

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

EVALUATION OF THE TYPE OF URBAN EXPRESSWAY RAMPS BASED ON THE MERGING PROBABILITY

巻上 安爾*・松尾 武**

By Yasuji MAKIGAMI and Takeshi MATSUO

This report describes a mathematical evaluation method of merging traffic on a center ramp terminal which is often designed for urban expressways. In order to make the evaluation, the merging probability on the center ramp terminal was compared with that of an usual side ramp terminal. Traffic flow on the both ramp terminals was recorded by using TV camera. The traffic volume and speed as well as the gap distribution were measured and the acceptable gap size was determined. Then the merging probability was computed based on the gap distribution and the acceptable gap for both the center ramp and the side ramp making use of probability theory. It is found that the merging probability of the center ramp was about 10 % smaller than that of side ramp terminal. It is suggested that careful attention should be given to the design and the operation of center ramps.

Keywords : ramp terminal, traffic survey, merging probability

1. はじめに

阪神高速道路をはじめとする都市高速道路は、放射線端末あるいは入路の料金所で料金を徴収する入口徴収型の有料の都市高速道路である。端末の集約ゲートを除いてほとんどの入路でランプ手前に設けられたゲートで料金を払い、ランプを経て高速道路本線へ流入していくことになる。これらの都市型高速道路は都市内の用地の制約からランプの構造も本線の走行車線の左側から合流するサイドランプの形式と本線の追越車線の右側から本線へ合流するセンターランプが併用して用いられており、本線上の交通運用上からみて問題となる場合もでてきている。本調査研究ではこのような2つのランプ接続方式の差が合流機能に与える影響を流入のしやすさに差があるかないかという観点から評価することを試みたものである。

方法としては調査地点に阪神高速道路神戸線のサイドランプである湊川入路からの合流部を、センターランプとしては柳原の入路を選定し、テレビカメラを用いて合

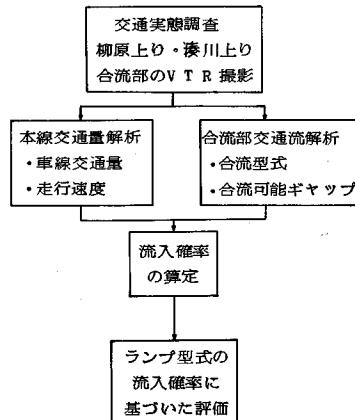


図-1 調査検討の手順

流部の交通実態調査を行い流入可能限界車頭時間を計測するとともに、流入車を受け入れる側の本線の交通流の車頭時間の分布を計測し、両者を合わせて流入確率を求め接続方式による差があるかどうかを求めたものである。本調査研究のフロー図を図-1に示す。

2. 合流交通実態調査

(1) 調査概要

サイドランプとセンターランプという接続方式の差が

* 正会員 工博 立命館大学教授 理工学部土木工学科
(〒603 京都市北区等持院北町56)

** 正会員 阪神高速道路公団業務部交通管制課長
(〒541 大阪市東区久太郎4-68)

流入確率にどのような差を与えていたかを交通の実態から評価するため、阪神高速道路神戸線の湊川入路上り線合流部と柳原入路上り線合流部を対象に、それぞれの合流部に隣接するビルの屋上からビデオカメラを用いて走行状況を録画した。図-2に両ランプの位置図を示す。

解析結果の信頼性を高めるためおののの計測地点で交通量のピーク時間帯におけるデータ数を多くしておく必要があった。このために午前中の8時30分から11時30分を解析時間帯として3日間にわたりビデオ撮影を実施した。なお録画に際しては、画面上に録画時刻を秒単位で記録している。両地点における調査時の交通は湊川において30分間の閉鎖があったものの、解析上支障となるような事故の発生や重大な渋滞は生じなかった。また、天候はあらかじめ、晴れまたは曇りの路面状態の良い日を選んで録画し、録画中雨など降ることもなく、路面状況は調査の全時間を通じて乾燥状態で、合流には全く支障のない正常な状態であった。

表-1に調査地点と調査の実施日時を示す。表-2に両地点の設計速度、加速車線長およびランプ形式等の構造上の特徴を、また図-3に両合流部の構造図を示す。

(2) 交通量と走行速度の計測方法とその結果

交通量の計測方法は、ビデオ撮影の結果得られたデータの再生画面から車線別の5分間交通量を計数器を用いて目視計測したものである。また走行速度の計測は、まず再生ビデオ画面上に合流部のノーズより上流の地点に10mごとにマーキングされた車線境界線を目印に30mの間隔を隔てて、2本の計測ラインを設け、計測対象車線上を走行する車両が、両計測ラインを通過するタイミングをパーソナルコンピューターでキーインすることによって通過時間を入力し、30mの区間長から時間を速度に演算記憶させ、1分ごとに演算集計していった。以下に述べる各種解析はすべて5分間を集計単位として実施していったが、この速度の計測は交通量の計測とともに、次節に示す解析対象時間帯の絞り込みのための判断資料を得ることを第1の目的としており、したがってサンプリングによって作業の能率化を計った。具体的には計測対象の5分間のうち、2分目と4分目の各1分間の交通流の速度を計測し、その平均値を当該5分間の平均走行速度とした。

図-4に交通量と走行速度の計測結果の一例を示す。図中の凡例に示す最多交通量と最頻交通量の記号は次節に示す車頭時間や合流可能限界ギャップの解析対象時間帯を示すものである。

(3) 解析時間基の絞り込み

表-1に示すように湊川・柳原の両合流部とともに8時間10分以上の収録が行われた。しかしながらこれらの全収録時間帯について、以下に述べる車頭時間、合流

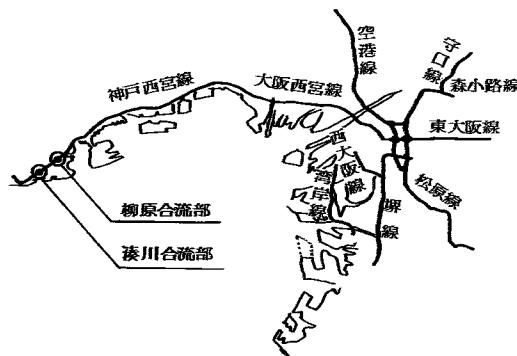


圖-2 合流部調查地點

表一 調查日時

調査地点	調査日時
猿川合流部	昭和61年5月28日 8:30-11:25
	昭和61年6月12日 8:30-11:25
	昭和61年6月19日 8:00-10:55
柳原合流部	昭和61年5月28日 8:30-11:25
	昭和61年6月11日 9:00-11:20
	昭和61年6月12日 8:20-11:15

表-2 調査地点の概要

調査地点名	渋川合流部	柳原合流部
設計速度 (km/h)	本線 60 ランプ 40	本線 60 ランプ 40
規制速度 (km/h)	本線 60 ランプ 40	本線 60 ランプ 40
加速車線長 (m)	80	80
ランプ形式	サイドランプ	センターランプ

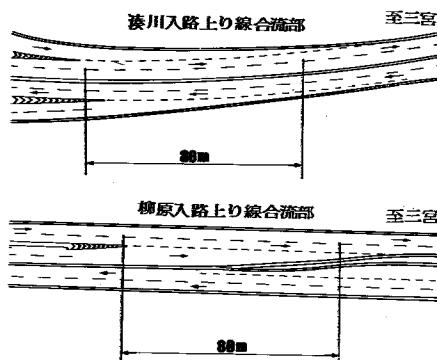


図-3 合流部の構造図

ギャップ、合流拒否ギャップ等の手間のかかる計測作業を実施することは不可能であると判断されたので、解析時間帯をある程度、絞り込む必要があった。このためまず $Q-V$ 図から渋滞領域にあると判断される時間帯のものは解析対象時間帯から除去するものとした。流入確率

による合流部構造形式の評価を試みる目的の1つには、当然設計計画上の見知を得ることも期待しており、渋滞状況下での合流実態を追求することは、この観点からは妥当なものとは考えられないと判断したことによる。

そこで阪神高速道路交通管制システムからのアウトプットを5月28日から6月13日の間の週日6日分入手し、これに基づいて神戸線上り湊川・柳原両入路の中間点にある車両検知器の設置点における車線別の5分間交通量と平均走行速度の関係を図-5に示すようにプロットした。このQ-V図を交通量が比較的少なく速度も速い自由走行の状態と判断される領域①と、交通量が多くなり速度低下がみられ渋滞領域にあると判断される領域②に分割し、さらに6月分のQ-V図から読み取れる領域①の最低速度から判断して、走行車線では平均走行速度が50km/時以下の時間帯を、また追越車線では同じく55km/時以下の時間帯は速度がかなり低下して渋滞領域に入っているものとして解析対象時間帯から除外した。以上が速度に基づいた絞り込みのルールである。

次にどの程度の交通量のレベルを想定して解析を進めていくかについての判断である。まず、自由走行領域内で、交通量が非常に多い場合の合流実態に基づく評価は当然行う必要があるが、ピーク時間帯で高速道路の利用者が最も多く遭遇するであろうと考えられる時間帯についても解析を行うことが、サービスのレベルを比較していくうえでも望ましいであろうと考えた。

このため再生ビデオの計測結果から走行車線で平均走行速度が50km/時以上、追越車線で平均走行速度が55km/時以上で、5分間交通量の発生頻度を調べ図-6を得た。同図より最頻交通量としては、サイドランプである湊川合流部では合流後の5分間交通量が90~100台、またセンターランプである柳原合流部では同じく合流後の5分間交通量が150~160台を用いればよいことが示された。

また念のため、上記の走行・追越し両車線の最頻交通量のレベルが、走行・追越し両車線上で同時に起こっているものかどうかのチェックを行った。これはサイドランプの合流現象は湊川合流部で、またセンターランプのそれは柳原合流部でそれぞれ別個に解析していくかざるを得ないとしても、上で定めた車線別最頻交通量が、単路部で250台/5分前後の断面交通量の際、通常生じている車線別交通量とほぼ対応していることが望ましいと考えたことによる。このため追越し車線上で最頻交通とその前後の交通量の範囲を図-7の凡例で示すように選び、記号を付して追跡していくところ、多少のずれは認められるものの、追越し車線上で150~160台/5分の最頻交通量が記録された時間帯の走行車線の5分間交通量は、ほぼ90~100台/5分であることが確かめられた。

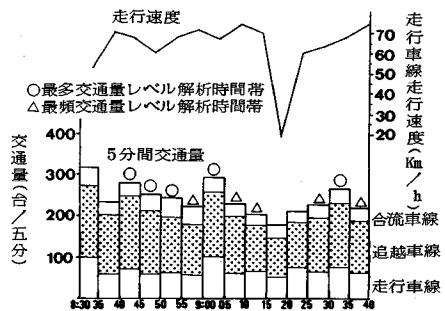


図-4 交通量と走行速度の実測例（湊川合流部 6月12日）

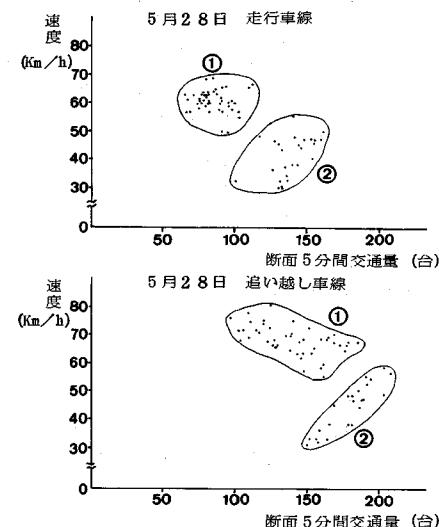


図-5 単路部のQ-V図

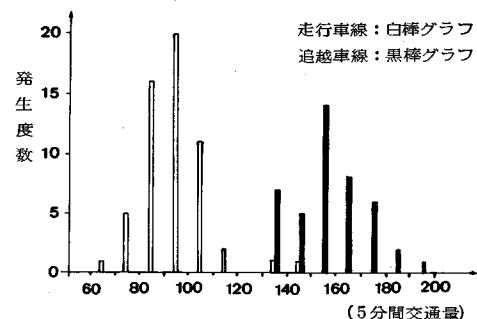


図-6 調査地点における車線別5分間交通量の分布状況

湊川・柳原両合流部の最多および最頻の両交通量レベルに対する解析時間帯数、平均5分間交通量および平均走行速度をとりまとめて表-3に示す。なお表中の平均5分間交通量は、湊川合流部は走行車線の、また柳原合流部では追越し車線のそれぞれ流入車が合流した後の5分間車線交通量の平均であり、平均走行速度も同様に該当する車線の5分間平均走行速度である。

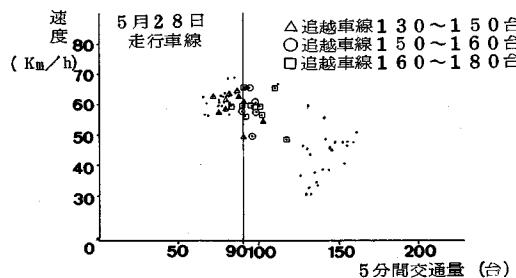


図-7 5分間交通量の車線別分布状況の対応図

表-3 解析対象時間帯の概要

合流部	交通量 レベル	解 析 時間帯数	5分間平均交通量	平均走行速度 (km/h)
			(台)	
湊川	最 頻	17	94 (28)	67.7
	最 多	18	112 (32)	64.1
柳原	最 頻	8	156 (43)	65.6
	最 多	9	179 (42)	67.0

• () 内は流入交通量で内数

(4) 車頭時間の計測方法とその結果

流入確率を算定し合流部の構造形式の差異を評価するにあたって、合流車が流入していく本線側車線の車頭時間の分布状況を把握しておく必要がある。このため湊川合流部の走行車線および柳原合流部の追越車線上で車頭時間の計測を行った。計測は該当車線の全車両（流入車を除く）とし、計測線を通過する時間をパーソナルコンピューターにキーインし、その時間間隔を同時演算させて車頭時間を記憶させた。集計は1分間にについて行い、1分間計測結果を5分間にについて0.5秒ごとのクラスに分けて集計し、車頭時間の頻度分布を求めた。

図-8に5分間計測時間帯の車頭時間の頻度分布図の例を、アーラン分布を理論分布として用いた場合の最適理論分布と併せて示した。図中の χ^2 の値は実測の度数分布に対する理論分布の適合度を検定する際求めた χ^2 の値である。

ここでアーラン分布は次の式で与えられる。

$$f(t) = \frac{\lambda}{(\lambda-1)!} (\lambda \cdot t)^{\lambda-1} \cdot e^{-\lambda t} \dots \dots \dots \quad (1)$$

パラメーターは λ と λ であるが、平均車頭時間は λ/λ で与えられるので、実際は上で述べたように試算により χ^2 の値を最小にする λ の値を求める。式(1)で示されるアーラン分布は確定することができる。この理論分布は流入確率の算定に理論値を用いて一般化する場合に用いるためのものである。

(5) 合流可能限界車頭時間

合流部での合流車の流入挙動は非常に複雑で単純に合流可能な車頭時間を求めることはできない。まず合流車

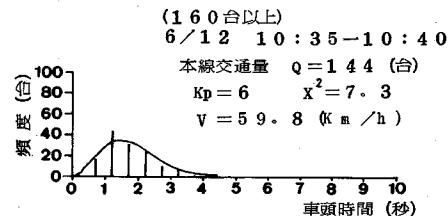


図-8 車頭時間の分布

の合流挙動をその形態上から分類し、その形態ごとに合流車が合流したギャップと合流し得なかったギャップを関連づけながら求めていく必要がある。まず合流挙動としての形態を一車合流と多重合流に分けて考える。一車合流とは、本線上の1つのギャップに合流車が1台ずつ流入していく形態をいい、多重合流は本線上の1つのギャップに2車以上の合流車の流入する場合をいう。阪神高速道路のような都市高速道路では、ランプからの流入車は取り付け街路の信号の影響などで車群として本線上に到達する場合が多く、このような多重合流は比較的多く見受けられる。本調査研究でも柳原合流部で数多く観測されたものである。

次に一車合流をさらに次のように分類した。

○非拘束合流

本線車線上、長いギャップに恵まれ合流車、本線走行車ともに相互に何の影響も与えずに合流する場合。

○拘束合流

合流車あるいは本線走行車、またそれらの双方が加減速して合流部の流れに何らかの影響を与えた場合とし、以下の3つに分類する。

高速合流：合流車が本線車線上の速度よりも高速で合流部に入り追い抜きながら合流する。

等速合流：速度は等速で併進し、本線車両に影響を与えるながら合流する。

低速合流：合流車は本線車線上の速度よりも低速で合流し、本線上の短いギャップを見送りながら合流する。

合流挙動の分類とギャップの計測は以下のようにして行った。

まず再生ビデオ画面上で合流車線ノーズ上に計測線を設ける。次にランプからの合流車のすべてについて合流形式の判定を行った後、画像をプレイバックさせて本線上の合流ギャップを計測線上で計測する。また高速あるいは低速合流の場合、合流せずに追い抜きあるいは見送りがあった場合は、合流拒否ギャップとしてそのギャップも同様に計測する。ただし合流拒否ギャップが複数となった場合、そのうち最大長の合流拒否ギャップを計測

対象として記録した。このことにより1つの一車合流に對して1つの合流ギャップと1つの合流拒否ギャップを計測することになる。以上のようにして計測していった合流ギャップ調査の集計表を一例として表-4に示す。

以上のように分類した合流形式の計測結果を個々についていくと、柳原入路では一車合流の中での見送り合流の割合が高いのに対し、湊川入路では見送り合流はかなり少ないとわかった。また高速合流はその個数もわずかで、ごく限られたものであることが示された。次に多重合流であるが、かなりの数に達している。合流台数からみると時間によって異なるが多重合流台数の方が多いケースが多くある。ただし、多重合流形態は非常に複雑で計測の方法と評価手法を早急に定め難いことがあり、今回の解析は一車合流のみを対象として検討を進めることとした。

なお、解析対象時間帯において観測されたギャップ数

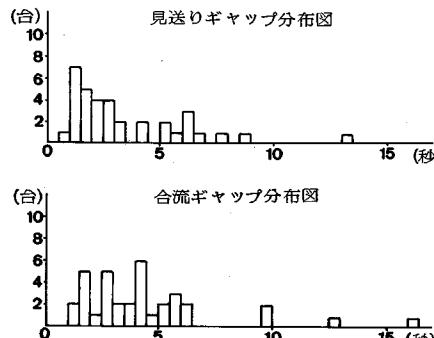


図-9 見送りギャップと合流ギャップの分布
(湊川合流車、一車低速合流最頻交通量レベル)

は、サイドランプの湊川合流部で719、センターランプの柳原合流部で413の合計1132に達する。このうち2台以上の多重合流が発生したギャップ数は湊川合流部で187、柳原合流部で134である。

図-9に湊川合流部の最頻交通レベルにおける一車合流について、その交通量別の合流ギャップと見送りギャップの分布図を示す。合流ギャップの方が見送りギャップよりも平均的に右側へずれ込んだ分布を示している。ただし、この2つの分布図からみてただちに合流可能限界車頭時間を決定することは不可能である。このため図-10に示すように、ここでは「これ以上のギャップで合流する車両の発生度数」と「これ以下のギャップで合流を拒否する車両の発生度数」が等しくなるギャッ

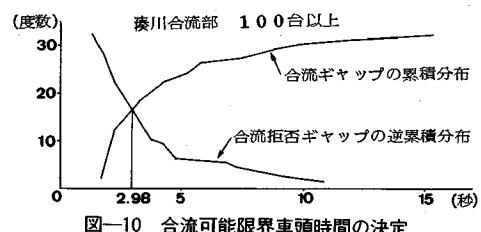


図-10 合流可能限界車頭時間の決定

表-5 合流可能限界車頭時間

	合数	限界ギャップ
湊	90台-100台	3.17秒
川	100台以上	2.98秒
柳	150台-160台	2.15秒
原	160台以上	2.08秒

表-4 合流ギャップ調査集計表 (湊川合流部)

一車合流										多重合流												
拘束合流					非拘束					2台					3台							
高速合流	等速合流	低速合流	形態	ギャップ	形態	ギャップ	見送りギャップ	最大値	選定	停車	形態	ギャップ	見送りギャップ	最大値	選定	停車	形態	ギャップ	見送りギャップ	最大値	選定	停車
	2.92	4.09	2.68					11.09	低	15.43		3.03	1									
	1.97	2.53	4.11						非	18.18												
	4.48								等	7.93												
	2.66																					
	5.47																					
	7.18																					
	2.96																					
	2.58																					
	7.56																					

多重合流					4台					5台					6台				
形態	ギャップ	見送りギャップ	最大値	選定	停車	形態	ギャップ	見送りギャップ	最大値	選定	停車	形態	ギャップ	見送りギャップ	最大値	選定	停車		

★ 形態

- ・ 高：高速合流
- ・ 等：等速合流
- ・ 低：低速合流
- ・ 非：非拘束合流

プを合流可能限界車頭時間として定めることにした。

このような判断をもとに、図-10で示すように、グラフより限界車頭時間を読み取った。以下湊川の最多交通量レベルと柳原の両ケースについても、同様にして合流可能限界車頭時間求めた。結果を表-5にとりまとめて示す。

3. 流入確率に基づいたランプ形式の評価

(1) 実測流入確率

ここでは一車合流のケースでランプを走行し、合流部ノーズ端に到着した流入車両がその瞬間に本線上の交通流に流入可能なギャップを見出せるかどうかを確率的に把握していく、ランプ形式の評価の方法について述べる。

まず、湊川・柳原両合流部の最多最頻の交通量レベルごとの4つのケースについて実測車頭時間の計測結果と流入可能限界車頭時間から流入確率を求める。実質的には、図-8に示す車頭時間分布図において、図-10に示された限界可能ギャップ以上の車頭時間の発生数から流入確率を求めようとするものである。すなわち流入確率は流入可能限界ギャップ以上の車頭時間の発生度数を全計測ギャップ数で除したものとして求める。いま、流入確率を P_0 とすれば、

$$P_0 = \frac{\text{〔流入可能限界ギャップ以上の車頭時間の発生度数〕}}{\text{〔全計測数〕}} \quad (2)$$

式(1)で示す理論分布で示せば、

$$P_0 = \int_{\tau_0}^{\infty} f(t) dt \quad (3)$$

ここに τ_0 は流入可能限界車頭時間である。式(2)で示される流入確率を実測流入確率とする。実測流入確率を湊川・柳原の両合流部について検討対象時間帯の全計測ギャップ数をもとにして求めると次のようにある。

湊川 90台～100台 $P_0=0.488$

100台～ $P_0=0.445$

柳原 150台～160台 $P_0=0.358$

160台～ $P_0=0.309$

上記で求めた実測流入確率は、流入車が合流部ノーズ端でいま、本線上に見出したギャップに流入できるかどうかの確率を与えるものである。

しかしながら、実際の流入挙動は、ノーズで出会ったギャップが限界ギャップよりも小さい場合には、加速車線を走行しながら、本線上のギャップを見送って次の上流ギャップに流入できるかどうかを探り、これも無理であればまたその次の上流側のギャップに流入できないかどうかを探る。このように順次探って、最終的に合流可能なギャップをみつけて合流していくことになる。いま、合流車がこのようにして本線上で初めて遭遇したギャッ

プから n 番目のギャップで初めて合流できたものとする。このような状態での流入確率 P_n は

$$P_n = P [1 \text{番目} \sim (n-1) \text{番目までのギャップを} \\ \text{見送り } n \text{番目のギャップで合流}]$$

$$= (1 - P_0)^{n-1} P_0 \quad (4)$$

いまランプからの流入車の走行速度と本線の走行速度および加速車線長から求められる流入車両の見送り可能ギャップ数を n とすれば、このような合流部での総合的な流入確率 P は、

$$P = [1 \text{番目のギャップで合流できる確率}] \\ + [1 \text{番目のギャップは見送り } 2 \text{番目のギャップ} \\ \text{で合流する確率}] \\ + [1 \text{番目も } 2 \text{番目も見送り、 } 3 \text{番目のギャップ} \\ \text{で合流する確率}] \\ + \dots \\ + [1 \text{番目} \sim (n-1) \text{番目まで見送り、 } n \text{番目の} \\ \text{ギャップで合流する確率}] \\ = P_0 + (1 - P_0) \cdot P_0 + (1 - P_0)^2 \cdot P_0 + \dots + (1 - P_0)^{n-1} \cdot P_0 \quad (5)$$

となる。

(2) 見送りギャップ数と実測に基づく流入確率

式(5)を適用するにあたっては、ランプノーズ端に到達した合流車が加速車線の終端まで走行する間に、本線のギャップを最大いくつまで見送ることができるものとするかについて考え方を整理しておく必要がある。理論的に求めると以下のように考えられる。

いま本線の走行速度を v_2 (m/s)、合流車のランプノーズ端における速度を v_1 (m/s)、合流車線長を L (m)、本線交通流の合流可能限界ギャップ以下の平均車頭時間を \bar{t}_0 (s)とする。合流車はランプノーズ端の速度 v_1 から一様の加速度で加速車線上を L (m) 加速走行し、加速車線終端で本線の走行速度 v_2 に達するものとする。この場合の加速度 a および合流車が L の間を走行するに要する時間 t_1 はそれぞれ次式で表わされる。

$$a = \frac{1}{2L} (v_2^2 - v_1^2), t_1 = \frac{v_2 - v_1}{a} = \frac{2L}{v_1 + v_2}$$

合流車の見送り台数(n)は t_1 の間に到着する本線車の台数から、 L の間に速度 v_2 で走行する本線交通流の中の存在台数を差し引いたものに等しいから、

$$n = \frac{L}{t_1} \left(\frac{2}{v_2 + v_1} - \frac{1}{v_2} \right) \quad (6)$$

湊川・柳原の両合流部について最多と最頻の交通量レベルごとに上記の式(6)を用いて n を求めるとき表-6のとおりで、平均見送り台数は0.6～0.8台である。これはかなり小さい値である。合流できないギャップを見送りながら合流しようとしているにもかかわらず、一定の加速走行状況を仮定しているところに無理があると考えられる。

えられる。実際には本線の速度まで加速するよりも、上流から逐次目前に来るギャップの中から合流可能なギャップを探し出すのに注意を集中し、合流可能なギャップをみつけてから、そのギャップへ向けて急速に加速するのが自然な合流挙動であろう。しかしながら、このような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、ほとんど不可能といってよいであろう。したがってここでは見送り台数についても実測によるものとし、再生画面の視野の関係から合流車の見送り挙動を容易に追跡できる柳原合流部において、見送り台数の計測を実施した。結果を表-7に示す。この表から、低速合流の際の見送り台数は、大半が1台であるが2台の場合もかなり多いことが示されている。したがって式(5)を用いる場合の n の値は2とするものとした。

したがって式(5)の実行形式は次式のようになる。

上式に前節で求めた実測流入確率を代入して実測値に基づく流入確率を求めることができる。結果を表-8に示す。

(3) 理論分布による流入確率の評価

流入しようとしている車両が流入可能なギャップをみつけて本線に合流する挙動を考えた場合、前節で行った計算は、本線上を上流から到達してくる車両間のギャップの全長を利用して合流できるかどうかの確率を求めたものである。しかし、実際はランプからの合流車は、ノーズ端においていま遭遇しているギャップの全長を必ずし

表-6 見送りギャップ数の理論値

ランプ名	交通量レベル (台／5分)	W_1 (m／時)	W_2 (m／時)	\bar{t}_0 (秒)	R
漆川	90～100	11.1	18.8	1.96	0.56
	100以上	11.1	17.8	1.85	0.56
柳原	150～160	11.1	18.2	1.33	0.80
	160以上	11.1	18.6	1.32	0.82

表-7 低速合流における見送り台数の分布

ランプ名	交通量レベル (台／5分)	見送り台数が下の数の低速合流数			合計
		1	2	3以上	
柳原	150～160	36	10	1	47
	160以上	45	15	0	60

表-8 実測に基づく流入確率

ランプ名	交通量レベル (台／5分)	P ₀	流入確率
漆川	90～100	0.488	0.867
	100以上	0.445	0.834
柳原	150～160	0.358	0.738
	160以上	0.309	0.671

も利用できるわけではない。利用できるのは流入車と本線にこれからやって来る車両との間のギャップ、いわゆる後方ラグであり、式(1)で与えられる車頭時間の理論分布を直接用いるわけにはいかない。確率論的にいえば、ランダムに発生する事象の発生時間間隔を与える分布を直接用いるのではなく、任意の時刻で観測を始めてから1番目の事象が発生するまでの時間を与える分布、すなわち初期分布を用いて第1番目のギャップについての流入確率を求めなければならない。

計算の順序として、まず式(1)を直接用いて第2番目以降のギャップについての流入確率 P_0 は以下のようにして求められる。いま合流可能限界ギャップを τ_0 とすれば

$$\begin{aligned} P_0 &= P(t \geq \tau_0) = \int_{\tau_0}^{\infty} f(t) dt \\ &= \int_{\tau_0}^{\infty} \frac{\lambda}{(\lambda t - 1)!} (\lambda t)^{\lambda t - 1} \cdot e^{-\lambda t} dt \\ &= \left[1 - e^{-\lambda t} \cdot \sum_{n=0}^{k-1} \frac{(\lambda t)^n}{n!} \right]_{\tau_0}^{\infty} \dots \quad (8) \end{aligned}$$

次に第1番目のギャップについての流入確率は、車頭時間の確率密度関数 $f(t)$ の初期分布を $f_0(t)$ とすれば

ここで、 r は平均車頭時間、 $F(t)$ は $f(t)$ の累積分布で式(8)中の不定積分で示されるものである。したがって

$$f_i(t) = \frac{1}{r} \cdot e^{-\lambda t} \cdot \sum_{n=0}^{k-1} \frac{(\lambda t)^n}{n!} \dots \dots \dots \quad (10)$$

さて合流車がノーズ端で出会うギャップに合流できる確率 P_{in} は、合流可能限界車頭時間における合流車と本線前・後車との間の車頭時間、すなわち前方ラグおよび後方ラグの限界値が与えられていれば、式(10)の初期分布を用いて前方・後方両ラグがそれぞれの限界値以上となる同時確率を算定すればよい。しかし本調査の渋川調査地点ではカメラアングルの条件が悪く、合流直前の前方あるいは後方ラグの計測が困難な場合が多く、ラグの限界値を求めることができなかった。したがってここでは本線車と本線後車とのラグが流入可能限界車頭時間以上となる確率を求めて、初期ギャップに対する流入確率 P_{in} とし、以下のように求めた。

$$P_{i0} = \int_{-\infty}^{\infty} f_i(t) dt = \frac{1}{\tau} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-\lambda t} \cdot \sum_{n=0}^{k-1} \frac{(\lambda t)^n}{n!} dt \quad \dots \dots \dots (11)$$

式(11)の積分は、 $\lambda t = x$ の変換により指数関数と x の整数幂の積の積分で、比較的容易に演算可能である。以上で求めた、 P_0 や P_{10} を用いて流入確率は次式で求めることができる。

$$P = P_{i_0} + (1 - P_{i_0}) \cdot P_0 + (1 - P_{i_0})(1 - P_0)P_0 \dots \dots \dots \quad (12)$$

表-9に式(12)を用いて計算した流入確率の理論値

表-9 初期分布を考慮した流入確率の理論値

ランプ名	交通量レベル (台/5分)	平均車頭 時間(秒) (t)	アーラン分布 の パラメーター (x)	合流可能限界 車頭時間(秒) (τ_0)	アーラン分布に による流入確率 (P_0)	初期分布による 流入確率 (P_{10})	式(11) による 流入確率
渾川	90~100	3.57	3	3.17	0.503	0.230	0.808
	100以上	3.30	3	2.98	0.491	0.233	0.798
柳原	150~160	2.24	4	2.15	0.463	0.202	0.769
	160以上	1.99	5	2.08	0.402	0.155	0.698

を、計算の基礎となった平均車頭時間やアーラン分布のパラメーター(x)等とともに示す。両合流部の最頻・最多の両交通量レベルとも、合流後の車線交通量を想定しているのに対して、平均車頭時間の欄に示す値は、当然のことながら該当する車線の合流地点上流側の平均車頭時間であり、交通量レベルに示されている交通量に対応する平均車頭時間よりも、合流車の流入していない分だけ長くなっている。またアーラン分布のパラメーターには、それぞれの交通量レベルにおいて、各解析対象の5分間ごとに実施した適合度の検定の結果得られたxの値のうち最も多く選定されたxの値が用いられている。

その他の τ_0 、 P_0 および P_{10} については、これまでに述べた値を用いている。前節で算定した実測流入確率と比べ、初期分布から求めた第1番目のギャップに対する流入確率が小さい値となっているだけに、サイドランプである渾川合流部の流入確率は4~6%低下している。しかし、柳原合流部では逆に3%程度上昇している。これはセンターランプである柳原合流部の追越車線の交通量が多く、このためxの値が大きくなつて車頭時間の分布型が右側へ寄り、第2番目以降のギャップに対する流入確率が大きくなつたものと考えられる。

4. 結論と今後の課題

阪神高速道路合流部のサイドランプとセンターランプの2つのランプ接続方式による違いを、それぞれ渾川合流部と柳原合流部に代表させて比較すると、両地点における合流可能限界車頭時間と流入確率に明らかに差がみられた。両ランプの合流可能限界車頭時間と流入確率の実測値と理論値を表-10に示す。

表-10の結果から、走行車線に左側から合流するサイドランプの方が、追越車線に右側から合流するセンターランプよりもゆったりとした判断で合流し、しかも流入し終える確率が高くなっている。このことから、交通量が多く、速度も高い追越車線上の短いギャップに無理に合流し、しかもその流入確率が低いセンターランプ

表-10 流入確率に基づくランプ型式の評価

(サイド ランプ)	交通量レベル(台/5分)	90~100	100以上
	合流可能限界車頭時間	3.17	2.98
	流入確率	実測値 0.867	理論値 0.808
(センター ランプ)	交通量レベル(台/5分)	150~160	160以上
	合流可能限界車頭時間	2.15	2.08
	流入確率	実測値 0.738	理論値 0.671

よりもサイドランプの方が、サービスのレベルが高いことを示している。このことは、ピーク時の最多および最頻の両交通量のレベルにおいていえる。また、流入確率の値自体についていえば、参考文献4)に示したように、名神高速道路の合流車線長算定の際、計算上の限界流入確率として0.85が採用されており、以後の高速道路の運用実績からみて、0.80~0.85が流入確率の限界値として妥当な値と考えられ、したがってサイドランプである渾川合流部では、流入確率の点からは問題はないものと考えられる。一方、柳原合流部では流入確率が最頻交通量レベルで0.75前後、最多交通量レベル0.7を下まわる値となっている。実際に交通量が多い時間帯ではランプからの合流車も多くなり合流できずに合流車線終端付近で最徐行する車両もみかけられ、結果的に多重合流の数が多くなっている。

センターランプでの流入確率を高めるためには、合流車が見送るギャップ数を多くとれるように加速車線長を長くとることが考えられる。いま仮に式(12)において見送る台数をもう一台増加させ

$$P = P_{10} + (1 - P_{10}) \cdot P_0 + (1 - P_{10})(1 - P_0) \cdot P_0 + (1 - P_{10})(1 - P_0)^2 \cdot P_0 \dots \quad (13)$$

なる式を用いて柳原合流部の流入確率を求めなおすと、最頻交通量レベルで0.875、最多交通量レベルで0.819と一応流入確率0.8以上を確保することが可能となる。したがって3台目まで見送ることができる合流車線長を

確保するためには、初期ギャップから数えて4番目のギャップに無理なく流入させることを考えれば、合流車線長を現在の基準値から30~40%増加させることが望ましいといえる。しかし現存するセンターランプはこのような構造上の改良は、ほとんど実現不可能であり、したがって規制速度をある程度下げたり、センターランプの上流では走行車線から追越車線の車線変更を制限する等交通運用面での検討が必要であろう。今後の課題としては、

- 1) 多重合流に関する流入確率算定の方法を確立し、総合的な流入確率の評価を試みること。
- 2) 以上の結果から合流部の交通容量の算定の方法を検討すること。
などが考えられる。

謝 辞：本研究を実施するにあたって、阪神高速道路公団の関係部局から多大のご協力とご援助を賜った。

深心の謝意を表したい。また膨大なデータの解析に従事した、立命館大学土木工学科の河合秀幸、高萩浩史および高浜善政の三君にも心からの謝意を表したい。

参考文献

- 1) Frank, A. Haight : Mathematical Theory of Traffic Flow, pp. 97~100, Academic Press Inc., 1963.
- 2) Donald R. Drew : Traffic Flow Theory and control, McGraw-Hill, pp. 173~222, 1968.
- 3) Martin Wohl, Brian r. Martin (加藤・山根訳) : 計画者と技術者のための交通工学(下), 鹿島出版会, pp. 31~41, 1973.
- 4) 卷上安爾・安達靖夫・末田元二 : 高速道路改築に伴なう合流部の合流車線長について, 土木学会論文集, 第371号/IV-5, pp. 133~142, 1986年7月.
- 5) 卷上安爾・松尾 武 : 都市高速道路合流部の形式による合流挙動の違いについて, 土木学会第41回年次学術講演会, pp. 271~280, 昭和61年11月.

(1987.4.28・受付)