

# ⑦ 車載計測システムによる環境負荷量の計測とその増大要因の解析

—マップ法を用いた排出ガス流量測定手法の検討—

環境研究領域      ※佐藤 進      山本 敏朗      小川 恭弘  
株式会社司測研      飯塚 豊

## 1. まえがき

自動車から排出される有害物質は、排出ガス規制の強化などを背景として、その排出総量が低減されてきている。一方で、NOx 法特定地域における環境基準達成状況としては、改善傾向は見られるものの依然として厳しい状況にあることから、沿道での局所的な排出ガス汚染は未だに改善されていない。局所での汚染実態を把握するためには、路上での実走行時に自動車から排出される有害物質の定量的評価が必須であり、そのためには車載型の計測システムを構築、開発することが必要である。

近年、計測技術の進歩により、車載型の排出ガス分析装置が開発されている。この装置では、排出ガス中の大気汚染物質の排出濃度を高精度で計測することが可能である。しかし自動車からの環境負荷は排出質量で評価することが重要である。排出濃度から排出質量への換算には排出ガス流量の測定が必須となる。

排出ガス流量については様々な測定手法が検討されてきたが<sup>(1)(2)</sup>、一長一短がある。例えばマスフローメータによる計測手法や超音波法による計測などが挙げられるが、車載計測用の手法としては使用が困難である。またピトー管を排気管後端部に接続し流量を計測する手法<sup>(3)(4)</sup>もあるが、アイドリングなどの低流量域で精度が低く、またテールパイプが湾曲している場合や二本に分離している場合もあり、取り付けに関して課題を抱える。

本研究では「マップ法」という手法に着目し排出ガス流量の測定手法に関する検討を行った。この方法は吸入空気流量の推定値を用いて排出ガス流量を求めるとの手法であり、この手法が確立されれば車両への装置接続が不要となるため取り付けに係わる課題が解決される。本報ではガソリン乗用車を対象としてマップ

法による排出ガス流量の測定手法の検証を行ったので報告する。

## 2. マップ法による排出ガス流量の算出方法

マップ法では、まず吸入空気流量計を使用して吸入空気体積流量  $Q_{ref}$  を計測する。一方で吸気管圧力  $P_b$ 、大気圧  $P_a$ 、エンジン回転数  $Ne$ 、大気温度  $T_a$ 、吸入空気温度  $T_{in}$ 、エンジン行程容積  $V_m$  の値を利用して、吸入空気体積流量の推定値  $Q_a'$  を算出する (式 1)。計測値  $Q_{ref}$  と推定値  $Q_a'$  を比較して吸入空気体積流量の補正係数  $k$  を求める (式 2)。この補正係数  $k$  のマップを作成して、エンジン回転数  $Ne$ 、吸気管圧力  $P_b$  の関数として吸入空気体積流量  $Q_a$  を算出する (式 3)。次に  $Q_a$  と空気密度  $\gamma_a$  から質量流量  $G_a$  に変換し (式 4)、さらに空燃比  $AF$  を加えて排出ガス質量流量  $G_{ex}$  を求める (式 5)。最後に  $G_{ex}$  と排出ガス密度  $\gamma_{ex}$  から排出ガス質量流量を算出する (式 6)。ここで排出ガス密度  $\gamma_{ex}$  は、ガソリンの H/C 比を考慮して空燃比  $AF$  に対する排気の組成変化を化学的に計算し、 $AF$  の関数として算出する。補正係数マップと空燃比が得られれば吸気管への装置接続が不要となり、装置接続による流量干渉を受けずに排出ガス流量の計測が可能となる。

$$Q_a' = \frac{P_b}{P_a} \cdot \frac{Ne}{2} \cdot \frac{T_a}{T_{in}} \cdot V_m \quad (式 1)$$

$$k = \frac{Q_{ref}}{Q_a'} \quad (式 2)$$

$$Q_a = \frac{P_b}{P_a} \cdot \frac{Ne}{2} \cdot \frac{T_a}{T_{in}} \cdot V_m \cdot k \quad (式 3)$$

$$G_a = \gamma_a \cdot Q_a \quad (式 4)$$

$$G_{ex} = G_a \left( 1 + \frac{1}{AF} \right) \quad (式 5)$$

$$Q_{ex} = \frac{G_{ex}}{\gamma_{ex}} \quad (式 6)$$

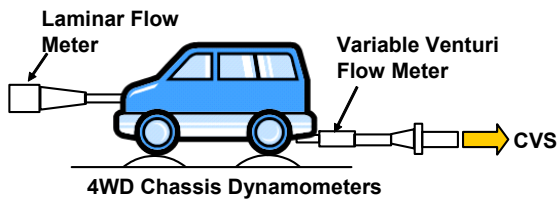


図1 実験システム

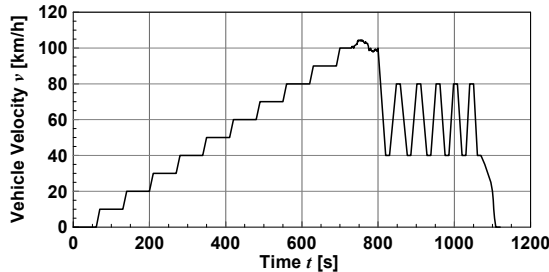


図2 補正係数マップ作成に使用したモード

ここで、

$Q_a'$ : 吸入空気体積流量の推定値[m<sup>3</sup>/min],  $Q_{ref}$ : 吸入空気体積流量の計測値[m<sup>3</sup>/min],  $Q_a$ : 吸入空気体積流量[m<sup>3</sup>/min],  $Q_{ex}$ : 排出ガス体積流量[m<sup>3</sup>/min],  $G_a$ : 吸入空気質量流量[g/min],  $G_{ex}$ : 排出ガス質量流量[g/min],  $P_a$ : 大気圧[kPa],  $P_b$ : 吸気管圧力[kPa],  $T_a$ : 大気温度[K],  $T_m$ : 吸入空気温度[K],  $N_e$ : エンジン回転数[rpm],  $V_m$ : エンジン行程体積[m<sup>3</sup>],  $k$ : 吸入空気体積流量の補正係数[-],  $\gamma_a$ : 空気密度[g/m<sup>3</sup>],  $\gamma_{ex}$ : 排出ガス密度[g/m<sup>3</sup>],  $AF$ : 空燃比[-]

### 3. 試験方法

試験車として排気量 2488cc の三元触媒ガソリン乗用車 (4 速 AT) を使用した。四駆シャシダイナモメータ上で走行させ、ラミナ流量計で吸入空気体積流量を高精度に測定した。排出ガス体積流量はマップ法で算出すると同時に、可変ベンチュリ式流量計により測定し両者の測定値を比較した。この可変ベンチュリ式流量計は、内部の差圧を一定に保つようにベンチュリ部分の断面積が変化する構造になっており、通常のベンチュリ式流量計で見られるような低流量域での計測精度の低さを克服したものである。本研究では、この可変ベンチュリ式流量計の測定値  $Q_{var}$  を基準値として使用した。図1に実験システム図を示す。

実験にあたり、吸入空気体積流量の補正係数  $k$  のマップを作成するためのモードを作成した。図2にこの走行モードの速度パターンを示す。この走行モードについて三つの条件で走行を行った。すなわち、条件 I : D レンジ固定 Over Drive On, 条件 II : D レンジ固定 Over Drive Off, 条件 III : 2 レンジ固定の三条件であ

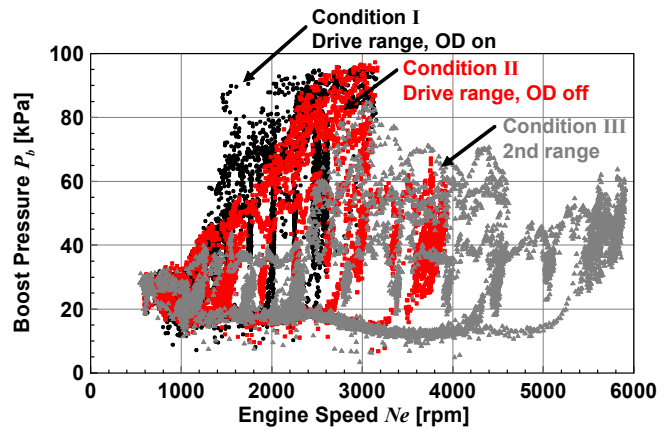


図3 条件 I, II, III のエンジン使用領域

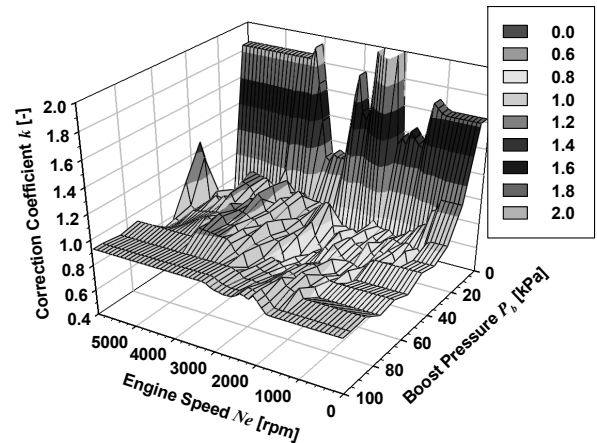


図4 過渡条件区別のない補正係数マップ

る。三条件の走行時のエンジン使用領域を図3に示す。個々のプロットは 0.1s ごとのデータを示している。図より上記の三条件で走行を行うことで、エンジン使用領域内の広範囲をカバー出来ていることが分かる。またこのような走行を行うことで、各ギヤでの車速・エンジン回転数の関係性を把握することができる。この使用領域において吸気管圧力  $P_b$  を 10kPa 毎、エンジン回転数  $N_e$  を 100rpm 毎に分割してメッシュを作成し、それぞれのメッシュに含まれるデータについて  $P_b$ ,  $N_e$ , 補正係数  $k$  の平均値を算出し、補正係数マップを作成した。

### 4. 試験結果

#### 4. 1. 過渡条件区別のない単一補正係数マップ使用時の排出ガス流量推定結果

前章で説明した手法により作成された補正係数  $k$  のマップを図4に示す。これは条件 I, 条件 II, 条件 III を走行した際に得られた全てのデータを統合して同じ処理を行い、補正係数を求めたものである。つまり過渡条件の区別等は何も行っておらず、排出ガス流量を算出に使用した補正係数マップは一つである。マッ

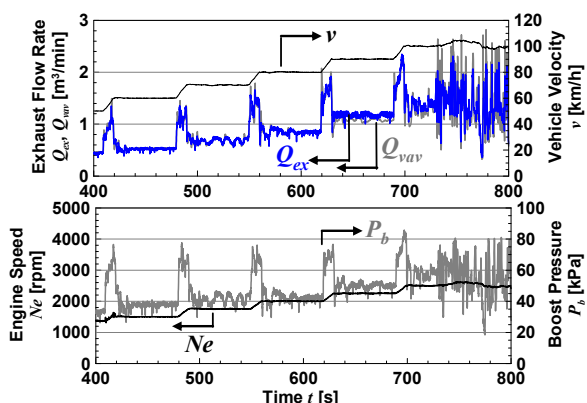


図5 排出ガス流量の比較  
(条件I: 過渡条件区別なし)

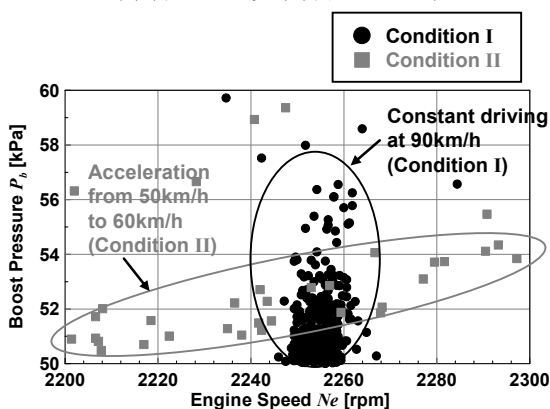


図6 エンジン使用領域の拡大図

中で補正係数が1を超える部分が存在するが、これは加速条件において吸入空気の流速が高くなり、吸気管内に圧力分布が生じたためと考えられる。

図4のマップを使用して排出ガス流量を算出した結果を図5に示す。なお検証に当たって条件Iの計測結果を用いた。図に示したのは、マップ法で算出した排出ガス流量  $Q_{ex}$ 、可変ベンチュリ式流量計の計測値  $Q_{av}$ 、車両速度  $v$ 、エンジン回転数  $Ne$  および吸気管圧力  $P_b$  の時間履歴である。 $Q_a$  の値は  $Q_{av}$  の値に対して、60km/h 定常、70km/h 定常の部分ではトレースできている。しかし 90km/h 定常、100km/h 定常、また高速走行部分での乖離が大きい。

#### 4. 2. 単一補正係数マップ使用時の問題点

図4のような補正係数マップ一つで排出ガス流量を計算することには、いくつか問題点が存在する。一つは過渡条件の区別がされないことである。車両が加速される部分や、そのときにギヤが変化してエンジン回転数が瞬間的に増加する部分といった過渡条件は、排出ガス流量を算出する際には区別すべき部分である。もう一つは、補正係数マップを作成する際に、同じエンジン回転数領域、吸気管圧力の領域に、異なる走行

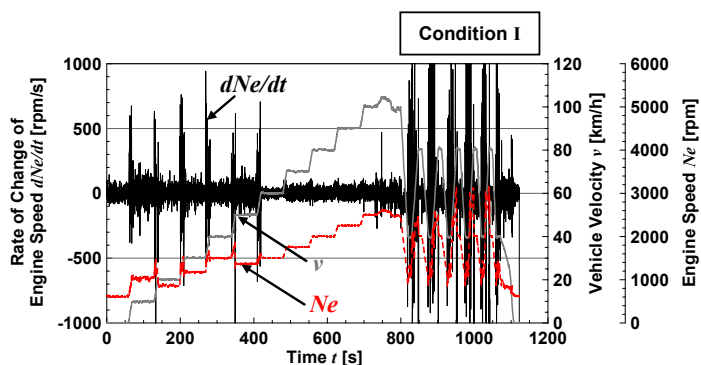


図7 条件Iでのエンジン回転数時間変化率履歴

パターンのデータが含まれることである。その一例として、図5より 90km/h 定常部分について解析した。図5より 90km/h 定常部分のエンジン使用領域を見ると、 $P_b=50\sim 60\text{kPa}$ 、 $Ne=2200\sim 2300\text{rpm}$  の範囲である。この範囲の元のデータを図3からピックアップしたのが図6である。このエンジン使用領域の範囲には、条件Iの 90km/h 定常走行部分のデータと、条件IIでの 50~60km/h の加速部分のデータが含まれている。 $P_b=50\sim 60\text{kPa} \cdot Ne=2200\sim 2300\text{rpm}$  のメッシュにおける補正係数  $k$  を算出する過程で、定常走行部分と加速部分のデータを両用していることになる。

#### 4. 3. 過渡条件区別のある複数のマップを使用した場合

前節で述べた問題点を解決できるマップを作成するために、エンジン回転数の時間変化率という指標を導入した。図7に示したのは条件Iの結果について、エンジン回転数変化率  $dNe/dt$  をプロットしたものである。これを見ると、0km/h~100km/h までの履歴の中で、各速度での定常走行部分ではエンジン回転数変化率がおよそ  $\pm 200\text{rpm/s}$  の範囲に入っており、その他の加速・減速部分では  $200\text{rpm/s}$  以上あるいは  $-200\text{rpm/s}$  以下になっている。ここではスペースの関係上、条件Iの結果のみを示したが、条件II、条件IIIの結果についても同様の結果となっている。

この考察結果を受けて、図3で示した条件I、条件II、条件IIIの全データについてエンジン回転数増加領域 ( $200\text{rpm/s} \leq dNe/dt$ )、エンジン回転数一定領域 ( $-200\text{rpm/s} \leq dNe/dt < 200\text{rpm/s}$ )、エンジン回転数減少領域 ( $dNe/dt < -200\text{rpm/s}$ ) の三つの領域に分けてデータを分類し、分類したそれぞれについて補正係数  $k$  の値を算出して三つのマップを作成した。図8にエンジン回転数増加領域、エンジン回転数一定領域、エンジン回転数減少領域の三つのマップを示す。エンジン回

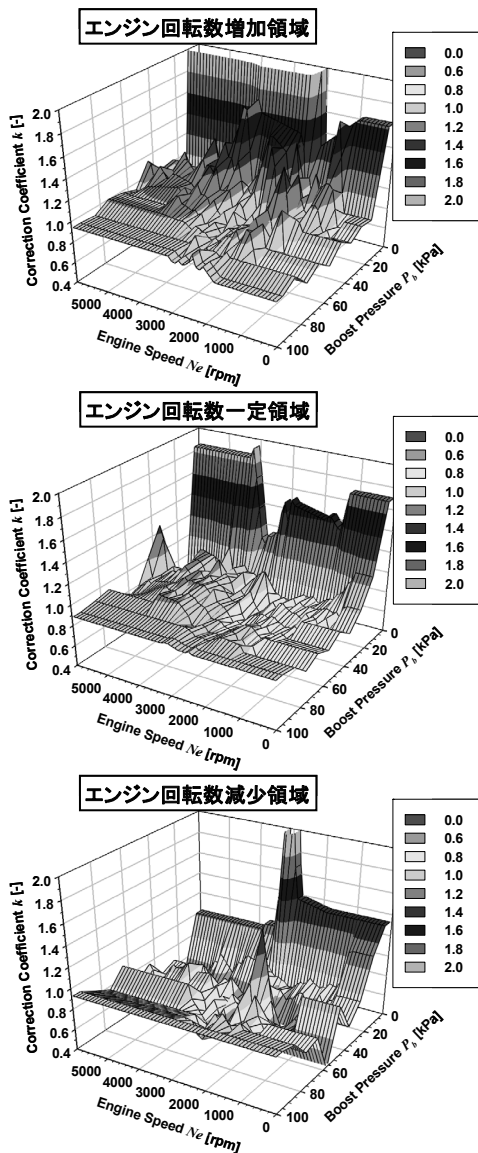


図8 過渡条件区別をした三つの補正係数マップ

回転数の変化率という指標で過渡条件の区別を行うことで、同じエンジン使用領域でも車両の加速時、定常走行時を分けることが可能となり、またギヤ変化時に見られる瞬間的なエンジン回転の変化も区別することが可能となるため、前節で述べた問題点を同時に解決することが可能である。車両が異なる場合、この $\pm 200\text{rpm/s}$ という閾値は変わることになるが、エンジン回転数の時間変化率を用いて過渡条件を区別する手法は一般性を持つ。

この三つの補正係数マップを使用して、排出ガス流量を算出した結果を図9に示す。検証に用いたのは4.1.と同じく、条件Iでの計測結果である。図5において $Q_{ex}$ と $Q_{vav}$ の値の乖離が大きかった90km/h定常について見ると、差が小さくなっており、過渡条件区別を行ったマップ法による排出ガス流量の推定精度

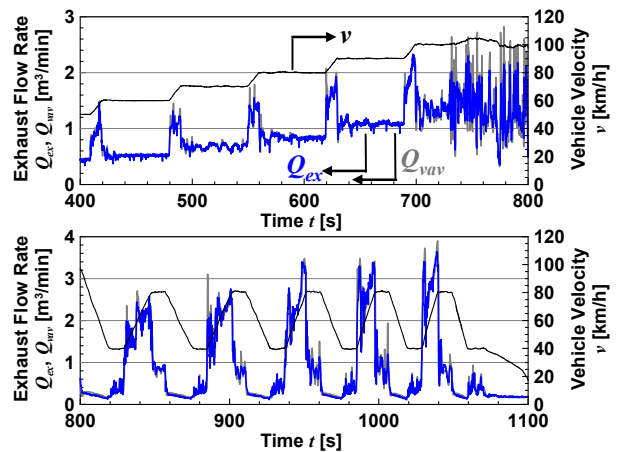


図9 排出ガス流量の比較  
(条件I: 過渡条件区別あり)

が全域に渡って向上したことが分かる。ただし $t=700\sim 800\text{s}$ のような高速走行時、つまり吸気管圧力の変動率が高い領域での流量推定については今後の課題である。

## 5. まとめ

本研究では車載型計測システムに使用可能な排出ガス流量の測定手法としてマップ法に着目し、ガソリン乗用車を対象として、その検証を行った。

- (1) 低速から高速までの定常走行、および加減速を含む走行モードを作成し、そのモードを各ギヤに固定して複数回走行して広いエンジン使用領域をカバーすることで、吸入空気流量の補正係数マップを作成し、排出ガス流量を推定する手法を提案した。
- (2) 過渡条件区別のない単一の補正係数マップを使用して排出ガス流量を推定した場合、高い速度での定常走行時に流量の推定値が基準計測値に対して乖離する現象が確認された。
- (3) エンジン回転数の時間変化率という指標を導入することで過渡条件を区別し、それに応じて複数の補正係数マップを用意することで(2)で述べたような現象は解決され、排出ガス流量の計測精度を向上させることが可能である。これは車両によらず一般性を持つ手法である。

## 参考文献

- (1) N. Kihara, 他5名, SAE Paper 2000-01-1141 (2000)
- (2) M. Gautam, 他5名, SAE Paper 2001-01-3643 (2001)
- (3) 山本敏朗, 他2名, 自動車技術会講演前刷集, No.66-06, pp.5-8 (2006)
- (4) 中村博司, 他3名, 日本機械学会論文集 (B編), Vol.70, No.695, pp.1673-1678 (2004)