

交通の動的変化に対応した
自動車からの排出ガス量推計手法の研究

小根山 裕之

交通の動的变化に対応した 自動車からの排出ガス量推計手法の研究

目次

第1章 序 論	— 1
1. 1 研究の背景	— 1
1. 1. 1 大気環境問題と交通施策に関する社会的背景・動向	— 1
1. 1. 2 施策実施のための施策効果評価の必要性和問題点	— 3
1. 1. 3 交通シミュレーションの適用とその課題	— 3
1. 2 本研究の目的及び論文の構成	— 5
第1章の参考文献	— 7
第2章 既往の研究のレビュー	— 8
2. 1 はじめに	— 8
2. 2 速度変動要素を考慮した排出量推計モデルに関する既往研究の整理	— 9
2. 2. 1 排出量推計モデルの階層的整理, 及び交通モデルとの関連	— 9
2. 2. 2 詳細モデル	— 10
2. 2. 3 ミクロモデル	— 12
2. 2. 4 速度変動要素を変数に含むモデル	— 14
2. 2. 5 平均速度モデル	— 18
2. 3 交通流シミュレーションを用いた排出量推計に関する既往研究と問題点	— 20
2. 3. 1 動的な交通評価ツールとしての交通流シミュレーションの有効性	— 20
2. 3. 2 車両挙動モデルの分類	— 21
2. 3. 3 排出量推計モデル適用上の問題点	— 22
2. 4 第2章のまとめ	— 24
第2章の参考文献	— 26
第3章 交通シミュレーションモデルを用いた新たな排出量推計アプローチ	— 30
3. 1 既存アプローチの問題点と新たな排出量推計アプローチの目的	— 30
3. 2 提案する排出量推計アプローチの枠組み	— 33

3. 2. 1	交通流シミュレーション	— 33
3. 2. 2	排出量推計モデル	— 34
3. 2. 3	排出量推計指標への変換モデル	— 34
3. 2. 4	本アプローチの特徴及び限界	— 35
3. 3	第3章のまとめ	— 37
	第3章の参考文献	— 37
第4章	排出量推計モデルの構築	— 38
4. 1	排出量推計モデルの基本的考え方	— 38
4. 2	排出量推計モデルの定式化	— 39
4. 2. 1	排出量及び車両運動に関する基本的定式化	— 39
4. 2. 2	エンジン出力比例を仮定したモデルの定式化	— 40
4. 2. 3	モデルパラメータの解釈	— 43
4. 3	モデルパラメータの推計	— 45
4. 3. 1	使用データ	— 45
4. 3. 2	分析対象モデル	— 47
4. 3. 3	パラメータ推計結果及びモデルパフォーマンスの分析	— 49
4. 4	集計単位に関する分析	— 54
4. 4. 1	集計単位の長さとはパラメータ推計に関する問題点	— 54
4. 4. 2	実データに基づく最適な集計単位の検討	— 58
4. 5	他のモデルアプローチとの比較	— 62
4. 5. 1	設定ケース	— 62
4. 5. 2	結果及び考察	— 65
4. 6	第4章のまとめ	— 67
	第4章の参考文献	— 69
第5章	排出量推計モデルに基づく交差点周辺を対象とした排出量要因分析	— 70
5. 1	はじめに	— 70
5. 2	交差点の停止、発進に伴う排出量の試算	— 71
5. 2. 1	走行パターンの仮定	— 71
5. 2. 2	総排出量の算出及び分析	— 73
5. 2. 3	排出量の空間分布の算出及び分析	— 76
5. 3	信号制御と排出量の関係分析	— 79
5. 3. 1	信号制御に伴う車両軌跡及び排出量推計指標のモデル化	— 79

5. 3. 2 ケーススタディによる排出量空間分布分析	— 80
5. 4 交差点周辺の排出量推計モデルの定式化	— 87
5. 4. 1 交差点の排出量の定式化	— 87
5. 4. 2 排出量を最小化する最適サイクル長、スプリットの算出	— 88
5. 5 第5章のまとめ	— 93
第5章の参考文献	— 95
第6章 排出量推計指標への変換モデルの構築及び排出量の推計	— 96
6. 1 はじめに	— 96
6. 2 モデルの定式化	— 98
6. 2. 1 直線近似された車両軌跡の定義	— 98
6. 2. 2 直線近似された走行軌跡からの排出量推計指標算出手順	— 103
6. 3 実車両の走行軌跡データに基づく排出量推計指標変換モデルの作成	— 108
6. 3. 1 実験車を用いた実走行パターン調査の概要	— 108
6. 3. 2 分析方法	— 109
6. 3. 3 分析結果	— 113
6. 4 排出量推計指標変換モデルを用いた排出量推計	— 139
6. 4. 1 距離帯別排出量推計指標の推計手順の整理	— 139
6. 5 実データを用いた排出量の算出及びモデルパフォーマンスの検証	— 141
6. 5. 1 対象データ及び設定条件	— 141
6. 5. 2 推計結果	— 143
6. 6 排出量推計指標変換モデルを用いた排出量推計手法に関する考察	— 148
6. 7 第6章のまとめ	— 151
第6章の参考文献	— 152
第7章 結論と今後の課題	— 153
7. 1 結論	— 153
7. 2 今後の課題	— 156
第7章の参考文献	— 158

図表一覧

APPENDIX

謝辞

第1章 序論

1. 1 研究の背景

1. 1. 1 大気環境問題と交通施策に関する社会的背景・動向

都市部、特に道路沿道の大気汚染は依然として厳しい状況にある。環境省のデータ¹⁾によると、自動車NO_x・PM法の対策地域のうち、首都圏の自動車排出ガス測定局における二酸化窒素（NO₂）の環境基準達成率は60%前後（2001年で54.8%）、浮遊粒子状物質（SPM）も年度によって大きく異なるが15～50%前後（2000年は45.7%、2001年では15.1%）である。車両単体の排出ガス規制の効果をはじめとする諸施策の実施により測定地点の濃度、環境基準達成率ともに徐々に改善されてはいるものの、都市部においてはまだまだ改善に向けた施策の積み重ねが必要とされている状況にあるといえよう。

しかしながら、これまでに実施されてきた諸施策を振り返って見ると、実際に有効な対策として機能したのは自動車単体の排出ガス規制の強化、燃料規制の強化といった発生源対策以外は顕著な効果が上がっているとは必ずしも言えないであろう。自動車の発生源対策は、かつては非常に大きな問題となっていた一酸化炭素（CO）、二酸化硫黄（SO₂）などの沿道濃度が昭和50年頃を境に急激に低下していったことなどからも一定の効果があったことが窺える。しかし、NO_x、SPMについては、ディーゼル車の排出ガス規制が必ずしも十分ではなかったことに加え、交通需要が常に伸び続けてきたため、必ずしも十分な改善がなされたとは言い難い。この大きな原因は、発生源としての交通側の対策が十分に機能していなかったことによるものと言える。

ただ、近年の環境意識の高まりに加え、西淀川訴訟、川崎訴訟といった道路交通公害に関する訴訟における国側の敗訴及びその後の和解といった社会的要因も加わり、自動車単体対策に加え、交通側の施策も含めた総合的な施策実施の機運が高まってきており、環境改善を主たる目的とした交通施策の実施も様々な形で行われてきている。例えば、東京都が総交通量の抑制による環境負荷の低減を狙いとしてロードプライシングの導入を検討している²⁾のは一例であろう。また、首都高速道路においては環境負荷の大きな大型車を湾岸線に迂回させる「環境ロードプライシング」の試行実験を行っている³⁾。一般道路での交通運用を担当する警察においてはUTMS（新交通管理システム）のサブシステムとしてEPMS（交通公害軽減システム）が位置づけられ⁴⁾、静岡での実証実験で低減効果が報告されている⁵⁾ほか、川崎から都県境にかけての比較的広域を対象としたエリアで実証実験が予定されている。ITS（高度道路交通システム）でも環境負荷の削減が大きな目標の一つとされている⁶⁾。表1-1は、大気汚染削減に資する交通施策を体系的に整理したものであるが、必ずしも環境負荷低減を主たる目標としたものでなくても、多かれ少なかれ環境への効果を目指の一つとして立案され、実施されることが多くなってきている。

表 1－1 大気汚染低減に資する交通施策⁷⁾

交通の発生集中に関する施策	土地利用施策	交通軸に沿った土地の高度利用 郊外の土地利用規制 中心市街地活性化 交通拠点・物流拠点の効率的配置
自動車の分担率を減少させる施策	公共交通機関等の整備	鉄道・LRT・バスレーンなどの整備 結節点整備による公共交通機関の利便性向上 ・公共交通機関のサービスレベル（運行本数など）の向上 ・歩道、自転車道などの整備
	自動車交通量の抑制	ロード・プライシングによる抑制 自動車の乗り入れ規制 相乗り促進，P & R
配分の変化に関する施策	道路ネットワーク整備による地域的な交通容量の増加，ネットワーク効果	バイパス，環状道路の整備
	交通施設整備によるボトルネックの容量増加	交差点の立体交差化 鉄道の連続立体交差化による踏切の解消 ボトルネック部分の車線数増加 駐車場整備による路上駐車削減
	交通制御，運用の改善による交通流の改善	信号制御の改善 情報の提供などによる適切な経路選択の誘導 路上駐車を取り締まり，駐車場の運用改善による路上駐車削減

1. 1. 2 施策実施のための施策効果評価の必要性和問題点

上述したような交通施策を大気環境の改善に資するものとして有効に機能させるためには、事前・事後の施策評価が適切に行われることが重要となる。そのためには、対象とする交通施策による交通状況の変化を的確に捉え、交通状況の変化を汚染物質の排出量の変化としての的確に把握し、さらに排出量の変化を汚染濃度の予測・評価へと結びつけていかなければならない。これらを予測・評価のモデルとして整理すると、①交通施策が需要サイド、供給サイドそれぞれに及ぼす影響の範囲・程度を的確に捉え、交通状況の変化として再現する「交通モデル」、②交通モデルにより再現された交通状況の変化を的確に捉え、排出量を推計する「排出モデル」、③排出モデルにより得られた排出強度を踏まえ、濃度変化としての的確に予測・評価する「拡散モデル」となる。交通施策を的確に評価するためには、これらのモデルが施策評価上必要な空間・時間単位で所要の精度が得られる必要がある。

しかしながら、これまで交通施策による排出量削減効果の評価は、実務レベルでは、①交通量配分や4段階推定法などの静的なアプローチに基づき、②平均速度との関係のみで表現された排出係数を用いた排出量の推計を行い、③プルーム・パフモデルといった適用条件が限定（障害物のない無限平面上による定常的拡散を想定）された簡便な拡散モデルにより推計されるといった、きわめて限定的なアプローチによって行われることが多かった。このようなフレームでは、①～③のいずれの段階においても環境負荷が大きくなる要因が十分に反映されない、との批判がある。上記のアプローチに基づいて排出量の推計を行う場合の問題点として、以下の点が上げられよう。①の静的なアプローチでは、信号制御、情報提供、経路誘導といった交通運用や、ボトルネック対策による渋滞削減施策の効果を的確に把握することや、ロードプライシングをはじめとした動的な需要調整に対する交通施策の効果を適切に予測・評価することは難しい。また、交差点近傍や渋滞中など、停止・加速を繰り返して高負荷となるような地点(Hot Spot)の影響を的確に捉えることはできない。また、②の平均速度式を用いた排出量推計では、仮に交通モデルで動的な交通状況の変化を捉えられたとしても、交差点周辺や渋滞など、より負荷の高い状況下における排出量への変化を推計することはできない。③の拡散モデルでも、建物や高架道路の影響、様々な気象条件による高濃度発生の影響を考慮することはできない。

1. 1. 3 交通流シミュレーションの適用とその課題

一方、動的な交通需要の変化に対応した渋滞現象など、動的な交通現象を再現するための交通モデルとして、交通流シミュレーションがある。交通流シミュレーションは交通需要を外生的に与えることにより、道路ネットワーク上での車両の挙動を再現し、渋滞現象などの様々な交通状況の変化を再現しようとするものである。交通需要及びその動的変化を如何に適切に捉えるかという基本的な問題があるものの、ある程度妥当な交通需要を与えることができれば、適切にモデルパラメータを設定することによ

って交通量や旅行時間、旅行速度といった動的な交通現象を表す指標を比較的良好な精度で再現できる。そのため、動的な影響を考慮する必要がある交通施策の評価に当たっては非常に有用なツールとなる。欧米では、NETSIM⁸⁾、PARAMICS⁹⁾、VISSIM¹⁰⁾、AIMSUN¹¹⁾といった統合的汎用シミュレータが商用ベースで多く流通しており、既に実務ベースでの利用が幅広く行われている。日本では研究ベースでの開発・適用が主であったが、近年実務への適用事例も増えてきており¹²⁾、今後、より複雑化かつ動的な交通施策の有力な評価ツールとしてさらなる展開が期待されている。また、これらのシミュレーションにより再現された動的な交通状況は、排出量など大気環境の推計にも非常に有効である。特に、車両の挙動をミクロに再現できるモデルと、速度・加速度別排出率などの詳細な排出モデルを組み合わせ、より詳細な排出量推計が可能となってきた。

しかし、これらのシミュレーションというツールを用いた環境評価は有効かつ適切に行われていると言えるであろうか？ミクロモデルを用いた詳細な排出量推計では、モデルで出力される個々の車両の加減速挙動が（排出量評価という観点から）必要十分なレベルで再現されていること、排出モデルがそのような加減速挙動と適切に関連づけられていることが必要であるが、現状ではいずれも満たされているとは言えないのではないか。例えば、加減速挙動の再現性は十分であろうか？仮に、モデルのポテンシャルとして再現性があるとしても、実務的な使用のレベルでは数多くあるパラメータを適切に操作して再現性を十分確保することは可能だろうか。そもそも再現性の検証自体が十分ではないのではないか。また、排出モデルについても、加減速挙動を正確に捉えたとして、個々の単位時間毎の排出量を積算して全体としての排出量特性が再現されるだろうか。また、評価対象とする交通施策に対して、必要十分な説明力、感度があるだろうか。これらはいずれも十分に検討がなされているとは言えず、シミュレーションを用いた排出量推計は、実務的な交通施策評価のツールとしての利用を考えた場合、必ずしも適切に行われているとは言えない状況であろう。

また、ロードプライシング、情報提供効果といった広域化かつ複雑化している交通施策の影響を的確に捉えるためには、より広い範囲を対象とした交通状況の変化を予測・評価することが必要である。その一方で、NOx、PM等の汚染物質については、特に Hot Spot を対象とした、詳細な空間的分布を把握する必要性は高く、一方では総量削減という観点で考えても、速度変動による排出量への影響を的確に捉えた予測・評価が重要であることは言うまでもない。近年のコンピュータ能力の飛躍的向上によって広域を対象としたシミュレーションは実用的なレベルで十分可能となっており、いくつかの実施例も見られるが¹³⁾¹⁴⁾¹⁵⁾、排出量推計という観点からは、上述したような施策評価上の需要に十分に応えることができる適切なアプローチは必ずしも確立していないものとする。第2章以降で詳述するが、シミュレーションから期待される車両挙動の再現性と適用される排出モデルがミスマッチを起こしていて、結果として出力される排出量が（再現性が保証されないという意味で）適切性・論理性を欠き、説明力のないものとなっていると考えられる。

1. 2 本研究の目的及び論文の構成

上記のような背景・問題意識に基づき、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アプローチを確立することを目的とする。本研究の目標は、ある程度の空間集計単位（10～100m程度）で速度変動要素が排出量に与える影響を考慮することにより、Hot Spot における排出量の空間的分布を現実的な精度で捉えるとともに、空間的に集約したレベルでの再現性・再現性を確保し、施策による排出量の削減効果に対する説明力を有するモデルを構築することである。このような排出量の推計レベルを達成しようとする場合、交通流シミュレーションで再現される車両挙動（ミクロな加減速挙動が十分な精度で捉えられない）と、必要とされる排出モデルの入力との間にギャップがあることになる。本研究では、このギャップを埋め、交通流シミュレーションと排出モデルを結びつけるため、“排出量推計指標変換モデル”を導入し、交通流シミュレーションから出力されるラフな車両軌跡から排出モデルの説明変数（排出量推計指標）へ変換する。これはすなわち、ラフな車両軌跡に対して、排出量の空間分布をもっとも適切に再現できるような車両軌跡を得ようとしていることにほかならない。この際、排出量推計指標変換モデルを実験車などを用いた実道路における走行軌跡の分析を通して設定することにより、観測された道路条件の範囲内で十分に妥当性を持った速度変動要素の設定が可能となるとともに、事前に期待される精度の検証も可能とする。

本研究では、交通流シミュレーションとしてある特定のモデルを想定していない。交通流シミュレーションのアウトプットとして、現実的なレベルで十分に再現性があると考えられる、マクロな車両軌跡（定速走行及び停止のみから構成される“time-space 上において直線近似された車両軌跡”）を仮定する。すなわち、本研究の目的を言い換えれば、“直線近似された車両軌跡から速度変動要素を考慮した排出量を推計する手法の確立”となる。

具体的な研究内容の説明と併せて本論文の構成を簡潔に示す。まず、第2章で、シミュレーションモデルを用いた排出量推計に関して、排出量推計モデル、シミュレーションモデル（交通流モデル）双方の観点から、既存研究をレビューする。それらを踏まえ、特にネットワークシミュレーション用いた既存の排出量推計アプローチの問題点を提示し、本研究におけるアプローチの狙いを明確にする。

第3章では、第2章で整理した問題点を踏まえ、交通流シミュレーションと排出モデルのギャップを踏まえた新たな排出量推計アプローチの枠組みを提示する。具体的には、シミュレーションのアウトプットとしてある程度再現性が検証可能な車両のマクロな挙動（停止位置、マクロな速度変化点、停止位置間の平均速度など）を用いる。また、対応する排出モデルとしては、推計対象とする空間集計単位で速度変動要素を考慮することができる「速度変動要素モデル」を設定する。また、交通流シミュレーションの出力と排出モデルの入力を結びつけるため、上述した「排出量推計指標変換モデル」を導入し、その概要を説明する。

第4章では、本アプローチにおいて必要十分な空間単位での精度を有する排出モデルとして、エンジ

ン出力ベースの速度変動要素モデルを構築する。モデル構築に当たってはギヤ比に関する簡便な仮定を導入することにより、低速域における精度の向上を図っている。また、排出ガスの実測データを用いていくつかの車両についてモデルパラメータの導出を行い、モデルの推計精度に関して集計距離などとの関係を詳細に分析するとともに、既存のモデルとの比較を通してその特徴を明らかにする。

第5章では、第4章で構築した速度変動要素モデルを用いた理論的分析の一つとして、停止・発進挙動を簡便にモデル化し、排出量及びその空間分布を定式化する。このモデルを用いて、加減速度、定常走行速度、遅れ時間などが排出量の空間分布に与える影響を分析する。更に、孤立交差点における停止発進挙動に拡張したモデル分析を行い、信号制御パラメータが排出量の空間分布に与える影響の特性を明らかにする。

第6章では、本研究で提案する排出量推計アプローチの核となる排出量推計指標変換モデルを提案し、実道路における走行パターンの測定データを用いてモデルパラメータの推定を行う。あわせて、排出ガスの実測データを用いて、推計精度に関する検討を行い、本手法の有用性、限界を示す。

第7章では、本研究で得られた成果をまとめるとともに、本研究で積み残された課題の整理、今後の研究への展望を述べる。

第 1 章の参考文献

- 1) 環境省環境管理局：平成 13 年度大気汚染状況について，環境省報道発表資料，2002.9.26.
- 2) 東京都ホームページ：<http://www.kankyo.metro.tokyo.jp/jidousya/roadpricing/index.htm>
- 3) 首都高速道路公団ホームページ：http://www.mex.go.jp/topics/wangansen/road_p.html
- 4) (社) 新交通管理システムホームページ：<http://www.utms.or.jp/japanese/>
- 5) 静岡県警察ホームページ：<http://www.wbs.ne.jp/cmt/kenkei/kansei/epms.htm>
- 6) 国土交通省道路局 ITS ホームページ：<http://www.its.go.jp/ITS/j-html/index.html>
- 7) 東京大学生産技術研究所：交通施策による大気汚染低減効果に関する研究，建設省受託研究報告書，2000.3
- 8) CORSIM(NETSIM)：<http://www.fhwa-tsis.com/>.
- 9) Paramics: <http://www.paramics.com/>
- 10) VISSIM: <http://www.english.ptv.de/cgi-bin/produkte/vissim.pl>
- 11) AIMSUN: <http://www.tss-bcn.com/aimsun.html>
- 12) 堀口良太，小根山裕之：適用事例を通じた交通シミュレーション利用実態の分析と利用促進への課題，土木学会論文集，No.709/IV-56，pp.61-69，2002.7
- 13) 小根山裕之，井料隆雅，桑原雅夫：東京 23 区を対象とした需要の時間分散施策の効果評価，第 24 回土木計画学研究・講演集，2001.11
- 14) 村上康紀，小根山裕之，桑原雅夫：東京 23 区ロードプライシング導入に伴う交通運用政策に関する研究，第 26 回土木計画学研究・講演集，2002.11
- 15) 後藤亮，白濱好文，屋井鉄雄：広域ネットワークを対象とした交通・環境マイクロシミュレーション，第 22 回交通工学研究発表会論文報告集，2002.10

第2章 既往の研究のレビュー

2.1 はじめに

第2章では、特に道路交通の実交通環境下における速度変動要因を考慮した排出量推計手法に的を絞り、既往の研究をレビューし、その問題点を明らかにする。基本的には、排出モデルを空間的・時間的な詳細度を踏まえた階層別に分類して既往の研究を俯瞰、整理し、併せてモデルのインプットとして必要とされる交通モデルを整理する。なお、車両からの排出量を推定するに当たっては速度変動以外にも、道路の縦断勾配や車種、燃料形式、年式、使用年数、積載量などの車両側の要因が大きく関係することは言うまでもない。しかし、これらについては必要に応じて触れるにとどめ、基本的には速度変動要素を中心とした整理とする。次に、動的な交通状態の変化を再現・評価するツールである交通流シミュレーションに関して、特に排出モデルとの整合性の視点から車両挙動モデルを中心として整理し、実務的な利用形態を踏まえながらその問題点を指摘する。最後に、各モデルの関係を空間再現性の詳細度、入出力の整合性の観点から体系的に整理し、交通流シミュレーションを用いた排出量推計に関する既存アプローチの問題点及び本研究の狙い、位置づけを示す。

2. 2 速度変動要素を考慮した排出量推計モデルに関する既往研究の整理

2. 2. 1 排出量推計モデルの階層的整理、及び交通モデルとの関連

Akcelik et.al.¹⁾は、交通システム分析に関する車両の燃料消費量推計モデルを、対応する交通モデルとの関係も踏まえつつ4つのレベル(Level 0: basic model, Level 1: micro model, Level 2: micro/macro model, Level 3: macro model) に階層化して整理している。この論文でなされた階層的分類は燃料消費量の推計に限定した記述となっているが、排出量推計のモデリングでも基本的に同じであると考えられるので、以下ではこの分類を基本として、若干の修正を加えつつ分類を行う。

- ・ Level 0 : 詳細モデル (エンジン挙動モデルなど)

個々の車両システムレベルでの非常に詳細なモデリング。詳細な車両挙動－エンジンマップモデルや、エンジン、トランスミッションなどの挙動、車両ボディ、タイヤの特性といった車両特性や、ギヤチェンジ挙動を中心とした運転者の運転挙動に関する詳細なモデリングが該当する。

- ・ Level 1 : ミクロモデル (速度加速度モデルなど)

車両の瞬間速度・加速度などの車両挙動データをインプットとして、瞬間の排出量を推計するモデル。インプットデータとして時々刻々の速度プロファイルが必要とされる。

- ・ Level 2 : メソスケールモデル (速度変動要素モデル、要素分割モデル、4モードモデルなど)

車両挙動と排出量の関係を踏まえて、特に停止、発進といった加減速挙動に関わる車両挙動から排出量を特徴付けるいくつかの指標 (排出量推計指標) を抽出し、説明変数とするモデル。

- ・ Level 3 : マクロモデル (平均速度モデルなど)

車両の走行特性を表す指標として、トリップ単位の平均旅行速度などのマクロな指標を変数とするモデル。

以下では、上記の階層分類に従い、排出量推計モデルに関する既往の研究を整理する。その際、必要とされる排出量推計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量推計モデルのアウトプットについても併せて言及する。

2. 2. 2 詳細モデル

個々の車両システム、エンジン挙動レベルでの非常に詳細なモデリングを行うことにより、時間的・空間的にも非常に細かいレベルの排出量の推計を行うものである。詳細な車両挙動－エンジンマップモデルや、エンジン、トランスミッションなどの挙動、車両ボディ、タイヤの特性といった車両特性や、ギヤチェンジ挙動を中心とした運転者の運転挙動に関する詳細なモデリングが該当する。基本的には、瞬間排出量がエンジントルク、エンジン回転数といったエンジン挙動と関係づけてモデル化され、車両挙動とこれらのエンジン挙動を結びつけるため、ギヤチェンジ等運転挙動のモデル化を行う。これらの詳細なモデル化はエンジン、機械やシステム工学の分野を中心として数多く行われている。

UC Riverside の CERT(Center for Environmental Research and Technology)のグループは、アメリカ NHCRP プロジェクトの1つとしてエンジン出力モデルを基本として、触媒モデル、ギヤチェンジ挙動などを組み合わせた詳細なモデル化を行い、さらに 343 台にも及ぶ膨大な車両についてパラメータを導出し、CMEM(Comprehensive Modal Emission Model)という排出量推計ツールとして発表している²⁾。ただし、排出量推計モデル自体はかなり詳細にモデル化されているものの、最終的に想定されているアウトプットは速度、加速度及び道路勾配などを与えて排出量を推計するモデルであるという意味では、Level 1 に属するモデルであるとも言える。

日本では、JCAP(Japan Clean Air Program)³⁾ プロジェクトの一環として、日本自動車研究所を中心としたグループにおいてシミュレーションを用いた交差点近傍の非常にミクロな排出量推計・拡散モデルを構築した⁴⁾⁵⁾。ここで用いられている手法は、ミクロシミュレーション(NETSIM)とエンジンマップを用いた瞬間排出量推計モデルの組み合わせにより排出量を推計するモデルである。すなわち、ミクロシミュレーションの出力として1秒ごとの車速が得られるが、このデータに対して車種毎の車両諸元(車重、走行抵抗、変速比、タイヤ径など)及びギヤのシフトロジックを考慮した運動方程式を適用し、速度プロファイルのトレースに必要なエンジン回転数及びトルクを推計する。これらのエンジン回転数及びトルクを排出量マップに当てはめることにより1秒ごとの排出量を算出する。これを全運行時間に渡って求め、時系列の排出データを推計する。さらに、交差点を通過する全車両について距離帯別に積算することにより、距離帯別排出量を推計している。

このようにエンジンマップとして定常状態におけるデータを用いて実際の走行状況下における排出量を推定した場合、定常状態と過渡的な状態のエンジン燃焼特性の違い(燃焼温度の違い、ターボエンジンの影響など)により、正確に排出量が推計できないという問題がある。これは特にPM、HC、CO等では顕著であると言われる。Hausberger et.al.⁶⁾はこれらの問題を指摘し、過渡的な状態の修正項を考慮したモデルを構築している。

その他にも、同様の手法は様々な研究で用いられている。金野、大橋⁷⁾は、エンジントルク及び回転数を変数とするエンジンマップを用いて、走行調査により得られた実走行モードに適用して排出量の推

計を行った。この際、エンジントルク、回転数は走行抵抗、ギヤ比、各部伝達効率からなるモデルにより推定した。また、ギヤチェンジ位置の排出量に対する影響を分析するとともに、実データによるギヤチェンジモデルの構築も行っている。また、鎌田ら⁸⁾は、蓄圧式ハイブリッドバスの走行特性分析にあたり、車両の運転挙動の再現にドライビングシミュレータを用い、その結果として得られるエンジントルク・回転数をエンジンマップに当てはめて排出量の推計を行っている。

一方、車両の発進挙動を精緻にモデル化した研究として、角ら⁹⁾、寺町ら¹⁰⁾は、信号交差点での発進挙動に伴う排出強度等の環境負荷量の予測を目的として、自動車の発進挙動を人間と機械のマン・マシン・システムとして精緻にモデル化した発進挙動モデルを構築した。さらに、森野ら¹¹⁾は、この発進挙動モデルを基礎とした追従挙動モデルを構築した。目標速度、車間距離、速度差、加速度差といった要素に対する人間の反応が車両側に伝達され、それを受けた車両側モデルで車両の挙動を決定し、更に人間側モデルにフィードバックさせるといった、非常に精緻なモデリングによって、交差点周辺の加速挙動を精緻に再現している。加速度の再現性や、実交通データを用いた NOx 濃度の検証もなされ、比較的良好な結果を得ている。

このレベルの詳細モデルにおいては、排出量推計モデルとしては、エンジントルク及び回転数を変数としたエンジンマップが多く用いられている。また、マップだけでなく、上述した CMEM のようにエンジントルク及び回転数を定式化しエンジン出力として瞬間の燃費や排出量を推計するモデル (Incremental Power Model¹²⁾や、以下の「瞬間排出量」の項で説明するモデルも含む)などもこのレベルの範疇に含まれる。これらのモデルは Level 1 の定式化の前段階としても用いられる。また、交通モデル (車両挙動モデル) については、実走行軌跡、ドライビングシミュレータ、マン・マシンシステムモデル、ミクロシミュレーションなど様々なレベルのモデルが用いられているが、いずれもギヤチェンジの再現が可能な詳細なモデルが構築されている。

このような詳細モデルを用いることにより、モデル上は非常に詳細な時空間集計区間で排出量を推計できるが、そのためには入力データである車両挙動、特に加減速挙動やギヤチェンジなどの運転挙動や、勾配などの道路条件についてもよりミクロなレベルでの再現性が要求される。また、排出ガスの現象面から見てもエンジンの燃焼段階における様々な誤差要因により必ずしも出力される最小の空間詳細度のレベルで高い精度が得られる訳ではない。むしろ、詳細なエンジン挙動の集積としての総排出量が平均的なレベルで再現されるかどうかは、パラメータ推計に用いたデータ、車両挙動モデルの再現性等に大きく依存する。また、詳細な計算を行うとかなりの計算コスト増大となることもあり、現実的にはネットワークレベルで適用するのは困難であろう。

2. 2. 3 ミクロモデル

車両の瞬間速度・加速度などの車両挙動データをインプットとして、瞬間の排出量を推計するモデルである。基本的には、単位時間当たり（例えば1秒当たり）の排出量を推計するモデルであるから、実際の精度はともかく、時間的・空間的にも非常に詳細な排出量の推計が可能である。詳細モデルとの大きな違いは、速度プロファイル（速度、加速度）を直接の説明変数としている点である（上記の詳細モデルでは、仮に速度、加速度のみを交通モデルのアウトプットして用いるにしても、トルク・エンジン回転数への変換モデルが入っていることから間接的なものである）。

大きく分けると、以下の通り分類されよう。

- 1) 速度・加速度別排出量マップ（テーブル）として保持するもの
- 2) モデル式の形で保持するもの
 - ①単純回帰モデル（定式上論理的整合性を有しないモデル）
 - ②理論モデル（定式上何らかの論理的バックグラウンドを有するもの）

以下、この分類に従って整理しよう。

1) 速度・加速度別排出量マップ（テーブル）として保持するもの

速度・加速度別排出量マップによる方法は、シャシダイナモ、車載型装置などを用いて計測した速度プロファイルと排出量の関係を集計して、速度・加速度別の排出率のテーブルとして保持するものである。いくつかのミクロシミュレーションにおいてモデルパラメータとして搭載されている。例えば、Jornard et.al.¹³⁾は INRETS のプロジェクトにおいて、150 台の車種についての台上試験を行い、CO、HC、NO_x、CO₂について、速度を9区分、速度×加速度を7区分したテーブルを作成している。これらのモデルは、VISSIM などのシミュレーションモデルに搭載されるなど、広く用いられているようである。

この方式は、正確な排出量レベルの推定のみを考えると良いかもしれないが、当該速度・加速度における排出率のバラツキに精度が依存する。元々の現象にもバラツキが多く、更に測定タイムラグの影響などにより測定データのバラツキが大きい場合には、精度が低下する。また、測定対象車両に急激に変化する過渡特性がある場合、その特性に大きく依存すること、排出要因の分析、結果の解釈において論理的な説明が非常に困難であるなどの問題がある。

2) モデル式の形で保持するもの

①単純回帰モデル

このモデルは、実際の車両の挙動と排出特性に関する観測・分析に基づき、速度、加速度といった車両挙動と排出量の関係をもっともよく表す式形を設定し、パラメータを同定するモデルである。これに

についても様々なモデルが提案されている。

矢島・古屋¹⁴⁾は、1秒単位の世界プロファイル及びNO_x、CO、HCの排出量データに基づき、10km/h毎の世界域を層別因子として捉え、ダミー変数を用いた層別統計回帰による瞬間排出量のモデルを作成した。基本式形は以下の通りとなっている。

$$\text{ガソリン車：} V = (\alpha_0 + \alpha_1 \cdot z_1 + \dots + \alpha_i \cdot z_i) a + \beta_0 + \beta_1 \cdot z_1 + \dots + \beta_i \cdot z_i$$

$$\text{ディーゼル車：} V = (\alpha_0 + \alpha_1 \cdot z_1 + \dots + \alpha_i \cdot z_i) a + \beta_0 + \beta_1 \cdot z_1 + \dots + \beta_i \cdot z_i + \gamma \cdot R$$

ここに、 V ：瞬間排出量[g/sec]、 a ：加速度[m/sec²]、 α ：加速度に関するパラメータ、 β ：速度域の定数項パラメータ、 γ ：総抵抗力のパラメータ、 z_i ：速度域 i のダミー変数（速度域 i のとき1、それ以外のとき0）、 R ：総抵抗力（ $R = a \cdot m + \omega$ 、 m ：車両総重量）。

また、この排出原単位を基本とした勾配時の排出量推計手法についても提案されている¹⁵⁾。

Yu¹⁶⁾は、リモートセンシングによる車上計測データに基づき、3車種（乗用車、バン・ピックアップ、その他のトラック）を対象としたHC、COの瞬間排出量推計モデルを作成した。基本式形は以下の通りである。

$$\ln(EMIs_x) = c_0 + c_1 v + c_2 v^2 + c_3 a + c_4 a^2 + c_5 t + c_6 h$$

ここに、 $EMIs_x$ ：車種 x の単位時間排出率、 v ：速度、 a ：加速度、 t ：温度、 h ：湿度、 $c_0 \sim c_6$ ：パラメータ

Lee and Miller¹⁷⁾は、ミクロシミュレーション等への適用を前提としたモデルとして、以下の式形による統計的モデルを提案した。なお、論文中ではCO₂排出量のモデルとして構築している。

$$\ln(ECO_2(t)) = c_0 + c_1 v(t) + c_2 a(t) + c_3 v(t)a(t) + c_4 D_d(t) + c_5 D_i(t)$$

$$\text{但し、} a(t) < 0 \text{ のとき、} D_d(t) = 1, \text{ それ以外では } D_d(t) = 0,$$

$$v(t) = 0 \text{ かつ } a(t) = 0 \text{ のとき、} D_i(t) = 1, \text{ それ以外では } D_i(t) = 0.$$

ここに、 $ECO_2(t)$ ：時間 t における瞬間のCO₂排出量 [g/sec]、 $v(t)$ ：時刻 t の瞬間速度、 $a(t)$ ：時刻 t の瞬間加速度、 $D_d(t)$ 、 $D_i(t)$ ：減速及びアイドリング時のダミー変数、 $c_0 \sim c_5$ ：パラメータ。

これらのモデルでは速度・加速度別排出量テーブルを用いた1)の方法と比較すると表裏一体の優劣関係がある。モデルの式形を仮定することにより、対象車両の測定データに依存する突発的な排出特性の影響が緩和される利点がある反面、推計される排出量がモデル式形に大きく依存するため、排出特性によっては大きな誤差を生ずる可能性がある。また、少ないパラメータ及び簡便な式形で瞬間の排出特性を記述できるため、排出量テーブルを用いた方法に比べて記憶容量、ハンドリングしやすさの点で有利であるが、今日のコンピュータのスペックを考えると、それほど大きな利点ではない。排出要因の分析、結果の解釈において論理的な説明が困難である点は排出量テーブルを用いた方法と変わらない。

②理論モデル

ここでいう理論モデルとは、単純回帰モデル同様、速度・加速度等を変数として瞬間の排出量を定式化するモデルであるが、定式化に当たり排出特性に関係する車両側の要因を踏まえモデルを定式化する

ものであり、定式化には理論的なバックグラウンドを有するものである。

この代表的な例が、排出量特性とエンジンの出力、あるいは車両の走行エネルギーの関係を仮定して定式化するものである。これらのモデルは、特に燃料消費量を推計するモデルとして様々な研究がなされており、Post et.al.¹⁸⁾、Richardson¹⁹⁾、Kent et.al.²⁰⁾は、エンジン出力が燃料消費量に比例することを利用して、車両の運動方程式を定式化して瞬間燃料消費量の推計モデルを構築した。また、Biggs and Akcelik²¹⁾²²⁾は、エンジン出力モデルを更に発展させた車両の運動エネルギーモデルとして定式化している。基本的には以下の式で表される。

$$f_t = \alpha + \beta_1 R_T v + \left| \beta_2 M v a_e^2 \right|_{a_e > 0} \quad \text{for } R_T > 0$$

$$= \alpha \quad \text{for } R_T \leq 0$$

但し、 $R_T = b_1 + b_2 v^2 + M a_e$ ：車両の推進力

ここに、 f_t ：瞬間の燃料消費量[g/sec]、 v ：瞬間速度、 M ：車両重量、 a_e ：有効加速度（ $a_e = a + g$ 、 a ：実際の加速度、 g ：重力加速度）、 α 、 β_1 、 β_2 、 b_1 、 b_2 ：モデルパラメータ

上記のモデル式で、定数項及び第2項がエンジン出力を考慮したモデル、第3項が加速時の車両の慣性エネルギーを考慮した項である。

これらのモデルと各階層のモデルとの関係を示すと、Level 0 の詳細モデルとしてのエンジン出力と排出量のモデルを基本として構築される。また、これらの式の時間・空間積分を行うことで、Level 2 以降の集計的な排出モデルと対応付けられる。

以上は燃料消費量モデルとして定式化されたものであるが、NOx、CO などの大気汚染物質排出量については、同様の手法によりモデル化してパラメータを推計する方法と、燃料消費量の排出量の関係をモデル化し、一旦燃料消費量を推計した後に排出量を推計する手法が提案されている。

速度加速度別排出量のモデルは速度プロファイルが与えられれば詳細な速度変動要素を考慮した排出量の推計が可能となるため、詳細な速度プロファイルを出力できる追従型のシミュレーションとの親和性が高いモデルである。しかしながら、ギヤ操作に関する効果を明示的には考慮していないため、Level 0 の詳細モデルから速度加速度別排出量を導出したモデルでは、仮定したギヤチェンジモデルの精度に依存し、速度、加速度と瞬間排出量のデータから推計したモデルでは、データ取得時のギヤ操作に依存する。また、詳細なエンジン挙動の集積としての総排出量が平均的なレベルで再現されるかという問題は、詳細モデルと同じくパラメータ推計に用いたデータ、車両挙動モデルの再現性等に大きく依存する。

2. 2. 4 速度変動要素を変数に含むモデル

車両挙動と排出量の関係から、特に停止時及び加速時の排出量の寄与が大きいことを踏まえて、停止・発進等の加減速挙動から排出量を特徴付ける推計指標を抽出し、説明変数とするモデルである。こ

これらのモデルで狙いとしている時間的・空間的集計区間は、比較的短い集計単位（例えば、交差点周辺、交差点間のリンク単位、ショートトリップ単位等）であり、Hot Spot における排出量把握を目的とするモデリングである。ここに分類されるモデルは、設定する説明変数の性質によって更に以下の3つに分類できる。

- 1) 速度変動要素モデル
- 2) 要素分割モデル
- 3) 4モードモデル

以下、それぞれについて整理する。

1) 速度変動要素モデル

速度プロファイル（走行パターン）から、排出量推計対象となる時間あるいは空間単位において排出量を特徴付ける推計指標（特に速度変動要素に関するもの）を抽出し、それらを説明変数とするモデルである。これについても、瞬間排出量推計モデル同様、理論モデルをベースとして構築されたモデルと、実データの分析に基づき説明変数を抽出し、回帰的にパラメータを推計したモデルがある。

Watson et.al.²³⁾²⁴⁾は、前節及び前々節で説明したエンジン出力と燃料消費量の関係に基づいて燃料消費量モデルを定式化した。その後、Akcelik²⁵⁾によって改良された式形を示すと以下の通りとなる。

$$f_x = b_1 + \frac{b_2}{v_s} + b_3 v_s^2 + b_4 PKE$$

$$\text{ただし, } PKE = \sum (v_f^2 - v_i^2) \cdot \frac{1}{x_s}$$

ここに、 f_x : 単位距離当たり排出量、 v_s : 区間平均旅行速度、 v_f, v_i : 加速区間内の終速度・初速度、 PKE (Positive Kinetic Power): 加速時の運動エネルギー増加分（加速分のみ加算）、 x_s : 対象区間距離、 $b_1 \sim b_4$: パラメータ。

また、Post et.al.¹⁸⁾は、上記のエンジン出力モデルを発展させて、リンク単位の平均的なエンジン出力を推計する指標として、上記の PKE に対応する指標として以下の式で表される PIP (Positive Inertial Power)という指標を導入し、簡易にエンジン仕事率を推計する手法を提案している。

$$PIP = \frac{1}{2} M (V_2^2 - V_1^2) \cdot \frac{1}{T}$$

ここに、 M : 車両重量、 V_1 : リンク内最低速度、 V_2 : リンク内最高速度、 T : リンク旅行時間

観測に基づくモデルとして、大口ら²⁶⁾は、都市高速道路上でのガソリン乗用車の走行実験データを交通状態毎に分析し、渋滞時は旅行時間のみ、非渋滞時は旅行時間、加速度平均値、加速度標準偏差を変数するモデルを提案し、道路整備効果の分析に応用した。さらに、一般道の走行実験データのショートトリップ（車両の発進から次の発進まで）毎の実証的分析を通して燃料消費量が旅行時間、走行距離及

び速度変動要因を表す AEE（加速エネルギー当量：Acceleration Energy Equivalent）の線形和により表現されるモデルを構築した²⁷⁾。

$$AEE = \sum_{k=1}^K \delta_k (V_k^2 - V_{k-1}^2)$$

ここに、 k は計測周期 ($k = 1, 2, \dots, K$)、 K は対象ショートトリップの旅行時間 T を計測周期 0.1 秒で割った値、 V_k は各周期毎の瞬間速度、 δ_k は加速時 $\delta_k = 1$ 、その他の場合 $\delta_k = 0$ となるダミー変数。

なお、このモデルとエンジン出力に関する理論モデルとの比較検討により、実証モデルと理論的モデルが概ね整合することを示している²⁸⁾。

上記のモデルでは、いずれも速度変動要素を表す PKE, PIP, AEE といった指標を導入しているものである。このうち、PKE, AEE は加速時のエネルギー増加分に相当する量であり、基本的には同じものである。PIP についても加速時のエネルギー増加分に相当する量として導入されたものであり、基本的な考え方は同じである。但し、PKE, AEE は加算可能な指標（PKE の場合単位距離当たりに正規化していない場合）であり任意の区間での集計量として表現できるが、PIP は対象区間を定義することにより初めて設定できる指標であり、加法性はなく、対象とする区間に大きく依存する指標である点が異なる。

いずれのモデルにしても、速度変動分を表す指標の導入によって、より正確な速度変動要素の再現が可能であるが、マクロな集計量を説明変数としながらも、より詳細なミクロレベルの車両挙動の再現が必要とされる点が問題とされる。また、上記のいずれのモデルでもギヤ比の影響などが考慮されていないため、特に低速域などで若干の精度低下の可能性がある。

2) 要素分割モデル(Elemental Model)

車両のマクロな走行挙動のうち、停止によるアイドリング及び加速時の排出量増加に着目し、定常走行、遅れ時間及び停止回数の 3 要素に分割して排出量を推計するモデルである。基本的な式形は以下の通り表される²⁹⁾。

$$F = f_1 l + f_2 d_s + f_3 h$$

ここに、 F ：1 台当たり排出量、 l ：走行距離、 d_s ：遅れ時間、 h ：停止率（1 台当たり平均停止回数）。

いずれの要素もマクロな発進停止挙動に着目したものであり、マクロな車両挙動モデルとの親和性が高く、信号制御による燃料消費量や排出量を簡易に推定するには非常に有効なモデルである。初期の TRANSYT には要素分割モデルに基づく排出モデルが導入されており²⁹⁾、これらを用いた信号制御の分析も行われている³⁰⁾³¹⁾。

また、遅れ時間、停止時間等は point queue を仮定した累積図などからも分析可能であることから、これらの理論的なモデルと組み合わせて排出量の分析を行うことも可能である³²⁾。また、モデル定式化の段階で既に要因別に分解されているため、排出量を走行に伴うもの、遅れ時間の発生によるもの、停止・発進に伴うものといった要因別に分析できるメリットがある。

しかしながら、加減速範囲や停止位置などの空間的情報を考慮していないため排出量の空間分布の再現性がないこと、交通状況の違いによる加減速挙動や定常走行挙動の違いを考慮していないため、総排出量の再現性や渋滞流における再現性が必ずしも高くはないことなどの問題がある。

3) 4モードモデル

車両のマクロな走行挙動を加速、定速、減速、停止の4つの要素に分割して排出量を推計するモデルである。このモデルは上記の要素分割モデルの発展形であり、要素分割モデルとして整理する場合もあるが、ここでは特徴が大きく異なるため別のモデルとして分類した。基本的には以下の形式で表現される。

$$F = f_I t_I + f_A t_A + f_D t_D + f_C t_C$$

ここに、 F : 排出量[g], t_I : 停止時間[sec], t_A : 加速時間[sec], t_D : 減速時間[sec], t_C : 定常走行時間[sec], f_I, f_A, f_D, f_C : 各モードに対応する排出原単位[g/sec].

これらの各モードに対する排出原単位はシャシダイナモ台上試験のデータなどを用いて様々なものが設定されているが、多くの場合、加減速では初速度及び終速度、定常走行においては定常走行速度を変数としたものが用いられている。

例えば、Penic and Upchurch³³⁾は、マクロシミュレーション TRANSYT-7F に適用するためのモデルとして、停止（停止による遅れ）・加速・減速・定常走行のモード毎に、速度及び勾配の関数として回帰分析によりモデルを設定している。例として、NO_x 排出量のモデルを示すと、

- ・ 停止（遅れ）: $\text{NOX}_{\text{delay}} = 0.0003$ [遅れ時間単位秒当たり g]

- ・ 加速: $\text{NOX}_{\text{accel}} = (10^B)(V_f^A - V_i^A)/10000$ [1 台当たり g]

但し、 $A = 1.6573 - 0.010139(G) + 0.0017341(G^2)$, $B = 0.51557 + 0.040046(G) - 0.002613(G^2)$

- ・ 減速: $\text{NOX}_{\text{decel}} = (10^B)(V_i^A - V_f^A)/10000$ [1 台当たり g]

但し、 $A = 1.4293 + 0.047751(G) - 0.000276(G^2)$, $B = -0.77628 - 0.029074(G) + 0.0010873(G^2)$

- ・ 定常走行: $\text{NOX}_{\text{const}} = \{A + (B - A)(A_g)\}/(10000(V))$ (勾配 $0 < G < 1$ の場合) [1 フィート当たり g]

但し、 $A = 1.5718(\exp(0.041732V))$, $B = 4.2279(\exp(0.050231V))$, $A_g = 32.2G/\{10 \cdot (100 + G)^{1/2}\}$

ここに、 $\text{NOX}_{\text{delay}}$, $\text{NOX}_{\text{accel}}$, $\text{NOX}_{\text{decel}}$, $\text{NOX}_{\text{const}}$: 各モード毎の排出係数, V_i : 初速度[mph], V_f : 終速度[mph], G : 勾配[%]

他の物質等（燃料消費量、HC、CO など）についても同様に設定されている。

また、Taylor and Young³⁴⁾は、環境評価モデル IMPAECT(Impact Model for the Prediction and Assessment)において用いる排出量予測モデルとして、代表的2車種について定常走行、加速、減速、停止の各モード時の排出原単位を速度の変数として表現している。ここで、加速・減速時の排出原単位を初速度、終速度だけでなく平均加速度・減速度の関数として表現しているのが特徴である。

このアプローチは先にも述べたとおり要素分割モデルの発展形であり、基本的な特徴は要素分割モデル

ルと同じである。しかし、各モードの空間的分布を考慮することにより、排出量の空間的分布を分析できる点が先に述べた要素分割モデルと大きく異なる点である。こういったモード分布は、交通シミュレーションの車両軌跡からも容易に推計できるだけでなく、time-space 図上での停止波、発進波といった shockwave の伝搬が再現されれば、それに加えて加速・減速時間（あるいは距離）の情報を与えることによって解析的手法によって容易に推計可能である。これらの手法を用いた排出量推計モデルは、特に交差点周辺などの停止・発進に伴う排出量をより精度良く分析するのに適しており、いくつかの手法の提案がなされている。

例えば、西村ら³⁵⁾は4モードモデルを基本とする推計手法として、交通量到着分布、信号制御パラメータなどを入力変数として、交差点に到着する車両の各モード構成比率を推定する信号停止モデルを開発した。さらに、信号停止モデルでは再現できない渋滞時の走行モードを推計する手法³⁶⁾、1台毎の車両走行軌跡の再現を狙った走行シミュレーションモデルを開発し³⁷⁾、大阪の幹線道路を対象としてそれらの手法を用いた排出量推計手法の検証を行った³⁸⁾。

また、Matzoros³⁹⁾、Matzoros and Van Vliet⁴⁰⁾⁴¹⁾は、time-space 図上での shockwave の伝搬を考慮して各モードの空間分布を簡易に推計し、4モード別排出係数を用いて交差点周辺の排出量空間分布を推計する手法を提案した。この中で、これらの手法では考慮できない待ち行列中の挙動を考慮するために新たに creeping モードを設定している。この手法と拡散モデルの組み合わせ、交差点周辺の汚染物質(CO, HC, NOx)の濃度空間分布を推計するモデルを開発している。

以上のように、簡便な方法で加減速に伴う排出量のある程度捉えることができ、排出量の空間分布の推計に発展できる点で非常に有効な手法ではあるが、各モード内における速度変化を考慮せずモード内の排出量を一定として捉えている点や、加減速時の排出量が、設定される加減速範囲に大きく依存する点などにより、必ずしも排出量の空間的分布が正確に捉えられるとは限らない。

2. 2. 5 平均速度モデル

トリップ単位等の平均的な排出量を、その走行特性をもっとも簡便に表現する指標である平均旅行速度で表すモデルである。対象とする時間的・空間的な集計単位はトリップ単位であり、比較的まとまった走行における排出量の評価、あるいは地域内の総排出量といった指標を算出する際に用いられる。

環境庁の窒素酸化物総量規制マニュアル⁴²⁾では、一般的によく使われている平均速度式として、以下のものを示している。

$$F = aV^3 + bV^2 + cV + d$$

$$F = aV^2 + bV + c$$

$$F = a/V + b$$

$$F = aV + b\sqrt{V} + c + d/V$$

$$F = aV + b\sqrt{V} + c$$

ここに、 F ：排出係数 [g/km]、 V ：平均旅行速度[km/h]、 a, b, c, d ：パラメータ。

その他、式形は異なるものの、環境省、建設省土木研究所⁴³⁾、東京都⁴⁴⁾など、国あるいは地方公共団体において、総排出量、道路の環境影響評価における排出量の推計などに用いる目的で設定しているものの多くはこの速度別排出係数である。また、必ずしも式の形で与える必要はなく、速度別のテーブルとして与えられる例も多い。これらの排出係数は、多くの場合、実際のトリップ単位の走行状態を再現したテストサイクルを設定し、シャシダイナモ上で設定を行うことが多い。より適切な平均速度モデルを導出するためには、対象とする交通状態を十分に反映し、排出量ベースで速度帯を代表するテストサイクルを設定する必要があることが指摘されており⁴⁵⁾、そのような視点からのモード作成法も提案されている^{46) 47)}。

平均速度モデルは施策に伴う速度変動の要素を考慮した排出量推計手法としてはもっとも簡便で、地域内の総排出量の推計などには有効な手法である。しかし、対象とする交通状態とモデル導出に用いられるテストサイクルの特性が異なると、推計される排出量に偏りが生じる。

また、トリップ単位で定義された平均速度モデルがリンクなどの短区間の平均旅行速度に適用されることも多いが、単一車両のリンク単位では同じ平均速度でもバラツキが大きく、適用は困難である。また、ある時間区間で集計したリンク平均速度を用いる場合、複数車両の平均旅行速度とトリップ単位の単一車両の平均旅行速度が、排出量推計という観点から等価であることを示す必要があると思われるが、そのような分析例はほとんど見られない。いずれにしても、平均旅行速度のみを変数とするモデルでは、速度変動を十分に考慮するのは非常に困難である。

2. 3 交通流シミュレーションを用いた排出量推計に関する既往研究と問題点

2. 3. 1 動的な交通評価ツールとしての交通流シミュレーションの有効性

本節では、交通モデルの中でも特に交通流シミュレーションに焦点を絞り、排出量推計という観点から見た場合の特徴及び問題点を明らかにする。交通流シミュレーションといっても様々な種類のものがあり、様々な目的に用いられる。ただし、ここではある程度広域レベルを対象とした交通施策の評価を念頭に置いて、それらの評価に際して有効なツールとなりうるネットワーク交通流シミュレーションを対象とする。

交通問題に対するシミュレーションの適用が米国で論じられたのは 1950 年代と古く、その後 70 年代に掛けて様々なシミュレーションモデルの開発が進められ、適用がなされてきた⁴⁸⁾。ただ、その頃はコンピュータ性能やインプットデータの収集上の限界から、車両を流体近似したマクロシミュレータを用いた街路レベルのシミュレーション(TRANSYT⁴⁹⁾、SATURN⁵⁰⁾など)がある程度実用的なレベルであったと思われる。その後、交通渋滞の激化を背景として、近年になってまた新たなモデルの開発が進められ、さらに交通施策評価の様々な分野で利用されるようになってきている。この大きな要因としては、

- ①TDM, adaptive な信号制御など、需要、供給側とも動的現象を考慮した上で評価すべき施策が多くなってきたこと、
- ②情報提供効果による経路選択行動の変化など、個々の車両特性の違いを考慮するために車両 1 台 1 台を離散的に表現する必要が出てきたこと、
- ③コンピュータ能力の劇的な向上、

と考えられる。特に③の要素が非常に大きく、車両 1 台 1 台の詳細な挙動を再現しようとするミクロシミュレーション（以下の整理では追従モデルと称す）が実用的なレベルで実施可能になってきたこともあり、近年、様々な種類のミクロシミュレーションが開発され、特に、実務分野でも盛んに用いられている。ヨーロッパで実施された SMARTTEST プロジェクト⁵¹⁾では、様々なミクロモデルが整理され、それらの適用性向上に向けた取り組みがなされている。また、日本ではシミュレーションの実務レベルでの交通施策評価への適用は欧米に比べて遅れていたが、近年様々なレベルで利用が進んでいる。堀口・小根山⁵²⁾の報告でも、局所渋滞対策、都市交通施設整備、商業施設・イベント対策など中心に幅広い分野への適用事例が増えていることを示している。

一方、交通シミュレーション、特にネットワークシミュレーションモデルの実施に当たっては様々な問題点が指摘されている⁴⁸⁾。モデルそのものの問題としては、車両挙動モデルの適切性（対象とする施策の評価に必要な十分な車両挙動の再現性を有しているか）、あるいは利用者行動モデルの適切性（経路選択行動などの道路ネットワーク上での交通行動が、評価に必要な程度に反映されているか）がある。また、モデル適用上の周辺環境の問題としては、入力データの取得・生成の問題（ネットワークデ

ータの作成、適切時間OD交通量の設定、信号パラメータ等の取得など)、キャリブレーション・現況再現の困難さ(キャリブレーションのための交通量、旅行時間などのデータ取得、キャリブレーション作業そのものの人的・時間的コストなど)といったような大きな問題が存在している。いずれの問題も重要な問題であり、特に実務におけるシミュレーションの適用を考えると、OD交通量の生成及びキャリブレーションの手間が非常に大きなウエイトを占めているといっても良い。

ここでは排出量推計の観点から、車両挙動モデル及び排出モデルとのリンクという観点を中心に持ち上げ整理した上、それらの問題点を論じる。

2. 3. 2 車両挙動モデルの分類

車両挙動モデルを分類する視点はいくつか考えられる。例えば、車両の表現方法の違いとして、車両を流体近似して表現する「流体モデル」と、車両一台毎、あるいはひとまとまりの車群を粒状のものとして表現する「粒状モデル」という分類もあろう⁴⁸⁾。しかし、排出量推計との関連を考えると、モデル上での加減速挙動の再現という視点が重要となる。そのような視点からは、交通流シミュレーションの標準検証プロセス(Verification)マニュアル⁵³⁾でなされているような1) Q-Kモデル、2) 追従モデルという分類が有効である。

まずは、それぞれの分類毎に一般的な特徴を整理しよう。

1) Q-Kモデル

リンクにおける交通量(Q)-密度(K)-速度(V)の関係や、リンクからの流出台数などのマクロな交通流特性を外生的に与えてフローを管理するモデルである。従って、マクロな交通流特性の再現性確保という前提の上に立った車両挙動のモデル化がなされる。vertical queueで車両の待ち行列を扱う待ち行列モデル(SOUND 街路版⁵⁴⁾など)、車両を流体近似してブロック内の密度でブロック間の車両移動を管理するブロック密度法⁵⁵⁾⁵⁶⁾、ブロック密度法を基本に車両の粒状表現を組み合わせたハイブリッドブロック密度法(AVENUE^{57) 58)}、リンクをいくつかのボックスに分けてボックス間の移動で車両挙動を表現するボックスモデル⁵⁹⁾、Q-Kから得られるS-V関係に基づいて車両を追従させるモデル(SOUND高速版⁶⁰⁾、などと様々な車両挙動のモデル化の方法が提案されている。ただ、いずれの方法にしても詳細な車両の追従挙動などはモデル上で考慮していないため、加減速度などミクロな車両挙動レベルでの再現性はない。仮に、モデルのアウトプットとして個々の車両の位置・速度等がデータとして出力できたとしても、詳細な加減速挙動に本質的な意味はない。但し、停止・発進時のshockwaveの伝搬、交通量と密度に従った速度の低下などのマクロな交通流特性及びそれに対応した個々の車両挙動は、与えられたQ-K-Vの関係に従って、その範囲内で再現される。

2) 追従モデル (C-Fモデル)

車両の発進挙動や前車への追従挙動など、個々の車両に関するミクロな挙動をモデル化し、個々の車両挙動の集積としてフローを再現するモデルである。主なモデルとして海外のものでは NETSIM⁶¹⁾, Paramics⁶²⁾, VISSIM⁶³⁾, AIMSUN⁶⁴⁾, DRACULA⁶⁵⁾, 日本で開発されたものでは tiss-NET⁶⁶⁾, REST⁶⁷⁾, VISITOK⁶⁸⁾などがある。それぞれ様々な形の車両挙動モデルを搭載している。ここでそれらのモデルを紹介することは省略するが、いずれのモデルも前車との相対距離や速度などを入力として、それに対するドライバーの反応として加速度を出力とするモデルを基本としている。従って、モデル構造上は詳細な加減速挙動及び速度プロファイルが出力される。但し、その再現性は搭載された車両挙動モデル及び設定されたモデルパラメータに依存することになる。

一方、この車両挙動モデルは必ずしもマクロなQ-K-V関係を前提に置いたものではないため、リンクの容量を直接調整することはできず、個々の車両挙動を合成した結果として再現されることになる。そこで、モデルのキャリブレーションを行う際には、リンク毎に設定される目標 headway や、車両毎に設定される反応遅れなどの、様々な車両挙動パラメータを調整することにより、マクロなレベルでは十分な再現性を有することになる。

2. 3. 3 排出量推計モデル適用上の問題点

上記のQ-Kモデル、C-Fモデルの特徴、及び前節で整理した排出量推計モデルとの関連を踏まえ、現状におけるシミュレーションと排出量推計に関する一般的認識を整理すると以下の通りである。

- ・ Q-Kモデル

マクロな交通状況の再現性はある程度確保されるが、より詳細な加減速挙動の再現性はない。従って、対応可能な排出モデルは4モードモデル、停止回数モデル、平均速度モデルである。但し、空間分布の再現性はなく、加減速が十分に考慮されないため排出量そのものの再現性も不十分である。

- ・ C-Fモデル

マクロな交通状況だけでなく、より詳細な加減速挙動も出力される（『再現される』としていない点に注意）ので、マクロな排出モデルは勿論のこと、速度プロファイルを利用する排出モデルが適用可能である。より詳細な速度加速度モデルを適用することにより、より詳細な空間的分布が正確に推計可能である。

しかしながら、ネットワークシミュレーションにおいてマクロな交通流の再現を目標とするような使用場面を考えると、いずれのモデルにおいても（C-Fモデルであっても）ミクロな加減速挙動の再現性を期待するのは無理があるであろう。

なぜなら、ネットワークシミュレーションで渋滞現象の解析を行う場合、Q-K、C-Fいずれのモ

デルにおいても、旅行時間、リンク速度、断面交通量など、マクロな交通状況に興味の対象がある。また、それらのマクロな交通状況値が再現性の指標として用いられ、キャリブレーションもそれらの指標に基づいておこなわれる。従って、そのように設定された各種パラメータ値を用いた場合にミクロな加減速挙動が再現されるか、排出量推計という視点で見た場合に十分に妥当な精度であるか、検証をされた例はほとんどないし、また各シミュレーション実施例に対してそれらを検証することは非常に困難である。むしろ、加減速挙動について再現性の検証がなされない状況下で、それらを用いて排出量の推計を行っても、単に推計値が得られたというだけで、その妥当性については何ら保証が得られず、場合によっては過大（あるいは過小）に排出量を推計したり、推計したい施策に対して十分な感度がない、あるいは感度が大きすぎるなど、施策評価ツールとして十分に機能しない可能性もあろう。

これらは、Q-KモデルかC-Fモデルかというシミュレーションモデルそのものの問題ではなく、シミュレーションモデルへの排出モデルへの適用方法が不適切であることによる。詳細な加減速挙動が検証不可能（少なくとも現段階での実務レベルの使用を前提とすると）であるのであれば、それらの再現性を前提としない排出量の推計方法を適用する必要があると考えられる。

2. 4 第2章のまとめ

既存の研究レビューのまとめとして、各レベルにおける排出量推計モデルと、それらの空間集計単位及び排出量推計モデルの入力データについて整理したものの表2－1に示す。また、それぞれの排出量推計モデルに対して、ネットワーク交通流シミュレーションを用いて排出量を推計する枠組みを前提とした場合の、排出量推計モデルの入力データ（＝交通モデルの出力データ）の推計精度のイメージを併せて表2－1に示している。これらを整理すると、交通流シミュレーションを用いた排出量推計手法の問題点は以下の通りまとめられよう。

- ・ 排出量の空間分布を推計するためには、それらに対応する速度変動要素を説明変数として考慮できるモデルを適用する必要がある。これらは、速度変動要素を的確に捉えて排出総量を精度良く推計するためにも必要である。特に、ある程度詳細な空間集計単位（10～100m）で妥当な排出量を推計するためには、表2－1の速度変動要素モデルより詳細なモデルを適用する必要がある。
- ・ 一方、交通流シミュレーションに上記の排出量推計モデルを適用するためには、シミュレーションより詳細な速度プロファイルのアウトプットが必要とされる。しかし、実際の適用レベルでは、事実上検証が困難という観点で交通シミュレーションでのミクロな加減速挙動の再現性は十分ではなく、結果として適切に排出量の推計がなされない恐れがある。
- ・ これらの問題に対してあまりにも関心が払われていないため、シミュレーションの速度プロファイルを過信して何ら検証作業を行うことなく速度・加速度モデルを適用する例や、平均速度モデルを適用してしまう事例も多い。
- ・ すなわち、現行のアプローチでは、必要とされる排出量の空間集計単位に対して、排出量推計モデルとシミュレーションとの間に大きな gap が存在する状況にあるとあって良い。

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

排出量推計モデル		空間分布の再現性 ¹⁾				排出量推計モデル入力 (交通モデルの出力)	シミュレーションでの再現性 ²⁾	
		微小区間 (～10m)	小区間 (10～100m)	リンク (100～1000m)	トリップ (1km～)		Q-Kタイプ	C-Fタイプ
Level 0	エンジン挙動モデル	○	○	○	○?	エンジントルク、回転数など	×	× (△ ³⁾)
Level 1	速度・加速度モデル	△	○	○	○?	Δt毎の速度プロファイル	×	△
Level 2-1	速度変動要素モデル	△	○	○	○	排出量推計指標(PKE、AEEなど)	×	△
Level 2-2	4モードモデル	×	△	○	○	加速・減速・停止・定常走行時間など	○	○
Level 2-3	停止回数モデル	×	×	○	○	旅行速度、遅れ時間、停止回数など	○	○
Level 3	平均速度モデル	×	×	△	○	平均旅行速度	○	○

記号の意味1): ○: モデル構造上、比較的再現性が高い、△: 推計は可能だが精度に疑問あり、×: モデル構造上推計は不可
*1) 対象とする車種・排出ガスに対する適切なモデル設定・パラメータ設定がなされ、なおかつ十分に精度の高い入力値を与えられた場合に可能な排出量推計精度を概念的に示したもの。距離区分は大まかな目安を示す。
*2) マクロな交通状況を再現できるよう適切にパラメータをキャリブレーションした場合の精度。
*3) 速度プロファイルからエンジントルク、回転数などのエンジン挙動を再現するサブモデルを導入することにより推計は可能。

本研究では、これらの gap を踏まえ、シミュレーションを用いた新たな排出量推計アプローチを構築しようとするものである。具体的には、シミュレーションの再現性が実用レベルで検証可能な車両挙動

（停止，走行，ラフな速度変化）が捉えられている状況までを前提とする．一方，排出量推計モデルについては，ある程度の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適用する．この2つのモデルの gap を埋めて結びつけるため，排出量推計指標変換モデルを導入する．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．また，いずれのモデル（シミュレーション，排出量推計モデル，排出量推計指標変換モデル）についても現実的な集計単位を設定することにより，各モデル毎に再現性の検証が可能となり，説明力が向上し，集計レベルでの精度の向上が図られる．

より具体的なアプローチについては，第3章以降で詳細に説明していくこととする．

第2章の参考文献

- 1) R. Akcelik, C. Bayley, D.P. Bowyer and D.C. Biggs : A hierarchy of vehicle fuel consumption models. Traffic Engineering + Control, Vol.24, No.10, pp.491-495, 1983
- 2) M.Barth, F.An, T.Younglove, G. Scora, C. Levine, M. Ross and T. Wenzel : Comprehensive Modal Emissions Model (CMEM), version 2.0, User's Guide, 2000.3
- 3) JCAP ホームページ : <http://www.pecj.or.jp/jcap/index-jcap.asp>
- 4) 平井洋, 國見均, 小林伸司 : 自動車排気排出量推計モデルの開発, 大気汚染学会予稿集, pp.178-179, 2001
- 5) 林誠司, 平井洋, 吉川康雄 : ミクロ交通流モデルを用いた排出量推計, 自動車研究, Vol.24, No.7, pp.257-260, 2002.7
- 6) S. Hausberger, J. Rodler and P. Sturm : Emission Factors for HDV and Validation by Tunnel Measurements, 11th International Symposium 'TRANSPORT and AIR POLLUTION' Graz, Proceedings Vol.1, pp.93-100, 2002.
- 7) 金野満, 大橋直樹 : 自動車の走行パターンと排気に関する一考察, 自動車技術会学術講演会前刷集 No.85-98, pp.5-8, 1998
- 8) 鎌田実, 岡沼浩司, 佐貫章, 山崎一平 : ドライビングシミュレータを用いた環境負荷の小さい路線バスの研究, 自動車技術会論文集, Vol.29, No.2, April 1998.
- 9) 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, pp.99-107
- 10) 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, pp.95-99
- 11) 森野伸崇, 寺町賢一, 角知憲 : 交差点付近の窒素酸化物の濃度分布予測, 環境システム研究ーアブストラクト審査部門論文ーVol.27, pp.643-648
- 12) K. Post, J. Tomlin, D. Pitt, N. Carruthers, A. Maunder, T. Gibson, J.H. Kent and R.W. Bilger : Fuel economy and emissions research annual report for 1980-1981. Charles Kolling Research Laboratory Technical Note ER-36, Department of Mechanical Engineering. University of Sydney, 1981.
- 13) R. Joumard, J. Hickman, J. Remerlin and D. Hassel : Modelling of emissions and consumption in urban areas -Final report, Deliverable No. 12 of DRIVE Project V1053 -INRETS Report LEN 9213, , , 1992
- 14) 矢島岳幸, 古屋秀樹 : 車両挙動を考慮した自動車排出ガス総量の算出手法に関する研究, 第27 回土木学会関東支部技術研究発表会講演概要集第4部門, pp.662-663 , 2000
- 15) 平島 浩一郎, 古屋 秀樹, 川嶋 弘尚 : 道路勾配を考慮した自動車排出ガス量算出手法と車両巡回計画問題, 第24回土木計画学研究・講演集, Vol.24, CD-ROM, 2001
- 16) L. Yu : Remote Vehicle Exhaust Emission Sensing for Traffic Simulation and Optimization Models,

Transportation Research D, Vol.3, No.5, pp.337-347, 1998

- 17) C. Lee and E. J. Miller : A Microsimulation Model of CO₂ Emissions from Passenger Cars: Model Framework and Applications, Transportation Research Board 80th Annual Meeting, Washington, D.C., Jan., 2001
- 18) K. Post, J.H. Kent, J.Tomlin and N. Carruthers : Fuel Consumption and Emission Modeling by Power Demand and a Comparison with Other Models, Transportation Research, Vol. 18A, No.3, pp.191-213, 1984
- 19) A.J. Richardson : The use of vehicle maps in the derivation of stop start fuel consumption rates, Paper No.11, SAE-A/ARRB 2nd Conf. 'Traffic Energy and Emissions', Melbourne, 1982
- 20) J.H. Kent, K. Post and J. Tomlin : Fuel consumption and emission modelling in traffic links, Paper No.10, SAE-A/ARRB 2nd Conf. 'Traffic Energy and Emissions', Melbourne, 1982
- 21) D.C. Biggs and R. Akcelik : Further work on modelling car fuel consumption, ARRB Internal Report AIR 390-10, Australian Road Research Board, 1985
- 22) D.C. Biggs and R. Akcelik : An energy-related model of instantaneous fuel consumption, Traffic Engineering + Control, Vol.27, No.6, pp.320-325, 1986
- 23) H.C. Watson, E.E. Milkins and G.A. Marshall : Controlling Traffic Flow for minimum Energy consumption and Emissions, Institute of Engineers, Australia Transport Conference, Adelaide, , pp.116-124, 1979
- 24) H.C. Watson, E.E. Milkins and G.A. Marshall : A simplified method for quantifying fuel consumption of vehicles in urban traffic, 4th Automotive Engineering Conference, 'Energy, Engineering and Environment and Economics', Melbourne, , , 1979
- 25) R. Akcelik : Formulae for predicting fuel consumption of cars, Traffic Engineering + Control, 1983.3, pp.115-118, 1983
- 26) 大口敬, 谷口正明, 森田緯之 : 燃費推定モデルを用いた道路交通施設整備効果の試算, 土木計画学研究・論文集, No.12, pp.575-582, 1995
- 27) 谷口正明, 大口敬, 岡本智 : 実用燃費の要因構造に関する研究, 自動車技術会論文集, Vol.28, No.1, pp.59-64, 1997
- 28) 大口敬, 片倉正彦, 谷口正明 : 都市部道路交通における自動車の二酸化炭素排出量推定モデル, 土木学会論文集, No.695/IV-54, pp.125-136, 2002.1
- 29) H.C. Lorick : Analysis and Development of Fuel and Platoon Models, Transportation Research Center, University of Florida, Gainesville, 1981
- 30) D.I. Robertson, C.F. Lucas and R.T.Baker : Coordinating Traffic Signals to Reduce Fuel Consumption, Transport and Road Research Laboratory TRRL Report, LR 934, , 1980
- 31) C. Bayley : Energy Implications of Co-ordinated Traffic Signals, Australian Road Research, Vol.10, No.2, June 1980
- 32) R. Akcelik : Stops at traffic signals, Proceedings 10th ARRB Conference, 10(4), pp.182-192, 1980

- 33) M.A. Penic and J. Upchurch : TRANSYT-7F: Enhancement for Fuel Consumption, Pollution Emissions, and User Costs, Transportation Research Rec., 1360, pp.104-111, 1986
- 34) A. Taylor and T.M. Young : Developing a Set of Fuel Consumption and Emissions Models for Use in Traffic Network Modelling, Proc. of 13th ISTTT(Lyon), , pp.289-314, 1996
- 35) 西村昂, 日野泰雄, 海住正治 : 信号停止モデルによる自動車走行モードの予測方式に関する基礎的研究, 土木学会論文報告集, No.324, pp.141-149, 1982
- 36) 西村昂, 日野泰雄, 伊藤智仁 : 渋滞時の自動車走行モード予測方法, 土木計画学研究・論文集, No.3, pp.161-168, 1986
- 37) 西村昂, 日野泰雄, 布川 : 走行シミュレーションモデルによる自動車排出ガス量に関する一考察, 土木計画学研究・講演集, No.8, pp.105-112, 1986
- 38) 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, pp.283-288, 1989
- 39) A. Matzoros : Results from a Model of Road Traffic Air Pollution, Featuring Junction Effects and Vehicle Operating Modes, Traffic Engineering + Control, 31(1) : pp.24-35, 1990
- 40) A. Matzoros and D.Van Vliet : A model of air pollution from road traffic, based on the characteristics of interrupted flow and junction control: Part I. Model description, Transportation Research, 26A, pp.315-330, 1992
- 41) A. Matzoros and D.Van Vliet : A model of air pollution from road traffic, based on the characteristics of interrupted flow and junction control: Part II. Model results, Transportation Research, 26A, pp.331-355, 1992
- 42) 環境庁大気保全局大気規制課編 : 窒素酸化物総量規制マニュアル[改訂版], 公害研究対策センター, 1993. 8.
- 43) 大城温, 小根山裕之, 山田俊哉, 大西博文 : 沿道における大気汚染予測に用いる自動車の排出係数について, 土木技術資料, Vol.42, No.1, pp.60-63, 2000
- 44) 東京都環境保全局 : 車種別速度別排出係数, 都内自動車走行量及び自動車排出ガス量算出調査報告書, 1996
- 45) 細井賢三 : CO₂ 排出総量の算出に必要な走行モードと排出係数について, 自動車研究, Vol.20, No.9, pp.7-11, 1998
- 46) 平井洋, 柳漢呉, 土井努, 細井賢三 : 排出係数測定用の実走行モードの作成方法について, 自動車研究, Vol.18, No.12, pp.5-8, 1996
- 47) 柳漢呉, 平井洋, 土井努, 細井賢三 : 自動車の都市内走行形態に及ぼす道路, 車種, 積載量の影響 - 試作走行モードの検証 -, 自動車研究, Vol.19, No.1, pp.11-14, 1997
- 48) やさしい交通シミュレーション, (社) 交通工学研究会編, 2000
- 49) D.I. Robertson : TRANSYT ; "A Traffic Network Study Tool, Road Research Laboratory Report", LR253, 1969

- 50) M.D. Hall, D. Van Vliet and L.G. Willumsen ; “SATURN-a simulation-assignment model for the evaluation of traffic management schemes”, Traffic Engineering and Control 21, pp.168-176, 1980
- 51) Smartest Project HP : <http://www.its.leeds.ac.uk/projects/smartest/>
- 52) 堀口良太, 小根山裕之 : 適用事例を通じた交通シミュレーション利用実態の分析と利用促進への課題, 土木学会論文集, No.709/IV-56, pp.61-69, 2002.7
- 53) 道路交通シミュレーションシステムクリアリングハウス : <http://www.jste.or.jp/sim>
- 54) 岡村寛明, 桑原雅夫, 吉井稔雄, 西川功 : 一般街路網シミュレーションモデルの開発と検証, 第 16 回交通工学研究発表会論文報告集, pp.93-96, 1996.11
- 55) 交通工学研究会 : 交通管制における交通状況予測手法に関する研究, 交通工学研究会報告書, 1971
- 56) 桑原雅夫, 上田功, 赤羽弘和, 森田綽之 : 都市内高速道路を対象とした経路選択機能を持つネットワークシミュレーションモデルの開発, 交通工学, Vol.28, No.4, pp.11-20, 1993
- 57) R. Horiguchi, M. Kuwahara, M.Katakura, H. Akahane and H. Ozaki : A Network Simulation Model for Impact Studies of Traffic Management ‘AVENUE-ver.2’, Proceedings of the 3rd World Congress on Intelligent Transport Systems, Orlando, 1996.10
- 58) 堀口良太, 片倉正彦, 赤羽弘和, 桑原雅夫 : 都市街路網の交通流シミュレーター-AVENUE-の開発, 第 13 回交通工学研究発表会論文集, pp.33-36, 1993
- 59) 飯田恭敬, 内田敬, 藤井聡, 鷹尾和享 : 渋滞の延伸を考慮した動的交通流シミュレーション, 土木計画学研究講演集, No.14(1), pp.301-308, 1991
- 60) 吉井稔雄, 桑原雅夫, 森田綽之 : 都市内高速道路における過飽和ネットワークシミュレーションモデルの開発, 交通工学, Vol.30, No.1, 1995
- 61) CORSIM(NETSIM) : <http://www.fhwa-tsis.com/>.
- 62) Paramics: <http://www.paramics.com/>
- 63) VISSIM: <http://www.english.ptv.de/cgi-bin/produkte/vissim.pl>
- 64) AIMSUN: <http://www.tss-bcn.com/aimsun.html>
- 65) DRACULA: <http://www.its.leeds.ac.uk/software/dracula/index.html>
- 66) K. Sakamoto, H. Kubota and N. Takahashi : Traffic assignment method considering car-by-car behavior for traffic impact studies - development of the tiss-NET System, Proceedings of 8th World Conference on Transport Research, Antwerpen, 1998
- 67) 吉田正, 野呂好幸, 富山礼人 : ETC 対応型 IC 計画に関する基礎的研究-交通流シミュレーター「REST」の適用事例の報告, 土木計画学研究・講演集, No.22(2), 1999
- 68) 宇陀正志, 森津秀夫 : 小規模道路網を対象とした交通シミュレーションモデル, 第 19 回交通工学研究発表会論文報告集, pp.69-72, 2000

第3章 交通シミュレーションモデルを用いた 新たな排出量推計アプローチ

3. 1 既存アプローチの問題点と新たな排出量推計アプローチの目的

第2章では、既存の研究の整理に基づき、シミュレーションを用いた現行のアプローチに関する問題点を整理した。本章では、これらの問題点を踏まえて、交通流シミュレーションの出力と排出量推計モデルの入力に介在する gap を結び、求められる時間的・空間的な集計単位に応じて現実的な精度を確保することができる新しい排出量推計アプローチを提案する。

提案モデルを提示する前に、ここで改めて本研究で対象とする評価対象施策とそれに必要なモデルの要求性能を整理しておこう。モデル構築に当たって必ずしも評価対象の施策を限定する必要はないが、ある程度モデルに求められる要求性能を想定して明確にしておくことは、推計アプローチの考え方の整理、有効性・妥当性の検討を行う上では重要であろう。

まず、評価対象施策としては、交通状況の変化にある程度広域的な影響を及ぼすような広域的な交通施策を対象とし、それらの施策に伴う局地的な沿道大気環境の改善効果の予測・評価、及び施策の検討に資するようなモデルの構築を目標とする。具体的に、対象となる交通施策としては広域系統信号制御、ロードプライシング、情報提供などの需要の時間分散に資する各種TDM施策などが挙げられよう。従って、それらに対応するためには、ある程度広域にわたるネットワークを扱うことができるシミュレーションを用いた交通状況の再現が必要となる。

このような施策の評価を対象とした場合、広域を扱うネットワークシミュレーションの適用を想定して、局地的な沿道大気環境の改善効果を予測・評価することが必要となる。そのためには、ある程度詳細な空間集計単位（例えば、10m～100m程度の集計距離）における排出量の予測ができることが必要となる。なお、時間軸については交通需要の変化に対応した排出量レベルの変化が捉えられる程度に集計することとなるが、実際にシミュレーションに与えられる交通需要の時間単位を考慮すると、あまり細かい集計単位である必要はない。ここでは、短くても信号1サイクル程度＝2～3分程度、現実的には10分～1時間程度の時間軸の集計単位を想定する。

一方、交通施策の評価という観点からは、排出量の定量的な精度も重要であるが、施策による排出量の変化の方向性が的確に捉えられていることが重要であろう。また、モデルのアウトプットを的確に捉え、有効な施策の検討に結びつけるためには、排出量の論理的な説明力を有することも必要である。

上記のようなモデルの要求性能に基づき、現状の排出量推計アプローチを見た場合、以下のような問題点があることは第2章で示したとおりである。

- ・ 排出量の空間分布を推計するためには、それらに対応する速度変動要素を説明変数として考慮できるモデルを適用する必要がある。これらは、速度変動要素を的確に捉えて排出量を精度良く推計す

るためにも必要である。特に、ある程度の空間集計単位（10～100m）で実用上妥当な精度の排出量を推計するためには、対象とする空間集計単位に対応したモデルを構築する必要がある。具体的には、表2-1で示した速度変動要素モデルか、さらに詳細なモデルを適用する必要がある。

- ・ 一方、交通流シミュレーションに上記の排出量推計モデルを適用するためには、シミュレーションより詳細な速度プロファイルのアウトプットが必要とされる。しかし、実際の適用レベルでは、（事実上検証が困難という観点で）交通シミュレーションでのミクロな加減速挙動の再現性は十分ではなく、結果として適切に排出量の推計がなされない恐れがある。
- ・ すなわち、現行のアプローチでは、必要とされる空間単位における排出量の精度に対して、排出量推計モデルとシミュレーションと大きな gap が存在する。

これらを実際によく用いられるアプローチに当てはめてフローで示したのが図3-1である。ここで、既存アプローチ①がミクロな車両挙動（速度プロファイル）をシミュレーションで再現して、速度・加速度別瞬間排出量推計モデルを適用するアプローチ（ミクロなアプローチ）、既存アプローチ②が、シミュレーションから遅れ時間、停止回数、平均旅行速度などのマクロな指標をアウトプットして、それらの指標に対応する排出量推計モデルを適用するアプローチ（マクロなアプローチ）である。上記の問題点の繰り返しになるので詳細には言及しないが、いずれにしても必要とされる排出量のアウトプットを得ることができないか（アプローチ②）、値が得られても問題が残る（アプローチ②）。

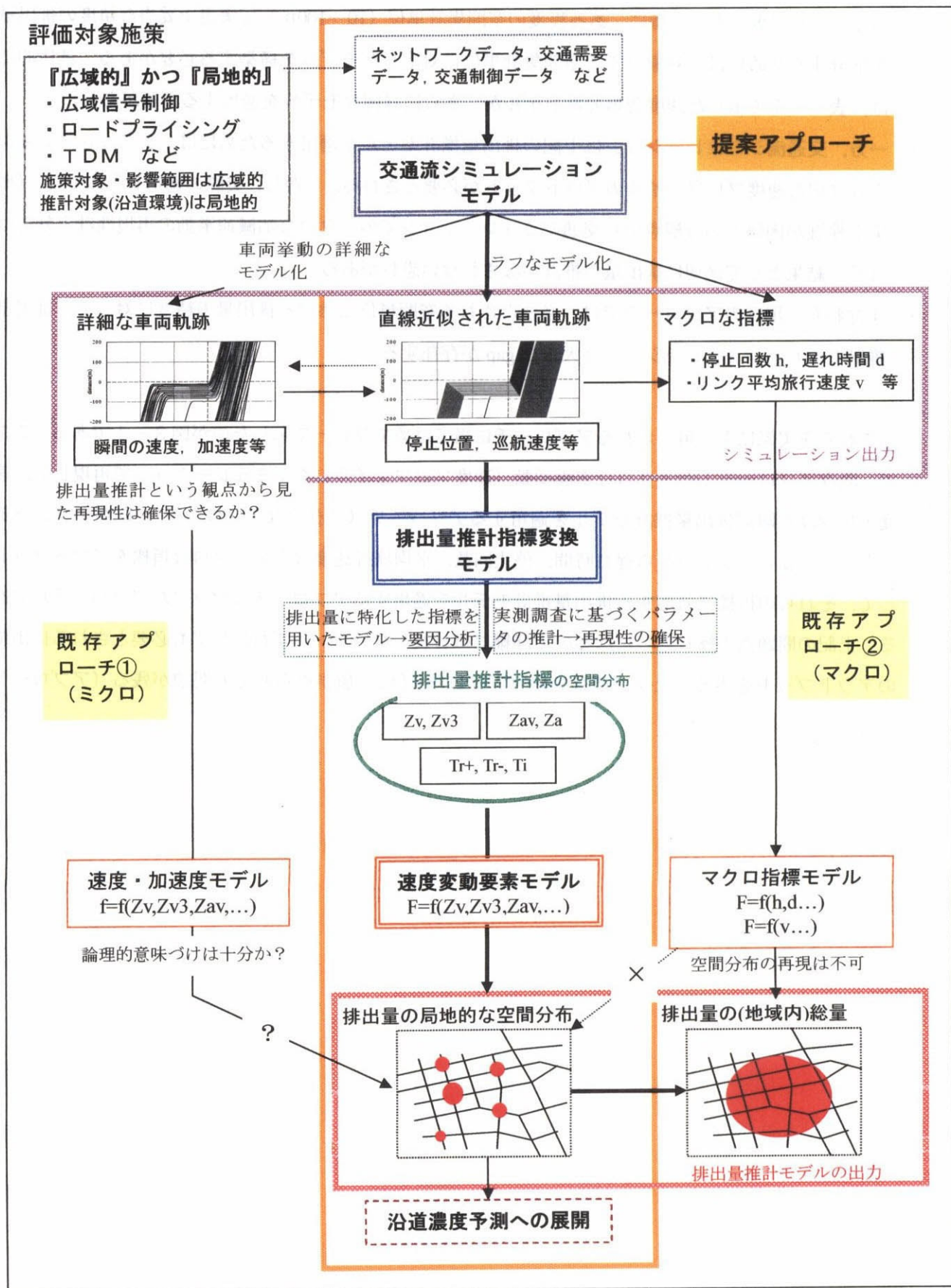


図 3-1 提案する排出量推計モデルの基本的なフロー

3. 2 提案する排出量推計アプローチの枠組み

本研究では、上記の問題点も踏まえて、交通流シミュレーションの出力と排出量推計モデルの入力に介在する gap を結び、求められる時間的・空間的な集計単位に応じて現実的な精度を確保することができる新しい排出量推計アプローチを提案する。図 3-1 には、既存のモデルと対比させる形で提案モデルのフローを示している。簡単に言うと、交通流シミュレーションモデルと排出量推計モデルの間に『排出量推計指標変換モデル』というモデルを導入し、シミュレーションのアウトプットである車両挙動から、排出量推計モデルのインプットである排出量推計指標へ変換（算出）することにより、両モデル間を結びつけようとするものである。以下、要素毎にその概要を説明する。

3. 2. 1 交通流シミュレーション

シミュレーションモデルでは、最低限マクロレベルでの交通状況の再現性（リンクへの流入・流出台数など）が得られていることを期待する。それとともに個々の車両について停止位置（又は速度が大きく変化する位置）、停止位置などにおける停止時間（正確な停止時間ではなく加減速による遅れも含めた遅れ時間）、停止位置間の平均巡航速度が再現されている状況を前提とする。この際、シミュレーションそのものに速度、加速度など詳細な走行状態についての再現性を要求しないところが特徴である。なお、上記のような状況を車両の走行軌跡として模式的に描くと、図 3-2 のように直線のみで近似された車両軌跡となる。

なお、ここではシミュレーションモデルとして特定のものを想定しておらず、上記の要件を満たせばどのような車両挙動に基づくモデルでも構わない。但し、ここでいう直線近似された車両軌跡が実軌跡とどのような関係にあるか、ある程度明確にしておく必要があるが、実際にはそれほど単純ではない。この議論については第 6 章で詳しく示す。

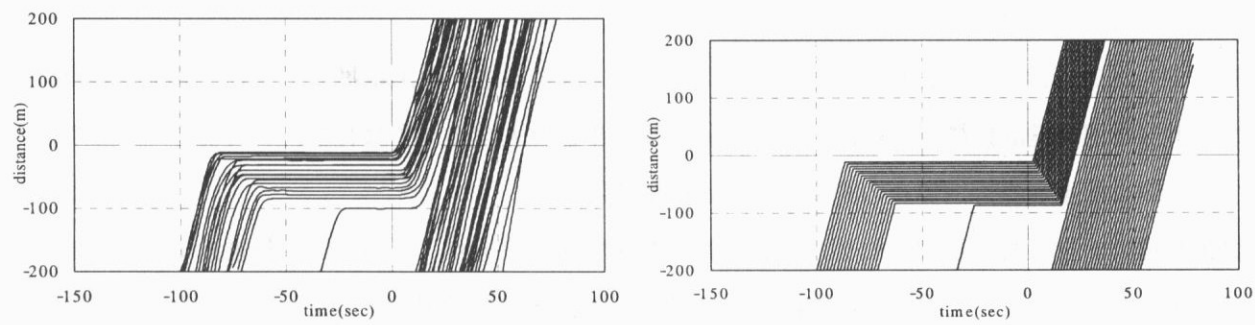


図 3-2 実際の軌跡（左図）と直線近似された車両軌跡（右図）¹⁾

3. 2. 2 排出量推計モデル

排出量推計モデルとしては、ある程度の空間集計距離において、速度変動を考慮した排出量を推計できるモデルである必要がある。しかし、前節で示したようなレベルのシミュレーションのアウトプットを対象とすることを考えると、速度・加速度モデルのような詳細なモデルでは、対応するアウトプットを生成することは困難である。そこで、推計対象区間における集計量を説明変数（排出量推計指標）とする『速度変動要素モデル』を対象とする。

具体的に、本研究において提案した排出量推計モデルを示す。このモデルは、「エンジン出力と排出量が比例」「エンジン回転数一定となるようにギヤ比を設定」という仮定を置くことにより、対象集計区間における『速度変動要素モデル』型の排出量推計モデルを設定している。具体的なモデル式形は以下の通りである。

$$F = c_1 \cdot Z_v + c_2 \cdot Z_{v3} + c_{3a} \cdot Z_{av} + c_{3b} \cdot Z_a + c_{4r+} T_{r+} + c_{4r-} T_{r-} + c_{4i} T_i,$$

ここで、 Z_v 、 Z_{v3} 、 Z_{av} 、 Z_a 、 T_{r+} 、 T_{r-} 、 T_i がモデルの説明変数である『排出量推計指標』であり、これらの値を推計対象区間の集計値として導出することにより、その区間における排出量が算出される。具体的なモデルパラメータの導出及び特性の分析は第4章に詳述する。このモデルの大きな特長としては各指標がそれぞれ意味づけを有する点である。詳細な説明は第4章に譲るが、簡単に示すと Z_v 、 Z_{v3} は走行距離に比例して増加する項（距離項）、 Z_{av} 、 Z_a は速度変動に伴って増加する項（速度変動項）、 T_{r+} 、 T_{r-} は走行時間に関係する項（走行時間項）、 T_i は停止時間に関係する項（停止時間項）として整理できる。このような整理をすることにより、排出量の要因分析とそれに基づく施策の検討にも有効である。

3. 2. 3 排出量推計指標への変換モデル

交通シミュレーションにより得られることを期待する車両軌跡が高々直線近似された軌跡レベルであるとするならば、これにより得られる情報のみから排出量を推計する必要がある。しかしながら、詳細な加減速挙動についての再現性がないため、車両の速度変動を考慮した排出量の空間分布を推計するにはこの情報だけでは不十分である。

そこで、シミュレーションモデルから得られるアウトプットと、排出量推計モデルで必要とされるインプット（排出量推計指標）を結びつけるためのモデルを導入する。すなわち、シミュレーションアウトプットから排出量推計指標への変換モデルを構築する。

排出量推計指標は排出量推計モデルの説明変数を指すものであり、用いる排出量推計モデルによって異なる。例えば、平均速度モデルであれば排出量推計指標は平均旅行速度であるし、速度ランク別加速度別排出量推計モデルなどであれば、瞬間の速度、加速度プロファイルそのものが排出量推計指標となる。しかしながら、前節でも示したとおり、直線近似されたラフな車両軌跡から詳細な排出量推計指標を推計するのは、必ずしも現実的とは言えないであろう。従って、対象とする排出量推計モデルも、評価対象の集計距離レベルである程度集計化された推計指標を変数とする速度変動要素モデルを用いるのが

適切である。

また、シミュレーションアウトプットの排出量推計指標への変換モデルは、精度良く観測された走行軌跡データに基づき設定する。これにより、排出量に大きな影響を与える速度・加速度の精度を確保できるとともに、事前に期待される排出量（推計指標）の推計精度を評価できるというメリットもある。

具体的に、第6章では、第4章で構築された速度変動要素型の排出量推計モデルを対象として排出量推計指標変換モデルを構築し、そのパラメータを推定している。その概要を簡単に示すと、図3-3の通りとなる。すなわち、直線近似された車両軌跡がシミュレーションから与えられるが、それを加速・減速・定常走行・停止の4つの範囲に分割し、その範囲毎に対象とする排出量推計指標 Z_v , Z_{v3} , Z_{av} , Z_w , T_{r+} , T_r , T_i それぞれに対して空間分布を当てはめる。この操作は、いわば直線近似された車両軌跡に対して“排出量が合うように排出量推計指標を fitting” していることに他ならない。このことにより、排出量をより適切に推計しようとするのが本手法の考え方であり、詳細な速度プロファイルを用いて排出量を推計する手法との大きな違いである。

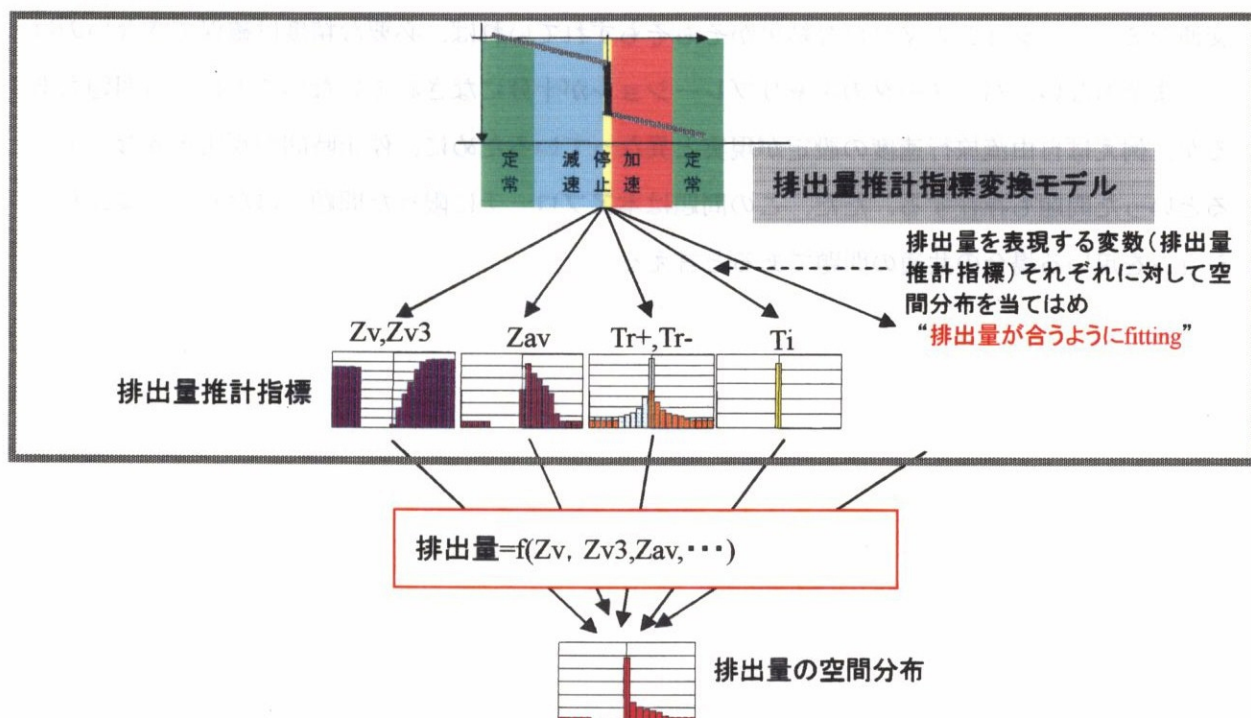


図3-3 排出量推計指標変換モデルのイメージ

3. 2. 4 本アプローチの特徴及び限界

本アプローチの既存の手法に対する特長は以下の通りである。

- ・ 排出量推計指標変換モデルを導入し、排出量を合わせるように車両軌跡を排出量のモデルインプットに変換することにより、適切な排出量推計が行える。
- ・ 加減速挙動について、十分にコントロールされた走行挙動の調査データを用いることにより、現実の現象との整合性を確保することができ、精度の向上が期待される。推計精度に関する分析を

事前に行えることも大きなメリットとなる。

- ・ 排出量推計には不向きとされていたQ-Kタイプの交通流シミュレーションでも、数 10m程度の時間・空間分解能での排出量推計が可能となること。このことは、特に大規模なネットワークにおける政策評価、オンラインシミュレーションなど、比較的計算時間が大きな要素となる場合には、Q-Kタイプと比較して計算時間を要するC-Fタイプのモデルに比べて効力を発揮する。また、シミュレーションのパラメータキャリブレーションなど、ハンドリングの容易さなどからも大きな優位性となる。

一方、本アプローチの欠点は以下の通りである。

- ・ 停止位置などとして抽出されなかった地点における排出量に関する事象は、排出量の推計に考慮されない。例えば、ネットワークを簡略化することにより、幹線道路の交差点しか対象とせず途中の交差点を対象としなかった場合、その交差点での停止・発進挙動は考慮できない。
- ・ 交通シミュレーションのマクロな結果がそもそもずれていれば、必要な精度は確保できないのは言うまでもない。パラメータのキャリブレーションが十分になされていないことによる問題もあるが、例えば自由流旅行速度の設定が現実と異なっているために、停止時間が現実と異なってくるといった問題も存在する。ただ、この問題は本アプローチに限った問題ではなく、シミュレーションを用いる場合の共通の問題であると言える。

3. 3 第3章のまとめ

本章では、交通流シミュレーションを用いた既存の排出量推計手法の問題点を踏まえた新たな排出量推計アプローチを提案した。既存のシミュレーションによる排出量推計モデルの問題点を一言で集約すると「現実的なレベルでの精度を考慮したシミュレーションモデルと排出量推計モデルの不整合」となる。一方では、交通管理施策を適切に評価する場合、交差点周辺などの Hot Spot における速度変動要素を的確に考慮して、排出量を推計する必要がある。その意味からも、ある程度（数m～数 10m，5 分～1 時間単位など）の時間的・空間的な集計区間を対象とした排出量推計が可能な、現実的な精度を考慮した排出量推計アプローチの構築が求められる。

ここで提案した排出量推計アプローチは、実用的なレベルでは再現性の期待できない詳細な加減速挙動についてはシミュレーションの結果を期待せず、あくまでもシミュレーションの結果としては停止、走行という基本的な部分のみを捉えることを期待する。その上で、「排出量推計指標変換モデル」を十分にコントロールされた走行挙動の調査データを用いて構築することにより、事前の現実の現象との整合性を確保しつつ、推計精度に関する検証を事前に行うことを可能にしようとするものである。この場合、適用する排出量推計モデルとしては、必要とされる集計単位における速度変動要素を集計的に表現した速度変動要素モデルが適切であろう。一方、シミュレーションとしては必ずしも詳細な加減速挙動を再現する必要はないことから、停止位置、走行速度といった基本的な挙動が再現可能であれば、Q-K，C-F モデルといった、車両挙動モデルの詳細度を問わない、というメリットもある。

本章では排出量推計モデル、排出量推計指標変換モデルについてその概略のみを示しているが、具体的なモデル構築について次章以降に順次示していく。

第3章の参考文献

- 1) 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

第4章 排出量推計モデルの構築

4. 1 排出量推計モデルの基本的考え方

本章では、第3章において示した排出量推計アプローチに適用可能な、速度、加速度などで表される走行状態の変化を反映できる排出量推計モデルを構築する。ここで想定されるシミュレーションのアウトプットとして、比較的加減速挙動に関する再現性を期待していないことや、ある程度の精度が確保される空間集計単位を10～100m程度とするならば、あまり細かい排出量の再現を意図したモデルである必要はなく、むしろ対象とする空間集計単位での再現性を確保できるような、対象区間内の速度変動に関する集計量を説明変数としたミクロ／マクロ排出量推計モデルである速度変動要素モデルが適当であろう。このような集計量を排出量推計指標として設定することにより、交通モデルと排出量推計モデルを結ぶ排出量推計指標変換モデルの設定・適用も効果的にできるものと考えられる。

ここで構築するモデルは、車両の運動方程式モデル、すなわち車両のエンジン出力と排出量に線形関係を仮定するモデルを基本としつつ、推計対象区間内における速度変動要因を考慮した集計量を説明変数とするモデルを作成している。特に、本研究ではギヤ比の設定について精度を確保すべき空間集計単位を考慮した簡略的なモデルを導入することにより、ギヤの影響が大きい低速域での精度の向上を図った点と、NO_x等の大気汚染物質の時系列データを用いて直接パラメータ推定を行い、特性の分析を行っているところが今までの研究に対する新規な点である。

一方、再現性の観点で言えば、目標とする空間集計単位での再現性はもちろん重要ではあるが、それとともに、より長いトリップ単位での再現性が十分かどうかとも検証する必要がある。このような観点から、モデルパラメータの設定における集計距離と推計精度の関係を詳細に分析した。さらに、他のモデルアプローチとの比較を行い、本手法の特徴を明らかにした。

4. 2 排出量推計モデルの定式化

4. 2. 1 排出量及び車両運動に関する基本的定式化

ここでは、まず瞬間の排出量を速度、加速度の関数として推計する式を構築する。この際、エンジン回転数やトルクなどのエンジンの状態と排出量との関係を用いる。次に、この瞬間の排出量を分析対象区間について積分することにより、分析対象区間における排出量を推計する式を導出する。

まず、分析対象区間における総排出量を F [g]、瞬間の排出量を f [g/sec] とすると、これらはエンジン回転数 n [回転数/sec] とエンジントルク τ [N/m] を用いて以下のように記述できる。

$$\frac{dF}{dt} = f(n, \tau). \quad (4-1)$$

ここで、エンジン回転数 n は車両速度と明確な関係があり、クラッチが接続されている状況では以下のように記述できる。

$$n = \frac{vr_i}{2\pi R}, \quad (4-2)$$

ここに、 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。

また、有効エンジントルクは車両の速度、加速度を用いて定式化された車両の運動方程式より以下のよう記述できる¹⁾。

$$\tau = \frac{R_i R}{\eta r_i}, \quad (4-3)$$

$$R_i = \mu_r \cdot M \cdot g + \mu_a \cdot A \cdot v^2 + M \cdot g \cdot \sin \theta + (M + m_i) \alpha, \quad (4-4)$$

ここに、 R_i : 総抵抗[N],

η : 総伝達効率,

μ_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],

μ_a : 空気抵抗係数[kg/m³],

A : 車両前面投影面積[m²],

θ : 道路勾配（上りを正とする）[deg],

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),

α : 瞬間の車両加速度[m/sec²].

従って、瞬間の排出量は、エンジンマップなどから $f(n, \eta)$ の式形を仮定することができれば、速度、加速度的関係として記述できる。ここで瞬間の排出量を分析対象区間において時間積分すると、対象区間における総排出量を算出する式が得られる。すなわち、

$$F = \int_{\tau} f(n, \tau) dt$$

となるが、 $f(n, \eta)$ の式形を具体化することにより、排出量に影響を与える因子が速度、加速度を変数とする集計量として抽出され、それらを説明変数とする排出量推計モデルが得られることとなる。

厳密に言うと、同じ回転数、トルクでも、定常状態における場合と過渡状態の場合では排出量は異なる。それとともに、エンジンの運転状況によっても排出量は大きく異なる。例えば、エンジンを始動した段階のコールドスタートの状況と十分に暖機された状況では大きく異なる。ここでは、これらの影響を無視できる状況、すなわち、同じ回転数、トルクの場合には排出量は一定である状態を仮定している。しかしながら、実際にはこの仮定が成立しない場合も多く存在する。例えば、ガソリン車などでは、電子燃料噴射制御による三元触媒の制御を行っているため、触媒の温度や燃料噴射の制御状況によって排出特性が大きく異なる。

しかしながら、上記のような過渡状態やエンジンの運転状況の影響がある程度小さいと仮定できる場合には、モデルのパラメータ推定段階で上記の誤差要因をパラメータに吸収させることが可能となる。これが、ある推計対象区間に対する集計量を説明変数とするモデルのメリットである。瞬間の排出量を推定するようなモデルの場合、過渡状態などに対して対応するためにはより複雑なモデリングによる考慮（あるいは補正）を行う必要がある。

4. 2. 2 エンジン出力比例を仮定したモデルの定式化

ここでは、瞬間の排出量がエンジンの出力に比例するような場合を想定して推計モデルを定式化する。この仮定はディーゼル車では NOx, CO2, 燃料消費量などについて概ね妥当な仮定であると言えよう。

2). この場合、モデル式は以下の通り定式化できる。

$$\begin{aligned} f &= k' \cdot Pe + f_{r+} & : v > 0, \quad Pe > 0 \\ &= f_{r-} & : v > 0, \quad Pe \leq 0 \\ &= f_i & : v = 0 \end{aligned}$$

ここに、 f : 瞬間の排出量

k' : パラメータ,

f_{r+} ：駆動走行時のエンジン出力に依存しない排出量，
 f_{r-} ：非駆動走行時の排出量，
 f_i ：アイドリング時の排出量．

一方，エンジン出力はエンジン回転数とトルクの積として表されるため， $f(n, \tau)$ は以下のように定式化できる．

$$\begin{aligned} f(n, \tau) &= k \cdot n \tau + f_{r+} & : v > 0, \tau > 0 \\ &= f_{r-} & : v > 0, \tau \leq 0 \\ &= f_i & : v = 0 \end{aligned} \quad (4-5)$$

ここに， k ：パラメータ．

(4-2)，(4-3)，(4-4)式を(4-5)式に代入すると，以下の式が得られる．

$$\begin{aligned} f &= \left(\frac{k \cdot v \cdot R_t}{2\pi\eta} \right) + f_i = c_1 v + c_2 v^3 + c_{3i} \alpha v + c_{4r+}, \quad v > 0, \quad R_t > 0 \\ &= c_{4r-}, \quad v > 0, \quad R_t \leq 0 \\ &= c_{4i}, \quad v = 0 \end{aligned} \quad (4-6)$$

$$\begin{aligned} \text{ここに,} \quad c_1 &= k(\mu_r + \sin\theta)Mg / 2\pi\eta, \\ c_2 &= k\mu_a A / 2\pi\eta, \\ c_{3i} &= k(M + m_i) / 2\pi\eta, \\ c_{4r+} &= f_{r+}, \quad c_{4r-} = f_{r-}, \quad c_{4i} = f_i, \end{aligned}$$

$R_t > 0$ となる条件は(4-6)式より以下のように記述できる．

$$\alpha > - \left(\frac{c_1 + c_2 v^2}{c_{3i}} \right). \quad (4-7)$$

走行距離 X [m]における総排出量 F [g]は，瞬間の排出量 f ，すなわち式(4-6)を距離 X の走行に要する走行時間 T [sec]の範囲で時間積分することにより求められる．ここで，パラメータ c_{3i} は選択するギヤによって変化する項である m_i を含んでおり，ギヤ比に依存する．簡単に見積もると，ローギヤ（1段）のギヤ比を4程度，オーバートップ（5速）を0.8程度，最終減速比を4とすると，5速のパラメータ c_{35} は概ね1速のパラメータ c_{31} に対して1.3倍程度となる．ギヤ位置は走行状態に応じて必要な車両挙動を達成させるように運転者の意志によって適宜操作され，運転者の操作によって異なる．ギヤ比の影響は瞬間の排出量を厳密に考慮したい場合には無視できない．しかし，ここではある程度の距離区間について平均的な排出量を推定するモデルを構築することが目的なので，ギヤ比の影響についてもある程度平均的に捉える必要がある．

そこで，ギヤ比に依存するパラメータ c_{3i} について以下のような簡単な仮定を置くことによって，最低限のギヤ比の影響を考慮する．加速時におけるエンジン回転数と速度の関係を，図4－1に模式的に示

す。一般的に、大きなトルクが必要な低速段階では、大きなギヤ比である低い段数が選択され、速度の増加に従って小さなギヤ比の高いギヤ位置にシフトアップされる。そこで、このような速度とギヤ比の関係を単純化してモデルに導入する。すなわち、図4-1に示すように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する。この場合、式(4-2)の車両速度 v とエンジン回転数 n の関係から、以下のような反比例の関係が得られる。

$$r_i = c/v, \quad (4-8)$$

ここに、 c : 定数

さて、上記のギヤ比に関する仮定を踏まえて、総排出量 F を導出しよう。式(4-6)に式(4-8)を代入し、時間微分することにより、総排出量 F は以下のように記述できる。

$$F = c_1 \cdot Z_v + c_2 \cdot Z_{v^3} + c_{3a} \cdot Z_{av} + c_{3b} \cdot Z_\alpha + c_{4r+} T_{r+} + c_{4r-} T_{r-} + c_{4i} T_i, \quad (4-9)$$

ここに $c_{3a} = k(M + m_1)/2\pi\eta$, $c_{3b} = k \cdot c \cdot m_2/2\pi\eta$,

$$Z_v = \int_T \delta v dt, \quad Z_{v^3} = \int_T \delta v^3 dt, \quad Z_{av} = \int_T \delta \alpha v dt, \quad Z_\alpha = \int_T \delta \alpha dt,$$

T_{r+} : $v > 0$ かつ $R_t > 0$ となる時間, T_{r-} : $v > 0$ かつ $R_t \leq 0$ となる時間,

T_i : $v = 0$ となる時間, δ : $R_t > 0$ のとき 1, $R_t \leq 0$ のとき 0.

又は、(4-9)式を走行距離 X で割って、単位距離当たりの排出量 F_x は、

$$F_x = c_1 \cdot z_v + c_2 \cdot z_{v^3} + c_{3a} \cdot z_{av} + c_{3b} \cdot z_\alpha + c_{4r+} t_{r+} + c_{4r-} t_{r-} + c_{4i} t_i, \quad (4-10)$$

$$z_v = Z_v/X, \quad z_{v^3} = Z_{v^3}/X, \quad z_{av} = Z_{av}/X, \quad z_\alpha = Z_\alpha/X, \quad t_{r+} = T_{r+}/X, \quad t_{r-} = T_{r-}/X$$

$$t_i = T_i/X$$

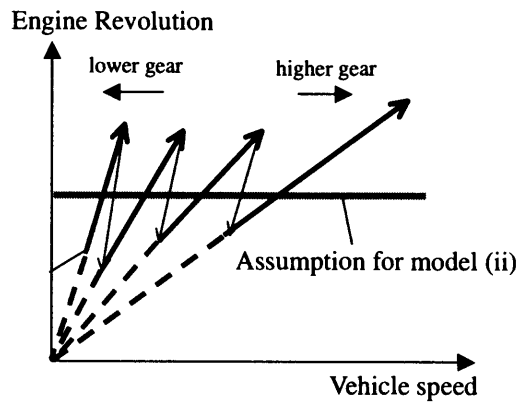


図4-1 車両速度とエンジン回転数の関係

4. 2. 3 モデルパラメータの解釈

上記のモデルは5つの説明変数及びパラメータから構成される。これらの各要素については同様のモデルアプローチでモデル化を行っている既存研究においても指摘されているとおりであるが³⁾⁴⁾、ここで改めて整理しておく。

第1項で、パラメータ c_1 は転がり抵抗と勾配抵抗に関係するものである。また、 Z_v は走行距離に関する変数である。ここで、車両が対象区間において駆動力で走行している状態、すなわち全区間で $\delta = 1$ の状態では、

$$Z_v = \int_T v dt = X \quad (4-11)$$

となり、走行距離に等しくなる。また、単位距離あたりに正規化した z_v は、

$$z_v = \frac{\int_T \delta v dt}{\int_T v dt} = \frac{\int_X \delta dx}{\int_X dx} \quad (4-12)$$

となることから、 δ の距離平均、すなわち駆動走行している距離の比率を表すことになる。

また、第2項で、パラメータ c_2 は空気抵抗に関係するものである。一般にこの項の影響は速度が低い場合は無視できる程度に小さいが、高速になるにつれて影響は急速に大きくなる。 Z_{v3} について単位距離で正規化した z_{v3} を見ると、

$$z_{v3} = \frac{\int_T \delta v^3 dt}{\int_T v dt} = \frac{\int_X \delta v^2 dx}{\int_X dx} \quad (4-13)$$

となり、駆動走行している区間での速度の2乗の距離平均となる。

第3項で、変数 Z_{av} について、 $\delta = 1$ の場合を考えると、

$$Z_{av} = \int_T a v dt = \int_v v dv \quad (4-14)$$

と変形できる。この区間での初速度を v_1 、終速度を v_2 とすると

$$Z_{av} = \frac{1}{2} (v_2^2 - v_1^2) \quad (4-15)$$

となり、この量は、駆動走行を行っている区間における運動エネルギーの増分に比例する項であることがわかる。この項はエネルギーモデルから導出される重要な速度変動要素であり、PKE(Positive Kinetic Energy)³⁾⁶⁾⁷⁾、AEE (Acceleration Energy Equivalence)⁴⁾⁵⁾と言われている。

第4項の変数 Z_a も同様に速度変動に関する変数であるが、ギヤ比の影響を考慮した場合にのみ現れる項である。これも同様に $\delta = 1$ の場合について考えると、

$$z_{\alpha} = \int_T \alpha dt = \int_v dv \quad (4-16)$$

すなわち、

$$z_{\alpha} = v_2 - v_1 \quad (4-17)$$

であるから、 Z_{α} は駆動走行している区間における速度の増分として記述できる。

また、5～7項はそれぞれ旅行時間に関する項であり、順にそれぞれ T_{r+} が駆動走行をしている時間、 T_r が非駆動走行の時間、 T_i がアイドリング時間である。

ここで、上述した解釈を踏まえて、排出の要因別に分類整理して意味づけを行う。既往の研究でも、燃費の消費構造について距離、時間、速度変動の3要素で表現されることが指摘されている⁴⁾⁵⁾が、ここでも以下の通り、同様の分類軸による要因の分類整理が可能である。

①走行時

- ・ 距離項： $F_v = c_1 Z_v + c_2 Z_{v3}$

上述したとおり、 Z_v は駆動走行する距離であり、 Z_{v3} は駆動走行区間での速度の2乗の距離平均に走行距離を乗じたものであるから、いずれも走行距離とは概ね正の相関がある。特に、速度が定常である場合には走行距離に比例する項となる。従って、それらをまとめて距離項とした。

- ・ 速度変動項： $F_{\alpha} = c_{3a} Z_{av} + c_{3b} Z_{\alpha}$

Z_{av} 、 Z_{α} はともに速度変動（速度の増加）に伴って発生する量である。これらをまとめて速度変動項とした。

- ・ 走行時間項： $F_T = c_{4r+} T_{r+} + c_{4r-} T_{r-}$

T_{r+} 、 T_{r-} はいずれも走行時間に関係する項である。従って、これらをまとめて走行時間項とした。

②停止時

- ・ 停止時間項： $F_I = c_{4i} T_i$

この項は説明するまでもなく停止時間に比例する項である。従って、この項を停止時間項とした。

4. 3 モデルパラメータの推計

4. 3. 1 使用データ

ここでは、モデルの適合性を分析するため、シャシダイナモ試験により得られた時系列の排出量及び速度変動パターンを用いてモデルパラメータの推定を行った。使用データは、平成9年度、10年度に建設省土木研究所の委託により日本自動車研究所が実施したシャシダイナモ台上試験の時系列データである。以下にデータの主な概要を示す。

1) 対象車両

分析対象車両は、上記の台上試験実施車両のうち、重量ディーゼル車12台の中から更に4台の車両を取り上げて詳しく分析を行った。これらの車両を選定した理由は、複数の種類の走行モード（走行モードについては後述）を用いて非常に多くの走行モードによる測定を行っていることによる。すなわち、パラメータ推定に用いるデータ量を十分に確保しつつ、パラメータ推定に用いないデータセットで検証を行うことが可能である。

なお、主な車両諸元を Appendix 1 に示す。いずれも平成6年度排出ガス規制車である。

2) 走行モード

走行モードについては、10/15モード、D13モードなどの法定モード、定められた一定の速度で走行する定速走行モード、実際の走行条件を再現するように設定された実走行モードを用いているが、本研究で用いるデータは実走行モードによる測定データである。

実走行モードとは、走行実態調査により車両の走行パターンを調査し、対象とする路線、あるいは平均旅行速度における走行パターンを代表するようなパターンを抽出して設定された走行モードである。測定に当たっては、JARIモード⁸⁾、土木研究所が作成した新旧のモード（以下、土研モード⁹⁾、旧建設省モード¹⁰⁾と呼ぶ）、が用いられている。JARIモード、土研モードは、いずれも日本自動車研究所で開発された同じ手法に基づき設定されたモードであり、トリップ長分布、アイドリング時間及びアイドリング時間分布、速度－加速度分布など、排出ガス量に影響を与えられとされる因子を分析し、各平均旅行速度において平均的な排出ガス量を算出できるように設定されたモードである。なお、JARIモード及び土研モードでは、対象とする路線、及びモード設定の元となった走行実態調査のデータが異なっている（JARIモード：都市内の道路、土木研究所モード：都市、郊外、地方部を含めたバイパス等の幹線道路）。

いずれのモードとも、一般道路、高速道路モードから構成され、それぞれ平均速度別にいくつかのモードから構成されている。高速道路モードはさらに停止モード（概ね平均速度 60km/h 以下）及び非停

止モード（概ね平均速度 60km/h 以上）に区分されている。上述したように、本調査でのデータは様々な走行条件におけるデータが含まれており、分析上、ある走行条件にデータが集中するなどのデータの偏りは、比較的小さいものと考えられる。

なお、以下の全ての分析において、パラメータ推定には土研モードを用い、推計精度に関する各種指標の算出などモデル適合性の検証にはその他のモード（旧建設省モード、JARI モード）のデータを用いた。

3) 積載条件、勾配条件

積載条件については、半積載（最大積載量の半分の重量の重りを積んだ状態）での走行が主となっている。その他、定積載（最大積載量の重量の重りを積んだ状態）、空積載（何も積んでいない状態）での測定もいくつかのモードについて行っているが、測定ケース数はあまり多くない。

また、勾配条件については、勾配なし（＝0 %）を中心として、± 2 %、± 4 %での測定もいくつかの走行モードで行っている。しかし、これについても測定点数はあまり多いとは言えない。

以上の理由により、以下の分析では半積載状態、勾配＝0 %のデータを対象として分析を行った。

2) 3) を踏まえて、分析に用いた走行モードを Appendix 2 に示す。

4) 測定項目・方法

計測システム全体のシステムダイアグラムを Appendix 3 に示す。本調査で対象とする車両については粒子状物質（PM）の測定も行っているため希釈トンネルを使用している。なお、PM については時系列データが測定されないため、本研究では用いていない。シャシダイナモメータは明電舎製 370kW シャシダイナモメータを用いている。また、排出ガス濃度の分析は、排気管からの排出ガス全量を分析対象として測定する直接排ガス分析計（堀場製作所 MEXA-9100 DEGR）、希釈トンネル中の排出ガスを分析対象とする希釈排ガス分析計（堀場製作所 MEXA-9200F）を用いているが、いずれの値も大きな差はないこと、直接排ガス分析計の方がタイムラグが小さいことから、本研究では直接排ガス分析計の結果を用いている。また、燃料流量の計測には容積型の燃料流量計（小野測器 FP-224）を用いるとともに、エンジンからのリターン燃料中の気泡の除去と燃料冷却のため、リターン処理タンクと燃料温調装置を使用している。

測定項目は多岐に渡っているが、本研究で使用した項目は以下の通りである。

- ・排出ガス関係：燃料消費量（燃料流量）、窒素酸化物（NO_x）、二酸化炭素（CO₂）、一酸化炭素（CO）

燃料流量については上記に示した方法、NO_x、CO₂、CO については、上記で測定した濃度に排気流量と排ガス密度を乗じて質量に変換している。

- ・車両挙動関係：速度、加速度、駆動力

いずれもシャシダイナモメータの回転速度、加速度、慣性力の変化を制御用に出力している

ものを用いている。

4. 3. 2 分析対象モデル

前節で提案したモデル（エンジン回転数一定モデル，時間項を駆動走行，非駆動走行，アイドリング状態に分解したもの）を基本とするが，基本モデルの特徴を浮き彫りにするためにいくつかのモデルバリエーションについてもパラメータ推計，適合性の検証を行った．分析対象とするモデル及び条件を以下に示す．なお，以下の分析では，パラメータ推計の際には排出量推計指標，排出量ともに単位距離当たりに正規化した値を用いている．

ーモデル1：エンジン回転数一定モデル（基本モデル）

前節で提案したモデルを基本モデルとする．

$$F_x = c_1 z_v + c_2 z_{v3} + c_{3a} z_{av} + c_{3b} z_{\alpha} + c_{4r+} t_{r+} + c_{4r-} t_{r-} + c_{4i} t_i \quad (4-18)$$

パラメータの推計手法は以下の通り．

- データを停止時と走行時に分割
- 停止時のデータを用いて t_i に掛かるパラメータ c_{4i} を推計
- 走行時のデータを集計区間（ここでは 100m）に分割して，集計量 z_v ， z_{v3} ， z_{av} ， z_{α} ， t_{r+} ， t_{r-} を算出し，最小自乗法にてパラメータを推定．

ーモデル2：ギヤ比一定モデル

前節で提案したモデルの定式化中，ギヤ比を一定と仮定すると，加速に関する項は z_{av} のみとなる．

$$F_x = c_1 z_v + c_2 z_{v3} + c_3 z_{av} + c_{4r+} t_{r+} + c_{4r-} t_{r-} + c_{4i} t_i \quad (4-19)$$

このモデルと基本モデル（モデル1）を比較することにより，基本モデルで簡便にギヤ比を考慮することの効果を示すことを狙いとしている．パラメータの推計手法はモデル1と同じである．

ーモデル3：時間項パラメータ一定モデル

基本モデル（モデル1）では，旅行時間に関するパラメータは3つの項に分かれているが，モデル上はアイドリング相当の排出量として同じ値を用いることで，時間項を一つのパラメータ c_4 を用いてまとめることができる．これにより，以下の式が得られる．

$$F_x = c_1 z_v + c_2 z_{v3} + c_{3a} z_{av} + c_{3b} z_{\alpha} + c_4 t \quad (4-20)$$

なお，筆者らの既発表論文¹¹⁾では，この方法によるモデル化を行っている．このモデルと基本モデルとの比較により，時間項を3つに分割することの効果を示す．なお，パラメータの推定に当たっては，データを停止時と走行時に分割せず，まとめて 100m の集計区間に分割して，集計量 z_v ， z_{v3} ， z_{av} ， z_{α} ， t を算出し，最小自乗法にてパラメータを推定している．

2) 集計単位

上記に掲げた4つのモデルいずれにおいても、パラメータを推定する際の集計単位及び推計対象である区間の距離は便宜的に100mとした。但し、パラメータ推定に用いる集計単位は、モデルが対象とする推計区間との関係も踏まえて十分に検討をすべき問題であり、後の4.4節にて取り上げる。

4. 3. 3 パラメータ推計結果及びモデルパフォーマンスの分析

4. 3. 2で示した分析対象モデル（提案モデル及び比較モデル）に対して、モデルパラメータの推計及びモデルパフォーマンスの分析を行った。この際、モデルのパフォーマンスを正當に評価するため、パラメータ推計に用いるデータとモデル適合性の検証に用いるデータを分けた。すなわち、パラメータ推計には土木研究所モードによるデータのみを用いて、モデル適合性の検証にはその他のモード（旧建設省モード、JARIモード）のデータを用いた。

対象とした各車両について、提案モデルを用いてパラメータを推計した結果を Appendix 4 に示す。また、NO_xについて、各車両、各モデルについてのパラメータ推定結果を Appendix 5 に示す。推定精度に関する指標としては、相関係数 R の他に、以下の指標を算出している。

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (y_{est} - y_{obs})^2}{n}}$$
$$\%RMSE = \sqrt{\frac{\sum (y_{est} - y_{obs})^2}{n}} \cdot \frac{n}{\sum y_{obs}}$$

ここに、 y_{obs} ：排出量の観測値、 y_{est} ：排出量のモデル推計値、 n ：データ数

いずれの車両のモデル推定結果を見ても、総じて相関係数 0.9 以上を達成しており、再現性の高いモデルであるといえる。以下、モデル間の比較も含め、いくつかの視点から結果を考察しよう。

1) パラメータの妥当性について

モデルの各パラメータは、本来物理的な意味を有する量である。そのため、モデル上である程度整合することが求められるが、Appendix 1で示された各対象車両の転がり抵抗、走行抵抗の値の比とモデルパラメータ c_1 、 c_2 の比を比較すると、パラメータの比率のオーダーは概ね同じであることから、概ね妥当な値であると言えよう。

なお、本モデルでは導出仮定を考えると全てのパラメータの符号が正になるはずであるが、一部符号が負になっている（車両4、 c_1 ）。これは、以下のような理由によるものと考察される。定速走行を行う場合、本モデル上で排出量は概ね以下の通り表される。

$$F_x = c_1 + c_2 v^2 + \frac{c_{4r+}}{v}$$

ここで、ある速度域まではパラメータ c_1 、 c_2 、 c_4 で表現できるとする。高速域ではエンジン出力と排出量の線形関係が崩れ、上記の関係式で表される排出量よりも多い量が排出されるとすると、この領域では c_1 、 c_2 の項が卓越し、この関係を表現するようにパラメータ c_1' 、 c_2' が（これにあわせて他のパラメータも）推定される。実際、次節で示されるとおり、低速域の排出量が多い部分では加速関係項 c_{3a} 、

c_{3b} の方が卓越するため、低速域での c_1 , c_2 の項の値はあまり影響力を持たない。そのため、 c_1 , c_2 の値は、転がり抵抗、走行抵抗等から想定される関係とは異なる値となるものと推察される。

推計結果を見る限りでは、今回用いたデータの範囲内では上記のパラメータの問題に関わらず比較的良好な推計精度が得られているが、上で述べたとおり低速域で卓越する加速関係項 c_{3a} , c_{3b} と高速域で卓越する速度項 c_1 , c_2 が相補的に作用するためであり、パラメータ値がモデル定式化上の不整合をうまく補っている状況となる。

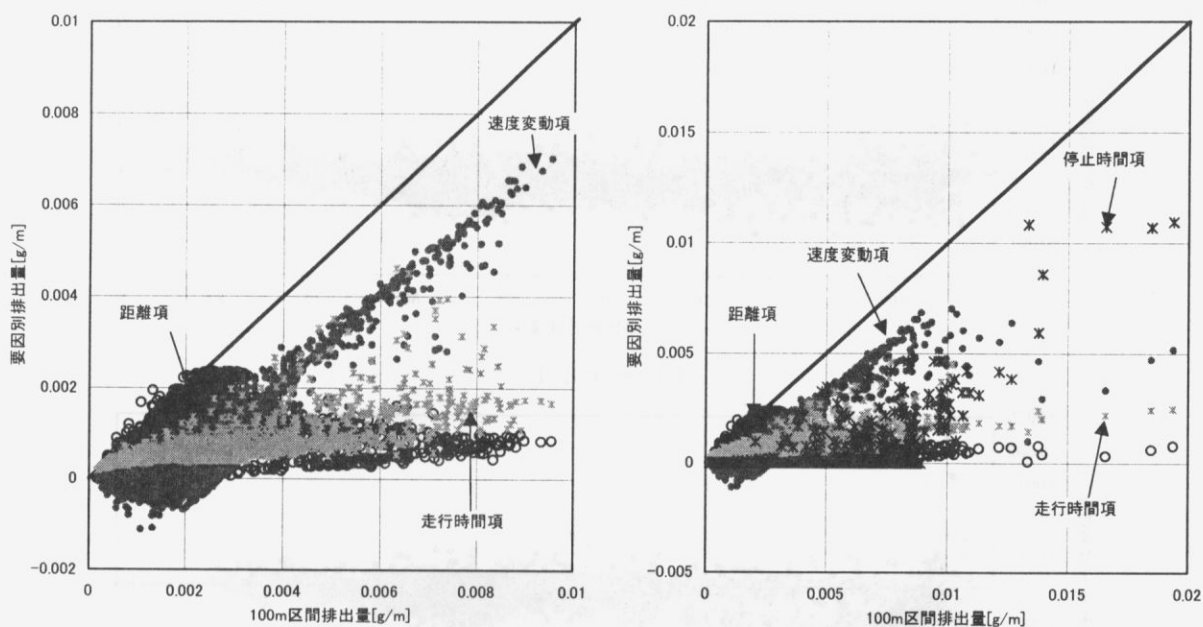
2) 排出量とモデルパラメータの寄与について

4. 2. 3において4つの要因（距離項、速度変動項、走行時間項、停止時間項）に分類したが、この分類に従い、排出量とモデルパラメータの寄与について実際のデータに基づき考察を加えてみよう。ここに示した4台の車両の中で、最も推定精度のよい（＝相関係数が高く%RMSEが小さい）車両として車両2を取り上げて、排出量レベル別に各要因の寄与を見た。各要因それぞれについて、モデルによる予測値とその場合の各要因別の排出量寄与分を示したものが図4-2である。これを見ると各要因別の寄与の度合いが明快に示されている。

図4-2の左図はアイドリング時間を含まない場合であるが、排出量の多い領域では、排出量の60%～80%が速度変動項を要因として排出される。また、状況によっては走行時間項の影響が大きい場合（＝つまり低速で走行している状態）に排出量が多くなる場合もあるが、その場合でも速度変動項の影響は大きい。なおかつ、距離項の影響は低排出量となる領域で卓越するが、値は実際それほど大きくはない。

一方、図4-2の右図は停止時間項を考慮した場合であるが、排出量の多い領域では、他の要因にかかわらず大部分が停止時間項の影響によるものとなる。当然、停止の後には加速段階が入るので速度変動項の寄与も大きいが、停止時間項の方が卓越している。

これらの結果は、高排出量となる要因に関する有用な情報を与えるとともに、本モデルのパラメータの値（あるいはその誤差、変動）が排出量に与える影響に関しても非常に重要な情報を提供している。すなわち、モデルパラメータの中で、走行中の高排出量時に大きく影響するのは、①速度変動項パラメータ(c_{3a} , c_{3b})、②走行時間項パラメータ(c_{4r+} , c_{4r-})の順である。また、停止も含めた場合では、停止が卓越した状況下で①停止時間項パラメータ(c_{4i})が大きく影響する。距離項パラメータ(c_1, c_2)の値は、高負荷となるような状況下では、排出量への寄与はあまり大きくない。



左図：停止状態を除く

右図：停止状態を含む

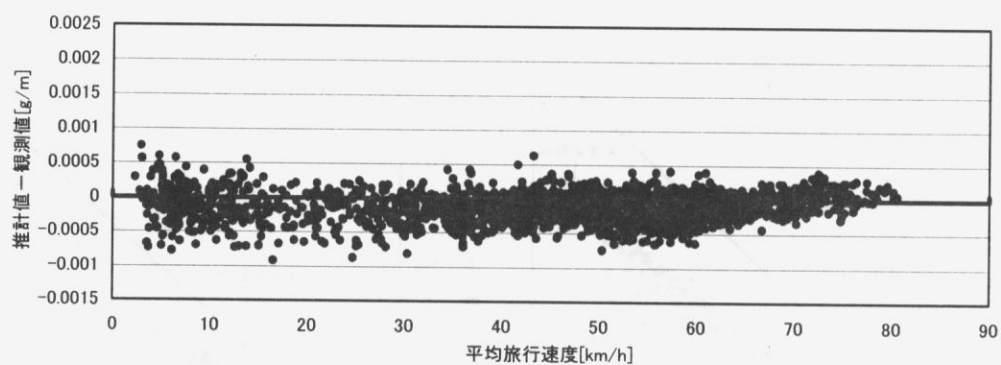
図4-2 100m 区間排出量と要因別寄与の関係 (NOx, 車両2)

3) モデル間の比較

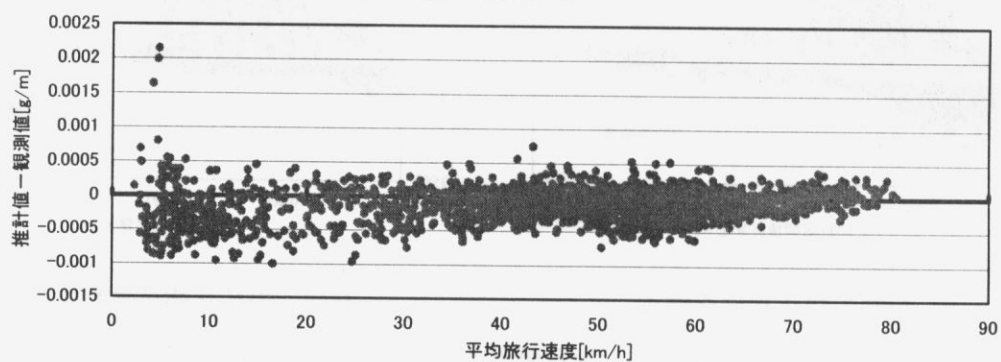
ここでは、パラメータ推定を行った各モデル間の比較を通じて、モデルの特徴を明らかにする。

①モデル1と2の比較

モデル1と2の精度は、RMSE等で見ても大きな開きがある。すなわち、低速走行時におけるギヤ比の変化を簡便ながらも考慮することによって（モデル1）、考慮しない場合（モデル2）よりも大幅に精度を向上させることがわかる。ギヤ比の変化は低速域の発進時などで影響を持つことから、特に発進加速時の高排出量になるところで推計精度が改善されているものと推察される。前項で示したとおり、発進加速時のモデルの推計精度は特に高排出量の範囲で影響を及ぼすものである。従って、特に高排出量状態での推計に当たっては重要な要因であると言える。図4-3は車両1について、また図4-4は車両3について、横軸を集計区間内の平均旅行速度、縦軸にNOxの推計誤差（＝推計値－観測値）を与えたものである。特に低速域の排出量の推計精度が大幅に改善されていることがわかる。

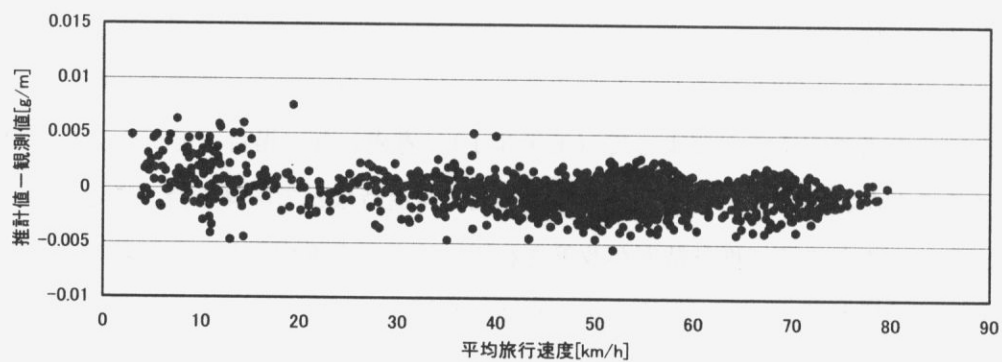


1) モデル1

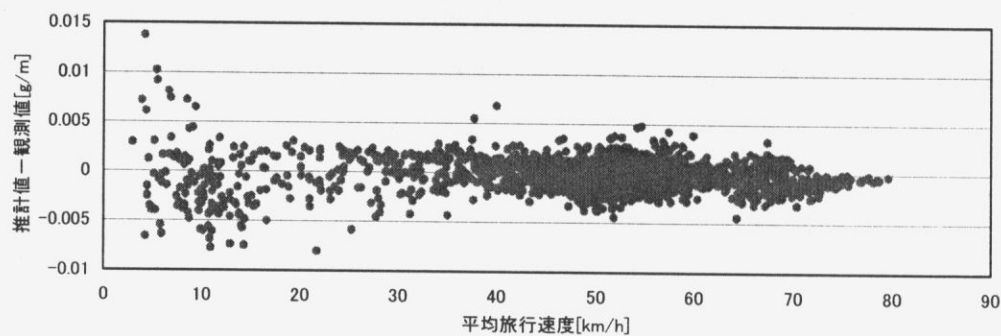


2) モデル2

図4-3 平均旅行速度と排出量の推計誤差の関係 (NO_x, 車両1)



1) モデル1



2) モデル2

図4-4 平均旅行速度と排出量の推計誤差の関係 (NO_x, 車両3)

②モデル1と3の比較

モデル1の結果から、 $c_{4r+} > c_{4i} \gg c_{4r-}$ となっている。 c_{4r+} が大きいことについては必ずしも十分に説明しうるものではないが、この結果はモデル構築上想定した通りであると言えよう。

一方、これらを一つのパラメータで表現しようとしているのがモデル3であるが、結果としてモデル1で設定した3つのパラメータ c_{4r+} , c_{4i} , c_{4r-} の値とは明らかに異なる値が計算されている。実際上は、駆動走行時には他の項（特に速度変動項）の影響が卓越するため、パラメータ c_{4r+} の影響はさほど大きくない（もちろん、この影響は $c_1 \sim c_3$ までの他のパラメータの推定に現れる）。また、非駆動走行時の値は異なってくるが、排出量レベルそのものが小さいため、実体的にはさほど問題とならない。

問題となるのはアイドリング時であり、パラメータ (c_{4r}) に引っ張られてアイドリング項 (c_{4i}) が過小評価された形となっている。前項での議論で示したとおり、停止時間項の影響は非常に大きく、停止時間が延びればその影響は累積的に増加するものである。そのため、少なくともアイドリング排出量についてはモデル1でなされているとおりアイドリング時のみを分割してパラメータの推計を行った方がよいことは明らかである。

4) まとめ

上記をまとめると、提案モデル（モデル1）では、高排出量となる状況で大きな寄与を有する速度変動項、停止時間項、走行時間項のいずれもがある程度のレベルで再現性を確保しており、提案モデルで組み込んだ各要素が精度向上に大きく寄与していると言える。

4. 4 集計単位に関する分析

前節までのモデルパラメータの推計及びモデルパフォーマンスの比較では、便宜的に100mという集計単位を用いた。しかしながら、100mという集計単位で分析を行うことの妥当性については十分に検討していない。本節では、これらの問題に関して分析を行う。

4. 4. 1 集計単位の長さパラメータ推計に関する問題点

本モデルは上述した通り、モデルの説明変数である集計量（排出量推計指標）の線形モデルであるから、原理的には単位区間に関わらず同じパラメータを用いることが出来るはずである。しかしながら、実際には必ずしも適切に推計されるとは限らない。以下に、短い集計単位の場合、長い集計単位の場合の問題点を整理する。

1) 短い集計単位の場合の問題点

短い集計単位（距離又は時間）では、燃焼状態の違い、ギヤの選択状況の違い、エンジンから排気管までの到達時間の違い（車両挙動－エンジン－排出ガスの一連のタイムラグ）など、構造的に排出量の大きなバラツキを生じさせる要因がある。さらに、測定上のバラツキ、排気管から測定機器までのタイムラグといったような測定段階での誤差が加わり、観測される排出量には結果として多くの誤差（バラツキ）が含まれている。測定誤差はともかくとして、その他の測定段階も含めた構造的なバラツキを再現するためには、それらの構造をモデル化する以外には方法はない。例えば、ギヤ比による影響を詳細に考慮するのであれば、詳細なギヤ選択モデルのようなモデルを構築する必要がある。

しかし、ここではこのような細かい事象の再現は必ずしも必要ではなく、平均的な排出量が再現されれば良い。このような平均を扱う場合、そのバラツキが正規分布のような一般的な誤差分布で表現されるようなものであれば、扱いはさほど問題にはならない。しかし、これらのバラツキにはギヤの選択状況の違いによる排出量の違いといったような、明らかに正規分布で表現できるようなバラツキとは考えられないものが含まれる。この場合、これらのデータを用いてパラメータ推定を行うと、そのデータに含まれる状態量の構成に依存したパラメータが算出される。このパラメータを用いて長い距離の排出量を推計すると（短い距離で推計した排出量を全区間にわたって集計するようなイメージ）、実際の平均的な排出量とは外れた推計量が導出される危険性があり得る。

2) 長い集計単位の場合の問題点

一方、集計単位を長くすることは、その集計区間内での現象を平均化して見ていることになり。当然、上述したような短い集計単位の場合に起こりうるバラツキの多くは、集計化の際に生起確率で重み付け

られ平均化されていることになる（なお、ここでいう“生起確率”はあくまでも測定されたデータの範囲内の話である。従って、排出ガスを測定する際に用いるモードは、ある程度一般的な走行パターンを再現しうるものである必要があろう）。従って、ある集計単位でパラメータを推計することは、その集計単位での排出量が最もよく再現されるようにチューニングするのと同義となると考えられる。

しかしながら、排出量のバラツキも平均化されるとともに、交通状態を表す説明変数である集計量(Z_v , Z_{v3} , Z_{av} , Z_a , T_{rt} , T_r , T_i)も平均化されるため、説明変数の取りうる範囲が限定される。従って、これらのモデルを集計距離よりも短い距離での再現性については保証の範囲外となる。さらに、モデルの説明変数（集計量）間の相関が大きくなっていくため、實際上、各説明変数の効果を十分に反映させてパラメータを推計することが難しい。

具体的に、各説明変数（集計量）の相関関係を実際のデータで見たのが図4-5～8である（いずれも単位距離当たりで正規化した値である）。これはシャシダイナモ試験のモード走行データから得られたものであるが、モードそのものも実際の走行実態を反映させるように設定されているので、実走行におけるバラツキも類似していると見て差し支えないであろう。

一目してわかるとおり、集計距離によって各説明変数間のバラツキが全く異なる。集計距離 100m では、まだ変数間のバラツキが見られるものの、1000m になると、変数間に極めて強い相関が現れることが見て取れる。また、取りうる値の範囲も集計距離によって大きく異なる。特に、加速項の Z_{av} , Z_a は集計距離が大きくなるに従い、平均化されて取りうる値の幅が狭くなっている。また、 Z_v も特徴的なバラツキ方を示す。 Z_v は駆動走行している距離の比率を示すものであるが、集計距離 10m では 0 か 1 を取る割合が多い。これが集計距離 100m になると、比較的まんべんなく 0～1 の間を取るようになるが、1000m になると、0.5 以上の値しか取っていない。

従って、このような説明変数の定義域の違いを考慮すると、集計距離と用いるパラメータには少なからぬ注意を払うべきであるし、ある程度長い集計距離では、各変数の効果を適切に分離したパラメータを設定することは困難になる。

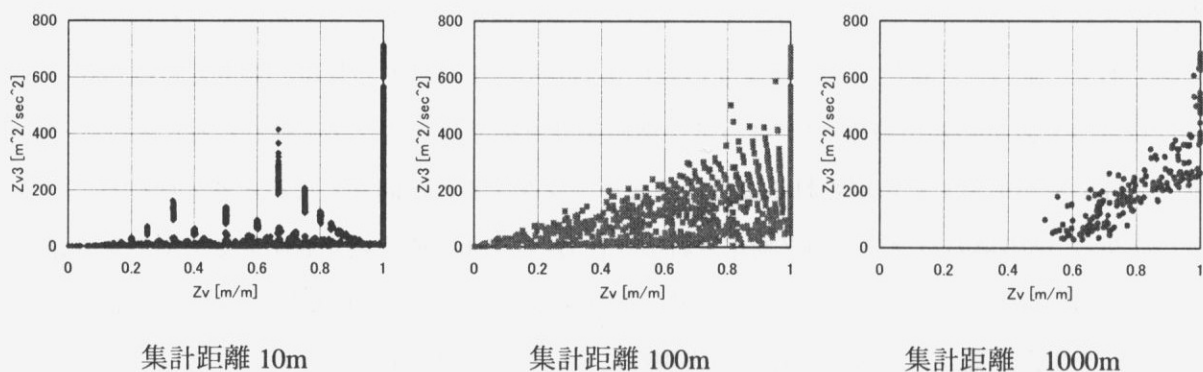


図 4-5 モデルの説明変数間の相関（車両 1, Z_v-Z_{v3} , 単位距離当たり, 集計距離別）

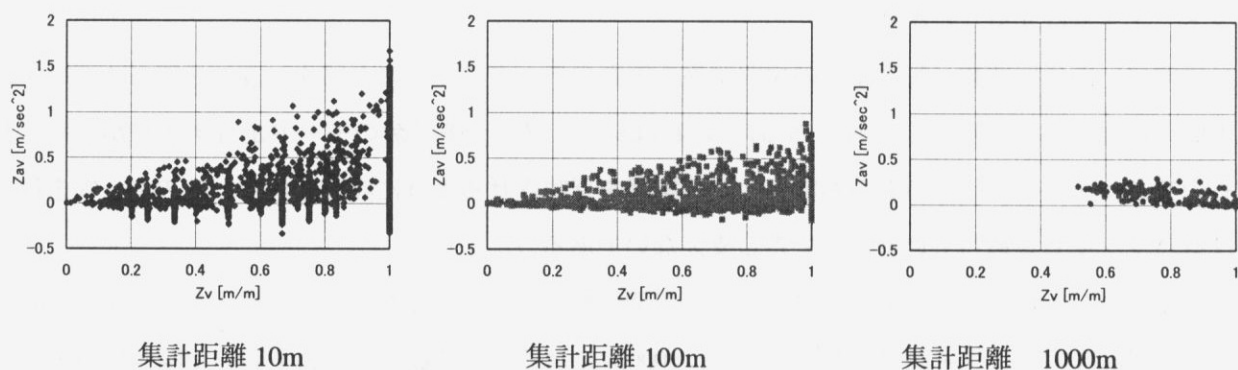


図 4-6 モデルの説明変数間の相関（車両 1, Z_v-Z_{av} , 単位距離当たり, 集計距離別）

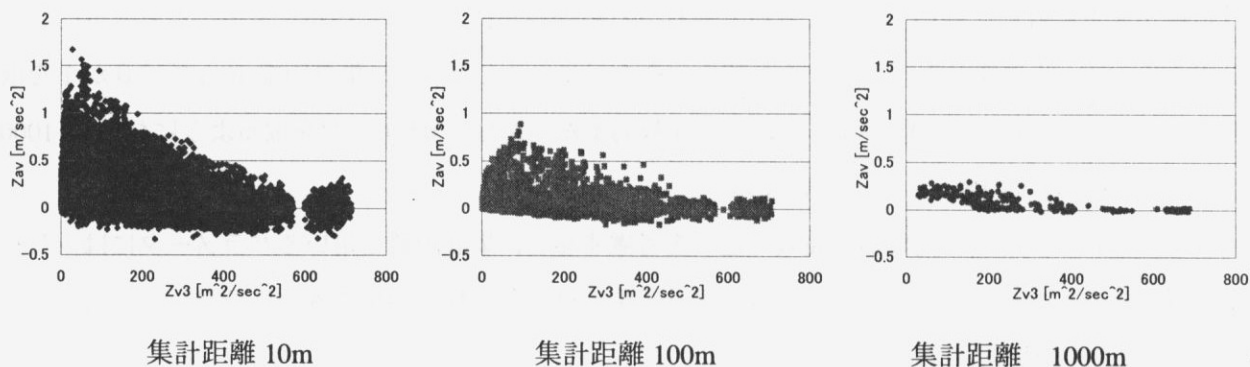


図 4-7 モデルの説明変数間の相関（車両 1, $Z_{v3}-Z_{av}$, 単位距離当たり, 集計距離別）

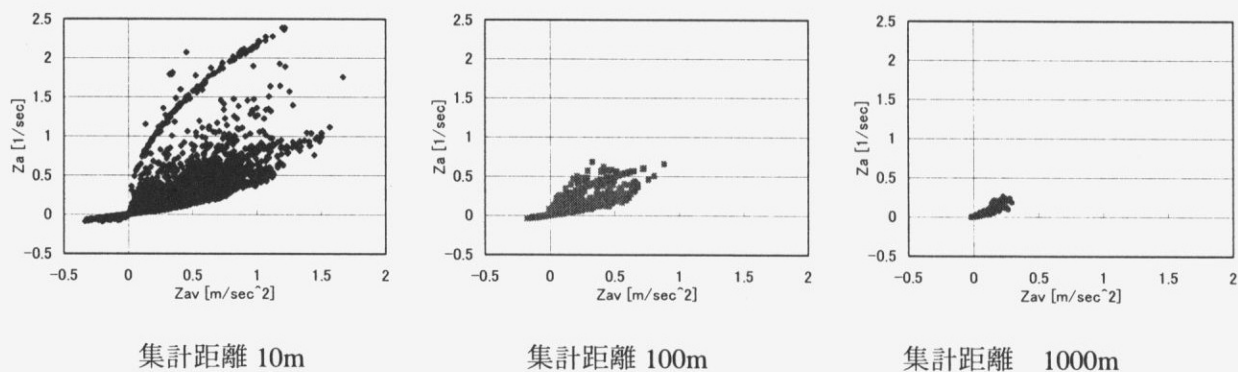


図 4-8 モデルの説明変数間の相関（車両 1, $Z_{av}-Z_{\alpha}$, 単位距離当たり, 集計距離別）

3) 望ましい集計距離は何か？

上述したとおり、モデルのパラメータは、本来集計単位によらず同じ値となるはずであるが、実際にはパラメータを設定する際の集計単位によって異なることが想定される。簡単にまとめると、

- ・ 短い集計単位・・・モデル上考慮していない、構造的に存在するバラツキの影響を受けるため、バイアスの掛かったパラメータとなり、それらを積分した値としての総量の精度は保証されない。
- ・ 長い集計単位・・・モデルの説明変数の定義域が狭くなり、なおかつ変数間に強い相関が現れるため、各要因を適切に区別することができない。

ここで、当然ながらどのようなレベルで精度を確保したいかによって望ましい集計距離は異なってくる。前述したとおり、本モデルはそもそもエンジンからの排出挙動やギヤチェンジ行動などを極めて簡略化して表現したモデルであり、短い距離での精度確保は狙っていない。10～100m といった集計単位で排出量の再現性を確保し、なおかつそれらを積分して得られる総量レベルの精度もある程度確保することを目標とするならば、推計対象とする空間集計単位に合った、例えば 10～100m位のところに、パラメータ推計のための望ましい集計単位があるものと考えられる。

4. 4. 2 実データに基づく最適な集計単位の検討

1) 分析方法

上記で論じた点について、実際の排ガスデータに基づき、最適な集計単位を検討してみよう。具体的に行った内容を以下に示す。

①集計単位別のパラメータ推計

4. 3で取り上げた4台の車両のパラメータ推計用データを用いて、集計単位を様々に変化させて、パラメータ推定を行う。条件は以下の通りである。

- ・ 集計単位：距離を集計単位とした場合として、5m, 10m, 20m, 50m, 100m, 200m, 500m, 1000m, 2000m, 5000m, 及び時間を集計単位とした場合として、1sec, 5sec, 10sec
- ・ 対象データ：土木研究所モードで走行した計測データ
- ・ 対象モデル：提案モデル1
- ・ 対象物質：CO, NO_x, CO₂, 燃焼消費量

②各パラメータを用いた、距離帯別の再現性検討

上記で推計したパラメータを用いて、検証用データより作成した推計対象距離別のモデル説明変数を用いて距離帯別の排出量を推計し、実測値との比較により精度の検証を行った。条件は以下の通り。

- ・ 推計対象距離：10m 毎, 100m 毎, 1000m 毎の各3ケース
- ・ 対象データ：旧建設省モード, JARI モードで走行した計測データ
- ・ 対象物質：CO, NO_x, CO₂, 燃焼消費量

2) 分析結果

まず、パラメータ推計に用いた集計単位と推計されたパラメータの関係について、車両3における一例を図4-9に示す。

一つ目の特徴としては、時間単位と距離単位で集計した場合、パラメータの値が大きく異なることが挙げられる。これは、時間単位と距離単位では集計の際のデータ平均化の基準が異なるためである。例えば、1秒単位で集計するような場合、高速域では20～30m区間での集計・平均化と等しいが、低速域では、1秒で進行できる距離は非常に短い。また、10秒単位の集計化を考えると、低速域では10～100m程度までの距離での平均化に等しいが、高速域では数100mで平均していることになる。この段階では必ずしもどちらが望ましいということはなく、どのような集計レベルでの排出量の精度を担保するかに依存すると思われる。しかし、距離帯別の排出量を推計することを考えるならば、距離帯別に推計する方が適切な集計化であると考えられよう。

二つ目の特徴としては、距離単位の集計単位を設定した場合、概ね10～100, 200m位までは距離帯に

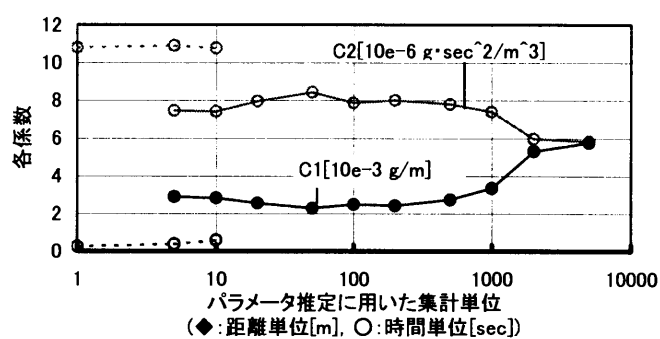
関わらずパラメータの値は安定しているが、それよりも長くなると急激にパラメータの値が不安定に変化するようになることである。これは、前節で説明したとおり各説明変数間の相関が大きくなっていることによるものと考えられる。

上記はパラメータ値そのものに関する議論であったが、実際に距離帯別排出量の推計精度はどのようなであろうか。これを今回パラメータ推定した4台の車両について、パラメータ推計に用いていないデータを用いた検証の結果を示したのが図4-10である。車両1及び4では、パラメータを推定した集計距離と推計対象区間長がほとんど一致していることがわかる。これは「精度を担保すべき推計対象区間長とパラメータ推定に用いる集計区間長はあわせるべきである」ということ示している。一方、車両3では集計距離5又は10mでパラメータを推計した場合が最も精度が良く、車両2では集計距離50mでパラメータを推計した場合にもっとも精度が良いという結果である。

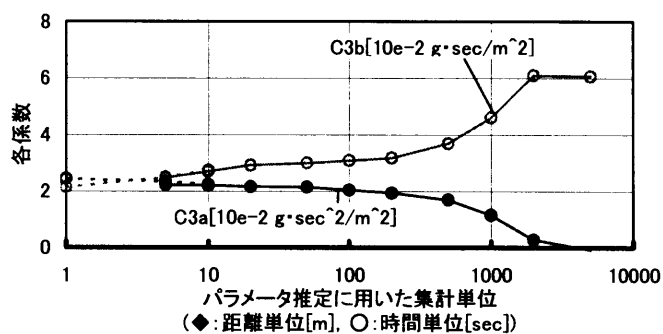
このように、高い精度を与える集計距離は車両によって異なっている。しかし、パラメータ推定に用いた集計単位が小さい(5~10m)、あるいは大きい(数100m以上)場合、精度が顕著に悪化する場合も見受けられる。一方では、50~100mといった集計単位の場合にはあまり大きく精度が悪化していない。長い距離での排出量推計精度を担保しつつ、短い距離区間での精度もそれなりに保つことを考えた場合、全体のバランスを考えると20~100m程度の集計単位がパラメータを推計する際の一つの目安となるものと考えられる。

なお、第6章で初速度・終速度と加速時間の関係を分析しているが、この結果を用いると、停止状態から10m/s(=36km/h)まで加速した場合の加速時間は約10secとなり、この場合の加速距離は約50mとなる。同様に、20mの加速距離に対応するのは停止状態から25km/hまでの加速、100mの加速距離は停止状態から約50km/hまでの加速に相当する。このことから、20~100mという集計距離は、エンジン挙動やギヤ操作などバラツキ要因の大きな低速域における加速挙動を、ある程度平均化して捉えられる距離であり、このことが20~100mという集計距離で精度が高い要因であると解釈することもできよう。

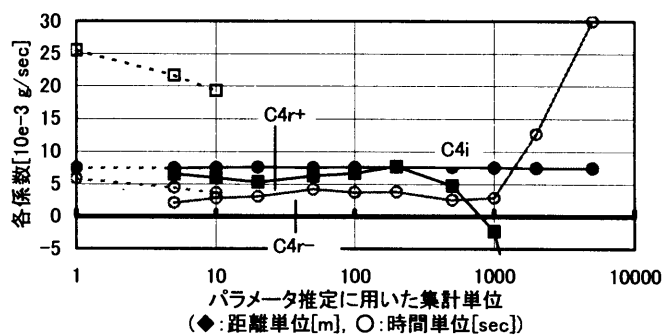
また、時間単位で集計した場合の結果についても見ると、距離単位で集計した場合と同等の精度を保っている場合がある(車両2, 4)一方、一部のデータでは明らかに精度が悪化している場合も見受けられる(車両1, 3)。先に述べたとおり、集計による平均化の基準が距離単位と時間単位では大幅に異なることから、距離単位で集計した方がより適切な結果が得られる場合の方が多いと思われる。



1) c_1, c_2



2) c_{3a}, c_{3b}



3) c_{4r+}, c_{4r-}, c_{4i}

図4-9 集計単位とパラメータの変化 (NO_x, 車両3)

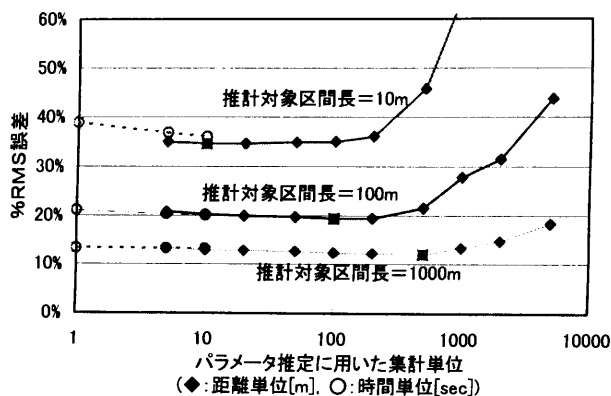
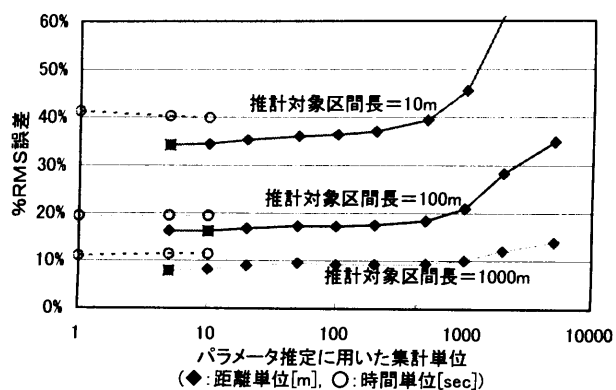
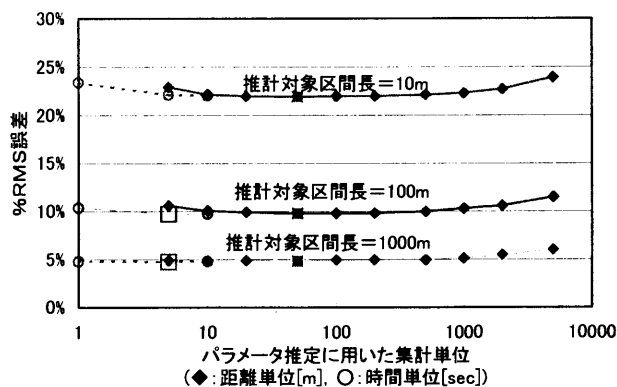
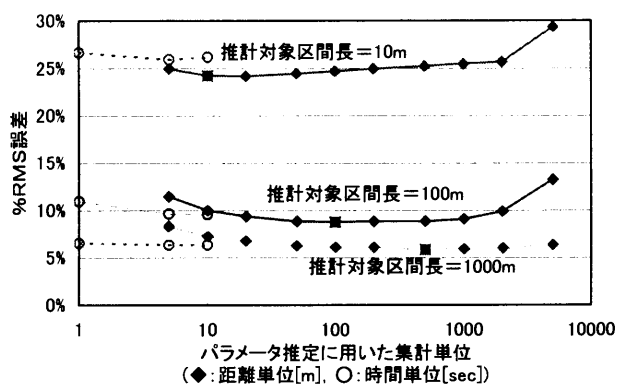


図 4 - 1 0 対象とする集計単位と推計誤差 (%RMS 誤差) の関係 (推計対象区間別, NOx)

注) ■ : 距離単位別集計でもっとも %RMS 誤差が小さくなる場合 (推計対象区間長別)
□ : 時間単位別集計でもっとも %RMS 誤差が小さくなる場合
(推計対象区間長別, 時間単位別集計が距離単位別集計より %RMS が小さい場合のみ)

4. 5 他のモデルアプローチとの比較

本節では、他の排出量推計アプローチに対する本手法の有効性、及び本手法の限界を明らかにするため、他のモデルアプローチとの比較検討を行う。既存研究のレビューでも示したとおり、排出量推計モデルとしては様々な式形のものが提案され、適用されている。しかし、ここで細かい式形の差を踏まえた比較はあまり重要ではないと考えられる。従ってここでは、交通モデルからのアウトプットと排出量推計モデルの組み合わせを代表させたいいくつかのケースを設定して比較を行う。

4. 5. 1 設定ケース

以下のような比較ケースを対象とする。

①提案手法

加減速の影響を考慮した集計量（説明変数： Z_v , Z_{v3} , Z_{av} , Z_a , T_{r+} , T_{r-} , T_i ）を用いて排出量を推計するモデルアプローチ（速度変動要素モデル）を代表している。

ここでは、速度プロファイルから推計対象区間における集計量の説明変数を算出して、排出量を推計する。なお、パラメータを推計するための集計距離は 100m とした。

②速度・加速度式

瞬間の速度・加速度を用いて、速度・加速度を説明変数として含むモデルに代入して瞬間の排出量を推計し、それらを推計対象区間に渡って積算する速度・加速度別モデルを用いたアプローチである。ここでは、提案手法と同じ式形を用い、1 秒単位に集計してパラメータ推計したモデルを用いた。

具体的には、0.2 秒毎に得られた瞬間の速度・加速度から瞬間の排出量を推計した。

③平均速度式 1（推計対象区間における平均旅行速度を用いたもの）

平均速度式を用いる手法の一つとして、推計対象区間全体の平均旅行速度をパラメータとして用いる方法である。ここでは式(4-21)で表される式形を適用した。この式形は、速度が 0 に近づくにつれて排出量が大きくなる状況を表すことから、多く用いられているものである¹²⁾。

$$EF_x = a_1 + a_2 / v + a_3 v + a_4 v^2 + a_5 v^3, \quad (4-21)$$

ここに、 EF_x ：排出係数（単位距離走行あたりの排出量）[g/m],

v ：平均旅行速度[m/sec],

$a_1 - a_5$ ：パラメータ。

シャシダイナモ台上試験のデータを 1000m 毎に区分し、それらのデータセットから最小自乗法によって上記式のパラメータを推計した。設定した各車両のモデルパラメータは Appendix 6 に掲載している。

ここでは、一例として車両3について、実際のデータと設定した速度式の関係を集計距離別に示したものを図4-11に示す。この図において、平均速度式は全て同じもの（1000mの集計データから算出）であるが、データのバラツキは対象とする速度によって大きく異なり、集計距離が短いと同じ旅行速度でもかなりバラツキが大きいことが窺える。

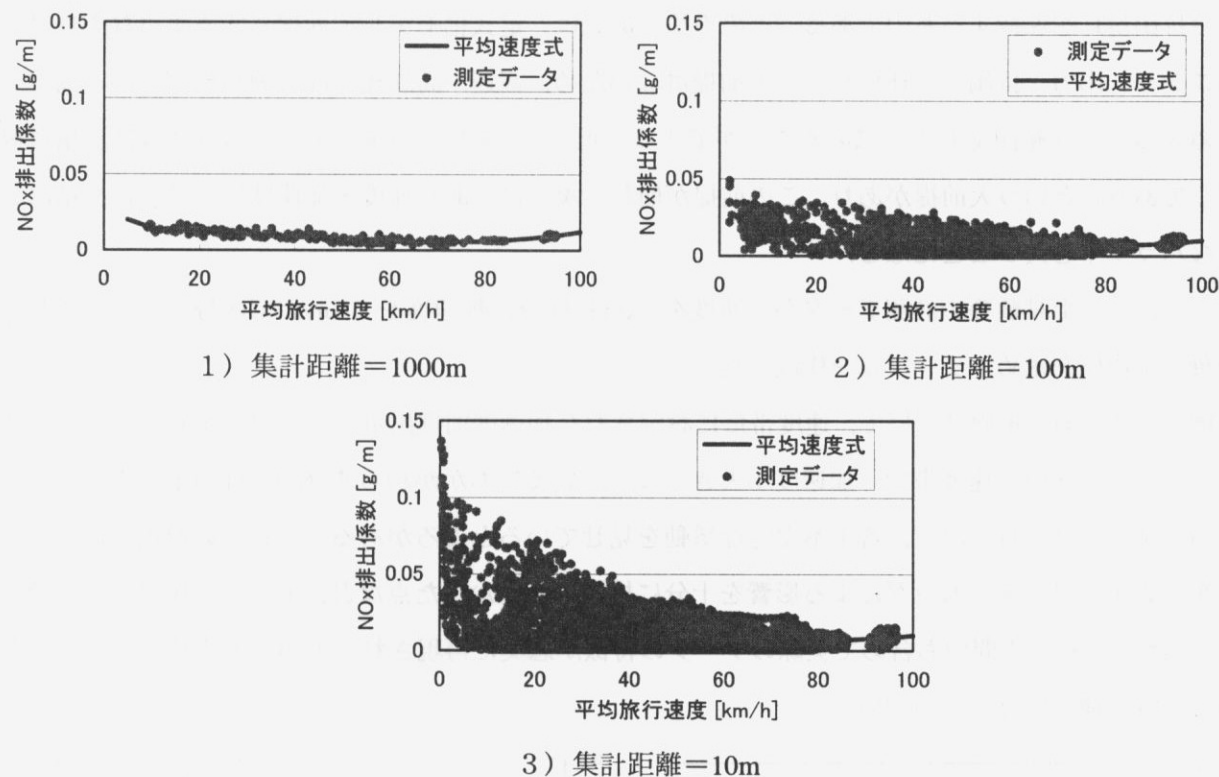


図4-11 平均速度別排出量（NOx，車両3，推計対象集計距離別）

④平均速度式2（平均速度式を瞬間の走行速度に適用したもの）

平均速度式を用いるもう一つのアプローチとして、時々刻々得られる速度プロファイルに平均速度式を適用する方法がある。これは一般的に設定される平均速度式の設定方法（長トリップモード単位の平均速度と排出ガス量からパラメータを推定）を考えると明らかな範囲外使用である。しかし、実際には、速度・加速度を考慮できる排出量推計モデルの未整備により、ミクロシミュレーションから得られる速度プロファイルに平均速度モデルを当てはめた例もよく見かける¹³⁾。

上記の適用を考えると、③の式形では停止時(v=0)が定義できない。従って、以下のように処理をすることで単位時間当たりの排出係数として変換する。

$$EF_t = a_1v + a_2 + a_3v^2 + a_4v^3 + a_5v^4, \tag{4-22}$$

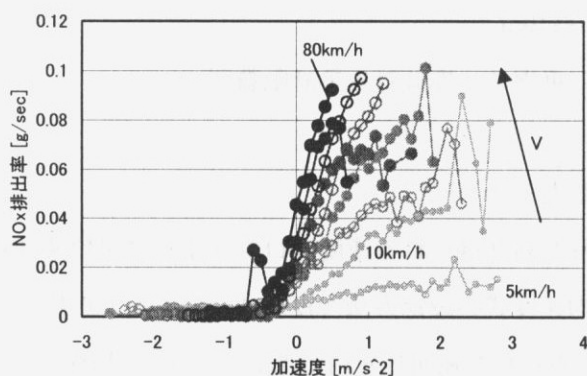
ここに、
 EF_x ：排出係数（単位距離走行あたりの排出量）[g/sec],
 v ：平均旅行速度[m/sec],
 $a_1 - a_5$ ：パラメータ。

⑤速度・加速度別排出率テーブル

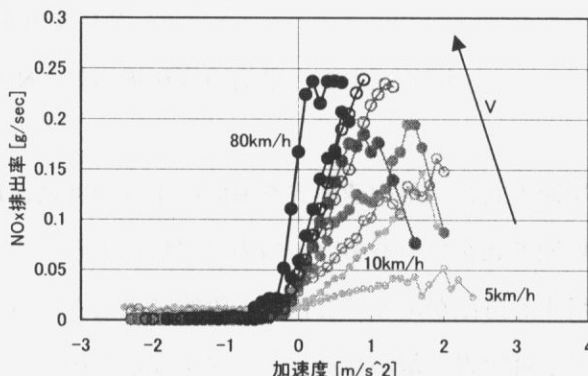
基本的には②のアプローチと同じく、瞬間の速度・加速度を用いて、速度・加速度を説明変数として含むモデルに代入して瞬間の排出量を推計し、それらを推計対象区間に渡って積算するものであるが、②との違いは、モデル式として与えるのではなく、速度・加速度別のテーブルとして排出率（単位時間当たり排出量）を保持するものである。この方法であれば、定式化モデルで前提とするような条件（例えばエンジン出力と排出量が比例など）の前提はないため、高速・高加速度などの高負荷時など前提条件を越えるような範囲でも当てはめることができる。但し、「速度、加速度が同じ場合には排出量は概ね同じである」という大前提があり、この前提が崩れる場合は、ある速度・加速度における排出量はおおきなバラツキを持つことになる。

ここでは、台上試験等の計測データから速度を 5km/h 区分、加速度を 0.1m/s^2 で区分し、それぞれの区分毎に平均値を求め、テーブルを作成した。

一例として、ある車両について、速度帯毎に設定された加速度別排出量をグラフに示したものが図 4-12 である。途中の速度帯で、加速度が大きくなっているにもかかわらず NO_x 排出率が大きく低下している部分が見られるなど、若干不安定な挙動を見せているところがある。これらの原因には、テーブルを作成する際にタイムラグによる影響を十分に排除できなかった点など、テーブル作成上の問題も含まれるが、それらの問題も含めて実際のデータの特徴が忠実に再現されるのがこの方法の特徴でもあるので、特段補正は行っていない。



左図：車両 1



右図：車両 4

図 4-12 速度帯・加速度別排出量 (NO_x , 5km/h 及び 10~80km/h については 10km/h 毎)

なお、使用データ及び対象データは 4.3 のパラメータ推計及びモデル間比較と同様である。すなわち、走行条件としては勾配 = 0%, 半積載状態を対象としている。また、各モデルのパラメータ推計は土木研究所モードによるデータのみを用い、検証はパラメータ推計に用いない JARI モード、旧建設省モードによるデータを用いている。また、評価指標として、相関係数 R , RMS 誤差, %RMS 誤差を算出した。なお、予測対象距離による誤差を見るため、5, 10, 50, 100, 500, 1000, 5000m の予測対象距離を設定して、その区間毎にデータを区切って排出量推計を行った。

4. 5. 2 結果及び考察

上記の分析結果を、Appendix 7 に示す。全般的な傾向を踏まえて考察を以下に述べる。

まず、明らかに平均速度式を用いた手法（平均速度式①、②）とそれ以外の方法では精度に大きな差が見られる。特に、短い予測対象区間に対しては平均速度式を用いた手法の誤差が極めて大きく、短い区間で交通状況のバラツキが大きい状況下では、平均速度式を用いて排出量を正当に評価することは不可能であることを示している。ただし、予測対象区間が 5000m 程度まで長くなると、今回の他のモデルと同等程度の精度が確保されるが、それでも加減速を考慮した他のモデルよりも誤差が大きい。ただ、平均速度式を用いた手法の大きな特徴は推計対象とするトリップ全体の平均旅行速度のみから排出量を推計できる簡便性にある。「広域にわたる対象範囲全体」における「総排出量」を「マクロ」に推計するような用途の場合には、簡便かつある程度の精度で排出量を推計することができるため、有効な手法であることには変わりない。なお、詳細な時間単位での速度プロファイルに平均速度式を当てはめる手法（平均速度式②）でも、基本的な特性は対象区間全体の平均旅行速度を用いる場合と変わらない。すなわち、これらの手法により短い区間の排出強度を分析することはほとんど意味をなさない。

なお、ここで示した結果はある 1 台の車両の走行軌跡に対する議論である。環境影響評価による予測手法としてよく用いられるような、ある地点（又は区間）における集計的な平均旅行速度（例えば日単位、1 時間単位など）を用いた場合、平均速度式で十分な精度を確保できるかどうかは、この結果のみからははっきりとは言えない。これは、1 台の車両のトリップ単位で集計された平均旅行速度を用いて作成された平均速度式が、様々な車両のある時間単位で集計された平均旅行速度を用いて適用できるか、という問題である。モデルの前提を考えると明らかに異なるが、両者の平均速度が同じ場合に同じような走行特性で構成されることが示された場合には、「平均的な排出強度」を推計する簡略的な手法として用いることは可能となるであろう。このような分析・検討を行う際に、本研究における提案モデルで抽出された排出量の説明指標の集計量(Z_v , Z_a など)を比較することが有効な手法となるものと考えられる。

一方、加減速度を考慮したモデルアプローチ間では、概ね同じような精度が得られている。ただ、全般的な傾向として、推計対象距離が 5~10m 程度と短い場合には速度・加速度別排出量テーブルを用いた手法の精度が若干高く、100m 前後の推計対象距離の場合には、提案手法の精度が高くなっている。生データをそのまま平均化処理して生成し、本来であればより正確な排出量の再現が期待できる速度・加速度別排出量テーブルよりも精度の高い結果が得られていることは興味深い点である。但し、推計対象距離が短い場合にはこれまでも繰り返し述べてきたとおり現象面及び計測面でのバラツキが大きい。そのため、推計精度そのものがそれほど高くない（%RMSE で 30~50%）。10%程度の誤差で推計できる 100m 程度の推計対象距離でより高い推計精度が確保できるということは、車両挙動、運転挙動、排出挙動の詳細なモデリングによりそれらの排出特性を精緻に再現することが目的なのでなければ、その意

味は高いものと考えられる。

なお、燃料消費量の結果では、特に本提案手法の推計結果が良い結果となっている。これは、測定上の問題によりタイムラグの影響が大きく、1秒単位の推計結果ではそのバラツキに対応できないことによるものであると考えられる。このような問題に対しても、100m程度の距離で平均化することによりその影響を吸収できる。ただし、COの結果を見ると、いずれの例でも本提案手法の結果は速度・加速度別排出量テーブルを用いる方法に比べて必ずしも良い結果を得ているとはいえない。これは、エンジン出力に排出量が比例するとした前提に必ずしも当てはまらないためであり、排出量の正確な把握という観点からは、排出モデルに前提を置かず、走行状態（速度、加速度）に応じた排出率を設定できるテーブル形式の方が良い場合もある。このような場合は本モデルの限界であるとも言える。

4. 6 第4章のまとめ

第4章では、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するとともに、実データに基づきパラメータの推定を行い、様々な精度検証、比較を行った。ここで提案したモデルは、10～100mの推計対象距離で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狙いとした。まず、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。これまでも類似のモデル構築が、特に燃料消費量を中心として行われてきているが、ギヤ比の影響をモデル定式上取り込み、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、モデル構築上の新たな点である。

また、シャシダイナモ台上試験のデータを用いて、パラメータの推定及びモデルパフォーマンスの検証を行った。モデルの比較分析により、ギヤ比の影響を取り込んだことによる低速域での精度向上、時間項を駆動走行、非駆動走行、アイドリング時間に分割することによる精度の向上を確認した。また、排出要因別を距離項、速度変動項、走行時間項、停止時間項に分けた場合、高排出量領域では停止時間を除くと、速度変動項、走行時間項の順、停止も含めた場合には、停止時間項がもっとも寄与が大きいこと、高負荷時には距離項の排出量への寄与はあまり大きくないことなどが示された。

また、モデルパラメータの推定は適切な集計距離により集計されたデータを用いるべきであり、長トリップでの排出量整合性を確保しつつ、短い区間での排出量の精度を上げるためには、その中間的な集計単位での集計が望ましいことが示された。適切な集計単位は、車両及び推計対象によって異なるが、20～100程度の集計距離をパラメータ推定する際の目安として提示された。

本提案手法では、比較対象モデルの説明でも示したとおり、提案手法のアプローチでは排出量推計指標 Z_v 、 Z_{v3} ・・・が得られていることが前提であって、速度プロファイルが得られていることは必ずしも前提としていないところが大きなメリットである。ある程度正確な速度プロファイルが得られている状況では、いずれの手法でもある程度の精度で排出量の推定が可能である。しかし、シミュレーションモデルのアウトプットとしての速度プロファイルの精度が十分確保されない、あるいはその精度の検証が十分になされていないような状況下では、得られた時々刻々の速度プロファイルに排出量推計モデルを適用した結果として推計された排出量の精度も必ずしも保証されない。このような場合でも、ある集計単位で精度が保証された本提案手法のようなモデルであれば、シミュレーションモデルのアウトプットとモデルの説明指標である排出量推計指標を、例えば実験車や現地観測による車両軌跡データの収集によって関連づけることによって、より適切な排出量の推計が行えるものと考えられる。ここで示したシミュレーションのアウトプットと排出量推計モデルの説明指標を結びつける方法については、第6章で述べる。

また、本提案手法のように車両の物理的挙動をモデル化したものであれば、排出量を要因別に分けて

分析することができ、モデルに基づく定性的・定量的な排出特性の分析も可能となる点が大きなメリットとなる。これは速度・加速度別の排出率テーブルを用いるような手法では困難である。これらの分析については、次章にて述べることとする。

第4章の参考文献

- 1) 赤井泉明, 平井洋, 細井賢三: 重量ディーゼル車の燃費推定法の検討 ―走行抵抗推定値とエンジン燃費マップによる車両燃費の推定―, 自動車研究, Vol. 20, No. 11, pp. 11-14, 1998
- 2) K. Post, J.H. Kent, J.Tomlin and N. Carruthers : Fuel Consumption and Emission Modeling by Power Demand and a Comparison with Other Models, Transportation Research, Vol. 18A, No.3, pp.191-213, 1984
- 3) R. Akcelik : Formulae for predicting fuel consumption of cars, Traffic Engineering + Control, 1983.3, pp.115-118, 1983
- 4) 大口敬, 片倉正彦, 谷口正明: 都市部道路交通における自動車の二酸化炭素排出量推定モデル, 土木学会論文集, No.695/IV-54, pp.125-136,2002.1
- 5) 谷口正明, 大口敬, 岡本智: 実用燃費の要因構造に関する研究, 自動車技術会論文集, Vol.28, No.1, pp.59-64, 1997
- 6) H.C. Watson, E.E. Milkins and G.A. Marshall : Controlling Traffic Flow for minimum Energy consumption and Emissions, Institute of Engineers, Australia Transport Conference, Adelaide, , pp.116-124, 1979
- 7) H.C. Watson, E.E. Milkins and G.A. Marshall : A simplified method for quantifying fuel consumption of vehicles in urban traffic, 4th Automotive Engineering Conference, 'Energy, Engineering and Environment and Economics', Melbourne, 1979
- 8) 平井洋, 柳漢呉, 土井努, 細井賢三: 排出係数測定用の実走行モードの作成方法について, 自動車研究, Vol.18,No.12, pp.5-8, 1996
- 9) 小根山裕之, 大西博文, 山田俊哉, 平井洋: 自動車の走行特性を反映した排出係数の設定に用いる実走行モードについて, 土木計画学研究・講演集, No.22(2), pp.571-574, 1999
- 10) 足立義雄, 藤城泰行: 一般国道における自動車の走行特性, 土木技術資料, Vol.22, No.3, 1980
- 11) Hiroyuki Oneyama, Takashi Oguchi and 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
- 12) 環境庁大気保全局大気規制課編: 窒素酸化物総量規制マニュアル[改訂版], 公害研究対策センター, 1993. 8.
- 13) 屋井鉄雄, 光畑太, 平田輝満, 白濱好文: 交通に起因する大気環境のミクロ評価システム, 土木学会論文集, No.709/IV-56, pp.81-94, 2002.7