

排出量推計モデルに基づく信号交差点の排出量推計

東京大学生産技術研究所 正会員 小根山 裕之
東京大学生産技術研究所 正会員 桑原 雅夫

1. はじめに

都市部における NOx などの排出ガスは依然厳しい問題である。特に交差点周辺では、信号による停止、発進により排出ガス量が高くなっている。最適な信号制御などによる交通の円滑化は交差点周辺の排出ガス量の低減に寄与するものと考えられているが、信号制御などの排出ガスへの影響は必ずしも明確にはなっていない。

本稿では、加減速を考慮した排出量推計モデルを簡単な仮定に基づく交差点周辺の走行パターンに適用して NOx 排出量を算出し、信号制御と NOx 排出量の関係を把握することを目的とする。

2. 排出ガス量推計モデル

まず、ディーゼル車を対象として、NOx 排出量推計モデルを定式化した。詳細については別稿¹⁾にて発表予定であるが、ここではその概要を示す。

ディーゼル車では瞬間の NOx 排出量 f は概ねエンジン出力に比例すると仮定できる。エンジン出力はエンジン回転数 n とトルク t の積に比例するため、 f は以下のように定式化できる。

$$f = k \cdot n t + f_i \quad ; \quad t > 0, \quad (1)$$

$$= f_i \quad ; \quad t \leq 0$$

但し、 k : パラメータ、 f_i : アイドリング時の NOx 排出量である。また、 n 、 t はそれぞれ以下のように記述される。

$$n = \frac{v r_i}{2 p R}, \quad (2)$$

$$t = \frac{R_t R}{h r_i}, \quad (3)$$

$$R_t = m_r M g + m_a A v^2 + M g \sin q + (M + m_i) a, \quad (4)$$

但し、 v : 瞬間の車両走行速度[m/sec]、 R : 有効タイヤ半径[m]、 r_i : i 段目のギヤ比に最終減速比を乗じたもの、 R_t : 総抵抗[N]、 h : 総伝達効率、 m_r : 転がり抵抗係数、 M : 車両重量 (乗車人員、その他の積載重量を含む) [Kg]、 m_a : 空気抵抗係数

[kg/m³]、 A : 車両前面投影面積[m²]、 q : 道路勾配 (上りを正とする)、 g : 重力加速度[m/sec²]、 m_i : ギヤ i 段における回転部分相当質量[Kg] ($m_i = m_1 + m_2 \cdot r_i$ 、 m_1 と m_2 はそれぞれ回転部分相当質量の内、ギヤ比に依存しない部分と依存する部分)、 a : 瞬間の車両加速度[m/sec²]。

ここで、(2)、(3)、(4)式を(1)式に代入して整理すると以下の式が得られる。

$$f = \frac{dF}{dt} = c_1 dv + c_2 dv^3 + c_3 da + c_4, \quad (5)$$

但し、 $c_1 = k(m_r + \sin q) M g / 2 p h$ 、 $c_2 = k m_a A / 2 p h$ 、 $c_3 = k(M + m_i) / 2 p h$ 、 $c_4 = f_i$ 、 d : $R_t > 0$ のとき 1、 $R_t \leq 0$ のとき 0。

この式中にはギヤ比に依存するパラメータ c_{3i} が存在するが、ここではギヤ比と速度の関係を単純化してモデルに導入する。すなわち、エンジン回転数と速度の関係をエンジン回転数一定となるような直線と仮定し、これに従ってギヤ比 r_i が選択されるものと考えたと、式(2)の車両速度 v とエンジン回転数 n の関係から $r_i = c / v$ (c は定数) の関係が得られる。

これを(5)式に代入し f を集計時間 T で積分すると、総排出量 F は、

$$F = c_1 \cdot Z_v + c_2 \cdot Z_{v^3} + c_{3a} \cdot Z_{av} + c_{3b} \cdot Z_a + c_4 T \quad (6)$$

但し、 $c_{3a} = k(M + m_1) / 2 p h$ 、 $c_{3b} = k c m_1 / 2 p h$ 、 $Z_a = \int_r da dt$ 、

$$Z_v = \int_r v dt, \quad Z_{v^3} = \int_r v^3 dt, \quad Z_{av} = \int_r a v dt.$$

上で導出された速度、加速度プロファイルから得ら

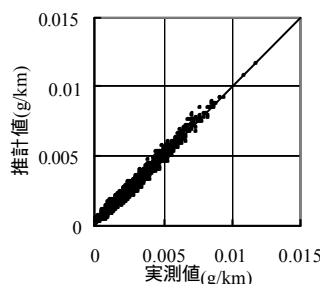


図1 実測値と推定値の相関

表1 パラメータ推定結果

n=5460, R=0.987, R²=0.973

| パラメータ | (値) |
|-----------------|------------------|
| C ₁ | 0.00103 (91.70) |
| C ₂ | 2.57E-06 (97.52) |
| C _{3a} | 0.00589 (124.87) |
| C _{3b} | 0.00277 (34.24) |
| C ₄ | 0.00362 (81.32) |

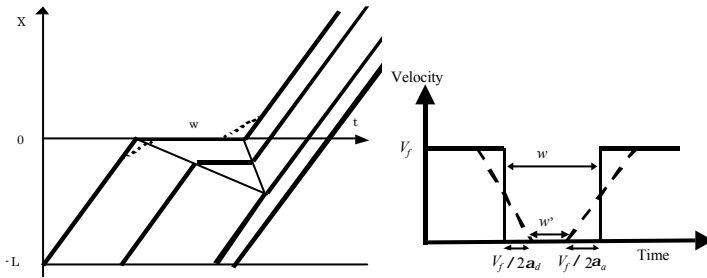


図2 交差点周辺の time-space 図

図3 速度パターン

れる集計値 Z_v 、 Z_{v3} 、 Z_{av} 、 Z_a 及び旅行時間 T を分析対象区間について推計することが出来れば、本モデルを用いて NO_x の排出量を推計することが可能である。

なお、4 t ディーゼル車のシャシダイナモ台試験による、速度・加速度及び NO_x 排出量に関する時系列データを用いたパラメータ推計の結果を表1、図1に示すが、高い推計精度が得られていることがわかる。

3. 排出量推計モデルに基づく信号交差点排出量の推計

3.1 交差点周辺の走行軌跡のモデル化

排出量推計モデルを用いて、簡単な走行パターンのモデル化により交差点の停止、発進による排出量の推計を行う。本研究では、他の信号制御の影響を受けない孤立交差点を対象として、交差点周辺の走行軌跡のモデル化を行った。単純化のため以下の仮定をおく。

信号交差点への到着交通は到着交通流率 q [veh/sec] の一様流とする。

車両は交差点での停止発進時を除き自由流走行速度 v_f [m/sec] で走行するものとする。すなわち、車両密度による速度の変化や車群拡散の影響は考慮しない。

車両の停止発進時の加減速度は変化しないものとし、減速度 a_d [m/sec²]、加速度 a_a [m/sec²] とする。

なお、信号のサイクル長 C [sec]、有効青時間 G [sec]、赤時間 R [sec] (= 有効青時間以外の時間とする。 $C=G+R$) とする。また、信号停止時のジャム密度を K_j [veh/m]、飽和交通流率を s [veh/sec] とする。

まず、1 サイクル分の車両について、図2のような車両軌跡を仮定する。すなわち、時刻 $t=0$ に起点 ($x=-L$ [m]) を出発した車両が信号で先頭車両として停止線 ($x=0$) において停止するものとする。

ここで、時刻 t に起点 ($x=-L$) を出発した車両の軌

跡を考える。まず、加減速を考慮しない piecewise linear な軌跡 (図2の太線) を考えると、車両が停止する条件は、

$$0 \leq t < \frac{R}{1-I}, \quad I = \frac{q}{s}$$

となる。但し、 I は対象方向の飽和度である。この場合の停止位置 $x_s(t)$ [m]、停止位置に到着する時刻 $t_s(t)$ [sec]、出発する時刻 $t_g(t)$ [sec] は以下の通りとなる。

$$x_s(t) = -\frac{q}{K_j} t \quad (7)$$

$$t_s(t) = \left(1 - \frac{q}{K_j \cdot V_f}\right) t + \frac{L}{V_f} \quad (8)$$

$$t_g(t) = \left(I - \frac{q}{K_j \cdot V_f}\right) t + \frac{L}{V_f} + R \quad (9)$$

また、遅れ時間 $w(t)$ [sec] は、以下の通り表すことができる。

$$w(t) = t_g(t) - t_s(t) = -(1-I)t + R \quad (10)$$

次に、停止前後の加減速を考慮する場合を考える。加減速度が a の仮定の通り一定であり、停止位置及び総旅行時間を変えないように速度変化すると仮定する。この仮定に基づく時間別の速度変化は図3の破線のように表され、加減速を考慮した場合の実際の停止時間 $w'(t)$ は以下のように表される。

$$w'(t) = w(t) - \frac{v_f^2}{2a_d} - \frac{v_f^2}{2a_a} \quad (11)$$

ここで、走行パターンをアイドリング、減速、加速、定速の4つの走行モードに分けると、位置と走行モード及び速度の関係は以下の通り表される。

- ・アイドリング: $x = x_s(t)$ で $v(x) = 0$
- ・減速: $x_s(t) - \frac{v_f^2}{2a_d} < x < x_s(t)$ で $v(x) = \sqrt{-2a_d(x - x_s(t))}$
- ・加速: $x_s(t) < x < x_s(t) + \frac{v_f^2}{2a_a}$ で $v(x) = \sqrt{2a_a(x - x_s(t))}$
- ・定速: $x \leq x_s(t) - \frac{v_f^2}{2a_d}$, $x_s(t) + \frac{v_f^2}{2a_a} \leq x$ で $v(x) = v_f$

但し、 $w'(t) \leq 0$ となる場合は実際には停止せず、ある速度まで減速した後、再加速することとなる。この場合、減速から加速に転じる速度を v_c とすると、遅れ時間 $w(t)$ について、

$$w(t) = \frac{(v_f - v_c)^2}{2v_f a_d} + \frac{(v_f - v_c)^2}{2v_f a_a} \quad (12)$$

という関係があるため、

$$v_c = v_f - \sqrt{\frac{2v_f w(t)}{\left(\frac{1}{a_d} + \frac{1}{a_a}\right)}} \quad (13)$$

となる。この場合、位置と走行モード及び速度の関係は、

・加速： $x_s(t) < x < x_s(t) + \frac{v_f^2 - v_c^2}{2a_a}$ で $v(x) = \sqrt{2a_a(x - x_s(t)) + v_c^2}$

・減速： $x_s(t) - \frac{v_f^2 - v_c^2}{2a_d} < x < x_s(t)$ で $v(x) = \sqrt{-2a_d(x - x_s(t)) + v_c^2}$

・定速： $x < x_s(t) - \frac{v_f^2 - v_c^2}{2a_d}, x_s(t) + \frac{v_f^2 - v_c^2}{2a_a} \leq x$ で $v(x) = v_f$

となり、アイドリング状態は発生しない。

なお、 $\frac{R}{1-I} \leq t < C$ の場合は信号によって停止しないため、すべての距離帯で定速状態となる。

3.2 走行モード別排出量の推計

3.1で仮定した走行パターンについて、2の排出量推計モデルを適用して排出量を推計する。ここで、(5)式より走行モード毎の地点別排出量を計算すると下記の通りとなる。

(i) 加速状態： $\frac{dF}{dx} = c_1 + c_2 v(x)^2 + c_{3a} a_a + c_{3b} \frac{a_a}{v(x)} + c_4 \frac{1}{v(x)}$

(ii) 減速状態： $\frac{dF}{dx} = c_4 \frac{1}{v(x)}$

(iii) 定速状態： $\frac{dF}{dx} = c_1 + c_2 v_f^2 + c_4 \frac{1}{v_f}$ (7)

(iv) アイドリング状態： $F = c_4 T_s$ 、 T_s ：停止時間 (8)

それぞれ、集計距離毎に積分することにより、地点別の排出量を推計することができる。

3.3 信号制御と排出量の関係

ここでは、3.1で仮定した走行軌跡モデルで設定している信号及び交通条件に関する各種パラメータ

を様々な設定し、それぞれのパラメータに対するNOx排出量への影響を分析した。なお、本試算では片方向のみを対象とした。また、L=500mとし、対象区間は交差点の停止線前後500mの合計1kmとした。なお、ここではすべてが同一の車両と仮定し、排出量推計式のパラメータは表1のものを用いた。信号制御と排出量の変化を捉えるためには特に問題はないが、ここで算出されている排出量の推計値そのものは現実的な値ではないことを付記しておく。

計算条件及び結果を表2に示す。以下では、試算から得られる考察をいくつか示す。

(1) 遅れ時間、平均旅行速度と排出量の関係

図4は総遅れ時間と総排出量の関係を示したものである。自由流走行速度 V_f 、交通量 q が同じケース (Case1、Case6~11) で比較すると、総遅れ時間の増加に伴って総排出量がほぼ線形に増加している。このことは、同じ道路交通の条件であれば、信号制御の適正化 (= 遅れ時間の減少) が排出量を減少させることを示唆している。一方、Case2、Case3は自由流走行速度が高いケースであり道路規格の異なる場合に相当する。また、Case4、Case5は交通量が少ない場合である。このようなケースを含む場合は、総遅れ時間との関係のみでは排出量の比較はできないことがわかる。

同様のことが平均旅行速度と1台当たりの排出量の関係 (図5) からとも言える。すなわち、自由流走行速度が異なるCase1,2を除き、平均旅行速度の上昇により排出量が減少しており、信号制御の適正化による交通の円滑化が排出量の減少につながることを示しているが、異なる道路条件の場合は必ずしも当てはまらない。交通の円滑化に伴う排出量の変化を推計する

表2 試算条件及び結果

| ケース | 交通条件 | | 信号制御 | | | | 旅行時間及び旅行速度 | | | NOx排出量 | | | | |
|---------|--------------|--------------|------------|------------|-------|------|----------------|----------------|------------------|--------------|------------|------|------|------|
| | q [veh/h] | Vf [km/h] | C [sec] | G [sec] | Split | I | 総遅れ時間 [sec] | 総旅行時間 [sec] | 平均旅行 速度[km/h] | 総排出量 [kg] | モード別内訳[kg] | | | |
| | | | | | | | | | | | 加速 | 減速 | 定速 | 停止 |
| Case 1 | 800 | 40 | 120 | 60 | 0.50 | 0.44 | 21,900 | 93,900 | 30.7 | 1.62 | 0.37 | 0.03 | 1.17 | 0.05 |
| Case 2 | 800 | 50 | 120 | 60 | 0.50 | 0.44 | 21,900 | 79,500 | 36.2 | 1.79 | 0.56 | 0.04 | 1.14 | 0.04 |
| Case 3 | 800 | 60 | 120 | 60 | 0.50 | 0.44 | 21,900 | 69,900 | 41.2 | 2.00 | 0.80 | 0.05 | 1.11 | 0.03 |
| Case 4 | 600 | 40 | 120 | 60 | 0.50 | 0.33 | 14,400 | 68,400 | 31.6 | 1.18 | 0.24 | 0.02 | 0.89 | 0.03 |
| Case 5 | 400 | 40 | 120 | 60 | 0.50 | 0.22 | 8,017 | 44,017 | 32.7 | 0.77 | 0.13 | 0.01 | 0.61 | 0.02 |
| Case 6 | 800 | 40 | 80 | 40 | 0.50 | 0.44 | 14,500 | 86,500 | 33.3 | 1.59 | 0.36 | 0.03 | 1.17 | 0.02 |
| Case 7 | 800 | 40 | 100 | 50 | 0.50 | 0.44 | 18,100 | 90,100 | 32.0 | 1.60 | 0.37 | 0.03 | 1.17 | 0.03 |
| Case 8 | 800 | 40 | 200 | 100 | 0.50 | 0.44 | 36,100 | 108,100 | 26.6 | 1.67 | 0.38 | 0.03 | 1.16 | 0.10 |
| Case 9 | 800 | 40 | 120 | 70 | 0.58 | 0.44 | 15,250 | 87,250 | 33.0 | 1.56 | 0.31 | 0.03 | 1.20 | 0.03 |
| Case 10 | 800 | 40 | 120 | 80 | 0.67 | 0.44 | 9,800 | 81,800 | 35.2 | 1.51 | 0.24 | 0.02 | 1.23 | 0.02 |
| Case 11 | 800 | 40 | 120 | 90 | 0.75 | 0.44 | 5,550 | 77,550 | 37.1 | 1.46 | 0.18 | 0.02 | 1.26 | 0.01 |

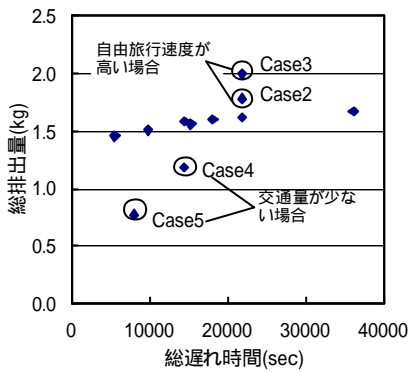


図4 総遅れ時間と総排出量の関係

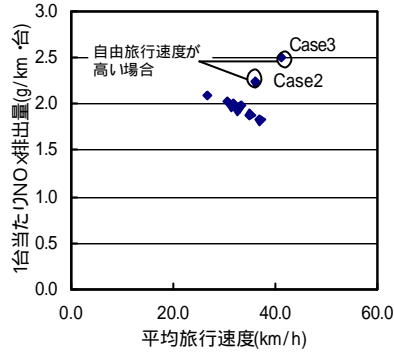


図5 平均旅行速度と排出量の関係

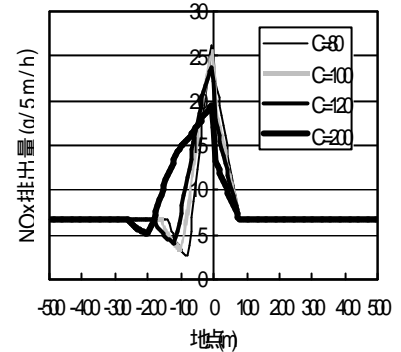


図6 地点別排出量

場合、しばしば旅行速度別に与えられる排出原単位が用いられるが、上記のような問題があることを留意する必要がある。

(2) サイクル長 C と排出量の関係

次に、スプリットを一定(0.5)のまま、サイクル長 C を 80,100,120,200sec と変化させた場合 (Case1,6,7,8) の結果について考察する。先に図4で示したとおり、サイクル長の増加による総遅れ時間の増加によって NOx の総排出量は増加する。ここで表2よりモード別の排出量を見ると、停止時の排出量の増加によるものであることがわかる。一方、図6は地点別の NOx 排出量を示したものであるが、サイクル長が短い場合に停止線(x=0)周辺の排出量が鋭く立ち上っている。サイクル長が短くなることにより単位時間当たりのサイクル数が増加し、停止点周辺での停止や発進加速が増加するためである。この結果は、遅れ時間や総排出量の観点で優れている場合でも局部的には負荷が大きくなる場合もあり得ることを示唆している。

4. まとめと今後の課題

本研究では、NOx の排出量推計モデルに基づき、簡単な走行パターンを仮定し、信号交差点における信号制御と排出量との関係を分析した。本研究で得られた結論をまとめると以下の通りである。

- ・ 同一の道路交通条件の下での比較では、信号制御の最適化による総遅れ時間の減少、平均旅行速度の向上が NOx の排出量を減少させる。
- ・ 但し、道路規格、交通量などが異なる条件下では遅れ時間、平均旅行速度と排出量は単純には結び

つかない。特に、平均旅行速度を用いた交通円滑化に伴う排出量の評価を行う場合には注意が必要である。

- ・ サイクル長と NOx 排出量の試算例のように、区間の総排出量が減少する場合でも、地点別に見ると増加するような場合もあり得る。

本研究では2章で示した排出量モデルが成立することを前提としている。ディーゼル車の NOx については高い説明力があると考えられるが、他の車種や、他の物質についても実際の排出量のデータを用いて検証する必要がある。また、本研究では1車種のパラメータを用いたが、実際に排出量を推計するには複数車種のパラメータを用いて車種構成を考慮した推計を行う必要がある。

また、交差点周辺の走行パターンについて、実現象を簡略化した仮定をおいている。実際には車両の速度変動には前後車両との車間距離や道路条件、車種による違いなど様々な要因が絡む。また、定速走行状態と仮定した部分でも実際には速度変動が存在する。実際に排出量を推定するためにはこれらの要因も取り込む必要がある。

参考文献

- 1) Oneyama, Oguchi and Kuwahara: "Estimation Model of Vehicle Emission Considering Variation of Running Speed", The 4th International Conference of EASTS, 2001 (投稿中)