

ビデオ画像を用いた都市高速合流部における合流挙動に関する分析*

Vehicle Merging Behavior Analysis on Urban Expressways Using Video Image Data

渡辺 将光**, 中村 英樹***

By Masamitsu WATANABE** and Hideki NAKAMURA***

1. はじめに

高速道路において、合流部は合流車と本線車との走行軌跡が交錯し、交通需要が多い場合には渋滞を引き起こし易くなるなど、サービス水準上、交通容量上ネックとなる重要な区間である。合流部における車両挙動に関する研究は今日まで多くの研究がなされており、高速道路流入部におけるギャップアクセプタンス挙動の解析において流入挙動は、流入部の残存加速車線長や本線走行車との相対速度に影響を受けること¹⁾、流入タイミング調整行動を考慮したモデルの構築により、実態により即した現象記述ができるという報告もある²⁾。しかし、これまでの研究では、流入挙動を考える際に、速度及び加速度を一定として考えているモデル構造の式がほとんどであり、合流車と被合流車が相互に及ぼしあう速度変化や加速度変化を表現するに至っていないのが現状である。

流入タイミングの制御などによる合流部の交通容量やサービス水準の管理施策を評価するためには、合流車及び被合流車双方の車両挙動を詳細に分析した上で、合流挙動やブレイクダウンの契機になるような挙動を精緻にモデル化することが不可欠であり、そのためには、合流車と被合流車の相互作用を考慮した加速度調整プロセスの表現が必要になる。

そこで本稿では、ビデオ画像データ解析ツールを用いて、ビデオ画像より合流部における個々の車両挙動を分析し、合流部における合流挙動、特に合流車の加速度調整行動をモデル化することで、主に本線車の車両挙動が合流車の加速度調整行動に与える影響について考察を行う。

2. 合流時における合流車と本線車の車両挙動分析

2.1 合流部における走行挙動軌跡データ取得

車両走行軌跡データの取得には、鈴木・中村(2004)が開発したビデオ画像処理システム(Traffic Analyzer)を用いた³⁾。今回は、名古屋高速 3 号大高線(下り)高辻入口

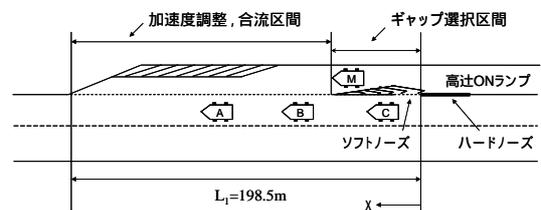


図1 分析対象区間における合流挙動

合流部のハードノーズ端から加速車線終了地点までの区間(図 1)において、合流車と合流を行う隣接車線を走行する先行車と後続車の計 3 台の車両について、0.1 秒毎にビデオ画像上の座標を記録し、軌跡を取得した。

2.2 取得データ分析

ビデオ画像処理システムを用いて取得した軌跡データから、2 つの合流形態が確認された。これらをそれぞれ、「直近合流」(合流部側方直近のギャップに合流する形態)、「追越合流」(車両を 1 台追越してから合流する形態)と定義することにする。すなわち、直近合流とは、合流車 M が本線車 B と本線車 C の間に合流する状況を指し、本線車 B が先行車、本線車 C が後続車になる。一方、追越合流は、合流車 M が本線車 A と本線車 B の間に合流する状況をいい、本線車 A が先行車、本線車 B が後続車になる(図 1)。

直近合流と追越合流では、追越合流のときのほうが、直近合流のときよりも後続車の加速度変化が大きくなっており減速の傾向が強いこと、すなわち、合流車の合流によって減速を余儀なくされている点に注目する。

このような合流形態の違いによる合流車の加速度調整挙動を定量化するため、次章ではそのモデル化を行う。

3. 合流挙動のモデル化

合流車は合流部に到達した時点で、直近のギャップに流入するか、1 台追越してから流入するかのギャップ選択を行っており、選択したギャップに応じた加速度調整行動をとっていると考えられる。そこで、本研究では、運転者がどのギャップに流入するかという選択を合流部ハードノーズ端からソフトノーズ端までの間に行っている

*キーワード: 合流部, 車両挙動

**学生会員 学(工) 名古屋大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻
(〒464-8603 名古屋市千種区不老町, E-mail: mwata@genv.nagoya-u.ac.jp)

***正会員 工博 名古屋大学大学院助教授 工学研究科社会基盤工学専攻

るものと仮定し、運転者の直近/追越のギャップ選択の判断を非集計2項選択ロジットモデルで表現した。

また同時に、選択したギャップごとの合流車の加減速挙動が本線車の車両挙動や幾何構造から受ける影響を分析するために、直近合流、追越合流の両形態についての加速度変化を重回帰分析を行うことによって表現する。なお本研究では、図1に示すようにソフトノーズ端に合流車Mが到達した時点において、合流車Mが本線車Bと本線車Cの間に存在する状況のみをサンプルとして使用した。これは、Cより後方の本線車は、合流部の構造上、合流車からは視認できないと考えたためである。

3.1 ギャップ選択モデル

表1は、時刻 t における運転者の直近/追越のギャップ選択を表現する非集計2項選択ロジットモデルのパラメータの推定結果である。有意な説明変数は、追越ギャップ、直近ギャップ及び本線車Bと合流車Mとの車頭距離相対変化率である。また、ここで説明変数とした追越、直近ギャップとは、それぞれ本線車AとB、本線車BとCの車頭距離である。車頭距離相対変化率とは、中村ら(1992)によって提案された、対象とする2車間の速度差をこれら2車間の車頭距離で除すことにより得られる指標であり、これら車頭距離相対変化率が正の場合は車間が広がりつつあり、さらに値が大きい程その広がる速度が大きいということを意味する⁴⁾。

表1より、まず追越ギャップのパラメータの符号が負になっているのに対して、直近ギャップのパラメータの符号は正になっている。さらに係数を比較すると、追越のギャップのほうが大きな値をとっており、単純に比較すると、直近のギャップが追越のギャップの1.6倍の大きさ以下であれば追越ギャップの方を選択するということを意味する。またもうひとつの説明変数として、本線車Bと合流車Mとの車頭距離相対変化率が選ばれている。今回用いたサンプルは、合流車Mが本線車Bよりも後方に存在する場合のサンプルのみを利用したため2車間の相対距離は正となる。よって2車間の相対速度が負になるとき、すなわち合流車Mの速度より本線車Bの速度が大きいときは直近のギャップを選択し、逆の場合は追越のギャップを選択することを意味する。

表1より、直近/追越のギャップ選択の的中率は概ね良好である。ただし本研究では、ハードノーズ端からソ

表1 パラメータ推定結果

説明変数	パラメータ推定値 (t値)
定数項	2.519(2.65)
追越ギャップ(m)	-0.275(-7.10)
直近ギャップ(m)	0.173(4.23)
合流車Mと本線車Bとの車頭距離相対変化率(1/s)	7.73*10 ⁻² (3.04)
サンプル数	286
尤度比	0.545
的中率	82.5

フトノーズ端という短い区間をギャップ選択区間と仮定しているが、運転者はソフトノーズ端を通過した後もギャップ選択をしていることもあると考えられる。今後、様々な幾何構造や交通量の状況下でのサンプルを増やすと共に、合流車が選択するギャップ選択モデルを直近と追越の2項選択から、さらにもう一つ前や後ろのギャップも考慮に入れた多項選択のモデルに拡張し、さらに随時ギャップ選択を行えるようなより現実性の高いモデルに再構築することが求められる。

3.2 合流車の加速度推定モデル

次に、ある時刻 t における直近合流、追越合流の両形態について、合流車の $t + \tau$ 秒後の加速度を以下に示す説明変数を含んだ式で重回帰分析を行うことによって表現する。

$$a(t + \tau) = \theta_1 a(t) + \theta_2 V(t) + \theta_3 \phi_f(t) + \theta_4 \phi_r(t) + \theta_5 L(t) + \theta_6 D_{HV} + \varepsilon \quad \dots(1)$$

ここに、

$a(t)$: 時刻 t における合流車の加速度(m/s²)

$V(t)$: 時刻 t における合流車の速度(km/h)

$\phi_f(t)$: 時刻 t における先行車と合流車との車頭距離相対変化率(1/s)

$\phi_r(t)$: 時刻 t における合流車と後続車との車頭距離相対変化率(1/s)

$L(t)$: 時刻 t における合流車の残存加速車線長(m)

D_{HV} : 先行車大型車ダミー

ε : 定数項

$\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6$: パラメータ

である。ここで、 τ は反応時間を考慮して0.2sと設定した。使用したデータは、名古屋高速3号大高線(下り)高辻入口合流部のハードノーズ端から合流終了までの区間の軌跡データである。

表2にパラメータ推定結果を示す。これより、まず直近合流、追越合流どちらの場合についても、加速度、速度、残存加速車線長は有意であり、パラメータの符号は加速度が正、速度及び残存加速車線長が負となっている。これは、時刻 t における合流車の加速度に対して、速度が大きくなると加速度が減少し、また残存加速車線長が短くなるにつれて減速度が小さくなっていくことを示している。すなわち合流部に大きい速度で流入してきた車両ほど急減速を迫られ、またその程度は、流入直後のほうが大きいことを意味する。

また、直近合流の場合は先行車と合流車、合流車と後続車との車頭距離変化率が共に有意となった。これはすなわち、2車間が広がりつつあると減速傾向にあり、狭まりつつあると加速傾向にあることを意味している。

一方、追越合流の場合は先行車と合流車との車頭距離変化率が有意になった。これは先行車との関係について、直近合流と同様なことが考えられる。また、先行車大型車ダミーが有意になり、そのときのパラメータは負であることから、先行車が大型車であると、加速度が低下することを表している。

また構築したモデルの性能を検証するため、今回ハードノーズ端で計測した加速度を初期値とし、表3に示す各パラメータを用いて、実測と推定の加速度の時間変化データの比較を行った結果を図2、図3に示す。

図2より、直近合流のほうは、加速度の符号が負の場合も正の場合も、推定値が実測値に比べて数値的に小さい値を示しており、推定したモデルでは加速度の細かい変化を表現しきれてはいないということがわかる。

また得られた加速度の推定値を用いて、速度、位置を推定し、実測値と比較してみる(図4、図5)。図中の破線はハードノーズ端と合流完了位置を示すものである。図4、図5に示すとおり、速度、位置に関しても、加速度で生じた推定値と実測値との誤差の影響を受けて多少の誤差が見られるが、ある程度の精度は確保しているものと思われる。

4. シミュレーションモデルの構築に向けて

合流部の上流から発生する車両の車頭時間分布に応じて、合流車がギャップを選択し、選択したギャップに対

表2 パラメータ推定結果

説明変数	パラメータ(t値)	パラメータ(t値)
	直近合流	追越合流
時刻 t における合流車の加速度(m/s^2)	0.987(989.1)	0.990(643.0)
時刻 t における合流車の速度(km/h)	$-9.0 \times 10^{-4}(-10.5)$	$-1.1 \times 10^{-3}(-15.7)$
時刻 t における先行車と合流車との車頭距離相対変化率($1/s$)	$3.9 \times 10^{-3}(2.96)$	$6.2 \times 10^{-3}(4.62)$
時刻 t における合流車と後続車との車頭距離相対変化率($1/s$)	$-6.2 \times 10^{-5}(-4.54)$	$-1.5 \times 10^{-5}(-0.38)$
時刻 t における合流車の残存加速車線長(m)	$-1.7 \times 10^{-4}(-18.7)$	$-1.4 \times 10^{-4}(-9.04)$
先行車大型車ダミー	$1.1 \times 10^{-3}(1.41)$	$-1.4 \times 10^{-2}(14.0)$
定数項	$6.7 \times 10^{-2}(28.2)$	$8.5 \times 10^{-2}(33.8)$
修正済み決定係数	0.999	0.999
サンプル数	1972	600

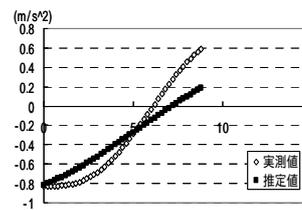


図2 加速度の実測値と推定値の比較 (直近合流)

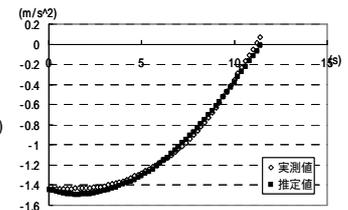


図3 加速度の実測値と推定値の比較 (追越合流)

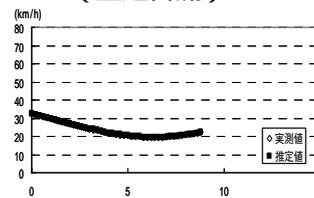


図4 位置・速度の実測値推定値の比較 (直近合流)

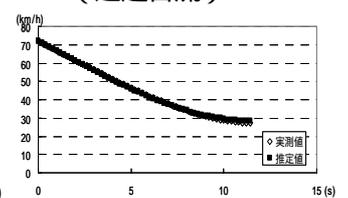


図5 位置・速度の実測値と推定値の比較 (追越合流)

して加速度を調整しながら合流を行う。その際、本線車の車両挙動は合流車の車両挙動に影響を受けながら変化していく。このような実現象に則したシミュレーションを構築することで、どのような合流挙動や本線車の挙動が容量低下や速度低下を引き起こすかという分析を行うことができると思われる。ここでは、現行モデルをシミュレーションに適用する際の課題と、合流部シミュレーションに必要な不可欠な本線車の挙動について述べる。

4.1 現行モデルのシミュレーション適用の際の課題

今回の加速度調整モデルは、あらかじめ流入するギャップが決まっている場合に適用されるモデルである。すなわち、合流車が本線車の車両挙動に応じて選択するギャップを変更することは考慮していないこととなり、このモデルをシミュレーションに適用すると、実現象とは異なる車両挙動を示す結果をもたらす可能性がある。さらに今回は、ビデオの画角の関係上、合流を開始した地点を判断することが困難であったため、ハードノーズ端から合流完了時までのデータを一貫して用いることとした。そのため、合流開始時から合流完了時までの挙動を詳細に表現しきれないため、この部分には仮定を用いて表現せざるを得ないという課題もある。

4.2 本線車の車両挙動の分析

合流部の車両挙動を取り扱う上では、合流車の挙動のみでなく本線車の挙動の分析も重要になる。特に合流車の後続車に当たる車両は、合流挙動によって追従状態を余儀なくされることも考えられ、本線交通に影響を及ぼすことが推測される。また、本線車の挙動としてもう一つ重要な挙動に避走挙動があり、他の本線交通に影響を与えていると考えられるため、これまでいくつかの研究がなされてきた。本線車の避走挙動が合流車や本線車に与える影響について、数量化理論 類を用いて分析した研究⁵⁾や、流入・避走挙動とマクロな交通特性と関連付けることで、流入部での相互作用を考慮した交通特性推定モデルを構築し、交通条件の変化が交通流に及ぼす影響などを評価する研究⁶⁾のほか、近年では情報提供が行われた際の合流部での本線車と合流車の相互作用の研究⁷⁾などの例がある。ただし、これらの研究は、速度を全車一定にする仮定を用いた相互作用の分析や、避走をするか否かの分析に留まっており、いつ避走するのか、どのような軌跡を描くのか、などの詳細な追従挙動や避走挙動を表現するに到っていない。また先行避走に至っては、データ収集が極めて困難なこともあり、まだほとんど解明されていないのが現状である。

追従・避走挙動を詳細に分析することは、合流車と本線車の車両挙動の相互作用を表現する上で非常に重要である。本稿では合流車の挙動を表現するに留まっているが、今後は本線車の追従挙動、避走挙動の分析も行っていきたい。

5. おわりに

本研究ではビデオ画像解析ツールを用いて取得した軌跡データから位置、速度、加速度などを算出し、それらを用いて、合流車のギャップ探索行動と加速度調整行動をモデル化し、被合流車の車両挙動との影響について分析した。また構成したモデルの性能について考察した。その結果、ギャップ選択モデルにおいては、追越ギャップ、直近ギャップ及び本線車Bと合流車Mとの車頭距離相対変化率が有意になり、合流車はギャップ選択を行う際、ギャップ長や合流車と本線車との車頭距離変化相対率に影響を受けることが明らかになった。また、合流車の加速度推定モデルにおいて、直近合流の場合は、合流車は、先行車と後続車の両方の関係を意識し、追越合流の場合は、先行車との関係を強く意識して加速度調整行動をとっていることが明らかになった。

今後は、実際に微視的なシミュレーションモデルの構築を行い、それによって表現される車両挙動を実現象と比較・考察する。また、より実現象に近い分析を可能にするシミュレーションの構築のために必要となるデータを補完し、モデルを再構築することでモデルの再現精度向上を図っていきたい。そして、流入タイミングの制御などによる合流部の交通容量やサービス水準の管理施策評価を検討していくことが課題である。

<参考文献>

- 1) 喜多秀行・畠中康行：高速道路流入部におけるギャップアクセプタンス挙動の解析，第11回交通工学研究会発表会論文集，pp.9-12, 1991
- 2) 喜多秀行・原田裕司：流入タイミング調整行動を考慮した流入挙動モデル，土木計画学研究・論文集 Vol.12, pp.673-679, 1995.8
- 3) 鈴木一史・中村英樹：交通流解析のための簡便な多機能ビデオ画像処理システムの開発，第24回交通工学研究会論文報告集，pp.69-72, 2004.10.
- 4) 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.4/ -16, pp.51-59, 1992.1
- 5) 高山純一・中山昌一朗・宇野伸宏・飯田恭敬・玉元将裕・住友拓哉：一般道路合流部の交通錯綜における避走挙動解析，土木計画学研究・論文集 Vol.19, pp.847-852, 2002.9
- 6) 喜多秀行・幸坂謙之介・福山敬：流入・避走行動の相互依存性を考慮した高速道路流入部のマクロ走行特性推計法，土木計画学研究・論文集 Vol.18, pp.903-908, 2001.9
- 7) 清水哲夫・屋井鉄雄・三室徹：AHSへの対応行動を考慮した都市高速合流部の運用評価分析システムの開発とその運用，土木学会論文集，No.758/ -63, pp.11-21, 2004.4