

## 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

### 6.1 はじめに

本章では、第3章で提案した排出量推計アプローチの中で中心をなす排出量推計指標への変換モデルの導出を行う。第3章で述べたとおり、この推計モデルはシミュレーション等の交通モデルのアウトプットと排出量推計モデルのインプットを結びつけるものであるから、必ずしも、ある限定された形式のモデルとなるものではなく、対応させようとする交通モデルと排出量推計モデルに応じて、それぞれのインプット・アウトプットを結びつけるように構築されるものである。従って、具体的に排出量推計指標への変換モデルを構築するに当たって、対象とする交通モデル、排出量推計モデルを定義する必要がある。ここでは、対象とする交通モデル及び排出量推計モデルを以下の通り設定する。

- ・ 交通モデル (= 変換モデルのインプット)

- 車両の走行軌跡が、time-space 上において定速走行に近似された車両軌跡として得られるモデル。

上に示した車両軌跡の具体的な定義は後に改めて示すが、time-space 上において直線のみで構成されることから、「直線近似された軌跡」と呼ぶこととする。

なお、必ずしも上記のような車両の走行軌跡がモデルのアウトプットとして直接的に得られている必要はない。例えば、シミュレーションモデルのアウトプットとして車両軌跡は得られていないが、ショックウエーブの伝搬などを考慮することにより間接的に車両軌跡が得られるような場合も該当する。また、ミクロ/メソ/マクロといったモデルの詳細度は問わない。

- ・ 排出モデル (= 変換モデルのアウトプット)

- 4章で構築した、推計対象区間における車両挙動の集計量（走行時： $Z_v$ ,  $Z_{v3}$ ,  $Z_{av}$ ,  $Z_a$ ,  $T_{r+}$ ,  $T_{r-}$ , 停止時： $T_i$ ）をインプットとする集計型の排出量推計モデル。具体的には以下の式形で表される（第4章の式(4-9)）。

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

上記の前提条件を踏まえると、ここで構築すべき排出量推計指標への変換モデルは、以下の通り定義づけられる。

- ・ 「直線近似された車両軌跡」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」（集計量  $Z_v$ ,  $Z_{v3}$ ,  $Z_{av}$ ,  $Z_a$ ,  $T_{r+}$ ,  $T_{r-}$  及び  $T_i$ ）の空間分布を、必要とされる空間集計距離でアウトプットするモデル。

なお、モデルのイメージを図6-1に示す。詳細の議論は次節以降に示されるが、本章で提案される手法をまとめて流れを示すと以下の通りとなる。

1. 直線近似された車両軌跡から加速範囲、減速範囲を設定し、続いて加速範囲、減速範囲を除いた範囲を定常走行範囲（速度 $>0$ の場合）、停止範囲（速度 $=0$ の場合）として設定する。なお、加速範囲、減速範囲は直線近似された車両の軌跡の巡航速度が変化する地点において、その前後の速度から設定される（初速度 $<$ 終速度の場合：加速範囲、初速度 $>$ 終速度の場合：減速範囲）。
2. 各範囲毎に、その区間における排出量推計指標値をモデルにより算出する。このモデルは、基本的には初速度、終速度（加速範囲、減速範囲）、巡航速度（定常走行範囲）に基づき設定される。
3. 加速範囲、減速範囲については、別途設定された排出量推計指標の空間分布（この分布も初速度、終速度に基づき設定される）を用いて配分され、排出量推計指標の空間分布が算出される。

この方法により、対象とするすべての排出量推計指標について空間分布を算出し、排出量推計モデルに代入することにより、排出量の空間分布が算出される。

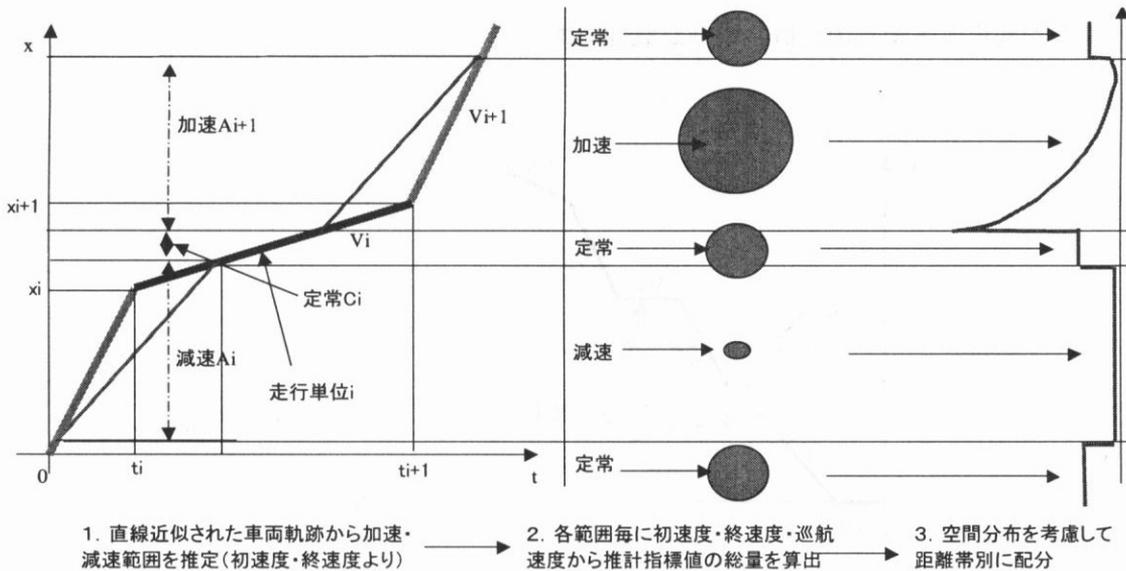


図6-1 排出量推計指標変換モデルのイメージ

## 6. 2 モデルの定式化

### 6. 2. 1 直線近似された車両軌跡の定義

前節で示した「直線近似された車両軌跡」を、排出量推計モデルのインプットである排出量推計指標に変換するモデルを構築するためには、直線近似された車両軌跡がどのようなものか、また直線近似された車両軌跡と実際の車両軌跡がどのような関係にあるのか、明確に定義する必要がある。ここでは、実際の車両軌跡を time-space 上で直線近似された車両軌跡に変換する方法を定義づけることにより、逆に直線近似された車両軌跡を定義づけることとする。

まず、シミュレーション等の交通モデルからのアウトプット（あるいは本モデルのインプット）として、図6-2のような車両軌跡が得られていることを仮定しよう。すなわち、

- ◇ time-space 上の2点間をある一定の速度（巡航速度）で走行（あるいは停止）する。
- ◇ 速度が変化する地点での加減速度は考慮しない（加減速度無限大）
- ◇ 速度が変化する地点の位置・時刻が既知である。

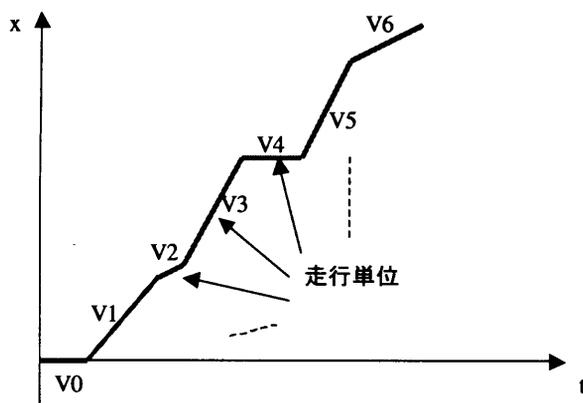


図6-2 シミュレーション等で再現される車両軌跡（イメージ）

この車両軌跡を『(time-space 上で) 直線近似された走行軌跡』といい、この time-space 上の走行軌跡の各リンク（等速で走行、あるいは停止している区間）を『走行単位』と定義する。

以下、速度プロファイル上での車両軌跡（図6-3）を用いて、実際の車両軌跡と上記の基準で再現された車両軌跡の関係を定義づける。図中、黒実線で示された軌跡が実際の軌跡であるとしよう。時刻  $t=0$  において速度  $V_1$  から加速状態に入り、ある程度の速度（図中の  $V_2$  前後）に達してからは小刻みな速度変動を繰り返す、最終的には減速状態に入った後、速度  $V_3$ （この図の例では  $V_3=0$ ）に達する。実際の車両軌跡では、定速状態といってもある程度一定の速度で走行しているわけではなく、加速一定速ー減速の区分が必ずしも明確になされるわけではない。

そこで、走行単位毎の実際の速度プロファイルに対して、速度変動が小さく概ね平均的な速度が仮定できる部分では一定の速度、加速及び減速の部分では加減速度一定となる速度プロファイル（time-velocity 図上では台形型の速度プロファイルとなる）を当てはめることにより、加速一定速減速の区間を明確に区分するとともに、定常走行時の巡航速度を定義する。具体的には、実際の速度プロファイルと台形型の速度プロファイルの自乗誤差が最小となるように台形型速度プロファイルを設定する。このようにして定義された台形型速度プロファイルを図6-3上に示したのが、赤の実線である。（注：図6-3の例のように、減速から即加速に移行するような場合には定常走行部分が存在しない場合もある。）なお、ここで与えられる一定の加減速度は加速・減速部分の平均加速度・減速度を表すものである。

さらに、上記のようにして得られる台形型速度プロファイルに対して、定常走行部分の速度プロファイル及び走行軌跡が位置、時間とも一致するように、加減速部分を省いた矩形型の速度プロファイルを一意に描くことができる。図6-4で見ると、灰色で示されるような矩形の速度プロファイルとなる。このようにして描かれた矩形型の速度プロファイルが直線近似された走行軌跡である。

上記の説明では、実際の走行軌跡から台形型速度プロファイル（加速一定速減速区間を明確に区分した走行軌跡）及び矩形型速度プロファイル（定常走行部分のみから形成される線形近似軌跡）を生成する手順として関係を示した。しかし、逆に言うと、「time-space 上で直線近似された車両軌跡を再現している」状況では、実際の走行軌跡との間に上記で説明したような関係が満たされているものと考えられよう。

ここで、time-space 上で直線近似された車両軌跡と、台形型の速度プロファイルを持つ車両軌跡を同じ time-space 上に示したのが、図6-4である。このように、直線近似された車両軌跡に台形型の速度プロファイルを当てはめることによって、加速・減速・定速の区間が決定できる。

さて、以上を踏まえ、「time-space 上で直線近似された車両軌跡」の側から実際の車両軌跡との関係を整理すると以下ようになる。

- ・ time-space 上で直線近似された車両軌跡が得られている場合、速度が変化する地点に加速度・減速度一定の走行軌跡（time-velocity 図上で台形型の速度プロファイル）を当てはめることによって、加速一定速減速区間に区分される。
- ・ 『実際の車両軌跡が再現されている状態』では、上記の台形型の速度プロファイルは、走行軌跡が実際の走行軌跡に対して最小自乗誤差となる。

上記の定義に基づいた場合、time-space 上で直線近似された車両軌跡と、台形型の車両軌跡の関係は以下の通り定式化される。各走行単位の始点・終点は（距離，時間）のセットで表すことができる。走行単位  $i$  の始点、終点をそれぞれ  $(x_i, t_i)$ 、 $(x_{i+1}, t_{i+1})$  とおく。また、走行単位  $i$  の距離、時間、速度をそれ

それぞれ  $X_i$ ,  $T_i$ ,  $V_i$  と置く。言うまでもなく、以下の関係がある。

$$X_i = x_{i+1} - x_i \quad (6-1)$$

$$T_i = t_{i+1} - t_i \quad (6-2)$$

$$V_i = \frac{X_i}{T_i} = \frac{x_{i+1} - x_i}{t_{i+1} - t_i} \quad (6-3)$$

次に、台形型の速度プロファイルを考える。走行単位  $i-1$  (速度  $V_{i-1}$ ) から走行単位  $i$  (速度  $V_i$ ) へ遷移する際の加速 (あるいは減速) 区間を  $A_i$  とし、それぞれ加速区間の始点、終点を  $(x_{A_i}^s, t_{A_i}^s)$ ,  $(x_{A_i}^e, t_{A_i}^e)$  とする。また、その際の加速 (減速) 距離及び時間をそれぞれ  $X_{A_i}$ ,  $T_{A_i}$  とする。

まず、 $T_{A_i}$  は以下の通り表される。

$$T_{A_i} = t_{A_i}^e - t_{A_i}^s \quad (6-4)$$

また、加速区間の始点、終点は線形近似された走行軌跡上にあるので、

$$x_{A_i}^s = x_i - V_{i-1}(t_i - t_{A_i}^s) \quad (6-5)$$

$$x_{A_i}^e = x_i + V_i(t_{A_i}^e - t_i) \quad (6-6)$$

さらに、加速区間内での進行距離の関係から、

$$\begin{aligned} x_{A_i}^e - x_{A_i}^s &= (V_{i-1} + V_i) \cdot (t_{A_i}^e - t_{A_i}^s) / 2 \\ &= (V_{i-1} + V_i) T_{A_i} / 2 \end{aligned} \quad (6-7)$$

これらの関係より、以下の関係が導かれる。

$$x_{A_i}^s = x_i - V_{i-1} T_{A_i} / 2 \quad (6-8)$$

$$x_{A_i}^e = x_i + V_i T_{A_i} / 2 \quad (6-9)$$

$$t_{A_i}^s = t_i - T_{A_i} / 2 \quad (6-10)$$

$$t_{A_i}^e = t_i + T_{A_i} / 2 \quad (6-11)$$

従って、加速 (減速) 区間  $A_i$  の時間、空間区間は以下の通りとなる。

$$\text{時間区間: } [t_i - T_{A_i} / 2, t_i + T_{A_i} / 2] \quad (6-12)$$

$$\text{空間区間: } [x_i - V_{i-1} T_{A_i} / 2, x_i + V_i T_{A_i} / 2] \quad (6-13)$$

また、 $X_{A_i}$  は以下の通りとなる。

$$X_{A_i} = V_{i-1} T_{A_i} / 2 + V_i T_{A_i} / 2 \quad (6-14)$$

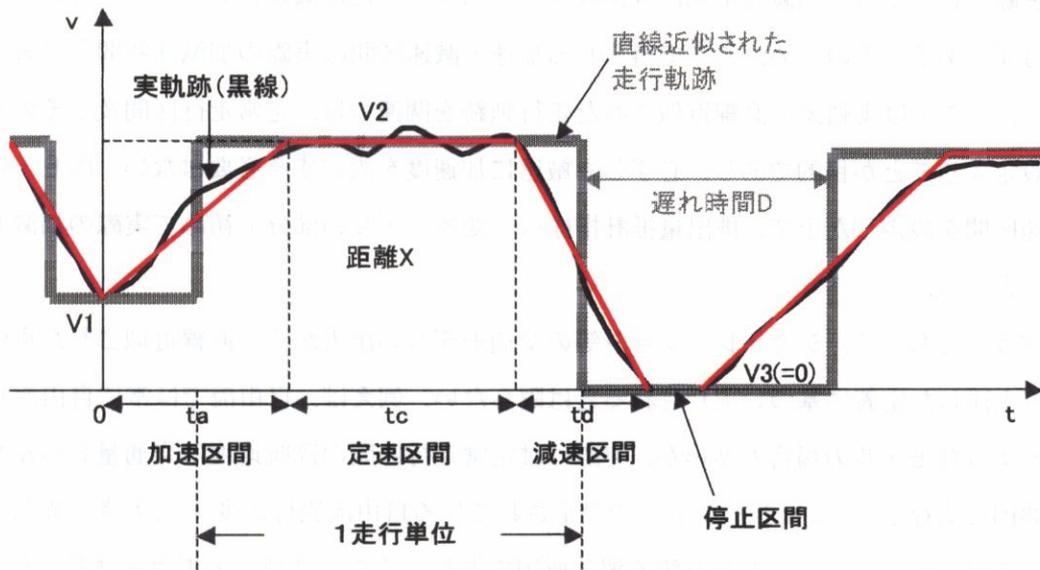


図 6 - 3 実際の走行軌跡（黒実線）とそれに対応する直線近似された走行軌跡（赤実線）の関係

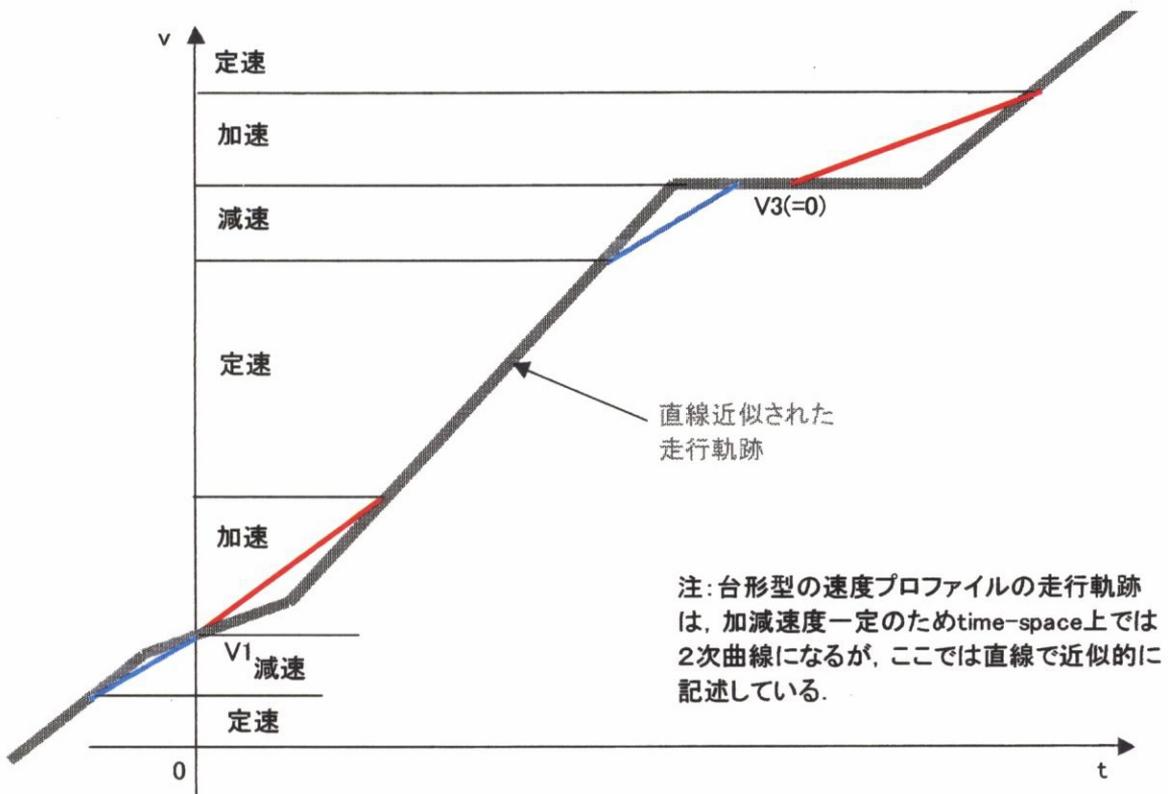


図 6 - 4 直線近似された走行軌跡と台形型走行軌跡の関係

なお、実際の軌跡では、加減速挙動は等加速度とならず、特に加減速の開始・終了時には加減速度は0になるはずである。そのため、ここで得られる加速・減速区間は実際の加減速時間とは厳密には異なる。しかし、ここでは実軌跡と直線近似された走行軌跡を関連づけ、定常走行区間及びその速度、加減速区間を設定することが目的であり、必ずしも厳密に加速度を設定する必要はない。図6-4に示すように加減速区間を設定した上で、排出量推計指標への変換モデルの部分で初めて実際の加減速挙動を考慮することとなる。

また、言うまでもなく、シミュレーション等の交通モデルの出力から、直線近似された車両軌跡が正確に再現（上述した定義に基づいて）されるとは限らない。例えば、自由流では常に自由流旅行速度  $V_f$  で走行するようなモデルの場合も多いが、実際には定常走行区間の巡航速度は交通量レベルやその他の道路交通要因に依存し、シミュレーションで設定されている自由流旅行速度  $V_f$  と大きく異なる場合も想定される。これらはシミュレーション側の誤差要因であり、ここではひとまず考慮せず、モデルの感度分析によって検討を加えることとする。

## 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

### 1) 基本的考え方

次に、直線近似された走行軌跡が得られている際に、加速・減速・定速区間を決定し、それに基づいて排出量推計指標の算出及び排出量の推計を行う手順を示す。

基本的な考え方は、各走行単位の接続点毎に加速区間、減速区間を設定し、更にそれらの区間を除いた部分として定速区間、停止区間を区分する。これらの区分された各区間毎に、別途調査等で設定された変換モデルを適用して、排出量推計指標の距離帯別分布を算出する。

しかし、直線近似された車両軌跡には加速区間、減速区間に関する直接的な情報はないため、与えられた情報を用いて推定をする必要がある。加速区間、減速区間は交通特性（交通量の大小など）、道路特性（車線、幅員、沿道状況など）、車両特性（車両重量、エンジン特性など）、運転特性（加減速挙動に関する運転者間の個人差など）等に依存するものと考えられる。可能な限りこれらの要因を取り込んだモデルとするのが望ましいが、実際には影響の大きな要因に基づくモデルを設定し、『平均的な加減速状態』を再現できるようなモデルを設定することになる。ここでは、加速時間を前後の巡航速度の変数として表現するモデルを仮定しよう。実際のモデル及びその妥当性については実データを用いた分析の項で述べるが、ここでは式(6-15)のように記載する。

$$T_{Ai} = T_A(V_{i-1}, V_i) \quad (6-15)$$

次に、この条件を用いて加速・減速区間  $A_i$  を設定すると、式(6-12)及び(6-13)の条件より以下の通り記述できる。

$$\text{時間区間} : [t_i - T_A(V_{i-1}, V_i)/2, t_i + T_A(V_{i-1}, V_i)/2] \quad (6-16)$$

$$\text{空間区間} : [x_i - V_{i-1} T_A(V_{i-1}, V_i)/2, x_i + V_i T_A(V_{i-1}, V_i)/2] \quad (6-17)$$

全ての走行単位について加速・減速区間を設定した後、加速・減速区間に含まれない部分が定常走行、あるいは停止区間として設定される。例えば走行単位  $i$  の定常走行区間（あるいは停止区間）を  $C_i$  と記述することとしよう。両側に加速・減速区間として  $A_i$ ,  $A_{i+1}$  が設定されるが、その間の部分である、

$$\text{時間区間} : [t_i + T_A(V_{i-1}, V_i)/2, t_{i+1} - T_{Ai} = T_A(V_i, V_{i+1})/2] \quad (6-18)$$

$$\text{空間区間} : [x_i + V_i T_A(V_{i-1}, V_i)/2, x_{i+1} - V_i T_A(V_i, V_{i+1})/2] \quad (6-19)$$

が  $C_i$  の区間となる。

この場合、 $V_i > 0$  の場合が定常走行となり、定常走行時間  $T_{Ci}$  定常走行距離  $X_{Ci}$  は以下の通りとなる。

$$T_{Ci} = T_i - T_A(V_i, V_{i+1})/2 - T_A(V_{i-1}, V_i)/2 \quad (6-20)$$

$$\begin{aligned} X_{Ci} &= X_i - V_i T_A(V_i, V_{i+1})/2 - V_i T_A(V_{i-1}, V_i)/2 \\ &= X_i - V_i T_{Ci} \end{aligned} \quad (6-21)$$

上記の定常走行区間について、 $V_i = 0$  の場合は停止位置になる。この場合の停止時間  $T_{fi}$  は(6-20)と同じく、

$$T_{Ci} = T_i - T_A(V_i, V_{i+1})/2 - T_A(V_{i-1}, V_i)/2 \quad (6-22)$$

となる。上記で示した加速・減速区間及び定常走行・停止区間の関係を図6-5に示す。

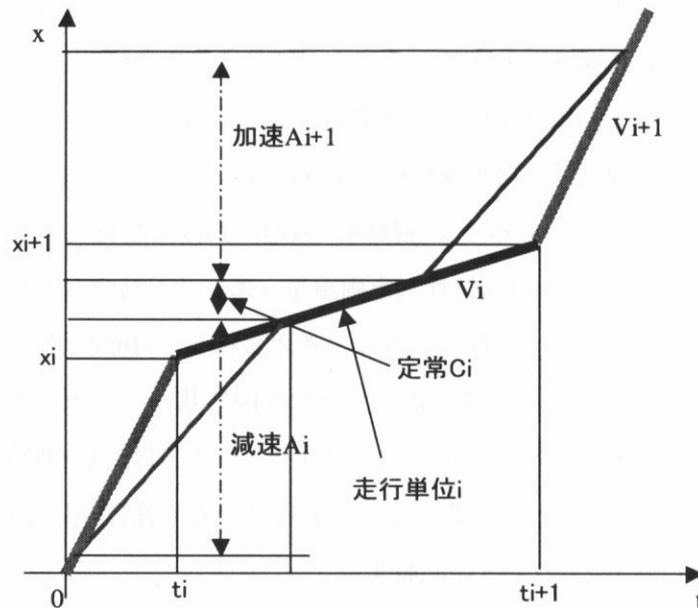


図6-5 走行単位と各区間の関係

## 2) 走行単位毎の整合性の考慮

上記の方法では、加速・減速・定速・停止の各区間が矛盾なく設定されることは保証されない。すなわち、上記の設定方法で矛盾のない解が得られる条件は、

$$X_i \geq V_i T_A(V_i, V_{i+1})/2 + V_i T_A(V_{i-1}, V_i)/2 \quad (6-23)$$

かつ

$$T_i \geq T_A(V_i, V_{i+1})/2 + T_A(V_{i-1}, V_i)/2 \quad (6-24)$$

であるが、式(6-24)を満たせば式(6-23)も満たすことは明らかなので、式(6-24)のみを満たせばよい。この条件式(6-24)が満たされない場合、定常走行区間あるいは停止区間が負の値になってしまう。これらの問題が発生する原因は、与えられた直線近似軌跡が実際の走行軌跡を再現していない、あるいは仮に再現しているとしても平均的な走行状態から外れていることにより、平均的な加減速時間を与えるモデル  $T_{Ai} = T_A(V_{i-1}, V_i)$  と整合が取れていないことによるものである。

本研究では、シミュレーション等の交通モデル側での加減速挙動の再現性には重点を置かない立場に立ち、加減速時間を実測により求めたモデル  $T_{Ai} = T_A(V_{i-1}, V_i)$  と整合するように走行単位の範囲を調整する。具体的には、式(6-24)を満たしていない全ての区間  $i$  について、式(6-24)が満たされるように、 $V_i$  (及び  $V_{i-1}$ ,  $V_{i+1}$ ) を調整、又は  $T_i$  を調整する。

しかしながら、式(6-24)の条件を見てもわかるとおり、前後の区間の速度が関連するため、ある1区間の条件だけでなく、前後区間の条件式も考慮する必要がある。隣接区間で式(6-24)が比較的余裕を持って満たされている場合にはそれほど問題とはならないが、特に、複数の区間に渡って式(6-24)を満たしていないような場合には、複数の未知数と条件式からなる連立不等式を解くこととなり、非常に扱いが煩雑となる。

そこで、計算の煩雑化をさげ、計算を容易にするため、以下の考えによる簡略化を行う。

- ・ 加速・減速区間の設定は上流側の走行単位から行い、式(6-24)を満たす場合は順次、走行単位の定常走行速度  $V_i$  及び加速区間  $A_i$  を確定していく。(確定値を  $V_i^*$ ,  $A_i^*$  などとする。)
- ・ 走行単位  $i$  について式(6-24)の条件式を満たさない場合は、式(6-24)を満たすように当該走行単位の軌跡を調整する。これにより、速度  $V_i$  及び走行単位の時間  $T_i$  も変化する。これにより、走行単位の走行速度を確定し、確定値  $V_i^*$ ,  $A_i^*$  を得る。この際、それ以外の走行単位は動かさない。
- ・ 確定した走行単位について、再度式(6-24)の条件のチェックは行わない。

具体的な計算手段を示す。走行単位  $i$  について式(6-24)が満たされていないとしよう。既に、走行単位  $i-1$  までは加速区間、この際、軌跡の上下流の走行単位との接続点を時間軸方向に等間隔に  $l$  だけ広げることを考える。図6-6にこの状況を time-space 上に示す。この際、時間軸が移動したことによる走行単位  $i$  の始点、終点をそれぞれ  $(x'_i, t'_i)$ ,  $(x'_{i+1}, t'_{i+1})$  とすると、

$$x'_i = x_i - V_{i-1}^* l \quad (6-25)$$

$$t'_i = t_i - l \quad (6-26)$$

$$x'_{i+1} = x_{i+1} + V_{i+1} l \quad (6-27)$$

$$t'_{i+1} = t_{i+1} + l \quad (6-28)$$

この場合、走行単位  $i$  の時間  $T_i$ 、距離  $X_i$ 、及び走行速度  $V_i$  は、

$$T'_i = T_i + 2l \quad (6-29)$$

$$X'_i = X_i + (V_{i-1}^* + V_{i+1}) l \quad (6-30)$$

$$V'_i = \frac{X'_i}{T'_i} = \frac{X_i + (V_{i-1}^* + V_{i+1}) l}{T_i + 2l} \quad (6-31)$$

なお、

$$V'_i - V_i = \frac{X'_i}{T'_i} - \frac{X_i}{T_i} = \frac{(V_{i-1}^* + V_{i+1}) T_i - 2l X_i}{T_i (T_i + 2l)} \quad (6-32)$$

より、 $(V_{i-1}^* + V_{i+1}) T_i - 2l X_i > 0$  すなわち、 $\frac{V_{i-1}^* + V_{i+1}}{2} > V_i$  の時、 $V'_i > V_i$  となる。

従って、式(6-24)の条件を踏まえ、

$$T'_i = T_i + 2l = T_A(V'_i, V_{i+1})/2 + T_A(V_{i-1}^*, V'_i)/2 \quad (6-33)$$

となる調整量  $l$  を推定する。

なお、式(6-33)を満たす調整量  $l$  が得られるかどうかは、 $T_i$ 、 $V_{i-1}$ 、 $V_{i+1}$ 、及び  $T_A(,)$  の具体的なモデル形に依存しており、必ずしも補正が可能とは限らない。(6-33)を満たす調整量  $l$  が得られない場合は、調整を行わない。

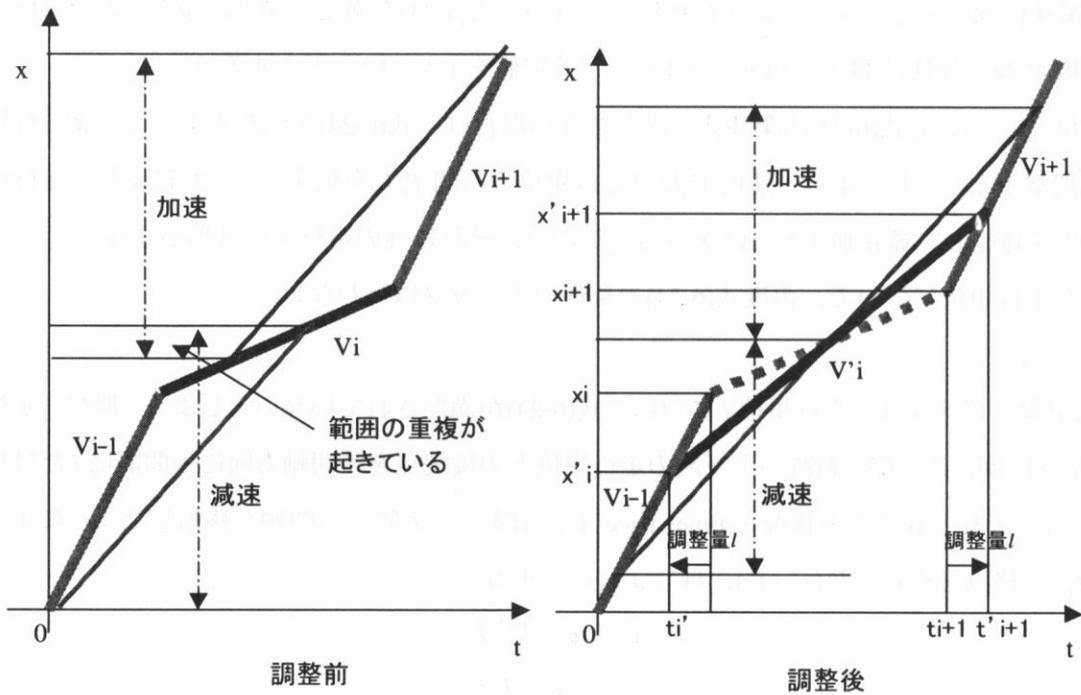


図 6 - 6 走行単位毎の軌跡の調整

### 3) 排出量推計指標算出手順のまとめ

ここでは、上記で示した推計手順及び軌跡の調整手順をまとめて、フローとしてまとめる。

Step1. 初期状態として  $V_0^*$  を設定。(一般的には停止状態から出発する場合は  $V_0^* = 0$ )。  $i = 1$  にセットする。

Step2. 走行単位  $i$  について、以下の条件を判定。

$$T_i \geq T_A(V_i, V_{i+1})/2 + T_A(V_{i-1}, V_i)/2$$

満たさない場合は軌跡の調整のため Step 3 へ、満たす場合は走行単位  $i$  の軌跡を確定 ( $V_i = V_i^*$ ) し、Step4 へ。

Step 3. 走行単位間の重合という不整合を解消するため、走行単位  $i$  の軌跡を調整する。以下の4つの式を満たす調整量  $l$  を設定し、これを満たす  $V_i'$  を  $V_i^*$  として確定する。但し、条件を満たす  $l$  が存在しない場合は調整を行わない。

$$\begin{aligned}
 T_i' &= T_i + 2l \\
 X_i' &= X_i + (V_{i-1}^* + V_{i+1}^*)l \\
 V_i' &= \frac{X_i'}{T_i'} = \frac{X_i + (V_{i-1}^* + V_{i+1}^*)l}{T_i + 2l} \\
 T_i' &= T_i + 2l = T_A(V_i', V_{i+1}')/2 + T_A(V_{i-1}^*, V_i')/2
 \end{aligned}$$

Step 4. 確定された走行単位  $i$  の走行軌跡（速度  $V_i^*$ ）に対して、加速（減速）区間  $A_i^*$  を以下の通り確定する。

$$\begin{aligned}
 \text{時間区間} &: [t_i - T_A(V_{i-1}^*, V_i^*)/2, t_i + T_A(V_{i-1}^*, V_i^*)/2] \\
 \text{空間区間} &: [x_i - V_{i-1}^* T_A(V_{i-1}^*, V_i^*)/2, x_i + V_i^* T_A(V_{i-1}^*, V_i^*)/2]
 \end{aligned}$$

Step 5. 走行単位  $i-1$  及び  $i$  の加速（減速）区間  $A_{i-1}^*$  及び  $A_i^*$  の確定を受けて、走行単位  $i-1$  の定常走行区間  $C_{i-1}^*$ （あるいは停止区間）を確定させる（ $i > 2$  の場合のみ）。

$$\begin{aligned}
 \text{時間区間} &: [t_{i-1} + T_A(V_{i-2}^*, V_{i-1}^*)/2, t_i - T_A(V_{i-1}^*, V_i^*)/2] \\
 \text{空間区間} &: [x_{i-1} + V_{i-1}^* T_A(V_{i-2}^*, V_{i-1}^*)/2, x_i - V_{i-1}^* T_A(V_{i-1}^*, V_i^*)/2]
 \end{aligned}$$

但し、時間区間、空間区間が負になった場合には定常走行区間、あるいは停止区間はなし。

Step 6. 確定した各区間  $A_i^*, C_{i-1}^*$  に対して、各区間の開始、終了位置を基準として、排出量推計指標変換モデルを当てはめ、距離帯別の排出量推計指標 ( $Z_v, Z_{v3}, Z_{av}, Z_a, T_{r+}, T_{r-}, T_i$ ) を求める。（具体的な手順は 6. 4 にて示す。）

Step 7. 最後の走行単位まで処理が終われば終了。そうでなければ  $i \leftarrow i+1$  として、Step2 へ。

### 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

前節までに示した手法に基づいて、直線近似された走行軌跡から排出量推計モデルのインプットとなる排出量推計指標を距離帯別に推計するためには、加速(減速)時間の推定(モデル式 $T_{Ai} = T_A(V_{i-1}, V_i)$ )や排出量推計指標変換モデルの形式、パラメータ等を、実際の車両軌跡のデータに基づき設定する必要がある。そこで、本節では、実車両の走行軌跡データに基づいて様々な分析を行い、加速減速時間推定モデル及び排出量推計指標 ( $Z_v, Z_{v3}, Z_{av}, Z_a, T_{r+}, T_{r-}, T_i$ ) 変換モデルの設定を行うことを目的とする。

#### 6. 3. 1 実験車を用いた実走行パターン調査の概要

排出量推計指標変換モデルの実際のパラメータ設定に用いるデータとして、建設省土木研究所で平成9年度に実施された走行実態調査<sup>り</sup>のデータを用いる。主な諸元は以下の通りである。

##### ①対象車種

本調査においては、大型車と小型車の特性の違いを考慮できるよう、それらを代表する車両として、ガソリン乗用車(2000cc)、ディーゼル大型貨物車(最大積載量 10t, 半積載状態)の2車種を用いて調査を行っている。なお、以下の分析では提案した排出量推計指標変換モデルの具体像を示し、モデル適用性の検討及び適用に当たっての課題の抽出を主眼として、ガソリン乗用車のデータを用いてパラメータ分析を行っている。

##### ②対象路線

関東・中部・近畿の各地方から都市部・郊外部・地方部の区分に分けて、全9路線を選定した。いずれの路線も、片側2車線以上の幹線道路である(ほとんどの区間は片側2車線、一部分片側1車線や3車線あり)。路線の概要を表6-1に示す。1路線当たりの距離は概ね平均30km程度である。

表6-1 調査路線の一覧

都市部：関東：東名高速(横浜IC~東京IC) 環状8号+国道246号+環状7号 (東京都世田谷区~杉並区)
中部：国道19号+国道22号 (名古屋市熱田区~清洲町)
近畿：国道26号(大阪市住之江区~泉佐野市)
郊外部：関東：国道16号(千葉県庄和町~沼南町)
中部：国道23号(三重県四日市市~愛知県弥富町)
近畿：国道2号姫路BP(姫路西ランプ~高砂西ランプ)
国道250号(兵庫県高砂市~明石市)
地方部：関東：国道50号(栃木県佐野市~笠懸町)
中部：国道21号(岐阜県各務原市~大垣市)
国道23号(三重県三雲町~伊勢市)

### ③調査対象時間帯

異なる交通状態のデータを取得するため、朝（7～9時）、昼（13～15時）・夜（23～1時）の3時間帯を設定した。

### ④測定項目

速度、エンジン回転数、燃料流量、アクセル開度、吸気負圧（ガソリン乗用車のみ）を測定している。主な測定方法は以下の通りである。

速度、エンジン回転数：

車両のエンジンコントローラからのパルス信号を直接シグナルコンディショナーのF/Vコンバータに入力し、パルス信号をアナログ信号（電圧）に変換して記録。

燃料流量：

燃料タンク後の流路に燃料流量計（東京航空計器 FS-108-050）を取り付けて計測。

アクセル開度：

ポテンションメータ（コパル JCL100B(5k $\Omega$ )）をアクセルワイヤーに取り付け、その出力信号ケーブルをシグナルコンディショナーのポテンション・コンバータと接続し、電位差信号をアナログ信号に変換して記録。

吸気負圧：

エンジンの負圧センサーに入っているパイプを分岐し、分岐したパイプに圧力計（コパル PG-35-102 R-NR2）を接続して計測。

なお、サンプリング単位は 100Hz（0.1 秒）である。なお、各データについて 1 秒単位（ $\pm 0.5$  秒）で移動平均によるスムージングを行っている。また、速度データにより、走行距離データ、加速度データを計算により求めている。

以上の調査により、総走行距離 1,905km、総走行時間：53 時間の走行データが得られている。これらをショートトリップ単位に分割すると、ショートトリップ数は 1,306 となる。

## 6. 3. 2 分析方法

上記の実走行パターン調査のデータに基づき、加速・減速区間毎に排出量推計指標の分析を行うべくこととなるが、そのためには、6. 2 節で示した定義に基づき、走行単位への分解及び、加速・減速区間の同定を行う必要がある。以下には、その具体的な方法を示す。

### 1) 走行データの加速・減速・定常走行区間への分解

前節の走行調査データを用いて加速区間、減速区間、定常走行区間に分解する。なお、停止区間も

停止位置として抽出されるが、今回は分析の対象とはしていない。

走行単位への分解は、具体的には以下のように行っている。

(1) まず、停止位置（速度＝0となる地点）を基準としてショートトリップに分解する。

(2) ショートトリップ毎に、速度・加速度プロファイルを基準として、仮に「加速区間」・「減速区間」・「その他の区間」に分解する。

「加速区間」・・・連続的に加速しており、速度増加分の合計が10km/h以上となる区間

「減速区間」・・・連続的に減速しており、速度減小分の合計が10km/h以上となる区間

なお、加速・減速中に100m以内のその他の区間を含む場合にも連続しているものと見なす。

(注：ここで「仮の」としたのは、実際の加速・減速区間は6.2の定義に基づき『台形型速度プロファイルと実際の速度プロファイルの最小自乗誤差』となる区間として設定されるためである。ここでの仮の区間は台形型プロファイルを当てはめるための区間を設定するためのものである)

(3) 加速区間、減速区間を基準にして、以下の区切りで抽出する(図6-7)。

①加速区間と減速区間が連続する場合(途中に「その他の区間」を含んでもよい)

・加速区間の開始から減速区間の終了までを抽出

②加速区間と加速区間が連続する場合(同上)

・加速区間の開始から次の加速区間の開始までを抽出

③減速区間と減速区間が連続する場合(同上)

・減速区間の終了から次の減速区間の終了までを抽出

(4) (3)で抽出した区間に対して、抽出した区間の初速度 $v_1$ (①, ②の場合)、終速度 $v_2$ (①, ③の場合)を固定して、台形型速度プロファイル(加速・減速区間は加減速度一定、その他の区間は速度一定)を当てはめて、実際の車両軌跡と最小自乗誤差となるように、加減速、定速の始点・終点を設定し、加速区間、減速区間、定速区間を抽出する。これにより、加速時間 $T_A$ 、定常走行時間 $T_C$ 、減速時間 $T_D$ 、加速距離 $X_A$ 、定常走行距離 $X_C$ 、減速距離 $X_D$ 、巡航速度 $V_C$ を算出する。

(5) (4)までで加速区間、減速区間、定速区間、停止区間が抽出されているので、これらのデータから直線近似された車両軌跡を設定する。但し、以降の分析では主に各区間毎のデータの分析が主であり、直線近似された車両軌跡そのものは最後の検証に用いることになる。

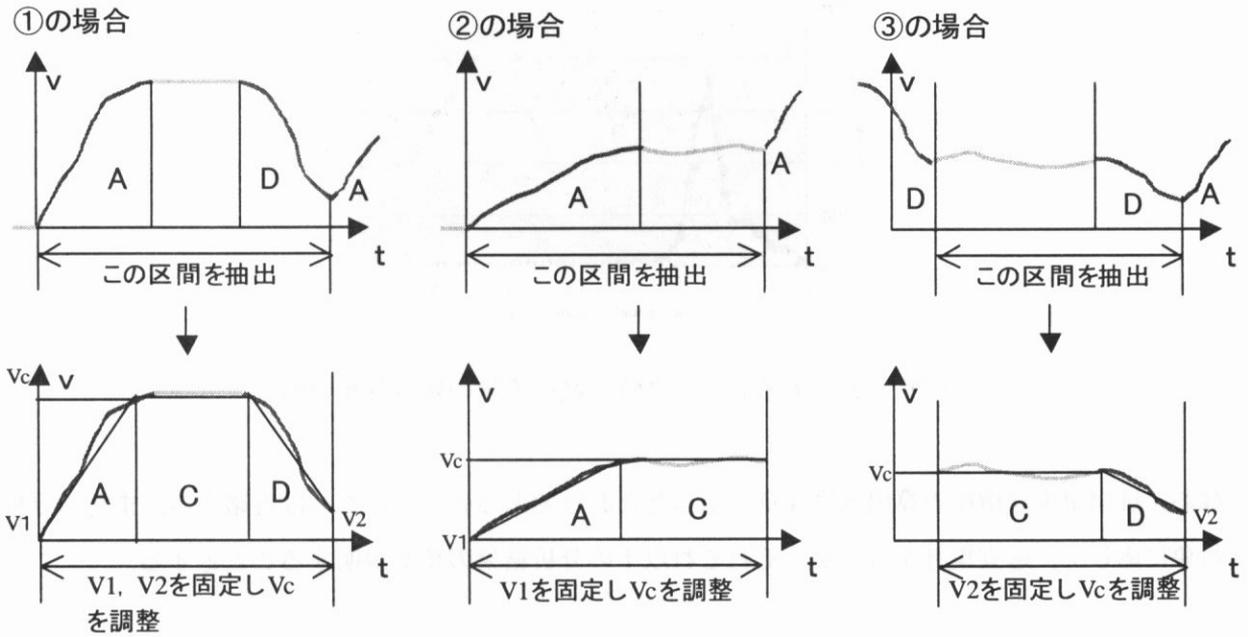


図6-7 加速・減速・定速区間の抽出方法

## 2) 排出量推計指標 ( $Z_v$ , $Z_{v3}$ , $Z_{av}$ , $Z_{\alpha}$ , $T_{r+}$ , $T_{r-}$ ) の算出

加速・減速・定常走行の各区間毎に、実際の速度プロファイルのデータを用いて排出量推計指標 ( $Z_v$ ,  $Z_{v3}$ ,  $Z_{av}$ ,  $Z_{\alpha}$ ,  $T_{r+}$ ,  $T_{r-}$ ) を算出する。なお、この際、駆動走行 (すなわち,  $R_f > 0$ ) の判別が必要となるが、直接判別するデータは取得していない。

そこで、取得しているデータのうち、燃料消費量のデータを用いて、駆動走行の判別を行うこととした。これは、燃料消費量についても4章のモデルが適用できることを利用したもので、駆動走行時にはアイドリング時を上回る燃料流量となり、非駆動走行時にはアイドリング時相当 (あるいはそれ以下) の燃料流量となることを仮定したものである。具体的には、アイドリング (速度 = 0 km/h) の時のデータを抽出してアイドリング時燃料流量の平均  $\mu$  と分散  $\sigma^2$  を算出した上で、バラツキを考慮して閾値を設定し、閾値以上の燃料流量の場合は駆動走行、閾値以下の場合にはアイドリング相当の燃料流量で非駆動走行をしているものと判定した。図6-8はアイドリング時の燃料流量の頻度分布の例で、3つの異なる路線のデータを示したものであるが、ほぼ同じような分布を示していることがわかる。ここでは、閾値として、 $\mu + 2\sigma$  を設定した。

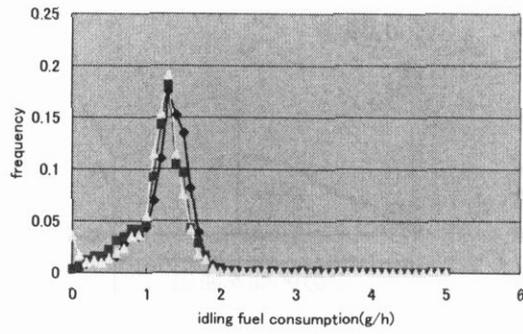


図6-8 アイドリング時の燃料流量の頻度分布の例

なお、排出量推計指標の算出式は4章で示したとおりであるので、ここでは省略する。また、分析の対象に応じて、適宜集計を行うが、それぞれ以下の分析結果の項で説明することとする。

### 6. 3. 3 分析結果

#### 1) 加速・減速時間のモデル化

6. 2では、加速・減速時間のモデルとして、対象とする加速、減速区間の前後の速度  $V_{i-1}$ ,  $V_i$  を変数とするモデル  $T_{Ai} = T_A(V_{i-1}, V_i)$  で決定されるとした。既往の研究でも、初速度・終速度から加速・減速時間を推計するモデルが提案されている例があるが<sup>2)</sup>、加速・減速区間の定義が異なること、地域が異なることなどからそのまま適用することはできない。ここでは、実際のデータに基づき具体的なモデルを定式化する。

ここまで、加速・減速を特に区別せず  $T_{Ai} = T_A(V_{i-1}, V_i)$  として記述したが、当然ながら加速・減速で走行特性が異なるため、加速、減速時間のモデルも異なってくる。そこで、以下では加速、減速を分けて分析する。なお、以下では  $V_1$  を初速度、 $V_2$  を終速度とする。加速時は  $V_1 < V_2$ 、減速時は  $V_1 > V_2$  となる。

#### ①加速時の分析

図6-9は横軸に加速区間の速度増加分（速度差、 $V_2 - V_1$ ）、縦軸に加速時間を示したものを初速度  $V_1$  のランク別に示したものである。バラツキが大きいものの、速度ランクが大きくなると同じ速度増加分であっても加速時間が大きくなる傾向が明確に現れている。これは、加速度変化が速度に対して逓減的であることによる。低速域かつ発進開始時には比較的大きな加速度となるが、高速域では加速度が小さくなる。

速度ランク  $0 \leq V_1 < 5\text{km/h}$  のケースを見ると若干速度増加分が大きくなるにつれて加速時間が逓増的に増えているように見受けられる（高速域での速度増加分が小さくなるためであり、平均加速度は低下）。しかし、ここではモデルを単純化するため、速度増加分と加速時間を線形近似として表現する。各速度ランク毎に原点を通る1次直線で回帰し、その係数と初速度  $V_1$  の関係を示したのが図6-10である。これより係数についても概ね一次直線で近似できることがわかる。

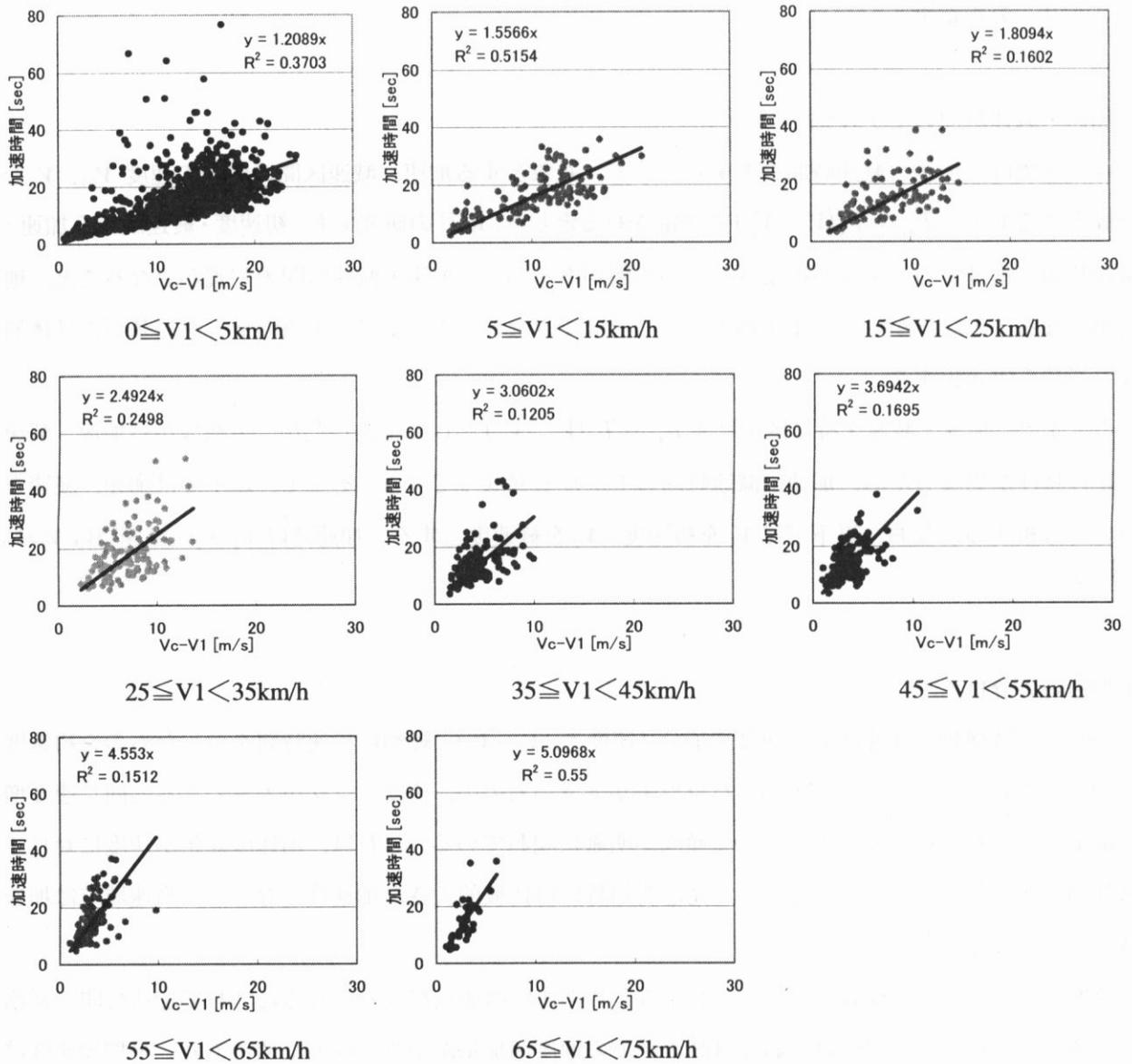


図 6 - 9 速度増加分と加速時間の関係 (初速度ランク別)

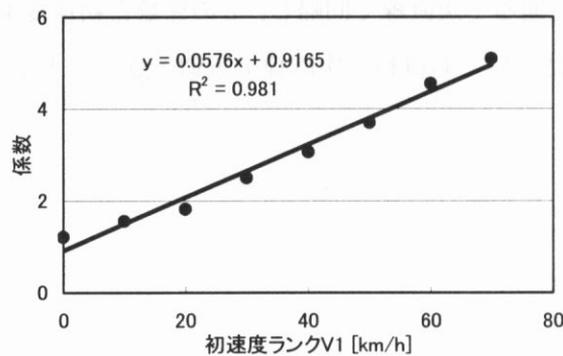


図 6 - 10 初速度ランクと係数の関係

また、路線別の特性を見るため、データの多い  $V_1=0$  の場合を抽出して路線別にプロットしたものが図6-11である。これを見る限り、基本的な傾向は路線別に大きな違いはないものの、都市部、郊外部の路線を中心に加速時間が大きくなるケースが多いことが見られる。ここで、都市部、郊外部等の分類は、走行する地域に基づき設定した便宜的なものであるため、交通条件、道路条件等が適切に反映されているとは言えない。走行している個別地点の交通条件（交通量など）、道路条件（車線利用、路上駐車状況、沿道状況など）との関係を分析すべきところであるが、データ取得の問題により、それらの分析は困難である。そこで、路線特性を表す指標として路線の平均旅行速度を取り上げ、その値によって分類したのが図6-12である。平均旅行速度が40km/h以上の路線では加速時間のバラツキが非常に小さく、40km/h以下の路線で加速時間が長くなるケースが多くなっている。これは、渋滞流中の追従挙動によるもので、6.3.3で示した判定基準では加減速と判定されないような小刻みな加減速を繰り返しながら徐々に速度を上げて行くため、平均としての加速度は小さくなり、加速時間が長くなるものと考えられる。加減速区間の判定基準とも大きく関係する問題であり、判定基準を変更すればその状況も変わる可能性がある。

上記の通り、交通条件、道路条件による変化はそれほど大きくない。ただ、渋滞時の挙動について多少異なる場合もあり、状況に応じたモデルの生成が望ましいが、データの制約の問題からこれ以上の分類は不可能であるため、さしあたり全データをまとめてモデルを生成する。

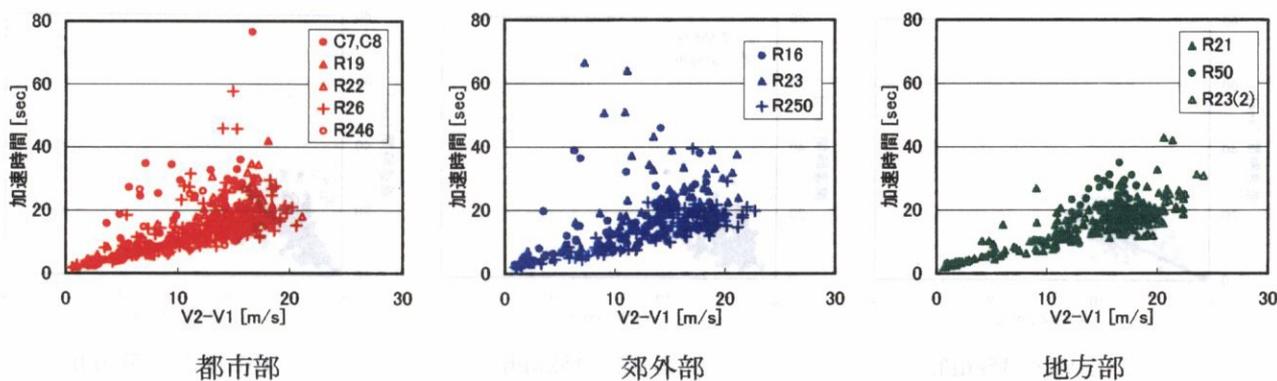


図6-11 速度増加分と加速時間の関係（路線別）

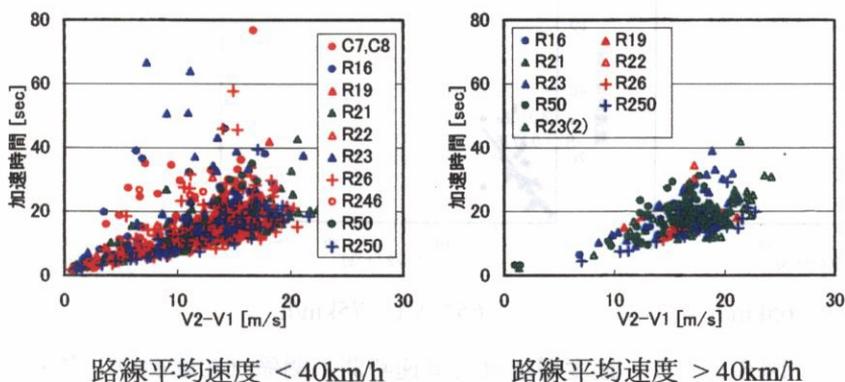


図6-12 速度増加分と加速時間の関係（路線の平均旅行速度ランク別）

## ②減速時の分析

図6-13は横軸に減速区間での速度減少分(速度差,  $V_1 - V_2$ ), 縦軸に加速時間を示したものを終速度  $V_2$  のランク別に示したものである。若干バラツキが大きいものの, 加速時と同様の傾向が見られる。また, 速度ランク  $0 \leq V_1 < 5\text{km/h}$  のケースを見ると若干速度増加量が大きくなるにつれて加速時間が逡減的になっているように見受けられる。これは, 高速域での速度減少量が多く, 低速域の停止位置近傍では速度減少量が小さくなるためであり, 平均加速度は上昇する。

ここでも加速時と同様に, 原点を通る線形近似を行い, その係数と速度ランクの関係を分析すると, 図6-14に示すとおり若干ズレが見られるものの, 全体のバラツキを考えると概ね直線で近似しても問題ないであろう。

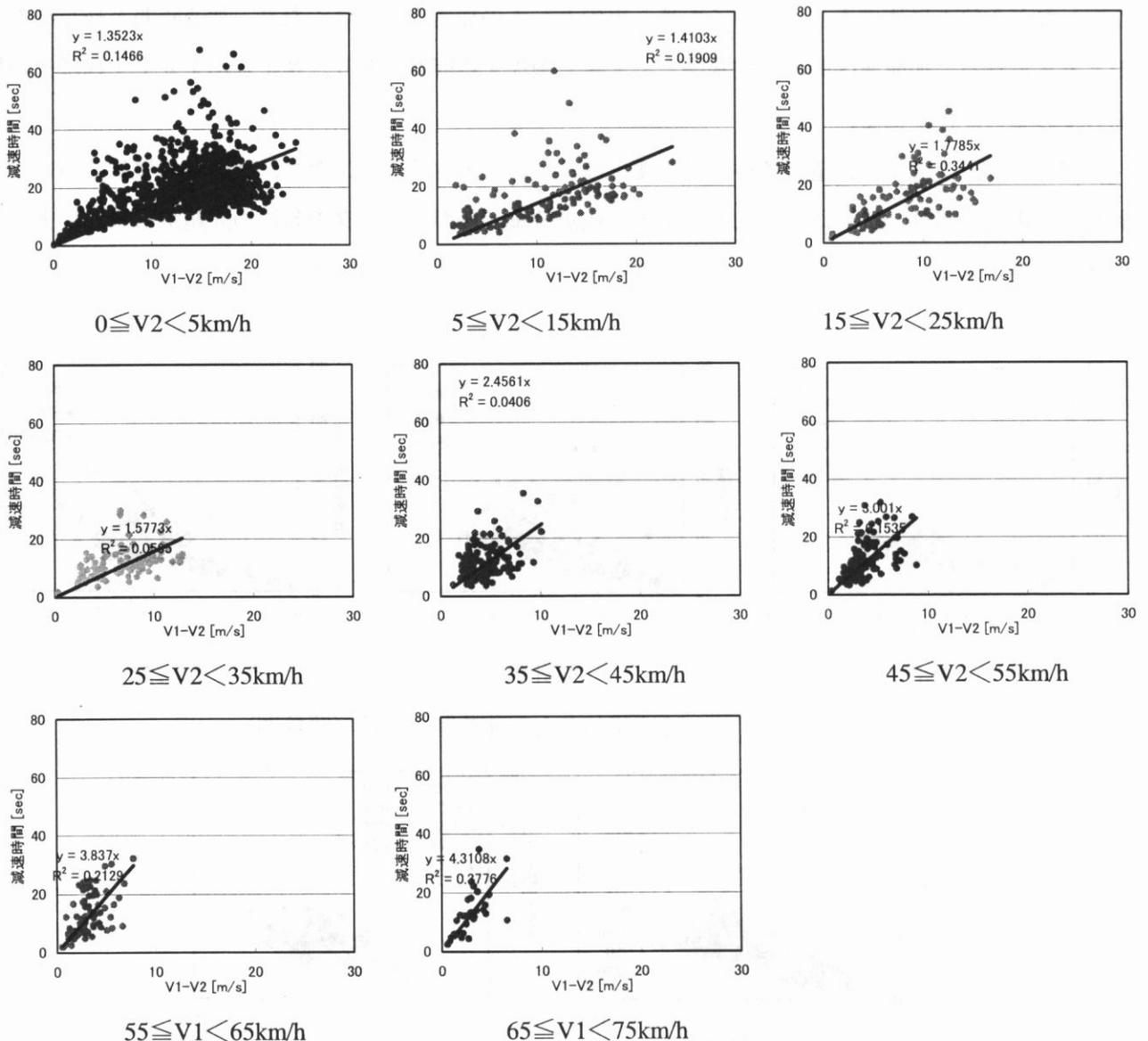


図6-13 速度増加分と減速時間の関係(初速度ランク別)

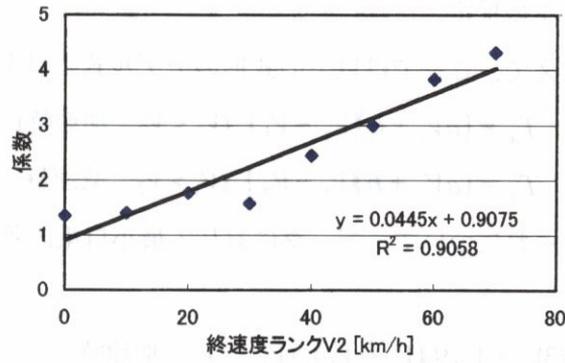


図6-14 初速度ランクと係数の関係

また、加速時と同様に行った路線別の分析を図6-15に示す。都市部、郊外部の方がバラツキが大きいように見えるが、その違いは加速時に比べるとかなり小さく、地方部の場合もバラツキが大きいことが窺える。また、路線の平均旅行速度別に分けた図6-16では、路線平均速度が40km/h以下の場合にバラツキが大きいのは変わらないが、路線平均速度が40km/h以上の場合でも比較的バラツキが大きいことが窺える。

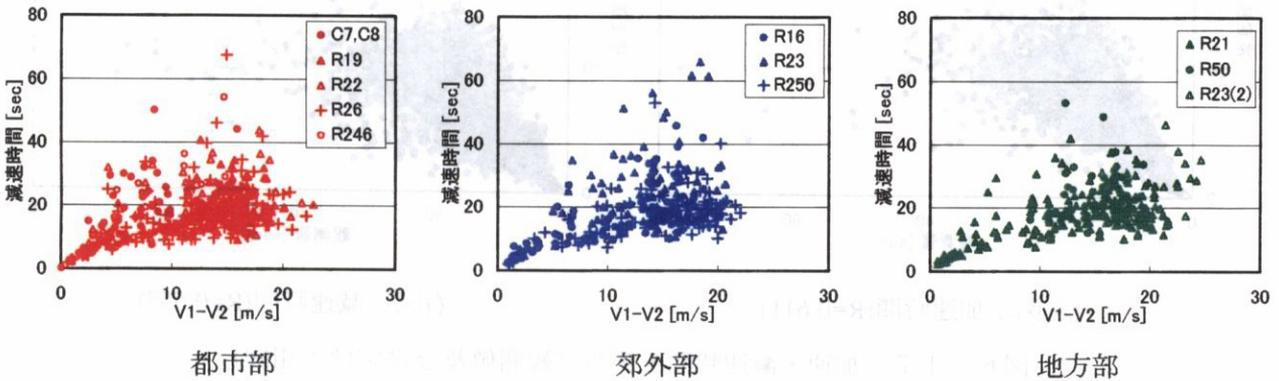


図6-15 速度減少分と減速時間の関係（路線別）

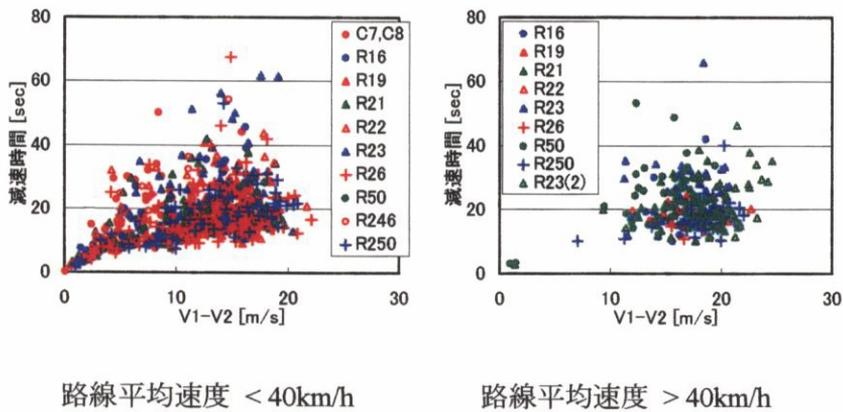


図6-16 速度減少分と減速時間の関係（路線の平均旅行速度ランク別）

### ③モデル式の設定とパラメータの推定

上記の①，②の分析を踏まえて，ここでは以下の式形のモデル式を設定する．

$$T_A = (aV_1 + b)(V_2 - V_1) \quad (V_1 < V_2 : \text{加速時})$$

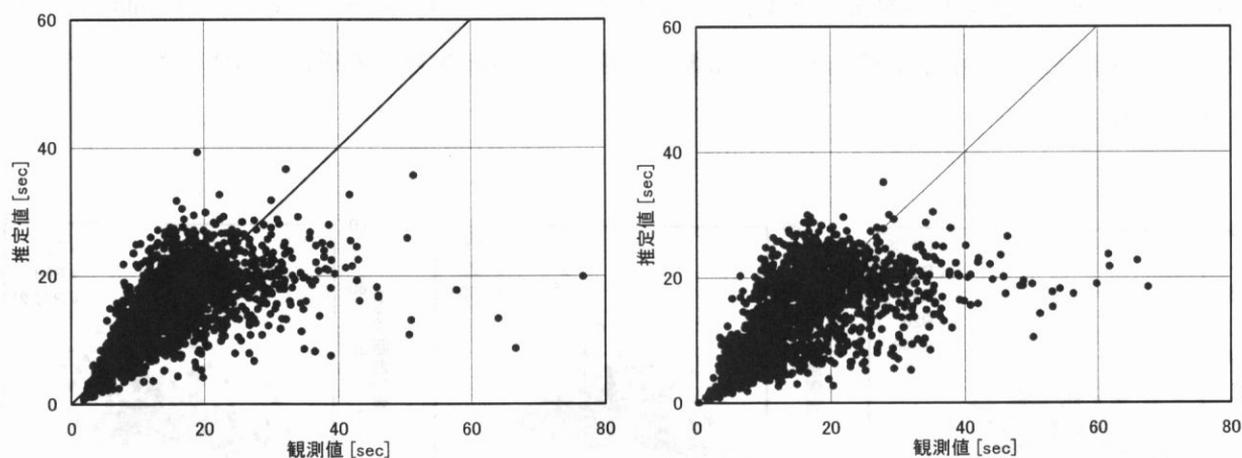
$$T_A = (aV_2 + b)(V_1 - V_2) \quad (V_1 > V_2 : \text{減速時})$$

ここで，加速時，減速時それぞれについて，データに対して最小自乗誤差となるようにパラメータを推定すると，以下の式となる．

$$T_A = (0.173V_1 + 1.19)(V_2 - V_1) \quad (V_1 < V_2 : \text{加速時}) \quad (6-34)$$

$$T_A = (0.101V_2 + 1.24)(V_1 - V_2) \quad (V_1 > V_2 : \text{減速時}) \quad (6-35)$$

図6-17に本モデルによる加速時間の観測値及び推定値の関係を示す．元データのバラツキを考慮すると比較的良好な推定結果と言えるが，バラツキの大きい分，減速時の方が若干パフォーマンスが悪くなっている．



左図：加速時間(R=0.611)

右図：減速時間(R=0.557)

図6-17 加速・減速時間モデル（観測値及び推定値の相関）

## 2) 各排出量推計指標に関する分析 (走行モード別)

次に、各排出量推計指標 ( $Z_v$ ,  $Z_{v3}$ ,  $Z_{av}$ ,  $Z_a$ ,  $T_{r+}$ ,  $T_{r-}$ ) について、加速・減速・定常走行の各区分毎に分析を行い、特性を把握する。

### ①加速時

#### (1)距離項 $Z_v$ , $Z_{v3}$ について

図6-18に、定常速度  $V_c$  と加速時単位距離当たり  $Z_v$  の関係を示す。この値は全区間駆動走行している場合に1となるものである。低速度域になると1以下の領域でのバラツキが見られるが、それ以外は概ね1となっており、全区間駆動走行していると言ってもよい。

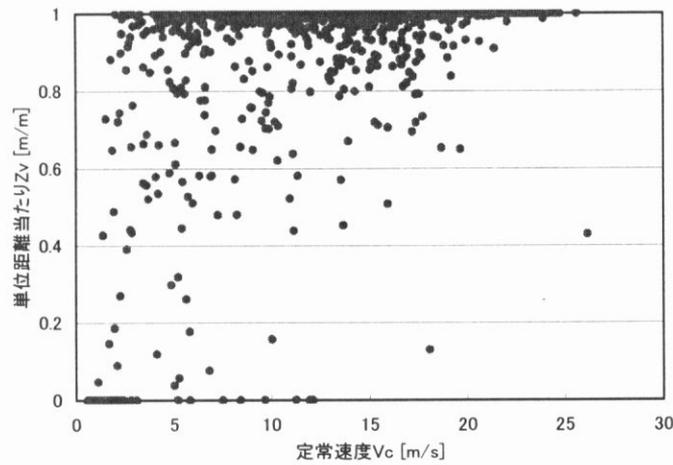


図6-18 巡航速度  $V_c$  と加速時単位距離当たり  $Z_v$  の関係

また、 $Z_{v3}$  について、初速度  $V_1$  を 10km/h 毎の速度ランクに区分した上で、巡航速度  $V_c$  との関係を見たのが図6-19である。巡航速度  $V_c$  と加速時単位距離当たり  $Z_{v3}$  で2次の関係が見られる。

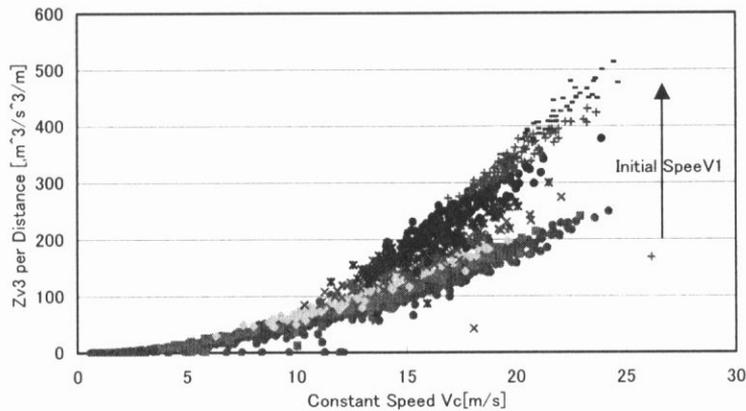


図6-19 巡航速度  $V_c$  と加速時単位距離当たり  $Z_{v3}$  の関係

そこで、初速度別に  $V_1$  別に原点を通る 2 次関数で回帰し、2 次関数の係数を初速度  $V_1$  の関数となるようにすることにより、以下の算出式を導出した。走行軌跡から得られた値と以下の計算式により算出した値との相関図を図 6-20 に示すが、非常に高い精度で推計される。

$$\text{算出式： } Z_{v3A/dist}^* = (0.0230V_1 + 0.452)V_c^2 \quad (6-36)$$

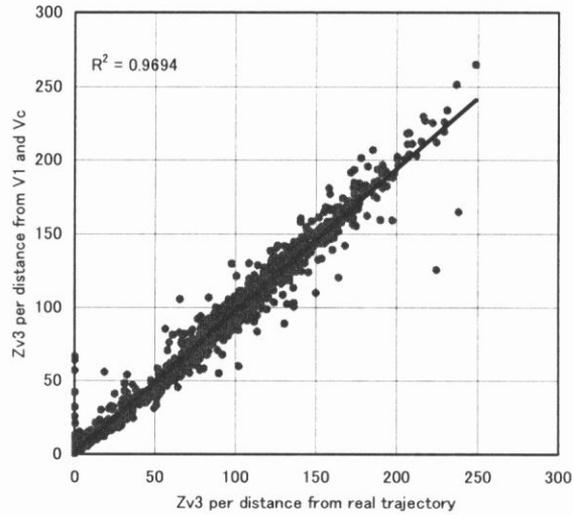


図 6-20  $Z_{v3}$  の実測値と推計値の関係

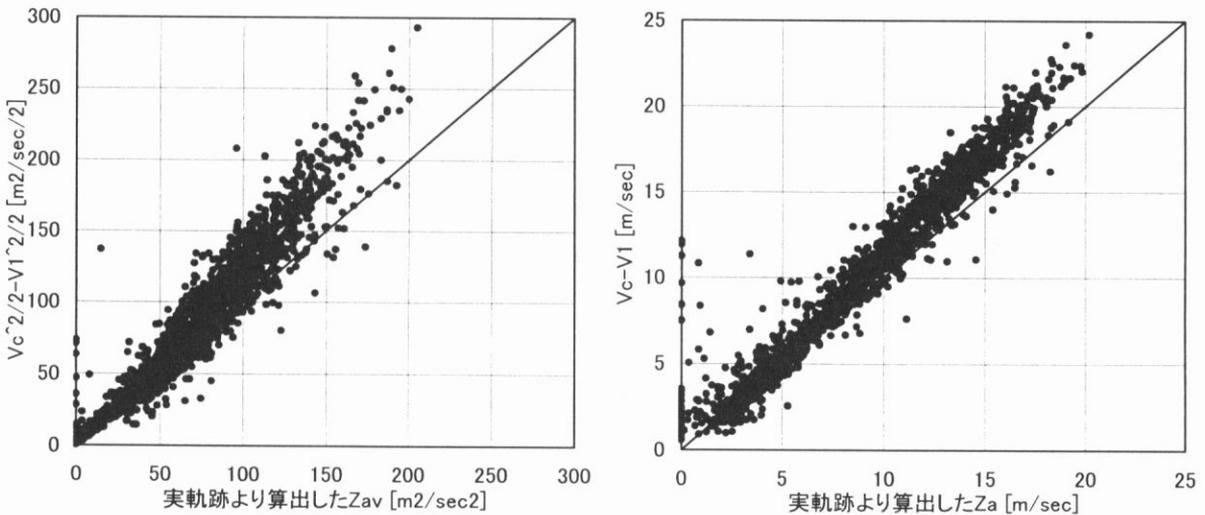
(2)速度変動項  $Z_{av}$ ,  $Z_a$ について

速度変動に関する項 ( $Z_{av}$ ,  $Z_a$ ) は、全区間で駆動走行していれば初速度と巡航速度  $V_c$  から計算可能である (第4章4.3.3参照) が、初速度  $V_1$  と巡航速度  $V_c$  から計算した値とデータから計算した結果を比較すると、図6-21のように偏りが生じている。この原因は、加減速範囲を加減速度一定、すなわち台形型速度プロファイルとして設定していることによる部分が多い。つまり、一般に速度変化はS字形になることが知られている<sup>3)</sup>。すなわち、発進時は緩やかに加速し、すぐに最大加速度に達した後、目標速度に近づくとつれて加速度がまた緩やかになる。しかし、ここで台形型速度プロファイルを設定して最小自乗法で範囲を設定したため、実際の軌跡では、巡航走行と判定された時刻に巡航速度以下で緩やかに加速している状態となっている。そのため初速度と巡航速度から算出したものは実軌跡から算出したものよりも過大な値となる傾向にある。もっとも、実軌跡では加速途中の加減速 (小刻みな加減速を繰り返しながら加速する状態) の影響も含まれるが、その場合は実軌跡から算出した値の方が大きくなる。従って、図6-21の偏りは台形型速度プロファイルによる部分が多い。

そこで、以下のような推計式を導入した。この推計式を用いることにより、図6-22のように比較的精度良く  $Z_{av}$ ,  $Z_a$  を推計することが可能となる。

$$Z_{av} = (0.0108V_1 + 0.498)(V_c^2 - V_1^2) - (0.000379V_1 + 0.00617)(V_c^2 - V_1^2)^{3/2} \quad (6-37)$$

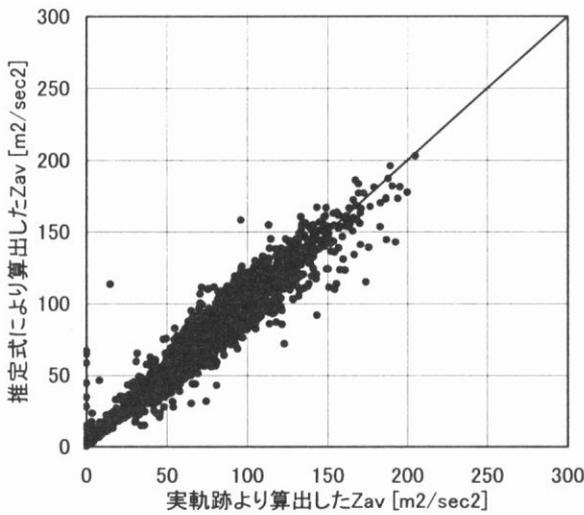
$$Z_a = (0.0120V_1 + 0.873)(V_c - V_1) \quad (6-38)$$



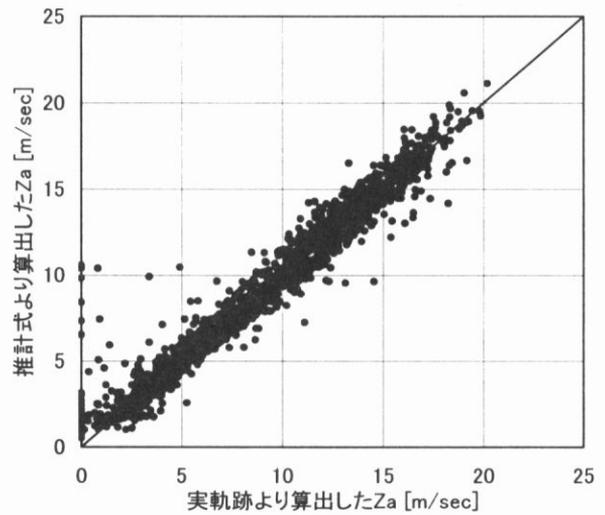
左図： $Z_{av}$

右図： $Z_a$

図6-21 加速時  $Z_{av}$ ,  $Z_a$  とモデル式からの導出値の関係



左図： $Z_{av}$



右図： $Z_{\alpha}$

図6-22 加速時  $Z_{av}$ ,  $Z_{\alpha}$  について実測値と推定値の関係

### (3) 走行時間項( $T_{r+}$ , $T_{r-}$ )について

加速区間においてはほぼ全ての時間駆動走行であると言える ( $Z_v$  に関する分析もこの結果を支持している)。従って、モデルの基本的な考え方に従い、加速区間においては加速時間が全て  $T_{r+}$  となる。逆に言うと、 $T_{r-} = 0$  であるとする。

これにより大きな誤差が生じることはないが、加速時間において多くの時間、非駆動走行を行うような状況下（渋滞流中において加減速を小刻みに繰り返すような状態）等を考慮するような場合や、下り勾配で非駆動走行でも加速されるような状況下では考慮する必要がある。