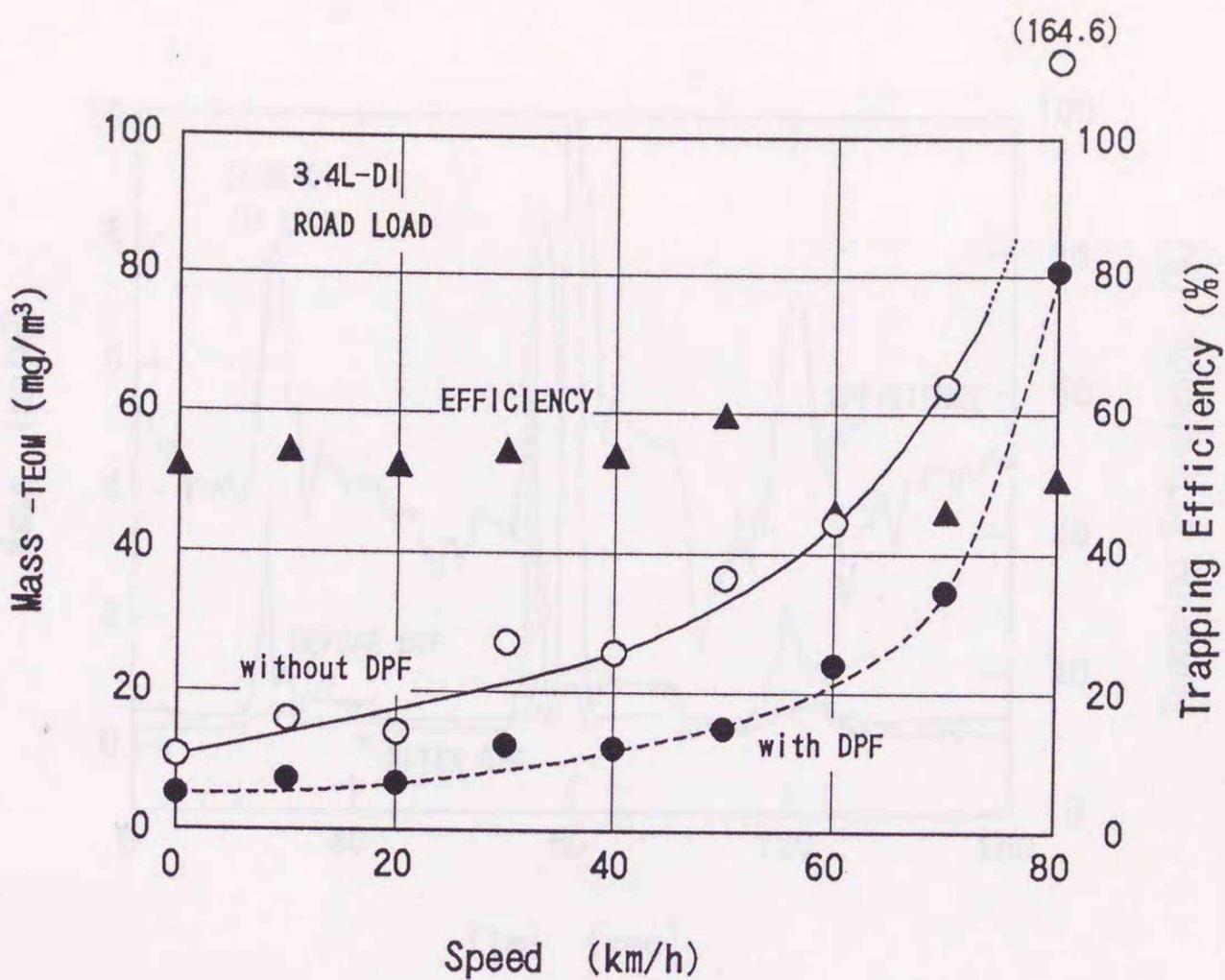


図 6.10 振動天秤法で測定した濃度と捕集効率

結果を、前章で示したような粒径と減衰係数の関係から、重量濃度に換算したことにより、DPF通過前後における粒径変化の影響が少なくなったためと考えられ、その結果、試作装置によりDPF捕集効率の迅速な測定が精度良く行なえることが確認された。

### 6.3.3 過渡運転時における測定

つぎに、10モード運転などの過渡運転時について同様の測定を行なった。図6.11に、DPF上・下流側濃度の連続測定結果の一例と、それから求めた捕集効率を示す。DPF上流側の直接排出濃度は、発進、加速時に大

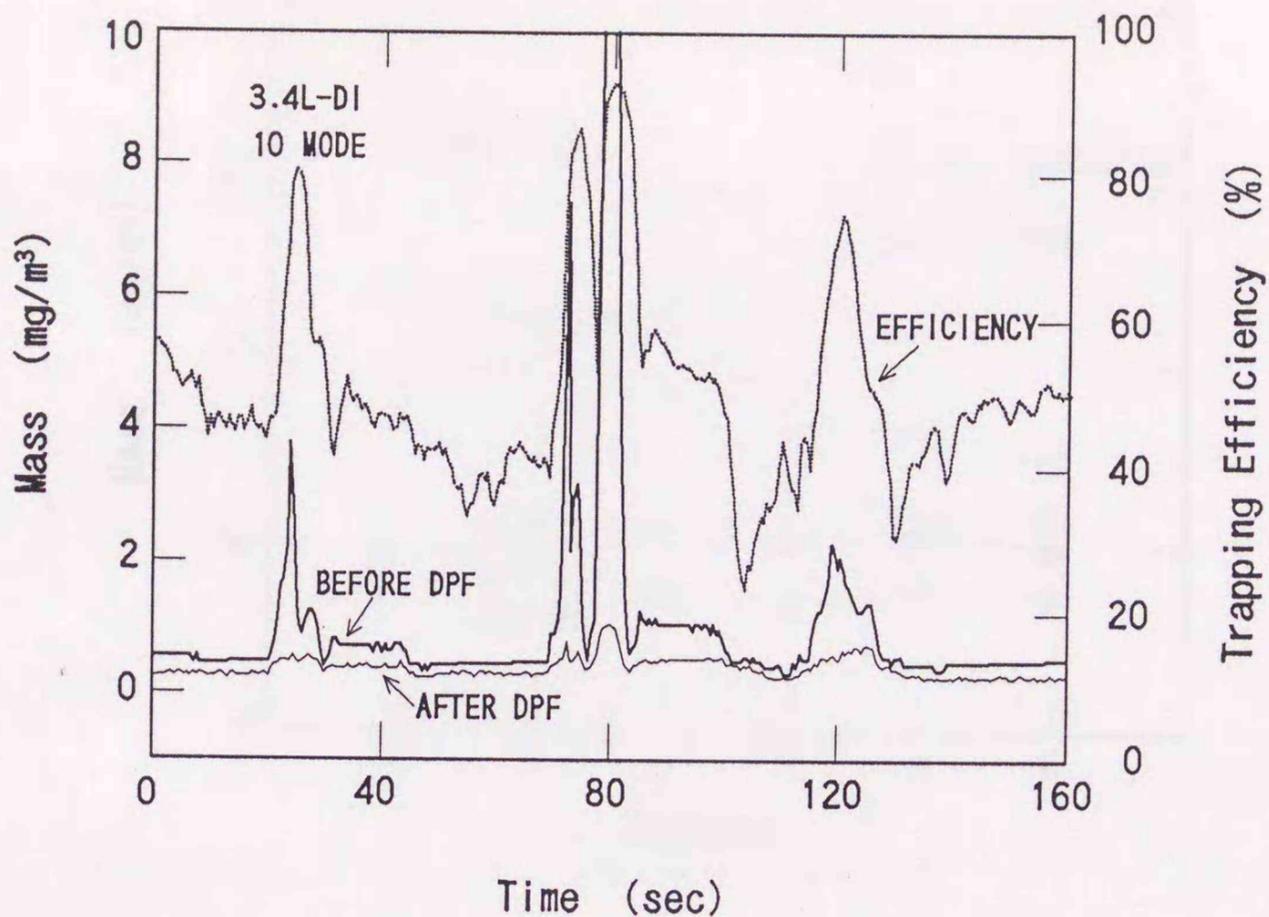


図 6・11 過渡捕集効率の測定例

幅に増加し、アイドリング、および定速走行時には極めて低い濃度となることが分かるが、DPF下流側濃度もほぼそれに応じた変化となっている。捕集効率は、DPF上流側濃度がピークを持つような時に大きく、濃度が低い場合にはやや不安定な結果となる。これは、前出の図6・7で示したように、このような低濃度域では、両スモークメータの指示濃度間の誤差が増大し、両者の比の値から求めた捕集効率の精度が低下するためと考えられる。

図6・12は、10モード運転時のサイクル当たり平均濃度を、光透過法とTEOMによる繰り返し測定から求め

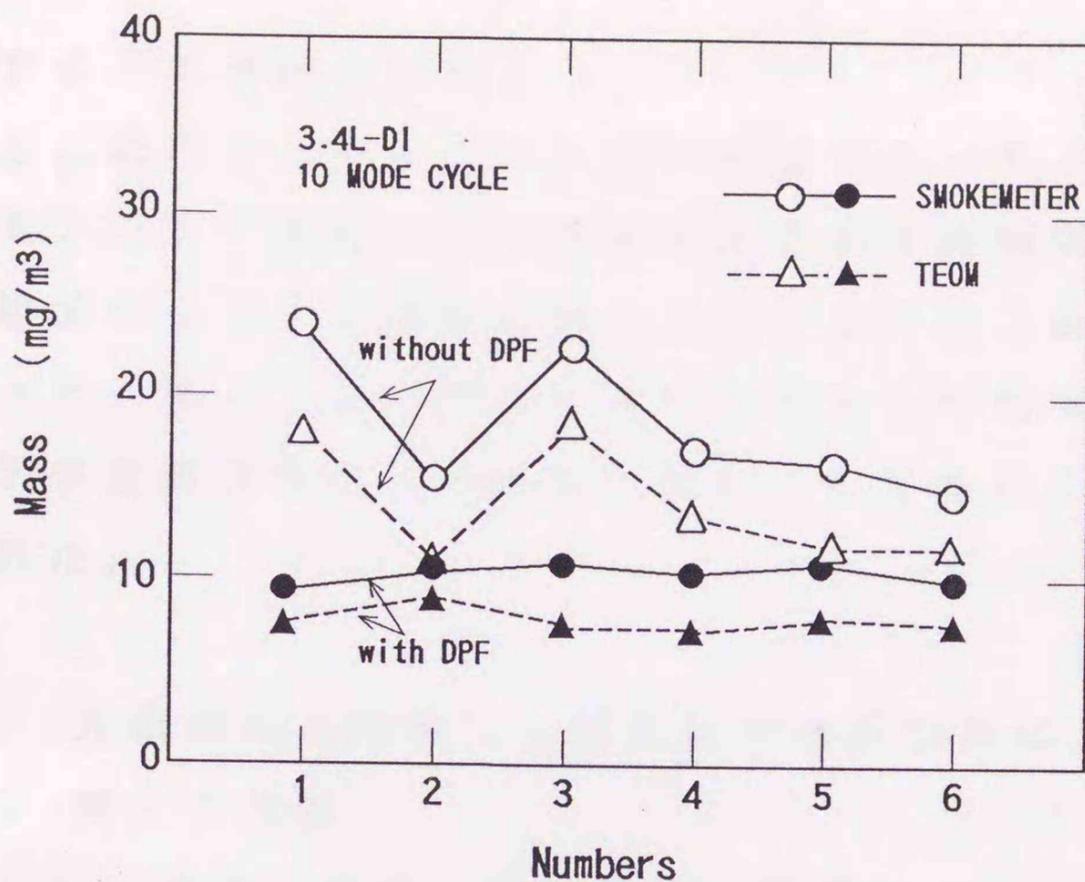


図6・12 10モードサイクル当たり平均濃度の比較

た結果とを比較して示したものである。ここで、TEOMの重量濃度は直接濃度に変換した。また、光透過法におけるサイクル当たり平均濃度は、光透過法で測定した瞬時濃度を時間積分することにより求めた。

10モード運転におけるサイクル毎の排出濃度に関しては、人為的な運転操作やDPF装着の有無により濃度変動を生じるが、両測定方法ともそれらの変動を非常に忠実に再現していることが分かる。そして、DPF上・下流側のサイクル毎排出濃度の平均捕集効率、光透過法で約46%、TEOM法で約45%と、定常運転時に比べて多少低い値とはなっているが両方式の結果は良好な一

致示すことが確認された。

以上、試作したインライン式光透過スモークメータによって、DPF通過前後の排気煙濃度を連続測定して、その結果からDPF捕集効率を迅速に求めることが可能となった。また、この方法により、従来不可能であったDPFの過渡特性などの計測が容易に行なえることが確認された。

#### 6.4 光透過法で測定した捕集効率の妥当性に

##### 関する検討

##### 6.4.1 重量捕集率と捕集効率の関係

DPFの捕集効率 $\eta$ は、DPF上・下流側濃度の値から、前出の式(6.1)により求められる。

一方、DPFに捕集される微粒子の重量割合、すなわち重量捕集率 $W_t$  (g/min)に着目すると、DPF上・下流側濃度 $C_u$ 、 $C_d$  (g/m<sup>3</sup>) および通過排気ガス流量 $q_e$  (m<sup>3</sup>/min) から、

$$\begin{aligned} W_t &= q_e (C_u - C_d) \\ &= q_e C_u \eta \end{aligned} \quad (6.2)$$

の関係が成り立つ。従って、濃度測定により求めた捕集効率の値が正しいものとするならば、DPFへの堆積微粒子の重量から求めた重量捕集率 $W_{t-DPF}$ と、この時の微粒子濃度の測定結果から求めた重量捕集率 $W_{t-conc.}$ とは一致しなければならない。

このことから、本研究では、運転期間毎に、DPFに

実際に堆積した微粒子重量を直接秤量して求めた重量捕集率と、光透過法で計測した濃度（DPF上・下流側濃度の重量変換値）から求めた重量捕集率とを比較することによって、光透過法における濃度ならびに捕集効率の測定方法に関する妥当性について検討した。

図6・13は、それぞれの方法で求めた重量捕集率を比較した結果を示したものである。ここで、採取時間毎の重量捕集率は、定常運転時にDPFに堆積した微粒子重量を間欠的に計測して求めた。また、光透過法による重量捕集率は採取期間中の平均値で表示した。回転数および負荷を一定とした場合、DPFへの堆積重量は採取時間に比例して増加し、採取時間毎の重量捕集率は一定となる。一方、光透過法で求めた重量捕集率も、採取時間に対してほぼ一定となり、重量測定により求めた重量捕集率の値とも概ね一致していることが分かる。すなわち、光透過法で求めた捕集効率の値が妥当なものであることが実証された。

#### 6.4.2 各種測定法による捕集効率の比較

ここでは、光透過法により測定した捕集効率を、フィルター捕集法ならびに振動天秤法による重量濃度測定から求めた捕集効率との間で比較することによって、光透過法による捕集効率測定の妥当性について別の角度から考察した。

図6・14は、同様の実験において、運転時間毎の捕集効

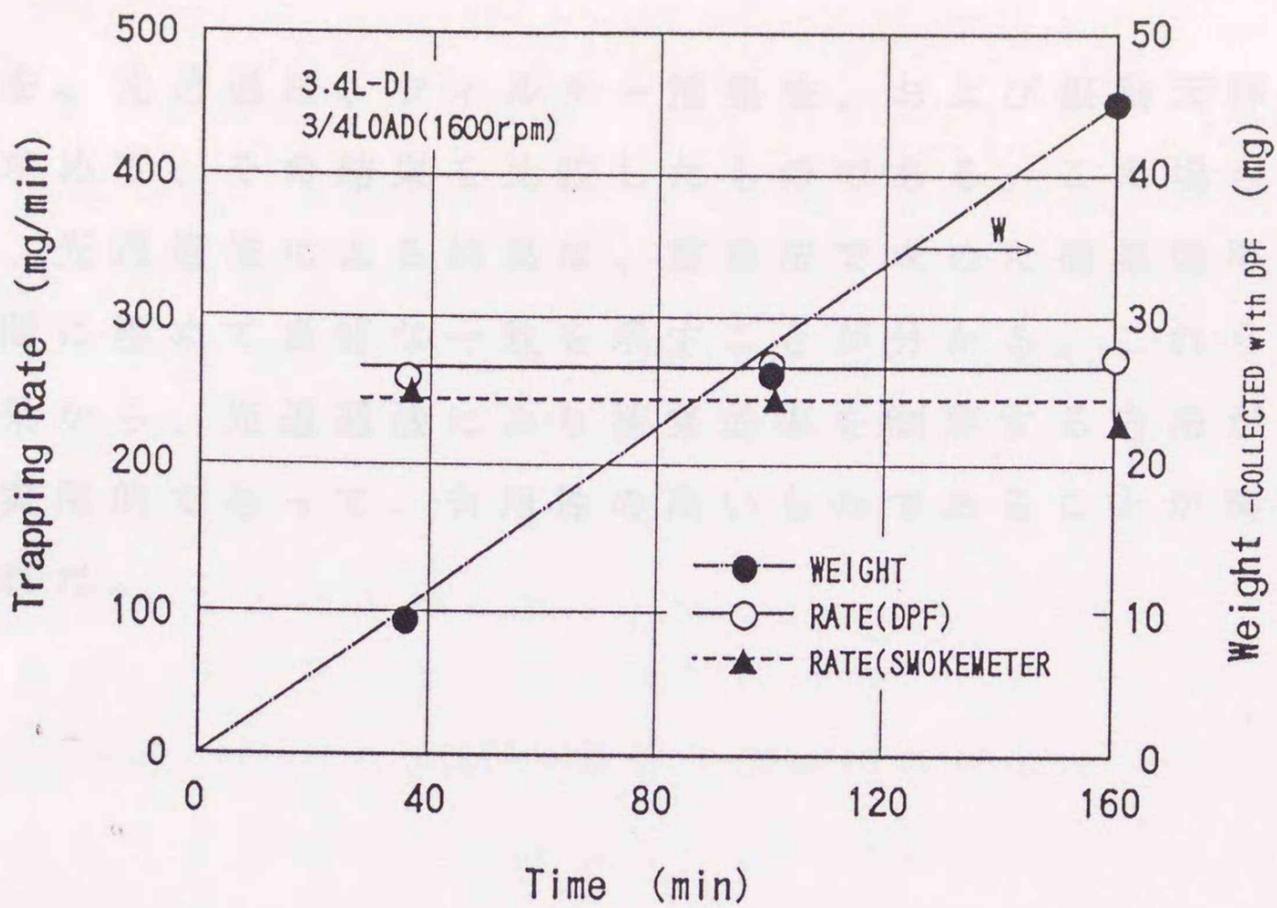


図 6・13 重量捕集率の比較

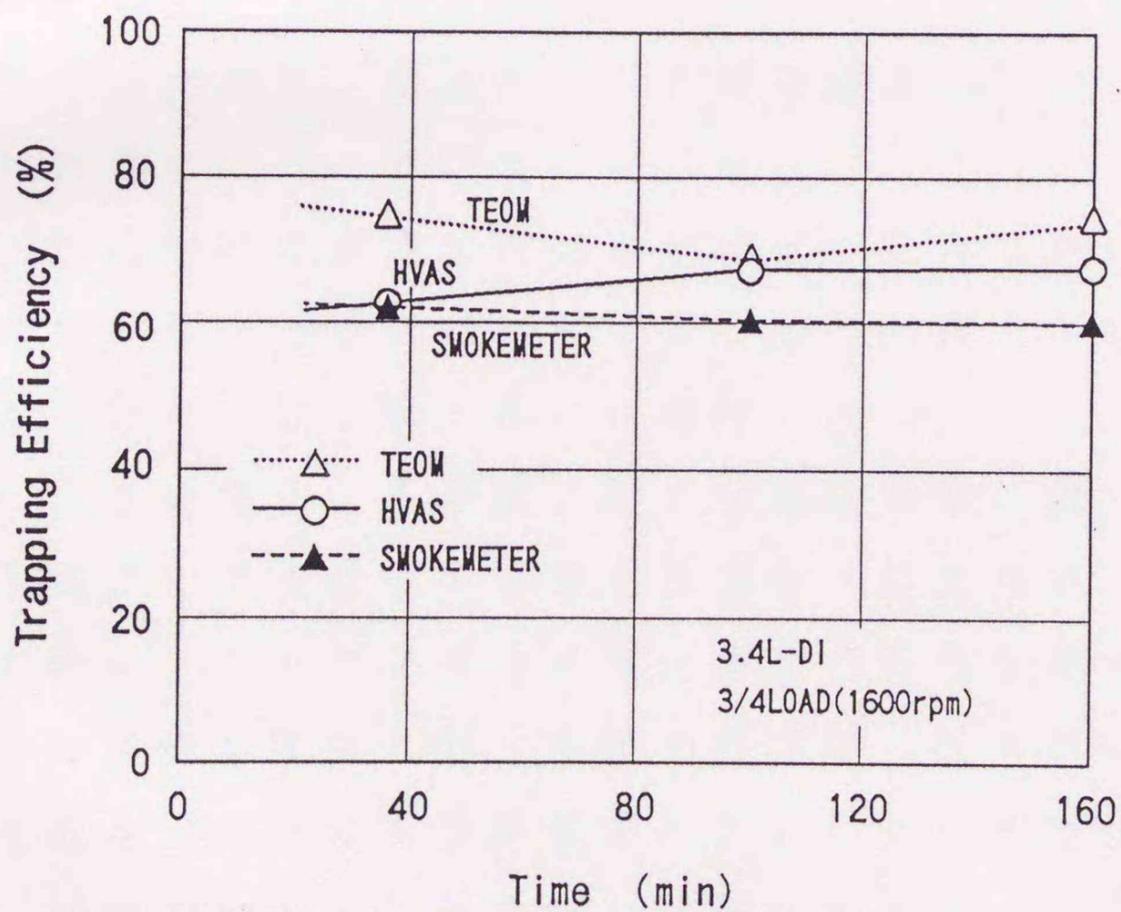


図 6・14 捕集効率の比較

率を、光透過法、フィルター捕集法、および振動天秤法で求めて、その結果を比較したものである。この場合にも、光透過法による結果は、重量法で求めた捕集効率との間に極めて良好な一致を示すことが分かる。これらの結果から、光透過法により捕集効率を測定する方法が十分実用的であって、有用性の高いものであることが実証された。

最後に、光透過法による捕集効率の測定について、その他の方法により求めた捕集効率との比較によって、その妥当性を検証した。得られた結果を要約すると、右を以下の通りである。

(1) 光透過法によるマイクライ、スモークカメラ、及びDPFと、下気流に設置することによって、捕集効率の測定精度、およびDPF捕集効率の測定精度は、ほぼ同等に測定することが可能となった。

(2) 光透過法で測定した捕集率は、定常運転時よりも、よりモード運転時よりもDPFの捕集率との間で極めて良好な一致を示すことが確認された。

(3) 光透過法による捕集率、およびフィルター捕集法の測定結果から算出した捕集率の相対誤差割合（重量捕集率）は、実際は下気流に捕集された捕集率を秤量して求めた重量捕集率の値との間で良好な一致を示すこと、光透過法で求めた捕集率とフィルター捕集法、および振動天秤法により求めた捕集率の値とはほぼ一致することなどから、光透過法によるDPF捕集率の

## 6.5 本章における結論

本章では、光透過式スモークメータによる捕集効率の簡易・迅速測定方法について、まず、光透過法を利用したDPF捕集効率の簡易・迅速測定方法を提案して、装置の試作を行なった結果について記述した。つぎに、試作した捕集効率測定装置の基本的な諸特性について検討を行なってその性能を確認した。

最後に、光透過法による捕集効率の測定について、その他の方法により求めた捕集効率との比較によって、その妥当性を検証した。得られた結果を要約すると、およそ以下の通りである。

- (1) 光透過法によるインライン式スモークメータを、DPFの上・下流部に配置することによって、排気微粒子の排出濃度、およびDPF捕集効率を迅速且つ簡便に測定することが可能となった。
- (2) 光透過法で測定した捕集効率は、定常運転時ならびに10モード運転時ともTEOMの結果との間で極めて良好な一致を示すことが確認された。
- (3) 光透過法による濃度、および捕集効率の測定結果から推定した微粒子の捕集重量割合（重量捕集率）は、実際にトラップに捕集された微粒子重量を秤量して求めた重量捕集率の値との間で良好な一致を示すこと、光透過法で求めた捕集効率とフィルター捕集法、および振動天秤法により求めた捕集効率の値とはほぼ一致することなどから、光透過法によるDPF捕集効率の

測定方法の妥当性が実証されるとともに、それが十分  
実用的で有用性の高いものであることが確認された。

本論文は、ゼーセル型気体電子を結晶・液体測定す  
る方法の研究を目的として行なった研究の結晶について  
論述し、効果的な計測手段を開発・提案したものである。

まず最初に、希釈・フィルター型測定法の信頼性向上に  
関する基礎的な研究を行ない、つぎに、基準測定におけ  
る試験手順の煩雑さを解消し、効率的でしかも簡便な計  
測手段を提供するための検粒子濃度の簡易・迅速測定方  
法に関して一連の試験を行なった。

さらに、高感度型光透過式スモークカメラを用いた  
インライン式スモークカメラにより迅速信頼性に使用で  
きる加算型基準測定装置を開発した。

本論文において得られた結果を要約すると、以下が主  
たる点である。

### 1. 検粒子増殖装置、および計測実験

(1) 走査型検出器の測定方法に関して、ゼーセル型イオン  
カメラのスクリーン補正を系統的に行なうロードロー  
ドセルを使用した検出器の良安定性能の測定方法を  
提案した。

(2) セラミックマイクロフィルターを用いた濃粒子検出器  
の検出装置について種々の検討を行なった結果、真  
実検出率条件時の測定を精度よく行なうための最も  
適当な装置として、透過面積が大きく孔径程の小さいコー

## 第7章 結 論

本論文は、ディーゼル排気微粒子を簡易・連続測定する方法の開発を目的として行なった研究の結果について論述し、効率的な計測手法を開発・提案したものである。

まず最初に、希釈・フィルター捕集法の信頼性向上に関する基礎的な研究を行ない、つぎに、基準測定における試験手順の煩雑さを解消し、効率的でしかも簡便な計測手段を提供するための微粒子濃度の簡易・連続測定方法に関して一連の実験を行なった。

さらに、高感度型光透過式スモークメータを応用したインライン式スモークメータにより過渡運転時に使用できる捕集効率測定装置を開発した。

本論文において得られた結果を要約すると、およそ以下の通りである。

### 1. 微粒子処理装置、および予備実験

- (1) 走行抵抗の制御方法に関して、シャシダイナモメータのフリクション補正を自動的に行なうロードロードセッタを使用した効率の良い走行抵抗の設定方法を提示した。
- (2) セラミックアップフィルターを用いた微粒子トラップ装置の捕集性能について種々の検討を行なった結果、低濃度排出条件時の測定を精度良く行なうための排気処理装置として、濾過面積が大きく細孔径の小さいコー

ジライトハニカムタイプの微粒子トラップが適していることを見出した。

- (3) 微粒子トラップの再生条件に関する検討の結果、一度トラップに捕集された微粒子の燃焼が開始する温度は、酸素濃度には殆ど無関係で、ほぼ500~550℃となること。また、燃焼速度は酸素濃度が低いほど遅くなる傾向にあるが、排気中酸素濃度に関しては通常の運転条件の中でほぼ満足されること。しかし燃焼開始に必要な温度は、通常運転の負荷範囲では得られないことが確認された。従って、本研究では補助加熱ヒータ方式を採用して、供試した微粒子トラップを繰り返し再生使用することとした。

## 2. 排気微粒子の重量濃度の測定

- (1) 濾紙重量の秤量精度を向上するためには、捕集用濾紙として耐熱性に勝れ化学的に最も安定な石英繊維濾紙を用い、微粒子捕集前後に温度、湿度の管理された計量室内に濾紙を30min程度放置しておくことが必要である。
- (2) 希釈・フィルター捕集法での最適な微粒子採取条件に関する検討を行なった結果、捕集直後は微粒子の吹き抜け現象により濾紙への捕集が安定しないため、濾紙前後の差圧がほぼ直線的に増加する時期まで採取をつづけることが必要である。
- (3) 捕集時の濾紙面温度が測定濃度に与える影響は非常

に大きいので、測定開始に当たっては、希釈風洞内温度を制御すると同時に濾紙面温度をモニタしておく必要があることを確認した。

(4) 試作した加熱・保温型フィルター捕集装置を用いて濾紙温度変化に関する検討を行なった結果、濾紙温度を一定に制御する対策などにより、採取ガス温度の影響を低減し、フィルター捕集法の測定精度を向上することが可能なことを確認した。

(5) サンプルノズルから微粒子を採取する際の吸引速度の影響に関しては、ディーゼル排気微粒子の粒径が微小なため、風洞内気流速度と吸引速度を等しくする等速吸引を厳守する必要は認められなかった。

(6) これらの検討の結果、当初は±50%近くもあった希釈・フィルター捕集法による測定の繰り返し精度を平均±3~5%程度まで向上させることができた。

(7) 排気微粒子の簡易測定が可能なβ線吸収法、圧電天秤法、および光散乱法を選んで、希釈・フィルター捕集法との比較測定実験を行なった結果、各測定方式とも、定性的にはディーゼル排気微粒子濃度の測定が可能であるが、いずれも希釈・フィルター捕集法との相関が曖昧であり、かつ検出部の汚染が最大のネックとなるので、ディーゼル排気微粒子の測定には実用的でないことが明かとなった。

### 3. 振動天秤法による微粒子濃度の連続測定

- (1) T E O M 装置で得られた計測データの効率的な処理方法を提示し、定常運転時における T E O M 装置の指示する積算重量の差から求めた微粒子重量と精密天秤による秤量結果との比較を行なうことによって、周波数変化から求めた T E O M 指示重量と精密天秤で測定した重量とはほぼ一致することが確かめられた。
- (2) 濾紙温度変化の影響に関しては、濾紙の温度が変化すると、フィルター捕集法と同様に測定濃度は影響を受けるが、その影響は比較的少ないと判断される。また、サンプリング管温度に関しては、その影響は殆どないものと判断された。
- (3) 排気処理装置 ( D P F ) を装着した場合のアイドリング時の微粒子排出濃度は約  $0.3\text{mg}/\text{m}^3$  程度であって、実用的には T E O M 装置の分解能以下の濃度であると考えられる。
- (4) モード運転時の連続測定においては、濃度変化に対して良好な追随性を示すことが分った。また、濃度排出レベルが低い場合には、移動平均時間を長くする必要があり、過渡応答性が犠牲となるが、濃度が高い場合には、実用的にはほぼ十分な過渡応答性の得られることが分った。
- (5) T E O M とフィルター捕集法との比較測定実験により、両者の間には、濾紙温度の相違に起因する測定濃度の差異はあるものの、その相関は良好であり、排気

微粒子の簡易・連続測定装置として、TEOMは有用性の高いものであることが確認された。

#### 4. 光透過法を利用した排気煙濃度の連続測定

- (1) 透過光源の波長の変動は不透過率の測定結果に対して大きな影響を与える。
- (2) ディーゼル排気微粒子の粒径および粒径分布は静電式微粒子分析計 (EAA) により測定することが可能であって、粒径範囲は大凡  $0.01 \sim 1.0 \mu\text{m}$ 、平均粒径は約  $0.2 \mu\text{m}$  程度であることが確認された。
- (3) 光透過式スモークメータにおけるノイズ発生の原因として、光源の温度ドリフトやゆらぎノイズが主なものであることを明らかにした。
- (4) 信号重畳式の3連式スモークメータでは、不透過率  $0.05\%$  までの煙濃度が検出できることを確認した。
- (5) 光路長の増大を図った多重反射式スモークメータでは、信号強度の増大とともにノイズの増加と光軸調整の複雑化が問題となることが分かった。
- (6) 試作した高感度型光透過式スモークメータによってディーゼル排気煙濃度の測定を行なった結果、エンジン回転数と当量比とをパラメータとした等排気煙濃度曲線のマッピングが効率的に行なえるようになった。
- (7) 光透過法と重量濃度測定法との比較試験では、エンジン回転数一定の条件のもとでは両者は良好な相関を示すことが分かった。

- (8) 本研究で開発した光透過法による測定によれば、瞬時濃度の連続的な計測が可能であるほか、振動天秤法やPHS式では不可能であった低濃度域でのデータの入手が容易となった。

## 5. 光透過式スモークメータによる捕集効率の簡易・迅速測定

- (1) 光透過法によるインライン式スモークメータを、DPFの上・下流部に配置することによって、排気微粒子の排出濃度、およびDPF捕集効率を迅速且つ簡便に測定することが可能となった。
- (2) 光透過法で測定した捕集効率は、定常運転時ならびに10モード運転時ともTEOMの結果との間で極めて良好な一致を示すことが確認された。
- (3) 光透過法による濃度、および捕集効率の測定結果から推定した微粒子の捕集重量割合（重量捕集率）は、実際にトラップに捕集された微粒子重量を秤量して求めた重量捕集率の値との間で良好な一致を示すこと、光透過法で求めた捕集効率とフィルター捕集法、および振動天秤法により求めた捕集効率の値とはほぼ一致することなどから、光透過法によるDPF捕集効率の測定方法の妥当性が実証されるとともに、それが十分実用的で有用性の高いものであることが確認された。

引用文献

- (1) 環境庁：“昭和62年度環境白書”（昭 62）
- (2) 中央公害対策審議会：“今後の自動車排出ガス低減対策のあり方について（答申）”（平 1）
- (3) U.S. Environmental Protection Agency：“Control of Air Pollution from New Motor Vehicle and New Motor Vehicle Engines; Gaseous Emission and Particulate Emission Regulations”，Federal Register, Vol.40（1985）
- (4) 財団法人エネルギー総合工学研究所：“軽油の低硫黄化に関する調査報告書”（平 1）
- (5) J.Scott MacDonald and Gerald M. Simon：“Development of a Particulate Trap System for a Heavy-Duty Diesel Engine”，SAE Paper No. 880006（1988）
- (6) O.A.Ludecke and D.L.Dimick：“Diesel Exhaust Particulate Control System Development”，SAE Paper No.830085（1983）
- (7) 吉田耕一，阿部次雄，小高松男，他6名：“ディーゼル自動車有害物質の排出防止技術総合評価手法に関する研究”，昭和61年度環境保全研究成果集（昭 61）

- (8) 環境庁ディーゼル黒煙低減技術評価検討会：“ディーゼル黒煙低減技術に関する報告（中間報告）”  
（昭 61）
- (9) 村山正：“圧縮着火機関の青煙，白煙，におい，内燃機関”，No.162（昭 52）
- (10) 村山正，宮本登，柴田正仁，久保田雅三：“ディーゼル排気中の炭化水素組成について”，自動車技術会論文集，No.14（昭 53）
- (11) 藤原康博，登坂茂，深沢正一：“ディーゼル機関の排気黒煙に関する研究（黒煙粒子の成長・消滅について）”，日本機化学会内燃機関合同シンポジウム講演論文集（昭 54）
- (12) A.Thomas：“Carbon Formation in Flames”，Combustion and Flame, Vol.6（1962）
- (13) D.Broome and E.M.Khan：“The Mechanisms of Soot Release from Combustion of Hydrocarbon Fuels with Particular Reference to the Diesel Engine”，Symposium of the Combustion Engine Group-The Institution of Mechanical Engineers, C140/71（1971）
- (14) H.R.Byers：“Nucleation in the Atmosphere”，Symposium of Industrial and Engineering Chemistry on Nucleation Phenomena,（1965）

- (15) G.Zebel: "Coagulation of Aerosol", Aerosol Science (1966)
- (16) N.J.Khatri, J.H.Jonson, and D.G.Leddy: "The Characterization of the Hydrocarbon and Sulfate Fractions of Diesel Particulate Matter", SAE Paper No.780111 (1978)
- (17) 山根浩二, 近久武美, 宮本登, 村山正: "ディーゼル機関から排出される微粒子及び未燃炭化水素の測定に係わる各種因子の影響", 機械学会論文集, 54巻498号 (昭 63)
- (18) 野村総合研究所: "昭和60年度ディーゼル排出ガス影響調査 (排出実態及び環境大気調査) 報告書" (昭 61)
- (19) 例えば, N.Ishinishi, A.Koizumi, S.O.McClellan, and W.Stober: "TOXED Proceedings Carcinogenic and Mutagenic Effects of Diesel Engine Exhaust, eds.", Elsevier (1986)
- (20) A.Postulka and K.H.Lies: "Chemical Characterization of Particulates from Diesel-Powered Passenger Cars", SAE Paper No.810083 (1981)
- (21) 自動車研究所: "粒子状物質測定法の文献調査 (中間報告)" (昭 62)
- (22) SAE: "Diesel Engine Smoke Measurement", SAE Hand Book J255a (1986)

- (23) JIS D 1101: “自動車用ディーゼルエンジン排気煙濃度測定方法” (1982)
- (24) SAE : Measurement Procedure for Evaluation of Full-Flow, Light Extinction Smokemeter Performance, SAE Hand Book J1157 (1986)
- (25) JIS Z 8808: “排ガス中のダスト濃度の測定方法” (1986)
- (26) “Federal Register” Vol.45, No.45 (1980)
- (27) 平河内信義, 深野泉, 庄司武志: “ミニトンネルによるディーゼルエンジン排気エミッションの測定法” 自動車技術, Vol.40 No.11 (1986)
- (28) 井上恵太, 野口博史, 内田謙一, 森信久: “ディーゼル・パーティキュレートエミッション測定用小型希釈トンネルの開発”, トヨタ技術 Vol.31 No.1 (1981)
- (29) J.Suzuki, H.Yamazaki, Y.Yoshida, and M.Hori: “Development of Dilution MiniTunnel and its Availabiliy for Measuring Diesel Exhaust Particulate Matter”, SAE Paper No.851547 (1985)
- (30) J.A.Harrington and R.A.Yetter: “ Application of a Mini-Dilution Tube in the Study of Fuel Effects on Stratified Charge Engine Emissions and Combustion”, SAE Paper No.811198 (1981)

- (31) J.S. MacDonald, S.L. Plee, J.B. D'Arcy, and R.M. Schrech : "Experimental Measurement of the Independent Effect of Dilution Ratio and Filter Temperature on Diesel Exhaust Particulate Samples" , SAE Paper No.800185 (1980)
- (32) 井上恵太,野口博史,森信久: "ディーゼル・パーティキュレートエミッション計測法について" ,自動車技術 Vol.36, No.11 (1982)
- (33) K.H.Lies, A.Postulka, and H.Gring: "Particulate Emissions from Diesel Engines evaluation of Measurement and Results" , SAE Paper No.830455 (1983)
- (34) R.Whitby, R.Johnson, and R.Gibbs : "Second Generation TEOM Filters Diesel Particulate Mass Comparisons between TEOM and Conventional Filtration Techniques" , SAE Paper No.850403 (1985)
- (35) P.R.Shore and R.D.Cuthbertson, : "Application of a Tapered Element Oscillating Microbalance to Continuous Diesel Particulate Measurement" , SAE Paper No.850405 (1985)
- (36) D.H.Gerke: "Real-Time Measurement of Diesel Particulate Emissions with a Light Extinction Opacity Meter" , SAE Paper No.830183 (1983)

- (37) JIS D 8004: “自動車用ディーゼルエンジン排気煙濃度測定用反射式スモークメータ” (1986)
- (38) 倉林俊雄, 松山龍雄, 柄沢隆夫: “濾紙式スモークメータの読みに及ぼす各種因子の影響”, 自動車技術会論文集, NO.21 (1980)
- (39) A.C. Alkidas: “Relationships Between Smoke Measurements and Particulate Measurements”, SAE Paper No.840412 (1984)
- (40) A.W. Carey: “Steady-State Corelation of Diesel smoke Meters”, SAE Paper No.690492 (1969)
- (41) 井上恵太, 野口博史, 森信久: “ディーゼルパーティキュレートエミッション連続測定法の開発”, トヨタ技術, Vol.32 No.1 (1982)
- (42) D.M. Roessler: “Opacity and Photoacoustic Measurement of Diesel Particulate Mass Emissions”, SAE Paper No.820460 (1982)
- (43) H. Osada, J. Okayama, K. Isida, and O. Saitoh: “Real-time Measurements of Diesel Particulate Emissions by the PAS Method Using a CO<sub>2</sub> Laser”, SAE Paper No.820461 (1982)
- (44) 竹内貴一郎, 石田耕三, 吉原福全: “ディーゼル排出粒子の黒煙の連続測定”, 自動車技術会論文集 No.27 (1983)

- (45) K.Krempf et al: "Dynamic Measurements of Particulate Mass Emission on Light-Duty Diesel Engines under Steady State and Transient Conditions", SAE Paper No.850269 (1985)
- (46) 古林誠,野原常靖,橋口英幸: "ディーゼル機関排気管内における排煙粒子の特性について",第8回燃機関合同シンポジウム講演論文集 (1990)
- (47) 山下憲一,篠山鋭一,嶋田勇,齊藤敬三,篠崎修: "ディーゼル排気による大気汚染防止技術に関する研究",機械技術研究所報告,第133号 (1985)
- (48) 吉田耕一,阿部次雄,小高松男,他6名: "ディーゼル自動車有害物質の排出防止技術総合評価手法に関する研究",昭和60年度環境保全研究成果集 (昭 60)
- (49) 吉田耕一,成沢和幸: "ディーゼル自動車の排出粒子状物質の測定法に関する研究", (第2報) -希釈トンネルを用いた大型ディーゼル粒子状物質の測定法に関する研究-昭和57年度交通安全公害研究所研究発表会講演概要 (昭 57)
- (50) Trend Report Service: "ディーゼル微粒子浄化技術に対するEPAの評価",IRM (U.S.) Inc.(1983)
- (51) 宮武公夫,綱本広之,上坂博二,岡山順二: "ディーゼル排気ガス中のパーティキュレート測定法について",日本機械学会第65期全国大会講演会講演概要集, NO.870-4 (1987)

- (52) 藤原康博：“ディーゼル機関から排出されるすす粒子の粒径分布の測定”，内燃機関 Vol.19 No.236 (1980)
- (53) P.J.Groblicki and C.R.Begeman：“Particle Size Variation in Diesel Car Exhaust”，SAE Paper No.790421 (1979)
- (54) R.Whitby, R.Gibbs, R.Jonson, and B.Hill：“Real Time Diesel Particulate Measurement Using a Tapered Element Oscillating Microbalance”，SAE Paper No.820463 (1982)
- (55) 小竹利明, 今道英治：“ディーゼル黒煙の測定法”自動車技術, Vol.37 NO.11 (1983)
- (56) 文献(36)に同じ。
- (57) 例えば、S.M.Japar and A.C.Szcallat：“Real-Time Measurements of Diesel Vehicle Exhaust Particulate Using Photoacoustic Spectroscopy and Total Light Extinction”，SAE Paper No.811184 (1981)
- (58) 高橋幹二：“基礎エアロゾル工学”，(昭 57)，養賢堂
- (59) k.Kontani and S.Gotoh：“Measurement of Soot in a Diesel Combustion Chamber by Light Extinction Method and In-Cylinder Observation by High-speed Shadowgraphy”，SAE Paper No.831291 (1983)

- (60) H.C.Scherrer, D.B.Kittelson, and D.F.Dolan: "Light Absorption Measurements of Diesel Particulate Matter", SAE Paper No.810181 (1981)
- (61) 文献(52)に同じ。
- (62) 紺谷和夫: "透過光減衰法によるディーゼル火炎内のすす粒子計測に関する研究", 機械技術研究所報告, 第144号 (1988)
- (63) 例えば, D.B. Kittelson, D.F. Dolan, and J.A. Verrant: "Investigation of a Diesel Exhaust Aerosol", SAE Paper No.780109 (1978)
- (64) G.L.Green, D.Wallace: "Correlation Studies of an In-Line, Full-flow Opacimeter", SAE Paper No.801373 (1980)

## 謝 辞

本研究をまとめるに当たっては、北海道大学工学部の村山正教授に、終始懇切なる御指導を賜った。また、同学部谷口博教授、宮本登教授、真田雄三教授には貴重な御助言と御指導を頂いた。これらの諸先生に対して、衷心より謝意を表する次第である。

本研究は、工業技術院機械技術研究所エネルギー部環境技術課における業務の一環として行なったものである。元エネルギー機械部長柳原茂氏、同部前環境技術課長山下憲一氏、および千阪文武課長を初めとする同課の方々には、随時、研究の方針ならびに内容について適切な助言と討論とを頂いた。また、エネルギー部燃焼工学課紺谷和夫課長、および同部環境技術課田中誠主任研究官には、研究の全般にわたり、大局的な御指導を頂いた。また、本報告の最終的な取りまとめ作業に当たっては、物理情報部知識機械工学課主任研究官広瀬武志氏に御助言を頂くとともに、非常勤職員の野口早苗氏に種々作業の協力を頂いた。これらの方々に対して、深甚なる謝意を表したい。

本論文を結ぶにあたり、共同研究者として研究の全般にわたり終始熱心な協力を頂いた、機械技術研究所エネルギー部環境技術課主任研究官篠山鋭一氏、同課研究官篠崎修氏、および同課元主任研究官嶋田勇氏に対して心からの謝辞を呈する。

