

多重合流を考慮した流入確率の算定方法について

MERGING PROBABILITY CALCULATION INCLUDING MULTIPLE MERGING

巻 上 安 爾^{*} , 松 尾 武^{**}

by Yasuji Makigami, Takeshi Matsuo

The merging probability is often calculated to evaluate the capacity or the level of service of on-ramp terminals of expressway systems. the probability is, however, mostly the probability of single merges. On the merging area of heavily loaded urban expressways such as the Hanshin Expressway, however, two or three vehicles often merge into a through traffic gap whole at once. In this study, attention was given to the multiple merging phenomena and the computation process of the multiple merging probability. Traffic survey was conducted at merging terminal of the Hanshin Expressway using a television camera. The multiple merging probability can be computed by evaluate the difference of the shoulder lane gap and the sum of the gaps between vehicles that make multiple merging from the ramp. The multiple merging probability was compared with actual data.

1. まえがき

高速道路の流入ランプの交通容量や幾可構造の検討を行う際、流入確率の算定を行なう場合があるが、これまでは合流端ノーズに到着した合流車が、本線上のギャップに流入できるかどうかという確率、すなわち各々の合流車の流入確率を求めるのに止まっていた。しかしながら阪神高速道路のような都市高速道路では交通需要が多く、合流部でも車群が本線上のギャップに合流してしまう、いわゆる多重合流の現象が数多く見受けられる。

本報告は、この多重合流に着目し、ノーズに到着する合流車の車頭時間と、本線走行車の車頭時間の

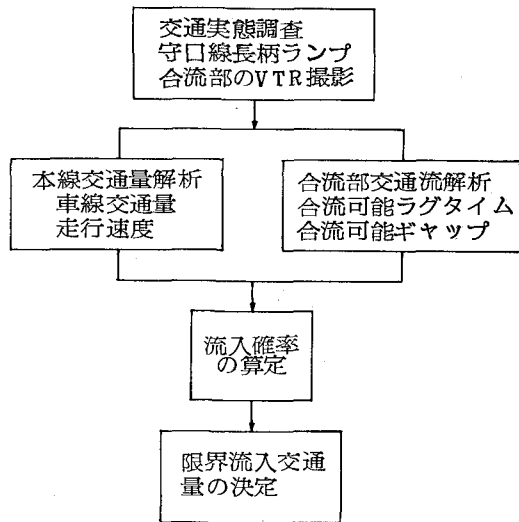
相対的關係から一車合流から多重合流の現象までを含めた総合的な流入確率の算定手法を考え、この理論を実現象に適用するためテレビカメラを用いた交通実態調査を行ない、合流現象を解析し、合流可能限界ギャップを求めて、多重合流を含めた流入確率の算定を試みたものである。本研究のフロー図を図-1に示す。

2. 調査の概要と解析の方針

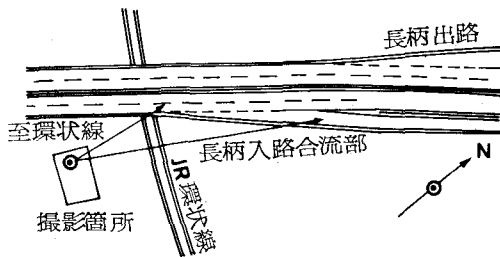
阪神高速道路守口線入り線の長柄入路の合流部を調査地点とし、これに隣接するビルの屋上からビデオカメラにより合流部の走行状況を録画した。調査は午前中のピークをねらい、昭和62年8月4日から連続4日間、午前8時35分から11時35分の3時間実施している。ただし渋滞の発生やこのための流入制限の実施等のため解析可能な時間がかなり減少すると予想されたので、これを補うため8月6日の午後1時から3時間にわたって追加録画を行なっ

* 正会員 工博 立命館大学理工学部教授
(京都市北区等持院北町56・1)

** 阪神高速道路公団業務部交通管制課長
(大阪市東区久田郡町4-68 大阪センタービル)



図一1 調査検討の手順

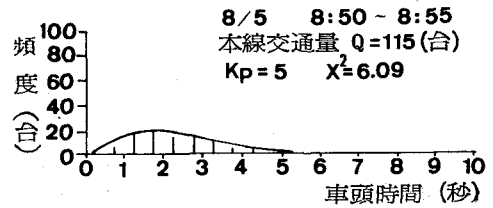


図一2 調査箇所

た。調査箇所を図一2に示す。

録画されたテープは全時間帯にわたって5分間の車線別交通量と走行車線の走行速度の計測を実施した。交通量の計測は、再生画面から計数器を用いて目視により行なった。また速度の計測は、再生画面上で30mの間隔を隔てて2本の計測ラインを記入し、走行車線上を走行する車輛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にキーインすることによって通過時間を入力し、30mの区間長から速度を同時に演算記憶させ、1分間毎に集計し、5分間における2分目と4分目の2分間にわたってそれぞれ計測し5分間平均走行速度とした。

この結果から平均走行速度が50km/時以下に落ちている時間帯、流入制限が実施された時間帯、お



図一3 車頭時間の分布

よび平均走行速度を低下させるほどではないが、ショックウェーブの発生している時間帯を除外し、しかも合流地点上流側の走行車線交通量が110台/5分以上の時間帯を抽出して、全部で21の5分間帯を解析対象の時間帯とした。ここで走行車線の交通量を110台以上としたのは、再生ビデオ画面から計測した走行車線の1分間交通量の発生度数を図一2のように10台/5分単位巾で集計し、その最頻値を求めたところ110~120台/5分間にあったことによっている。

3. 解析結果

3.1 車頭時間の計測方法とその結果

流入確率を算定するにあたっては、合流車が流入していく本線走行車線の車頭時間の分布状況を把握しておく必要がある。このため長柄合流部における走行車線上の車頭時間の計測を行なった。この計測は、前述の速度計測の際、上流側計測ライン上に相前後して到着してくる車輛の先端部通過時刻を差し引くことにより求められ、上記速度計測と同時に実施されたものである。図一3に5分間計測時間帯における車頭時間の頻度分布図の例を示す。図中の曲線は理論分布をアーラン分布として用いた場合の最適分布を示している。 χ^2 の値は適合度の検定の際求められる χ^2 値で、実際の演算はパラメーター k を1から順次増加させ、それぞれの k の値のうち最少の χ^2 値を与える k の値を最適パラメーター値としたものである。ここでアーラン分布は次の式で与えられる。

$$f(x) = \frac{\lambda}{(k-1)!} (\lambda x)^{k-1} e^{-\lambda x} \dots\dots\dots (1)$$

ここでパラメーターは k と λ であるが、平均車頭時間に関して、

$$\frac{k}{\lambda} = \frac{3600}{q} \dots\dots\dots (2)$$

が成り立つ。ここで q は車線交通量である。上記2式から k を順次変更して χ^2 値を最小にする k から $f(x)$ を確定することが可能となる。

3.2 合流ギャップ・ラグタイム

合流部での合流車の流入挙動は非常に複雑である。ここでは、合流の形態を次のように分類した。まず本研究の主題である多重合流については次のように定義できる。

- 一車合流；本線上の1つのギャップに合流車が1台づつ流入していく合流形態。
- 多重合流；本線上の1つのギャップに2車以上の合流車が流入していく合流形態。

次にランプより流入し、合流部先端ノーズに到着した車両が、その瞬間に本線上の交通流に流入可能なギャップを見いだせるかどうかによって次の2つの場合を設定する。

- 初期ギャップへの流入；合流車が合流部先端ノーズに到着した瞬間に本線上に見い出したギャップすなわち初期ギャップを見逃すことなく合流できるケースで、このケースを形態Aとする。
- 初期ギャップは見送り、次のギャップへの流入；合流車が合流部先端に到着した瞬間に、本線上の後方ラグに合流できず見送り、次のギャップに合流した場合で、形態Bとする。

さらに合流の形式を、流入車と本線走行車との相

対的關係から以下の2つに大別する。

- 非拘束合流；走行車線上、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、またはこれを相方が加速あるいは減速して合流部の流れに何らかの影響が現れた場合とし、以下の3つに分類する。
 - 高速合流；合流車が走行車よりも高速で合流部に入り、本線走行車を追い抜きながら合流する場合。
 - 等速合流；合流車と走行車の速度がほぼ等しく互いに影響を与えながら合流する場合。
 - 低速合流；合流車が走行車よりも低速で合流部に入り本線上のギャップを見送りながら合流する場合。

上の定義に従って合流挙動の分類とギャップ・ラグタイムの計測は以下に行われた。まず再生ビデオ画面上で合流部先端ノーズ端上に計測線を設け、合流形式と合流形態を判定しながら本線上の合流ギャップを計測線上で計測する。さらに画像をプレイバックして合流車と本線後車間のラグタイムと計測する。また低速合流で合流拒否ギャップが複数となった場合は、その最大のギャップを見送りギャップとして計測する。以上のような方法で計測した合流ギャップとラグタイムの集計表の一例を表-1に示す。表中“避走”の欄は合流車が本線に合流する

表-1 合流ギャップ調査集計表 (長柄ランプ)

8月 4日 9:30-9:35

一 車 合 流										二 車 合 流												
ギ'ャツプ'	ラグ'タイム	見送り ギ'ャツプ'	拘束合流			非 拘束	避 走	停 車	形 態	車 種	ギ'ャツプ'	ラグ'タイム	見送り ギ'ャツプ'	ランフ'ノ ギ'ャツプ'	拘束合流			非 拘束	避 走	停 車	形 態	車 種
			高	等	低										高	等	低					
4.14	4.09					○			A	小	5.01	3.23		1.26				○			A	小
1.77	1.36			○					A	小	5.20	4.21		2.27				○			A	小
0.98	0.84			○					A	小	2.25	2.14		1.05		○					A	小
3.14	2.38					○			A	小	3.44	0.73		1.14	○						B	小
3.11	1.02			○					A	大	7.87	7.36		2.16				○			A	小
2.81	1.35			○					A	大												
4.29	2.57			○					A	小												
3.93	2.15					○			A	小												
2.42	—			○					A	小												

際、本線走行車がその合流車を認めて追越車線へ避走した場に、その避走台数が記入されている。また“停止”の欄は合流車が加速車線上で停止した場合のためのチェック欄である。合流形式の分類結果は該当する欄に○印を付すことによって表示されている。

3.3 合流可能限界ギャップおよびラグタイム

これまでの研究では合流可能限界ギャップの選定は、主として見送り合流に注目して合流を拒否されたギャップと合流したギャップの発生頻度から、これ以上のギャップで合流する確率と、これ以下のギャップでは合流を拒否する確率が等しくなるギャップを求めて合流可能限界ギャップとしていた。しかしながら前年度の計測結果では見送り合流の計測数が少く、これまでの手法で限界ギャップを求めた場合、非常に短い合流拒否ラグタイムに引きずられて限界時間も非常に短時間のものになり、妥当な値を求めることが困難であった。したがってこれまで

の同種の調査で上と同様の方法で求めた限界ギャップが全合流ギャップの累積分布上約80%のギャップに相当していたことから、全合流車の80%が合流できるギャップあるいはラグタイムを限界値として定めるものとした。合流ギャップの分布図と20パーセントイル付近の拡大累積分布図を図-4および5に、また合流ラグタイムについてのものを図-6および7に示す。

4. 多重合流を考慮した流入確率理論

4.1 初期ギャップへの流入

多重合流を含めた流入状況を分類すると、前節で述べたように初期ギャップにそのまま流入する場合（形態A）と初期ギャップを見逃して次のギャップに流入していく場合（形態B）に分けられる。したがって、ここではAおよびBの合流形態別に、流入確率算定のための理論構成について示す。

いま、図-8の合流部における走行車両の配列モ

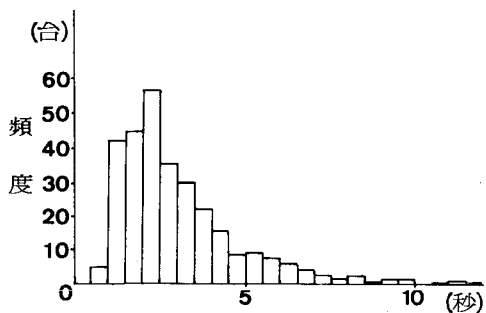


図-4 合流ギャップ分布図

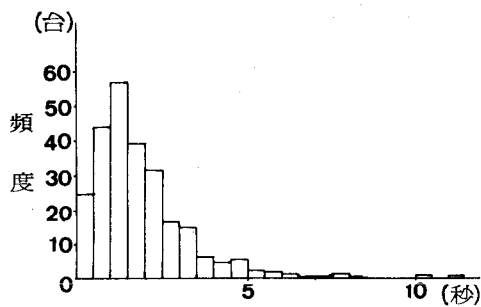


図-6 合流ラグタイム分布図

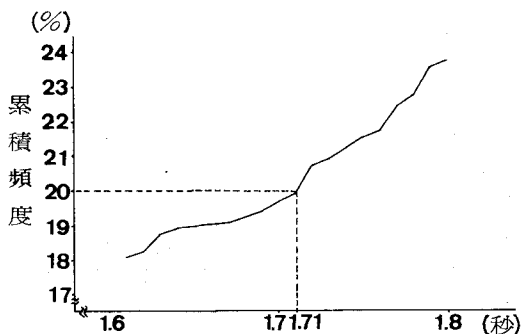


図-5 合流可能限界ギャップの決定

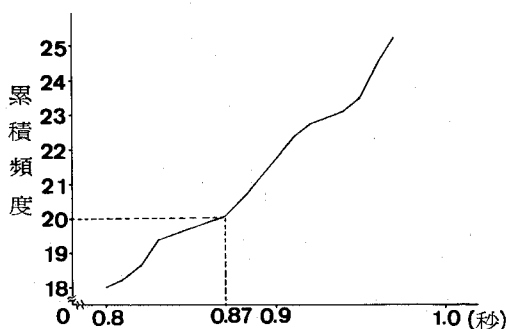
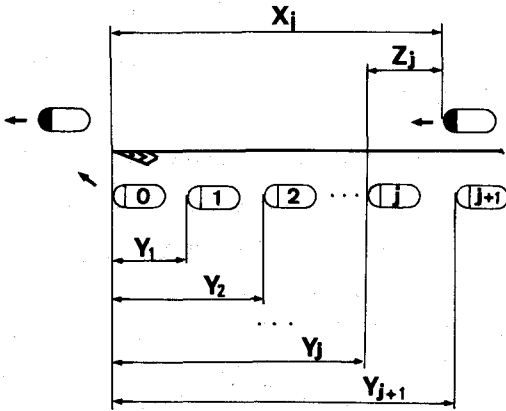


図-7 合流可能限界ラグタイムの決定



図一 8 合流時のギャップとラグ

デル図に示すように、ノーズに到達した任意の車群先頭車からランプ上の後継車へ向けて 0, 1, 2, ..., j と車両番号をつける。同図に示すように車群先頭車に対する本線上の後車ラグを X_i 、ランプ上の j 車までの車頭時間を Y_j とする。合流可能限界後車ラグを τ_i とすれば、車群先頭車が流入した初期ギャップに引続いて (j - 1) 車合流できる条件は次の通りである。

- Ⅰ) 本線後車ラグとランプ上の車群先頭車から j 番目の車までの車頭時間の差は、合流可能限界後車ラグよりも大きい。
- Ⅱ) 本線後車ラグとランプ上の車群先頭車から j 番目の車までの車頭時間の差は、合流可能限界後車ラグよりも小さい。

以上の条件を式で示せば

$$\begin{aligned}
 X_i - Y_{j-1} &\geq \tau_i. \\
 X_i - Y_j &\leq \tau_i.
 \end{aligned} \quad (3)$$

さて、 X_i 、 Y_j の確率密度関数は次のように示される。まず、 X_i は (1) 式の異積分布を $F(x)$ とすれば

$$f_i(x) = \frac{1 - F(x)}{\tau} = \frac{1}{\tau} e^{-\lambda_1 x} \cdot \sum_{n=0}^{k_1-1} \frac{(\lambda_1 x)^n}{n!} \quad (4)$$

で与えられる。ここで k_1 および λ_1 は本線の走行車の交通量 q_1 に対する最適アーラン分布を与えるパラメーターである。

次に Y_j の分布については、ランプ上の個々の車頭時間の分布にもアーラン分布を適用するものとす

ば、j 個ある車頭時間がそれぞれ流入交通量 q_2 に対応する最適アーラン分布に従うものとして、“たみ込みの法測”を j 回適用して次式で与えられる。

すなわち Y_j の確率密度関数を $g_j(y)$ とすれば、

$$g_j(y) = \frac{\lambda_2}{(j \cdot k_2 - 1)!} \cdot (\lambda_2 y)^{j k_2 - 1} \cdot e^{-\lambda_2 y} \quad (5)$$

で与えられる。ここで k_2 および λ_2 (4) 式の場合と同様に、ランプ流入交通量 q_2 に対する最適アーラン分布を与えるパラメーターである。 X_i と Y_j は互に独立であると考えられるので、図一 8 の配列図に示される $X_i - Y_j = Z$ の確率密度関数 $h_{ij}(Z)$ も、たみ込みの法測を適用して、

$$\begin{aligned}
 h_{ij}(z) &= \int_0^\infty f_i(z+x) \cdot g_j(x) dx \\
 &= \frac{\lambda_2^{j k_2} \cdot e^{-\lambda_1 z}}{\tau (j k_2 - 1)!} \cdot \sum_{n=0}^{k_1-1} \frac{\{\lambda_1(z+x)\}^n}{n!} \cdot x^{j k_2 - 1} \cdot e^{-\{\lambda_1 + \lambda_2\}x} dx \quad (6)
 \end{aligned}$$

で与えられる。従って初期ギャップへの (j + 1) 車の流入確率 P_{Aji} は次のようにして求められる。

$$\begin{aligned}
 P_{Aji} &= P \left\{ \begin{array}{l} \text{ノーズに到着した車両が車群先頭車} \\ \text{または独立走行車である。} \end{array} \right\} \\
 &\quad \times P \left\{ \begin{array}{l} \text{初期ギャップは (j + 1) 車合流可能} \\ \text{初期ギャップは (j + 2) 車合流不可} \end{array} \right\}
 \end{aligned}$$

いま初期ギャップに (j + 1) 車合流が可能である確率を P_{ijo} とすると、

$$P_{ijo} = \int_{\tau_i}^{\infty} h_{ij}(z) dz \quad (7)$$

であり、また任意の車両が独立走行車あるいは車群先頭車である確率は、Y の車両の前を走行する車両が、前の本線ギャップに流入してしまうことが必要かつ十分の条件と考えられるので、その確率を P'_{ijo} とすれば

$$P'_{ijo} = \int_{\tau_i}^{\infty} f_i(x) dx \cdot \int_0^{\tau_i} h_{jo}(z) dz \quad (8)$$

で与えられる。したがって初期ギャップへの (j + 1) 車の流入確率は次式で求められる。

$$P_{Aji} = P'_{ijo} \cdot P_{ijo} \cdot (1 - P_{ijo}) \quad (9)$$

4.2 後続ギャップへの流入確率

先頭車が初期ギャップを見送り、次のギャップへ

流入し、しかもそのギャップへ後続車が逐次流入していく場合の流入確率について考察する。本線上の後続ギャップ X とランプ上の車群先頭車から $(j+1)$ 台目までの車頭時間 Y_j の確率密度関数は $f(x)$ および $g_j(y)$ で与えられるので、 $X-Y_j=Z$ の確率密度関数 $h_j(Z)$ は、これまでの議論と同様に

$$h_j(z) = \int_0^{+\infty} f(z+y) \cdot g_j(y) dy \\ = \frac{\lambda_1^{k_1} \cdot \lambda_2^{j k_2} \cdot e^{-\lambda_1 z}}{(k_1-1)! (j k_2-2)!} \cdot \int_0^{+\infty} (x+y)^{k_1-1} \cdot y^{j k_2-1} \cdot e^{-(\lambda_1+\lambda_2)y} dy \quad \dots\dots\dots (7)$$

で与えられる。車群先頭車が初期ギャップを見送り、本線上の次のギャップに流入し、しかも $(j+1)$ 車が連続して流入する確率 $P_{Bj}^{(1)}$ は前述の1)と同様にして次のように求められる。

$$P_{Bj}^{(1)} = P \left[\begin{array}{l} \text{先頭車に対する初期ギャップは流入} \\ \text{不可能} \end{array} \right] \\ \times P \left[\begin{array}{l} \text{次のギャップは}(j+1)\text{車合流可能} \end{array} \right] \\ \times P \left[\begin{array}{l} \text{次のギャップは}(j+2)\text{車は合流不可} \\ \text{能} \end{array} \right] \\ = \int_0^{\tau_{i0}} f_i(x) dx \cdot \int_0^{\infty} h_j(z) dz \cdot \int_0^{\tau_{i0}} h_{j+1}(z) dz \\ = \{(1-P_{i0}) \cdot P_{j0} \cdot \{1-P_{(j+1)0}\} \} \quad \dots\dots\dots (8)$$

同様に先頭車が本線後続する $(m-1)$ ケのギャップを見逃し、 m 番目のギャップで合流し、ランプ上 $(j+1)$ もの後続車がそのギャップに流入していく確率 $P_{Bj}^{(m)}$ は次式で与えられる。

$$P_{Bj}^{(m)} = \{(1-P_{i0})^{m-1} \cdot P_{j0} \cdot \{1-P_{(j+1)0}\} \} \dots\dots\dots (8)$$

ただし今回の調査では多重合流における見送りギャップ数は初期ギャップのみであったので総合的な流入確率の算定は(8)式を用いている。

いま $(j+1)$ 車合流の形態AおよびBを総合した多重合流確率を P_j とすれば当然

$$P_j = P_{Aj} + P_{Bi} \quad \dots\dots\dots (9)$$

である。1)で示した P_0 と(9)式を用いて多重合流の総合確率 P は

$$P = P_0 + 2P_1 + \dots + (j+1)P_j + \dots$$

..... (10)

で与えられる。

5. 多重合流を考慮した流入確率の算定と考察

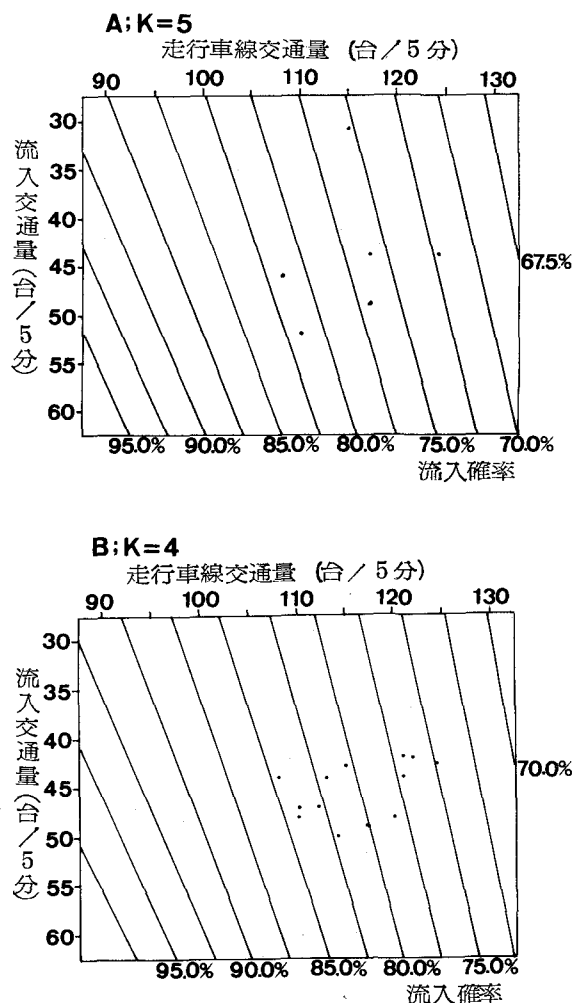
阪神高速道路の交通管制システムから得られる守口線より長柄～南森間間の車検知器からのアラットより、調査地点を含む当該区間の走行車線の最大車線交通量は190台/5分間程度であり、長柄入路からの流入交通量は最大60台/5分間程であった。したがって(10)式を用いて総合的な流入確率の算定にあたっては、走行車線の交通量を90～130台/5分、入路からの流入交通量を30～60台/5分の範囲にとり、それぞれ5台/5分の間隔で設定される走行車線・入路相方の全ての交通量の組合せに対して流入確率を求めた。計算にあたって設定した条件は次の2点である。

○アラン分のパラメーター；走行車線の最適アラン分布のパラメーター k_1 に関しては、適合度の検定の結果から $k_1=5$ となったケースが13、 $k_1=4$ となったのが6となり、両ケースが解析対象となった21の5分間時間帯の9割以上を占めていることが示された。したがって k_1 の値としては4および5の2つの値について演算を行なった。

またランプ上の交通に適用するパラメーター k_1 については、流入交通が少ないので、全てのケースに対してその値を1とした。

○多重合流の適用範囲；解析対象の時間帯における3車以上の多重合流の発生回数は、2車合流の発生回数の5分の1程度であり、また3車以上の多重合流が流入確率の値に寄与する割合は非常に小さいものと判断されたので、多重合流の適用を今回の試算では2車合流までとした。すなわち(10)式の適用にあたっては $j=1$ までとした。

以上の条件のもとで算出した走行車線と流入車線の交通量に対する流入確率の値から図-9に示すように流入確率のコンター図を作成した。図-9(A)が $k_1=4$ のケース、(B)が $k_2=5$ のケースで、該当する解析時間帯の数は前者が6、後者が13である。これら解析時間帯における走行車線と流入車線の交通量から定められるコンター図の位置に、点をプロ



図一 9 流入確率と実測交通量

ットしてみると、流入確率は70～85%の間にあることが示されている。これはこれまでの調査研究や都市間高速道路の加速車線上算定の基礎となった流入確率の値である85%と比べるとやや小さい値ではあるが、それほど無理な値でもないものと考えられる。また図一9において、流入車線交通量が一定で本線交通量が増加するにつれ流入確率が減少する傾向については、当然の傾向が示されていると考えられるものの、本線交通量を個定してランプの交通量を増加させた場合には、逆に流入確率が増加する傾向となっている。これは、ランプからの流入交通量が増加すれば、ランプ上のギャップは相対的に小さくなり、本線のギャップが一定であれば流入確

率が増大していくことになり理論的には納得のいく面もあるものの、サービスレベルといった観点から見れば、合流後の交通量が増加しているのに流入確率が高まり流入しやすくなるのは実態に反するとも考えられる。また2車合流の発生頻度も理論値は実測値と比べてかなり小さい値となっており今後さらに検討を加えていく必要があるものと考えられる。

5. 結論と今後の課題

本調査研究は阪神高速道路守口線より長柄入路の合流部における合流交通の実態をテレビカメラで収録し、再生画面上から走行車線、流入車線の車頭時間の分布状況や合流可能の限界ギャップやラグタイムで計測するとともに、多重合流現象も考慮に入れた流入確率の算定方式を構築し、総合的な流入確率の算定を試みたものである。算定の結果得られた流入確率の値は、これまでの経験値からみて妥当な範囲にあるとはいえ、本線交通と流入交通の組み合わせからみて、流入確率の変動傾向を必ずしも適確に説明しきっていない面もあり、今後さらに検討を加えていく必要がある。今後の課題としては次の点があげられよう。

- i) 流入交通の車頭時間の分布に、単純に指数分布を適用しているが、アーラン分布をあてはめるなど、モデル構成にさらに検討を加えること。
- ii) 今日の長柄入路からの流入交通量よりも、流入需要の多い合流部での調査を積み重ね、適用範囲の中を拡げること。

最後に本調査研究を行なうにあたって多大の協力を得た阪神高速道路公団の担当の方々に心からの謝意を表したい。

参考文献

- 1) 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，第389号/Ⅳ-8，1988年1月，p93～101
- 2) 阪神高速道路公団；阪神高速道路の交通渋滞対策に関する調査研究報告書，1988年3月