報 文

走行中の自動車排出ガス流速の連続測定

Experimental Studies on the Continuous Measurements of the Flow

Rate of Exhaust Gas from Running Automobiles

西 田 耕之助 *・奥 沢 将 行 **

ABSTRACT

The methods of continuous measurement of the flow rate of exhaust gas were experimentally examined on driving cars using several instruments based on different principles of the measure, in order to develop the proportional sampling system of the automobile exhaust gas. The results obtained are as follows.

1. The values measured by hot wire anemometer were always slightly larger than those derived from the measurement of the total volume of exhaust gas which was collected into the plastic bags at the exit of tail pipe during 10 sec. on every load of engines.
2. Biram type anemometer method gave values slightly inferior to those by Pite tube method, and former was little influenced by the setting position of the probe. On the other hand the later had a higher sensitivity for the fluctuation of flow rate.
3. The measurements of moisture contents in exhaust gas were done by applying the principle of thermister type psychrometer, Assman type psychrometer and calcium chloride adsorption tube, so as to calculate the gas velocity based on the their density.
4. The measurements of exhaust gas flow rate on idling were carried out by Biram type anemometer, Pite tube and thermister methods, and it was recognized that a considerable differences were observed between the data by Biram and Pito methods, and this would be brought about by the difference of measuring point.
5. Applying these methods, the flow rates of exhaust gas of the test cars were measured on city road driving. And it seemed that the Biram type anemometer was the most suitable to the measurement of flow rate of automobile exhaust gas which are emitting successively with large fluctuation.

要 旨

自動車排出ガスのプロポーショナルサンプリングシステムを開発するために、排出ガス流量の連続測定方について、測定原理の異なる方法を用いて実験的に検討した。その結果、熱線風速計を用いた場合には、エンジンの各負荷について、10秒間のバッグサンプリングによる絶対排出量に比べてやや大きい値を示した。

ビラム法は、ピトー管法よりもやや低い値を示すものの、検出器の設置位置による影響が小さい。ピトー管法は排出ガスの流速変動に対する追従性が優れている。また、排出ガスの密度を連続的に測定するために、サーミスター法、アスマン法および塩カル法を用いて検討した。

実験車のアイドル時について、上記の3法による排出ガス量の測定結果を比較したところ、これらの測定値の間にはかなりの相違がみられ、その大きな原因に各法の検知部の設置位置による影響が挙げられた。ついで、これらの測定装置を取り付けた自動車を用いて、実際の都市道路の走行中に排出される排気ガス量の連続測定を行ったところ、ビラム法を用いた場合に排出ガスの流量変動に最もよく追従した測定結果が得られた。

* 京都大学工学部附属環境微量汚染制御実験施設 助教授 Konosuke NISHIDA
** Masayuki OKUZAWA

昭和62年8月30日受理

はじめに

現在、自動車から排出される汚染物質の排出係数 (g/km) は、10および11モード (軽量車)、6モード (重量車) の走行パターンをシャーシダイナモ上で再現し、その排出ガスをCVS法で採取した排出ガスの濃度分析から求められている¹⁾。しかし、走行パターンの代表性²⁾、シャーシダイナモ上での実走行の再現性などから、排出係数の現実性に大きな疑問³⁾がもたれたまま、安易に環境アセスメントでの原単位に用いられている。また、CVS法では走行速度の遷移条件に対する排出ガス流量と組成の変化が考慮されておらず、測定される排出ガスは実走行中のそれと対応していない⁴⁾。そこで、実走行中の自動車から直接に排出ガスを採取、測定することが必要で⁵⁾、比例採取法、すなわち排出ガス流量の変化に比例して採取するプロポーションナルサンプリング法が提唱^{6,7)}されたが、それらは排出ガス流量をエンジンの吸気量で代替えたことによる問題点が残された。

そこで、プロポーションナルサンプリング法での最大の問題点となる排出ガス流量の連続測定法について検討した。すなわち、直接に排気口で流量を測定するもので、運転条件の変化に対応した排出ガス流量を連続的にとらえ、実際の道路走行での排出係数を求めようとするものである。

1. 実験方法

走行中の排出ガスの流量原価の連続測定においては、排出ガスの温度に対する補正および流速変動の追従性が重要となることから、①熱線風速計 (以下熱線法)、②微差圧計を用いたピトー管 (以下ピトー管法) および③ピラム式風速計 (以下ピラム法) の適用性について検討した。①はガス温度と水分で大きな影響を受け、②では排出ガスの密度変化、また③は機械的に測定できるが、ダストなどの影響が問題となる。そこで、排出ガス密度の連続測定から、これらの測定法の比較検討と行った。また、アイドル時のエンジン回転数による排出ガス流量の変化ならびに実際走行での測定から、その実用性を実験的に検討した。

1) 実験車

A車; 三菱コルトギャラン (A-52), 4サイクル,
1,490cc, 45年型, 既走行距離107,000km

B車; トヨタセリカ (TA-20), サイクル, 1,400
cc, 48年型, 既走行距離22,000km

C車; マツダグランドファミリア (SU-4A),
4サイクル, 1,490cc, 48年型, 既走行距離
100,000km

D車; 三菱ミニカ (A-103), 2サイクル, 360cc,
48年型, 既走行距離48,000km

E車; 三菱ギャランシグマ (CA-123), 4サイク
ル, 1,990cc, 51年型, 既走行距離45,000km

2) 運転条件

通常の都市走行でのエンジン回転数は、3,000rpm以下であることから、回転数は500~3,000rpmとした。すなわち、十分なウォームアップののち、アイドル時の500~1,000rpm, 1,000, 1,500, 2,000, 2,500および3,000rpmで測定した。

3) 測定方法の検討

(1) 熱線法

排気管出口に熱線風速計 (AM-B11, 日本化学工業) を固定したパイプ (ステンレス製, 100mm×長さ500mm) を取り付け、水銀温度計で排出ガス温度を測定した。熱線風速計の受感部は感風熱電対と風温補正用の熱電対が直列同行に接続され、風温の自動補正機構をもち、風温250℃まで測定可能である。

(2) 排出ガスの絶対流量

排気管の出口にポリエステルバッグ (100l) を取り付けて、10秒間排出ガスを採取し、その全量から流量を求めた。

(3) 熱線法をピトー管法による測定

排気管の出口で熱線法とピトー管法で同時に測定した。ピトー管差圧は傾斜マノメータで読み、流速に換算した。

(4) 熱線法とピラム法による測定

熱線風速計とピラム式風速計 (MT112) を排気管出口に取り付けて、測定値を比較した。ピラム式風速計は、風速変化に応じて交流電圧 (0~8V) を出力し、指示計に風速値として示す。

(5) ピラム法とピトー管法による測定

ピラム法とピトー管法の測定結果を、熱線法の値との相関性から検討した。まず、風量変化に対する応答遅れと流速値を検討した。パイプ (長さ300mm, 内径100mm) に熱線風速計のセンサー、ピトー管、ピラム式風速計を固定し、パイプの先端のプロアの風量を段階的に調節した。ピトー管は微差圧計 (21DPT2200) から、空気圧-電流変換器 (40PCT1000) を通して差圧を、また、ピラム式風速計の出力電圧、および熱線風速計の出力電圧をそれぞれペンレコーダー (300

mm/mm)で記録した。ブローの風量は熱線風速計の指示値で1~5 m/sとし、レコーダーのチャートから応答遅れと流速値を求めた。

4) 排出ガス分析

排出ガス組成とガス密度の関係をj知るために、アイドル時のエンジンの回転数を変えてガス濃度(CO, HC, CO₂, NO_x)を測定した。排出ガス中のCOは柳本非分散型赤外分析計(NDIR, EP4-11F), HCは島津全炭化水素計(FIA, HCM-1A), NO_xは窒素酸化物自動測定記録装置(MODEL-258 紀本), CO₂とN₂はガスクロマトグラフ(G80柳本, 検出器TCD, Molecular sieve 5 Aおよび活性炭カラム)で分析した。

5) サーミスタ温度計法(以下サーミスタ法)による水分量測定

サーミスタ温度計は応答速度が速く、出力の取り出しが容易であることから、排出ガスの水分量の連続測定に適用することを検討した。すなわち、2台のサーミスタ温度計の一方を乾球センサー、他方を湿球センサーとし、それらの指示値から絶対湿度を求め、水分量を算定する。

(1) アスман温湿度計(以下アスман法)による検定
フラスコ内で蒸発した水蒸気をブローで送入した乾燥空気と混合ののち、排出口でサーミスタ温度計とアスман温湿度計で測定し、両者の結果を比較した。

(2) 塩化カルシウム法(以下塩カル法)による検定
サーミスタ法の値を絶対量測定⁸⁾による値と比較した。湿り空気の発生は上記と同様で、塩化カルシウム吸収筒(2~3 g, 60mmL×10mmid, 通気1 l/min)を通して水分を吸収させた。また、テープヒーターでパイプ内の排出空気温度を変えた場合についても測定した。

(3) 排出ガス中の水分量

実際に自動車の排出ガスをサーミスタ法による測定値と塩カル法による絶対水分量測定の結果と比較検討した。

6) アイドル時での測定

停車中の自動車のエンジンの回転数を変えた場合について、ビラム法とピトー管法での値を比較した。排出ガスの水分量はサーミスタ法で測定した。すなわち、排気管に取り付けたパイプ(300mmL×110mmid)にサーミスタの乾球センサーと湿球センサー、ピトー管およびビラム式風速計を固定する。ピトー管の静圧側、動圧側接続部には微差圧計の導管をつかぎ、タンクから常時清浄空気を送り、差圧となる空気圧を空電変換器からの電流値で記録した。

図-1 走行実験装置のフローシート

7) 走行実験

ビラム法とピトー管法で、実際に走行中の自動車の排出ガス流量を連続的に測定した。装置のフローシートは図-1に示す。流速および差圧の出力電圧は、データレコーダー(R61, TEAC)に記録し、サーミスタ温度計の出力電圧はペンレコーダーに記録した。また、これらの計器の電源として小型発電機(ホンダE II 300, 交流電圧100V, 300VA)を車内に積んだ。実験車の車速10, 20, 30, 40, および50km/hの定速条件で、排出ガス流量の1分間測定を行い、ついで、実際の道路走行時について連続測定を行った。

2. 実験結果ならびに考察

1) 測定方法の比較

(1) 排出ガス流量

アイドル時(エンジン回転数600~3,000rpm)の排出ガスの流量(0℃, 1 atm)を熱線法で測定した結果(平均値, n=10)を図-2に示す。

実際の走行時における停車状態、すなわちエンジンの無負荷時での排出ガスの排出量は回転数600rpmでA車がほぼ18 l/sec(7.5 l/sec), B車がほぼ12 l/sec(7.3 l/sec), また、C車が1,000rpmでほぼ8.2 l/sec(6 l/sec)で、D車は1,000rpmで7.6 l/sec

図-2 アイドル時のエンジン回転数と排出ガス流量(熱線法)

(16.6 l/sec)を示した。ここで、()内の値は、それぞれエンジン気筒容積に4サイクルエンジンでは回転数の $\frac{1}{2}$ を、2サイクルエンジンでは回転数を乗じた理論排気量である。

各車とも排出ガス量は理論排気量を大きく下回っており、A、D車では約4割、B、C車では約6～7割となっており、これらの実験車はいずれもアイドル時の吸気系の作動不良による混合気の調整不良が生じているものと考えられた。

実験車B、D、E車ではアイドル状態でエンジンの回転数の上昇とともに排出ガス量は増大するが、A車とC車にはこのような傾向がみられない。これらの両車では回転数の上昇に対応して供給される混合気の量、あるいは燃料量の制御機構の調整不良や吸入空気量制御の不良が原因していると考えられた。

一方、排気管の出口で排出ガスの全量を10秒間採取して求めた排出ガスの流量は、B車で6.6～7.0 l/secで同時に熱線法による測定から求めた流量は8.3 l/secとやや大きく、これは熱線法が排出ガス流の中心流速の測定となることによるものと考えられる。

(2) 測定方法による排出ガス流速の比較

ピトー管法およびピラム法を熱線法と組み合わせて排気管の出口に取り付けて、排出ガス流量の測定を行い、測定法の違いによる測定結果について検討した。すなわち、実験車Aについてはピトー管法と熱線法で、またB車については熱線法とピラム法で、いずれもアイドル時でエンジンの回転数を変えた場合について測定した。その結果は図-3の通りで、ピトー管法での

排出ガス密度は 1.29 kg/m^3 とした。

A車では回転数2,000rpm以下での流速変動が大きく、排出ガス流量と回転数の間に対応関係がみられない。これは、A車の吸気系の作動不良による中速回転での息つき現象が生じているものと考えられる。また、1,500rpm以下での排出ガス流速値はピトー管法との間に大差はみられない。しかし、2,000rpm以上では、ピトー管法による値が回転数の上昇に対応して大きく増大するのに対して、熱線法での値は1,500rpmから大きく低下する結果となっている。エンジンが高速回転になると排出ガスの流速も大きくなり、排気系に推積、付着しているダストが剥離して流出し、それらが熱線風速系のセンサーに付着すること、また、高速回転時には排出ガスが300℃以上の高温となることや、排出ガス中に含まれる多量の水分による影響と考えられる。このことは、実際の道路走行中の排出ガス量の測定に対して熱線法の採用は非常に不利であることを示している。

一方、B車での測定では、エンジンの回転数の上昇につれて熱線法とピラム法の両者とも排出ガス流量はほぼ同様の増大傾向を示しているが、熱線法が回転数について約15～30%大きい値を示している。この場合の両者の差は、測定装置の取り付け位置の差、ならびに熱線法は排出ガスの中心流速の測定となることが原因しているものと考えられる。

(3) ピラム式風速系とピトー管による測定の比較

乾燥清浄空気($\text{N}_2 79\%$, $\text{O}_2 21\%$)を用いてピラム法およびピトー管法によるガス流速の測定値と熱線法による値との関係を検討した結果は図-4の通りである。ピラム法による値はピトー管法による値よりも常に大きい値を示し、両者とも熱線風速計の指示値との間に直線関係を示さない。また、熱線法の指示値に対してガス流速が $1 \sim 5 \text{ m/sec}$ ではピトー管法が約20～40%小さい値を示し、装置の取り付け位置が影響しているものと考えられた。これに対してピラム法による値は、ガス流速 $2 \sim 3.5 \text{ m/sec}$ で約11～20%、 $3.6 \sim 5.1 \text{ m/sec}$ で約30～45%といずれも熱線法による指示値よりも大きい値となっている。

さらに、ピラム法による値とピトー管法による値との関係をみると図-4(b)のように、両者の間にきわめて高い相関関係($r=0.999$)が得られた。ピラム法では回転羽根の慣性による影響で測定値が大きくなるものと考えられる。これに対してピトー管法は熱線法よりもやや低い値となっているが、排気管から連続的

図-3 測定法による排出ガス流速の比較

図-4 測定法による流速値の関係

に変化しながら排出される排出ガスの流速のほぼ的確な測定が可能と考えられた。

つぎに、各測定法について、乾燥ガスの流速が定常時に指示値が一定となるまでの時間、すなわち、応答時間を測定した結果は表1の通りである。測定は、ダクト内に各測定装置を取り付けておき、ダクト内へ送入する空気の流れを低速度から一定の高速度に、あるいは高速から一定の低速度に設定した場合にそれぞれの指示値が定常に達するまでに要する時間を出力記録紙上（紙送り速度150mm/min）から読みとった。なお、一定流速値は、送気ブロアーの回転数をスライダックによる電圧制御とその際の流速を予め測定しておくことで設定した。表からみられるように、微差圧計を用いたビトー管法の応答がもっとも早く、ビラム法の応答がもっとも遅い。ただし、上昇および下降は

表1 Time log の平均値の比較 単位:sec

熱線風速計による流速 (m/s)	熱線風速計		ビラム式風速計		ビトー管	
	上昇	下降	上昇	下降	上昇	下降
1.24	5.79	18.86	6.86	23.14	4.29	9.86
2.04	12.25	23.50	12.25	28.00	9.50	13.75
3.10	13.00	28.75	14.75	32.50	11.25	20.50
3.98	15.90	32.40	17.40	35.40	14.70	23.10
5.00	15.00	35.10	17.40	38.10	14.40	20.70

それぞれその流速値に達するまでの時間、およびその流速値から流速ゼロまでの時間であるが、この応答時間にはブロアの応答遅れの時間も含まれている。以上のことから、測定値の応答速度ではビトー管法、平均流速あるいは操作の容易さではビラム法が自動車の排出ガスの流速測定に適當であると考えられた。

2) 排出ガスの分析

排出ガス流量の測定時に排気管の出口において採取した排出ガス中のCO、HCおよびNO_x濃度の測定を行った。その結果から、実験車Bについてエンジンの回転数と成分濃度の関係を図-5に示す。

(1) CO濃度

走行停止時の600rpmでCO濃度は各車とも1%以下で、エンジンの回転数とCO濃度の変化傾向は各車ともほぼ同様である。すなわち、B車では回転数が600rpmから200rpmの範囲では濃度が0.98%から0.17%と大きく減少するが、2,000rpmをこえるとやや増大(0.27%)し、他の実験車(c)では0.5%に達した。一般に¹⁰⁾、アイドルでの空燃比は理論比より過濃で、供給混合気の不完全燃焼によりCO、HC濃度が大となり、エンジンの回転数が上昇すると空燃比も大きくなり、最大出力付近で理論混合比（ほぼ15:1）近くになり、排出ガス中のCOおよびHC濃度が最低となる。

また、本測定のように、エンジンの無負荷時（アイドル）に回転数のみを大きく上昇させると、シリンダー内のピストンの上下運動に対するフライホイールの慣性力の影響などにより吸気系や燃料供給系の作動遅れが生じ、シリンダーの新気吸入効率が大きく低下し、混合気の燃焼が不完全になることから、排出ガス中のCOやHC濃度の上昇をもたらす。

(2) HC濃度

エンジンの回転数2,000rpm以下では回転数の上昇

図-5 排出ガス分析 (B車)

につれてB車の場合で1,400ppmから1,060ppmに減少し、他車の場合でも同様に、約1500ppmから約600ppm程度に低下した。しかし、回転数がさらに上昇するとHC濃度が上昇する傾向を示し、B車では2,500rpmで1,800ppmと大幅な上昇を示した。これらの原因にはCOの場合と同様のことが挙げられる。

(3) NO_x濃度

エンジンの回転数の上昇につれて、各車とも約20～30ppmから上昇し、2,500rpmで4サイクル車で約200ppm、2サイクル車で約100ppmに達した。一般に、ガソリンエンジンの排出ガス中のNO_x濃度¹¹⁾は空燃比が大きく影響し、濃混合気では、O₂不足と低い燃焼温度でNO発生が少なく、NO_x濃度も低い。このサーマルNO_xは回転数の上昇、すなわち、シリンダー内の燃焼温度の上昇、および供給混合気の空燃比の低下とともに急増し、理論混合比を超えた空気過剰で最大出力時にピークに達する。

今回、実験に使用した各車とも、従来から報じられている値^{12,13,14)}に比べてかなり高いNO_x濃度を示している。これらの実験車はいずれも法定の車検整備から約0.5～1年を経過した状態であり、実際に都市域を走行している中古車では、排出ガス規制¹³⁾にもとづく排出基準濃度が維持されていないことを示している。

(4) CO₂およびN₂濃度

排出ガス中のCO₂濃度は供給燃料の燃焼状態を表わしており、今回の実験車ではエンジンの回転数の上昇とともにほぼ5～7%から9%に上昇した。ただし、実験車Dでは回転数に関係なく、ほぼ8～9%を示した。一方、排出ガス中のN₂濃度は各車とも1,000～2,500rpmで、80～85%と大きな変化がない。

以上の排出ガス中のNO_x、CO₂およびN₂濃度の測定結果から各車とも各回転条件における供給混合気やや希薄側、すなわち燃焼不足気味となっており、その原因として燃料供給系の作動不良が考えられる。

3) 水分量測定法の検討

(1) アスマン法により検定

通常、乾・湿球の温度指示値からガス中の水分量は次のように求められる。すなわち、蒸気圧から乾燥空気1kgに対応する水蒸気量である混合比を求めて水分量に換算する。蒸気圧 e (mb)は、次式より求められる⁸⁾。

$$e = e'_s - K P (t - t') \quad (1)$$

e'_s : 湿球温度の飽和蒸気圧 (mb)

K : 乾湿計定数 (アスマン0.00066, サーミス

タ0.00080)

P : 圧力 (mb)

t : 乾球温度 (°C)

t' : 湿球温度 (°C)

ただし、本実験で圧力 P は一定 (1,007mb)

また、サーミスタ温度計の乾湿計定数は、簡易温度⁸⁾の値を用いた。蒸気圧より混合比 r (g/kg-乾燥空気)は次式で求められる。

$$r = \frac{0.622 e}{P - e} \times 1,000 \quad (2)$$

ただし、定数0.622は乾燥空気に対する水蒸気の比重

結局、水分量 X_w (%)は次式で得られる。

$$X_w = \frac{1.24 r \times 100}{771.93 + 1.24 r} \quad (3)$$

実際に排出ガス中の水分量を測定した結果について、アスマン法 (Y_w %)とサーミスタ法 (X_w %)の関係をみると図-6に示すように、両者の間にかなり高い相関関係 ($r=0.881$)が認められた。しかし、両法の値には1:1の対応関係がなく、図中に示すように回帰直線の回帰係数は約0.6と小さく、サーミスタ法ではアスマン法での1.2%以下の測定値が得られない。

また、アスマン法はサーミスタ法にくらべて測定値のバラツキが大きく、かつ指示値の安定化時間、すなわち応答時間がかかなり大きいことから、自動車の排出ガスのように燃焼状態が刻々変化し、それにとまって排出ガス中の水分量も大きく変化する場合の連続測定には、サーミスタ法の利用が有効であり、かつ排出ガス密度の算出に対して、実用上、十分な精度が得られるものと考えられた。

(2) 塩カル法による検定

ガス中の水分を塩化カルシウム (CaCl₂) に吸収す

図-6 アスマン温湿度計による検定

る方法で、サーミスタ法を用いた場合の測定値と比較した。塩カル法による水分量 Z_w (%) は、吸収水分の重量 m (g)、乾燥空気量 V (l)、ガス温度 θ (°C) から次式で求められる。

$$Z_w = \frac{1.24m \times 100}{V \times \frac{273}{273 + \theta} + 1.24m} \quad (4)$$

ただし、圧力項は無視

実際の排出ガスについて測定した結果から、塩カル法による値 (Z_w %) と同時に測定したサーミスタ法による値 (X_w %) の関係を示す図-7の通りである。両者の間には、大まかな直線関係がみられ、回帰直線の相関係数は $r = 0.675$ を示した。また、測定値のバラツキも大きいことから、95%信頼区間を t 検定により求めると、 Z_w と X_w についての95%信頼区間は図中に示す通りで、その値は

$$\frac{0.598X_w + 1.463 + 2.01 \times 0.107 + 0.09(X_w - 11.809)^2}{11.809} < Z_w < \frac{0.598X_w + 1.463 + 2.01 \times 0.107 + 0.09(X_w - 11.809)^2}{11.809}$$

となり、標準誤差 S は2.34%を示したが、図にみられるように、かなりの実測値がこの区間外まで散らばっていることが認められる。

塩カル法での水分量測定は、排出ガス中の水分の絶対量の直接測定ができる利点をもつが、吸湿剤の塩化カルシウムの飽和吸収量、吸収効率、吸収速度、さらには測定対象ガスの吸収層通過速度および通過量などの要因によって測定結果に大きなバラツキが生じるものと考えられる。

以上の本測定の結果から、サーミスタ法は、水分量の絶対測定である塩カル法との間にほぼ直線関係を示すこと、ならびに非常に速い応答性をもつサーミスタ法により排出ガス中の水分量の連続測定を行い、図-

図-7 塩化カルシウムによる検定

7の関係を用いて絶対水分量へ換算することに大過はないと考えられた。

4) 排出ガス密度の算定方法

現在のところ、自動車の走行状態、すなわちエンジンの負荷条件の変動に応じて連続的に変化する排出ガスの密度に対する連続測定法は未確立である。そこで、本研究では応答速度の速いサーミスタ法を適用して排出ガス中の水分量の連続測定から排出ガス密度を求める方法を考案した。すなわち、排出ガスの成分分析から N_2 がエンジンの回転数により大きな変動を示さないために、 N_2 、 CO_2 および水分量をパラメータに排出ガス密度を算出した。アイドル時にはエンジンの回転数 N (rpm) をパラメータに CO_2 を一次回帰して求め、 N_2 は平均値を用いた。それらの結果の例を示すと次の通りである。

(1) A車; N_2 = 85.85, CO_2 = 6.99

$$CO_2 = 0.0035N + 0.76 \quad (r = 0.948)$$

(2) B車; N_2 = 84.57, CO_2 = 8.57

なお、アイドル時の CO_2 はエンジン回転数によらず、ほぼ5~9%であることがアイドル実験については平均値を用いた。

(3) C車; N_2 = 80.95

$$CO_2 = 0.0026N + 3.04 \quad (r = 0.735)$$

なお、実験車の路上走行実験については排出ガスの分析から得られた CO_2 の平均値を用いて排出ガス密度を求めた。すなわち、排出ガス密度 γ (kg/m³) は水分量を X_w 、排出ガス温度を t °C とする次式で得られる。

$$\gamma = \frac{\frac{CO_2(\%)}{100} \times 44 + \frac{N_2(\%)}{100} \times 28 + \frac{100 - CO_2(\%) - N_2(\%) - X_w}{100} \times 32 + \frac{X_w}{100} \times 18}{22.4 \times \frac{273 + t}{273}} \quad (5)$$

5) アイドル時の排出ガス流量

実験車の走行停止状態、すなわちアイドル時に測定した排出ガスの流量をエンジンの回転数について示すと図-8のとおりで、図には実験車A, B, C車について、ピトー管法とビラム法による結果を示す。また、同時に測定した排出ガス中の水分量および算定排出ガス密度の成績は表2に示す。図中には実験車A, B, Cのシリンダー容積を1.5lとして算出した理論排気量を示す。

ビラム法とピトー管法による値は、いずれもエンジンの回転数の上昇につれて増大するが、ビラム法による値の増加傾向がやや小さく、ピトー管法による値は

図-8 アイドル実験結果-排出ガス流量-

表2 アイドル時の排出ガス中の水分量とガス密度(平均)
(n=10)

実験車	A		B		C	
エンジン回転数 (rpm)	水分量 (%)	排出ガス密度 (kg/m³)	水分量 (%)	排出ガス密度 (kg/m³)	水分量 (%)	排出ガス密度 (kg/m³)
750					3.43	1.098
800					4.92	1.064
900	8.18	0.998				
950	8.41	1.034				
1000	7.97	1.010	6.95	1.133	4.39	1.088
1500	8.26	1.040	7.00	1.125	4.21	1.059
2000	8.69	0.999	7.67	1.102	4.43	1.046
2500	8.86	0.939	8.46	1.090	4.87	1.039
3000	9.44	0.885	9.03	1.069	5.45	1.018

理論排気量線とはほぼ同様の増加傾向を示す。

アイドル時の排出ガス流量は回転数600～2,500rpmで、ピラム法による値ではA車8～20 l/sec, B車6～17 l/sec, C車7～13 l/secで、ピトー管法による値ではA車20～30 l/sec, B車10～46 l/sec, C車28～45 l/secを示した。

ピトー管法による値に対してピラム法による値は実験車Aで22～31% (平均25%), B車で43～66% (平均53%), C車で28～61% (平均42%)と、いずれもかなり小さい値を示している。

各回転数について理論排気量に対する比率を求めると、ピトー管法の値は、C車の低回転、およびA車の高回転の場合を除いて、ほぼ1.2～1.8となり、シリンダー内に吸入された混合気中の燃料の燃焼による体積増加を考えるとほぼ妥当な値を示しているものと考えられる。

また、実験車AおよびCの場合にみられるように、回転数の増加に対して、ピトー管法による値は大きく変動を示すが、同時に測定しているピラム法での値の

変動性はさほど大きくない。このことは、前述のように、ピトー管法では排出ガス流の中心流速の測定で流速変動が大きく現われ¹⁵⁾、ピラム法では回転羽根の慣性による流速変動への追従遅れが原因しているものと考えられ、車体振動の影響も考えられるが、これらについては今後の検討が必要である。

エンジンの回転数の上昇につれて排出ガス流量が増大するが、同時にピラム法による値とピトー管法による値との差も大きくなっている原因の一つに次のことが考えられる。すなわち、低流速(流量)では中心流速と平均流速の差が小さく、高流速(流量)になるにつれて、その差がより大きくなることである。

なお、ピトー管法とピラム法による値との差についてはされに検討が必要であるが、今回の検討から、自動車の排出ガス流量をエンジン条件の変化に追従してほぼ把握できることが明らかになった。

また、シリンダー容積が1.5 lの実験車について、アイドル時の排出ガス中の水分量とガス密度は表2に示すように、エンジンの回転数が上昇するにつれて、混合気の燃焼効率の向上¹⁶⁾によって水分量は増大し、ガス密度は逆に低下する。実験車A, Bでは排出ガス中の水分量は約7～9%と大差がない。実験車Cでは約3～5%とほぼ1/2と小さく、この原因については、各車の混合気吸入率、燃焼効率、供給混合気の空燃比の相違などが考えられるが、詳細については今後の検討が必要である。しかしながら、各車とも排出ガス密度は0.99～1.1 kg/m³で、通常の空気での値(1.29 kg/m³)よりもやや小さく、エンジンの回転数による大きな変化がない。

6) 走行実験

実験車(A車)に前述の排出ガス流量測定装置を取り付け、実際の道路で10～50 km/hの定速走行および通常の走行を行った場合について、排出ガスの排出量を測定した。定速走行では12秒ごと、また、実走行では10秒ごとに水分量、排出ガスの密度と流量を測定した。その結果から、定速走行での速度条件と排出ガス流量の関係を示すと図-9(a)の通りである。図中(b)には、排出ガス中の水分量とガス密度についても示す。

定速走行では車速の上昇(10～40 km/h)につれて、排出ガス流量は増大し、ピラム法による値で約17～37 l/sec, ピトー管法による値で約24～47 l/secを示した。しかし、両側定値とも50 km/h定速条件ではやや減少を示した。これは使用した実験車が車速50 km/hで吸気タイミングの調整不良などによる吸気不足を

図-9 定速走行条件と排出ガス流量、水分量、ガス密度

おし、エンジン内の燃焼状態が悪化したためと考えられる。

また、実験車Aを用いた定速走行条件での排出ガス流量のピトー管法による測定値はビラム法による値に対して、約1.2～1.5倍となり、前述のアイドル時での測定の場合とほぼ同様の傾向が認められた。

さらに、排出ガス中の水分量は20～50 km/h 定速では車速によらずほぼ同様の値を示すが、排出ガス密度は車速と弱い逆比例の関係を示すことが認められた。

つぎに、実際に京都市内の街路において、交通流の流れにしたがった実走行、すなわち、加速、減速および停止の条件を含む走行を行って、その際の排出ガスの流量を連続測定した。流量の測定はピトー管法とビラム法による同時測定で行った。走行距離は約8 km 、所要時間18分(平均車速26.6 km/h)である。走行の開始から終了までの排出ガス流量の変図-10に示す。なお、図中には走行中の信号などによる停止区間の位置を記入した。

実走行中の排出ガス流量は速度条件の変化に対応して著しく大きな変動を示し、加速時では急激に増大する。とくに発信加速での増加が著しく、定速時では徐々に増減し、減速時には急激に減少する。信号などによ

図-10 実走行中の排出ガス流量

る停止状態ではビラム法による値で10～20 l/s 、ピトー管法による値で20～30 l/s にまで減少し、それぞれアイドル時の1,000rpm程度に相当した排出流量となっている。走行中での加速では定速度条件から40～50 km/h への加速時に排出流量が急増する。図中の信号区間は主に赤信号での停止から、その交差点が出るまでの区間のことで、その区間内で排出ガス流量に増加や減少がみられる。これは、青信号でいったん発信した直後に歩行者や他の自動車等の出現で減速または停止するためである。

このことは、実際の都市域での自動車走行においては、エンジンが完全なアイドル状態(通常4サイクル車で600rpm)となっている時間は非常に短く、したがって現行の自動車排出ガス規制に採用されている10モードや11モードサイクルで規定されている完全なアイドルによる排出汚染物量の測定は過小評価であることを示している。

また、ビラム法による値とピトー管法による値を比べると、この場合でも、中心流速を測定するピトー管法による値が約1.5～2倍も大きい値を示している。これは、排出ガスの流量化に対する追従性が大きく原因しており、とくにビラム法ではガス流量の変化が激しいために回転羽根の慣性による影響が、アイドル時よりも一層顕著に現れること、すなわち応答速度の違いを示していると考えられる。しかしながら、両測定値の変動はほぼ対応している。

以上、今回検討を行った排出ガス流量の測定法を適用することによって、実際に道路上を走行中の自動車について、排出ガスの流量を連続的に測定し、排出ガス中の汚染物濃度の同時連続測定から、当該道路の走行中に放出される汚染物量を的確に把握することが可能になった。

総括

今日、わが国の自動車公害、とくに排出ガスによる

NO_x 汚染は慢性化しており、自動車の通行量、すなわち汚染源の増加が問題となるとともに、これらの自動車から放出される汚染物量の的確な把握が排出ガスや交通規制、汚染防止対策、および自動車排気の環境影響評価にもっとも重要となっている。しかし、現在用いられている汚染源強度値、すなわち自動車からの汚染物排出量の評価法による値は、実際の都市域における実態から大きくかけ離れている。

すなわち、特定の走行パターンについての測定にもとづく、排出係数を原単位とした汚染の評価は、実際の道路走行での汚染物放出にもっとも大きく影響している遷移条件を著しく軽視した過少評価となっている。

そこで、実際に街路を走行する自動車からその流量変動に対応して排出ガスを採取するプロポーショナルサンプリング法の実用化を図るために、その基本条件となる排出ガス流量の連続測定の方法について検討した。その結果の概要は次の通りである。

- 1) 熱線風速計を用いて、5種の自動車についてアイドル時の排出ガス流量を測定した。その結果、エンジンの回転数の上昇につれて排出ガスの流量も増大し、各車とも10~20 l/secを示したが、この値は10秒間の全量採取による流量値よりもやや大きい値となった。
- 2) ビラム法とピトー管法を用いた測定では、応答性でピトー管法が秀でるが、測定位置による影響が大きく、ビラム法は平均流速の測定となる。
- 3) 排出ガス中のCOとHC濃度はエンジンの回転数の上昇につれて減少し、NO_x、CO₂は増大した。また、N₂はほぼ一定値を示した。
- 4) ピトー管法による測定法で必要な排出ガス密度を求めるために、水分量をパラメータとして検討した。水分量はサーミスタ温度計(乾、湿)を用いて、算定する方法を検討し、アスマン法および塩カル法と比較した。その結果から、両法について求めた回帰直線で相互の換算が可能で、かつかなりの信頼性が得られると認められた。
- 5) ビラム法、ピトー管法およびサーミスタ法を用いて、アイドル時の排出ガスの流量を測定した。エンジンの回転数の上昇につれて排出ガス流量は増大した。しかし、ビラム法による値とピトー管法による値にはかなりの相違がみられた。また、排出ガス中の水分量も回転数の上昇につれて増大するが、ガス密度は逆に減少した。
- 6) 実際の都市街路における走行中の自動車について排出ガス流量の測定を行った。その結果、定速走行で

は車速の上昇につれて排出ガス流量は増大したが、ピトー管法による値はビラム法による値の約1.5~2倍を示した。また、排出ガス中の水分量は車速によらずほぼ一定で、ガスの密度とは弱い逆比例を示した。

さらに、排出ガス流量は加速時で急激に増大し、定速時では徐々に減少し、減速時では急激に減少した。さらに交差点などでの走行停止時においても排出ガス量は完全なアイドル時に比べてかなり大きな値を示すことが明らかになった。

以上、今回の検討から実際に都市域を走行中の自動車から排出される排出ガスの流量を連続的に直接測定することが可能となった。しかし、ビラム法とピトー管法との測定値の差など今後の検討が必要であるが、平均流速の把握ではビラム法が、また、変動性の大きい場合の測定にはピトー法の適用が有効と考えられた。

参 考 文 献

- 1) 自動車工学全書編集委員会；自動車と環境，37~54，山海堂，1980
- 2) 芳住邦雄，中村 健；都市における自動車の走行状態，産業と環境，20(9)，19~28，1984
- 3) 東京都公害研究所；自動車排出ガスに関する調査研究，昭52，昭53
- 4) 西田耕之助；自動車排気ガス汚染と対策，京都大学工学部大学解放講座，われわれの生活と公害，1，268~314，ナカニシヤ，1971
- 5) 西田耕之助；交通機関排気ガスの分析，講談社，1969
- 6) Rose A. H. Jr., Smith R., Michael W. F., Kaase R. E. ; Comparison of Auto Exhaust Emission in Two Major Cities, JAPCA., 15(8), 362~366, 1965
- 7) Chipman J. C., Marcey M. T. ; Proportional Sampling System for the Collection of Air Integrated Auto Exhaust Gas Sampling, JAPCA., 10(1), 60~69, 1960
- 8) 日本薬学会編；衛生試験法・註解，金原出版，1980
- 9) J. P. Sheehy, W. C. Achinger, R. A. Simon ; Handbook of Air Pollution, HEW. US, 1971
- 10) 嶋村春夫，山口隆章，清水固；自動車排ガス公害，90~101，化学工業社，1971
- 11) 内燃機関編集部，自動車用機関の燃焼と排気，騒音，内燃機関，14(2)，5~50，1975
- 12) 東京都公害局規制部；大気汚染物質排出係数算出結果について，昭48
- 13) 環境庁大気保全局自動車公害課編；自動車排出ガス低減の軌跡，119~261，1976
- 14) 小林勝；自動車排気浄化装置とその整備，8~49，1978
- 15) 亀井三郎；基礎化学工学，263~255，いずみ書房，1961
- 16) 景山久；大気汚染と自動車排気ガス，53~70，技術書院，1965