

## 第7章 結論と今後の課題

本章では、第6章までの研究成果を総括し、本研究で得られた結論と今後の課題についてまとめる。

### 7.1 結論

本研究で得られた結論を以下に順に列挙する。

1. 依然として厳しい都市部の大気汚染問題を改善するためには、道路交通の需要に働きかける交通施策を積極的に実施していくことが必要であること、それらの施策を効果的・効率的に実施するためには施策効果の適切な予測及び事前事後の評価が重要であることを指摘した上で、既存の静的かつマクロな交通-排出-拡散モデルの枠組みでは限界があることを指摘した。その上で、交通流シミュレーションを用いて動的な交通状況を再現し、排出モデル、拡散モデル等を組み合わせた評価の枠組みが非常に有効であることを指摘した。
2. 排出モデルと交通流シミュレーションモデルに関する既存の研究を整理し、交通シミュレーションを用いた排出量推計の問題点を指摘した。まず、排出モデルについては、①詳細モデル、②ミクロモデル、③メソスケールモデル、④マクロモデルの4階層に分類して既存の研究を整理し、必要とされる排出モデルのインプット（すなわち交通モデルのアウトプット）及び各モデルで想定している排出モデルのアウトプットについても整理した。結論として、車両の速度変動要素を的確に捉え、Hot Spot などの高負荷地域への影響を的確に評価するためには、詳細なエンジン挙動モデル、速度・加速度別瞬間排出モデル、速度変動要素モデルなど、ある程度の空間集計単位での再現性を有する詳細なモデルが必要であることを指摘した。
3. 一方、交通流シミュレーションについては、車両挙動モデルを中心として整理した。Q-Kモデルでは詳細な加減速挙動の再現を意図していないため、排出量に影響を与える速度変動要素の再現性が十分でない。一方、C-Fモデルでは車両の加減速挙動が出力されるが、実務的な利用のレベルでは排出量を推計するのに十分な再現性があるとはいえない。以上の点を踏まえ、ある程度詳細な空間集計単位に対応する排出モデルにおいて必要とされるインプットと、シミュレーションで期待されるアウトプットの間には gap が存在することを指摘した。
4. これらの問題に対応するため、本研究では交通流シミュレーションを用いた新たな排出量推計手法のアプローチを提示した。これは、シミュレーションである程度再現性が期待できるマクロな車

両軌跡と、ある程度短い空間集計単位における速度変動要素を考慮できるモデルのうち集計単位のもっとも大きい速度変動要素モデルを組み合わせた上で、この2つのモデルを結びつけるための排出量推計指標変換モデルを導入するものである。このモデルは走行軌跡の実測データに基づき設定されるものであり、現実を反映した排出量推計指標の導出が可能となる。

5. 上記アプローチに対応した排出モデルとして、エンジン出力と排出量の線形関係を利用した排出量推計モデルを提案した。本モデルでは、10～数100mの空間集計単位においてより良いパフォーマンスで排出量を推計でき、なおかつトリップ単位での排出量も偏りなく再現可能なモデルの構築を目指したものである。車両の運動方程式に基づく定式化により排出量の瞬間値モデルを生成し、更にそれを積分することにより、推計対象区間での集計量を説明変数（排出量推計指標）とする排出量推計モデルを作成した。特に、ギヤ比の影響を定式上取り込み、集計化することを前提としたギヤ比の影響の簡略化を行っている点がモデル上の新たな点である。
6. 上記モデルに対して、シャシダイナモ試験の実測データ（ディーゼル貨物車）を用いてパラメータを推定し、既存のモデルとの比較を通してモデルの有効性を確認した。特に、ギヤ比の影響がある低速域での再現性向上が認められた。また、パラメータ推定の際の集計距離とモデルの精度の関係を分析した。短い集計距離ではエンジン挙動、測定タイムラグなどの誤差の影響を受けトリップ単位の精度も低下すること、長い集計単位では説明変数（排出量推計指標）間の相関により、精度が低下することを示し、その中間的な、目的とする空間集計単位のレベルでの集計がもっとも適切であることを示した。
7. 加減速度一定、自由流旅行速度一定の簡単な車両の停止・発進挙動をモデル化して、提案した排出モデルを適用することにより、モデルの特性を明らかにするとともに、排出量の空間分布と車両挙動の関係を分析した。結論として、提案した排出モデルでは加速時の排出量が概ね初速度・終速度で決定されること、自由流旅行速度、遅れ時間の増加が排出量増加に大きな影響を有していること、加減速度が排出量の空間的分布及び排出強度に大きく影響を与えることなどが示された。
8. 上記の車両挙動モデルを発展させ、孤立交差点を対象とした車両群の停止・発進挙動に伴う排出量の空間分布を定式化した。このモデルには信号制御パラメータを内生化しており、信号制御による排出量の空間分布の推計が可能である。このモデルを用いていくつかのケースを設定したモデル分析を行った。その結果として、スプリットを固定したままサイクル長を変動させたケースで、サイクル長を短くすることにより遅れ時間及び排出総量は低減するが、交差点近傍に停止・発進挙動が集中するため、単位時間当たりでは局地的に排出量が増大するケースが見られた。このようなケ

ースは、排出量の空間分布を捉えることの重要性を示すものである。また、同モデルで平均旅行速度と排出量の関係を分析し、特に自由流旅行速度が向上した場合に平均旅行速度が向上するにもかかわらず排出量が増大することを示した。

9. 上記モデルの応用として、孤立交差点での排出量の観点からの最適スプリットを分析した。結論として、交差点全体の飽和度に余裕があり、主従の交通量に差がある場合、主道路側に若干大きなスプリットを割り振ると、総遅れ時間は増加するものの停止回数が相対的に減少することにより排出量が低減することを示した。ただし、排出量最小化の状態では総遅れ時間が最小時の2倍程度になるなど、総遅れ時間の感度が相対的に大きく、排出量の感度が小さい点が適用上の留意点となる。
9. 本研究で提案した排出量推計アプローチの中核をなす排出量推計指標変換モデルの定式化・構築を行った。排出量推計指標変換モデルは、交通モデルの出力として与えられる直線近似された車両軌跡に対して、平均加減速時間のモデルを用いて加速・減速・定速・停止の各モードに分割した上、排出量推計指標の空間分布モデルを当てはめる手法である。まず、直線近似された車両軌跡の導出方法を明確化することにより、実際の車両軌跡と直線近似された車両軌跡の関係を関連づけるとともに、上記の手法の詳細を明確に記述した。
10. 実走行調査のデータを分析して排出量推計指標変換モデルのモデルパラメータを具体的に設定した。また、それらのパラメータを用いて実際の車両軌跡に適用して排出量の空間分布を推計し、排出量の空間的ピーク及びその前後の空間的分布などについて良好な再現性を得ることができた。

## 7. 2 今後の課題

本研究において残されている課題を以下にまとめる。

1. まず、排出量推計モデルについてであるが、今回対象とした車種は一部のディーゼル貨物車のみであり、実際に世の中に存在する幅広い車種を考慮したモデルの有効性の確認、パラメータの推定には至っていない。様々な車種に対する適用可能性を検討する必要があるとともに、実際に走行している車両の車種構成やシミュレーションで与えられる車種区分などを考慮したモデルパラメータの設定が必要とされる。もっとも、交通施策に対する排出量の感度の分析に焦点を当てる場合にはエンジン出力比例を仮定した今回のアプローチは引き続き有効であろうが、実際の排出特性に対応したモデルとするためには、モデルの説明変数である排出量推計指標の再構築も必要となる可能性もあろう。また、今回はデータの問題から十分に検証が行えなかった車両重量、勾配の影響等についても検証を加える必要がある。
2. また、車両挙動モデル及び提案した排出モデルを用いた排出量の空間分布に関する検討では、孤立交差点を対象とした一様流という単純なケースのみを取り上げた。例えばランダムな到着を仮定した場合や、系統交差点での有効な系統制御のあり方（特に空間分布との関係について）などについて、まだ検討がなされておらず、今後の課題である。また、これらの問題に関連して、排出量低減という観点からの有効な制御指標の設定なども課題となろう。
3. 排出量推計指標変換モデルについては、今回の車両軌跡データは、①ほぼ全てのデータが片側2車線以上の道路であること、②走行調査時の交通状況に関するデータがないこと、③実際の走行位置に関する精度が不十分であり、道路条件（勾配など）との対応がマッチングしないこと、等の理由により、限定された分析にとどまっている。今後、車両軌跡の実測データを蓄積して、様々な道路・交通条件に対応した変換モデルを作成し、適用範囲を広げる必要がある。また、モデルの検証のためには、交差点周辺の数百m区間といったような比較的長い区間に渡って連続的に全車両の軌跡を取得し、そのデータとの比較が有効であろう。このような取り組みも既に行っているものの<sup>1) 2)</sup>、現段階で十分な精度で車両軌跡を取得するには至っていない。これらのデータを用いたシミュレーションとの組み合わせによる総合的な検証が必要とされる。また、今回は1車種に対するパラメータの設定にとどまっている。車種による車両の走行挙動の違いは明らかであり、今後、排出量に対する影響なども含め、車種の違いを考慮した検討を行う必要がある。

手法そのものに関する課題としては、加速区間・減速区間の設定方法に伴う問題がある。すなわち、台形型速度プロファイルに従って設定された加速、減速範囲の初速度、終速度と、それに

対応する実軌跡の初速度，終速度が整合しないことによると見られる排出量推計指標の偏りが見られている（主に  $Z_m$ ,  $Z_a$  について）．加速区間・減速区間の設定方法についてはまだ改善の余地が残されており，それらを含めた手法の検討が必要とされる．

また，今回は汎用性の高いモデルとするため特にシミュレーションモデルを限定しなかったが，今後シミュレーションモデルへの実装を行い，施策評価への適用を通して本手法の有効性を確実なものとしたいと考えている．この際，適用対象となるモデルの特性に依存した問題が発生することも想定される．

## 第7章の参考文献

- 1) 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, 2001
- 2) 小根山裕之, 大口敬, 赤羽弘和, 桑原雅夫: 直線近似された車両軌跡からの排出量推計手法, 第26回土木計画学研究・講演集, 2002

# 図表一覧

## 第1章

表1-1 大気汚染低減に資する交通施策

## 第2章

表2-1 排出量推計モデルとシミュレーションモデルのまとめ

## 第3章

図3-1 提案する排出量推計モデルの基本的なフロー

図3-2 実際の軌跡（左図）と直線近似された車両軌跡（右図）

図3-3 排出量推計指標変換モデルのイメージ

## 第4章

図4-1 車両速度とエンジン回転数の関係

図4-2 100m 区間排出量と要因別寄与の関係（NO<sub>x</sub>，車両2）

図4-3 平均旅行速度と排出量の推計誤差の関係（NO<sub>x</sub>，車両1）

図4-4 平均旅行速度と排出量の推計誤差の関係（NO<sub>x</sub>，車両3）

図4-5 モデルの説明変数間の相関（車両1， $Z_v-Z_{v3}$ ，単位距離当たり，集計距離別）

図4-6 モデルの説明変数間の相関（車両1， $Z_v-Z_{av}$ ，単位距離当たり，集計距離別）

図4-7 モデルの説明変数間の相関（車両1， $Z_{v3}-Z_{av}$ ，単位距離当たり，集計距離別）

図4-8 モデルの説明変数間の相関（車両1， $Z_{av}-Z_{a}$ ，単位距離当たり，集計距離別）

図4-9 集計単位とパラメータの変化（NO<sub>x</sub>，車両3）

図4-10 対象とする集計単位と推計誤差(%RMS 誤差)の関係（推計対象区間別，NO<sub>x</sub>）

図4-11 平均速度別排出量（NO<sub>x</sub>，車両3，推計対象集計距離別）

図4-12 速度帯・加速度別排出量（NO<sub>x</sub>，5km/h 及び 10～80km/h については 10km/h 毎）

## 第5章

図5-1 停止位置周辺の走行軌跡

図5-2 加速度と排出量の関係（遅れ時間別，自由流旅行速度  $v_f=36\text{km/h}$ ）

図5-3 遅れ時間と排出量の関係（要因別，加減速度  $\alpha=0.9$ ，自由流旅行速度  $v_f=36\text{km/h}$ ）

図5-4 自由流旅行速度  $v_f$  と排出量の関係（要因別，加減速度  $\alpha=0.9$ ）

表5-1 単純な発進・停止車両軌跡を仮定した場合の排出量推計モデルの各説明変数

図5-5 排出量の距離帯別分布に関する試算

(車両2、遅れ時間  $w = 20$  sec 自由流旅行速度  $V_f = 10$  m/s (=36 km/h)、加減速度  $\alpha = 1.5$  m/s<sup>2</sup>)

図5-6 排出量の距離帯別分布に関する試算

(車両2、遅れ時間  $w = 20$  sec 自由流旅行速度  $V_f = 10$  m/s (=36 km/h)、加減速度  $\alpha = 1.0$  m/s<sup>2</sup>)

図5-7 排出量の距離帯別分布に関する試算

(車両2、遅れ時間  $w = 20$  sec 自由流旅行速度  $V_f = 10$  m/s (=36 km/h)、加減速度  $a = 0.5$  m/s<sup>2</sup>)

図5-8 交差点周辺の time-space 図

図5-9 累積到着交通量と通過位置図

表5-2 試算ケース及び結果

図5-10 加速度を変化させた場合の排出量の空間分布

図5-11 加速度を変化させた場合の排出量の空間分布 (双方向を考慮)

図5-12 ジャム密度を変化させた場合の排出量の空間分布

図5-13 自由流旅行速度を変化させた場合の排出量の空間分布

図5-14 交通量を変化させた場合の排出量の空間分布

図5-15 サイクル長を変化させた場合の排出量の空間分布

図5-16 青時間長を変化させた場合の排出量の空間分布

図5-17 平均旅行速度と1台当たり NO<sub>x</sub> 排出量の関係

図5-18 排出量推計対象とする4肢交差点

図5-19 自由流旅行速度と各変数の値の関係

図5-20 飽和度と最適スプリットの関係

図5-21 遅れ時間、排出量の関係 (飽和度別)

## 第6章

図6-1 排出量推計指標変換モデルのイメージ

図6-2 シミュレーション等で再現される車両軌跡 (イメージ)

図6-3 実際の走行軌跡 (黒実線) とそれに対応する直線近似された走行軌跡 (赤実線) の関係

図6-4 直線近似された走行軌跡と台形型走行軌跡の関係

図6-5 走行単位と各区間の関係

図6-6 走行単位毎の軌跡の調整

表6-1 調査路線の一覧

図6-7 加速・減速・定速区間の抽出方法

図6-8 アイドリング時の燃料流量の頻度分布の例

図6-9 速度増加分と加速時間の関係 (初速度ランク別)

図6-10 初速度ランクと係数の関係

- 図 6-1-1 速度増加分と加速時間の関係 (路線別)
- 図 6-1-2 速度増加分と加速時間の関係 (路線の平均旅行速度ランク別)
- 図 6-1-3 速度増加分と減速時間の関係 (初速度ランク別)
- 図 6-1-4 初速度ランクと係数の関係
- 図 6-1-5 速度減少分と減速時間の関係 (路線別)
- 図 6-1-6 速度減少分と減速時間の関係 (路線の平均旅行速度ランク別)
- 図 6-1-7 加速・減速時間モデル (観測値及び推定値の相関)
- 図 6-1-8 巡航速度  $V_c$  と加速時単位距離当たり  $Z_v$  の関係
- 図 6-1-9 巡航速度  $V_c$  と加速時単位距離当たり  $Z_{v3}$  の関係
- 図 6-2-0  $Z_{v3}$  の実測値と推計値の関係
- 図 6-2-1 加速時  $Z_{av}$ ,  $Z_a$  とモデル式からの導出値の関係
- 図 6-2-2 加速時  $Z_{av}$ ,  $Z_a$  について実測値と推定値の関係
- 図 6-2-3 定常走行時の巡航速度  $V_c$  と  $Z_v$ ,  $Z_{v3}$  の関係
- 図 6-2-4 定常走行時の巡航速度  $V_c$  と  $Z_{av}$ ,  $Z_a$  の関係
- 図 6-2-5 巡航速度  $V_c$  と単位距離当たり  $Z_v$ ,  $Z_{v3}$  の関係
- 図 6-2-6 巡航速度  $V_c$  と単位距離当たり  $Z_{av}$ ,  $Z_a$  の関係
- 図 6-2-7 速度と正規化  $Z_{av}$  の関係
- 図 6-2-8 距離帯別の排出量推計指標分布 ( $Z_{av}$ )
- 図 6-2-9  $Z_{av}$  の空間分布 (実距離, 実指標値に変換, 但し  $Z_{av}$  は単位距離当たり)
- 表 6-2 距離帯別パラメータと変動係数 ( $Z_{av}$ )
- 図 6-3-0 距離帯別の排出量推計指標分布 ( $Z_{v3}$ )
- 図 6-3-1  $Z_{v3}$  の空間分布 (実距離, 実指標値に変換, 但し  $Z_{v3}$  は単位距離当たり)
- 図 6-3-2 距離帯別の排出量推計指標分布 ( $Z_a$ )
- 図 6-3-3  $Z_a$  の空間分布 (実距離, 実指標値に変換, 但し  $Z_a$  は単位距離当たり)
- 図 6-3-4 距離帯別の排出量推計指標分布 ( $T_{r+}$ )
- 図 6-3-5  $T_{r+}$  の空間分布 (実距離, 実指標値に変換, 但し  $T_{r+}$  は単位距離当たり)
- 図 6-3-6 距離帯別の排出量推計指標分布 ( $T_r$ )
- 図 6-3-7  $T_r$  の空間分布 (実距離, 実指標値に変換, 但し  $T_r$  は単位距離当たり)
- 図 6-3-8 実軌跡 (赤細線) と直線近似された走行軌跡 (青太線) の関係 (time-space 図)
- 図 6-3-9 実軌跡 (赤細線) と直線近似された走行軌跡 (青太線) の関係 (time-velocity 図)
- 図 6-4-0 NOx 排出量推計結果
- 図 6-4-1 排出量推計指標の推計結果 ( $Z_v$ )
- 図 6-4-2 排出量推計指標の推計結果 ( $Z_{v3}$ )
- 図 6-4-3 排出量推計指標の推計結果 ( $Z_{av}$ )

図6-44 排出量推計指標の推計結果 ( $Z_{\alpha}$ )

図6-45 排出量推計指標の推計結果 ( $T_{r+}$ )

図6-46 排出量推計指標の推計結果 ( $T_{r-}$ )

図6-47 排出量推計指標の推計結果 ( $T_i$ )

# APPENDIX

## 目次

A1：シャシダイナモ台上試験の主な車両諸元	A-2
A2：分析に用いた走行モード	A-3
A3：シャシダイナモ台上試験システムダイヤグラム	A-4
A4：パラメータ推計結果（集計距離=100m）	A-5
A5：パラメータ推計結果：各モデル別パラメータの検討及び誤差 （RMSE, %RMSE）	A-6
A6：平均速度式のパラメータ	A-7
A7：モデル間比較結果	A-8
A8：排出量評価指標の導出過程	A-12
A9：交差点排出量の導出過程	A-17
A10：最適化問題の求解過程	A-18

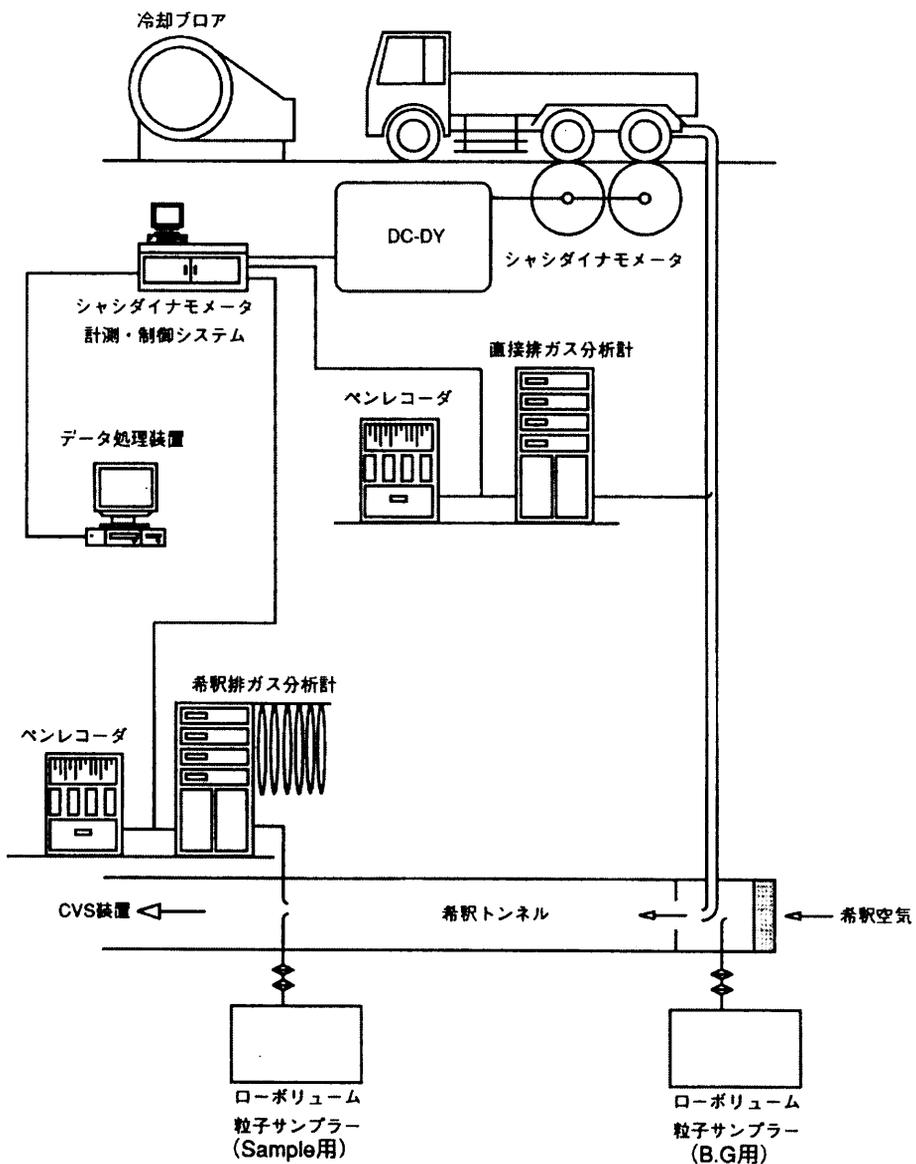
# A1：シャシダイナモ台上試験の主な車両諸元

車名		車両1	車両2	車両3	車両4
車体	全長 (mm)	8480	7990	11980	9720
	全幅 (mm)	2260	2230	2490	2490
	全高 (mm)	2760	2410	3780	2895
	車両重量 (kg)	3680	3820	10575	7990
	定員 (人)	2	2	2	2
	最大積載量 (kg)	4100	4050	14300	11750
	車両総重量 (kg)	7890	7980	24985	19850
原動機	種類	D1NA	D1,TI	D1,TI,L6	D1NA
	圧縮比	18.5	18	16.5	19.2
	総排気量 (cc)	8226	7961	12068	19688
	最高出力	210/2850	260/2700	360/2000	355/2200
	最大トルク	55/1700	76/1600	147/1200	236/1400
	排出ガス対策方式	-----	エンジンモディフィケーション	エンジンモディフィケーション	エンジンモディフィケーション
変速比	形式	OD6	常時噛合式	MJD7P	常時噛合式
	1速	6.378	6.893	7.74	6
	2速	3.627	4.274	5.362	4.038
	3速	2.307	2.607	3.153	2.25
	4速	1.452	1.564	1.958	1.435
	5速	1	1	1.394	1
	6速	0.723	0.77	1	0.714
	7速	-----	-----	0.775	-----
最終減速比	4.555	3.636	4.333	4.875	
タイヤ	前	7.5-16-14PR	225/80R17.5 14PR	295/80R22.5	275/70R22.5
	後	7.5-16-14PR	225/80R17.5 14PR	11R22.5	275/70R22.5
排ガス規制年度		平成6年	平成6年	平成6年	平成6年
走行距離		62587~67069	133490~136740	7963~13680	6765~11350
走行抵抗	転がり抵抗係数	0.00872	0.00715	0.00667	0.00716
槽行法による	空気抵抗	0.018111	0.015922	0.031197	0.023474

A2：分析に用いた走行モード

	モード名	平均速度 [km/h]	車両					モード名	平均速度 [km/h]	車両					
			1	2	3	4				1	2	3	4		
パラメータ 推定用データ	土研モード	TN201	15.6	○	○	○	○	検 証 用 デ ー タ	建 設 省 モ ー ド	CT32	20.3	○			
		TN301	25.7		○	○	○			CT41	40.0	○	○	○	○
		TN401	34.8	○	○	○	○			CT44	59.1	○	○	○	○
		TN501	45.0		○	○	○		J A R I モ ー ド	HCS11	8.6	○			
		TN601	53.4	○	○	○	○			LCS21	14.7		○		
		TES2	14.9	○	○	○	○			HCS21	15.2	○		○	○
		TES4	30.8	○	○	○	○			LCS31	26.1		○		
		TES6	50.7	○	○	○	○			HCS31	26.6	○		○	○
		TEC6	56.3	○	○	○	○			HCS41	34.1	○			
		TEC7	61.3	○	○	○	○			LCS51	43.1		○		
		TEC9	83.4	○	○	○	○			HCS51	45.0	○		○	○
		TEC11	94.7	○	○	○	○			HHS21	10.5	○			
										LHS31	23.4		○		
										HHS31	26.7	○		○	○
						LHS51	44.1		○						
						HHS51	40.9	○		○					
						LHC61	59.2		○						
						HHC61	57.3	○		○	○				
						HHC71	63.2	○							
						LHC81	75.5		○						
						HHC81	74.6	○		○	○				

A3：シャシダイナモ台上試験システムダイアグラム



A4：パラメータ推計結果（集計距離=100m）

	CO		NOx		CO2		燃料消費量		
車両1	集計単位	100m		100m		100m		100m	
	サンプル数	2041		2041		2041		2039	
	パラメータ	値	(t値)	値	(t値)	値	(t値)	値	(t値)
	C1(Zv)	1.45E-03	(27.32)	6.89E-04	(26.02)	1.47E-01	(23.93)	7.49E-05	(20.43)
	C2(Zv3)	-1.18E-06	(-14.78)	3.02E-06	(76.14)	4.11E-04	(44.79)	1.32E-07	(24.10)
	C3a(Zav)	1.26E-03	(10.55)	6.02E-03	(101.42)	1.02E+00	(74.50)	3.91E-04	(47.61)
	C3b(Za)	1.25E-03	(5.82)	2.56E-03	(23.85)	1.68E-01	(6.76)	-7.47E-05	(-5.04)
	C4r+(Tr+)	1.05E-02	(20.26)	5.72E-03	(22.17)	1.20E+00	(20.08)	3.54E-04	(9.92)
	C4r-(Tr-)	5.08E-03	(21.55)	2.24E-03	(19.06)	5.03E-01	(18.53)	4.57E-04	(28.13)
	C4i(Ti)	5.69E-03	(18.13)	4.11E-03	(13.55)	6.55E-01	(13.18)	2.60E-04	(5.64)
		当該	検証	当該	検証	当該	検証	当該	検証
	R	0.955	0.955	0.993	0.992	0.985	0.984	0.949	0.951
	RMSE	3.43E-04	3.91E-04	1.71E-04	2.24E-04	3.95E-02	4.35E-02	2.36E-05	2.61E-05
	%RMSE	18.30%	18.91%	7.01%	8.75%	9.54%	10.27%	14.78%	15.77%
車両2	集計単位	100m		100m		100m		100m	
	サンプル数	2379		2378		2379		2377	
	パラメータ	値	(t値)	値	(t値)	値	(t値)	値	(t値)
	C1(Zv)	9.40E-04	(29.34)	7.22E-04	(25.59)	1.69E-01	(29.13)	7.68E-05	(23.36)
	C2(Zv3)	-9.30E-07	(-19.11)	2.31E-06	(53.79)	2.30E-04	(26.09)	7.27E-08	(14.55)
	C3a(Zav)	-6.54E-04	(-9.03)	6.19E-03	(97.03)	8.64E-01	(65.85)	3.53E-04	(47.53)
	C3b(Za)	2.05E-03	(16.22)	3.98E-03	(35.77)	4.52E-01	(19.74)	2.43E-05	(1.88)
	C4r+(Tr+)	6.79E-03	(22.42)	1.04E-02	(39.09)	9.70E-01	(17.67)	3.26E-04	(10.50)
	C4r-(Tr-)	9.84E-04	(7.29)	3.39E-03	(28.54)	2.80E-01	(11.44)	3.25E-04	(23.49)
	C4i(Ti)	2.89E-03	(8.03)	7.64E-03	(7.02)	6.57E-01	(7.38)	2.68E-04	(5.87)
		当該	検証	当該	検証	当該	検証	当該	検証
	R	0.948	0.926	0.995	0.992	0.986	0.987	0.962	0.962
	RMSE	2.16E-04	2.55E-04	1.92E-04	2.90E-04	3.91E-02	4.42E-02	2.21E-05	2.56E-05
	%RMSE	20.65%	26.07%	6.90%	9.79%	10.37%	11.09%	15.14%	16.62%
車両3	集計単位	100m		100m		100m		100m	
	サンプル数	2239		2239		2239		2237	
	パラメータ	値	(t値)	値	(t値)	値	(t値)	値	(t値)
	C1(Zv)	1.02E-03	(16.86)	2.49E-03	(18.60)	3.61E-01	(46.47)	1.86E-04	(33.56)
	C2(Zv3)	-1.08E-06	(-9.14)	7.87E-06	(30.01)	4.97E-04	(32.60)	1.19E-07	(10.93)
	C3a(Zav)	-1.12E-03	(-5.71)	2.04E-02	(46.97)	2.64E+00	(104.78)	8.69E-04	(48.28)
	C3b(Za)	5.15E-03	(16.59)	3.09E-02	(44.95)	1.41E+00	(35.42)	4.21E-04	(14.79)
	C4r+(Tr+)	4.41E-03	(10.68)	6.67E-03	(7.29)	7.68E-01	(14.46)	2.29E-04	(6.03)
	C4r-(Tr-)	2.56E-03	(7.43)	3.73E-03	(4.89)	4.27E-01	(9.62)	4.61E-04	(14.56)
	C4i(Ti)	3.93E-03	(9.27)	7.60E-03	(3.14)	9.73E-01	(8.81)	4.09E-04	(3.69)
		当該	検証	当該	検証	当該	検証	当該	検証
	R	0.838	0.929	0.979	0.978	0.992	0.990	0.964	0.968
	RMSE	6.17E-04	3.06E-04	1.37E-03	1.33E-03	7.94E-02	8.12E-02	5.66E-05	4.92E-05
	%RMSE	56.54%	28.37%	16.81%	17.26%	9.87%	10.64%	18.15%	16.55%
車両4	集計単位	100m		100m		100m		100m	
	サンプル数	2392		2392		2392		2390	
	パラメータ	値	(t値)	値	(t値)	値	(t値)	値	(t値)
	C1(Zv)	3.22E-03	(63.28)	-1.15E-03	(-11.43)	3.88E-01	(56.90)	1.88E-04	(42.43)
	C2(Zv3)	-3.58E-06	(-32.28)	1.49E-05	(68.29)	4.97E-04	(33.36)	1.43E-07	(14.74)
	C3a(Zav)	-1.80E-03	(-10.38)	1.43E-02	(41.61)	2.00E+00	(86.00)	6.58E-04	(43.40)
	C3b(Za)	4.03E-03	(15.21)	1.03E-02	(19.76)	1.09E+00	(30.64)	3.83E-04	(16.55)
	C4r+(Tr+)	2.40E-03	(8.94)	1.43E-02	(26.97)	1.05E+00	(29.18)	3.46E-04	(14.77)
	C4r-(Tr-)	5.20E-03	(16.23)	4.92E-03	(7.78)	8.41E-01	(19.57)	5.34E-04	(19.11)
	C4i(Ti)	3.46E-03	(8.36)	1.23E-02	(6.71)	1.17E+00	(7.00)	4.95E-04	(2.98)
		当該	検証	当該	検証	当該	検証	当該	検証
	R	0.849	0.813	0.957	0.964	0.988	0.984	0.961	0.962
	RMSE	5.82E-04	5.63E-04	1.15E-03	9.60E-04	7.81E-02	8.57E-02	5.08E-05	4.79E-05
	%RMSE	28.09%	25.30%	20.02%	19.34%	10.08%	11.57%	16.53%	16.24%

A5：パラメータ推計結果：各モデル別パラメータの検討及び誤差（RMSE, %RMSE）

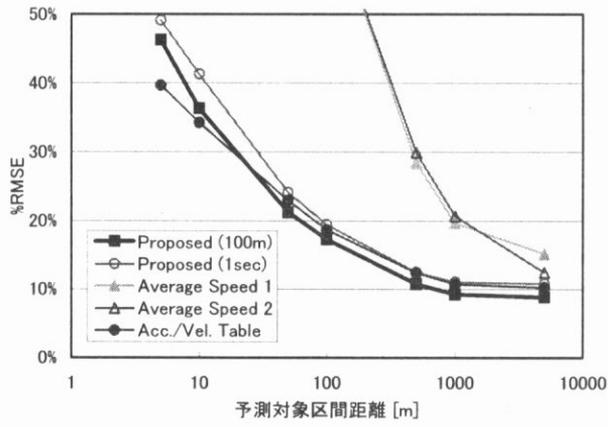
	NOx	Model 1		Model 2		Model 3		Model 4	
車両1	集計単位	100m		100m		100m		100m	
	サンプル数	2041		2041		2041		2041	
	パラメータ	値	(t値)	値	(t値)	値	(t値)	値	(t値)
	C1(Zv)	6.89E-04	(26.02)	3.02E-04	(12.77)	8.61E-04	(59.88)	8.32E-04	(62.23)
	C2(Zv3)	3.02E-06	(76.14)	3.38E-06	(81.58)	2.87E-06	(85.79)	2.88E-06	(87.65)
	C3a(Zav)	6.02E-03	(101.42)	7.23E-03	(208.60)	5.83E-03	(102.59)	5.84E-03	(110.92)
	C3b(Za)	2.56E-03	(23.85)			3.17E-03	(33.26)	3.02E-03	(38.30)
	C4r+(Tr+)	5.72E-03	(22.17)	9.94E-03	(46.81)	3.50E-03	(70.50)	4.11E-03	(13.55)
	C4r-(Tr-)	2.24E-03	(19.06)	2.90E-03	(22.51)	3.50E-03	(70.50)	2.46E-03	(21.83)
	C4i(Ti)	4.11E-03	(13.55)	4.11E-03	(13.55)	3.50E-03	(70.50)	4.11E-03	(13.55)
		当該	検証	当該	検証	当該	検証	当該	検証
	R	0.993	0.992	0.991	0.989	0.993	0.992	0.993	0.992
	RMSE	1.71E-04	2.24E-04	1.93E-04	2.50E-04	1.75E-04	2.19E-04	1.72E-04	2.21E-04
%RMSE	7.01%	8.75%	7.93%	9.77%	7.16%	8.57%	7.07%	8.65%	
車両2	集計単位	100m		100m		100m		100m	
	サンプル数	2041		2041		2041		2041	
	パラメータ	値	(t値)	値	(t値)	値	(t値)	値	(t値)
	C1(Zv)	7.22E-04	(25.59)	8.87E-05	(3.25)	9.79E-04	(53.76)	9.73E-04	(64.09)
	C2(Zv3)	2.31E-06	(53.79)	2.91E-06	(59.48)	2.12E-06	(50.56)	2.06E-06	(56.52)
	C3a(Zav)	6.19E-03	(97.03)	8.13E-03	(197.31)	6.13E-03	(88.31)	5.87E-03	(102.22)
	C3b(Za)	3.98E-03	(35.77)			4.50E-03	(40.76)	4.78E-03	(58.40)
	C4r+(Tr+)	1.04E-02	(39.09)	1.70E-02	(71.53)	6.68E-03	(123.14)	7.64E-03	(7.02)
	C4r-(Tr-)	3.39E-03	(28.54)	4.62E-03	(32.73)	6.68E-03	(123.14)	3.68E-03	(31.14)
	C4i(Ti)	7.64E-03	(7.02)	7.64E-03	(7.02)	6.68E-03	(123.14)	7.64E-03	(7.02)
		当該	検証	当該	検証	当該	検証	当該	検証
	R	0.995	0.992	0.993	0.991	0.994	0.990	0.995	0.991
	RMSE	1.92E-04	2.90E-04	2.37E-04	3.13E-04	2.22E-04	3.14E-04	1.96E-04	2.93E-04
%RMSE	6.90%	9.79%	8.52%	10.54%	8.00%	10.59%	7.05%	9.89%	
車両3	集計単位	100m		100m		100m		100m	
	サンプル数	2239		2041		2041		2041	
	パラメータ	値	(t値)	値	(t値)	値	(t値)	値	(t値)
	C1(Zv)	2.49E-03	(18.60)	3.68E-04	(2.13)	2.36E-03	(20.76)	2.41E-03	(22.56)
	C2(Zv3)	7.87E-06	(30.01)	9.45E-06	(26.35)	8.06E-06	(31.63)	7.95E-06	(31.74)
	C3a(Zav)	2.04E-02	(46.97)	3.65E-02	(108.64)	2.12E-02	(47.72)	2.05E-02	(49.67)
	C3b(Za)	3.09E-02	(44.95)			2.94E-02	(41.32)	3.05E-02	(51.40)
	C4r+(Tr+)	6.67E-03	(7.29)	2.73E-02	(25.07)	7.02E-03	(20.10)	7.60E-03	(3.14)
	C4r-(Tr-)	3.73E-03	(4.89)	1.72E-02	(17.74)	7.02E-03	(20.10)	3.52E-03	(4.79)
	C4i(Ti)	7.60E-03	(3.14)	7.60E-03	(3.14)	7.02E-03	(20.10)	7.60E-03	(3.14)
		当該	検証	当該	検証	当該	検証	当該	検証
	R	0.979	0.978	0.961	0.966	0.979	0.978	0.979	0.978
	RMSE	1.37E-03	1.33E-03	1.89E-03	1.61E-03	1.38E-03	1.34E-03	1.37E-03	1.33E-03
%RMSE	16.81%	17.26%	23.16%	20.87%	16.92%	17.38%	16.82%	17.26%	
車両4	集計単位	100m		100m		100m		100m	
	サンプル数	2041		2041		2041		2041	
	パラメータ	値	(t値)	値	(t値)	値	(t値)	値	(t値)
	C1(Zv)	-1.15E-03	(-11.43)	-1.62E-03	(-15.39)	-9.02E-04	(-9.45)	-9.61E-04	(-11.07)
	C2(Zv3)	1.49E-05	(68.29)	1.52E-05	(64.71)	1.48E-05	(67.29)	1.47E-05	(69.42)
	C3a(Zav)	1.43E-02	(41.61)	1.99E-02	(96.94)	1.44E-02	(39.28)	1.39E-02	(41.89)
	C3b(Za)	1.03E-02	(19.76)			1.04E-02	(17.54)	1.11E-02	(22.85)
	C4r+(Tr+)	1.43E-02	(26.97)	1.83E-02	(34.65)	1.05E-02	(33.80)	1.23E-02	(6.71)
	C4r-(Tr-)	4.92E-03	(7.78)	1.08E-02	(17.93)	1.05E-02	(33.80)	5.46E-03	(8.85)
	C4i(Ti)	1.23E-02	(6.71)	1.23E-02	(6.71)	1.05E-02	(33.80)	1.23E-02	(6.71)
		当該	検証	当該	検証	当該	検証	当該	検証
	R	0.957	0.964	0.950	0.954	0.955	0.963	0.957	0.964
	RMSE	1.15E-03	9.60E-04	1.24E-03	1.08E-03	1.17E-03	9.66E-04	1.15E-03	9.57E-04
%RMSE	20.02%	19.34%	21.60%	21.78%	20.44%	19.47%	20.08%	19.29%	

A6：平均速度式のパラメータ

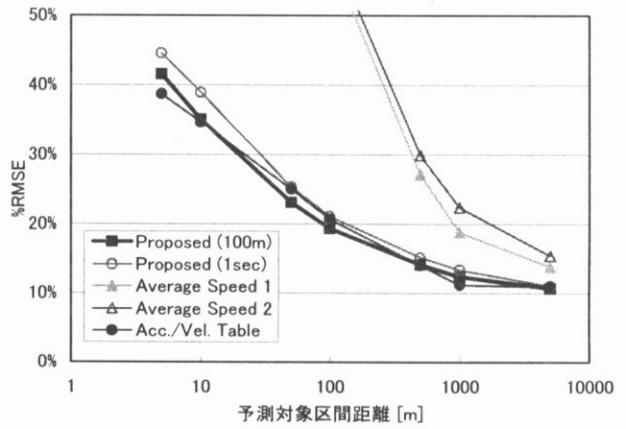
		CO		NOx		CO2		燃料消費量	
車両1	集計単位	1000m		1000m		1000m		1000m	
	サンプル数	209		209		209		208	
	パラメータ	値	(t値)	値	(t値)	値	(t値)	値	(t値)
	a1(定数)	2.87E-03	(3.93)	2.28E-03	(2.22)	3.16E-01	(1.80)	1.39E-04	(2.15)
	a2(1/v)	4.56E-03	(3.20)	3.29E-03	(1.64)	6.75E-01	(1.97)	2.32E-04	(1.84)
	a3(v)	-2.11E-04	(-1.87)	1.08E-04	(0.68)	2.91E-02	(1.07)	8.66E-06	(0.87)
	a4(v <sup>2</sup> )	1.04E-05	(1.58)	-1.72E-05	(-1.84)	-3.35E-03	(-2.10)	-1.14E-06	(-1.95)
	a5(v <sup>3</sup> )	-1.98E-07	(-1.55)	5.42E-07	(3.01)	9.52E-05	(3.09)	3.38E-08	(2.99)
R	0.932		0.791		0.766		0.784		
車両2	集計単位	1000m		1000m		1000m		1000m	
	サンプル数	243		243		243		243	
	パラメータ	値	(t値)	値	(t値)	値	(t値)	値	(t値)
	a1(定数)	2.12E-03	(5.39)	1.36E-03	(1.29)	3.91E-01	(2.56)	1.61E-04	(2.81)
	a2(1/v)	1.77E-03	(2.31)	9.54E-03	(4.63)	5.97E-01	(2.00)	2.09E-04	(1.86)
	a3(v)	-2.25E-04	(-3.73)	2.16E-04	(1.33)	7.39E-03	(0.31)	1.51E-06	(0.17)
	a4(v <sup>2</sup> )	1.28E-05	(3.65)	-2.06E-05	(-2.19)	-1.77E-03	(-1.30)	-6.14E-07	(-1.20)
	a5(v <sup>3</sup> )	-2.47E-07	(-3.68)	5.31E-07	(2.94)	5.54E-05	(2.13)	2.03E-08	(2.07)
R	0.920		0.878		0.810		0.816		
車両3	集計単位	1000m		1000m		1000m		1000m	
	サンプル数	227		227		227		227	
	パラメータ	値	(t値)	値	(t値)	値	(t値)	値	(t値)
	a1(定数)	2.97E-04	(0.52)	6.71E-03	(1.61)	1.02E+00	(2.57)	4.15E-04	(2.69)
	a2(1/v)	8.44E-03	(7.39)	1.70E-02	(2.04)	6.70E-01	(0.85)	2.41E-04	(0.78)
	a3(v)	5.52E-06	(0.06)	1.00E-03	(1.57)	3.06E-02	(0.51)	8.40E-06	(0.36)
	a4(v <sup>2</sup> )	-2.64E-07	(-0.05)	-1.22E-04	(-3.28)	-6.59E-03	(-1.87)	-2.36E-06	(-1.72)
	a5(v <sup>3</sup> )	-1.69E-09	(-0.02)	3.32E-06	(4.63)	1.94E-04	(2.87)	7.18E-08	(2.71)
R	0.943		0.860		0.818		0.821		
車両4	集計単位	1000m		1000m				1000m	
	サンプル数	243		243		243		242	
	パラメータ	値	(t値)	値	(t値)	値	(t値)	値	(t値)
	a1(定数)	1.86E-03	(1.96)	7.29E-03	(2.16)	7.89E-01	(2.13)	3.10E-04	(2.10)
	a2(1/v)	6.51E-03	(3.50)	6.69E-03	(1.01)	1.30E+00	(1.79)	5.19E-04	(1.79)
	a3(v)	-6.37E-05	(-0.44)	-6.17E-05	(-0.12)	2.43E-02	(0.43)	1.03E-05	(0.45)
	a4(v <sup>2</sup> )	4.72E-06	(0.55)	-3.55E-05	(-1.17)	-4.60E-03	(-1.38)	-1.88E-06	(-1.41)
	a5(v <sup>3</sup> )	-1.35E-07	(-0.82)	1.62E-06	(2.77)	1.40E-04	(2.18)	5.69E-08	(2.22)
R	0.847		0.813		0.780		0.779		

# A7: モデル間比較結果

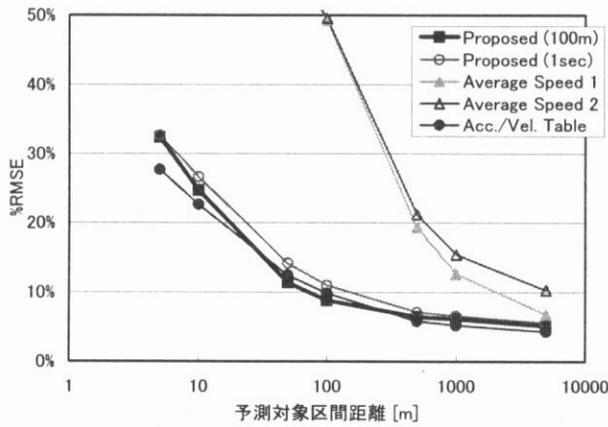
・ NO<sub>x</sub>



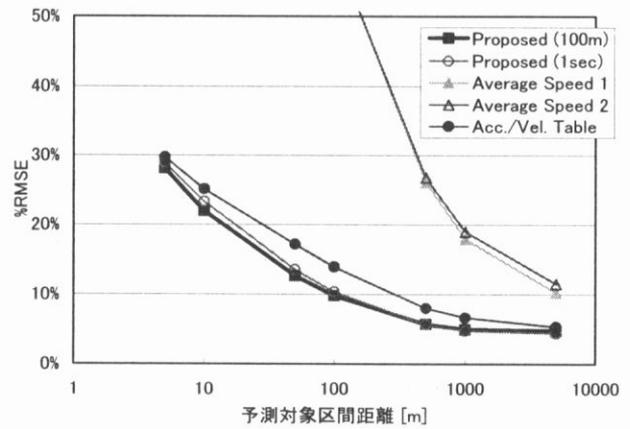
車両 G



車両 S

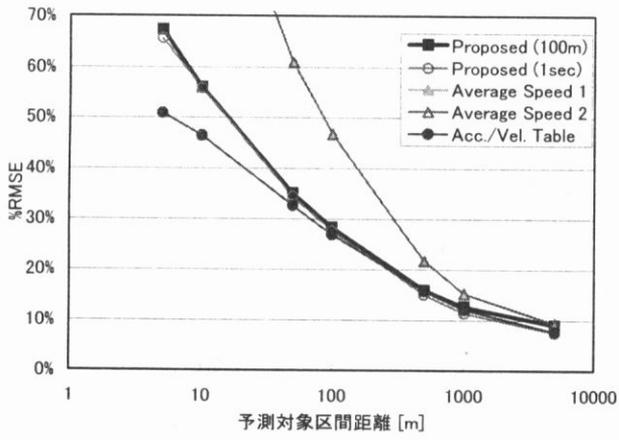


車両 Y

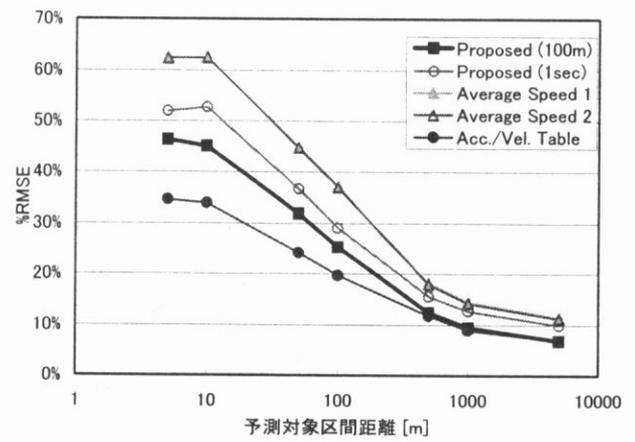


車両 Z

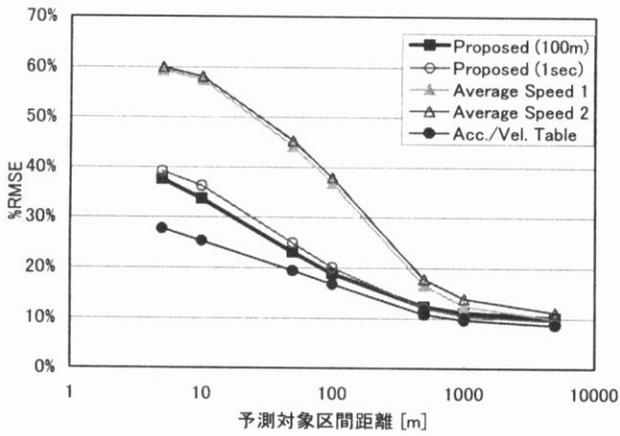
・ CO



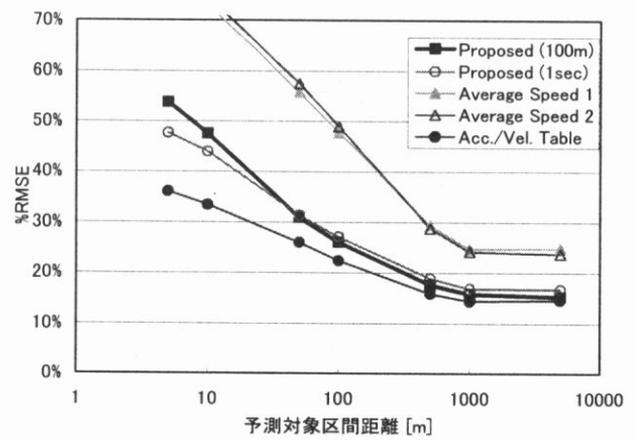
車両 G



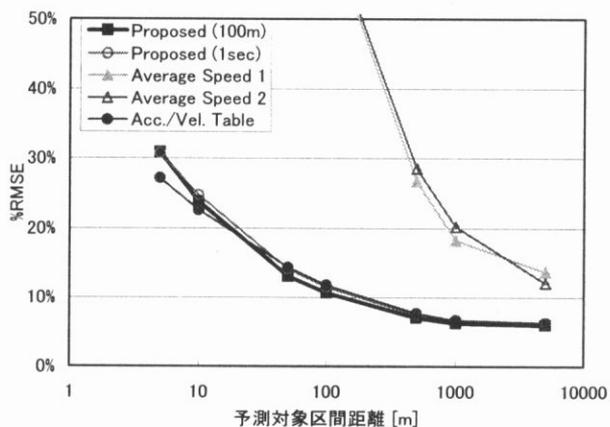
車両 S



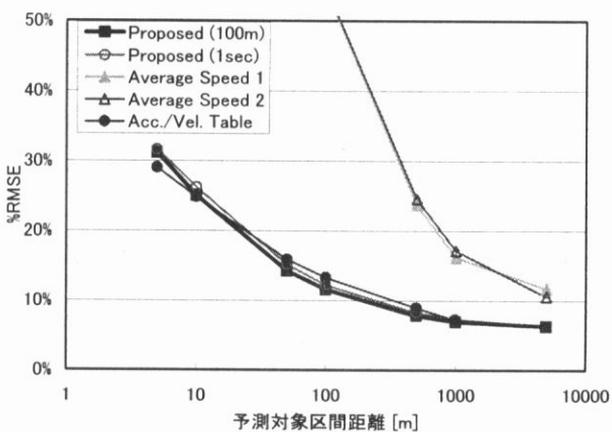
車両 Y



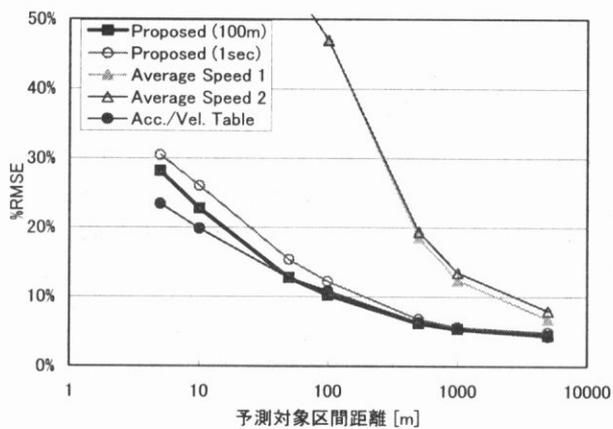
車両 Z



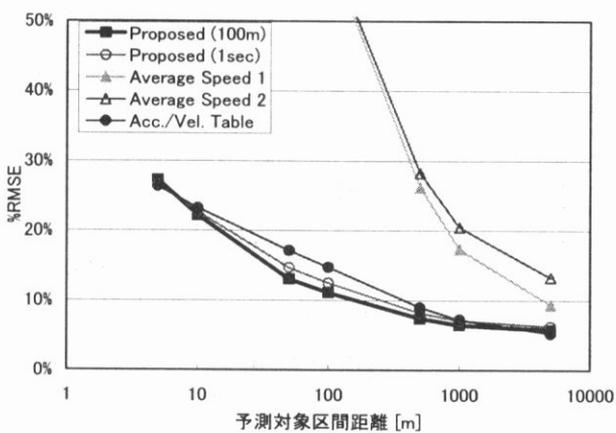
車両 G



車両 S

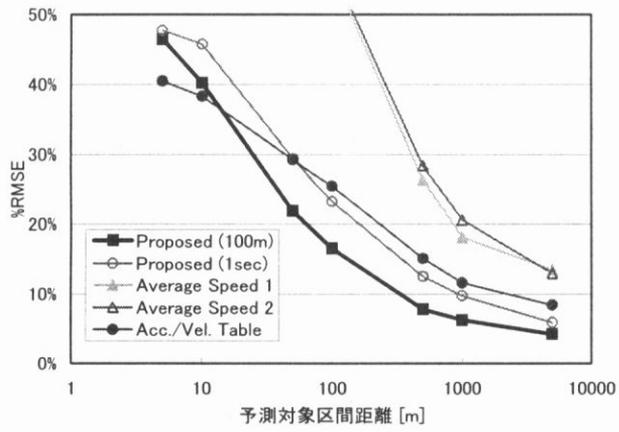


車両 Y

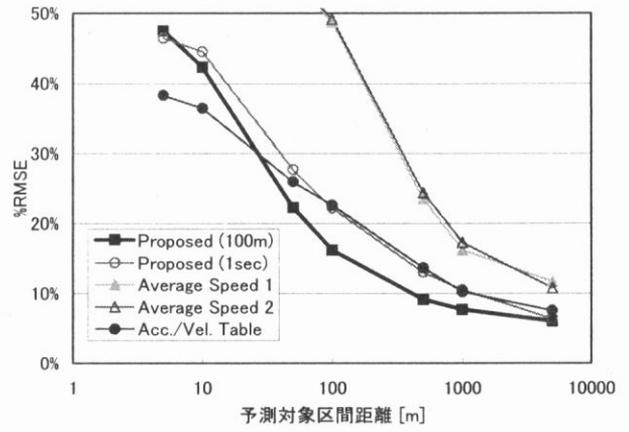


車両 Z

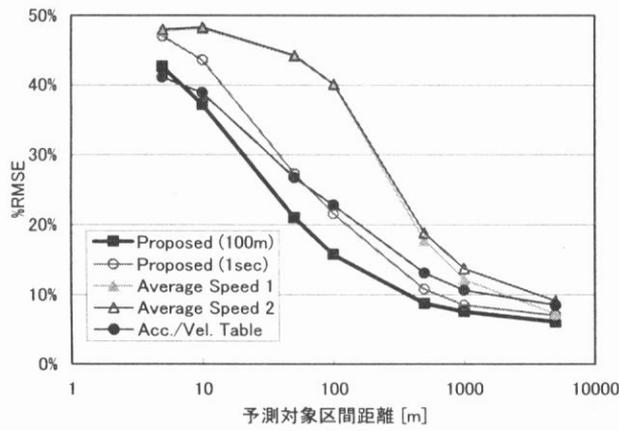
・ 燃料消費量



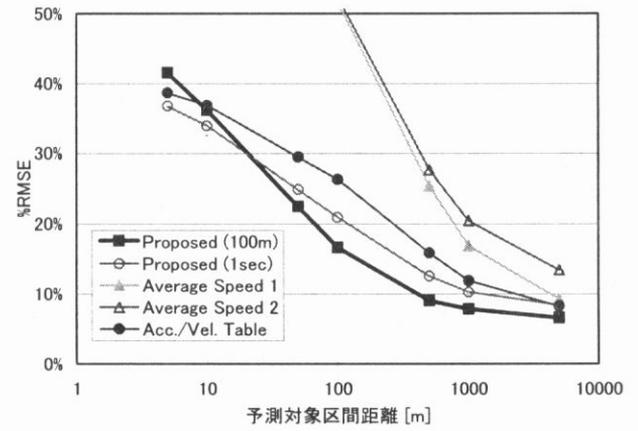
車両 G



車両 S



車両 Y



車両 Z

## A8：排出量評価指標の導出過程

1. 区間全体における排出量推計指標の導出過程  
それぞれ、停止がある場合、ない場合で分けて考える。

①  $w > \frac{v_f}{2\alpha_d} + \frac{v_f}{2\alpha_a}$  の場合、すなわち、停止する場合、

・  $Z_v$

$\delta = 1$  の場合（加速・定速の場合）  $Z_v = \int_0^T v dt = \int_x dx$ ,  $\delta = 0$  の場合（減速の場合）  $Z_v = 0$  である。この場合、

加速・定速走行する距離は停止前  $l - \frac{v_f^2}{2\alpha_d}$ , 停止後  $l$  であるから、

$$Z_v = 2l - \frac{v_f^2}{2\alpha_d}$$

・  $Z_{v3}$

$\delta = 1$  の場合（加速・定速の場合）  $Z_{v3} = \int_0^T v^3 dt = \int_x v^2 dx$ ,  $\delta = 0$  の場合（減速の場合）  $Z_{v3} = 0$  である。従っ

て、

$$\begin{aligned} Z_{v3} &= \int_0^{\frac{v_f^2}{2\alpha_d}} (\sqrt{2\alpha_a x})^2 dx + \int_{\frac{v_f^2}{2\alpha_d}}^l v_f^2 dx + \int_{-l}^{-\frac{v_f^2}{2\alpha_d}} v_f^2 dx \\ &= 2v_f^2 l - \frac{v_f^4}{4\alpha_a} - \frac{v_f^4}{2\alpha_d} \end{aligned}$$

又は、 $\alpha_a = \alpha_d = \alpha$  とするならば、

$$Z_{v3} = 2v_f^2 l - \frac{3v_f^4}{4\alpha}$$

・  $Z_{av}$

4. 3. 3で指摘したとおり、 $\delta = 1$  の区間では、初速度  $v_1$ , 終速度  $v_2$  とすると、 $z_{av} = \frac{1}{2}(v_2^2 - v_1^2)$  である。今回の場合、初速度 0, 終速度  $v_f$  であるから、

$$z_{av} = \frac{1}{2}v_f^2$$

・  $Z_a$

同じく 4. 3. 3で指摘したとおり、 $\delta = 1$  の区間では初速度  $v_1$ , 終速度  $v_2$  とすると、 $z_a = \frac{1}{2}(v_2 - v_1)$  である。今回の場合、初速度 0, 終速度  $v_f$  であるから、

$$z_a = v_f$$

・  $T_{r+}$

これは、 $\delta = 1$  で走行している時間である。停止前は、 $x = l$  から減速開始までの時間であり停止位置  $x = 0$  から  $x = -l$  まで自由流旅行速度速度  $v_f$  で走行する場合の走行時間は  $\frac{l}{v_f} - \frac{v_f}{2\alpha_d}$ , 停止後は加速開始から

$x = l$  までの走行時間であり、 $\frac{l}{v_f} + \frac{v_f}{2\alpha_a}$  である。従って、

$$T_{r+} = \frac{2l}{v_f} + \frac{v_f}{2\alpha_a} - \frac{v_f}{2\alpha_d}$$

又は、 $\alpha_a = \alpha_d = \alpha$  とするならば、

$$T_{r+} = \frac{2l}{v_f}$$

・  $T_{r-}$

これは、 $\delta = 0$  で走行している時間であり、減速時間であるので、

$$T_{r-} = \frac{v_f}{\alpha_d}$$

•  $T_i$

実際の停止時間であるから、以下の通りとなる。

$$T_i = w - \frac{v_f}{2\alpha_d} - \frac{v_f}{2\alpha_a}$$

又は、 $\alpha_a = \alpha_d = \alpha$ とするならば、

$$T_i = w - \frac{v_f}{\alpha}$$

②  $w \leq \frac{v_f}{2\alpha_d} + \frac{v_f}{2\alpha_a}$  の場合、すなわち、停止しない場合、

基本的定式化の考え方は①と同じ。式と結果のみを記載する。

•  $Z_v$

$$Z_v = 2l - \frac{v_f}{\alpha_d} \sqrt{\frac{2v_f w}{A}} + \frac{v_f w}{A\alpha_d}$$

又は、 $\alpha_a = \alpha_d = \alpha$ とするならば、

$$Z_v = 2l - \frac{v_f^{3/2}}{\alpha^{1/2}} w^{1/2} + \frac{v_f}{2} w$$

•  $Z_{v3}$

$$\begin{aligned} Z_{v3} &= \int_0^{\frac{v_f^2 - v_c^2}{2\alpha_a}} \left( \sqrt{2\alpha_a x + v_c^2} \right)^2 dx + \int_{\frac{v_f^2 - v_c^2}{2\alpha_a}}^l v_f^2 dx \\ &= 2v_f^2 l - \frac{v_f^3}{\alpha_d} \sqrt{\frac{2v_f w}{A}} + \frac{v_f^3(1-2\alpha_d)w}{\alpha_d A} + \frac{2v_f^2 w}{A} \sqrt{\frac{2v_f w}{A}} - \frac{v_f^2}{A^2} w^2 \end{aligned}$$

又は、 $\alpha_a = \alpha_d = \alpha$ とするならば、

$$Z_{v3} = 2v_f^2 l - v_f^{3/2} \alpha^{-1/2} w^{1/2} + \frac{v_f^3(1-2\alpha)}{2} w + \alpha^{3/2} v_f^{5/2} w^{3/2} - \frac{v_f^2 \alpha^2}{4} w^2$$

•  $Z_{av}$

$$z_{av} = \frac{1}{2}(v_f^2 - v_c^2) = v_f \sqrt{\frac{2v_f w}{A}} - \frac{v_f w}{A}$$

又は、 $\alpha_a = \alpha_d = \alpha$ とするならば、

$$z_{av} = v_f^{3/2} \alpha^{1/2} w^{1/2} - \frac{\alpha v_f}{2} w$$

•  $Z_a$

$$z_a = v_f - v_c = \sqrt{\frac{2v_f w}{A}}$$

又は、 $\alpha_a = \alpha_d = \alpha$ とするならば、

$$z_a = v_f - v_c = \alpha^{1/2} v_f^{1/2} w^{1/2}$$

•  $T_{r+}$

$$\begin{aligned} T_{r+} &= \frac{2l}{v_f} + \frac{v_f - v_c}{2\alpha_a} - \frac{v_f - v_c}{2\alpha_d} \\ &= \frac{2l}{v_f} + \left( \frac{1}{\alpha_a} - \frac{1}{\alpha_d} \right) \sqrt{\frac{v_f w}{2A}} \end{aligned}$$

又は、 $\alpha_a = \alpha_d = \alpha$ とするならば、

$$T_{r+} = \frac{2l}{v_f}$$

•  $T_{r-}$

$$T_{r-} = \frac{v_f - v_c}{\alpha_d}$$

$$= \frac{1}{\alpha_d} \sqrt{\frac{2v_f w}{A}}$$

又は、 $\alpha_a = \alpha_d = \alpha$ とするならば、

$$T_{r-} = v_f^{1/2} \alpha^{-1/2} w^{1/2}$$

・  $T_i$

$$T_i = 0$$

## 2. 距離別排出量推計指標の導出過程

それぞれ、停止がある場合、ない場合で分けて考える。

①  $w > \frac{v_f}{2\alpha_d} + \frac{v_f}{2\alpha_a}$  の場合、すなわち、停止する場合、

・  $z_v(x)$

$\delta = 1$  の場合（加速・定速の場合）  $z_v(x) = \frac{dZ_v}{dt} \frac{dt}{dx} = v \cdot \frac{1}{v} = 1$ 、 $\delta = 0$  の場合  $z_v(x) = 0$  である。

従って、

$$z_v(x) = 1 \quad \left( x \leq -\frac{v_f^2}{2\alpha_d}, 0 < x \right)$$

$$z_v(x) = 0 \quad \left( -\frac{v_f^2}{2\alpha_d} < x \leq 0 \right)$$

・  $z_{v3}(x)$

$\delta = 1$  の場合（加速・定速の場合）、 $z_{v3}(x) = \frac{dZ_{v3}}{dt} \frac{dt}{dx} = v^3 \frac{1}{v} = v(x)^2$ 、 $\delta = 0$  の場合（減速の場合）  $z_{v3}(x) = 0$  である。従って、

$$z_{v3}(x) = (\sqrt{2\alpha_a x})^2 = 2\alpha_a x \quad \left( 0 < x < \frac{v_f^2}{2\alpha_a} \right)$$

$$z_{v3}(x) = v_f^2 \quad \left( x \leq -\frac{v_f^2}{2\alpha_d}, \frac{v_f^2}{2\alpha_a} \leq x \right)$$

$$z_{v3}(x) = 0 \quad \left( -\frac{v_f^2}{2\alpha_d} < x \leq 0 \right)$$

・  $z_{\alpha v}(x)$

$\delta = 1$  の場合（加速・定速の場合）  $z_{\alpha v}(x) = \frac{dZ_{\alpha v}}{dt} \frac{dt}{dx} = \alpha v \cdot \frac{1}{v} = \alpha(x)$ 、 $\delta = 0$  の場合（減速の場合）  $z_{\alpha v}(x) = 0$  である。従って、

$$z_{\alpha v}(x) = \alpha_a \quad \left( 0 < x < \frac{v_f^2}{2\alpha_a} \right)$$

$$z_{\alpha v}(x) = 0 \quad \left( x \leq 0, \frac{v_f^2}{2\alpha_a} \leq x \right)$$

・  $z_{\alpha}(x)$

$\delta = 1$  の場合（加速・定速の場合）  $z_{\alpha}(x) = \frac{dZ_{\alpha}}{dt} \frac{dt}{dx} = \alpha \cdot \frac{1}{v} = \frac{\alpha(x)}{v(x)}$ 、 $\delta = 0$  の場合（減速の場合）  $z_{\alpha}(x) = 0$  である。従って、

$$z_{\alpha}(x) = \frac{\alpha_a}{\sqrt{2\alpha_a x}} \quad \left( 0 < x < \frac{v_f^2}{2\alpha_a} \right)$$

$$z_{\alpha}(x) = 0 \quad \left( x \leq 0, \frac{v_f^2}{2\alpha_a} \leq x \right)$$

・  $t_{r+}(x)$

これは、 $\delta = 1$  で走行している時間であるから、 $\delta = 1$  の場合  $t_{r+}(x) = \frac{dt}{dx} = \frac{1}{v(x)}$ 、 $\delta = 0$  の場合、 $t_{r+}(x) = 0$  で

ある。従って、

$$\begin{aligned}
 t_{r+}(x) &= \frac{1}{\sqrt{2\alpha_a x}} & (0 < x < \frac{v_f^2}{2\alpha_a}) \\
 t_{r+}(x) &= \frac{1}{v_f} & (x \leq -\frac{v_f^2}{2\alpha_d}, \frac{v_f^2}{2\alpha_a} \leq x) \\
 t_{r+}(x) &= 0 & (-\frac{v_f^2}{2\alpha_d} < x \leq 0)
 \end{aligned}$$

•  $t_r(x)$

これは、 $\delta = 0$  で走行している時間であるので、 $\delta = 0$  の場合  $t_r(x) = \frac{dt}{dx} = \frac{1}{v(x)}$ 、 $\delta = 1$  の場合  $t_r(x) = 0$  である。

従って、

$$\begin{aligned}
 t_r(x) &= \frac{1}{\sqrt{-2\alpha_d x}} & (-\frac{v_f^2}{2\alpha_d} < x < 0) \\
 t_r(x) &= 0 & (x \leq -\frac{v_f^2}{2\alpha_d}, 0 \leq x)
 \end{aligned}$$

•  $t_i(x)$

停止位置  $x = 0$  における停止時間であるから、以下の通りとなる。

$$\begin{aligned}
 t_i(x) &= w - \frac{v_f}{2\alpha_d} - \frac{v_f}{2\alpha_a} & (x = 0) \\
 t_i(x) &= 0 & (x \neq 0)
 \end{aligned}$$

②  $w \leq \frac{v_f}{2\alpha_d} + \frac{v_f}{2\alpha_a}$  の場合、すなわち、停止しない場合、

基本的考え方は①の停止ありの場合と同じ。ここでは結果のみを示す。

•  $z_v(x)$

$$\begin{aligned}
 z_v(x) &= 1 & (x \leq -\frac{v_f^2 - v_c^2}{2\alpha_d}, 0 < x) \\
 z_v(x) &= 0 & (-\frac{v_f^2 - v_c^2}{2\alpha_d} < x \leq 0)
 \end{aligned}$$

•  $z_{v3}(x)$

$$\begin{aligned}
 z_{v3}(x) &= 2\alpha_a x + v_c^2 & (0 < x < \frac{v_f^2 - v_c^2}{2\alpha_a}) \\
 z_{v3}(x) &= v_f^2 & (x \leq -\frac{v_f^2 - v_c^2}{2\alpha_d}, \frac{v_f^2 - v_c^2}{2\alpha_a} \leq x) \\
 z_{v3}(x) &= 0 & (-\frac{v_f^2 - v_c^2}{2\alpha_d} < x \leq 0)
 \end{aligned}$$

•  $z_{av}(x)$

$$\begin{aligned}
 z_{av}(x) &= \alpha_a & (0 < x < \frac{v_f^2 - v_c^2}{2\alpha_a}) \\
 z_{av}(x) &= 0 & (x \leq 0, \frac{v_f^2 - v_c^2}{2\alpha_a} \leq x)
 \end{aligned}$$

•  $z_\alpha(x)$

$$\begin{aligned}
 z_\alpha(x) &= \frac{\alpha_a}{\sqrt{2\alpha_a x + v_c^2}} & (0 < x < \frac{v_f^2 - v_c^2}{2\alpha_a}) \\
 z_\alpha(x) &= 0 & (x \leq 0, \frac{v_f^2 - v_c^2}{2\alpha_a} \leq x)
 \end{aligned}$$

•  $t_{r+}(x)$

$$t_{r+}(x) = \frac{1}{\sqrt{2\alpha_a x + v_c^2}} \quad \left(0 < x < \frac{v_f^2 - v_c^2}{2\alpha_a}\right)$$

$$t_{r+}(x) = \frac{1}{v_f} \quad \left(x \leq -\frac{v_f^2 - v_c^2}{2\alpha_a}, \frac{v_f^2 - v_c^2}{2\alpha_a} \leq x\right)$$

$$t_{r+}(x) = 0 \quad \left(-\frac{v_f^2 - v_c^2}{2\alpha_a} < x \leq 0\right)$$

•  $t_r(x)$

$$t_{r-}(x) = \frac{1}{\sqrt{-2\alpha_d x + v_c^2}} \quad \left(-\frac{v_f^2 - v_c^2}{2\alpha_d} < x < 0\right)$$

$$t_{r-}(x) = 0 \quad \left(x \leq -\frac{v_f^2 - v_c^2}{2\alpha_d}, 0 \leq x\right)$$

•  $t_i(x)$

このケースでは停止はしないので、常に  $t_i(x) = 0$  である。

## A9 : 交差点排出量の導出過程

区間 $[-l, l]$  (距離  $2l$ ) において, 基準位置  $x = 0$  における遅れ時間が  $w$  の場合の排出量推計指標値は式(5-7) (停止する場合) 及び式(5-8) (停止しない場合) で導出したとおりである. 交差点における排出量の推計では基準位置は式(5-13)に従って変化する. しかし, 加速・減速範囲が区間 $[-l, l]$ を越えなければ定速範囲を前後に移動させることによって, 前後の区間距離が基準位置  $x = 0$  の場合と同じになることから, 式(5-7)及び(5-8)の結果をそのまま用いることができる. ここでは, 加速・減速範囲に比べて区間 $[-l, l]$ は十分大きいものとする.

ここで, ある方向について, サイクル長  $C$  [sec], スプリット  $g$ , 交通量  $q$  [veh/sec], 飽和交通流率  $s$  [veh/sec] の場合の単位時間当たりの排出量を推計する.  $u$  台目の車両の排出量を  $F(u)$  とすると, 遅れ時間の有無, 停止の有無によって  $u$  は3つの範囲に分けられ (式(5-11,12,15)より), それぞれの排出量は式(5-7,8)に従って以下のように記述できる.

(i)  $0 \leq u < \frac{qs}{(s-q)} \left( R - \frac{v_f}{\alpha} \right)$  の場合 (遅れ時間あり, 停止あり)

$$F_1(u) = c_1 \left( 2l - \frac{v_f^2}{2\alpha} \right) + c_2 \left( 2v_f^2 l - \frac{3v_f^4}{4\alpha} \right) + c_{3a} \left( \frac{1}{2} v_f^2 \right) + c_{3b} v_f + c_{4r+} \frac{2l}{v_f} + c_{4r-} \frac{v_f}{\alpha} + c_{4i} \left( w - \frac{v_f}{\alpha} \right)$$

(ii)  $\frac{qs}{(s-q)} \left( R - \frac{v_f}{\alpha} \right) \leq u \leq \frac{qs}{(s-q)} R$  の場合 (遅れ時間あり, 停止なし)

$$F_2(u) = c_1 \left( 2l - v_f^{3/2} \alpha^{-1/2} w^{1/2} + \frac{v_f}{2} w \right) + c_2 \left( 2v_f^2 l - v_f^{3/2} \alpha^{-1/2} w^{1/2} + \frac{v_f^3 (1-2\alpha)}{2} w + \alpha^{3/2} v_f^{1/2} w^{3/2} - \frac{v_f^2 \alpha^2}{4} w^2 \right) + c_{3a} \left( v_f^{3/2} \alpha^{1/2} w^{1/2} - \frac{\alpha v_f}{2} w \right) + c_{3b} \left( \alpha^{1/2} v_f^{1/2} w^{1/2} \right) + c_{4r+} \frac{2l}{v_f} + c_{4r-} v_f^{1/2} \alpha^{-1/2} w^{1/2}$$

(iii)  $\frac{qs}{(s-q)} R \leq u < qC$  の場合 (遅れ時間なし)

$$F_3(u) = 2l \left( c_1 + c_2 v_f^2 + \frac{c_{4r+}}{v_f} \right)$$

ただし, (i)(ii)の場合,  $w(u) = -\left( \frac{1}{q} - \frac{1}{s} \right) u + R$  である.

上記の条件を用いて, さらに毎サイクル同じ交通条件であるとする, 1時間での対象方向の総排出量  $F$  は, 以下の式で算出できる.

$$F = \left[ \int_0^{\frac{qs}{(s-q)} \left( R - \frac{v_f}{\alpha} \right)} F_1(u) du + \int_{\frac{qs}{(s-q)} \left( R - \frac{v_f}{\alpha} \right)}^{\frac{qs}{(s-q)} R} F_2(u) du + \int_{\frac{qs}{(s-q)} R}^{qC} F_3(u) du \right] \frac{3600}{C}$$

ここで,  $\lambda = \frac{q}{s}$ ,  $R = (1-g)C$  とし, さらに  $S = 3600s$  [veh/h] として上記式を整理すると, 以下の通りとなる.

$$F = K_1 + K_2(1-g) + K_3 \frac{1}{C} + K_4(1-g)^2 C$$

ただし,  $K_1 = 2lS\lambda k_1$ ,  $k_1 = c_1 + c_2 v_f^2 + c_{4r+} \frac{1}{v_f}$

$$K_2 = \Omega k_2, \quad k_2 = -c_1 \frac{v_f^2}{2\alpha} - c_2 \frac{3v_f^4}{4\alpha} + c_{3a} \frac{v_f^2}{2} + c_{3b} v_f + c_{4r-} \frac{v_f}{\alpha} - c_{4i} \frac{v_f}{\alpha}$$

$$K_3 = \Omega k_3, \quad k_3 = c_1 \frac{v_f^3}{12\alpha^2} + c_2 \frac{3v_f^5}{20\alpha^2} - c_{3a} \frac{v_f^3}{12\alpha} - c_{3b} \frac{v_f^2}{3\alpha} - c_{4r+} \frac{v_f^2}{6\alpha^2} - c_{4r-} \frac{v_f^2}{3\alpha^2} + c_{4i} \frac{v_f^2}{2\alpha^2}$$

$$K_4 = \Omega k_4, \quad k_4 = \frac{1}{2} c_{4i}$$

$$\Omega = S \frac{\lambda}{1-\lambda}$$

## A10：最適化問題の求解過程

以下に、最適化問題（式(5-19)）の求解過程を示す。なお、本来であれば以下の場合分け毎に解の存在の証明及び各変数の範囲を明示すべきであるが、計算過程が非常に複雑となることからその部分は省いている。

(1) 最小化する目的関数  $F$  は、

$$F = \sum_{i=1,2} F_i = \sum_{i=1,2} \left\{ K_{1i} + K_{2i}(1-g_i) + K_{3i} \frac{1}{C} + K_{4i}(1-g_i)^2 C \right\}$$

(2) 式(5-19c)を変形して上記式に代入して  $C$  を消去すると、

$$F = \sum_{i=1,2} F_i = \sum_{i=1,2} \left\{ K_{1i} + K_{2i}(1-g_i) + K_{3i} \frac{1-g_1-g_2}{L} + K_{4i}(1-g_i)^2 \frac{L}{1-g_1-g_2} \right\}$$

(3)  $g_2$  を固定して、 $g_1$  についてのみ最適化する。すなわち、さしあたり式(5-19b)の条件を無視し、 $\frac{\partial F}{\partial g_1} = 0$

かつ  $F$  が最小値をとる  $g_1$  を求めると、

$$g_1^* = 1 - g_2 - L \sqrt{\frac{K_{41}g_2^2 + K_{42}(1-g_2)^2}{K_{21}L + K_{31} + K_{32} + K_{41}L^2}}$$

(4) (3)で、 $g_1^*$  が式(5-19b)を満たす、すなわち  $g_1^* \geq \lambda_1$  であるとして、 $g_1^*$  を(2)の式に代入すると、 $g_2$  のみの式となる。

$$F = K_{11} + K_{12} + (K_{21} - K_{22})g_2 + 2\sqrt{(K_{21}L + K_{31} + K_{32} + K_{41}L^2)[K_{41}g_2^2 + K_{42}(1-g_2)^2]} + K_{22} + 2K_{41}Lg_2$$

(5) (4)について、式(5-19b)の条件を無視し、 $\frac{\partial F}{\partial g_2} = 0$  かつ  $F$  が最小値をとる  $g_2$  を求めると、

$$g_2^* = \frac{\Omega_2}{\Omega_1 + \Omega_2} - \sqrt{\frac{\Omega_1\Omega_2}{\Delta} \frac{2\Omega_1k_4L + (\Omega_1 - \Omega_2)k_2}{\Omega_1 + \Omega_2}}$$

また、この場合  $g_1$  は、

$$g_1^* = \frac{\Omega_1}{\Omega_1 + \Omega_2} - \sqrt{\frac{\Omega_1\Omega_2}{\Delta} \frac{2\Omega_2k_4L + (\Omega_2 - \Omega_1)k_2}{\Omega_1 + \Omega_2}}$$

ただし、 $\Delta = 8\Omega_1\Omega_2k_2k_4L + 4(\Omega_1 + \Omega_2)^2k_3k_4 + 4\Omega_1\Omega_2k_4^2L^2 - (\Omega_1 - \Omega_2)^2k_2^2$

(6) (5)について、 $g_1^* \geq \lambda_1$ 、 $g_2^* \geq \lambda_2$  であるならば(5)が最適値となる。

(7) (6)以外の解は  $g_1$ 、 $g_2$  のいずれかが端点解となり、 $g_1 = \lambda_1$  かつ / または  $g_2 = \lambda_2$  となる。

$g_2 = \lambda_2$  かつ  $g_1 > \lambda_1$  となる解が存在する場合、(3)の  $g_1^*$  に  $g_2 = \lambda_2$  を代入した解である

$$g_1^* = 1 - \lambda_2 - \sqrt{\frac{\Omega_1k_4L^2\lambda_2^2 + \Omega_2k_4L^2(1-\lambda_2)^2}{\Omega_1k_2L + (\Omega_1 + \Omega_2)k_3 + \Omega_1k_4L^2}}$$

が解となる。

(8) (7)の場合と同様にして、 $g_1 = \lambda_1$  かつ  $g_2 > \lambda_2$  となる解が存在する場合、

$$g_2^* = 1 - \lambda_1 - \sqrt{\frac{\Omega_2k_4L^2\lambda_1^2 + \Omega_1k_4L^2(1-\lambda_1)^2}{\Omega_2k_2L + (\Omega_1 + \Omega_2)k_3 + \Omega_2k_4L^2}}$$

が解となる。

(9) (6)(7)(8)がいずれも式(5-19b)の条件を満たさない場合は、 $g_1$ 、 $g_2$  の両方が端点解となる。すなわち、

$$g_1 = \lambda_1, \quad g_2 = \lambda_2$$

## 謝 辞

本論文は、著者が建設省土木研究所在籍中に得た知見・問題意識を土台として、東京大学生産技術研究所在籍中に取り組んだ研究活動の成果をとりまとめたものである。その間論文が完成するまでには、多くの方からのご指導、ご協力、叱咤激励を頂いた。ここで、名を記してお世話になった各位に対して御礼申し上げたい。

東京大学生産技術研究所の桑原雅夫教授には、東大生研の助手として勉強・研究する機会を与えて頂き、常に温かいご指導、ご助言を頂くとともに、公私にわたって大変お世話になった。ここに最大限の感謝の意を表したい。また、東京大学大学院の森地茂教授、家田仁教授、東京大学国際・産学共同研究センターの須田義大教授、東京都立大学大学院の大口敬助教授には、各々大変お忙しいお立場におられる中、本論文の副査の労をお引き受けいただき、貴重かつ有益なコメントをいただいた。ここに、厚く御礼申し上げる次第である。

本研究の大部分は、環境に関する自主的研究プロジェクト“NOx 21”の主要課題として実施されたものであり、その中でなされた活発な議論が本研究の大きな土台となった。主要メンバーである桑原教授、千葉工業大学の赤羽弘和教授、大口助教授、Edward Chung 客員教授、住友電気工業の榊原肇氏、松下電器産業の増山義人、岩岡浩一郎、音喜多亨の各氏、アイ・トランスポート・ラボの堀口良太代表取締役、熊谷組の熊谷香太郎氏、及び研究室から Majid Sarvi 氏、西川功技官、井料隆雅氏には、毎回熱心な議論にお付き合い頂くとともに、データの提供、現地調査等における便宜なども図って頂いた。また、千葉工大赤羽研から卒論生として参加してもらった内田君、貴田君、清水（俊）君、小嶋君、清水（大）君、山本君、及びこれら卒論生の面倒を見てもらった宮崎君には、現地調査などに当たって大変な苦勞をして頂いた。関係各位には深く謝意を表したい。

また、本研究の一部は土木学会道路利用の情報化・効率化小委員会 WG2-2 のテーマとして実施されたものである。WG2 の関係者各位、特に WG2-2 メンバーである桑原教授、大口助教授、国総研の上坂氏（元）、熊谷氏、日本自動車研究所の押野康夫氏、片平エンジニアリングの川尻辰男氏、中島孝氏、及び WG 事務局でもある毛利雄一氏ほか計量計画研究所の各位に謝意を表します。

なお、本研究の実施に当たり、東京大学大学院の鎌田実教授、日本自動車研究所の細井賢三氏、東京情報大学の岡本眞一教授、慶應義塾高等学校の坪田幸政教諭から有益な知見、示唆を頂いた。

本研究は最初に述べた通り、建設省土木研究所交通環境研究室（現・国土交通省国土技術政策総合研究所道路環境研究室）在籍時に得た知見・問題意識が土台となっており、また、当時調査・実験で得た各種データも使用させて頂いた。貴重なデータの使用をご快諾頂き、様々な議論・相談に乗って頂いた、大西博文前室長、並河良治室長、上坂前主任研究官、大城温研究官、松下雅行前研究官をはじめ、研究室メンバー各位には深く謝意を表したい。

東大生研の桑原研究室秘書の森本紀代子さん、技官の西川功氏には、私の研究活動及び研究室活動の様々な場面において、直接・間接的に多くのサポートを頂いた。また、客員教授の Edward Chung 氏、助手在籍中の全期間に渡って共に研究室で苦樂を共にした井料隆雅氏をはじめ、研究室メンバー各位には、普段の研究室生活などで交わされる議論の中から多くの知的刺激や研究へのヒントを得ることができた。また、日本大学の森田緯之教授、京都大学の吉井稔雄助教授をはじめ研究室OB各位には、ことある毎に叱咤激励を頂き、論文完成に向けての推進力となった。各位には深く感謝の意を表したい。

もちろん、上記に掲げた方々以外にも多くの皆様にお世話になっており、本来であれば全員の名を記して御礼申し上げるべきところであるが、スペースの都合上それは叶わないため、ここに、上記の方々も含め、お世話になった各位に改めて御礼を申し上げたい。

最後に、いろいろと心配を掛けた私と妻の両親・家族に感謝するとともに、いつも側にいて励ましてくれた最愛の妻のり子、長男裕也にこの論文を捧げます。

平成15年6月

小根山 裕之