

交差点付近の窒素酸化物の濃度分布予測

PREDICTION OF NITROGEN OXIDES DENSITY IN CONSIDERATION OF ACCELERATION OF CAR AT A SIGNALLED INTERSECTION

森野 伸崇* 寺町 賢一* 角 知憲*
Nobutaka MORINO Kenichi TERAMACHI Tomonori SUMI

ABSTRACT ; In recent years, air pollution caused by exhaust gas and traffic congestion become a big social problem, especially signaled intersection where the cars repeat stop and go. It needs immediate measures to break the present condition. In fact, density of nitrogen oxides and suspended particulate matters over the environmental quality standard in some cities. One of the causes is that short intervals between the signaled intersections keep drivers from smooth driving. It is important to predict about exhaust gas caused by cars, because nitrogen oxides and suspended particulate matters have a bad influence upon our health. This paper proposes a method to predict the nitrogen oxides generated from departing cars at a signaled intersection. This model consists of two models. One of them is a man-machine-system model which represent the mechanical properties of the car and the human factors in driving, another is an exhaust gas diffusion model. The previous studies proposed discharge amount of nitrogen oxides from cars is proportional to work. The former provides work of departing cars for the latter. So density of nitrogen oxides is calculated. Besides, we must consider the influences of buildings on condition that they stand around signaled intersection. Using the exhaust gas diffusion model in this paper, we can express density distribution about nitrogen oxides on such a condition.

KEYWORD ; man-machine-system model, signaled intersection, nitrogen oxides,

1. はじめに

自動車から発生する排気ガスの濃度予測には排出係数を使って予測する手法^{1) 2) 3)}が広く一般に用いられている。しかし定常走行を扱うものがほとんどで、発進・停止を繰り返す市街地の信号交差点付近の排気ガス濃度を正確に表現しているものはない。ある報告書⁴⁾によれば交差点部が局所的に濃度が高くなっていることから車群の停止・発進の影響が明らかであり、その原因は交通量だけでははかることはできない。

すでに著者らは発進・停止を繰り返す市街地の信号交差点から発進する車群先頭車の挙動をエンジン運用状態とあわせてを予測するための発進挙動モデルを提案した。^{5) 6)} 本論文は、この先頭車発進挙動モデルを基礎として、追従回路を組み合わせ追従車発進挙動モデルを提案し、これに基づいて交差点付近における窒素酸化物の濃度分布予測を行うことを試みる。

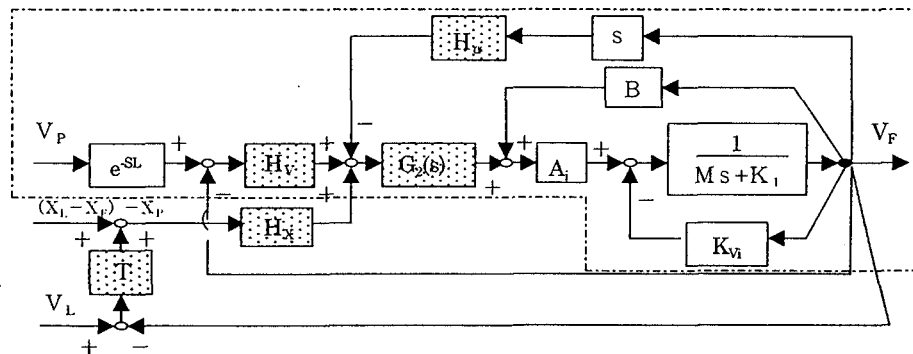
* 九州大学大学院工学研究科都市環境システム工学専攻

* Department of Civil Engineering, Kyushu University

2. 発進挙動モデル

2. 1 発進挙動モデル

自動車の発進挙動を人と機械とのマン・マシン・システムとしてモデル化したものが図-1の発進挙動モデルである。図中点線で囲まれた部分がすでに提案した先頭車発進挙動モデル⁵⁾を表す。図中の網を掛けた部分はヒューマンファクターでありドライバーの果たす機能、それ以外のパラメータは自動車の機械的性能を表す。現在ではAT車が主流となっているが本モデルは大型車を中心として、マニュアル車を対象としたモデルである。



V_p : 目標速度 X_p : 目標車間距離 H_x : 車間距離に対する人の比例要素
 V_L : 先行車速度 X_L : 先行車の位置 H_v : 速度差に対する人の比例要素
 V_F : 追従車速度 X_F : 追従車の位置 H_a : 加速度差に対する人の比例要素
 T : 将来の車間距離に対する人の比例要素 $G_2(s)$: 人の2次遅れを表す伝達関数
 $G_2(s) = 1 / (1 + P \cdot s)^2$ B : 燃料消費量を補う伝達関数 $B = (K_1 + K_v) / A$
 A, K_1, K_v : 自動車の性能に関する定数 M : 自動車の走行時における換算質量

図-1 発進挙動モデル (追従車)

先頭車モデルでは青信号現示確認後に目標速度 V_p が入力されるが、この際ドライバーがアクセルを踏み込むまで反応時間遅れ L が生じる。(時間遅れ e^{-sL} と表される) 次に V_p と自車速度 V_F との速度差 ($V_p - V_F$) を速度差に対する比例要素 H_v によってアクセルペダル踏み込み量 (燃料流量) に変換する。この踏み込むという動作は緩やかに行われる。

と考えるので $G_2(s)$ という二次遅れを考慮する。なお、半クラッチ操作を行う1速と2速以降では違いがあるため $P_1, P_{2,3}$ と区別する。 A はアクセル踏み込み量を駆動力に変換する自動車の機械的性能を表し、 $1 / (Ms + K_1)$ は回転慣性を考慮した質量 M 、走行抵抗係数を K_1 としたときの自動車の運動方程式を表す。 K_v は機関内部抵抗を代表する。 B は定常走行の際に K_1 と K_v に釣り合う定常駆動力を発生させ、 K_1 と K_v の効果を消去して、終局値定理を満たすために導入した関数である。また、 H_a は人が加速度が大きくなりすぎないように操作を加減することを表す。

追加した追従回路では車間距離を維持する、最終走行速度を先行車に一致させる、という要求を満たすために、先行車と追従車の車間距離 ($X_L - X_p$) から目標車間距離 X_p を引いたものが先行車の速度とともに入力として加えられる。ただし、目標車間距離は、 T 秒後の予測値であるものとする。図の回路はこの要件を満たす最も簡単な回路である。目標車間距離とは本来運転者の個人差を含む分布関数であると考えられるが、ここでは平均的な挙動を対象とする。また、追従車のドライバーは T 秒後の車間距離を予測し目標車間距離 X_p を保つためヒューマンファクター H_x により燃料流量を決定する。これらを考慮したものが追従

車発進挙動モデル（図－１）である。

本論文では先頭車モデルにおいて運転者特性を表すパラメーターである H_v 、 H_a 、 P_1 、 P_{23} に加えて H_x 、 T を推定する。まず、ブロック線図を等価規則⁸⁾を用いて変換することにより伝達関数の導出を行い式（１）を得る。

$$V_P=[A_iH_vV_P+A_iH_x\{(X_L-X_P)X_P+A_iH_xTV_L\}e^{st}]/\{MP^2s^3+2MPs^2+(M+A_iH_a)s+A\{2H_v+H_xT\}\} \tag{1}$$

式（１）中の s がラプラス領域における１回微分を表しているので次の微分方程式に変換することができる。

$$MP^2\frac{d^3V_P}{dt^3}+2MP\frac{d^2V_P}{dt^2}+(M+A_iH_a)\frac{dV_P}{dt}=A_iH_vV_P+\{(X_L-X_P)-X_P\}A_iH_x+A_iH_xTV_L \tag{2}$$

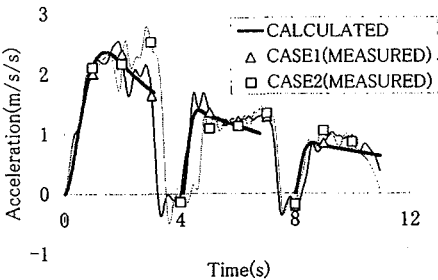
式（２）よりルンゲクッタ法などの数値解析によって自動車の速度・加速度を算出し、実験結果と適合するように H_x 、 T を決定する。

2. 2 自動車走行実験および解析

信号交差点において2000cc クラスのマニュアルトランスミッション普通自動車を先頭車に追従して発進させその挙動を把握するべく実験を行った。このとき追従車は自由走行状態にあり、先頭車以外の影響は全く受けない状態であった。目標車間距離、目標速度の平均値はそれぞれ10.68(m)、13.40(m/s)であった。また、信号が青現示になり先行車が加速を開始するまでの時間と追従車が加速を開始するまでの時間の差を反応遅れ時間（ラグタイム）とし、平均値は1.52(sec)であった。発進挙動モデル中のヒューマンファクターについては、式（２）で得られた理論加速度と観測加速度について最小二乗法で推定し、その結果を表－１に示す。図－２に追従車加速度の理論値と観測値の比較の一例を示すが、よく理論値が観測値を再現していることがわかる。排気ガスに与える大型車の影響は大きいため自動車性能の異なる大型車についても同様の走行実験を行いヒューマンファクターを推定した。表－２は機械的性能を表すパラメータでその導出方法については文献⁵⁾を参照されたい。図－３に大型車先頭車加速度の理論値と実測値をみる限り両者は再現性はある。以上のことから、大型車と普通車が混合する車群に対しても本モデルは適用できることが確認できる。

表－１ 各パラメータの平均・分散

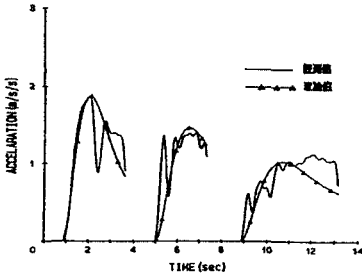
	H_v	H_a	P_1	P_{23}	H_x	T
平均	0.74	2.44	0.48	0.13	0.25	1.51
分散	0.02	0.03	0.02	0.01	0.02	0.01



図－２ 追従車加速度変化

表－２ A_i 、 K_{vi} の値

	普通車		大型車	
段位	A_i	K_{vi}	A_i	K_{vi}
1	84.67	83.86	954.81	1941.98
2	52.46	29.98	595.5	755.37
3	35.15	13.01	326.55	277.14
4			199.3	84.61
K_i	0.265		0.156	



図－３ 大型車加速度変化

3. 排気ガス拡散モデル

3. 1 排出源強度

本論文ではパフモデルを適用して弱風時の拡散計算を行うこととする。パフモデルの排出源強度 Q の決定にエンジンの運用状態と交通量を考慮する必要がある。窒素酸化物の排出量 V_{NOx} (g) は仕事量 psh と比例関係にあることが報告されている。

大型車の場合、 NOx の排出量を V_{NOx} (g) とするとエンジン出力 (psh) との関係は次式で表される。⁷⁾

$$V_{\text{NOx}} = 4.570 psh + 65.46 \quad (3)$$

普通車の場合も NOx 排出量 V_{NOx} (g) も同様にして $V_{\text{NOx}} = \lambda_1 V_{\text{NOx}}$ (λ_1 : 比例定数) と表すことにする。これらを位置の関数として発進挙動モデルから得られる個々のエンジン出力に適用すれば窒素酸化物の排出量が算出される。

しかし、パフモデルは一点の煙源から連続してガスが排出されるモデルであるのに対し、自動車は走行するために煙源が移動してしまい、このままではパフモデルに適用することはできない。そこで、排出源強度を車群の進行方向に配置し所定時間内の平均として複数の車群を発進させ排出量の時間平均をとることにより排出源強度 Q (ml/sec) を算出した。

シミュレーションにおいては排気ガスの発生煙源が自動車の走行によって進行方向に移動するものとして計算を行った。

3. 2 建物の有無が濃度分布に与える影響

交差点付近に建物がある場合、ガスの拡散に対する建物の影響は無視できないと考えられる。本論文では、地表付近の濃度分布を考えて建物の高さは十分高くガス(NOx)は全反射するものとしてシミュレーションを行った。

4. 予測計算とシミュレーション

4. 1 開けた地形に対する拡散

発進挙動モデルにパフモデルを併用する本手法の有用性を検討するための第1段階として、道路の近傍に建物がなく交差点となっていない信号のある場所（歩行者用信号のみの場所）で片側2車線の道路における

表-3 直進車の車群の構成

	車種	直進車通過台数(台)				合計 (台)
		第Ⅰ 車線	第Ⅱ 車線	第Ⅲ 車線	第Ⅳ 車線	
ケース1	普通車	426	387	384	427	1624
	大型車	83	100	87	74	344
	大型車 混入率	0.16	0.21	0.18	0.15	0.17
ケース2	普通車	631	577	265	223	1696
	大型車	34	34	27	30	125
	大型車 混入率	0.05	0.06	0.10	0.12	0.07

表-4 右左折車の車群の構成(ケース2)

行動	車種	進入車線(台)				合計 (台)
		第Ⅰ 車線	第Ⅱ 車線	第Ⅲ 車線	第Ⅳ 車線	
左折	普通車	44	85	36	41	206
	大型車	3	16	3	1	23
右折	普通車	61	0	74	116	251
	大型車	5	0	2	22	29

排気ガスの濃度予測を行った。表－3は実際に1時間の測定を行い得られた数値に基づいて普通車と大型車に分け得られた直進車台数の構成を示す。このときの窒素酸化物理論濃度を表したのが図－4であり、自動車排出ガス局について理論値と観測値の比較を行ったのが表－5である。

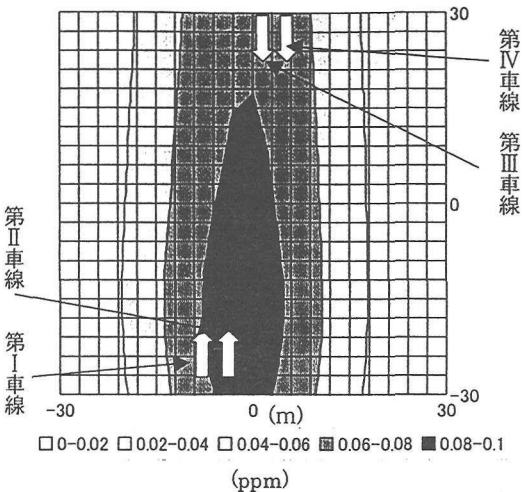
NO_x 濃度分布図を見てみると、濃度のピークが交差点の中央部（原点座標）からずれを生じた。第Ⅰ車線から第Ⅳ車線まで交通量・大型車混入率は大きく変わらないことを考えれば濃度の最高値を示すのは交差点中央部になるはずである。しかしながら、今回は前述のような結果を得た。これは、第Ⅰ・Ⅱ車線は信号で止まって発進する車が多かったのに対して、第Ⅲ・Ⅳ車線では信号制御のため停止する車が少なかったことが原因である。本手法により窒素酸化物の排出量は定速走行の時よりも発進・加速するときのほうがかなり大きくなることを再現できた。また実測値と理論値の比較においても大きな差は生じず、その再現性は高い。

4. 2 建物を含む交差点における拡散

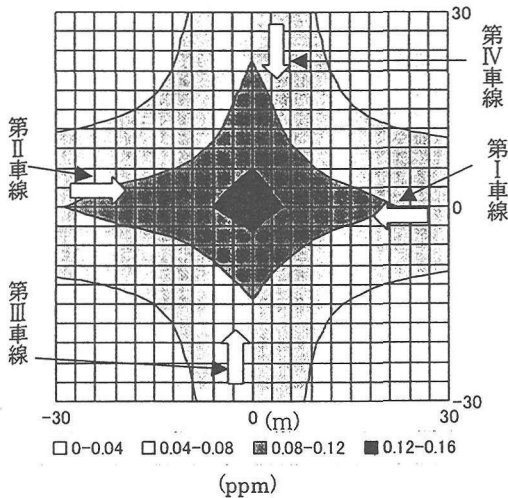
次に、建物による影響が考えられる道路の近傍に建物があり信号十字交差点を含む片側1車線の道路付近の排気ガスの濃度予測を行った。表－3、4は車群の状況を表す。これについて窒素酸化物の濃度予測を行ったのが図－5である。建物における影響については本論文では地表付近の濃度分布を考えて建物の高さは十分に高く NO_x は全反射するものとして理論計算を行った結果が図－6である。

交差点中央部（原点座標）が最も濃度が高くなっていることが分かる。これは第Ⅰ～Ⅳ車線すべてから比較的大きな影響を受けているためだと考えられる。

また交通量・大型車混入率にほぼ比例して濃度は広がっていることも分かる。また、実測値と理論値の比較から、建物を考慮することにより信号交差点部においてより正確な濃度予測が可能となった。



図－4 NO_x 濃度分布図（ケース1）



図－5 NO_x 濃度分布図（ケース2）
（建物による影響を考慮しないとき）

表－5 実測値と理論値の比較

		実測値 (ppm)	理論値 (ppm)
ケース1		0.090	0.080
ケース2	建物考慮なし	0.096	0.044
	建物考慮あり		0.088

5. 結論

本論文では追従車の発進挙動を表すモデルの提案を行い、交差点から発進する自動車群全体の挙動を把握し NO_x の濃度予測を行い、実測値との比較を行うことによりモデルの有用性を検討した。その結果、以下のことが言える。

- (1) 発進挙動モデルと排気ガス排出モデルを組み合わせることにより建物による影響を考慮した信号交差点周辺の濃度予測が可能
- (2) 市街地信号交差点における複数方向・複数車線の車の動きに対応した NO_x 濃度に与える影響を表現

また、今回提案したモデルは高さ方向について沿道建物の高さの効果を考えておらず、正確なガスの拡散を表現しているとは言えないため今後の課題である。

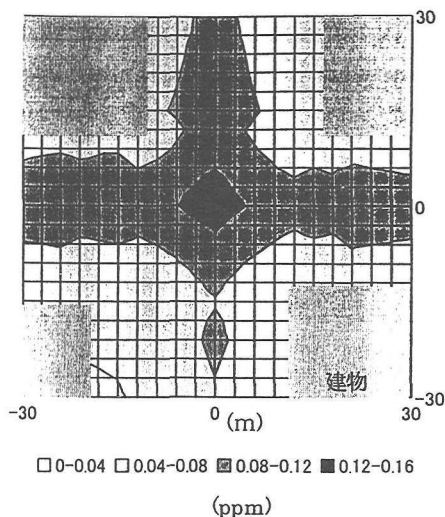


図-6 NO_x 濃度分布図 (ケース2)
(建物による影響を考慮したとき)

参考文献

- 1) 西村 昂, 日野泰雄, 寺本 譲: 自動車走行モードに基づく排出ガス量の予測方式に関する一考察, 土木計画学研究・論文集, No.7, pp283-288, 1989.12
- 2) 足立義雄, 森 寛昭, 藤城泰行, 田原嘉和, 吉川良行: 道路走行時における自動車の排出ガス量に関する研究, 土木研究所報告, 第164号-3, 1984. 11
- 3) 岡本眞一, 小野憲仁, 北林興二: 自動車道路からの NO_x 排出量推定法の比較と評価, 公害・第20巻第2号, p37-49, 1985
- 4) (財)九州環境管理協会: 窒素酸化物濃度分布調査報告書, 1994.2
- 5) 角 知憲, 渡辺義則, 坂口祐司, 河原瑞將, 寺町賢一: 信号交差点を発進する先頭車群のマン・マシン・システム・モデル, 土木学会論文集, No.530/IV-30, pp99-107, 1996.1
- 6) 寺町賢一, 角 知憲, 渡辺義則, 大枝良直: 最終速度の個人差を考慮した発進する自動車のマンマシンシステムモデル, 土木学会論文集, No.569/IV-36, pp95-99, 1997.7
- 7) 吉田耕一, 小池章介, 塚本雄次郎, 成沢和幸: ディーゼル車からの NO_x 排出量の予測手法に関する研究(第一報) 直接噴射式エンジンの NO_x 排出特性に関する一般的考察一, 第13回交通安全公害研究所研究発表会・講演概要, p30-33, 1983. 11
- 8) 添田 喬: わかる自動制御, 日新出版, 1975