

直線近似された車両軌跡からの排出量推計手法*

Estimation Method for Vehicle Emission from Piecewise Linear Vehicle Trajectories*

小根山裕之**・大口敬***・赤羽弘和****・桑原雅夫*****

By Hiroyuki ONEYAMA**・Takashi OGUCHI***・Hirokazu AKAHANE****・Masao KUWAHARA*****

1. はじめに

大気汚染の影響は交差点周辺や渋滞部など頻繁に停止，発進を繰り返し，速度変動が大きいところで顕著になると言われており，このような速度変動の影響を考慮して空間的な排出強度の分布も含めたより適切な排出量の評価が求められている．一方，このような複雑な交通状況を再現できるツールとして多くの交通シミュレーションモデルが開発されており，シミュレーションモデルと排出量推計モデルを組み合わせることで様々な交通制御，交通運用施策などの環境への影響評価を行うニーズも高いと思われる．

しかし，シミュレーションモデルを用いて速度変動を考慮した排出量推計を行う場合，得られる車両軌跡などのアウトプットでは排出量を推定する際に必要となる速度変動の要素が十分に再現されているとは言いがたい．例えば，リンクの容量と Q-K の関係に基づき車両を移動させるようなモデルでは，リンクの容量管理とその再現に重点が置かれ，微細な加減速挙動は再現されない．一方，車両のミクロな追従関係に基づき個々の車両を移動させるいわゆるミクロモデルでは，組み込まれた追従モデルの範囲内で車両の微細な速度変動も再現されるが，排出量推計という観点から十分な再現性を有しているかは必ずしも定かではない．

本稿では以上のような観点を踏まえ，シミュレーションモデルである程度再現性が確保されることが期待される車両の流入・流出時刻，停止位置，停止時間などの情報のみから生成され

る車両軌跡，すなわち直線近似された車両軌跡から速度変動の要素を考慮した排出量を推計する手法を提案する．具体的には，これらの車両軌跡に別途の観測から得られた排出量推計指標への変換モデルを組み合わせることにより速度変動要素も含めた排出量の推計指標を算出しようとするものである．併せて交差点での車両軌跡観測により，変換モデルの導出及び排出量の試算を行った．

2. 排出量推計の考え方

2.1 基本的考え方

まず，ここで対象としている直線近似された車両軌跡について簡単に説明する．図1の time-space 図の点線は実際の車両軌跡を表しているとする．この車両軌跡について，対象範囲への流入時刻(t_A)，流出時刻(t_B)，停止位置(X)，停止位置前後の定常走行速度(V_A, V_B)が再現されている場合，この車両軌跡は実線で示されたような直線で近似された車両軌跡で表現される．本研究では，このようなレベルで再現されている車両軌跡が得られている場合を想定している．

このような車両軌跡から排出量の空間分布を推計する手法の基本的考え方を図2に示す．シミュレーションモデルなどにより推計された走行軌跡に基づき，速度変動を考慮できる排出量推計モデルを適用して排出量の空間分布を推計

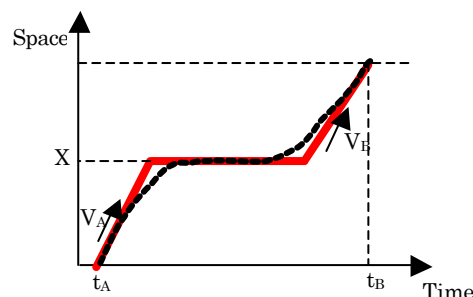


図1 実際の車両軌跡(点線)と直線で表現した軌跡(実線)

*キーワード: 大気汚染, 排出量, 車両軌跡, 速度変動

**正員, 工修, 東京大学生産技術研究所

***正員, 博士(工学) 東京都立大学大学院

****正員, 工博, 千葉工業大学

*****正員, Ph.D, 東京大学生産技術研究所

(連絡先: 東京都目黒区駒場4-6-1,

TEL03-5452-6098, FAX03-5452-6420)

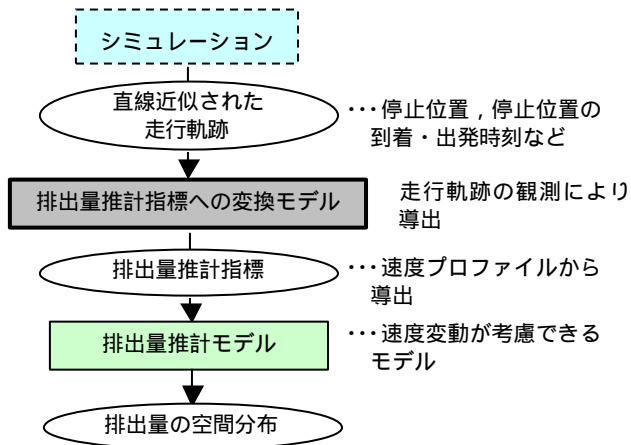


図2 排出量推計の基本的考え方

するのが基本的な流れである。しかし、直線近似された軌跡からは停止地点前後の加減速の影響、走行中における種々の要因（車両間の相互作用による影響、駐車車両などの交通攪乱要因）による速度変動の要素が再現できないため、適切に排出量の推計指標（排出量モデルのインプット）が設定できない。

そこで、排出量推計指標への変換モデルを作成し、直線近似された走行軌跡から排出量推計指標を推計する。排出量推計指標は速度プロファイルから導出されるため、この変換モデルは実現象として観測された詳細な走行軌跡の分析により導出される。

2.2 対象とする排出量推計モデル

上記の基本的考え方は排出量推計モデルを特定するものではない。しかし、排出量推計指標を設定し具体的な変換モデルを検討するためには、対象とする排出量推計モデルを設定する必要がある。

そこで、ここでは著者らが提案した NO_x 排出量モデル¹⁾を用いる。このモデルは、瞬間の NO_x が概ねエンジン出力に比例することを用いて定式化し、さらに推計対象区間を走行する時間 T で積分して得られたモデルであり、以下の式で表される。

$$F = c_1 \cdot Z_v + c_2 \cdot Z_{v^3} + c_{3a} \cdot Z_{av} + c_{3b} \cdot Z_a + c_4 T \quad (1)$$

ここで、F：推計対象区間の総排出量 [g]，

$$Z_a = \int_T da dt, \quad Z_v = \int_T dv dt, \quad Z_{v^3} = \int_T dv^3 dt, \quad Z_{av} = \int_T da v dt,$$

v：瞬間の走行速度 [m/s]，a：瞬間の車両加速度 [m/s²]，c₁，c₂，c_{3a}，c_{3b}，c₄：パラメータ。

ここで、Z_v，Z_{v³}，Z_{av}，Z_a及び T が 2.1 でいう

排出量推計指標に相当する。

2.3 変換モデルの基本的設定方法及び排出量空間分布の推定の手順

ここでは、変換モデルの基本的設定方法を排出量空間分布の推定方法と組み合わせて説明する。内田ら²⁾は、排出量推計指標値を停止位置からの距離帯毎に算出して分析しているが、平均的には停止位置からの距離の関数で表現できることが窺える。一方では、排出量推計指標が発進時先頭車両からの台数や交通密度など、交通状況によって異なることを示している。また、道路種別や車種などによっても異なることが想定される。

従って、変換モデルは、基本的には停止位置からの距離の関数として表現し、マクロな交通指標（交通密度、旅行速度）や道路種別・車種などの指標も変換モデルの要因として加えるのが適切と考えられる。実際にどこまで要因として取り込めるかは観測データ数、データ精度などによって異なる。

以下、具体的な排出量の推定の流れを示す。

- 1) 直線近似された車両軌跡を停止位置と走行領域に分ける。ここでは説明の便宜上対象範囲内での停止回数を 1 回とし、停止位置を $x=0$ とする。また、以下の手順では、停止位置での排出量を $F(x)$ とおく。
- 2) 停止位置においては、直線近似された軌跡上での停止時間 T_p から、停止位置における実際の停止時間である T を以下の通り推計する。

$$T = f_T(T_p)$$

ここで、 f_T は T_p から T を推計するための推計式である。T 以外の推計指標 ($Z_v, Z_{v^3}, Z_{av}, Z_a$) は 0 となるので、推計された T を排出量モデルに代入すると、停止位置での排出量 $F(0)$ は以下の通りとなる。

$$F(0) = c_4 T$$

- 3) 走行領域では、近傍の停止位置からの距離 x を用いて排出量推計指標を算出する。例えば、Z_{av} に対して距離 x の関数 $f_{Z_{av}}$ を定

義し，以下のように推計する．

$$Z_{av}(x) = f_{Z_{av}}(x)$$

他の推計指標についても同様に推計し，(1)式の排出量モデルに代入すると，排出量は以下の通りとなる．

$$F(x) = c_1 \cdot Z_v(x) + c_2 \cdot Z_{v3}(x) + c_{3a} \cdot Z_{av}(x) + c_{3b} \cdot Z_a(x) + c_4 T(x)$$

上記で示した関数 ($f_T, f_{Z_{av}}$ など) が変換モデルの関数となり，実際の走行軌跡の観測と分析に基づき設定されることとなる．なお，上記説明では x を連続的なものとして説明しているが，実際の計算上は，距離帯別に排出量を推計することとなる．

3. 観測データに基づく変換モデルの導出例

3.1 交差点観測調査

実軌跡の分析により排出量推計指標への変換モデルを設定するため，交差点付近における停止，発進挙動のビデオ観測調査を行い，車両の走行軌跡を観測した．調査対象地点は国道246号青山一丁目交差点上り方向である．

調査は，対象となる交差点に面した高層建築より，4台のビデオカメラを用いて交差点を中心とする約400mを撮影した．観測は平日（水曜日）の午前11時半から午後5時までである．併せて，射影変換・平滑化を行うための座標軸を設定するため，撮影範囲内の基準点とした点と各カメラ位置の3次元座標を測量した．

このようにして撮影したデータの中から，先詰まり，捌け残り等が発生しておらず減速，加速挙動が明確に観測されている5サイクルを抽出して，射影変換による実座標への変換，複数カメラの軌跡結合及び平滑化を行い車両軌跡のデータを得た．このように取得した車両軌跡データの一例を図3に示す．

3.2 排出量説明変数の推計式の導出

3.1で得られた車両軌跡を用いて，排出量推計指標を距離帯別に単位距離（10m 毎）当たりの値として算出し，車両の停止位置からの距離と推計指標の値の関係を加速時，減速時に分

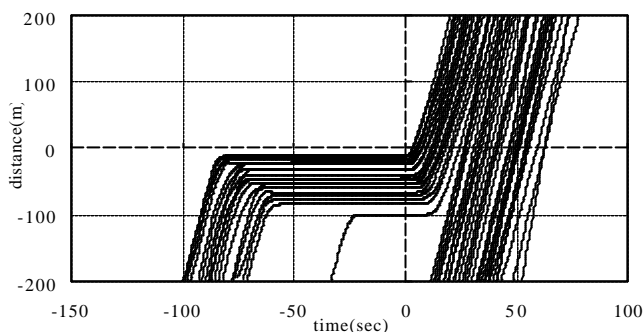


図3 ビデオ観測で得られた車両の走行軌跡

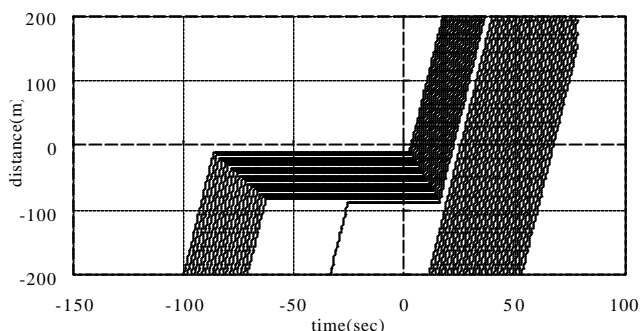


図4 図3に対応する直線近似された車両軌跡

けて分析した．また，変換式を停止位置からの距離の関数として導出した．スペースの都合上指標 Z_{av} のケースを示す．停止位置からの距離と Z_{av} の関係を示したのが図5（加速時），図6（減速時）である．車両毎のパラツキが大きいが，全車両の平均値で見ると概ね一定の傾向が見て取れる．そこで，これらの関係を簡単な近似式に当てはめて，設定式を以下のように作成した．

加速時

$$Z_{av10} = 50.7 X^{-0.518} \quad (0 < X \leq 100)$$

$$Z_{av10} = 4.31 \quad (100 < X, X < -150)$$

減速時

$$Z_{av10} = -0.00184X \quad (-80 \leq X < 0)$$

$$Z_{av10} = -0.0589X - 5.10 \quad (-150 \leq X < 80)$$

$$Z_{av10} = 4.31 \quad (100 < X, X < -150)$$

ここで， Z_{av10} は停止位置から $(X-10) \sim X$ の10m 区間における Z_{av} の値 $[m^2/s^2/10m]$ ， X は停止位置からの距離 $[m]$ である．同様に，その他の推計指標についても変換式を設定した．なお，車両軌跡のパラツキが大きいため，停止位置からの距離 X 以外の要素を考慮できなかった．パラツキの主因は軌跡データの精度，特に加速度

に問題があるためと考えられ、軌跡データ生成方法の再検証が必要である。

4. 排出量推定例及び結果分析

4.1 推定対象及び手法

ここでは、提案手法した手法を用いて排出量の推計例を示す。ここでは、先に示した図3の実軌跡に対して、それに対応する図4の直線近似された軌跡を作成し、以下の3つの方法により対象区間の排出量を推計した。

1 台毎の実軌跡に排出量推計モデルを適用して排出量を推計（リファレンス）

直線近似された軌跡に3で導出した変換式を適用して2で提案した方法で排出量を推定（提案手法）

なお、車種は便宜上1車種とし、排出量推計モデルのパラメータは文献¹⁾の値を用いた。

4.2 結果及び考察

10mの距離帯別に推計したNOx排出量を図6に示す。軌跡のばらつきを反映して必ずしもよく適合しているとは言いが、交差点周辺、交差点周辺部くらいに分けて考えると、平均的には排出量のオーダーはある程度再現できていると考えること

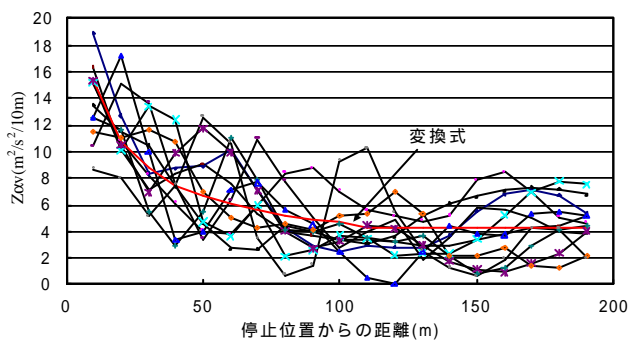


図5 Z_{av} の実測データ及び変換式曲線（加速）

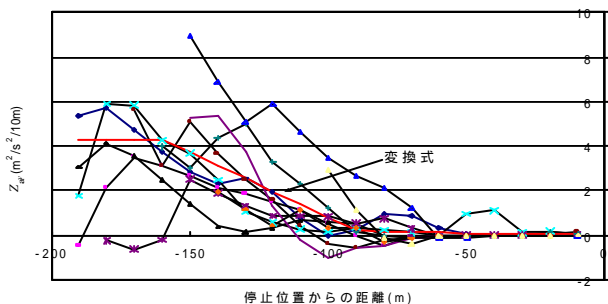


図6 Z_{av} の実測データ及び変換式曲線（減速）

もできる。特に、交差点周辺で排出量が増加する様子が捉えられていることは、よく用いられる平均速度式による推計ではできなかった部分である。

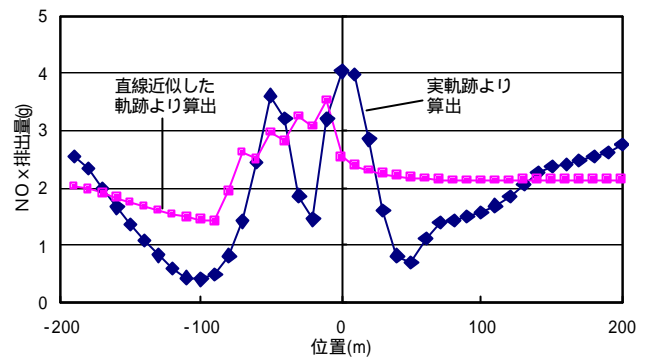


図7 推定NOx排出量の空間分布

5. まとめと今後の課題

本研究では、直線近似された車両軌跡から排出量推計指標を変換モデルを用いて推計し、速度変動を考慮した排出量を推計する手法を提案した。また、ビデオ観測調査による交差点周辺の車両軌跡を用いて、変換モデルを設定するとともに実際に排出量推計を行い、排出量の空間的分布をある程度推計できることを示した。精度的な問題が残るが、データの精査である程度カバーできていると考えている。

本手法では、排出量推計指標に影響を与える交通状況の説明要因をどの程度変換モデルに取り込めるかがキーポイントとなる。そのため、様々な条件下での車両軌跡を取得し、分析を進める必要がある。

謝辞

3章のビデオ観測調査及び車両軌跡の取得は千葉工業大学工学部元学生の内田勲、清水俊宏、小嶋浩一各氏の労によるところが大きい。ここに記して謝意を表します。また、様々な議論に参加して頂いたNOx21プロジェクトメンバーの各氏にも謝意を表します。

参考文献

- 1) Hiroyuki Oneyama, Takashi Oguchi, Masao Kuwahara: "Estimation Model of Vehicle Emission Considering Variation of Running Speed", Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, Vol.4, No.5, pp.105-117,2001.10
- 2) 内田勲, 小根山裕之, 赤羽弘和, 桑原雅夫: "環境負荷の視点からみた交差点周辺の走行軌跡と交通状態の関係分析", 第24回土木計画学研究・講演集, 土木学会, 2001.11