

多重合流を考慮した流入確率の算定方式について

MERGING PROBABILITY CALCULATION METHOD CONSIDERING MULTIPLE MERGING

卷上安爾*・松尾 武**

By Yasuji MAKIGAMI and 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 all 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.

Keywords : merging probability, multiple-merging, expressway, merging capacity

1. まえがき

高速道路の合流部における運用状況や幾何構造の検討を行う際、流入確率の計算を行う場合があるが^{3),4)}、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、すなわち個々の合流車の流入挙動のみを考慮して流入確率を求めるとどまっていた。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量が多く、高速道路へ流入していく車両も車群となって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。

本調査研究は、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との相対的な関係を追究して、1車合流から多重合流までの現象を包括した、総合的な流入確率の計算方法を求めた。また、この理論を表現に適用するため、阪神高速道路神戸線京橋ランプにおいて、テレビカメラを用いた交通実態調査を行い、合流現象を解析して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、

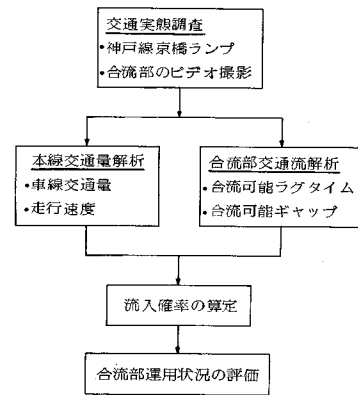


図-1 調査検討の手順

試みたものである。本研究のフロー図を図-1に示す。

2. 前提条件と合流形態の分類

(1) 前提条件

流入確率の算定式を求めていくにあたって、以下のことを想定した。

- i) 対象とする交通の流れは、渋滞の発生していない、いわゆる自由走行領域にある流れを想定する。
- ii) 合流車が流入していく本線上のギャップは、当

* 正会員 工博 立命館大学教授 理工学部
(〒603 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
(〒541 大阪市中央区久太郎町 4-1-3 センタービル)

該流入車が合流端ノーズで遭遇する初期ギャップと、その次のギャップのみとする。

iii) 本線上のギャップに複数の合流車が流入する多重合流の流入確率を求めるにあたって、多重合流車の最大数は3までとする。

iv) ギャップの長さは、アーラン分布に従うものとする。

上記前提条件の i) に関しては、幾何構造の検討や、サービスレベルの判定の基礎となる流入確率の算定にあたっては、渋滞時の流入交通の多い入路でみられるトラック等の強引な割り込み合流につられて、他の流入車も合流してしまうような、サービス水準の低い合流現象まで考慮する必要はないと判断したことによっている。具体的には、交通実態調査の項でも示されるように、合流の対象となる本線走行車線の平均走行速度は 50 km/h 以下とはならない時間帯を、解析対象の時間帯としている。

ii) に関しては、都市高速道路の加速車線長からみて実質的に、加速走行可能な延長が 80 m 程度しかなく、想定する交通が良好な走行状態であるかぎり、流入のため見送っていくことのできる理論上のギャップ数は、たかだか 1 つという試算があり⁴⁾、また観測結果からも、渋滞が発生していないかぎりには妥当なものであると判断されることによっている。

iii) に関しては、現実には 4 以上の多重合流も観測されてはいるものの、その数はきわめて少なく、流入確率への寄与率も非常に小さいものと判断された。加えて、次章に示す算定方式は、理論上は何台の多重合流も適用が可能であるが、算定式を導くにあたって必要な積分計算の煩雑な演算過程が幾何級数的に増大し、しかも結果への寄与率も演算の複雑さに反比例して小さくなってしまふ。このため、今回の試算では観測結果も勘案して、多重合流の最大数を 3 台としたものである。

最後に iv) に関しては、これまでの調査研究から^{3), 4)}、実測値に適合させやすく、また以後に述べるたみ込みの法則を利用した流入確率の算定式を導いていくにあたっては積分計算の比較的容易な形式の理論分布であることによっている。

(2) 合流形態の分類

多重合流を考慮した流入確率の計算を行っていくには、まず合流車が本線上のギャップにどのような順番で流入していくのかを明確に識別しておくことが必要である。いま本線上の 1 つのギャップに、複数の車両が流入する多重合流車の先頭となった車両を先頭合流車または 1 番合流車、2 番目の多重合流車を 2 番合流車、3 番目のそれを 3 番合流車ということにする。このような合流順位に従った合流車の番号に基づいて、流入確率算定の

ための合流形態の分類を試みると以下ようになる。

まず任意の合流車が先頭合流車である場合、後続合流車が次のギャップに流入する場合は 1 車合流、後続合流車 1 台が本線上の同一ギャップに流入する場合は 2 車合流、後続合流車 2 台が続いて流入する場合は 3 車合流となる。同様に任意の合流車が 2 番合流車の場合、後続合流車が次のギャップに流入する場合は 2 車合流、同一ギャップに流入する場合は 3 車合流となる。さらに任意の合流車が 3 番合流車の場合には、後続車が次のギャップに流入する場合は 3 車合流で、同一ギャップに流入する場合は 4 車合流となるが、後者のケースは前提条件 iii) により、ここでは取り扱わない。以上のように 1 車合流、2 車合流および 3 車合流の成立条件は任意の合流車の合流順位と後続合流車の流入挙動によって定まる。まず合流順位についての成立条件を整理すれば、次のようになる。

i) 任意の車両が先頭合流車である場合

ランプ上の前車との車頭時間 (Y_i') と本線前方ラグ (X_i') との差が合流可能限界後車ラグ (τ_{i0}) よりも大きく、かつ本線後車ラグ (X_i) が τ_{i0} よりも大きい。

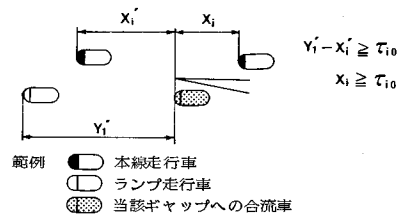


図-2 先頭合流車の成立条件

ii) 任意の車両が j 番合流車である場合 ($j=2, 3$)

ランプ上の j 台前の車両との車頭時間 (Y_j') と本線前方ラグ (X_j') との差が合流可能限界後車ラグ (τ_{i0}) より大きく、かつランプ上の ($j-1$) 台前の車両との車頭時間 (Y_{j-1}') と X_i' との差が τ_{i0} よりも小さく、かつ Y_{j-1}' と本線上のギャップ (X) との差が τ_{i0} よりも大きい。

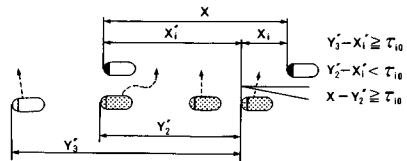


図-3 j 番合流車の成立条件 ($j=3$)

次に後続合流車が連続して、同一ギャップへ流入していくための条件は、次のとおりとなる。

iii) 後続車は次のギャップへ合流する場合

本線上の後車ラグ (X_i) は、合流可能限界後車ラグ (τ_{i0})

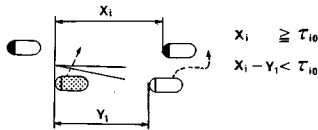


図-4 後続が次のギャップへ合流する場合

より大きく、かつ X_i とランプ上の後続車との車頭時間 (Y_j) との差が τ_{10} よりも小さい。

iv) 後続 j 台目は次のギャップへ流入 ($j=2, 3$)

本線上の後車ラグ (X_i) とランプ上の後続 ($j-1$) 台目との車頭時間 (Y_{j-1}) の差は、合流可能限界後車ラグよりも大きく、かつ X_i と後続 j 台目の車両との車頭時間 (Y_j) の差は、 τ_{10} よりも小さい。

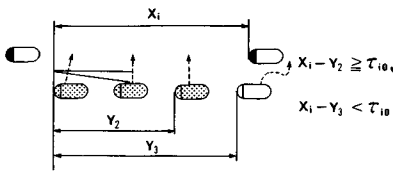


図-5 後続 ($j-1$) 車が同一ギャップへ合流する場合 ($j=3$ の場合)

以上、当該車両の合流順位に関する条件 i) および ii) と、後続流入台数に関する条件である iii) および iv) を組み合わせることにより、1車合流から多重合流の流入確率を以下のように算定していくことが可能となる。

なお、上記の図-2~5において、先頭合流車の成立条件には、本線前車とランプ車との間の車頭時間 (前方ラグ) についての条件式は含まれていない。これはランプ車が合流できるかどうかの判定を、そのランプ車が初期ギャップへ流入しようとしているか、その後続ギャップへ合流する状態にあるかによって、本線上のラグあるいはギャップのいずれかに注目して行い、本線上のギャップ長とランプ上の複数ギャップ長との差に基づく多重合流の発生確率算定方式の構築を試みたからである。このような考え方は、後述する合流ギャップおよびラグの計測方法と合流可能限界値の定め方から考えて無理のないものと判断されるものである。さらに前方ラグに関する条件式を取り入れ、前方・後方両ラグともに流入可能となる同時発生確率を求めると、実測結果から推定される初期ギャップへの流入確率と比べて非常に小さい値となり、かえって実態と合わなくなることも考慮したものである。

3. 多重合流を考慮した流入確率の理論

前提条件 iv) に従って、本線およびランプの車頭時間の理論分布は、アーラン分布に従うものとする、そ

れぞれの確率密度関数 $f(x)$ および $g(y)$ は次式によって示される。

$$\text{本線}; f(x) = \frac{\lambda_1}{(k_1-1)!} \cdot (\lambda_1 x)^{k_1-1} \cdot e^{-\lambda_1 x} \dots \dots \dots (1)$$

$$\text{ランプ}; g(y) = \frac{\lambda_2}{(k_2-1)!} \cdot (\lambda_2 y)^{k_2-1} \cdot e^{-\lambda_2 y} \dots \dots \dots (2)$$

ここで、 k_1 および k_2 、ならびに λ_1 および λ_2 は、それぞれ本線およびランプのアーラン分布のパラメーターである。ところで、アーラン分布の性質から、 k_1 、 k_2 および λ_1 、 λ_2 の間には、本線の車線交通量およびランプからの流入交通量を q_1 および q_2 とすれば、

$$\frac{k_1}{\lambda_1} = \frac{T_1}{q_1}, \quad \frac{k_2}{\lambda_2} = \frac{T_2}{q_2} \dots \dots \dots (3)$$

なる関係が成立する。ここに、 T_1 および T_2 は交通量の集計時間長を秒単位で表わしたもので、本調査研究では5分間、すなわち300秒を基本としている。したがって本線・ランプともに交通量が与えられれば、車頭時間の実測分布に最も良く適合するパラメーター k_1 および k_2 を求めれば、式 (1) および (2) で示される車頭時間の理論分布を確定することができる。

この式 (1) および (2) を用いて多重合流を考慮した流入確率の算定式を導くにあたって、さらに基本となる確率変数として、本線上の初期ギャップとランプ上の多重合流の先頭合流車と後続合流車間の車頭時間の2つが挙げられる。まず初期ギャップとは、ランプ上の任意の合流車が合流ノーズ端に到着した瞬間、本線上に見出すギャップのうち合流車の車頭と本線後車との車頭時間、いわゆる後車ラグのことで、この初期ギャップの確率密度関数 $f_i(x)$ は、車頭時間すなわちフルギャップの確率密度関数 $f(x)$ の初期分布を用いればよく、 $f(x)$ の累積分布関数を $F(x)$ とすれば、

$$F(x) = \int_0^x f(x) dx = 1 - e^{-\lambda_1 x} \cdot \sum_{n=0}^{k_1-1} \frac{(\lambda_1 \cdot x)^n}{n!}$$

であるので、参考文献1) より

$$f_i(x) = \frac{1-F(x)}{\gamma} = \frac{1}{\gamma} e^{-\lambda x} \sum_{n=0}^{k_1-1} \frac{(\lambda \cdot x)^n}{n!} \dots \dots \dots (4)$$

で表わされる。ただし γ は、ギャップの平均長である。

式 (4) は、ある長さ z のギャップの始点より x の時点から計測が始められた初期ギャップの確率密度が、領域 $(0, z)$ において $1/z$ であり、また時点 x から計測される z の確率密度関数が領域 (x, ∞) 上において

$$f(z)/[1-F(x)]$$

で与えられるので、これら2つの条件付き分布を Bayes の定理に代入し、 z について積分することによって求めることができる。

次に多重合流車群において、先頭合流車から $(j+1)$ 番合流車までの車頭時間 (Y_j) の確率密度関数 $[g_j(y)]$ は、

パラメーターが k_2, λ_2 のアーラン分布に従う j 個の確率変数の和であるから、たたみ込みの法則を逐次適用して次式で示される。

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

上記式 (5) と前出の式 (2) を比較して、式 (2) は式 (5) において $j=1$ としたものであることが示されている。以下に、これらの基本式を用いて、1車合流から3車合流までの流入確率算定式を求める。

(1) 1車合流

任意の車両が1車合流を行うための成立条件は、前章の議論から、その車両が先頭合流車でありかつその後続車が次のギャップ以降に合流することであり、図-2および図-4を参照して

- ⓐ $Y_1 - X_1' \geq \tau_{10}$, ⓑ $X_1 \geq \tau_{10}$, ⓒ $X_1 - Y_1 \leq \tau_{10}$

である。1車合流の発生確率は、この3条件の同時発生確率を求めればよい。ところで、先行車との車頭時間 Y_1 の確率密度関数は当然 $g_1(y)$ である。また X_1' すなわち、本線前車とのラグタイムは、1つのギャップを任意に分割した場合、前後いずれのラグタイムにも初期ギャップの確率密度関数が適用できるはずであるから、 X_1' も式 (4) が、適用可能であると考えられる。したがって条件ⓐに対応する確率密度関数、 $Y_1 - X_1' = Z$ の密度関数 $h_{11}(z)$ は、たたみ込みの法則を用いて、

$$h_{11}(z) = \int_0^\infty f_1(x) \cdot g_1(z+x) dx \dots\dots\dots (6)$$

なる積分で与えられる。また、条件ⓒに関する確率変数 $X_1 - Y_1 = Z$ の密度関数 $h_{11}(z)$ も、たたみ込みの法則を適用して、次の積分で求められる。

$$h_{11}(z) = \int_0^\infty f_1(z+y) \cdot g_1(y) dy \dots\dots\dots (7)$$

したがって初期ギャップへの1車合流の流入確率は、次の3つの確率の積として求められる。

- ⓐ 当該車両が先頭合流車である確率

$$P(Y_1 - X_1' \geq \tau_{10}) = \int_{\tau_{10}}^\infty h_{11}(z) dz = P_{m1} \dots\dots\dots (8)$$

- ⓑ 初期ギャップは流入可能である確率

$$P(X_1 \geq \tau_{10}) = \int_{\tau_{10}}^\infty f_1(x) dx = P_{10} \dots\dots\dots (9)$$

- ⓒ 後続合流車は同一ギャップへは流入不可能である確率

$$P(X_1 - Y_1 < \tau_{10}) = 1 - \int_{\tau_{10}}^\infty h_{11}(z) dz = 1 - P_{11} \dots\dots\dots (10)$$

したがって初期ギャップへの1車流入確率 $P_1(1)$ は、

$$P_1(1) = P_{m1} \cdot P_{10} \cdot (1 - P_{11})$$

で求めることができる。

次に、初期ギャップは見送り、次のギャップへ流入していく確率は、図-6を参照して以下の4つの確率の積

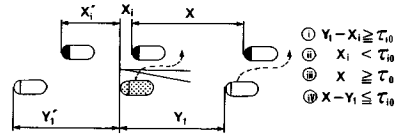


図-6 初期ギャップは見送り、後続ギャップへ1車が合流する場合

として求めることができる。

- ⓐ 当該車両が先頭合流車である確率; 式 (8) より P_{m1}

- ⓑ 初期ギャップに流入不可能な確率; 式 (9) より $1 - P_{10}$

- ⓒ 次のギャップは流入可能である確率

$$P(X \geq \tau_0) = \int_{\tau_0}^\infty f(x) dx = 1 - F(\tau_0) = P_0 \dots\dots\dots (11)$$

上式において、 τ_0 は合流可能限界車頭時間である。

- ⓓ 後続合流車は同一ギャップへは流入できない確率

$$P(X - Y_1 < \tau_{10}) = \int_0^{\tau_{10}} h_1(z) dz = 1 - \int_{\tau_{10}}^\infty h_1(z) dz = (1 - P_{11}) \dots\dots\dots (12)$$

ここで、 $h_1(z)$ は、 $X - Y_1 = Z$ の確率密度関数で、たたみ込みの法則により次の積分で与えられる。

$$h_1(z) = \int_0^\infty f(z+y) \cdot g(y) dy \dots\dots\dots (13)$$

以上の4条件の同時発生確率によって、初期ギャップは見送り、次のギャップへ流入する確率 $P_s(1)$ が与えられる。すなわち、

$$P_s(1) = P_{m1} \cdot (1 - P_{10}) \cdot P_0 \cdot (1 - P_{11})$$

したがって、初期ギャップと次のギャップへの1車合流の確率 $[P(1)]$ は、次式で求めることができる。

$$P(1) = P_1(1) + P_s(1) = P_{m1} \cdot P_{10} \cdot (1 - P_{11}) + P_{m1} \cdot (1 - P_{10}) \cdot P_0 \cdot (1 - P_{11}) \dots\dots\dots (14)$$

(2) 2車合流

まず初期ギャップへの2車合流について考える。前章で示した合流形態の分類に従えば、任意の車両が先頭合流車である場合と、2番合流車である場合の2つに分けて流入確率の算定式を求めると以下のとおりである。まず任意の車両が先頭合流車である場合、図-3および図-5において $j=2$ とした場合を想定すると2車合流の成立条件と、各条件の発生確率は次のとおりである。

- ⓐ 当該車両が先頭合流車である確率; 式 (8) より P_{m1}

- ⓑ 後続合流車1台が同一初期ギャップに流入できる確率; 式 (10) を参照して P_{11}

- ⓒ 後続2台目の合流車は、同一初期ギャップには流

入できない確率；先頭合流車から後続2台目の車両の車頭時間 Y_2 の確率密度関数 $g_2(y)$ は式(5)に $j=2$ を代入して求められるので、 $X_1 - Y_2 = Z$ の確率密度関数は、これまでと同様に、たたみ込みの法則を用いて次式で与えられる。

$$h_{12}(z) = \int_0^\infty f_1(z+y) \cdot g_2(y) dy \dots\dots\dots (15)$$

したがって、

$$P(X_1 - Y_2 \leq \tau_{10}) = 1 - \int_{\tau_{10}}^\infty h_{12}(z) dz = 1 - P_{12} \dots\dots\dots (16)$$

上式において P_{12} は、後続2台目の合流車も初期ギャップに合流できる確率である。

当該車両が先頭合流車で、後続車が同一初期ギャップに流入するための成立条件は、以上の3条件であるのでこの場合の2車合流の流入確率 $P_{11}(2)$ は、次式となる。

$$P_{11}(2) = P_{m1} \cdot P_{11} \cdot (1 - P_{12}) \dots\dots\dots (17)$$

次に、当該車両が2番合流車である場合の2車合流の発生確率は、

① 当該車両が2番合流車である確率；図-3において $j=2$ を想定し、 $Y_1' - X_1' = Z_1$ および $Y_2' - X_1' = Z_2$ の確率密度関数は、それぞれ、式(7)と式(15)で与えられるから、

$$P(Y_2' - X_1' \geq \tau_{10}) = \int_{\tau_{10}}^\infty h_{12}(z_2) dz_2 = P_{m2}$$

$$P(Y_1' - X_1' \leq \tau_{10}) = 1 - \int_{\tau_{10}}^\infty h_{11}(z_1) dz_1 = 1 - P_{m1}$$

との積で与えられる。すなわち、 $P_{m2} \cdot (1 - P_{m1})$ で与えられる。

② 当該車両とその前車が、初期ギャップに流入できる確率；式(12)を参考に P_1 で与えられる。

③ 後続車両が初期ギャップに流入できない確率；式(10)から $(1 - P_{11})$ で与えられる。

以上の同時発生確率により、任意の車両が2番合流車で2車合流となる確率 $P_{12}(2)$ は、次式で与えられる。

$$P_{12}(2) = P_{m2} \cdot (1 - P_{m1}) \cdot P_1 \cdot (1 - P_{11})$$

したがって初期ギャップへの2車合流の確率 $P_d(2)$ は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} P_d(2) &= P_{11}(2) + P_{12}(2) \\ &= P_{m1} \cdot P_{11} \cdot (1 - P_{12}) \\ &\quad + P_{m2} \cdot (1 - P_{m1}) \cdot P_1 \cdot (1 - P_{11}) \dots\dots\dots (18) \end{aligned}$$

次に1車合流の場合と同様に、初期ギャップを見送り、次のギャップへ2車合流が生ずる確率を求める。この場合は、先頭合流車による初期ギャップの見送りに伴う2車合流を考えればよい。なぜなら、先頭合流車が、初期ギャップを見送らず合流してしまい、2番合流車とみなしていた車両のみが、同一初期ギャップを見送ってしまう、もはや当該2番合流車は次のギャップへの先頭合

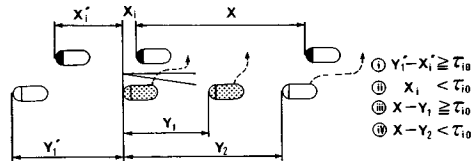


図-7 初期ギャップは見送り、後続ギャップへ2車合流が発生する場合

流車となってしまうからである。図-7を参照して成立条件別に発生確率を求めると、以下のとおりである。

- ① 当該車両が先頭合流車である確率；式(8)より P_{m1}
- ② 当該車両が初期ギャップに流入できない確率；式(9)より $(1 - P_{10})$
- ③ 後続車両が次のギャップに流入できる確率；式(12)を参考に P_1
- ④ 後続2台目の車両が次のギャップへ流入できない確率； $X - Y_2 = Z$ の確率密度関数 $h_2(z)$ は、

$$h_2(z) = \int_0^\infty f(z+y) \cdot g_2(y) dy$$

で与えられるから

$$P(X - Y_2 \leq \tau_{10}) = 1 - \int_{\tau_{10}}^\infty h_2(z) dz = 1 - P_2$$

したがって、先頭合流車が初期ギャップを見送り、しかも次のギャップへ2車合流が発生する確率は、

$$P_d(2) = P_{m1} \cdot (1 - P_{10}) \cdot P_1 \cdot (1 - P_2)$$

となる。したがって2車合流に関する総合流入確率 $P(2)$ は、次式で与えられる。

$$\begin{aligned} P(2) &= P_d(2) + P_d(2) \\ &= P_{m1} \cdot P_{11} \cdot (1 - P_{12}) + P_{m2} \cdot (1 - P_{m1}) \cdot P_1 \cdot (1 - P_{11}) \\ &\quad + P_{m1} \cdot (1 - P_{10}) \cdot P_1 \cdot (1 - P_2) \dots\dots\dots (19) \end{aligned}$$

(3) 3車合流

1車および2車合流の流入確率算定式を導いてきたのと全く同様の考え方に従って、3車合流の際の算定式を導くことができる。ここでは、算定式誘導の過程は省略して、結果と変数の定義のみを以下に示す。3車合流の場合も、2車合流と同様に初期ギャップへの流入確率 $P_d(3)$ と次のギャップへの流入確率 $P_s(3)$ に分けられる。すなわち、

$$\begin{aligned} P(3) &= P_d(3) + P_s(3) \\ &= P_{m1} \cdot P_{12} \cdot (1 - P_{13}) + P_{m2} \cdot (1 - P_{m1}) \cdot P_1 \cdot P_{11} \cdot (1 - P_{12}) \\ &\quad + P_{m3} \cdot (1 - P_{m2}) \cdot P_2 \cdot (1 - P_{11}) \\ &\quad + P_{m1} \cdot (1 - P_{10}) \cdot P_2 \cdot (1 - P_3) \dots\dots\dots (20) \end{aligned}$$

ここに、

P_{mj} : j 台前の合流車が、当該車両がノーズ端で遭遇したギャップよりも前のギャップに合流する確率、 $j=1$ の場合は、当該車両は先頭合流車となる。前提条件に

より j は、1, 2 または 3 の値をとる。

P_{ij} ：当該車両の j 台後続車が同一の初期ギャップに流入する確率。 $j=0$ のときは、初期分布自体が、合流可能限界可能ギャップよりも大きい確率。 j は 0, 1, 2 および 3 の値をとる。

P_j ：当該車両の j 台後続車が、同一ギャップに流入する確率。 j は 0, 1, 2 または 3 の値をとる。 $j=0$ のときは、ギャップ自体が流入可能限界可能ギャップ以上である確率。

4. 交通実態調査の概要と解析の方針

(1) 調査概要

これまでに示した多重合流の現象を考慮した流入確率の算定方法に従った流入確率を求めていくにあたって、必要な流入可能限界ギャップやラグタイム、あるいはアーラン分布のパラメーター等の数値を定めるとともに、流入確率を求めて理論の妥当性を確かめるため、以下に述べるような交通実態調査を実施した。調査地点として阪神高速道路神戸線京橋入路下り線合流部を選定し、これに隣接するビルの屋上からビデオカメラにより、合流部を中心に各走行線上の走行状況を録画した。調査は午後のピークをねらい、表-1 の調査日時に示される、延時間 3 時間 5 分に及ぶ録画を実施した。画面の範囲は、流入車線全体を見渡せ、かつ加速車線が本線に完全に合流するテーパー端まで入るように設定し、録画時にはビデオタイマーをセットして、画面上にラップタイムを秒単位で記録した。調査時の天候は、3 日間とも晴れまたは曇りの路面状態の良い日を選んで調査を実施したので、天候による路面状態や走行条件の影響はなく、また事故発生等の交通障害事象の発生もなかった。調査地点の平面形状と撮影地点の位置関係を図-8 に示す。

録画されたテープは、全時間帯にわたって再生させ、ビデオ画面上から 5 分間の車線別交通量と走行車線の平

均走行速度の計測を行った。交通量の計測は、再生画面から計数器を用いて、目視により実施した。また速度の計測は、再生ビデオ画面上で合流部のノーズ直近上流付近に、路面上の車線境界線を基準に 30 m の間隔で、2 本の計測線を設定し、走行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にキーインすることによって、通過時間を入力し、30 m の区間長から計測対象車両の速度を同時に演算記憶させ、1 分ごとに集計平均した。ただし、全録画時間についての速度計測はサンプリングにより、各 5 分間の時間帯中 1 分 0 秒および 3 分 0 秒からの各 1 分間、計 2 分間の平均走行速度を求めた。

これらの計測結果に基づいて、以後の詳細な車頭時間の計測の実施時間帯を次のような考え方に従って選定した。まず、上記平均走行速度が 50 km/h 以下の時間帯、あるいは、平均走行速度は 50 km/h 以上であっても、一時的渋滞の見届けられた時間帯は、以後の解析対象時間帯からは除外するものとした。これは、合流部のように走行状況の変動が非常に鋭敏な区間の交通運用水準の判定、あるいは合流交通容量の推定にあたっては、渋・停滞中の交通の状況を追求するよりも、良好な運用水準を保ちつつ、限界の値を求める方が、妥当であると判断したことによる。次に交通量の水準については、調査時間帯において、走行状況が最も長い時間帯にわたって出現する最頻交通量のレベルから最大交通量のレベルまでの 5 分間帯を選ぶものとした。図-9 に本線走行車線の 5 分間交通量の頻度分布図を示す。上記判断基準から、走行車線交通量が 70 台/5 分以上の時間帯を解析していくものとした。以上、速度と交通量の 2 つの判断基準から 23 の 5 分間帯を抽出した。表-2 に交通量と走行速度の集計表の例を示す。表中最右欄の採用欄に◎を付した時間帯が 23 の解析対象時間帯の一部である。

(2) 車頭時間の計測法とその結果

本線およびランプの交通流に最適のアーラン分布を求めため、再生画面から車頭時間の計測を行った。この

表-1 調査日時

調査地点	調査日時
京橋合流部	昭和63年6月 9日 13:15-16:25
	昭和63年6月10日 13:20-16:15
	昭和63年6月14日 13:20-16:20

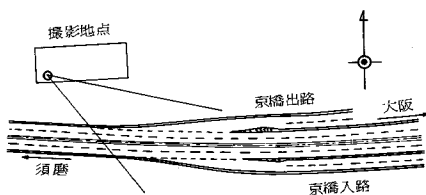


図-8 調査地点の平面図

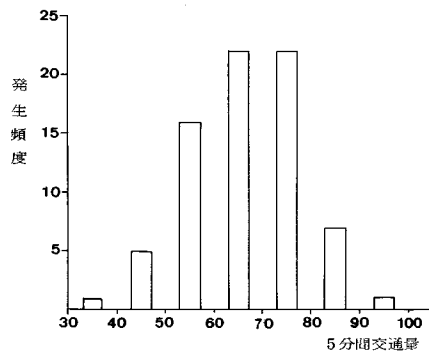


図-9 走行車線における 5 分間交通量の頻度分布

表-2 合流部交通量および速度集計表 (京橋ランプ, 昭和63年6月9日)

ラップ	時間	5 分 間 交 通 量									本 線 走 行 速 度			採 用
		走 行 車 線			追 い 越 し 車 線			ラ ン プ 交 通 量			1分0秒	3分0秒	平 均	
		普通	大型	合計	普通	大型	合計	普通	大型	合計	2分0秒	4分0秒		
00	13:15	44	36	80	111	61	172	27	6	33	61.105	60.038	60.572	◎
05	:20	42	29	71	91	60	151	37	9	46	61.044	68.069	64.557	◎
10	:25	37	31	68	91	54	145	45	7	52	65.262	52.656	58.959	
15	:30	41	39	80	98	66	164	31	7	38	54.209	46.717	50.463	◎
20	:35	45	28	73	96	61	157	25	3	28	65.208	62.781	63.995	
25	:40	41	33	74	114	48	162	34	5	39	53.012	65.893	59.453	
30	:45	34	26	60	103	51	154	30	8	38	52.606	49.123	50.865	
35	:50	40	39	79	84	48	132	27	7	34	54.036	44.847	49.442	

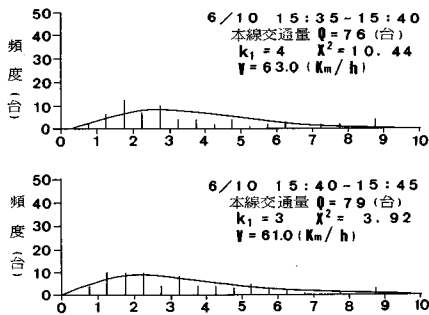


図-10 車頭時間の頻度分布図

計測は前項で述べた速度計測の際、上流側計測ライン上に相前後して到着する車両の先端部通過時刻を差し引くことにより求められるもので、上記速度計測と同時に実施された。図-10に5分間の計測時間帯における車頭時間の頻度分布の例を示す。図中の曲線は、最適と判断されるアーラン分布を示したものである。図中に併記されている 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_1 の値を1から順次増加させ、それぞれの k_1 の値のうち最小の χ^2 値を与える k_1 の値を最適パラメーターの値としたものである。もう1つのパラメーター λ_1 は、式(3)から交通量を与えることにより求められ、最適アーラン分布が各計測対象時間帯について確定される。計測対象の23個の5分間帯の解析結果を表-3に示す。ただし、この適合度の検定において本線交通量が70台以上の時間帯を対象としている本線走行車線の場合は、サンプル数に問題はないものの、交通量が本線走行車線の半数以下となるランプの場合には発生度数が少なく、同様の検定を行うには精密度を欠くおそれがある。しかしながら、ランプでの標本数は小数標本の適合度の検定法である素分布検定法を適用しなければならぬほど少ないものとは考えられない。したがって、ここではランプの各計測時間帯に対して、同様の交通状況がさらに5分間継続した状態を

表-3 パラメーター k_1 および k_2 に関する検定結果

区 分	k_1, k_2 の値	時間帯数	平均交通量
本線走行車線 (k_1)	3	13	74
	4	9	77
	5	1	80
ランプ (k_2)	1	9	29
	2	12	39
	3	2	34

想定し、計測時間帯、交通量および車頭時間の発生度数をそれぞれ2倍し、式(3)を適用したうえで、本線交通と同じプログラムを用いて検定を行った。上記の結果から本線の交通流に対しては、交通量の大小により、 k_1 の値は3あるいは4を、またランプからの流入交通量に対しては $k_2=2$ の値を用いればよいものと判断された。

(3) 合流ギャップ・ラグタイムの限界値

合流部における合流車の挙動は、本線走行車両の挙動とも関連して非常に複雑である。したがって、合流車が流入していった個々のギャップについても、合流挙動と関連づけて計測しておく必要がある。ここでは、本研究の主題である1車合流、2車合流といった、多重合流の現象に直接関連する合流形態の分類に加えて、合流車の合流挙動そのものに注目して、以下のように合流形態の分類を行い、その分類に従ってギャップおよびラグタイムの計測を行った。まず、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出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見出したギャップ、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、

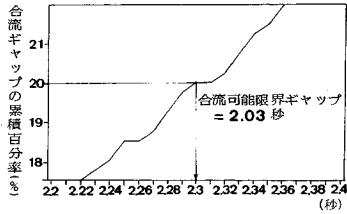


図-12 合流ギャップの決定

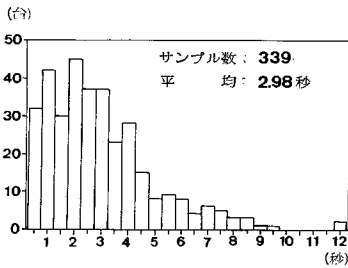


図-13 合流ラグタイム分布図

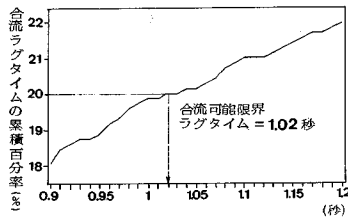


図-14 合流ラグタイムの決定

流可能限界ギャップおよびラグタイムは、図-12および14に示されるように、累積分布上の20%に対応する値として定められる。すなわち、この限界値以上のギャップあるいはラグタイムは合流可能なものとみなすのである。当然のことながら、これら合流可能なギャップあるいはラグが全体に占める割合は80%となる。

5. 多重合流を考慮した流入確率の算定と考察

図-9から示されるように、本線走行車線の調査時間帯における最大交通量は5分当たり90~100台であった。またランプからの流入交通のそれは50台前後であった。したがって本線走行車線の5分間交通量を60~90台の範囲に、また5分間流入交通量を25~50台の範囲にとり、それぞれ5台ピッチで刻んだ交通量のすべての組合せについて、1車、2車および3車合流の流入確率を算定した。この流入確率の算定にあたって用いたアーラン分布のパラメーター k_1 および k_2 の値は、表-3で示すように、本線の車頭時間分布に適用する k_1 については3および4の2つの値を用い、ランプについては、 $k_2=2$ としている。以上の条件のもとで走行車線と流入

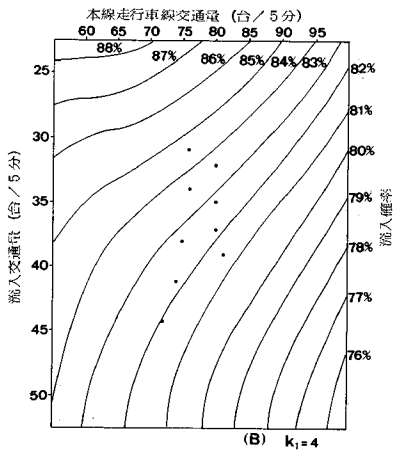
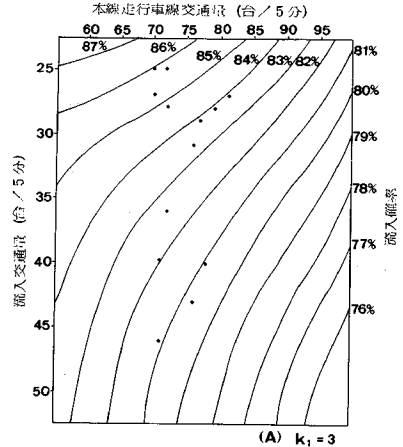


図-15 流入確率図および実測分布図

車線の交通量に対する流入確率の値から、図-15に示すようなコンター図を作成した。図-15(A)が $k_1=3$ とした場合で (B) が $k_1=4$ とした場合の流入確率を1%ピッチの等流入確率線で示している。パラメーターの値が3および4にそれぞれ該当する解析時間帯の数は、表-3に示すように前者が13、後者が9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ットしてみると、本研究による流入確率の算定方式に従って求められる各解析時間帯における多重合流を考慮した流入確率の値は、 $k_1=3$ の場合で80~86%、 $k_1=4$ の場合で81~85%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高速道路の加速車線長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、流入可能限界ギャップおよびラグタイムの値を流入ギャップおよびラグタイムの80パーセンタイル値としていることを考慮すれば妥当な値と考えられる。また解析対象時間帯の抽出にあたっては、合流部にお

表一五 流入ギャップ数に関する実測値と理論値の比較

k_1	5分間平均 交通量		流入 確率 (%)	流入ギャップ数			備 考
	本線	ランプ		1車	2車	3車	
3	74	33	82	18	4	2	実測値 理論値
				23	3	1	
4	77	37	83	17	6	2	実測値 理論値
				25	3	1	

る走行車線の走行速度が50 km/h以上あり、瞬間的な停滞もない良好な交通条件に恵まれている時間帯が選ばれているので、本研究の流入確率算定方式による流入確率の値が80%以上である場合の合流部におけるサービス水準は良好なものと判断してよいものと考えられる。

最後に k_1 の値が3および4となった時間帯の本線およびランプの平均交通量を用いて求めた流入確率の値と、合流形態の実測値と理論値をとりまとめて示したものが表一五である。両ケースともに2車および3車合流のギャップ数の理論値は、実測値のそれよりも多少小さくなっているが、これは理論上は、ノーズ端で設定されたギャップ長は合流地点に至るまで不変であるとしているのに対して、実際の流入挙動においてはブレーキ操作や避走挙動などによる運転者相互の調整動作によりギャップ長も変動して同一ギャップへより多く流入させる傾向があるものと考えられる。

しかしながら、多重合流の台数が多くなるほど、その発生確率は遞減しており、傾向的には、かなりよく多重合流の発生状況を説明しているものと考えられる。

6. 結論と今後の課題

本調査研究は、阪神高速道路神戸線下り京橋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、流入車線上の交通におけるギャップの分布状況や、合流可能限界ギャップあるいはラグタイムの計測を行うとともに、多重合流現象を考慮に入れた流入確率の算定式を構築し、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り、

多重合流の発生確率も、実現象と傾向的には合致しており、合流部におけるサービス水準を数値的に評価するための指標として、利用できる可能性があるものと考えられる。本流入確率算定方式の信頼性を高め、実際の利用を計っていくためには、今後次のような課題に取り組んでいくことが必要であろう。

i) ブレーキ操作あるいは避走挙動といった流入需要の多い合流部で本線およびランプ双方のドライバーに見受けられる流入挙動を加味した流入確率算定方式を考え、多重合流の占める割合が、交通量が多くなるに従って高くなっていく傾向を十分に説明し得るようなモデル構成の検討を深めていくこと。

ii) 今回の京橋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、適用範囲の幅を広げること。

謝 辞：最後に本調査研究を行うにあたって多大の協力をいただいた阪神高速道路公団の担当者の方に心からの謝意を表したい。また過酷な交通実態調査の実施と解析作業ならびに複雑な流入確率算定の演算に従事した立命館大学理工学部土木工学科計画研究室の佐々木悟・佐野和久の両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, Academic Press Inc., pp.97~100, 1963.
- 2) Martin wohl, Brian R. Martin: Traffic System Analysis for Engineers and Planners, The RAND corporation, pp.352~362, 1967.
- 3) 巻上安爾・安達靖夫・末田元三: 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, 第371号 / IV-5, pp.132~142, 1986年7月.
- 4) 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, pp.93~101, 1988年1月.
- 5) 巻上安爾・松尾 武: 多重合流を考慮した流入確率の算定方式について, 土木計画学研究・講演集, No.11, pp.55~61, 1988年11月.

(1989.3.17・受付)