

画像データを活用した都市高速合流部における合流ギャップ選択モデル*

A Model of Gap Choice Behavior at an Urban Expressway Merging Section by Using Video Image Data*

柳原正実**・宇野伸宏***・塩見康博****・洪多禧*****・倉内文孝*****

By Masami YANAGIHARA**・Nobuhiro UNO***・Yasuhiro SHIOMI****・Dahee HONG*****

・Fumitaka KURAUCHI*****

1. はじめに

(1) 研究の背景と目的

都市高速道路の合流部では、ドライバーは前方の車両のみならず隣接車線の車両の挙動に対しても的確な判断・反応が求められ、単路部と比べてより大きな運転負担が生じる。そのため追突事故や渋滞等、交通安全性および効率性の面で多種多様な問題が生じやすい。交通の円滑性・安全性の向上に資する効果的な対策を講じるためには、精緻な車両挙動データに基づいて渋滞や事故の原因となる車両挙動を明確化し、交通現象を的確に再現する交通流モデルの構築が必要となる。

そこで本研究では都市高速道路合流部のビデオ画像から抽出した車両走行軌跡データに基づき、車両合流挙動の解析を目的とする。合流時には、車両は自らが合流すべき車間を選択（合流ギャップ選択挙動）し、その後選択した車間への流入を実現するための速度調整を行う

（合流ギャップ流入挙動）という2段階の挙動を取るものとする。本稿では合流挙動モデル構築の前段として前者に焦点を当て、合流ギャップ選択モデルを構築する。さらに、構築したモデルを用いて、ギャップ選択時の車両相互作用の特性について車線ごとの違いも考慮して考察を行う。

(2) 既存研究のレビューと本研究の位置づけ

内山¹⁾は車両軌跡データを用いて、「合流を開始する」と「合流を見送る」という2つの選択を2項選択ロジットモデルで表現しており、Kita²⁾は合流挙動を、非ゼロ和・非協力の2人ゲームとして表現しており、ファジィ推論や離散選択モデル以外にも合流挙動を表現するアプローチが提案されている。このように、これまで合流するか道を譲り見送るかという合流時点を変更する単純なオンランプの2項選択行動分析については多くの研究が存在するが、合流を見送ることが困難であり、強制的に合流させられる本線合流部における、合流時点数秒前の複数ギャップ選択行動に関する研究はほとんど存在しない。そこで、合流時点までの時間軸を考慮した本線合流部における合流ギャップ選択モデルの構築を目指す。

2. 合流車両走行軌跡データの概要

(1) 車両走行軌跡データの抽出

本研究では阪神高速道路1号環状線と12号守口線が合流する区間を分析対象とし、2005年8月30日8:49:00～9:04:00の15分間に連続する11台のビデオカメラで撮影された画像から抽出した車両走行軌跡データを分析に用いた。当該時間帯は自由流状態と渋滞流状態が混在している時間帯であり、走行車両が相互に干渉し合う、複雑な交通状況にあると考えられる。本研究の分析対象区間を図1に示す。本研究では特に図中の守口線第2車線と環状線第3,4車線上の車両のデータを用いる。

*キーワード：交通流，交通量計測，ITS，画像データ

**学生員，京都大学大学院工学研究科

(京都市西京区桂キャンパスCクラスター C1-438

TEL: 075-383-3237,

E-mail: yanagihara@trans.kuciv.kyoto-u.ac.jp)

***正員，京都大学経営管理大学院

****正員，京都大学大学院工学研究科

*****学生員，京都大学大学院工学研究科

*****正員，岐阜大学工学部

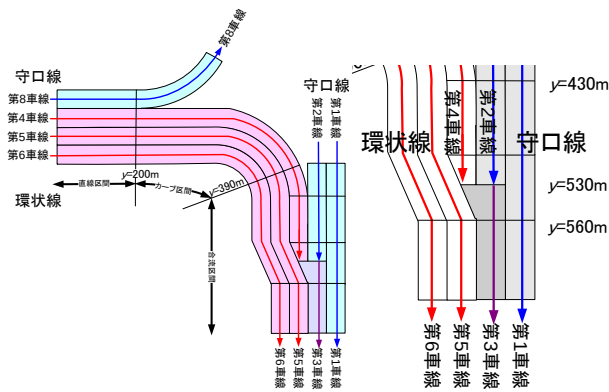


図1 分析対象区間と合流部拡大図

(2) 合流車両の定義

本研究ではまず、車両走行軌跡データより分析対象である合流車両を抽出する。当該合流区間は2車線とも十分に交通量が高く、一方を主道路、他方を従道路と位置づけることは難しい。よって便宜上、ギャップを選択し合流していくとみなす車両を「合流車両」と呼び、そのギャップ選択挙動をモデル化する。このときの合流車両が存在する車線を「合流車線」、他方を「走行本車線」と呼ぶ。ただし、走行本車線に合流車線が結合しているとみなし、2車線が完全に統合される地点より下流側も走行本車線と呼ぶ。

その上で、合流車線から流入した車両の内、走行本車線からの車両に対して進行方向に30[m]以下、進行方向と垂直な方向（横方向）に5[m]以下となるまで接近した車両を合流車両と定義し、その距離に初めて接近した時点合流完了時点と定義した。

(3) 合流車両の抽出

定義に基づき分析を行った結果、環状線から流入してきた環状線合流車両が161台、守口線合流車両が202台、あわせて363台の合流車両データを取得した。各車両のギャップ選択の傾向を把握するため、合流完了からt秒前各時点において選択したギャップを図2に示す。各時点で直近ギャップとは走行本車線前方車両と走行本車線後方車両の間のギャップであり、前方ギャップは走行本車線前方車両の前方のギャップ、後方ギャップは走行本車線後方車両の後方のギャップである。（図3参照）ここで合流完了t秒前において、選択ギャップが前方ギャップであるということは、合流車両が当該時点における走行本車線上の直前の車両と、さらにその1台前の車両で構成される車間に合流したことを意味する。その他の選択ギャップも同様に考える。図より各時点でほぼ全ての車両が、前方、直近、後方ギャップのいずれかを選択していることが確認できる。

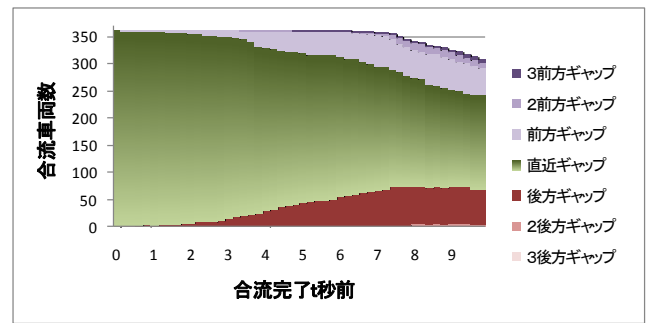


図2 選択ギャップ別の合流車両数

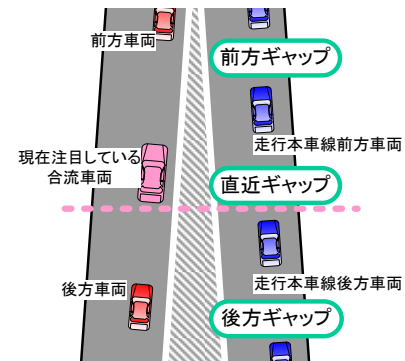


図3 ギャップ定義図

最終的な合流ギャップの選択結果は一つであるが、ドライバーは初めからそのギャップに入ることを選択しているとは限らない。最終的に合流ギャップ決定された時点は、合流完了の数秒前にあると考えられる。また、2つ以上離れたギャップに入る際でも、まずは近くの前、後方ギャップに入ることを選択していると考えことは妥当である。つまり、ドライバーは直近、及び直前、直後のギャップに入ることが可能か否かを逐次的に判断しながら走行し、合流完了前のある時点において最終的な判断を下していると推測される。

そこで以下では、ドライバーが前方、直近、後方ギャップのなかで3項選択を逐次的に行っていると仮定し、合流ギャップ選択モデルを構築する。

3. 合流ギャップ選択モデルの定式化

(1) 説明変数の選択

合流ギャップ選択モデルを構築するにあたって、まず交通状況を示す各変数と選択ギャップ番号（前方= 1, 直近 = 0, 後方 = -1）との相関関係を分析する。表1に合流完了6秒前時点での分析結果を示す。まず、合流車線の車両数と選択ギャップ番号との相関が有意な負の値を示しており、合流部における合流車線上の車両数が多いほど後方のギャップが選択されやすい傾向があることがわかる。各車両の相対進行方向距離、相対進行方向速度は合流車両を中心とした位置関係・速度関係を示す指標であり最も重要な指標であると考えられ、それら

と選択ギャップ番号との相関も高い。ただし、相対距離、相対速度の値は変数の対象の車両から分析対象の車両の変数の値を引いた値を指す。

表1 ギャップ番号との相関係数

データラベル	相関係数
走行本車線 車両数	0.085
合流車線 車両数	-0.171
合流車両 進行方向速度[m/s]	0.256
合流車両 進行方向加速度[m/s ²]	-0.132
合流車両 大型車ダミー	0.043
前方車両 大型車ダミー	0.042
前方車両 相対横方向距離[m]	-0.058
前方車両 相対進行方向距離[m]	0.145
前方車両 相対進行方向速度[m/s]	-0.322
後方車両 大型車ダミー	-0.008
後方車両 相対横方向距離[m]	0.158
後方車両 相対進行方向距離[m]	-0.177
後方車両 相対進行方向速度[m/s]	0.018
走行本車線後方車両 大型車ダミー	-0.018
走行本車線後方車両 相対横方向距離[m]	-0.077
走行本車線後方車両 相対進行方向距離[m]	-0.148
走行本車線後方車両 相対進行方向速度[m/s]	-0.328
走行本車線前方車両 大型車ダミー	-0.055
走行本車線前方車両 相対横方向距離[m]	-0.086
走行本車線前方車両 相対進行方向距離[m]	-0.316
走行本車線前方車両 相対進行方向速度[m/s]	-0.456
5%有意	

(2) モデルの定式化

以上に基づき、直近、前方、後方いずれかのギャップを選択する3項選択ロジットモデルとして、合流挙動を表現する。各ギャップを選択する効用は以下の式で表されるとする。なお、前方、後方ギャップは環状線合流車両と守口線合流車両で一对一に対応するため、それぞれの効用関数の定数項に差はないと考えた。

$$V_{Front\ Gap} = \beta_1 z_1 + \beta_2 z_2 + \beta_3 z_3 + \varepsilon_1$$

$$V_{The\ Nearest\ Gap} = \beta_0 + \varepsilon_0$$

$$V_{Rear\ Gap} = \beta_4 z_4 + \beta_5 z_5 + \beta_6 z_6 + \varepsilon_{-1}$$

ただし

$\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \beta_5, \beta_6$: 推定パラメータ, z_1 : 前方車両相対進行方向距離, z_2 : 走行本車線前方車両相対進行方向距離, z_3 : 走行本車線前方車両相対進行方向速度, z_4 : 後方車両相対進行方向距離, z_5 : 走行本車線後方車両相対進行方向距離, z_6 : 走行本車線後方車両相対進行方向速度, ε : 誤差項

合流車両が導流帯に差し掛かった時点から合流完了時点までを0.2秒間隔で分割し、各時点でのパラメータを推定する。推定するにあたって走行本車線前方車両が遠方に離れている場合や前方車両が接近しすぎている場合において、前方ギャップは選択不可能であると考え、選択肢集合から除外している。また、後方についても同様に扱った。

4. 合流ギャップ選択モデルの推定結果

(1) 分析に用いたデータ

第2節で抽出した環状線合流車両161台と守線合流車両202台の周辺車両も含めた車両軌跡を用いて分析を行った。本稿では環状線合流車両、守線合流車両両方を用いた合流ギャップ選択モデルとそれぞれ一方のみを用いたモデルを比較分析する。

(2) モデル推定結果の時間的变化

モデル適合度を示す指標である自由度調整済み ρ^2 値の時間的变化を守口線、環状線の結果を合わせて図4に示す。いずれのデータも ρ^2 値は合流完了0~3秒前時点ではほぼ1.0となっている。これは、図2で示した様にこの時点においては、ほぼ全ての車両が直近ギャップを選択しているためと考えられる。次に、合流完了3~7秒前時点では、時間を遡る方向に進むに従ってモデル適合度が次第に減少していることがわかる。更に合流完了7秒以上前の時点では、それぞれのモデル適合度が一致しておらず、時間を遡るとともに不規則な変化をしているように見てとれる。これは、合流完了7秒以上前の時点まで遡ると2車線が壁で区切られており、他方の車線の車両が認識できない部分のデータを取り除いたために、推定に用いるデータが以前より少なくなることが原因であると考えられる。

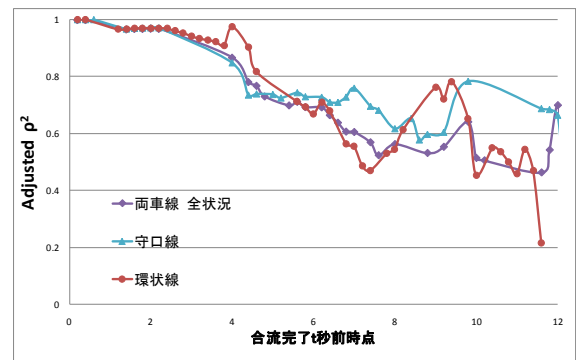


図4 モデル適合度の時間的变化

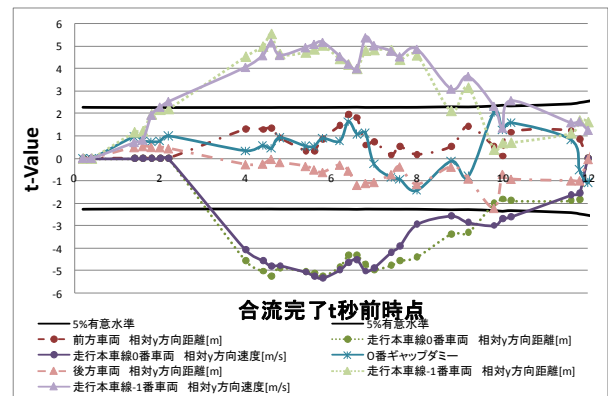


図5 有意な変数の時間的变化

合流車両の両車線あわせて推定した結果について、各パラメータの有意度を表すt値の時間的変化を図5に示す。この図より合流完了4～7秒前の時点では、走行本車線前方、後方車両の相対位置、相対速度がそれぞれ有意にギャップ選択に影響を与えることがわかる。

(3) 最終選択ギャップ決定時点

前で示したように合流完了 0～3 秒前時点では選択の余地が無く、合流完了 7 秒以上前の時点では、最終的な選択ギャップをこのモデル式では十分に説明できない可能性が考えられる。一方、合流完了 3～7 秒前時点ではモデルの有意な説明変数が多く、特に各車線の推定結果において、合流完了 4～5 秒前時点で走行本車線車両に関する説明変数が十分に選択に影響し、モデル適合度も高い値を示すことから、この合流完了 4～5 秒前時点までに最終的な合流ギャップが決定されていたと仮定する。

ここではこの合流完了約 5 秒前時点の推定パラメータ値を表 2 に示す。走行本車線前方車両の相対距離、相対速度のパラメータ値が負に有意な値を示していることから、前方ギャップまでの距離が小さく、接近している状況のとき、その前方ギャップが選択されやすいことが示された。同様に、走行本車線後方車両の相対距離、相対速度のパラメータ値が負に有意な値を示していることから、後方ギャップまでの距離が小さく、接近している状況のとき、その後方ギャップが選択されやすいことがわかる。しかし、有意になるパラメータは走行本車線車両の変数のものであり、合流車両自身と同じ車線上に存在する前方車両、後方車両相対位置の係数は合流ギャップ選択に有意な影響を与えていない。これは、前方、後方車両が合流車両に接近している状況が除外されているためであると考えられる。

表 2 最終選択ギャップ決定時点パラメータ

推定パラメータ, 説明変数	パラメータ	t値
β_1 , 前方車両 相対進行方向距離[m]	0.004	0.330
β_2 , 走行本車線前方車両 相対進行方向距離[m]	-0.421	-5.028
β_3 , 走行本車線前方車両 相対進行方向速度[m/s]	-1.107	-5.071
β_0 , 直近ギャップの選択肢固有ダミー	0.234	0.560
β_4 , 後方車両 相対進行方向距離[m]	-0.001	-0.346
β_5 , 走行本車線後方車両 相対進行方向距離[m]	0.364	4.722
β_6 , 走行本車線後方車両 相対進行方向速度[m/s]	1.064	4.942
サンプル数	236	
L(0)	-259.273	
L(β^*)	-76.578	
ρ^2	0.705	
Adjusted ρ^2	0.699	
		5%有意

(3) モデルの車線別比較

次に、車線別にギャップ選択行動の差異を比較する。図 6, 図 7 に t 値の時間的変化を示す。ここから有意な

影響のある変数の組み合わせが変化する様相も類似していることがわかる。

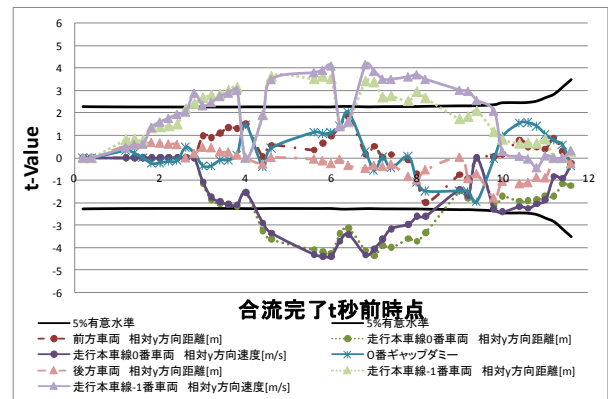


図 6 有意な変数の時間的変化（環状線合流車両）

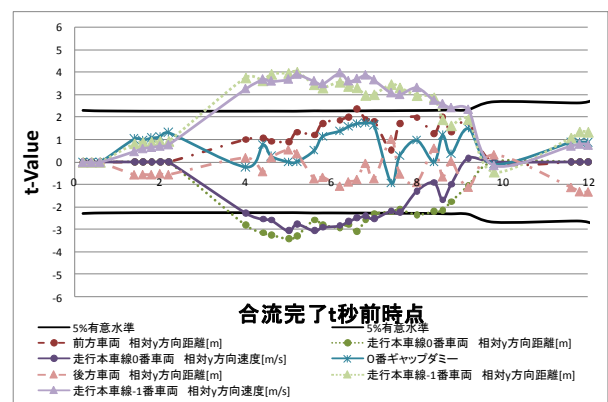


図 7 有意な変数の時間的変化（守口線合流車両）

表3, 4に最終合流ギャップ選択時点と仮定した合流完了約5秒前の合流ギャップ選択モデル推定結果の詳細を示す。どちらの推定結果も走行本車線に関するパラメータが有意な影響を示している。また、パラメータの大小もおおよそ同じであると考えられる。

表3 最終選択ギャップ決定時点パラメータ
(環状線合流車両)

推定パラメータ, 説明変数	パラメータ	t値
β_1 , 前方車両 相対進行方向距離[m]	0.005	0.353
β_2 , 走行本車線前方車両 相対進行方向距離[m]	-0.477	-4.087
β_3 , 走行本車線前方車両 相対進行方向速度[m/s]	-1.379	-4.314
β_0 , 直近ギャップの選択肢固有ダミー	0.687	1.155
β_4 , 後方車両 相対進行方向距離[m]	0.000	-0.044
β_5 , 走行本車線後方車両 相対進行方向距離[m]	0.340	3.517
β_6 , 走行本車線後方車両 相対進行方向速度[m/s]	1.462	3.816
サンプル数	134	
L(0)	-147.214	
L(β^*)	-41.210	
ρ^2	0.720	
Adjusted ρ^2	0.712	
	5%有意	

表4 最終選択ギャップ決定時点パラメータ
(守口線合流車両)

推定パラメータ、説明変数	パラメータ	t値
β_1 , 前方車両 相対進行方向距離[m]	0.023	0.911
β_2 , 走行本車線前方車両 相対進行方向距離[m]	-0.482	-3.403
β_3 , 走行本車線前方車両 相対進行方向速度[m/s]	-0.903	-3.054
β_0 , 直近ギャップの選択肢固有ダミー	0.010	0.014
β_4 , 後方車両 相対進行方向距離[m]	0.018	0.568
β_5 , 走行本車線後方車両 相対進行方向距離[m]	0.400	3.962
β_6 , 走行本車線後方車両 相対進行方向速度[m/s]	1.113	3.693
サンプル数	158	
L(0)	-173.581	
L(β *)	-43.929	
ρ^2	0.747	
Adjusted ρ^2	0.738	
		5%有意

4. 結論

最終合流ギャップは合流完了 4～5 秒前時点に決定されていたという結論が得られた。車線別の比較では、2 車線で大きな差はないことがわかった。今後は合流ギャップ選択にかかわる車両の数などの詳細な要因について分析を行う。

5. 謝辞

本研究の実施にあたり、データの収集に際しては、阪神高速道路㈱、㈱住友電気工業ならびに(社)システム科学研究所より多くのご協力・ご支援をいただいた。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 内山久雄：“高速道路における工事時の合流意思決定プロセスのモデル化”，土木学会論文集，No.625, IV-44, 29-37, 1999.7
- 2) Hideyuki Kita. “A merging-giveway interaction model of cars in a merging section: a game theoretic analysis”, Transportation Research, Part A, 33, 305-312, 1999