

HotSpot分析のための実走行における自動車排出ガス原単位推定に関する基礎的研究*

Analysis of NOx and PM Emission from Automobile by On-board Monitoring*

古屋秀樹^{**}, 石田東生^{***}, 金山直司^{****}, 岡本直久^{***}

By Hideki FURUYA^{**}, Haruo ISHIDA^{***}, Tadashi KANAYAMA^{****} and Naohisa OKAMOTO^{***}

1. 本研究の背景・目的

近年、自動車排出ガスを起因とする大気環境問題が深刻化し、その中でも川崎、尼崎等の大気汚染訴訟に関連して、局所地域への対策が求められている。そのためには、自動車の排出ガス量を推計する必要があり、特に車両挙動の把握とそれに対応した排出ガス原単位構築が必要不可欠である。しかし、一般的に用いられている排出ガス原単位は平均速度毎に算出されており、加速度やエンジンへの負荷を考慮することが難しい¹⁾。さらに、道路縦断勾配、高速域、積載量の未考慮といった問題が存在する。一方、その計測に不可欠な観測機材は、近年低価格化、小型化により、車両に機材を搭載した測定が可能となった。

そこで、本研究では、局所地域における排出ガス量推計手法の確立を念頭として、その基礎となるNOxおよびPM(Particulate Matter) 排出量原単位の推計を目的とする。

2. 車載調査の実施

前述した排出ガス量への影響が想定される項目を考慮するため、最大積載量4t のディーゼル車(いすゞフォワード[平成6 年規制]) をベースにした散水車にGPS , 排出量センサー, 排気流量計等を設置し、実際の道路を走行した。この時、排出量センサーで得られた0.1 秒毎の濃度データ(g/m^3) と排気流量計のデータ(m^3/min) から単位時間当たりの排出量(g/min) を得た。走行ルートは、一般道と高速道路が混在する2 ルートを設定し、すべての速度域

において速度・加速度と排出量の間係を取得する(表-1)。また車両総重量に変化を与えるため、散水車のタンク内の水を3 パターン設定した(空載[3270kg], 半載[5270kg], 定載[7270kg])。

さらに気圧計から得られる高度情報から道路縦断勾配を算出し、排出量との関係も把握を行う。なお、この調査であるが、土木学会ITS小委員会(WG2) および、ITを用いた交通データに関する研究会(環境WG)により実施された。

表-1 ルート別・積載量別調査回数/走行時間

	空載	半載	満載	合計
東京 ルート	18 / 約14h	16/ 約13h	17/ 約13h	51 / 約40h
横浜 ルート	13 約9h	4/ 約3h	4 / 約3h	21 / 約15h
合計	31 約23h	20/ 約16h	21 / 約16h	72 / 約55h

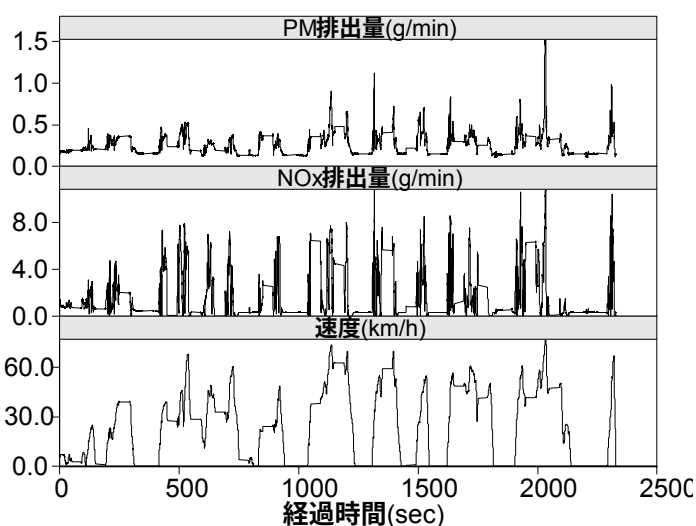


図-1 排出ガス量・速度の時間推移図

3. 排出ガス原単位の推定の考え方

図-1 は、排出ガス量の時間推移を示したものである。同一速度でも排出量が異なっており、他の影響

*キーワード: 排出ガス原単位, NOx, PM, 車載調査

** 正会員, 工博, 東洋大学国際地域学部国際観光学科
(Phone.0276-82-9158, E-mail: furuya@itakura.toyo.ac.jp)

*** 正会員, 工博, 筑波大学社会工学系

**** 正会員, 修士(環境科学), パシフィックコンサルタンツ(株)

要因の存在が考えられる。NO_xは、エンジン・シリンダー内の温度上昇、すなわちエンジンの高回転、高負荷・高トルクにともない発生量が増加する。一方、PMの発生は上記に加え、シリンダー内の不安定な燃焼状態によるものが大きいとされ、負荷の急激な変化も一因となる^{2),3),4)}。そこで、本研究ではこれらを考慮し、以下に示す4つの原単位モデルを構築した。

1) 速度・加速度モデル

速度から排出量を推定した論文が従来多く見られること、シミュレーションモデルへの適用容易性の観点から、説明変数に速度・加速度を用いて1秒毎の排出ガス量を説明するモデルである。

2) エンジン負荷モデル

先に述べたように、排出ガス発生量を規定する「エンジン回転数・エンジン負荷」の概念を導入したモデルである。そのエンジン負荷であるが、瞬間負荷(R_t)、抵抗変化量(R_d)で表現することができる。ここで、瞬間負荷とは車両にかかる抵抗力(転がり抵抗(R_r)、空気抵抗(R_f)、勾配抵抗(R_g)の和)である。また、抵抗変化量に関して、加速抵抗の値が十分大きいため、近似式を用いて算出を行った。以上を式で表すと、次のようになる。

$R_r = \mu \cdot W \cdot g \cdot l \quad \cdots(1)式$

$R_f = (\rho \cdot Cd \cdot A \cdot V_t^2 / 2) \quad \cdots(2)式$

$R_g = l \cdot W \cdot g \cdot \sin \theta \quad \cdots(3)式$

$R_a = W \cdot v_t^2 / 2 \quad \cdots(4)式$

$R_t = R_r + R_f + R_g \quad \cdots(5)式$

$R_d = R_a^t - R_a^{t-a} \quad \cdots(6)式$

$= W \cdot (v_t - v_{t-1})^2 / 2 \quad \cdots(7)式$

R_E : エンジン負荷(瞬間値)(N・m)
R_D : エンジン負荷(差分)(N・m)
R_r : 転がり抵抗(N・m) g : 重力加速度(9.8m/s ²)
R_f : 空気抵抗(N・m) μ : 転がり抵抗係数
R_g : 勾配抵抗(N・m) ρ : 空気密度(kg/m ³)
R_a : 加速抵抗(N・m) Cd : 空気抵抗係数
W : 車両総重量(kg) A : 前面投影面積(m ²)
θ : 道路勾配(%) v_t : 時刻 t における速度(m/sec)
l : 単位時間当たりの走行距離(m)

2-1) エンジン負荷モデル(平均化モデル)

調査データは0.1 秒間隔で取得しているため、速度変化と排出ガス量の間にずれが生じている可能性がある。また、速度変化にノイズの含有が考えられるため、実測データを1.0 秒間隔で平均化した。

2-2) エンジン負荷モデル(対数化モデル)

PMに関して、総抵抗、抵抗変化量、回転数が増加するに従い、排出量が指数関数的に増加する傾向が見られる。そこで、1.0秒間隔で平均化を行ったデータを用いて、排出量を対数変換し、排出ガス原単位の作成を行った。

3)抵抗モデル

論文^{1),5)}に見られるように、ビデオカメラ等を用いて外部観察により、車両挙動(速度・加速度)を取得する場合、総抵抗および抵抗変化量は、車体総重量が仮定されれば速度・加速度より推定可能であるが、エンジン回転数の推定は困難である。そこで、エンジン回転数を除いた排出原単位の推定を試みる。従って、転がり抵抗(R_r)、空気抵抗(R_f)、勾配抵抗(R_g)、抵抗変化量(R_d) を説明変数とし、排出ガス量の推定を行う。また、用いたデータであるが、PMでは1.0秒間隔で平均化後、PM排出量を対数変換を行ったものを、NO_xに関しては、1.0秒間隔で平均化したものを用いた。

4. モデル推定結果

表- 2 はPM排出量原単位の推定結果である。いずれのモデルも重回帰式を用いた。速度、加速度モデル、平均化モデルの定数項の符号がマイナスとなっているが、決定係数、t値は良好な値を示している。

表- 2 PM排出原単位モデル推計結果

PM		速度・加速度モデル (Ln(g/min))	エンジン負荷モデル		抵抗モデル (Ln(g/min))
			平均化モデル (g/min)	対数化モデル (Ln(g/min))	
定数項		-1.998 (-5325.956)	-9.157E-02 (-72.635)	-2.563 (-2014.070)	-1.865 (-1628.986)
速度	(km/h)	2.334E-02 (2282.389)			
加速度	(km/h/sec)	1.160E-01 (878.599)			
エンジン回転数	(rpm)		3.027E-04 (229.315)	9.576E-04 (714.760)	
総抵抗	(N-m)		2.895E-08 (125.722)	5.716E-6 (238.546)	
抵抗変化量	(N-m/ 0.1sec)		3.358E-06 (158.388)	5.716E-06 (238.546)	
転がり抵抗	(N-m)				9.955E-07 (98.940)
空気抵抗	(N-m)				9.417E-06 (244.840)
勾配抵抗	(N-m)				9.835E-06 (310.440)
サンプル数		1,993,604	199,428	187,614	187,614
R ²		0.727	0.652	0.912	0.761
平均平方誤差(g/sec)		0.0067	0.0037	0.0037	0.0053

表-3、図-2に各モデルの R^2 値、平均平方誤差(RMSE)およびサンプル数を示す。図-2では、平均平方誤差に関して、目盛りを上下逆にしていて、 R^2 値・平均平方誤差とも、右上に行くほど、精度が高い。また、参考値として、ギア変速時と想定される観測値や異常値を除く前の速度・加速度モデルを、初期値として図に示す。この図より、PMでは、対数化モデルが、NOxでは、抵抗モデルが精度良いことが分かる。

(1)勾配条件が与える排出量へ影響

局所地域における排出ガス量推計を考えた場合、積載量や勾配による感度分析を通じた包括的評価が必要と考えられる。そのため、勾配による感度分析を行った。速度・加速度モデルは勾配を考慮する変数がないため、勾配によらず排出量は一定である。また、平均化モデル、対数化モデルでは、定載・勾配10%のケースで、排出量が1%増加する結果となった。平均速度毎に算出している原単位であるため、比較には注意が必要であるが、環境アセスメント等で用いられている勾配1%当たりのPM増加率⁶⁾は、1.21であり、それと比較すると若干増加率が低いと考えられる。一方、抵抗モデルでは、半載(5270kg)時、勾配1%あたり、PM排出量約10%増加となった。これらの結果が導出された理由として、本実験の走行ルート特性から、PM排出に関してエンジン回転数の寄与度が勾配抵抗に対して大きかったためと考えられる。先の文献6との対比から、路側観測では重量が計測できない恐れがあるものの、精度高い排出量推計の観点から、抵抗モデルが構築したモデルの中では妥当と判断した。図-4は、60km/hの一定速度で走行した場合、勾配0%と比較したPM排出量の増減率である。これより、積載量が多いほど、勾配条件による影響が大きく、より多く排出していることが分かる。なお、この抵抗モデルについての全走行における実績値と推定値の比較(PM)を図-4に示す。排出量が多い場合に、若干外れ値が大きくなっているものの、高い精度で排出量を推定していることが分かる。

(2)交差点付近の排出ガス量の再現性について

(1)で適当な感度を示した抵抗モデルを用いて、

表-3 PM, NOx排出原単位モデルの決定係数等

		R^2	RMSE	サンプル数
P	速度・加速度モデル	0.727	0.0067	1,993,604
	平均化モデル	0.652	0.0037	199,428
	対数化モデル	0.912	0.0037	187,614
	抵抗モデル	0.761	0.0053	187,614
N	速度・加速度モデル	0.571	0.023	1,993,604
	平均化モデル	0.663	0.018	199,428
	対数化モデル	0.558	0.021	187,614
	抵抗モデル	0.731	0.016	187,614

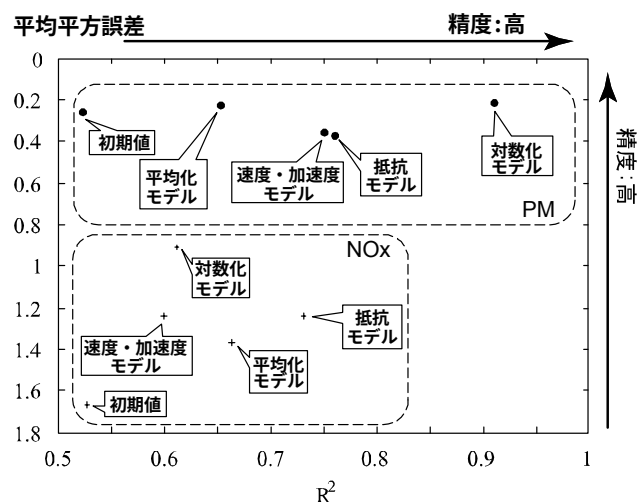


図-2: R^2 値および平均平方誤差の比較

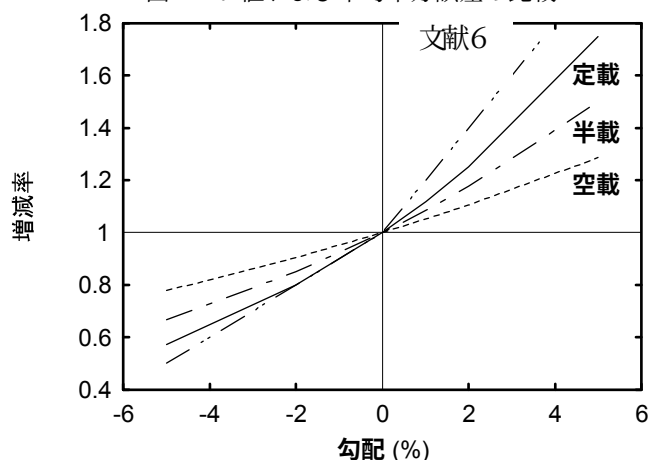


図-3 勾配による排出量の変化

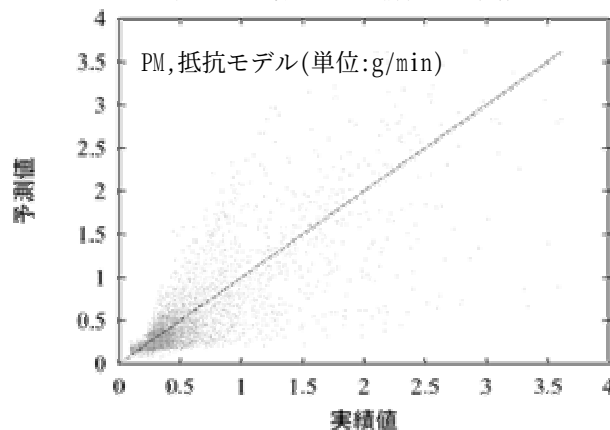


図-4 実績値と予測値との関連性(1点:1秒)

交差点を含むショートトリップ(走行時間:200秒, 走行距離:1405m)における排出ガス量の実績値と予測値の比較を図-5に示す。すべての速度域において、精度よく推定していることが分かる。

(3) 調査走行別実績値と推定値との関係

次に、走行距離を拡大し、1調査走行当たりの総排出量実績値と推定値の比較を行う。また、比較対象として、速度・加速度モデルにおける推定値を示す(図-6)。

この結果、PMに関しては、 R^2 値がほぼ同じであるため、抵抗モデル、速度・加速度モデルとも同程度の精度で推定していることが分かる。また、NOx では、 R^2 値が上昇しているため、推定精度も高くなっている。

5. 本研究の結論と今後の課題

本研究から、加速時、高負荷時に多くのNOx, PM が排出されていることが分かった。また、PM に関しては、対数線形式を適用し、そして、集計時間の調整により、データをクリーニングすることで、決定係数の高いモデルを構築することができた。その結果、勾配条件が及ぼす排出量への影響を明確にすることができ、さらに、本研究で推定を行った排出量原単位の適用可能な範囲を明確にすることができた。

しかしながら、本研究では対象車両が1台のみであるため、他の車両を含めた原単位設定、ならびに交通流シミュレーションの適用、および大気拡散モデル等を用いた着地濃度への影響分析が今後の課題として考えられる。また、構築したモデルの決定係数はきわめて高いものとは言えず、さらにPMとNOxの排出特性の差異を考慮した改良が必要と考えている。さらに外部観測による排出量推計のためには、速度加速度モデルの適用性が高く、その改善も重要と考えられる。

参考文献

- 1) 古屋秀樹, 金山直司, 石田東生, 岡本直久: 交差点における排出ガス量推計のための車両挙動特性分析土木計画学研究・論文集Vol.19 NO.2, 2002
- 2) 中島 徹: 自動車からのPM排出の実態, ENGINE TECHNOLOGY, Vol.2, No5, pp.13-18, 2000

3) 佐野妙子: 燃焼における化学反応, ENGINE TECHNOLOGY,

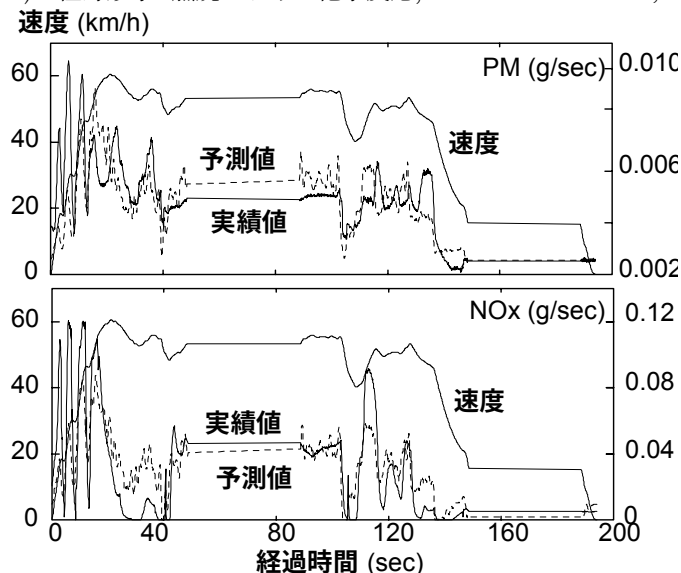


図-5 局所地域における排出量の推計

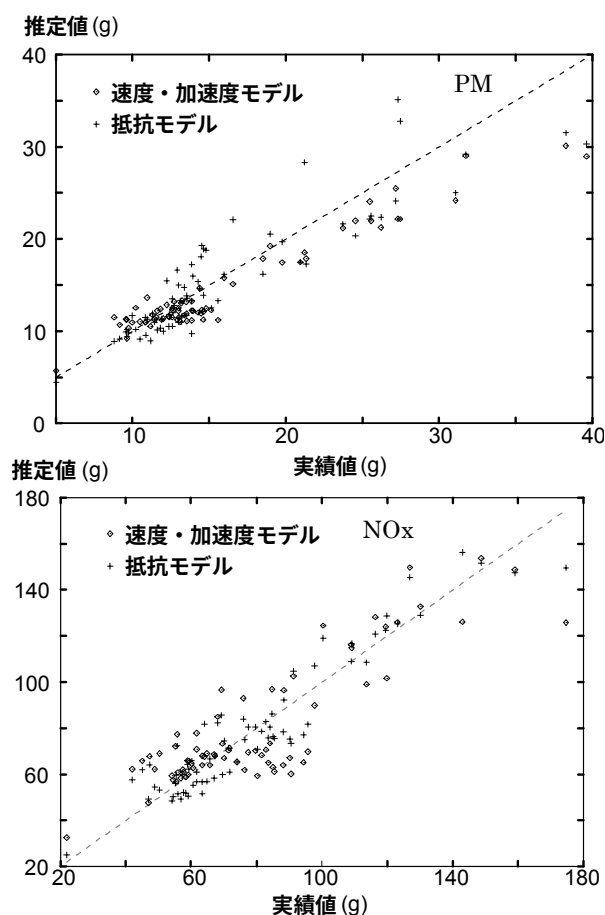


図-6 調査走行別実績値との相関

Vol.1, No5, pp.92-96, 1999

- 4) 金子靖雄: 内燃機関基礎工学, 山海堂, 平成9年
- 5) 赤羽弘和: 複数の高詳細度ビデオカメラによる車両軌跡の高詳細連続観測システムの開発, 第37回土木計画学シンポジウムテキスト, pp.89-96, 2001
- 6) 財団法人道路環境研究所: 道路環境影響評価の技術手法, 財団法人道路環境研究所, 2000