

# 排気ガス規制の施行と分析測定技術の進歩

大浦政弘・中村成男\*

## (1) まえがき

国際社会が協力して地球の環境を保全するために、各国で活発に討議したことが報告されているが、これらには単に技術だけの問題ではなく、国家の政治、経済を含む総合施策が適切であってこそ快適な生活環境を維持する事が出来るとされている。

内燃機関、とくに自動車の排気ガス規制の断面からの歴史的過程は、1968年に米国で成立した大気浄化法に基づき、いわゆるマスキー法が成立したことより始まった。当時、それまで高出力と熱効率を主たるテーマとしていた内燃機関の技術者達は、突然自動車が主役になりかつ、効率を犠牲にしても有害物質を減少すべきであるという状況の急変にとまどったものであった。しかし、その問題に直面して優秀な技術者を集め、測定方法を考案して現象を解析し、基礎技術にもどって研究をすすめた自動車メーカは結果として優秀な製品を作り出すことに成功した。すなわち、厳しい規制は極めて難しい技術の実用化を推進し、それに応えられたことがその後の発展につながった。さらに、前述の環境の規制では不十分だとして、現在、極端だといわれるほど厳しい排気ガスの規制が、検討・実施されていることより、また新しい技術が求められている。

ここでは、自動車の排気ガス規制の動向より、常に世界的な規制のリード役である

米国カルフォルニア州の規制を中心に、そこに提起されている難しい課題と、それを乗り越えるための技術的な可能性について述べ、快適な環境作りへの一つの話題提供としたい。

## (2) 自動車排気ガス規制の動向

### 2-1) 各国の規制

1970年代に始まった排気ガス規制は先進各国においては80年代半ばまで暫時その内容を強化して一つの安定期を迎えていた。しかし、近年地球規模の環境問題が大きくなってきたことや、自動車の絶対数の増加により環境の改善が思わしくないことなどより排気ガスの規制強化の動きが再び活発になってきた。とくに、今回の動きは単に規制値を強化するのではなく、規制の対象の拡大、試験・測定条件の見直し、さらに代替燃料の使用の促進なども検討されておりマスキー法の再来とまでうわさをされる状況となっている。

新しい規制への世界の各国の動向をみると、日本では、中央公害審議会が、10年程度先までを見通して、ディーゼル車等のNO<sub>x</sub>およびパーティキュレートの大幅低減を盛り込んだ答申「今後の自動車排出ガス低減対策のあり方」をまとめて環境庁へ提出した。この答申により、去る平成3年3月27日に環境庁は、表1に示すような

\*株式会社 堀場製作所 代表取締役社長・自動車計測システム部長

表1 ディーゼル車への新たな規制値

車種		NO <sub>x</sub> 削減率	粒子状物質	黒煙削減率	適用時期
軽	量車	33%	0.34 g/km	20%	新車 : H5年10月
中量車	直噴式	35%	0.43 g/km		輸入車 : H7年4月
	副室式	0%			
乗用車		—	0.34 g/km	20%	新車 : H6年10月
重量車	直噴式	17%	0.96 g/KWH		輸入車 : H8年4月
	副室式	2%			

ディーゼル車に関する規制を公布した。現在、引き続き新しい規制と具体的な試験法の検討が進められている。

米国においては、環境問題にたいする世論の高まりを背景にブッシュ大統領は12年ぶりに法律の改正を発表し、新しい大気浄化法案を提出した。また、米国上院商業委員会は平成3年3月19日、自動車の燃費を2001年までに40%向上させることなどを義務づけた、メーカー別平均燃費(CAFE)の改正法案を可決している。その他、EPA(米国環境保護局)がガソリン車のパーティキュレートの規制を検討している等の動きもある。一方、米国では州ごとに独自の規制を施行することが許されていることより、スモッグが改善されないカリフォルニア州では、CARB(カリフォルニア州大気資源局)により連邦規制よりはるかに厳しい、世界一厳しいといわれる規制が施行されることになった。

EC諸国では、EC統合に備えて規格の制定・改訂が進められていて、92年以降ではメンバー国が一斉に排気ガス規制の強化を適用する予定である。(1)

以上のように、先進各国では規制強化の動きが、まだ規制が施行されていない国では規制の導入の動きが見られるが一般的な傾向としては

1. 規制値の強化
2. 高速走行モードでの試験の導入

### 3. ディーゼル車のパーティキュレート規制の導入

が共通に認められる。

これらの動きの中には、従来の技術開発の延長線上で解決できる事項もあるが、元来、環境を美しくしたいとのテーマは、これまでのハード技術の展開とは少し異なった、あるべき論が先行するため、まず規制が先に作られそれから技術検討が開始されることがあが少なくない。

#### 2-2) CARBの規制

米国カリフォルニア州では、従来の規制では大気汚染は抑制できないとして、カリフォルニア州大気浄化法を採択し、この法の実行のため次々と厳しい排気ガス規制を制定してきた。この規制は、その検討対象の広さ、厳しさの点で特徴的なものがあるので以下にその一部を紹介する。

##### a) 規制対象機関

排気ガス規制といえば自動車を差すのが常識であつたが、今回は排気を出す機関すべてを対象としているようで、排気量20ccの芝刈機から船舶の大型ディーゼルエンジンまでの規制が検討されている。規制内容はあくまでその時の大気の状態により修正されるとしているが、小型エンジンの電動モータへの転換、電気自動車の製造

命令などの言葉より、CARBの基本姿勢はZEV（排気ガスのない車）を広げることではないかと思えるほどである。現在制定・検討されている規制を表2に示す。

表2. CARBが検討している規制対象

- 1.低排気ガス自動車とクリーン燃料
- 2.自動車の蒸散ガス
- 3.小型汎用エンジン
- 4.オフ・ハイウエーエンジン
- 5.建設・農耕機械用エンジン
- 6.船舶用エンジン
- 7.鉄道機関車用エンジン

b)低排気ガス自動車とクリーン燃料

この規制は、その値が厳しいだけでなく今までの排気ガス規制の概念の枠を越えた新しい考え方が導入されていて、多くの課題を投げかけている。ここでは、その骨子を紹介する。

b-1)LEV規制値

TLEV, LEV, ULEV, ZEV\*との言葉を創造して、各カテゴリごとの規制値を決定している。(2) これらの値を表3に示すが、暫時強化して2000年には、たとえば炭化水素では現行の値の20%に

減少させようとするものである。この表にある、CO（一酸化炭素）、NOx（窒素酸化物）は従来からの規制対象の物質であるが、NMOG（Non-Methane Organic Gases）、ホルムアルデヒドは今回はじめて明記された物質である。

もう一つ、この規制において画期的なことは、1998年以降にZEVすなわち電気自動車の生産が命令されている。これにより、自動車メーカはカルフォルニア州に販売する自動車の2%をZEVとしなければならないこととなった。TLEV, LEVの開発はまだしも、ULEV程度になると現在の燃焼原理での機関の延長として実現出来るのか、何か別途のブレークスルがないと実現出来ないか、ギリギリのレベルであると言われている。

b-2)NMOG

NMOG光化学スモッグの原因となるオゾンの生成に寄与するHC（炭化水素）を規制するための定義である。ガソリンに代表される燃料は種々のHCの混合物であり排気ガスには燃料より複雑な各種のHCが含まれる。図1にインオクタンを燃焼させた時の排気ガスの組成を示すが、単一組成の燃料でも、排気ガスには多くのHCが生成されることがわかる。従来、このHCの規制にはTHC（全炭化水素）との定義があり、FID法（水素炎イオン化分

表3. 低排気ガス自動車の規制値（小型乗用車と小型トラックg/mile）

耐久期間	排気ガソリン	NMOG	CO	NO <sub>x</sub>	ホルムアルデヒド
5万マイル	TLEV	0.125	3.4	0.40	0.015
	LEV	0.075	3.4	0.20	0.015
	ULEV	0.040	1.7	0.20	0.008
10万マイル	TLEV	0.156	4.2	0.55	0.018
	LEV	0.090	4.2	0.25	0.018
	ULEV	0.055	2.1	0.25	0.011

\*LEV: Low Emission Vehicles      TLEV: Transitional Low Emission Vehicles

ULEV: Ultra Low Emission Vehicles      ZEV: Zero Emission Vehicles

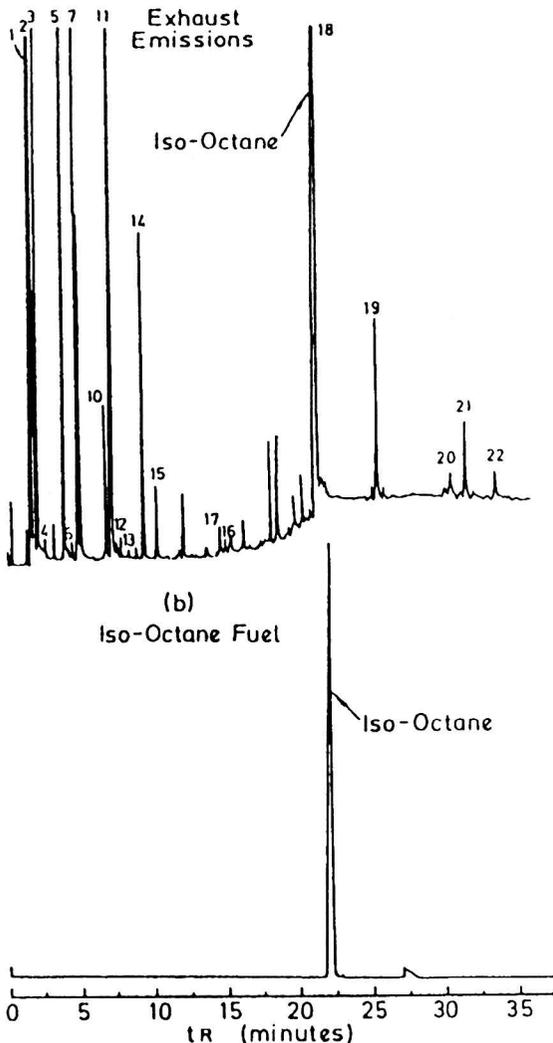
析法) で分析するとメタン、エタン、プロパン等の炭素数に大略比例した炭化水素の濃度の合計が測定されることを利用してこの値をTHC濃度としていた。そして、カルフォルニア州ではTHCよりオゾン生成に影響を与えないメタンを差し引いた、NMHC (Non-Methane Hydrocarbons) にて規制を制定していた。しかし、今回、この考え方ではオゾンの生成能を正しく表していないとの判断から、NMOGにて規制値を決定することになった。

ここでの、NMOGの定義は、「炭素原子12個以下の酸素を含まないメタンを除く炭化水素化合物と炭素数5以下の含酸素炭化水素化合物」であり、この各々の炭化

水素化合物に別途定める各成分ごとのオゾン反応性調整係数をそれぞれに乗じて、その総和が規制値となった。このことより従来はFID法で簡単に求められたHC濃度が、個々の成分に分解して測定する必要が生じた。

### b-3) クリーン燃料、その他

この規制の目的は、あくまで大気の質を良くすることであるが、ここでは単に排気ガスの規制値を厳しくするだけでなく、排気ガスがきれいになるクリーン燃料と呼ばれる代替燃料を採用した自動車を優遇しようとしている点にある。クリーン燃料とし



C <sub>1</sub>	Methane
C <sub>2</sub>	Ethane
	Ethene (ethylene)
	Ethyne (acetylene)
C <sub>3</sub>	Propane
	Propene (propylene)
	Propyne (methyl acetylene)
C <sub>4</sub>	i-Butane (iso-butane)
	n-Butane
	i-Butene
	trans-2-butene
	cis-2-butene
	1-Butene
	1-Butyne (ethyl acetylene)
	1,3-Butadiene
C <sub>5</sub>	n-Pentane
C <sub>6</sub>	n-Hexane
Aromatics	Benzene
	Toluene
	Ethyl benzene
	p- and m-Xylene
	o-Xylene

炭素数の順に並べた各成分と識別番号

図1. イソオクタンを燃料とした時の排気ガス成分のクロマトグラフ(3)

ては、アルコールやCNGなどが考えられているようで、この点よりも、また新たなエンジンの開発が促進され、そして、排気ガスの分析測定技術に対しても新たな課題が設定された。

その他、測定には直接関係はないが、この規制では全ての自動車が1台1台この規制値を下回る必要はなく、ある車の群の平均値が、規制値以下であれば良いとしている。また、その規制平均値を下回った分だけをクレジットとして発行し、このクレジットは他の群あるいは後年に使用することが認められている。規制値が年々厳しくなっていく環境では、早くこのクレジットを手に入れたいのは良く理解できることであり、そのためにも、1日も早く分析測定機器を開発して欲しいとの要求にもつながってきている。

### (3) 排気ガスの測定法

ここで、一般的な排気ガス測定法を紹介

する。排気ガスの規制は排出されるガスの重量値で管理することになっている。ところで、排気管出口でのガスの濃度とその流量が測定できれば問題はないのであるが、実際には温度・圧力・流量が大きく変化する点にてそれを測定することはむづかしい。

そこで、現在は図2に示すように排気の全量を一旦空気にて希釈して、その混合気を一定流量になるように吸引する、CVS (Constant Volume Sampler) 法が採用されている。まず、この定流量の部分より一部のガスをバッグに採取する。次に、走行試験が終了後、このバッグ中の濃度を測定して積算流量と密度を乗じると、その試験で排出された排気ガスの重量が求まる。

ディーゼルのパーティキュレートすなわち粒子状物質は、上記と同様に、空気希釈された後、希釈トンネルといわれる円筒管内を流れるようにして、CVSで吸引す

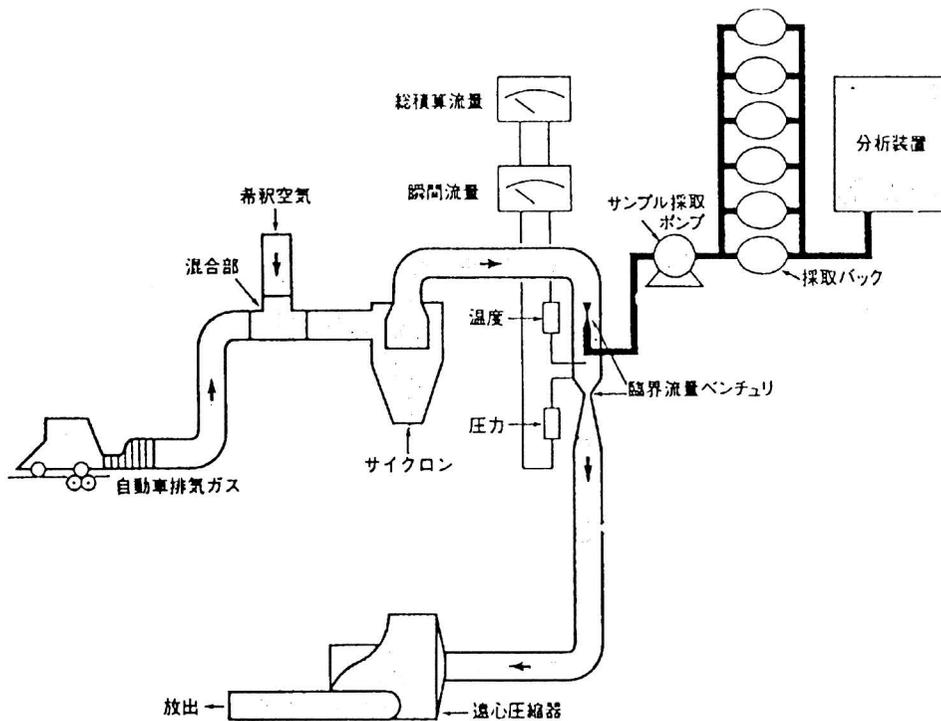


図2. CVS法による排気ガスの測定装置

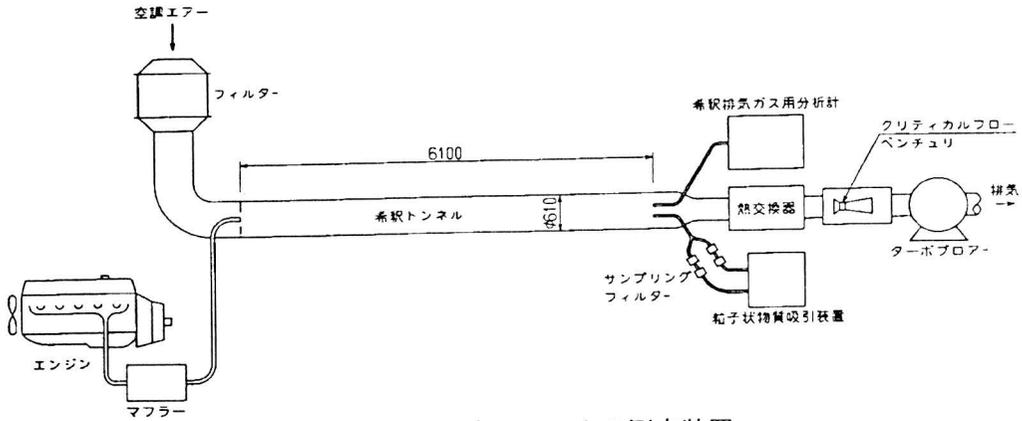


図3 パーティキュレートの測定装置

る構成となっている。この後流より一部をまた吸引して、その中間に位置するフィルタに捕獲される物質の重量をもって管理されている。

#### (4) 排気ガス分析測定への課題と検討

これまで述べられた規制の動向は、規制に合ったエンジンの技術的改良が出来るという保証や、規制に合っているかどうかを評価できる測定技術が既に準備されているものではなかった。今まで述べられた新しい規制の具体的な展開に伴って提起される分析・測定に関する技術的課題について検討してみる。

これらの課題を二つに分類し、一つはサンプリング系に関する課題と、もう一つは分析機器そのものに関する課題とに分けてみる。

##### 4-1) サンプリング系に関する課題

規制の車の Real State に近い状況からの排出規制になってきたこと、一方規制値が現

表4. 環境大気の濃度

	THC	NOX	CO
都市近郊	3-5 ppm	0.05-0.10 ppm	1-5 ppm
それ以外	2 ppm	0.01-0.02 ppm	0.5-1.0 ppm

状の環境濃度以下に決められようとしていることから、サンプリング系に対する条件については相当厳しい検討が必要である。

##### ① 希釈用空気の前製

図2に示したCVSや図3に示した希釈トンネルには大量の希釈用空気が必要であり、この希釈用空気は一般に環境大気から導入されていた。ところが、現状の環境大気には表4に示すような汚染物質が平均的に存在している。一方、ULEVの排気ガス規制からいうと、これらの汚染物質の

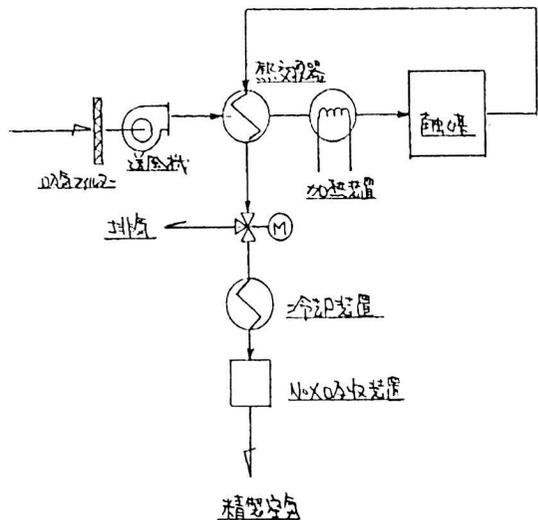


図4. 空気精製機の処理の流れ

レベルは、THCで1.5 ppm、NO<sub>x</sub>で1.8 ppm、COで10 ppm程度であり、汚染物質によっては現状の環境における濃度より低い。このため、ULEVの排気ガス汚染物質を正確に測定するためには、希釈用空気に許容される汚染物質の濃度を、各々THC：0.1 ppm、NO<sub>x</sub>：0.1 ppm、CO：1 ppm程度以下にする必要がある。

この目的で、図4に示すような構成の空気精製装置が提案された。これは、導入された大気を触媒や吸着剤によって精製しようというもので、精製後の汚染物質の濃度は、それぞれの要求濃度以下にできることが確認された。

## ②希釈トンネルの課題

ディーゼルの機関から排されるパーティキュレートの捕集には大流量の希釈空気を導入した図3に示したような全量希釈トンネル（フルトンネル）が使用される。このフルトンネルは、気体が高温になると蒸発成分がフィルタから抜け落ちるためにサンプリング点の温度が規定されている等により装置が余りにも大規模になる為代替手法として大流量の一部を分流した小流量のトンネル（ミニトンネル）が使用されている。このミニトンネルには分流の仕方によって2、3の方法があり、代表的な

例を図5に示したが、いずれも分流比の精度について考察すれば、流路系の圧力制御を適当に実施すれば定常流にある間は殆ど差は認められない。しかし、車が加速減速し排気ガス流量が過渡状態にある時に、分流比がどれだけ安定しているかが今後の課題である。また代替燃料への対応や、低希釈率に関する検討も求められている。

前者は、主としてアルコール燃料が対象であり、この排気ガスが大量の水分を含有して成分測定に対して大きなバックグラウンドとして影響することによる。このような場合に対応して、トンネルの水分を測定してトンネルの希釈率を変化させて水分のバックグラウンドを下げる提案がされている。（Variable Dilution System） 後者は、希釈率を大きくすると測定成分の濃度が薄くなり測定器の測定限界を下回ることがある。この場合、一般に使用されてきたCO<sub>2</sub>ガスをトレーサとして希釈比を求め、これより排気ガスの計算するモーダルマス法では精度が不十分なため、希釈前と希釈後の流量を測定して計算に使用する等の、より高い精度の測定が求められている。

## 4-2) 分析機器の機能上の課題

規制の強化に伴って、従来の分析計の基本的な機能ではカバー出来ない領域が出てきた。

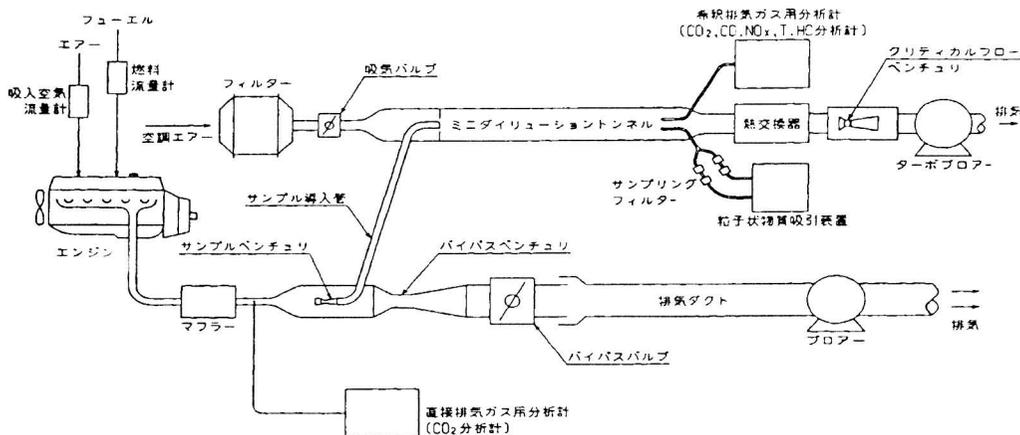


図5. 分流希釈トンネルの構成

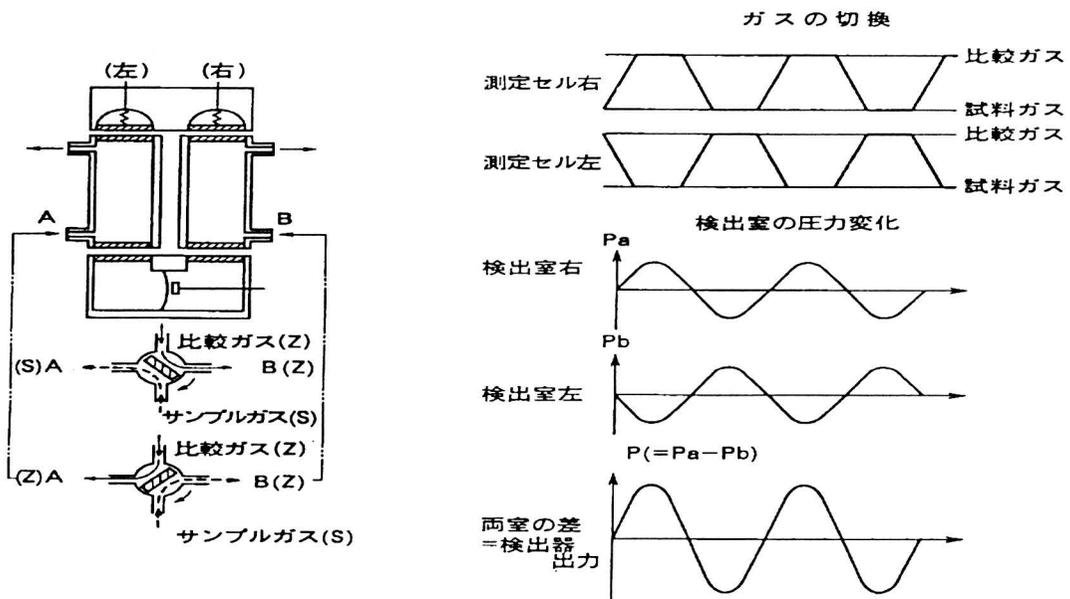


図6 クロスフロ式赤外分析計

①分析計の感度・応答速度について

一般的に言って、分析計は、一般大気環境用として、高感度のものが既に開発されており、現状の規制程度であれば追従出来る。しかし共存成分の影響とか、感度の安定性からみると、図6に示すようなクロスフロ式と呼ばれる特別な構成のものが必要である。これは試料ガスと参照ガスの流路を交互に切り替えることにより変調信号を作り出す方式で、共存成分の干渉影響の低下などの機能向上を実現した。この方式によって、CO<sub>2</sub>濃度で0.1ppm程度の感度を得ることができた。

②炭化水素の分別とアルデヒドの規制

前項のb-2)に述べたように、炭化水素の測定は各成分別に計測する必要が出てきた。これは、これまでのNDIR法（非分散型赤外法）とか、FID法では不可能である。また、アルコール燃料の使用が提起され、この排出物としてアルデヒドの測定も必要となってきた。これらいずれの測

定にも高い分解能をもつ測定機が必要である。

この目的の為に、二つのアプローチがあった。一つはFTIRの適用であり、一つはGC-MS（ガスクロー質量分析計）の適用である。いずれの方法もこれまでは理化学用機器としては使われていたが、これを排気ガス測定用として実用化するためには、応答速度の大幅な改良が必要であった。FTIRについては、従来数十秒であった応答速度を5秒程度迄早くすることが出来たが、光路を短くしたことで感度の低下が考えられ、最低検出感度を各物質について求めているところである。図7にFTIRの構造図、図8に走行試験結果を示すが、多成分の同時測定ができて

いる。一方、さらに高速・高感度を求めて、GC-MSが開発が検討されている。GC-MSは飛行時間分別（TOF）法によるもので、GCは高速カラムを使用するが、これについては未だに開発の緒についたばかりである。

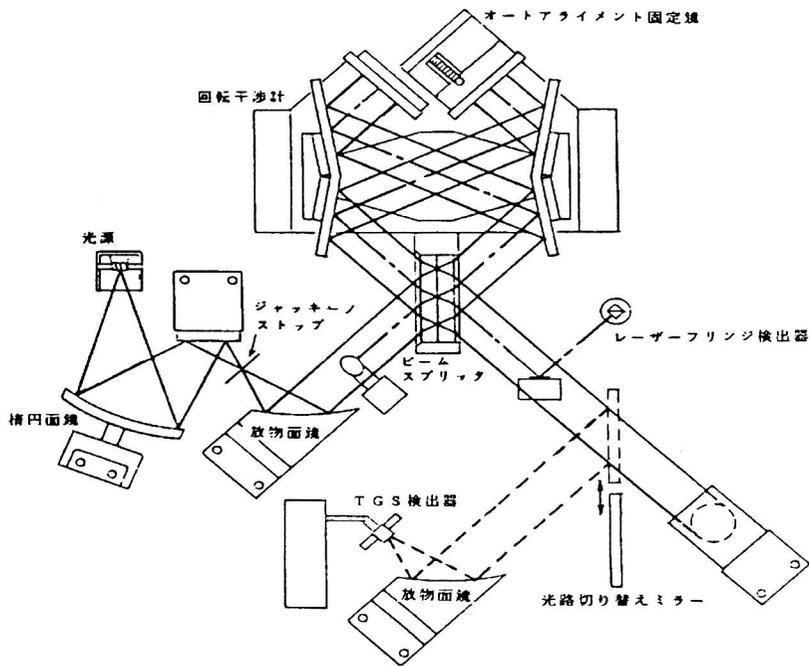


図7. FTIR分析計の構造

MEXA-2000FT (LA4 CT)

CVS 9.0m<sup>3</sup>/min. Gasoline Fueled Car '91.3.20

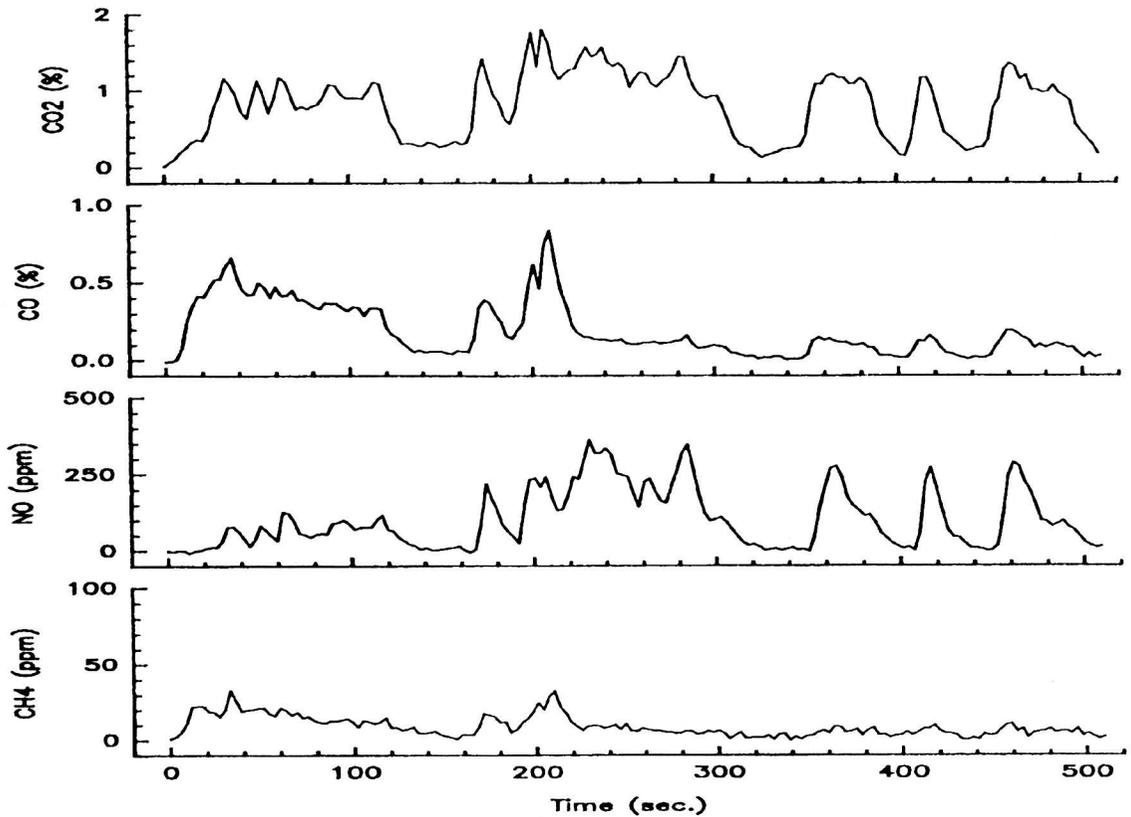


図8. FTIR分析計による測定結果

### ③パーティキュレートの測定

パーティキュレートの測定は濾紙に捕集したパーティキュレートの重量を測ることと規定されている。しかし、この方法では静特性は得られるが、排出の動特性は得られず、エンジンを改良するための指標にならない。このことより、パーティキュレートの動特性を得るために多くの方法が提案されて来た。

#### 1) 濾紙の共振周波数の変化

(MicroBalance) 法

#### 2) 光散乱法

#### 3) 光音響 (Photo Acoustic) 法

#### 4) 燃焼酸化法

#### 5) 圧電天秤法

#### 6) 導電率法

#### 7) 差圧検出法

#### 8) 2波長NDIR法

などが試みられ、重量法との相関がよく、動特性が優れているものが、求められてきた。一応、重量法との相関がいいのは、1)、3)、4)、であるといわれているが、まだ、実用的な面で難点を持つてようである。現状では、4)が重量法との相関が最も良いと考えているが、その原理図を図9に示す。今後、燃焼部を半自動

化することなどを含めて改良を加え実用に供したいと検討している。

#### 5) まとめ

以上、排気ガス規制の動向と分析測定技術の進歩について概要を記したが、これからの規制は日々に厳しくなると考えられ、それに伴う測定技術も何とか追従せざるを得ない。いわば、規制先行型で自動車エンジンの改良技術も測定技術もこれを追っている形となっている。しかし、その命題が地球の環境を良くしようとするものである以上、誰もが努力しなければならず、我々も排気ガスの分析測定技術の進歩が、この命題に対して大いに役立つものと期待して努力するつもりである。

#### 6) 参考文献

- 1) 海野英雄ほか 「年鑑2；自動車と法規」自動車技術 Vol.44, No.7, 1990
- 2) State of California Air Resources Board "Proposed Regulations for Low-Emission Vehicles and Clean Fuels; Technical Support Document" August 13, 1990
- 3) Nicola m. Dempster and Philip R. Shore "An Investigation into the Production of Hydrocarbon Emissions from a Gasoline Engine Tested on Chemically Defined Fuels" SAE 900354 Feb. 1990

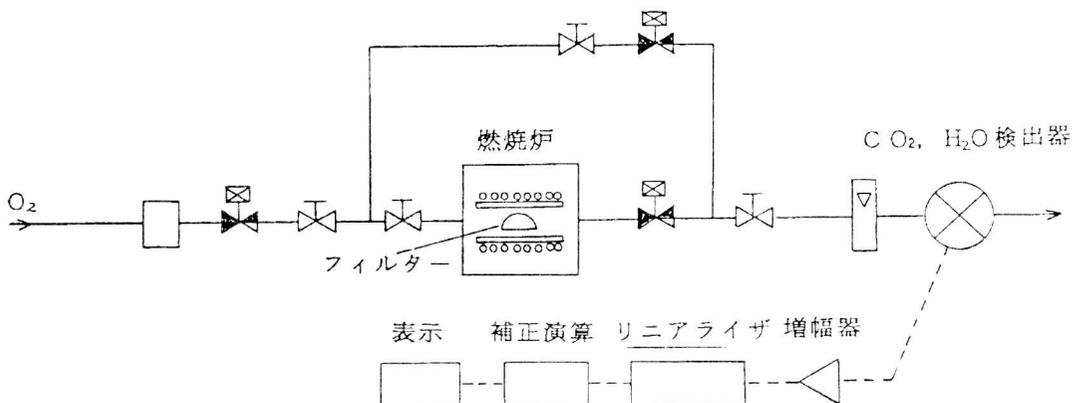


図9. 燃焼酸化法の原理