

# 高速道路における工事時の自動車車両のミクロ的な合流挙動特性解析

内山久雄<sup>1</sup>

<sup>1</sup>正会員 工博 東京理科大学教授 理工学部土木工学科 (〒278 千葉県野田市山崎2641)

高速道路上では夜間工事時の飽和交通量以下での交通流の時でさえ工事規制による渋滞が発生している。こうした渋滞はある意味で人為的に惹起されていると言えなくもなく、それ故その軽減は急務であると考えられる。本論文は、この検討のために必要不可欠な車線規制部手前での自動車を実際にどのように合流しているか、すなわち個々の車両に着目した合流挙動特性を詳細に分析することを目的としている。時々刻々変化する個々の車両の走行軌跡を効率的にしかも精度高く取得するシステムを開発し、合流開始から終了に至る時間の経過に対応した先行車、合流車、追従車を1組として、これら車両の相対的な位置関係からミクロ的な車両の合流挙動を確率事象として明示することを試みる。

**Key Words :** traffic jam caused by repair work, vehicle merging behavior, time space graph, probabilistic distributed running characteristics

## 1. はじめに

都市内高速道路では維持・補修のための工事が頻繁に実施されるようになってきた。これらの工事は比較的交通量の少ない夜間に実施されることが多いが、それにも拘わらず渋滞が発生している状況が多く見られる。この飽和交通量以下の交通量でさえ渋滞が発生する原因として、車線規制部手前での車両の合流が円滑に行われていないことが挙げられる。このような渋滞は換言すれば人為的な渋滞と言えなくもなく、それ故この軽減は急務であると言わねばならない。このためには、車線規制部手前で自動車を実際どのように合流しているのか、すなわち個々の車両に着目した合流挙動特性を詳細に分析することが必要である。しかしながらこれを達成するためには、時々刻々変化する膨大な自動車の位置座標を能率的に取得することが条件となる。そのため本研究では、まずはじめにビデオ撮影により得られる自動車のアナログデータをデジタル変換するシステムを開発することにより、車線規制部手前の自動車の走行軌跡データを効率的に取得することを試みる。次いでこうして得られる走行軌跡データから、先行車、合流車、追従車を1組として合流開始から合流終了に至る時間の経過に対応した車両の位置データを抽出し、車線規制部手前での自動車のミクロ的な挙動を車両の相対的な位置関係から明示し、この結果を合流挙動特性として確率的に表現することを試

みる。

## 2. 合流挙動の分析に関する従来の研究

工事渋滞や事故渋滞は別として、高速道路の交通渋滞は通常合流部や織り込み区間などのボトルネックで生じるので、最近ではこれらのボトルネックを主対象として交通挙動の解明がなされてきている。こうしたボトルネックの交通容量解析として片倉は文献<sup>1)</sup>で次のように3つのアプローチがあると要約している。第1のアプローチは交通現象を観測し、大量のデータを得て統計的解析によって交通容量やサービス水準を決定していく方法である。第2はトラフィックシミュレーションによる解析方法であり、また第3は、対象とする交通現象を表現する理論モデルを構築し、交通特性値や目的とする変数について解析する方法である。どのアプローチをとるにせよ基本的な合流挙動データが必要とされるが、初期の頃に蓄積されたデータにより合流部の交通特性をある程度は解明し得たものの、合流部の設計、運用の指針を得るにはそれだけでは必ずしも十分とは言えないと指摘している。

自動車の合流挙動の観測は、よりよい合流部の幾何構造を探ることを目的に始められ、我が国でも高速道路の開通に伴い当初は交通流の実測結果に基づく現象解析<sup>2)~4)</sup>が中心に次のような観点からなされた。すなわち車頭時間変化や合流ギャップの分布

に基づいた最小ギャップ等の閾値の算出や、また合流部前後の速度及び密度の小時間変動に基づく自由走行時と拘束走行時の間の遷移状態の説明が試みられた。これらは合流部の解析として着目すべき重要な指標とそれらの相対関係を明示しようとしたという意味で先駆的な研究であると位置づけられよう。また同時期ギャップアクセプタンスの観測結果に基づく調査研究が実施され<sup>5)</sup>、その後の我が国の急激なモータリゼーションによってボトルネックが顕在化するに至り、合流や織り込みの現象をギャップアクセプタンスの確率モデルとして表現する試みが巻上らによってなされてきた<sup>6)~8)</sup>。しかしながら、これらの分析に用いられたデータは個々の自動車のミクロ的な挙動データではなく、5分間交通量といった形で集計されたデータであった。この意味から、合流挙動の現象はある程度マクロ的に解析せざるを得ず、いみじくも文献<sup>7)</sup>での記述、すなわち「複雑な合流時の自動車の動きを理論的に追跡していくことはほとんど不可能であろう<sup>9)</sup>」に見られるように、マクロ分析の限界を示唆しているかのようである。

個々の自動車のミクロ的な挙動を扱うにはトラフィックシミュレーションが適しているが、たとえ合流ロジックを想定し得たとしてもこれを検証するための挙動データを取得することが難しく、この点に課題が残されている。例えば森川らは合流部のシミュレーションモデルを開発<sup>10)</sup>しているが、合流するために必要な速度を50km/hと設定せざるを得ない点がそれである。さらにこのモデルは松本らによって織り込み現象にも拡張されたが<sup>11)</sup>、個々の自動車の合流ロジックはそのままにして、織り込みの判断や車線変更の判断を実態調査結果に整合させるというルーチンを付け加えて改良を図ったモデルである。したがって汎用性のあるシミュレーションモデルの構築のためには、換言すれば車両挙動の一般的な特性の分析のためにも、実現象の再現性の検証のためにも、合流時のミクロ的な車両挙動を表現するデータを大量に取得することが必要条件であることには言を俟たない。

交通流観測データという観点からは、車両感知器による定点の断面の情報が最も一般的で最も頻繁に利用される交通流データである。こうした感知器データは5分間交通量等に集計された形での活用が基本であるため、合流挙動の分析もこれまで述べてきたようにある程度マクロ的にならざるを得ないこともまた事実である。近年はビデオカメラを用いた撮影調査も実施されるようになったが、後述する方法を除けばこれも目視によって5分間交通量等をカウントするといういわば感知器データを補完するよう

な利用方法<sup>12)</sup>が多い。これに対して航空写真を用いて時間的に連続する交通流を追跡する試みもなされ、巻上らは数多くの自動車の走行軌跡図を同一画面上に表示することに成功している<sup>13)~15)</sup>。またビデオ画像からも同様な走行軌跡図が越らによって作成されている<sup>16)</sup>。さらにこの走行軌跡図に基づいて作成される密度コンター図<sup>17)</sup>や速度コンター図<sup>18)</sup>を併用することにより、ショックウェーブ現象の存在や、その伝搬プロセスのパターンを視覚的に表示し、ボトルネック解消のための有益な情報を提供している。この意味で従来とは異なった一歩進んだ方法として評価に値する研究ではあると考えられるが、自動車のミクロ的な走行挙動をまとめて1つの図面上にマクロ表示した段階に留まっており、走行軌跡図を個々の自動車の挙動に注目して活用する余地は大きく残されていると言える。

一方ビデオを用いた計測については、その光学的な機能を十分活用した方法も提案されている。今田らは写真測量の原理を応用し、中心投影された2次元のビデオ画像を3次元の測地座標へ変換するシステム<sup>19)</sup>を開発した。中村らはカルマンスムージングアルゴリズムを導入することによりこれを発展させ<sup>20)</sup>、変換された測地座標の点列として表現される個々の自動車の走行軌跡の平滑化に成功している。中村らはさらにこれらの走行軌跡データから得られる自動車相互の車頭距離の相対変化率を指標とした織り込み区間のシミュレーションモデルを開発するところまで発展させている<sup>21)</sup>。この研究は、シミュレーション手法が主流となると予見した片倉の指摘<sup>22)</sup>とも一致する方向の研究であり、かつ時々刻々変化する自動車の走行特性の動的な変化を直接モデル化しているという点では画期的な研究であると評価できよう。しかしながら次の点に課題が残されていると考えられる。それらは、①ビデオ画像データの読み取り、すなわち車両の中心点の特定とデータ取得の効率、②合流時における車頭距離以外の車両相互の相対特性の時間変化の分析、である。

こうした視点に立ち、本研究ではより精度高くより効率的に走行軌跡データを取得するシステムの構築を試みると同時に、合流時の車両相互の相対関係の時間変化に焦点をあてた合流挙動のミクロ的な特性を探ることとする。

### 3. 走行軌跡データ取得システムの開発

#### (1) システムの概要

近年のビデオ装置の小型化、低価格化、高性能化は、撮影場所の空間制約を大幅に緩和したり、夜間

の撮影に対してさえも解像度の高い画像が確保できるなど、ビデオの利活用の自由度を大きく増加させている。こうした背景から、本研究では夜間時の首都高速道路の交通流を撮影したビデオ画像から効率的に個々の自動車の走行軌跡データを取得するシステムを開発することにする。システム開発に際してはデータ取得の効率化を念頭に置き、ワークステーションとしてNeXTdimensionコンピュータを利用している。システム全体の概要は図-1に示す通りであり、大別してビデオ画像上で自動車の位置を特定すること、この位置を画像座標として表現すること、画像座標から測地座標に変換すること、測地座標の点列として得られた自動車の走行軌跡を平滑化することからなっている。

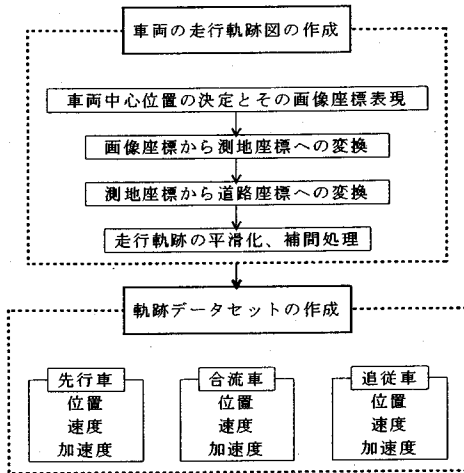
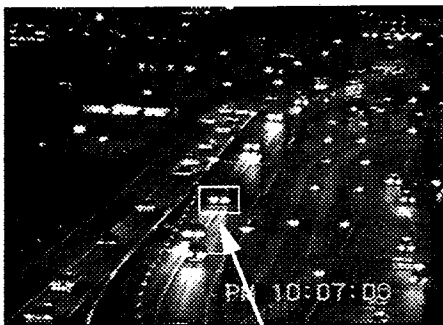


図-1 走行軌跡データ取得システムの概要

## (2) ビデオ画像上の車両の位置

ビデオ画像を一定時間間隔（本研究では1秒）ごとに静止させ、ワークステーションのA/D変換機能を用いて640×480ピクセルの静止画ファイル（TIFF形式）を作成し、これを時刻tの「原画像」



ヘッドライトの部分画像

図-2 時刻tの原画像

と呼ぶことにする（図-2参照）。

各時刻の原画像から車両のヘッドライト部分を切り取り、これを「部分画像」として同じ形式のファイルを作成する。部分画像が原画像の下流側から何番目の車両に対応しているかを車種別、車線別に調べ、部分画像ファイルに車両のインデックスとしてこれらの情報を付与しておく。さらに図-3に示されるように、この部分画像を2値化処理し、左右のヘッドライトの重心位置を車両の中心として計算し、その点の縦及び横方向のピクセル番号を求めておく。この縦及び横のピクセルからなる座標系を画像座標系と呼ぶことにすると、車両の中心位置はしたがって画像座標上の縦及び横方向のピクセルの番号で表示されることになる。

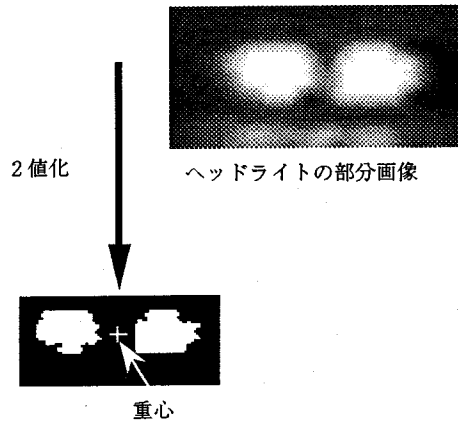


図-3 部分画像の2値化と重心算出

## (3) 画像座標から測地座標への変換

2次元の画像座標から3次元の測地座標に変換するには写真測量の標定原理<sup>23)</sup>が応用されるが、その基本的な考え方は次の通りである。すなわち、ビデオの撮影場所に想定される画像座標上の1点（車両の中心の画像）から出た光線がビデオカメラのレンズ中心を通り、そのまますすぐ進んだ後に、平面として表現される道路上に結像すると考えて絶対標定が行なわれる。画像座標系の標定要素（測地座標系との座標原点間の距離及びオイラー角）を求めするため、ビデオ画像上に同時に写し込まれている測地座標既知の不動点、例えば道路上のポールやビル等の建築物のコーナー等、を設定する。斜めに撮影された画像であることを考慮に入れ<sup>24)・25)</sup>、射影変換式を用いて画像座標を測地座標に変換する。具体的かつ詳細な変換方法は紙面の制約により省略せざるを得ず文献<sup>26)</sup>に譲るが、不動点として選んだ13点全てに対する画像座標上での中等誤差は0.99 (mm)、また13点のうち道路上に設定した6点に

対する測地座標上での中等誤差は 2.3 (m) であり、この種の標定としては十分許容できる精度を有していると言える。

#### (4) 車両軌跡の補間処理及び平滑化

車両の走行軌跡を得るため車両位置の測地座標はさらに道路のセンターラインを座標軸とする1次元の道路座標に書き換えられる。図-4は、合流車、先行車、追従車の3台を1組とし、これら車両の1秒ごとの時系列道路座標の点列を直線で結んだ軌跡を例示したものであり、合流車が追い越して合流している様子を示している。図-4上段の走行軌跡からは、先行車の影によりヘッドライトが特定できなかった等に対応して部分的に不連続ではあるが、全体としては滑らかな合流挙動をよく表示している

言えよう。これに対して、中段の速度軌跡、下段の加速度軌跡からは、離散的な挙動として表現されており、非現実な結果となってしまっている。これらはビデオ画像の各ピクセルの発光輝度の誤差、画像座標の歪曲誤差、座標変換に伴う標定誤差あるいは1秒というサンプリングインターバル等に起因すると考えられるが、少なくともこの段階で車両の中心をビデオ画像上で特定する際の人為的誤差が介入する余地が全くないということは特筆すべき本システムの特徴である。そこで上述の各種の誤差の影響を最小化すると同時に観測値の得られなかった区間を補間するためにカルマンスムーズアルゴリズムを適用することにする<sup>20)・27)</sup>。なおこのアルゴリズムの特徴は次の3点に要約できる<sup>28)・29)</sup>。第1に通常のラグランジェ補間やニュートン補間、スプライ

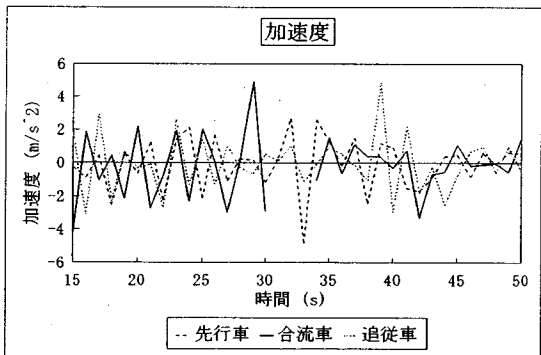
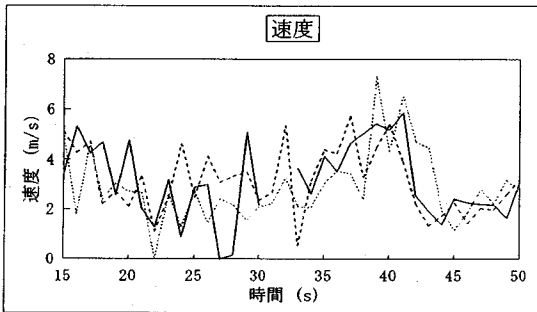
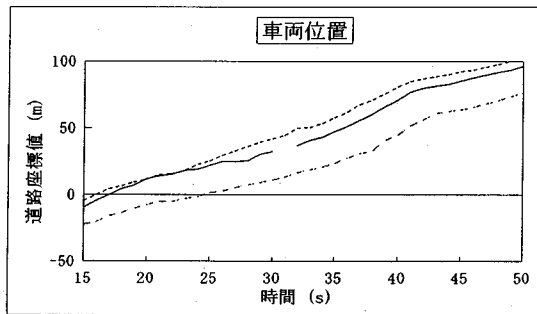


図-4 走行軌跡図 (平滑化前)

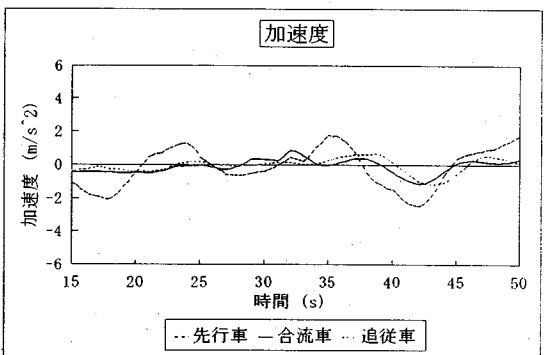
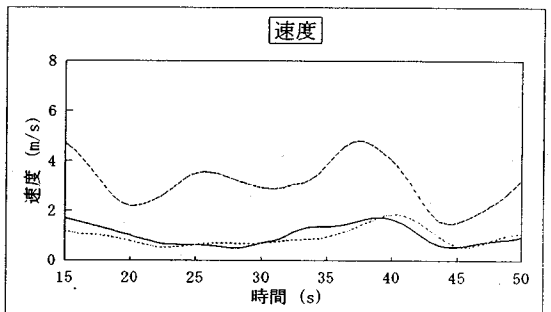
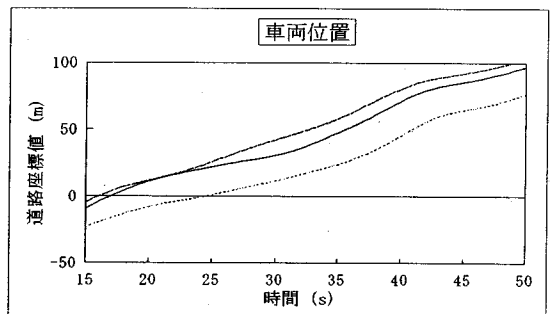


図-5 走行軌跡図 (平滑化後)

ン補間等と異なり、運動量を表す物理量の相互関係及び測定値と物理量の真値の関係がわかれば測定値の精度に応じて最確値が推定できる。第2に座標値のみならず速度、加速度の平滑化も同時に行うことができ、また第3に平滑化と同時に観測値のない1/3秒単位時刻においても補間値を算出できる。このアルゴリズムを介在させることにより、車両の位置のみならず、速度、加速度の軌跡も、図-5に示されるように同時に補間され平滑化されることになる。

#### 4. 合流時の車両相互間の走行データ

##### (1) 観測区間の概要

首都高速道路3号線下り渋谷オランプ付近と、5号線上り護国寺オランプ付近の工事規制開始部手前の2つの区間において、工事開始時刻から終了時刻までの交通流に対してビデオ撮影が実施された。図-6にそれぞれの区間の平面図とビデオ撮影地点が、表-1に撮影実施日時や工事規制時間等が示されている。

これらの区間に設置されている車両感知器データから得られる交通量観測結果<sup>30)</sup>によると、3号線の15分間交通量は工事規制区間内の池尻オランプ

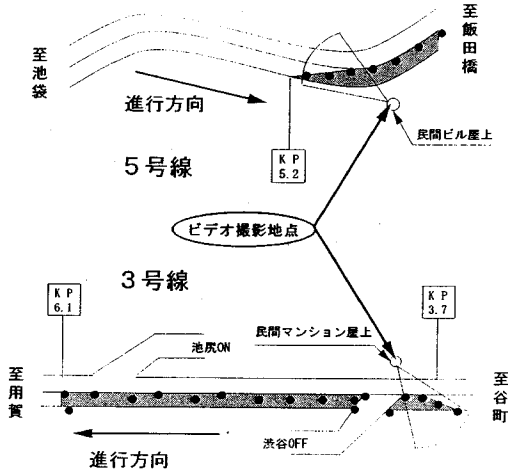


図-6 ビデオ撮影区間

表-1 撮影実施日時

規制区間	区間長	撮影日時	規制時間
3号線下り	2.4km	1990年10月9日(火) ～10月10日(水)	20:30～3:40
5号線上り	0.8km	1992年11月30日(月) ～12月1日(火)	21:00～4:00

に約150台(15分)の流入交通量があるため、規制区間内では約350台(15分)捌けているものの工事規制区間手前では約200台(15分)であった。また当該区間手前ではほとんどの時間帯で走行速度が10(km/h)前後の先詰まり状態の渋滞が生じており、軽減していく様子が見え始めるのは3時を過ぎてからであった。

一方5号線の15分間交通量は工事規制区間手前で約300台(15分)、区間内では約350台(15分)であり、この差は当該区間内の護国寺オランプの流入交通量約50台(15分)に対応している。21時の工事規制開始に伴い走行速度が10(km/h)未満の渋滞が発生し、23時頃には約1.5kmの渋滞長となったが、ほぼ1時間で解消し、午前0時以降は規制区間手前で70(km/h)以上の定常的な走行速度に回復し、その後渋滞は生じていない。

##### (2) 分析データのプロフィール

撮影されたビデオのアナログ画像は走行軌跡データ取得システムを適用することにより、先行車、合流車、追従車の3台を1組とする走行軌跡データセットとしてデジタル変換され、1,194のセット数が得られた。しかし、1台1台が譲り合いながら合流せざるを得ない完全に拘束された状態では、個々の車両に合流に際しての自由度が全くないと考え、5 km/h以下での走行時のデータは以下の分析から除外することにする。また先行車、合流車、追従車の3台が同時に得られていない不完全なデータセットも除外すると、最終的に分析対象としたセット数は806となった。

合流車が合流する際、先行車、追従車との位置関係により次のように分類される。すなわち、①加速合流：合流車が隣接車線上の車両を追い越して合流するパターン、②等速合流：合流車が隣接車線上の先行車及び追従車との位置関係を保ちながら合流するパターン、そして③減速合流：合流車が隣接車線上の車両に追い越されて合流するパターンである。表-2には取得された走行軌跡データセット数が道路別、合流パターン別に示されている。

表-2 走行軌跡データセット数

合流パターン	3号線	5号線	計
加速合流	195	18	213
等速合流	302	224	526
減速合流	53	12	65
計	550	254	804

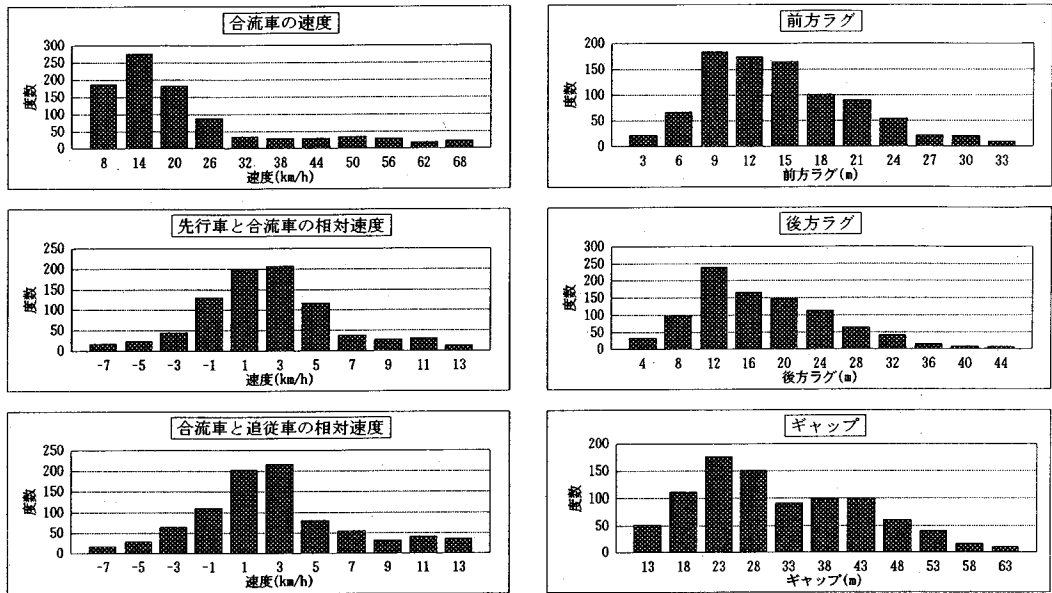


図-7 各指標の度数分布

この走行軌跡データセットから合流を開始してから終了するまでの間の1秒毎の各車両の速度、加速度、テーパー後端（完全に1車線に絞られる地点）からの距離、及び各車両間の相対関係を示す指標、すなわち相対速度、相対加速度、ギャップ（先行車と追従車の車頭距離）、前方ラグ（先行車と合流車の車頭距離）、後方ラグ（合流車と追従車の車頭距離）が得られ、こうした指標に基づく分析が可能になる。なおここでは合流開始地点を合流車の右ヘッドライトがセンターラインにかかった地点、合流終了地点を合流車の左ヘッドライトがセンターラインを離脱した地点としており、極めて限定された範囲でのミクロな合流挙動が追跡されることになる。

(3) 走行特性把握のための予備的な検討

合流可能かどうかの判断を決定づけている要因が何であるかを探る第一歩として、まさに合流しようとしている時の動的に変化する車両相互間の相対関係を概観することにする。そのためここでは①合流車の速度、②先行車に対する合流車の相対速度（速度差）、③合流車に対する追従車の相対速度（速度差）、④ギャップ、⑤前方ラグ、⑥後方ラグの6つの指標を用いて統計的な検討を試みる。したがって②および③の相対速度の指標は正および負の符号が出現する。図-7は、データセット数に大きな偏りがあり、その上工事規制区間手前での渋滞の程度も異なる3号線と5号線のデータ全てを用い、図-5

に示された先行車、合流車、追従車の走行軌跡図から直接得られる上記指標の1秒ごとの値をプールして作成した度数分布図である。この図より特に合流車の速度やギャップの分布はいわゆる正規分布等の系統的な分布とは大きくかけ離れていると言わざるを得ない。このことは前述のように3号線にしる5号線にしる工事開始後の渋滞が発生している状況からそれが解消し定常的な走行状況に至るまでを分析対象としており、合流地点での交通流が自由流と渋滞流の両方から成る混合流であると推察されるからである。なお3号線と5号線を別々に抽出しても同様な傾向が見られるため、以下では2つの観測区間を合わせて解析することにする。一方表-3にはこれら指標間の相関係数が示されているが、指標相互間には何らかの相関関係が存在すると言わざるを得ず、合流時の走行特性を明確に把握するためにはさらに踏み込んだ検討が強く要求される。

表-3 指標間の相関係数行列

	MVL	VFM	VMB	FORE	BACK	GAP
合流車の速度	MVL	0.61	0.63	0.53	0.35	0.52
先-合の相対速度	VFM		0.35	0.51	0.17	0.40
合-追の相対速度	VMB			0.44	0.19	0.37
前方ラグ	FORE				0.41	0.82
後方ラグ	BACK					0.85
ギャップ	GAP					

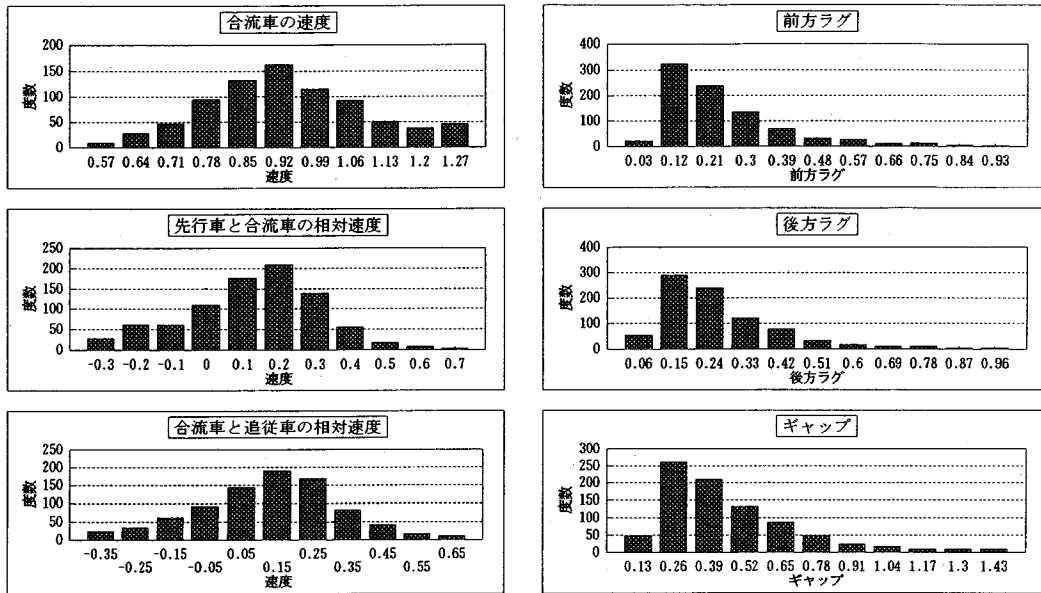


図-8 基準化された指標の度数分布

## 5. 合流挙動特性の確率表現の試み

### (1) 指標の基準化と度数分布

合流時の走行特性をより顕著な形で明示すべく、先の6つの指標に対して考えられ得るいくつかの指標で基準化することを試みる。何回かの試行錯誤を経て、位置（距離）の次元を持っている指標は先行車のテーパー後端からの距離で、速度の次元を持っている指標は先行車の走行速度で、すなわち先行車の走行特性によって無次元量として基準化すると、図-7に対応する度数分布は図-8に示されるようにその分布形状を大きく変える。これらの各分布について $\chi^2$ 検定による既知の分布形への適合度検定を行った結果、表-4に示されるように距離に関する指標は指数分布に、速度に関する指標は正規分布

表-4  $\chi^2$ 検定結果

	分布	$\chi^2$ 値	自由度	検定結果
合流車の速度	正規	14.208	6	1%採択
先一合の相対速度	正規	8.248	6	5%採択
合一追の相対速度	正規	10.815	6	5%採択
前方ラグ	指数	2.109	5	5%採択
後方ラグ	指数	7.352	5	5%採択
ギャップ	指数	4.144	5	5%採択

自由度6、有意水準5%の $\chi^2$ 値 12.592

自由度6、有意水準1%の $\chi^2$ 値 16.812

自由度5、有意水準5%の $\chi^2$ 値 11.070

自由度5、有意水準1%の $\chi^2$ 値 16.086

に適合し、基準化されたこれらの指標が系統的な確率分布に従うことが確認された。

### (2) 指標間の独立性、従属性の検定

先行車の走行特性で基準化された指標が互いに独立であるか従属であるかを明らかにするため無相関検定を行うことにする。表-5はこの検定結果を一覧表にまとめたものであり、表-3で示されたオリジナルの指標間の相関関係と比較するまでもなく、指標間の独立・従属関係が極めて鮮明に識別されている。

表-5 指標間の独立・従属関係

◎：独立、\*：数式上完全な負の相関

(表内の数字は相関係数)

	MVL	VFM	VMB	FORE	BACK	GAP
合流車の速度	MVL	*	◎	◎	◎	◎
先一合の相対速度	VFM		◎	◎	◎	◎
合一追の相対速度	VMB			◎	◎	◎
前方ラグ	FORE				0.91	0.98
後方ラグ	BACK					0.98
ギャップ	GAP					

特にギャップ、前方ラグ、後方ラグといった車頭距離関連の互いに相関のある指標は基準化することによって、互いに高い従属関係にあることが際だって強調されている。これは先行車のテーパー後端までの距離が短くなればなる程、すなわち合流車線が

狭められるに伴って、これらの指標は相対的に大きな値を示す傾向を持つので、この互いに従属となる性質が顕著になることを意味している。一方速度に関しては、合流車の速度及び合流車と追従車の相対速度の先行車の速度に対する比が独立であることを示しており、速度の絶対値に着目しがちであったこれまでの分析手法に一石を投じるものである。すなわち速度の絶対値ではなくその相対値としての速度の比で合流現象がより明確に説明される可能性を示唆していよう。さらに車頭距離関連の基準化された指標と速度の比が互いに独立であるということも、車頭距離と速度の関係を議論する上で興味深い新たな知見が提示されたと言えよう。いずれにしても以上より合流現象の解明には先行車の走行特性（テーパー後端からの距離と速度）が極めて大きな役割を果たしていることが指摘される。

### (3) 確率事象としての合流時の走行特性

以上の検討の結果、合流時の走行特性を表現する各指標は以下のような性質を持つ確率事象として捉えることが可能であると要約される。すなわち、

①ギャップ、前方ラグ、後方ラグについては先行車のテーパー後端からの距離で基準化することにより、指数分布に従う確率事象として表現でき、しかもこれらの3つの指標は互いに極めて高い従属関係を保っている事象である。

②合流車の速度、合流車と追従車の相対速度は、先行車の速度で基準化すると、互いに独立な正規分布に従う確率事象として表現されると同時に、これらの速度の比は車頭距離関連の基準化された指標とも独立な事象である。

③また本稿では割愛したが、加速度に関する指標についても先行車の加速度によって基準化すると、速度と同様に互いに独立な正規分布として表現され、車頭距離関連の基準化された指標とも独立な確率事象である。

## 6. むすび

本研究で開発した走行軌跡データ取得システムは、夜間という限定はあるものの時々刻々変化する交通流の動的で膨大なデータを効率的にしかも精度高く取得できることを示し得た。しかしながら、図-4から明らかなように速度、さらには加速度について取得された軌跡データは離散的であり、例えばサンプリングインターバルをもっと短くとる等精度改善の余地はまだ残されよう。ここではマニュアルで行っている連続する時間断面での同一車両の認知

に対してはパイロット的な研究<sup>31)</sup> 段階ではあるがすでにその自動化への検討がなされている。

この走行軌跡データ取得システムを活用した合流挙動の分析は本稿で示した通り、先行車の車両特性（速度・テーパー後端からの距離等）を介在させることにより、各指標を確率事象として認識可能なことが明示された。今後合流車の先行車に対する詳細で時系列的な追従挙動が明らかにされれば、車線変更地点におけるシミュレーションモデルのロジックの作成に大きな示唆を与えると期待できる。たとえこの時系列挙動に対して何らかの仮説を置かざるを得ないとしても、シミュレーションによる各車両の挙動結果と確率モデルから得られるそれとを照合することにより仮説の妥当性を検証することも可能である。

車両位置そのものの軌跡データは別としても速度や加速度の軌跡データの精度高い取得や、他の車線規制地点におけるデータを用いた本分析結果の普遍性の検証を始めとして、大型車と小型車の走行特性の相違、合流パターン別の合流挙動の相違、完全な拘束合流時の扱い等さらに詳細な検討の余地はもちろん残されている。しかしながら本研究での成果は時間的に変化する合流挙動の解明のみならず、この成果を活用したシミュレーションモデルの開発を促し、さらに具体的な夜間時の工事渋滞軽減策の検討に大きく貢献することが期待できると結論づけられよう。

謝辞：本研究は平成4年度、平成5年度の首都高速道路公団での研究会（座長：大蔵泉横浜国立大学教授）「首都高速道路の交通工学・交通経済に関する基礎的研究」の中で実施されたものである。このような機会を与えて下さり、かつ貴重な助言を頂戴した研究会のメンバー各位に感謝する次第である。ただ走行軌跡データ取得システムの開発から合流挙動の分析に至る手法及びその結果についての責任は全て著者が負うべきものである。また著者の研究室の当時の大学院学生であった中山健氏、殿村元秀氏、現大学院学生の石渡勝氏のデータ取得から解析に至る献身的な協力なくして本研究の達成はあり得なかった。このことを付記するとともに、3氏の貢献に対して深甚なる謝意を表する。

## 参考文献

- 1) 片倉正彦：織り込み区間に関する研究の現状と課題、土木学会論文集、No.440/IV-16, pp.36-37, 1992.
- 2) 岩崎征人：高速道路合流部の交通現象解析、交通工学 Vol.4, No.1, pp.10-18, 1969.



- 3) 岩崎征人：交通流の現象解析－合流部前後の交通流に関して－，交通工学，Vol.6, No.2, pp.22-32, 1971.
- 4) 栗本謙，荻野弘，巻上安爾，渡辺信次：小牧ジャンクション合流部の走行挙動解析，第2回交通工学研究発表会論文集，1974.
- 5) Donald R.Drew： *Traffic Flow Theory and Control*, McGraw-Hill, pp.173-222, 1968.
- 6) 巻上安爾，安達靖夫，末田元二：高速道路改築に伴う合流部の合流車線長について，土木学会論文集，No.371/ IV -5, pp.133-142, 1986.
- 7) 巻上安爾，松尾武：流入確率に基づく都市高速道路入路接続方式の評価について，土木学会論文集，No.389/ IV -8, pp.93-103, 1988.
- 8) 巻上安爾，松尾武：多重分流を考慮した流入確率の算定方式について，土木学会論文集，No.413/ IV -12, pp.93-103, 1990.
- 9) 前掲 7), pp.-99.
- 10) 森川美信，松本健次郎：合流部シミュレーションモデルの開発，交通工学，Vol.22, No.6, pp.31-44, 1987.
- 11) 松本健次郎，高橋秀喜，井上淳一，辻光弘：織り込み区間長評価のための交通シミュレーションモデルの開発，土木学会論文集，No.440/ IV -16, pp.61-69, 1992.
- 12) 例えば，桑原雅夫，越正毅，鈴木隆：首都高速道路の織り込み区間の交通容量と走行速度に関する実証的研究，交通工学，Vol.26, No.2, pp.39-42, 1991. など
- 13) 巻上安爾，坂本破魔雄，林昌親：航空写真に基づいた交通流解析の一手法について，土木学会論文集，No.347/ IV -1, pp.153-162, 1984.
- 14) 巻上安爾，松尾武，松原武司：阪神高速道路環状線堂島区間の交通現象実態と容量解析についての研究，交通工学，Vol.23, No.5, pp.7-22, 1988.
- 15) 巻上安爾，豊田建，松尾武：阪神高速道路における織り込み区間の交通実態と交通流解析，土木学会論文集，No.440/ IV -16, pp.41-50, 1992.
- 16) 越正毅，桑原雅夫，赤羽弘和：高速道路のトンネル，サグにおける渋滞現象に関する研究，土木学会論文集，No.458/ IV -18, p.67, 1993.
- 17) 前掲 15), p.44.
- 18) 前掲 16), p.67.
- 19) 今田寛典，菊谷久嗣，門田博知：ビデオを用いた交通流の計測法について，土木学会第41回年次学術講演会講演概要集，pp.257-258, IV -129, 1986.
- 20) 中村英樹，桑原雅夫，鈴木隆，越正毅，赤羽弘和：首都高速道路織り込み区間での交通流観測と運転挙動解析，第12回土木計画学研究・講演集，土木学会，pp.61-67, 1989.
- 21) 中村英樹，桑原雅夫，越正毅：織り込み区間の交通容量算出シミュレーションモデル，土木学会論文集，No.440/ IV -16, pp.51-59, 1992.
- 22) 前掲 1), pp.38.
- 23) 中村英夫，村井俊治：測量学，技報堂，pp.270-272, pp.289-291, 1979.
- 24) 村井俊治：斜め空中写真の解析的偏歪修正，写真測量とリモートセンシング，Vol.17, No.1, pp.5-17, 1978.
- 25) 村井俊治，小林健，中村秀至：手持ちカメラによる斜め空中写真の解析的偏歪修正，写真測量とリモートセンシング，Vol.18, No.3, pp.16-25, 1979.
- 26) 中山健：車線閉塞時の自動車交通流の合流挙動解析，東京理科大学内山研究室修士論文，pp.62-85, 1993.
- 27) 赤羽弘和，大庭孝之，桑原雅夫，越正毅：車両の走行挙動計測システム，第11回土木計画学研究・講演集，土木学会，pp.63-70, 1988.
- 28) 片山徹：応用カルマンフィルター，朝倉書店，pp.116-132, 1995.
- 29) J.S.Meditch： A Study of Data Smoothing for Linear and Nonlinear Dynamic Systems, *Automatica*, Vol.9, No.2, pp.151-162, 1973.
- 30) 首都高速道路公団保全施設部，(株)オリエンタルコンサルタンツ：高速道路工事規制付近の交通流解析報告書，1992. など
- 31) 宮田卓，内山久雄，喜多紀州：画像処理を利用した同一車両認識システムに関する研究，土木学会第48回年次講演会講演集・第4部，pp.678-679, 1993.

(1995. 10. 19受付)

## MICROSCOPIC CHARACTERISTICS OF VEHICLE MERGING BEHAVIOR CAUSED BY REPAIR WORK ON EXPRESSWAY

Hisao UCHIYAMA

Traffic jams caused by repair work at night on the Expressway are seen even less traffic flow than that of the capacity. In order to illustrate this phenomenon, vehicle movements by time at a merging zone, where usually one of lanes is regulated to pass, must be traced microscopically. This study is (1) to develop the system with high accuracy and efficiency for obtaining time spacial data of running vehicles at the merging zone, (2) to analyze a set of 3 different trajectories of the merging, the foregoing and the following vehicles simultaneously, and (3) to derive some probabilistic distributed characteristics from the time serial locational relations of the above set of vehicles.