

1. 超低公害自動車用次世代排出ガス計測システムの 開発に関する研究

(研究期間 平成 13 年度～平成 14 年度)

環境省 環境技術開発等推進費（実用化研究開発課題）

環境エネルギー部 エミッション技術研究室 後藤 雄一

石井 素

動力システム研究室 佐藤 辰二

株式会社堀場製作所 技術担当統括部 中村 成男

実用 6. 超低公害自動車用次世代排出ガス計測システムの開発 に関する研究

独立行政法人

交通安全環境研究所環境エネルギー部

エミッション技術研究室

後藤 雄一

石井 素

動力システム研究室

佐藤 辰二

株式会社 堀場製作所

技術担当統括部

中村 成男

研究期間 平成13年度～平成14年度

平成13年度当初予算額

44,232千円

Development of Advanced Emissions Measurement System for Ultra-Low Emission Vehicles

(FY 2001-2002)

Yuichi Goto, Hajime Ishii

Emission Technology Section,

Tatsuji Sato

Power System Section

National Traffic Safety and Environment Laboratory, Ministry of Land, Infrastructure and Transportation

Shigeo Nakamura

HORIBA Ltd.

In the conventional CVS method a full dilution tunnel dilutes the whole exhaust gas. On the other hand, a partial flow dilution tunnel is now studying eagerly by proportional sampling from exhaust gas line. In order to realize accurate proportional sampling of exhaust gas, it is necessary to measure the total exhaust gas flow rate accurately. Many methods for proportional sampling of an exhaust gas flow have been considered till now. However, the practical method has not been obtained yet because of low heat-resistance of measuring devices and so on. The carbon balance method by using a fast CO₂ analyzer is a good one to overcome past problems for measuring the exhaust gas flow. The A/F sensor method by using a UEGO sensor is also a good one because of the reasonable price and easy measurement. By these methods there are possibilities to establish advanced emission measurement systems to measure both exhaust emissions and PM simultaneously for ultra-low emission vehicle in the future.

In this study the measurement principle and algorithm of carbon balance method was investigated and also the error factors and

falsifiability for this method were clarified. On the other hand, use of UEGO sensor was experimentally studied. As results, it was shown that it is easy to measure fuel flow by means of UEGO sensor and the method by UEGO sensor was shown to be also feasible. Because it is not influenced by the high temperature of exhaust gas hence the sensor itself operates in the high temperature condition. Moreover, the error factors and working principles of UEGO sensor were clarified. For further study, it is necessary to establish a practical measurement by examining error factors in detail.

1. まえがき

今後、排出ガスやPMの規制が一層強化される流れの中で、ディーゼル自動車やガソリン自動車、低公害自動車（ULEV、SULEVなど）からの排出ガス・PM排出量が大幅に低減し低濃度になりつつある。現在の自動車排出ガス計測システムは分析計が排出ガス中の水蒸気の干渉を受けるため環境大気をフィルタで浄化した希釈空気を用いて、排出ガスを希釈トンネルにより希釈し水蒸気の影響を除いて排出ガス分析を行っている。一部の排出ガス成分では環境大気より清浄なため、従来の排出ガス計測法では到底対応できなくなっている。さらに低濃度PMについては、低濃度排出ガスと統一的に測定する手法が未だ実現できていない。そのため、これら超低濃度の排出ガスに対する次世代の計測法が早急に必要である。

希釈トンネルが排気ガス全量を希釈する従来のCVS法に対して、その一部を排出ガス流量に比例してサンプリングし希釈するシステムが研究されている。正確な部分比例サンプリングを行うために排出ガス量を正確に知る必要があり、今まで多くの手法が検討されているが、排出ガス量を直接計測する方法では、検出器の耐熱性がないなど十分に実用的な手法が未だ得られていない。排気ガス中のCO₂成分等を高応答で計測し、カーボンバランス法から燃料流量を求め吸入空気量と合わせて高速で計測・演算することにより間接的に排気ガス量を測定する方法は従来の手法の課題を克服できる可能性がある。これが実現できれば、それを基に正確に一部排出ガスを比例サンプリングすることでシャシーダイナモを使った実車両ベースで過渡運転条件にも対応した、排気ガスとPMの排出量を同時計測する次世代の超低濃度排出ガス計測システムが構築出来る可能性がある。この方法によれば、排気ガスとPMを統一的に計測可能であり、将来のナノ粒子計測法を適用する可能性も開かれる。

本研究は、排出ガス流量導出の技術とシステム構築法が次世代排出ガス計測システムの基幹技術であるとの認識の基に、これらの技術を中心とした次世代自動車排出ガス計測システムの開発を行い、実用化を促進することを目的とするものである。

2. 本研究のアプローチと目標

環境負荷低減を目的として自動車排気ガス規制が一層強化される中で、自動車排気ガス及びPM濃度も極めて低くなる。本研究は、このような計測上の要求を受けて超低公害自動車用次世代排出ガス計測システムを構築するものである。従来から課題となっていた排気ガス流量計測をカーボンバランス法を応用した技術により解決しようとするところに着眼点がある。さら

に、これを発展させて柔軟性の高い全体のシステムを構築する方法を求める。本研究の特色として、(1) 超低濃度の排気ガス及びPM排出量の統一的な計測、(2) 実車両をそのまま計測可能なシャシーダイナモベースの計測、(3) 将来のナノ粒子計測法への適用の可能性などが挙げられる。

本技術開発を行うことにより、今後の超低公害自動車に対応する排出ガス計測システムが確立する。その結果、超低公害自動車に対して高い計測精度で正確な評価をすることが可能となり、より低環境負荷な自動車の普及を促進する基礎となることが期待できる。

国内においては御堀場製作所等の分析メーカーにおいて本研究に必要な排気ガス分析計等の要素技術については開発が既に済んでおり、SULEVなどの一部ガソリン自動車について排気ガスを計測可能な状態にある。しかしながら、PM排出量との同時計測やナノ粒子の粒径計測については未だ研究が進められていない状態であり、ディーゼル自動車に至っては超低公害自動車はこれからの研究が進められるところである。海外においては、米国でガソリン自動車に限った超低濃度排気ガス計測法の開発が進められているが、研究段階であり未だ実用化の域には達していない。これらの状況から、本研究は革新的な極低濃度の自動車排出ガス測定システムの開発を目指す。

3. 研究実施計画

本研究では、排出ガス流量導出の技術の計測精度、再現性、実用性等を調べ、開発済みのシステム要素と組み合わせて排気ガス及びPMを統一的に計測可能なシステム構成法を検討する。さらに、ナノ粒子(nano particle)等の粒子計測法を適用する手法の可能性も検討する。

初年度には、排出ガス流量導出の技術を検討し、A/F方式排気流量計を試作する。さらに、システムを組み上げるのに必要な要素の導入を進める。一方、排気ガス中のCO₂成分等を高応答で計測し、カーボンバランス法から燃料流量を求め吸入空気量と合わせて高速で計測・演算することにより従来の手法の課題を克服して排出ガス流量を求める可能性を検討する。

次年度には、試作したA/F方式排気流量計を考慮に入れたシステム構成法を検討しその評価を行う。それを基に正確に排出ガスを比例サンプリングする手法を確立する。また、次世代の超低濃度排出ガス計測システムを構築するために必要な高精度高感度排出ガス分析計の仕様を検討する。一方、PM計測やナノ粒子計測に必要な粒子サンプリングシステム、粒径計測システム等への本システムの適用可能性を検討する。

4. 排出ガス流量導出法

4. 1 空気過剰率（空燃比、A/F）の算出

4. 1. 1 カーボンバランス法による算出

従来、エンジンにおける空気過剰率（または空燃比）は、シリンダに吸入される燃料流量と空気流量を計測することにより、算出されている。ここでは、排気組成を用いる手段を検討してみる。それらについては、Fagley¹⁾の研究があり、エンジンが定常運転時における空燃比の測定を目的としたものであるが、エンジンの低公害化を測るためには、気筒ごとの空燃比や、過渡運転時での空燃比を求めようとすると、下記の問題点がある。FagleyのTotal C (CO₂+CO+HC) を用いる手法は、O₂濃度を使用しないので過渡時に適用可能であるが、測定精度が十分でない。ここでは、上記の問題点を解決し、O₂濃度を使用しないで過渡運転時の空燃比を十分な精度で測定できる細井の手法について以下に述べる。²⁾

4. 1. 1. 1 排気組成を用いた算出方法

(a) 基礎式

$$C_n H_m O_r + \lambda \cdot (n + m/4 - r/2) \cdot (O_2 + 3.764 \text{Inerts}) \\ \Rightarrow Np(X_{CO_2}CO_2 + X_{CO}CO + X_{O_2}O_2 + X_{UBF}C_aH_bO_c \\ + X_{H_2}H_2 + X_{H_2O}H_2O + 3.764 \cdot \lambda \cdot (n + m/4 - r/2) \cdot \text{Inerts})$$

C-H-O系燃料C_nH_mO_rと乾燥空気との燃焼式は次式で表される。

ここで、

λ：空気過剰率

n：燃料中の炭素数

m：燃料中の水素数

r：燃料中の酸素数

X_{CO₂}：排気中のCO₂のモル数割合

X_{CO}：排気中のCOのモル数割合

X_{O₂}：排気中のO₂のモル数割合

X_{UBF}：排気中の未燃焼燃料（UBF）のモル数割合

X_{H₂}：排気中のH₂のモル数割合

X_{H₂O}：排気中のH₂Oのモル数割合

a：未燃焼燃料の平均炭素数

b：未燃焼燃料の平均水素数

c：未燃焼燃料の平均酸素数

C、HおよびOの各原子数は燃焼前後において等しいことから次式が成り立つ。

C-balance

$$n = Np(X_{CO_2} + X_{CO} + aX_{UBF})$$

H-balance

$$m = Np(cX_{UBF} + 2X_{H_2} + 2X_{H_2O})$$

O-balance

$$r + 2\lambda(n + m/4 - r/2) = Np(2X_{CO_2} + X_{CO} + 2X_{O_2} + cX_{UBF} + X_{H_2O})$$

$$Y = m/n = b/a$$

$$Z = r/n = c/a$$

ここで、燃焼ガスの全モル数をNpとし、各成分を容積割合Piで表し、さらにとすると

$$n/Np = P_{CO_2} + P_{CO} + aP_{UBF}$$

$$Yn/Np = YaP_{UBF} + 2P_{H_2} + 2P_{H_2O}$$

$$[Z + 2\lambda(1 + Y/4 - Z/2)] \cdot n/Np = 2P_{CO_2} + P_{CO} + 2P_{O_2} + 2P_{H_2O} + ZaP_{UBF}$$

となる。

$$\sum P_i = 1$$

から

$$3.764\lambda \cdot (1 + Y/4 - Z/2) \cdot n/Np + P_{CO_2} + P_{CO} + P_{CO} + P_{H_2O} + P_{H_2} + P_{UBF} = 1$$

水性ガス反応定数をKとすると、

$$K = \frac{P_{CO} \cdot P_{H_2O}}{P_{CO_2} \cdot P_{H_2}}$$

λをP_{CO₂}、P_{CO}およびP_{UBF}で表すと

$$\lambda = \frac{1 - \frac{Z \cdot (P_{CO_2} + P_{CO})}{2} - \frac{P_{CO}}{2} - P_{UBF} \cdot \frac{Y \cdot (P_{CO_2} + P_{CO})}{4} \cdot \frac{1 + \frac{2P_{CO}}{K \cdot P_{CO_2}}}{1 + \frac{P_{CO}}{K \cdot P_{CO_2}}}}{4.764 \cdot (1 + Y/4 - Z/2) \cdot (P_{CO_2} + P_{CO} + aP_{UBF})}$$

ここで、一般に排ガス分析計でCO₂、COの測定値は除湿後の容積割合であるので、除湿後の容積割合を'を付けて表すと、

$$P_{CO_2}' = (1 - P_{H_2O}) \cdot P_{CO_2}$$

$$P_{CO}' = (1 - P_{H_2O}) \cdot P_{CO}$$

$$P_{H_2O} = \frac{Y \cdot (P_{CO_2}' + P_{CO}')}{2(1 + \frac{P_{CO}'}{K \cdot P_{CO_2}'}) + Y \cdot (P_{CO_2}' + P_{CO}')}$$

以上の式から

$$\lambda = \frac{1 - \frac{P_{CO}}{2} P_{UBF} + \frac{(P_{CO_2} + P_{CO})}{4} \cdot \left[\frac{Y - 2P_{UBF} - \frac{2P_{CO}}{K \cdot P_{CO_2}}}{1 + \frac{P_{CO}}{K \cdot P_{CO_2}}} - 2Z \right]}{4.764 \cdot (1 + Y/4 - Z/2) \cdot (P_{CO_2}' + P_{CO}') \left(1 + \frac{YaP_{UBF}}{2(1 + \frac{P_{CO}'}{K \cdot P_{CO_2}'})} \right) + P_{UBF}}$$

を得る。なお、空燃比は下記の理論空燃比 $(A/F)_{st}$ を入に乘ずることにより得られる。

$$(A/F)_{st} = \frac{138.0 \cdot (1 + Y/4 - Z/2)}{12.01 + 1.008 \cdot Y + 16 \cdot Z}$$

(b) 空燃比の測定値に及ぼす因子の影響

排気組成から算出した空燃比に及ぼす因子の影響を、ガソリンについて検討する。ここで検討する因子として、燃料の H/C 比 Y、排気中の炭化水素の平均炭素数 a、水性ガス反応定数 K、および排気組成の測定誤差を選んだ。

(1) Y (燃料の H/C 比) の影響

空燃比の算出値に及ぼす Y の誤差の影響を図 1 に示す。Y の値が大きくなるほど誤差が大きくなるが、Y の誤差を ±5 % 以内に抑えれば、空燃比への影響は ±1 % 以内になる。データを用いて、Y の影響を検討した結果を図 2 に示す。Y が

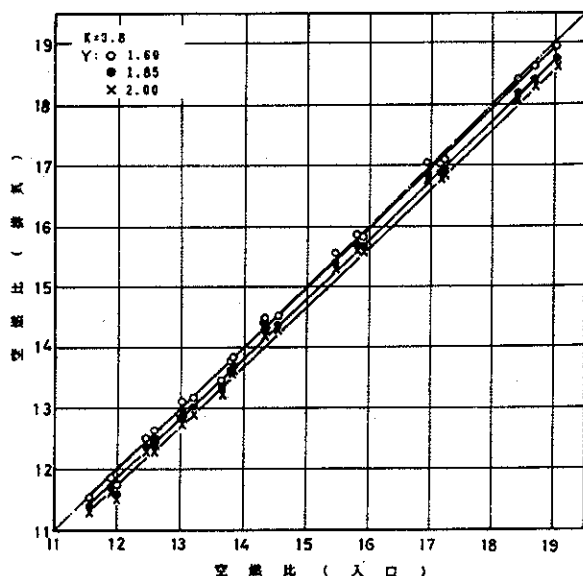


図 1 空燃比の計算に及ぼす H/C 比の誤差の影響

大きくなるに従い、排気組成から算出した空燃比は、入口空燃比（吸入空気流量と燃料流量から測定）に対して、ほぼ平行に濃くなる方向にずれている。また、その影響は、Y の 0.1 の変化に対して、空燃比で約 0.1 である。以上から、n に対して小数点以下 1 桁まで正確に測定しておけば空燃比の誤差は 1 % 以下に抑えられる。

(2) K (水性反応定数) の影響

K は燃焼温度により異なるため、当然ながら空燃比により異なる。そこで、一般に言われている K の値の範囲で、空燃

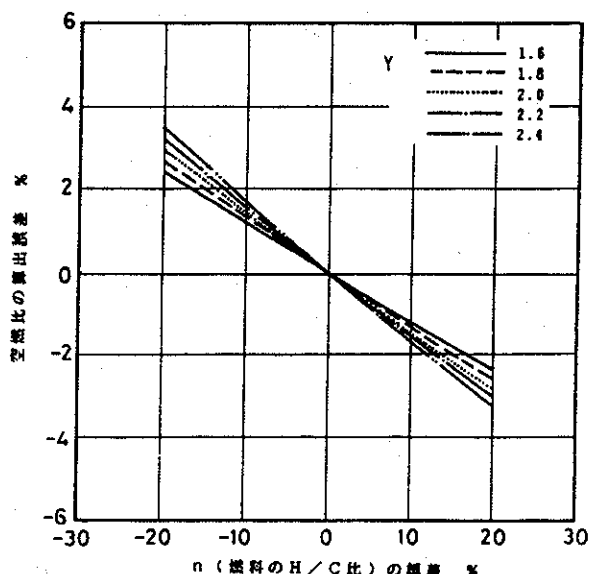


図 2 空燃比の計算に及ぼす H/C 比の影響

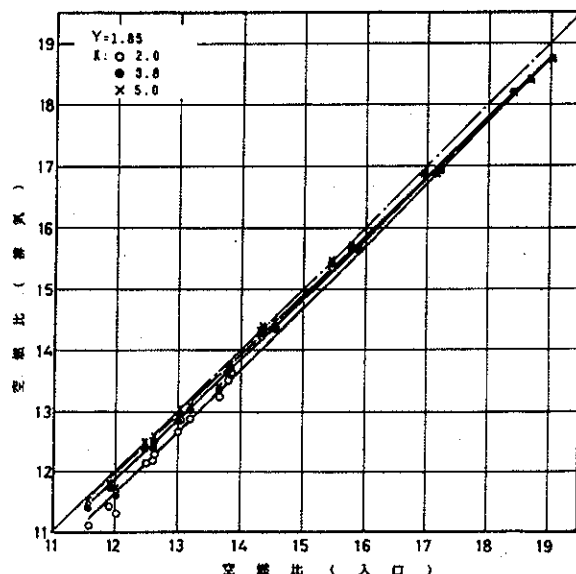


図 3 空燃比の計算に及ぼす水性ガス反応定数の影響

比の算出値にどのように影響するかを検討する。CO が増加し、CO₂ が減少するような空燃比が濃くなる条件ほど、K の影響が表れると考えられる。図 3 は Y=1.85 とした場合の K の影響を示したものであるが、空燃比が 12 付近で K が 1 の変化に対して、空燃比で約 0.1 程度である。

(3) 排気中の炭化水素の平均炭素数 a の影響

a を大きくするに従い、同一の HC (ppmC) でも、排気の全モル数 Mw は小さくなり、空燃比の算出値は大きくなる。その影響を種々の HC (ppmC) について図 4 に示す。

a ≥ 3 で、空燃比に対する影響は小さくなっている。また、a

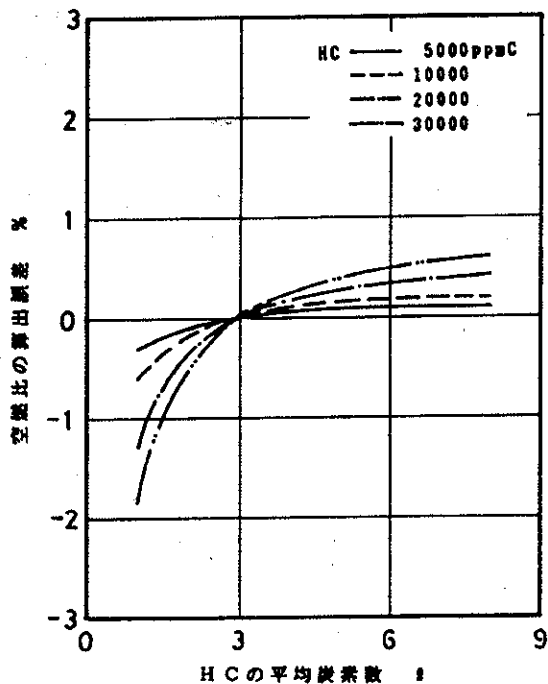


図4 空燃比の計算に及ぼすHCの平均炭素数の影響

<3で、空燃比に対する影響が大きく、HCの値が大きくなるに従い顕著である。

(4) 排気組成の測定誤差の影響

ここでは、排ガス分析計における分析誤差、読み取り誤差等を含めた排気組成の測定誤差の影響を検討する。 CO_2 は、あらゆる空燃比に対して高濃度であるため、算出値への影響が大きくなり、 CO は空燃比が濃くなるに従い影響が大きくな

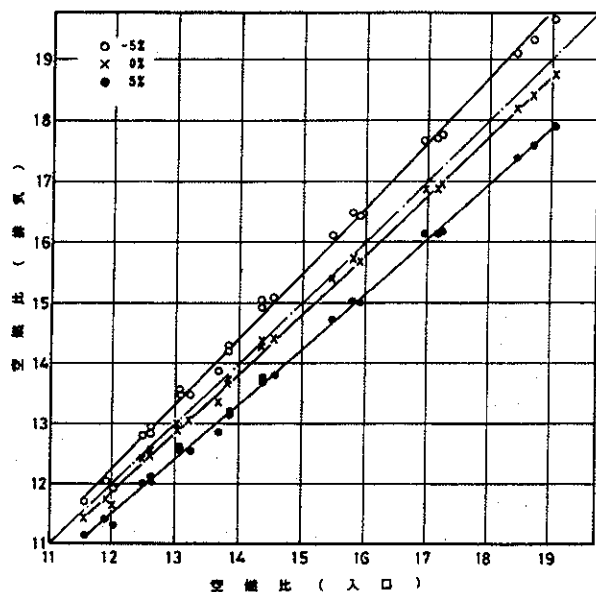


図5 空燃比の計算に及ぼす CO_2 の測定誤差の影響

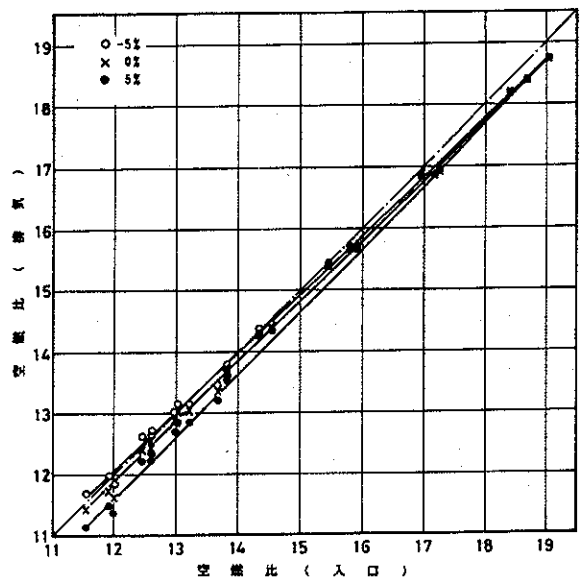


図6 空燃比の計算に及ぼす CO の測定誤差の影響

り、HCは高濃度になるに従い影響が大きく表れる。図5に示すように、 CO_2 の1%の測定誤差で空燃比の算出値に約1%の誤差を生じる。 CO については、図6に示すように、空燃比12付近で1%の測定誤差で約0.05である。HCについては、エンジンにより排出濃度レベルが異なるため明確に測定誤差の影響を見積もることは出来ないが、HCが10,000ppmC以下では影響は少ない。

4. 1. 1. 2 過渡時の空燃比の推定方法

本測定法を過渡運転時に応用するためには、サンプリング系（サンプリング・ラインと分析計）での応答性を考慮しなければならない。ここでは、過渡運転時の空燃比を、サンプリング系の応答性を、「むだ時間+一次遅れ」で近似して推定する方法について検討する。

(a)解析方法

一般に、データ解析において連続信号として解析することは稀であり、連続信号をあるサンプル周期で、離散データとして処理することがほとんどである。そこで、ここでは解析方法としてz変換を用いて行った。

(1) 時系列とz変換

等比数列 $a, ar, ar^2, \dots$ において $|r| < 1$ ならば、第1項からの総和は

$$a + ar + ar^2 + \dots = a/(1-r)$$

により与えられる。

Tごとにサンプルした値の系列を

$f(0), f(T), f(2T), \dots, f(nT), \dots$ とすると、離散化されたラプラス変換に相当する z 変換は、サンプル値の系列 $f_0, f_1, f_2, \dots$ として、

$$F(z) = f_0 + f_1 z^{-1} + f_2 z^{-2} + \dots$$

で表される。

ただし、 z は順番を表すためのパラメータとし、 $|z| < 1$ とする。また、入力サンプル値 $r(nT)$ と出力サンプル値 $c(nT)$ 間のパルス伝達関数 $G(z)$ は、

$$G(z) = C(z)/R(z)$$

ただし、

$$R(z) = Zr(t), C(z) = Zc(t)$$

(2) 出力の時系列 $c(nT)$ の求め方

入力の時系列 $r(nT)$ 、およびパルス伝達関数 $G(z)$ が既知ならば、出力の時系列 $c(nT)$ の z 変換 $C(z)$ は、

$$C(z) = G(z) \cdot R(z)$$

から求められる。ここで、 $G(z)$ を一次遅れとすると、

$$G(z) = (1-d)/(z-d)$$

ただし、 $d = \exp(-T/\tau)$ 、 τ は時定数である。

入力の時系列 $r(nT)$ の z 変換 $R(z)$ を、

$$R(z) = r_0 + r_1 z^{-1} + r_2 z^{-2} + \dots + r_n z^{-n} + \dots$$

とすると、

$$C(z) = \frac{1-d}{z-d} (r_0 + r_1 z^{-1} + r_2 z^{-2} + \dots + r_n z^{-n})$$

$$= (1-d) \cdot \left[r_0 z^{-1} + (r_1 + d r_0) z^{-2} + (r_2 + d r_1 + d^2 r_0) z^{-3} + \dots + (r_{n-1} + d r_{n-2} + \dots + d^{n-1} r_0) z^{-n} + \dots \right]$$

となる。従って、

$$c_1 = r_0 (1-d) + d c_0$$

$$c_2 = (r_1 + d r_0) (1-d) + r_1 (1-d) + d c_1$$

$$c_3 = (r_2 + d r_1 + d^2 r_0) (1-d) + r_2 (1-d) + d c_2$$

$$c_n = (r_{n-1} + d r_{n-2} + \dots + d^{n-1} r_0) (1-d) + r_{n-1} (1-d) + d c_{n-1}$$

(3) 入力の時系列 $r(nT)$ の求め方

入力の時系列 $r(nT)$ の z 変換 $R(z)$ は、

$$R(z) = C(z)/G(z)$$

ここで、一次遅れについて考えると、 $C(z)$ 、 $G(z)$ は、

$$C(z) = c_0 + c_1 z^{-1} + c_2 z^{-2} + \dots + c_n z^{-n} + \dots$$

$$G(z) = (1-d)/(z-d)$$

従って、

$$R(z) = C(z)/G(z)$$

$$= \frac{z-d}{1-d} (c_0 + c_1 z^{-1} + \dots + c_n z^{-n} + \dots)$$

$$= \frac{1}{1-d} \{ c_0 z + (c_1 - d c_0) + (c_2 - d c_1) z^{-1} + \dots + (c_n - d c_{n-1}) z^{-(n+1)} + \dots \}$$

以上から、入力の時系列 $r_n = r(nT)$ は、

$$r_0 = (c_1 - d c_0)/(1-d)$$

$$r_1 = (c_2 - d c_1)/(1-d)$$

$$r_2 = (c_3 - d c_2)/(1-d)$$

$$r_n = (c_{n+1} - d c_n)/(1-d)$$

以上、入力の時系列 $r(nT)$ 、出力の時系列 $c(nT)$ 、パルス伝達関数 $G(z)$ のうち、2つが既知ならば他の一つは求められる。

(b) サンプリング系の伝達関数

ゼロガスとスパンガスを電磁弁により切り替えることにより、ステップ応答させてサンプリング系の伝達関数を求めた実験結果の一例を図7に示す。図から CO_2 (NDIR)、 CO (NDIR)、 HC (FID)、 NO_x (CLD) 分析計の伝達関数のいずれもむだ時間 + 一次遅れで近似できると見られる。

そこで、図8に示すように時間軸に対して CO_2 、 CO 、 HC 、

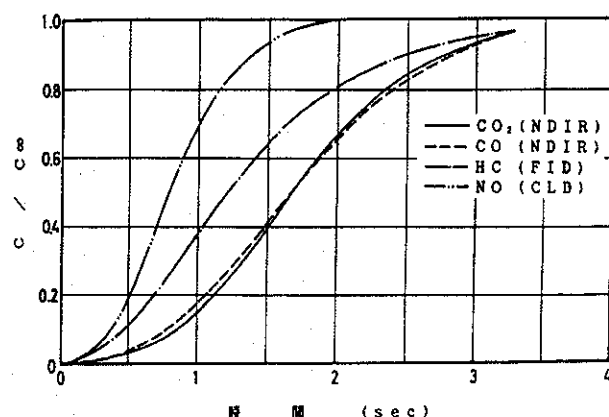


図7 各ガス分析計の過渡応答

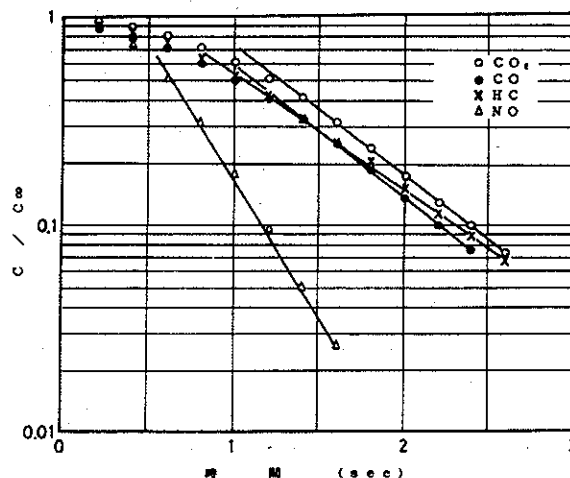


図8 各ガス分析計の時定数

NOxの分析計出力を対数プロットすることにより時定数を求めた。

CO₂、CO分析計でサンプル流量を1、3、5 L/minと変えて、時定数に及ぼすサンプル流量の影響を調べた結果を図9に示す。サンプル流量を増加するに従い、時定数は小さく応答性は良くなっている。これは、時定数 τ とサンプル流量 V_s 、分析計のサンプルセル容積 V_c が

$$\tau = V_c / V_s$$

で表されることから理解される。

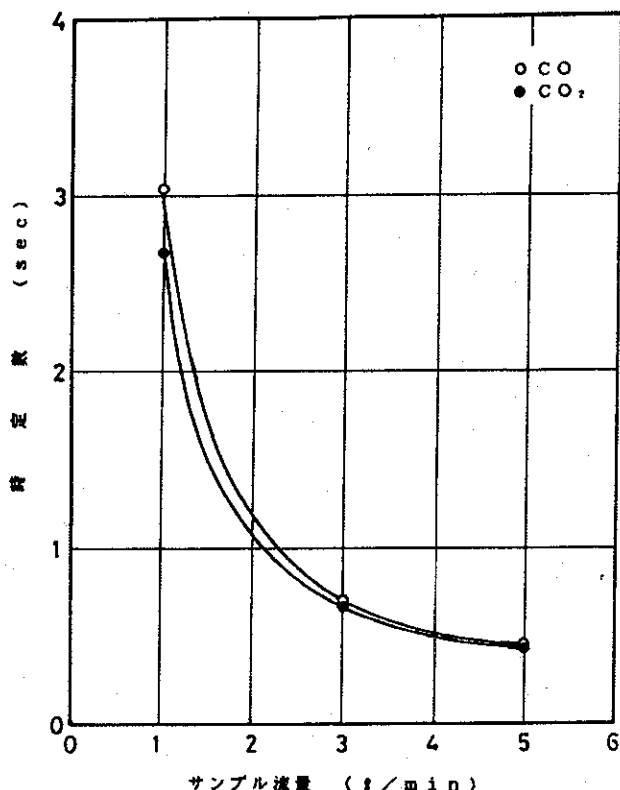


図9 NDIR分析計の時定数に及ぼすサンプル流量の影響

HC分析計についてはサンプル圧を0.1、0.2、0.3kg/cm²、NOx分析計については0.25、0.30、0.35kg/cm²と変えても時定数には影響を及ぼさなかった。

4. 1. 1. 3 過渡運転時の空燃比の推定

一般に燃焼変動は周期性が無く、種々の周波数成分を含んだホワイトノイズとして取り扱うとすると、ホワイトノイズの平均値は0であるので同一モードを繰り返し運転して平均応答法を用いてデータを平均化することが可能である。

平均応答法を用いてデータを平均化し、各分析計の伝達関数を用いサンプル周期0.1secで排ガスをサンプリングして空燃比の計算を行うと、空燃比の急変するところで分析計の応答性を考慮した場合と、しない場合では空燃比に約1の差を生じる。データの平均化を行う作業に多量のデータ処理を必

要とすることから、平均応答法は推定精度を上げるために有効であるものの実際の計測法として使用するには困難を生ずると思われる。

4. 1. 2 O₂センサを用いた算出

A/F (空燃比) の計測には様々な方法がある。その中でも、排ガス組成から計算する方法が一般的であり、特に定常状態においては、前述した方法により高い精度と信頼性を有している。

排ガス組成から、A/Fを求める計算式が幾つか提案されている。O₂濃度から空燃比を求める方法としては、R. S. Spindi³⁾によって提案されたA/F計算式がある。この方法は以前は応答性が悪かったO₂濃度計を使用していたため過渡時の適用できなかったが、高速応答性を持つO₂センサ (EGOセンサ) が開発された後は、エンジン制御用として幅広く用いられてきた。

O₂センサは排気ガス中にある酸素濃度からA/Fを検出する。酸素量がエンジンに供給される燃料を消費するために完全に等量である理論空燃比は14.7 (燃料のC/H比により若干のずれが生ずる) である。燃料が増加するにつれて、エンジン出力は増加し排気ガス中に残留COとH₂量が増加する。この領域は燃料過濃領域、略してrich (リッチ) と呼ばれる。燃料が減少すると、出力が減少し排気中の残留酸素濃度が増加する。この領域は燃料希薄領域、略してlean (リーン) と呼ばれる。三元触媒車では、CO、H₂は残留酸素およびNO_xと反応し、CO₂、H₂O及びN₂を生成して排気ガスを浄化する。O₂センサ (λセンサ) は一般に理論空燃比にエンジンを制御するために用いられる。それはリッチでは約1V、リーンでは0Vを出力する。その出力電

$$EMF = \frac{RT}{4F} \log \left\{ \frac{PO_2(exhaust)}{PO_2(air)} \right\}$$

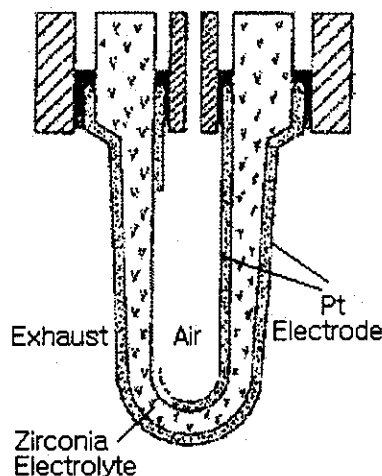


図10 λセンサの構造

圧は理論空燃比において1 Vから0 Vに突然変化する。燃料がリーンかリッチかを検出することができ、エンジンを理論空燃比に制御することが可能である。

図10に従来のλセンサの構造を示す。その主要部はジルコニア電解質でできたU型のチューブである。ジルコニアは高温で酸素イオンを通す導体として良く知られている。Pt電極がジルコニアチューブの両側に塗りつけられている。内部の電極は大気中の空気と接触しており、外側の電極は排気ガスと接触している。それは実際には電位差を発生する固体電解セルであり、次のように書くことが出来る。

$O_2(\text{exhaust}), Pt \mid \text{Solid Electrolyte (Zirconia)} \mid Pt, O_2(\text{air})$

セル内の起電力(ElectroMotive Force, EMF)は次の式で与えられる。

空気中の酸素分圧($P_{O_2}(\text{air})$)はほとんど一定であり、EMFは排気ガスの酸素分圧($P_{O_2}(\text{exhaust})$)に依存する。リーンでは $P_{O_2}(\text{exhaust})$ は $P_{O_2}(\text{air})$ に近く、EMFはほとんど0 Vである。しかしながら、リーンでは酸素分圧の平衡は無視でき、EMFは約1 Vになる。理論空燃比ではEMFは約0.5 Vである。平衡酸素分圧は理論空燃比の近傍で急激に変化するためEMFはこの点でステップ変化をするように見える。λセンサのDMFを測定することによって燃料がリーンかリッチかを検出することが可能である。

新しいエンジンでは燃費をよくするためにリーンで運転するものが開発されてきた。これらのエンジンでは空燃比が20～25の間で運転されている。この空燃比領域では従来のセンサは感度を持たないためにエンジンを制御できない。A/Fを正確に検出することが出来るセンサが適切なフィードバックをするために必要である。このセンサはUniversal Air to fuel ratio Exhaust Gas Oxygen (UEGO) sensorと呼ばれる。エンジンは、より出力が必要な時にはこのセンサを使ってリッチで制御することも出来る。

UEGOセンサは広い範囲のA/Fを検出することが出来ることから、エンジンを非常にリーンかリッチの状態で制御することが

可能である。λセンサが電位差を測るのに対し、UEGOセンサは電流を測る。それは、A/Fの定量的情報を与えるようなリーンにおける酸素分圧とリッチにおけるCO、 H_2 及びCmHnの分圧に比例した電流を測定する。リーンでA/Fが増加するにつれて、排気中の過剰酸素が増加する。リッチでA/Fが減少するにつれて、排気中の酸素不足によりCO、 H_2 及びCmHnの分圧が増加する。理論空燃比(化学量論比)点で、これらのガスはほとんど0であり排気ガスは完全燃焼のためにほとんど H_2O と CO_2 である。

ジルコニア板の両側に印刷された電極間に適当な電圧を印加することによって酸素ガスを移動させることが可能となる。酸素はカソードから電子を得て電解中の酸素イオンになる。酸素イオンはアノードに移動してアノードに電子を与え酸素ガスになる。これは、カソード側からアノード側に酸素を送るため酸素ポンプ(Oxygen pumping)と呼ばれる。

リーンでは、電流は電極への酸素供給によって制限される。電流は排気中の酸素分圧に比例する。A/Fは限界電流を測定することにより知ることが出来る。しかしながら、リッチでは排気中にほとんど酸素がない。CO、 H_2 及びCmHnの分圧を測るために、これらのガスの拡散を制限するように反対方向に電流が流される。酸素は電極上の CO_2 分解から供給される。電流方向が反対であるため、酸素ポンプはバリアによって制限されない。汲み上げられた酸素は反対側の電極上のCO、 H_2 及びCmHnと反応して CO_2 と H_2O になる。この電流は拡散バリアを通るCO、 H_2 及びCmHnによって制限される。汲み上げる酸素の量はCO、 H_2 およびCmHn供給の量を超えることは出来ない。もしそうでないなら、過剰酸素の濃度はより多くの酸素供給を制限するポンプ電圧にまで起電力を引き起こす濃度になる。結果として、逆電流はCO、 H_2 及びCmHnによって制限される。リッチでA/Fを測ることが可能になる。

図11にUEGOの構造図を示す。⁴⁾ 電位差セル(λセンサ)はギャップ中にある排気ガスと大気中空気の間で起電力(EMF)を測る。測定された電圧 V_s (EMF)は V_0 と比べられる。 V_0 は理論空燃比のEMFに対応する。アンプは、 V_s と V_0 を比べた後、適当なポンプ電圧をポンプセルに印加する。もし $V_s > V_0$ であれば排気はリッチ、反対であればリーンである。

電流 I_p は次式によってあらわされる。

$$I_p = \frac{nF}{RT} \cdot \frac{DPA}{L} \cdot X$$

ここで、

I_p : Pump current,

n : Number of electric charge concerned to the electrode reaction in the pumping electrode at the gap side,

F : Faraday constant,

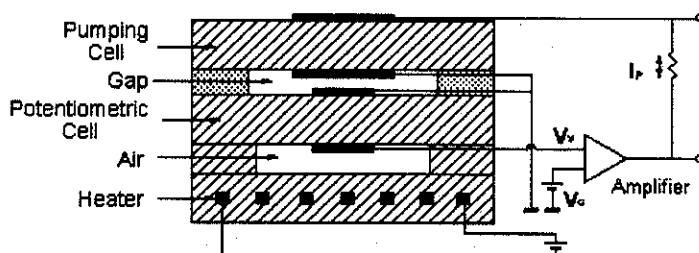


図1-1 UEGOの構造

R:Gas constant, T:Temperature(K),
D:Diffusion coefficient of a diffusing component,

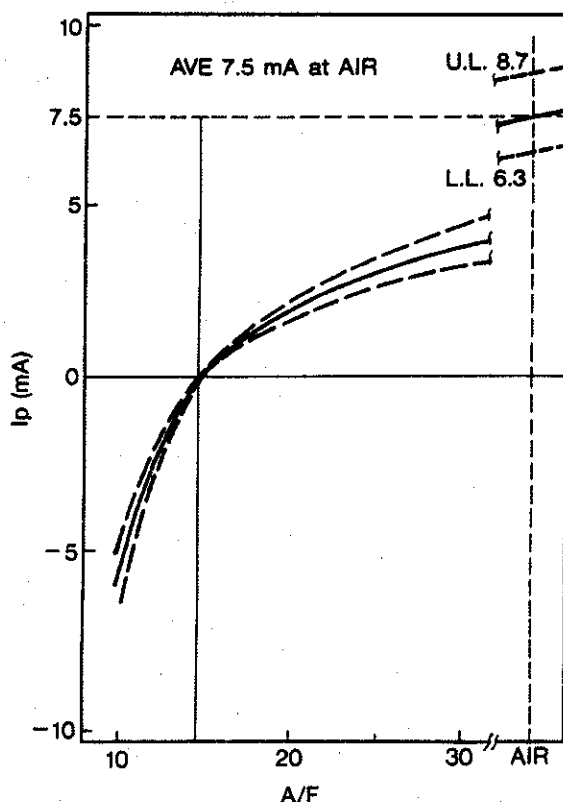


図12 UEGOの出力特性

P:Pressure (atm),
A:Effective sectional area,
L:Effective diffusion distance,
X:Concentration of a component of the gas to be measured (%)

一般にCO, H₂及びCmHnが存在する場合は次式となる。⁵⁾

$$I_p = \frac{2F}{RT} \cdot \frac{PA}{L} \cdot X \cdot (DH_2 \cdot PH_2 + DCO \cdot PCO + DC_m H_n \cdot PC_m H_n)$$

UEGOセンサのIPとA/Fの出力特性図を図12に示す。理論空燃比においては、排気ガス中の酸素分圧と検出容積内の酸素分圧が同じであるとき酸素ポンプは必要ないためいつも $I_p=0$ mAとなる。リッチ、リーン領域の値のばらつきは最大±15%あり、実際の適用では問題となる。特にリーン側ではIPの変化をA/Fに換算する際にばらつきの影響が大きいため補償が必要がある。例えば、モード運転におけるアイドル条件では空燃比が安定しておりその空燃比値をチェックに利用する可能性も考えられる。

センサへの温度、圧力の影響を考えると、拡散係数Dは温度と圧力に依存性を持つ。拡散の種類ごと以下に示す。

Molecular diffusion

$$D_m \propto T^{1.75} Pa^{-1}$$

ここで、

Dm:Molecular diffusion coefficient

Pa:Total pressure of the measured atmosphere

Knudsen diffusion(fine pore diffusion)

$$D_k \propto r \cdot T^{0.5} M^{-0.5}$$

ここで、

Dk:Knudsen diffusion coefficient

r:average pore diameter

M:molecular weight of the measured gas

UEGOの拡散経路は分子拡散とクヌセン拡散を利用したセラミックの多孔層からなる。そのため、センサ出力は温度と圧力に次式の通り依存する。

$$I_p \propto \left(K1 \cdot T^{0.75} \cdot \frac{S}{L} + K2 \cdot T^{-0.5} \cdot P_g \cdot \frac{S}{L} \right)$$

ここで、

K1とK2は $K1+K2=1$ を与える係数

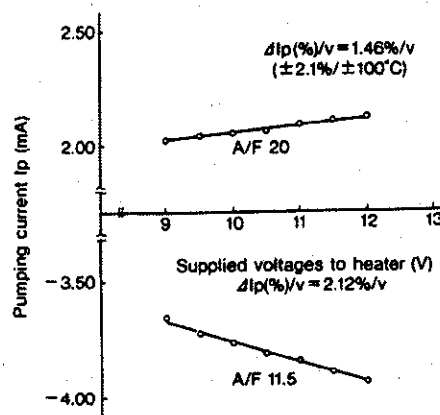


図13 UEGOの温度依存性

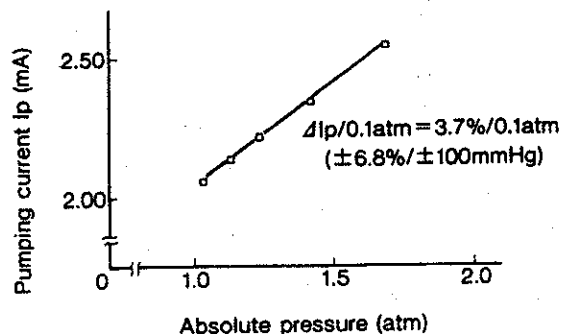


図14 UEGOの圧力依存性

表1 瞬時吸入空気流量計候補一覧

No.	1	2	3	4	5	
型式	LFE-75B	LFM-10.11	IGM868	UP1080-D111-70021	VFX	
メーカー	SOKKEN	山田製作所	パナメトリクス社	オーバル	オーバル	
測定流量範囲 (L/min.)	225-4500	402-6140 804-12300	測定範囲内であれば任意に設定可能、160L/S対応可	122-3830		
計測原理	層流式	層流式	超音波式	超音波式	渦式	差圧式流量計、アニューバ、ベンチュリ、オリフィス
精度	±1.0%F.S.	再現性±0.35%R.S.直線性±0.5%R.S.	±1.0%R.S.(0.9m/s以上)	±1.0%F.S.		
トレーサビリティ	有り	有り	有り	有り	有り	
システム応答速度	1s	アナログ演算器APZ使用の場合20ms	0.1s	約2s		
逆流対応	不可	不可	可	可	不可	不可
圧力損失(kPa)	発生差圧MAX.65mmAq	MAX.120mmAq	ほぼ0	ほぼ0	約70mmAq	
その他	差圧取り出し部の整流器が存在していない部分の補正を発生差圧の1次式で補正	一般的なラミナの式を使用	ノイズ対策として、超音波を一種のパターンで発信し、信号処理によりノイズ低減、高速応答を実現	一般的な超音波流量計	センサとして圧電素子とサーミスタの2種類があるがいずれも配管振動、外乱ノイズに弱い	エンジンなどの脈動流では、理論的に平方根誤差が発生することが知られており、実際、アニューバではアイドル域で誤差が大きく、ベンチュリでは低流量域で精度が落ちることが報告されている。
長所	差圧での補正	応答が速い	耐ノイズ性、高速性、湿度補正が不要	湿度補正が不要		
短所	応答速度が1.0s、層流式は厳密な流量計測には空気の湿度補正が必要	高速応答がやや疑問、厳密な流量計測には空気の湿度補正が必要	実績なし	外乱ノイズにやや敏感、応答速度が自定数で約2s		

気ガス流量を算出することが出来る。

排気ガス流量計を試作するに当たって、瞬時吸入空気流量計として利用する測定器の選定を行った。表1に各種吸入空気流量計を示す。吸気抵抗が無いこと、高速性、耐ノイズ性、湿度補正が不要であることからパナメトリクス社製の超音波流量計を選定する予定であったが、未だ実績が無く入手に時間がかかることから、ラミナ流量計を選定することとした。ラミナの差圧信号を流量信号に計算する演算器の応答時間は数十msと10Hz以上の応答速度を持っているため、配管系の応答速度の評価を行った。ラミナ（流路抵抗）+バッファタンク（体積）を電気系のRC回路に見立て1次遅れの応答計算をした。室温、流体温度は20℃、流体は空気とした。時定数を計算した結果、11msである。理論値としてラミナ流量計自身の流体遅れは数十msのオーダーであり、信号処理と

あわせても100ms以下と考えられる。従って、当ラミナ流量計の使用においても10Hz以上の応答は得られると考えられる。

瞬時燃料流量計についても利用する測定器の選定を行った。表2に各種瞬時燃料流量計を示す。燃料配管系に可能な限り影響を及ぼさないようにするためには、圧力損失が小さく、精度が高く、応答性の高い燃料流量計が求められる。表中で最も精度が高く圧力損失の低いものはNo.1であるが、応答速度が余り高くないことから、今回はNo.3を選択した。No.3はダイナミックレンジが大きく、応答性が高いところを重点として選択した。

UEGOセンサ自体はNGKで製造しており、空燃比計として堀場製作所が最終的な製品としているので、当製品を使用することとした。直線性は0.02%以内、再現性は±0.01%02以

No.	1	2	3	4	5
型式	FP-2240H+アンプ類	Fp-213S	Model 213/272	XFS-1205	FS-103K-015
メーカー	小野測器	小野測器	東洋コントロールズ	コリサーチ	東京航空計器
測定流量範囲 (L/min.)	0.3~120L/h	0.06~60L/h	0.06~108L/s	0.6~120L/s	0.3~15L/h
計測原理	ピストン式 エンコーダによるパルス カウント	ピストン式 エンコーダによるパルス カウント	ラジアルピストン式 ステータコイルのジェネ レータによる電圧出力	精肉型ギア回転に伴う マグネットによるパルス カウント	ポンプギア回転に伴う パルスカウント
精度	±0.2%R.S.	±0.5%R.S.	±0.5%R.S.	±1.0%F.S.	±0.25%R.S.
トレーサビリティ	有り	有り	有り	有り	有り
システム応答速度	非公開	同左	数ms	数ms	時定数0.5s以下
逆流対応	有り	有り	有り	有り	不明
圧力損失(kPa)	0.01以下(フィルタ圧損を除く)	2以下(ただガソリン60L/h)	9.8以下(軽油60L/h相当)	2(ただし45L/s)	0(サーボモータ回転による圧力調整)
その他	温度、圧力計測有り 分解能0.1mL 超高精度型	分解能0.01mL	再現性0.1%以下 直線性0.05%	外形寸法が小型	入口と出口の圧力が等しくなるように圧力をセ ンシングし、フィードバックを かけサーボモータで ポンプギアを回転させる
長所	実績、精度面では優位 温度、圧力計測有り	分解能が高い	安定性が大 ダイナミックレンジが大 まい(1:1800)	小型軽量	圧力損失が無い
短所	システム全体での応答 が200~300ms	システム全体での応答 性が200~300ms 流量域がMAX60L/h	精度が1の流量計に比 べ±0.5%	精度が±1.0% 低 流量域が0.5L/hまで	流量域が0.3~15L/h狭 い システムの時定数が0.5 s

表2 瞬時燃料流量計

下、応答性は63%応答で60ms以下のデータが得られた。

本装置を用いて、瞬時吸入空気量と瞬時空燃比から燃料流量を求め、別途燃料配管系に取り付けた瞬時燃料流量計の測定値と比較した。各データは0.1secごとのサンプルを行った。電子制御燃料噴射、A/Fストイキ制御方式のガソリンエンジンを利用し、自動変速機を取り付けた状態でベンチに設置して自動運転装置によりモード運転等を行わせた。供試エ

表3 供試エンジンの主要諸元

Engine Type	SOHC,4-Cycle,4-Cylinder In-line
Bore X Stroke(mm)	85 X 95
Displacement(mL)	2156
Compression Ratio	8.8
Fuel Injection System	EFI

ンジンの主要諸元を表3に示す。

試験モードとして、11モード試験を行った。図18に11モード試験で、A/Fから求めた燃料流量と燃料流量計で求めた燃料流量の比較を示す。A/Fから求めた燃料流量は前後合わせて5点による5点平均法により平滑化を行った。立ち上がり部、ピーク位置、ピーク高さとも一致していることが分かる。波形の微細部ではずれている所もあり、その原因については今後の課題である。

また、都市内実走行状態でも計測を行った。図19にその結果を示す。渋滞時間が多いため、アイドル状態が多いが平均化A/F燃料流量と燃料流量計による燃料流量とも図18の場合と同様に合っていることが分かる。微細部分では不一致も見られるので、計測部の位置の違いなどより詳細な補正が必要と考えられるが、基本的には一致していると考えら

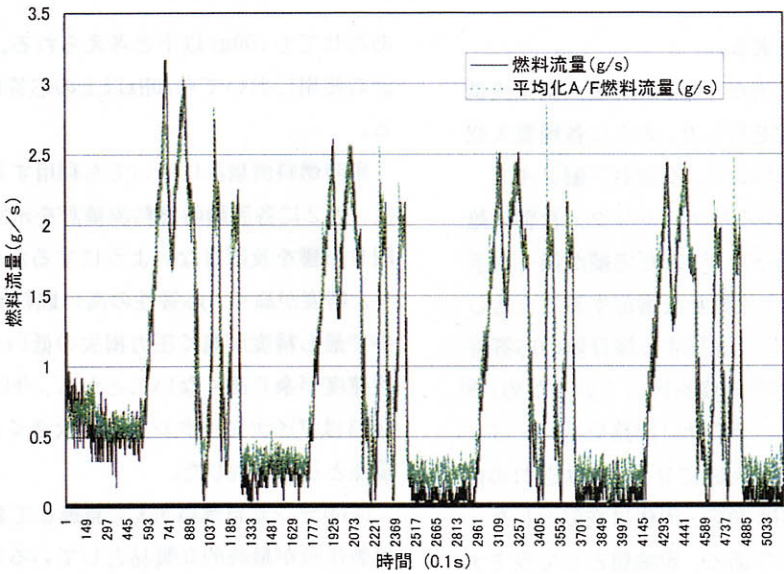


図18 11モード計測例

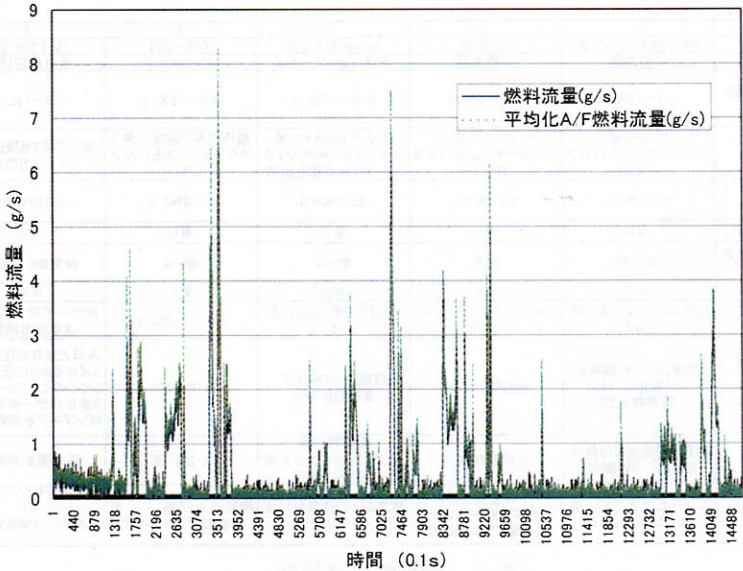


図19 都市内走行計測例

れ、本手法の正しさが認められた。UEGOを使用した計測法は、燃料流量計を用いた手法よりもより高速に計測できる可能性を持つことから、高精度で高速応答の分流希釈が可能になると考えられる。

6. 結 論

従来のCVS法では排気ガス全量を希釈する希釈トンネルを使用するのに対して、その一部を排出ガス流量に比例してサンプリングし希釈するシステムが研究されている。正確な部分比例サンプリングを行うために排出ガスを正確に知る必要があり、今まで多くの手法が検討されているがその測定装置に耐熱性がないなど十分には実用的な手法が未だ得られていない。排気ガス中の CO_2 成分等を高応答で計測し、カーボンバランス法から燃料流量を求め吸入空気量と合わせて高速で計測・演算する間接的な方法では、上記のような従来の手法の課題を克服して排出ガス流量を求める可能性がある。また、UEGOセンサ（空燃比センサ）を用いることにより、安価で高速応答の空燃比計測が直接的に可能であり、本センサでより容易に排出ガス流量を計測可能となる可能性がある。これらの排出ガス流量値を基に正確に一部排出ガスを比例サンプリングすることにより、シャシーダイナモを使った実車両ベースで過渡運転条件にも対応した、排気ガスとPMの排出量を同時計測する次世代の超低濃度排出ガス計測システムが構築出来ると考えられる。

本研究では、カーボンバランス法による計測の手法について、その計測原理と導出アルゴリズムについて検討し、誤差要因と適用可能性について明らかにした。カーボンバランス法を利用した高速 CO_2 計による計測は、高速 CO_2 計の入手が遅れたために次年度に行うこととした。また、UEGOセンサを用いた空燃比計を用いることにより、容易に燃料流量を算出することが可能であることを示した。センサ自身が高温に加熱して動作することから排気ガス温度による影響も無い優れた方法であることを示すとともに、センサの動作原理と誤差要因を明らかにした。実際に燃料流量データを用いて微細挙動以外では基本的にデータが一致することを示した。今後、より詳細な誤差要因を調べ、実用的な計測法の確立を図る必要がある。

7. 参考文献

- [1]Fagle,W.S. et al., Exhaust Gas Analysis as a Tool for Measuring Fuel-Air Ratios, SAE Paper 670483
- [2]細井、排気組成から得られる情報、日本自動車研究所研究資料第1号、平成3年12月編

[3]Spindt,R.S., Air-Fuel Ratios from Exhaust Gas Analysis, SAE Paper 650507

[4]Shigeo Soejima and Shunzo Mase, Multi-Layered Zirconia Oxygen Sensor for Lean Burn Engine Application, SAE Paper 850378

[5]Tessho Yamada, et. al., Universal Air-Fuel Ratio Heated Exhaust Gas Oxygen Sensor and Further Applications, SAE Paper 920234