

登坂車線を有する道路の交通容量に関する考察*

TRAFFIC CAPACITY OF ROADS WITH CLIMBING LANE

井 上 博 司**

1. はじめに

昨今、高速道路の交通量の増大にともない、高速道路本線上での交通流の渋滞という現象が頻繁に生起するに至っている。高速道路上での自然渋滞は、トンネル部、登坂部、料金所などでの交通容量の狭隘が原因となって生起するものである。このうち勾配登坂部については、速度低下の著しい大型車両への高速車の追従による交通流全体の速度低下を防ぐため、急勾配部に登坂車線が設置されている。しかし登坂車線の意義はもともと交通量があまり大きくない場合に高速車両の走行性を向上するものであり、交通量が容量近くまで増大すると、低速車両追い越しの可能性が少くなるばかりか、登坂終端部での登坂車線交通流と本線交通流の合流により生じる乱れのためにこの部位での交通容量が低下し、もはや登坂車線として機能しなくなる。このため渋滞時には登坂車線を閉鎖する方がかえって交通流が円滑になるともいわれている。いずれにせよ、勾配登坂部での適正な交通管理を行うためには、勾配部での交通現象特に終端合流部での交通現象の解明が必要である。本研究はこの勾配終端部での交通の合流現象を待ち行列理論を用いてモデル化し、これより適正な制御基準を設定するために必要となるこの部位での交通容量を算定しようとするものである。

待ち行列理論による合流現象の解析では、通行の優先権をもつ主交通流と、この主交通流中に適当なギャップを見い出して合流を行う副交通流とが設定される。通常、副路で停止している車が主道路上に合流に必要なギャップが到着したときに主道路への合流が行われる場合を静的合流、またオンランプから本線への合流の場合のように、副路の車も動きながら本線に合流する場合を動的合流と呼んでいる。このうち静的合流に関しては J. C. Tanner,¹⁾ R. M. Oliver and E. T. Bisbee,²⁾ D. H. Evans, R. Herman and G. H. Weiss,³⁾ W. S. Jewell⁴⁾ 等が興味ある重要なモデルを構築している。Tanner の論文では主道路、副路ともいわゆる Tanner 交通が仮定されており、主道路上にある一定以上のギャップが到達したときに合流が行われる。主道路上のギャップには任意分布が許されているが、副路への車の到着はポアソンとされている。Evans 等の研究では主道路、副路ともポアソン流が仮定されているが、ギャップアクセプタンスには任意分布を許しており、待ち時間分布のラプラス変換を導いている。また動的合流を取り扱った論文には P. A. Perchonok and S. L. Levy,⁵⁾ D. R. Drew, L. R. Lamotte, J. H. Buhr and J. A. Wattleworth,⁶⁾ T. W. Casey,⁷⁾ 井上博司^{8), 9)} 等がある。これらは静的合流の理論では説明し得ない動的合流のかなり細い車両の動きをモデル化するのに成功しているという点で有用である。一方合流容量を取り扱った論文としては M. C. Dunne and D. J. Buckley,¹⁰⁾ N. R. Ashton, D. J. Buckley and A. J. Miller¹¹⁾ 等がある。Dunne 等の研究は Tanner の結果に対して有用な近似を行ったものである。Ashton 等の研究は車頭時間間隔が指数分布の場合とシフトした指数分布の場合の両方に対して合流容量を算定したものである。

以上のように待ち行列理論による交通の合流現象の解析については多くの研究があり、また合流容量を算

*道路、交通流、交通容量

** Hiroshi Inouye, 正会員 工博 岡山大学助教授 工学部土木工学科

定する試みも行われているが、解析の複雑さを避けるためいくつかの点であらゝい近似が行われており、合流交通容量の評価を行うにはいまだ十分であるとはいえない。そこで本研究では合流容量の算定のみに焦点を絞り、ギャップアクセプタンス関数および車頭間隔分布により一般的な前提を設定して合流容量を誘導し、これを用いて登坂合流部の交通容量を算定する試みを行っている。

2. 合流の待ち行列モデル



図-1 合流部の交通流

いま図-1のように登坂車線を走行してきた低速の大型車交通流と本線の高速車交通流とが登坂終端部で合流する場合を考える。このような合流にあっては、通常登坂車線側の大型車交通が強引に本線側に合流するため、本線走行車両がそれに応じて前後の車間距離および速度を調整し、合流交通流が形成されと考えられる。それ故登坂車線の低速の大型車交通を通行の優先権をもつ主交通流とし、これに本線側の副交通流が主交通流中に必要なギャップを見い出して合流するというモデルを考える。主交通流中に必要なギャップが見い出せない場合には減速して次のギャップを待つものとする。主交通流の交通量が大きいかあるいは副交通流の交通量大きい場合には合流できない車両が待ち行列を形成し、本線側の交通流が渋滞に陥ることになる。

いま本線走行車両の最小合流可能ギャップ T はそれぞれの車両について独立であるとし、その確率密度関数を $f(t)$ 、累積分布関数を $F(t)$ で表わす。副交通流の待ち行列が十分長いとき、主交通流の長さ t のギャップに n 台の車が合流する確率を $P_n(t)$ とする。また同一のギャップに2台以上の車が合流するときの合流車の車頭時間間隔は一定であると仮定し、これを δ とする。 k 台目の車両の最小合流可能ギャップを T_k とすると、長さ t のギャップに n 台の車が合流するのは、 n 台目の車までの有効ギャップがそれぞれの最小合流可能ギャップ以上であり、かつ $n+1$ 台目の車両の有効ギャップがこの車の最小合流可能ギャップよりも短い場合、すなわち

$$(T_1 \leq t) \cap (T_2 \leq t - \delta) \cap (T_3 \leq t - 2\delta) \cap \dots \cap (T_n \leq t - (n-1)\delta) \cap (T_{n+1} > t - n\delta)$$

の場合であるから、その確率は

$$P_n(t) = F(t) \cdot F(t - \delta) \cdot F(t - 2\delta) \dots F(t - (n-1)\delta) \cdot \{1 - F(t - n\delta)\} \quad (n = 1, 2, 3, \dots) \quad (1)$$

となる。ただし $n=0$ の場合には明らかに

$$P_0(t) = 1 - F(t) \quad (2)$$

である。つぎに主交通流の車頭時間間隔の分布を $h(t)$ としよう。

このとき1ギャップに n 台合流できる確率は

$$P_n = \int_0^\infty h(t) P_n(t) dt \quad (3)$$

となる。したがって1ギャップ当りの平均合流台数は、

$$\begin{aligned} E &= \sum_{n=0}^\infty n P_n = \sum_{n=0}^\infty n \int_0^\infty h(t) P_n(t) dt \\ &= \int_0^\infty h(t) \sum_{n=0}^\infty n P_n(t) dt \end{aligned} \quad (4)$$

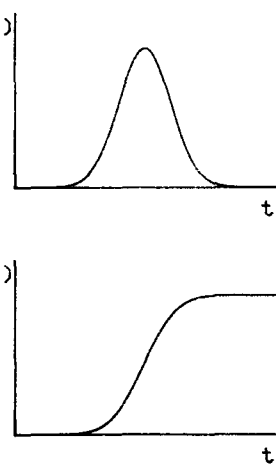


図-2 ギャップアクセプタンス関数

となる。ここで

$$E(t) = \sum_{n=0}^{\infty} n P_n(t)$$

とすると、これはギャップの長さが t であるときの 1 ギャップ当りの平均合流台数を表わしている。

主交通流および副交通流の交通量を q_1, q_2 とすると、この待ち行列についてのエルゴード条件は

$$q_2 < q_1 E$$

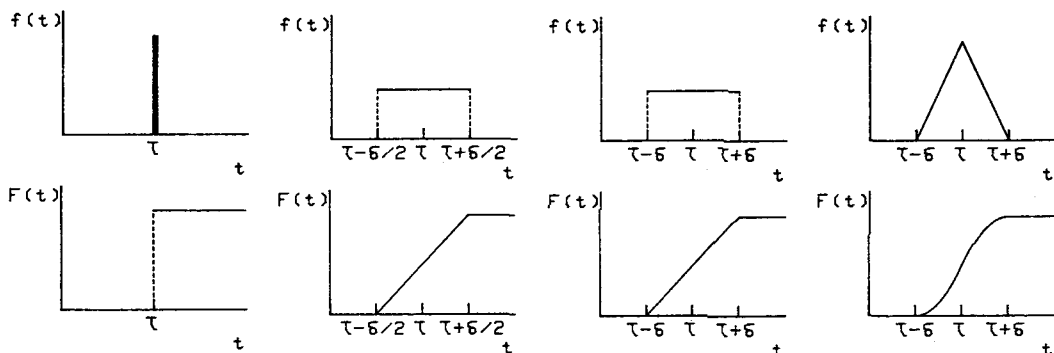
である。したがって主交通流に合流することのできる副交通流の最大交通量は

$$q^* = q_1 E = q_1 \int_0^{\infty} h(t) E(t) dt \quad \dots\dots\dots (5)$$

となる。これは q_1 の関数であり、合流容量ということにする。

3. 種々のギャップアクセプタンス関数に対する平均合流台数

いま最小合流可能ギャップ T の分布形として (1) 単位分布, (2) 一様分布 (拡がり δ), (3) 一様分布 (拡がり 2δ), (4) 三角形分布 (拡がり 2δ) の 4 つの場合を考えよう。ここで各分布の拡がり解析の都合上 δ の倍数に設定している。各ギャップアクセプタンス関数の密度関数および分布関数を図-3 に示す。



(1) 単位分布 (2) 一様分布 (拡がり δ) (3) 一様分布 (拡がり 2δ) (4) 三角形分布 (拡がり 2δ)

図-3 各種のギャップアクセプタンス関数

主交通流のギャップ長が t のとき、このギャップへの平均合流台数 $E(t)$ は各ギャップアクセプタンス関数に対して次のようになる。

(1) 単位分布の場合

$$t < \tau \text{ のとき } P_0(t) = 1, P_i(t) = 0 \quad (i \neq 0)$$

$$\tau + (n-1)\delta < t < \tau + n\delta \quad (n \geq 1) \text{ のとき } P_n(t) = 1, P_i(t) = 0 \quad (i \neq n)$$

よって

$$E(t) = \begin{cases} 0 & (t < \tau) \\ n & (\tau + (n-1)\delta < t < \tau + n\delta, n \geq 1) \end{cases} \quad \dots\dots\dots (6)$$

(2) 一様分布 (拡がり δ) の場合

$$t < \tau - \delta/2 \text{ のとき } P_0(t) = 1, P_i(t) = 0 \quad (i \neq 0)$$

$$\tau + (n-1/2)\delta < t < \tau + (n+1/2)\delta \quad (n \geq 1) \text{ のとき}$$

$$P_n(t) = -t/\delta + \tau/\delta + 1/2 + n$$

$$P_{n+1}(t) = t/\delta - \tau/\delta + 1/2 - n$$

$$P_i(t) = 0 \quad (i \neq n, n+1)$$

よって

$$E(t) = \begin{cases} 0 & (t < \tau - \delta/2) \\ t/\delta - \tau/\delta + 1/2 & (t > \tau - \delta/2) \end{cases} \dots\dots\dots (7)$$

(3) 一様分布 (拡がり 2δ) の場合

$$t < \tau - \delta \text{ のとき } P_0(t) = 1, P_i(t) = 0 \quad (i \neq 0)$$

$$\tau + (n-1)\delta < t < \tau + n\delta \quad (n \geq 0) \text{ のとき}$$

$$P_{n-1}(t) = (-t + \tau + n\delta) / 2\delta$$

$$P_n(t) = \{ t - \tau - (n-2)\delta \} \{ -t + \tau + (n+1)\delta \} / 4\delta^2$$

$$P_{n+1}(t) = \{ t - \tau - (n-2)\delta \} \{ t - \tau - (n-1)\delta \} / 4\delta^2$$

$$P_i(t) = 0 \quad (i \neq n-1, n, n+1)$$

よって

$$E(t) = \begin{cases} 0 & (t < \tau - \delta) \\ (t - \tau + \delta) / 2\delta & (\tau - \delta < t < \tau) \\ (n-1/2) + 3\Delta t / 4\delta + \Delta t^2 / 4\delta^2 & (\tau + (n-1)\delta < t < \tau + n\delta, n \geq 1) \end{cases} \dots\dots\dots (8)$$

$$\text{ただし, } \Delta t = t - \tau - (n-1)\delta$$

(4) 三角形分布 (拡がり 2δ) の場合

$$t < \tau - \delta \text{ のとき } P_0(t) = 1, P_i(t) = 0 \quad (i \neq 0)$$

$$\tau + (n-1)\delta < t < \tau + n\delta \quad (n \geq 0) \text{ のとき}$$

$$P_{n-1}(t) = 1/2 + \{ t - \tau - (n-1)\delta \} \{ t - \tau - (n+1)\delta \} / 2\delta^2$$

$$P_n(t) = [1/2 - \{ t - \tau - (n-1)\delta \} \{ t - \tau - (n+1)\delta \} / 2\delta^2] [1 - \{ t - \tau - (n-1)\delta \} / 2\delta^2]$$

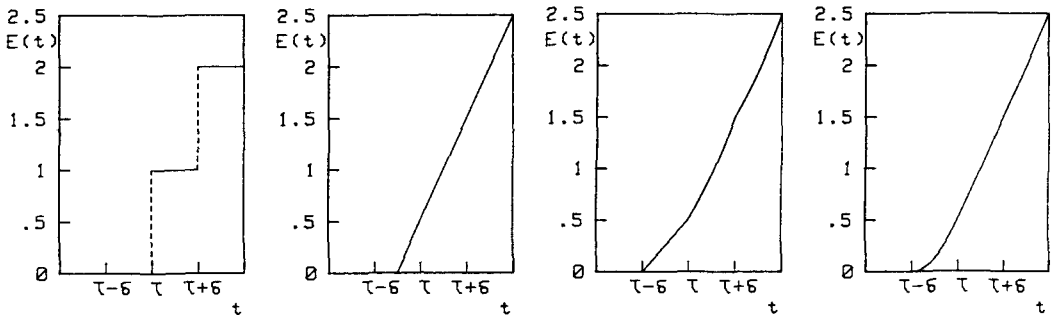
$$P_{n+1}(t) = [1/2 - \{ t - \tau - (n-1)\delta \} \{ t - \tau - (n+1)\delta \} / 2\delta^2] \{ t - \tau - (n-1)\delta \} / 2\delta^2$$

よって

$$E(t) = \begin{cases} 0 & (t < \tau - \delta) \\ (t - \tau + \delta)^2 / 2\delta^2 & (\tau - \delta < t < \tau) \\ (n-1/2) + (-\Delta t^4 + 2\delta\Delta t^3 - \delta^2\Delta t^2 + 4\delta^3\Delta t) / 4\delta^4 & (\tau + (n-1)\delta < t < \tau + n\delta, n \geq 1) \end{cases} \dots\dots\dots (9)$$

$$\text{ただし, } \Delta t = t - \tau - (n-1)\delta$$

それぞれのギャップアクセプタンス関数に対する平均合流台数 $E(t)$ の形を図-4に示す。



(1) 単位分布

(2) 一様分布 (拡がり δ)

(3) 一様分布 (拡がり 2δ)

(4) 三角形分布 (拡がり 2δ)

図-4 ギャップ長と1ギャップ当り平均合流台数の関係

4. ラプラス変換を用いた合流容量の算定法

交通流の車頭時間間隔はガンマ分布に比較的好く適合することが知られている。Casey¹²⁾はガンマ分布のパラメーター m と交通量 q の関係を次式で表わしている。

$$m = q / 1000$$

ここでは主交通流の車頭時間間隔分布としてガンマ分布から得られる次の4つの分布を考えよう。

(1) 指数分布

$$h(t) = \lambda e^{-\lambda t} \quad (t > 0) \quad \text{ここに } \lambda = q_1$$

(2) シフトした指数分布

$$h(t) = \lambda e^{-\lambda(t-a)} \quad (t > a)$$

ここに, $\lambda = 1 / (1/q_1 - a)$

(3) アーラン分布

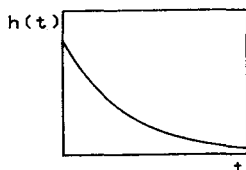
$$h(t) = \frac{\lambda^m}{(m-1)!} t^{m-1} e^{-\lambda t} \quad (t > 0)$$

$$\text{ここに, } \lambda = m q_1 \quad (m = 2, 3, \dots)$$

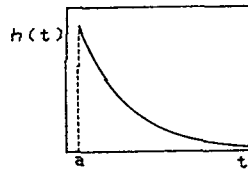
(4) シフトしたアーラン分布

$$h(t) = \frac{\lambda^m}{(m-1)!} (t-a)^{m-1} e^{-\lambda(t-a)} \quad (t > a)$$

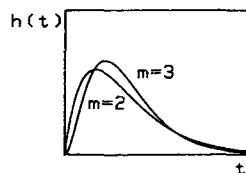
$$\text{ここに, } \lambda = m / (1/q_1 - a) \quad (m = 2, 3, \dots)$$



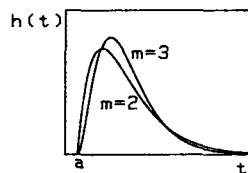
(1) 指数分布



(2) シフトした指数分布



(3) アーラン分布



(4) シフトしたアーラン分布

図-5 種々の車頭時間間隔分布

これらの分布形を図-5に示す。

主交通流の交通量 q_1 に対する副交通流の最大合流可能交通量 q^* は、各ギャップアクセプタンス関数に対する平均合流台数 $E(t)$ およびこれらの車頭時間間隔分布の密度関数を用いて式(5)により求めることができる。しかし式(5)の積分を行うよりも次のようにしてラプラス変換を用いる方が計算が容易である。これをシフトしたアーラン分布の場合を例にして示そう。もちろん $m=1$ の場合には指数分布、 $a=0$ の場合には通常のアーラン分布に対する解となる。式(5)より合流容量は

$$q^* = q_1 \int_a^\infty E(t) \frac{\lambda^m}{(m-1)!} (t-a)^{m-1} e^{-\lambda(t-a)} dt = \frac{q_1 \lambda^m}{(m-1)!} \int_0^\infty E(t+a) t^{m-1} e^{-\lambda t} dt$$

となる。ここで

$$\int_0^\infty E(t+a) t^{m-1} e^{-\lambda t} dt = [\mathcal{L}\{E(t+a) t^{m-1}\}]_{s=\lambda}$$

である。ラプラス変換公式を用いると、

$$\mathcal{L}\{E(t+a) t^{m-1}\} = \left(-\frac{d}{ds}\right)^{m-1} \mathcal{L}\{E(t+a)\} = \left(-\frac{d}{ds}\right)^{m-1} e^{as} \mathcal{L}\{E(t)\}$$

であるから、合流容量 q^* は

$$q^* = \frac{q_1 \lambda^m}{(m-1)!} \left[\left(-\frac{d}{ds}\right)^{m-1} \{e^{as} \mathcal{L}\{E(t)\}\} \right]_{s=\lambda} \dots\dots\dots (10)$$

となる。この方法では $e^{as} \mathcal{L}\{E(t)\}$ を逐次 s で微分することにより、 $m=2, 3, \dots$ に対する合流容量 q^* を求めることができる。最小合流可能ギャップの分布 $f(t)$ および車頭時間間隔の分布 $h(t)$ のそれぞれの組み合わせに対してこの方法により求めた合流容量 q^* を表-1に示す。なお三角形分布に対する近似式は、同分布の場合の1ギャップ当り平均合流台数 $E(t)$ の形状が $t > \tau$ では t の4次の周期関数であるが、ほとんど直線に近いということからこの部分を直線に近似して求めたものである。

表-1 ギャップアクセプタンス関数および車頭時間間隔分布の各組み合わせに対する合流容量

$\begin{matrix} f(t) \\ h(t) \end{matrix}$		単位分布	一様分布 (拡がり δ)	一様分布 (拡がり 2δ)
$\mathcal{L}\{E(t)\}$		$\frac{1}{s(e^{\delta s}-1)} e^{-(\tau-\delta)s}$	$\frac{1}{\delta s^2} e^{-(\tau-\delta/2)s}$	$e^{-\tau s} \left[\frac{1}{2\delta^2 s^3} + \frac{1}{\delta s^2} \left\{ \frac{3}{4} + \frac{1}{2} e^{\delta s} - \frac{1}{2(1-e^{-\delta s})} \right\} \right]$
指数分布 $\lambda = q_1$		$\frac{q_1 e^{-\lambda \tau}}{1-e^{-\lambda \delta}}$	$\frac{q_1}{\lambda \delta} e^{-\lambda(\tau-\delta/2)}$	$\frac{q_1}{2\lambda \delta} e^{-\lambda \tau} \left\{ e^{\lambda \delta} - \frac{1}{1-e^{-\lambda \delta}} + \frac{3}{2} + \frac{1}{\lambda \delta} \right\}$
シフトした 指数分布		$q_1 e^{a\lambda} E_1, \lambda = \frac{1}{(1/q_1 - a)} \quad a < \tau - \delta$		
アー ラン 分布	$m=2$ $\lambda=2q_1$	$\frac{q_1 e^{-\lambda \tau}}{1-e^{-\lambda \delta}} \left(1 + \lambda \tau + \frac{\lambda \delta e^{-\lambda \delta}}{1-e^{-\lambda \delta}} \right)$	$\frac{q_1}{\lambda \delta} e^{-\lambda(\tau-\delta/2)} \cdot \left\{ 2 + \lambda \left(\tau - \frac{\delta}{2} \right) \right\}$	$\frac{q_1 e^{-\lambda \tau}}{2\lambda \delta} \left\{ (\lambda \tau + 2) \left(\frac{1}{\lambda \delta} + \frac{3}{2} + e^{\lambda \delta} - \frac{1}{1-e^{-\lambda \delta}} \right) + \frac{1}{\lambda \delta} - \frac{\lambda \delta e^{-\lambda \delta}}{(1-e^{-\lambda \delta})^2} \right\}$
	$m=3$ $\lambda=3q_1$	$\frac{q_1 e^{-\lambda \tau}}{1-e^{-\lambda \delta}} \left\{ 1 + \lambda \tau + \frac{1}{2} \lambda^2 \tau^2 + \frac{\lambda \delta (\lambda \tau + 1) e^{-\lambda \delta}}{1-e^{-\lambda \delta}} + \frac{\lambda^2 \delta^2 e^{-\lambda \delta} (1+e^{-\lambda \delta})}{2(1-e^{-\lambda \delta})^2} \right\}$	$\frac{\lambda^3 q_1}{2\delta} e^{-\lambda(\tau-\delta/2)} \cdot \left\{ \frac{1}{\lambda^2} \left(\tau - \frac{\delta}{2} \right)^2 + \frac{4}{\lambda^3} \left(\tau - \frac{\delta}{2} \right) + \frac{6}{\lambda^4} \right\}$	$\frac{q_1 e^{-\lambda \tau}}{4\lambda \delta} \left\{ (\lambda^2 \tau^2 + 4\lambda \tau + 6) \left(\frac{1}{\lambda \delta} + \frac{3}{2} + e^{\lambda \delta} - \frac{1}{1-e^{-\lambda \delta}} \right) + \lambda \delta (\lambda \tau + 2) \left\{ \frac{2}{\lambda^2 \delta^2} - \frac{2e^{-\lambda \delta}}{(1-e^{-\lambda \delta})^2} - e^{-\lambda \delta} \right\} + \frac{2}{\lambda \delta} - \frac{\lambda^2 \delta^2 e^{-\lambda \delta} (1+e^{-\lambda \delta})}{(1-e^{-\lambda \delta})^3} \right\}$
シア フ ラ ン し た 布	$m=2$	$q_1 e^{a\lambda} (-a\lambda E_1 + E_2), \lambda = \frac{2}{(1/q_1 - a)} \quad a < \tau - \delta$		
	$m=3$	$q_1 e^{a\lambda} \left(\frac{1}{2} \lambda^2 a^2 E_1 - a\lambda E_2 + E_3 \right), \lambda = \frac{3}{(1/q_1 - a)} \quad a < \tau - \delta$		
$\begin{matrix} f(t) \\ h(t) \end{matrix}$		三角形分布 (拡がり 2δ)		三角形分布に対する近似
$\mathcal{L}\{E(t)\}$		$e^{-\tau s} \left\{ \frac{1}{\delta^2 s^3} (e^{\delta s} - \frac{3}{2}) + \frac{3}{\delta^3 s^4} \cdot \frac{1+e^{-\delta s}}{1-e^{-\delta s}} - \frac{6}{\delta^4 s^5} \right\}$		$\frac{e^{-\tau s}}{\delta^2 s^3} (e^{\delta s} - 1)$
指数分布 $\lambda = q_1$		$\frac{q_1}{\lambda^2 \delta^2} e^{-\lambda \tau} \left\{ (e^{\lambda \delta} - \frac{3}{2}) + \frac{3}{\lambda \delta} \cdot \frac{1+e^{-\lambda \delta}}{1-e^{-\lambda \delta}} - \frac{6}{\lambda^2 \delta^2} \right\}$		$\frac{q_1}{\lambda^2 \delta^2} e^{-\lambda \tau} (e^{\lambda \delta} - 1)$
シフトした 指数分布		$q_1 e^{a\lambda} E_1, \lambda = \frac{1}{(1/q_1 - a)} \quad a < \tau - \delta$		
アー ラン 分布	$m=2$ $\lambda=2q_1$	$q_1 e^{-\lambda \tau} \left\{ \frac{1}{\lambda \delta} \left(-1 + \frac{\tau}{\delta} + \frac{3}{\lambda \delta} \right) e^{\lambda \delta} + \frac{1}{\lambda^2 \delta^2} \left(\frac{3\tau}{\delta} + \frac{12}{\lambda \delta} \right) \frac{1+e^{-\lambda \delta}}{1-e^{-\lambda \delta}} + \frac{6e^{-\lambda \delta}}{\lambda^2 \delta^2 (1-e^{-\lambda \delta})^2} - \frac{1}{\lambda \delta} \left(\frac{3\tau}{2\delta} + \frac{9}{2\lambda \delta} + \frac{6\tau}{\lambda^2 \delta^3} + \frac{30}{\lambda^3 \delta^3} \right) \right\}$		$\frac{q_1}{\lambda^2 \delta^2} e^{-\lambda \tau} \cdot \left\{ e^{\lambda \delta} (3 + \lambda \tau - \lambda \delta) - (3 + \lambda \tau) \right\}$
	$m=3$ $\lambda=3q_1$	$q_1 e^{-\lambda \tau} \left\{ e^{\lambda \delta} \left\{ \left(\frac{\tau}{\delta} - 1 \right) \left(\frac{\tau}{2\delta} - \frac{1}{2} + \frac{3}{\lambda \delta} \right) + \frac{6}{\lambda^2 \delta^2} \right\} + \frac{3e^{-\lambda \delta} (1+e^{-\lambda \delta})}{\lambda \delta (1-e^{-\lambda \delta})^3} + \frac{6e^{-\lambda \delta}}{\lambda \delta (1-e^{-\lambda \delta})^2} \left(\frac{\tau}{\delta} + \frac{4}{\lambda \delta} \right) + \frac{1+e^{-\lambda \delta}}{1-e^{-\lambda \delta}} \cdot \frac{\tau}{\lambda \delta^2} \left(\frac{3\tau}{2\delta} + \frac{12}{\lambda \delta} \right) - \left(\frac{3\tau^2}{4\delta^2} + \frac{9\tau}{2\lambda \delta^2} + \frac{9}{\lambda^2 \delta^2} + \frac{3\tau^2}{\lambda^2 \delta^4} \right) \right\}$		$\frac{q_1}{2\lambda^2 \delta^2} e^{-\lambda \tau} \left\{ e^{\lambda \delta} (12 + 6\lambda(\tau - \delta) + \lambda^2(\delta - \tau)^2) - (12 + 6\lambda\tau + \lambda^2\tau^2) \right\}$
シア フ ラ ン し た 布	$m=2$	$q_1 e^{a\lambda} (-a\lambda E_1 + E_2), \lambda = \frac{2}{(1/q_1 - a)} \quad a < \tau - \delta$		
	$m=3$	$q_1 e^{a\lambda} \left(\frac{1}{2} \lambda^2 a^2 E_1 - a\lambda E_2 + E_3 \right), \lambda = \frac{3}{(1/q_1 - a)} \quad a < \tau - \delta$		

E_1, E_2, E_3 はアーラン分布の $m = 1, 2, 3$ に対する 1 ギャップ当たり平均合流台数

5. 観測結果および合流容量の算定例

モデルの前提の妥当性を検証し、またモデルで用いているパラメーターの値を推定して合流容量を算定するため、国道2号線鯉峠（兵庫県赤穂市）の登坂合流部において観測を行った。まず登坂車線の終端部への低速大型車交通の到着時間間隔の分布を観測した結果を図-6に示す。この標本ではシフトした指数分布がよく適合しており（ $\chi^2=13.7$ ，自由度27，サンプルサイズ257），また時間間隔が2.2秒以下のものの割合は0.8%しかない。ただしこの時の登坂車線の交通量は平均178台/時と少く，交通量が多くなれば車頭時間間隔の分布はフェーズ2以上のシフトしたアーラン分布に近くなるものと思われる。

次に同一のギャップに2台以上の本線走行車両が連続して合流した場合の合流車の車頭時間間隔を測定した結果を図-7に示す。ほぼ1秒から3.5秒位までの間に分布しており，平均値は1.99秒である。（標準偏差0.58秒，サンプルサイズ169）。

ギャップアクセプタンスの分布は直接には観測不可能であるが，登坂車線交通流のギャップへの合流車が1台のときのギャップ長を測定した結果を図-8に示す。この分布はほぼギャップアクセプタンスを表わしていると考えることができよう。図より2秒から7秒位までの間ではほぼ三角形に分布していることがわかる。なお平均値は4.39秒，標準偏差は1.13秒であり， $\tau=4.4$ 秒， $\delta=2.0$ 秒の三角形分布にしたがうという統計的仮説は有意水準5%で採択することができる（ $\chi^2=32.3$ ，自由度21，サンプルサイズ169）。

以上の観測結果より主交通流の車頭時間間隔分布としてはシフトしたアーラン分布（ $m=1, 2, 3$ ）が，またギャップアクセプタンスとしては三角形分布が適当と思われる， $a=2.2$ 秒， $\tau=4.4$ 秒， $\delta=2.0$ 秒という値

を用いて合流容量を算定する。主交通流の交通量 q_1 に対する副交通流の最大合流可能交通量 q^* を求めたものを図-9に示す。低速大型車両の割合が増加するほど，またフェーズが大きくなるほど合流容量は小さくなる。図-10は登坂合流部の交通容量 $q_1 + q^*$ を低速大型車両の混入率 $\phi = q_1 / (q_1 + q^*)$ に対して図示したものである。 $\phi = 0$ のときは高速車が一定の車頭時間間隔 δ で走行している状態である。低速大型車両の割合が増加していくと，車頭時間間隔およびギャップアクセプタンスのバラツキのため有効に使用されないギャップが増加してくる。このため容量が次第に低下していき， $\phi = 0.8$ 位で容量は最小になる。さらに低速大型車両の割合が増加すると，今度は低速大型車両の様な流れに近づいていくため，容量は増加し， $\phi = 1.0$ のときには低速大型車が一定の車頭時間間隔 a で走行している状態となる。図より明らかなように， ϕ が0.3位よりも大きい場合，合流部の交通容量は低速大型車両の様な流れに対する容量よりも小さい。このこと

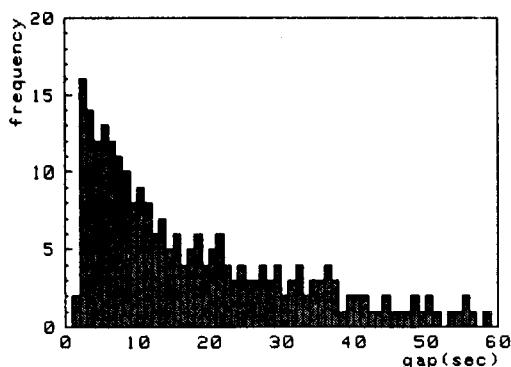


図-6 登坂車線終端部への到着時間間隔分布

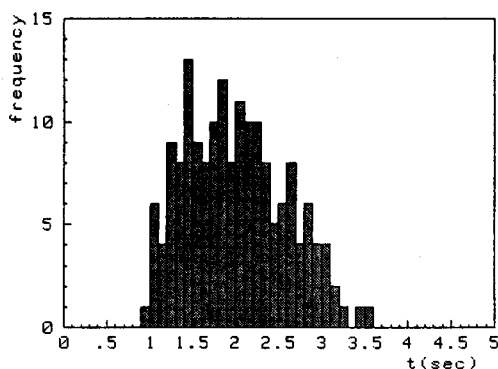


図-7 連続合流車間の車頭時間間隔分布

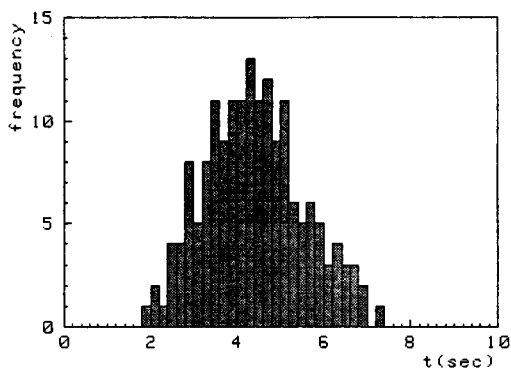


図-8 合流車が1台のときのギャップ長の分布

は交通量が増加して本線走行車両の速度が低下してくると、高速車両の走行性の向上はあまり期待できず、むしろ登坂車線を閉鎖する方が合流部での交通流の乱れがなくなることから交通流が円滑になり、また容量も増大する可能性があることを示唆するものといえよう。

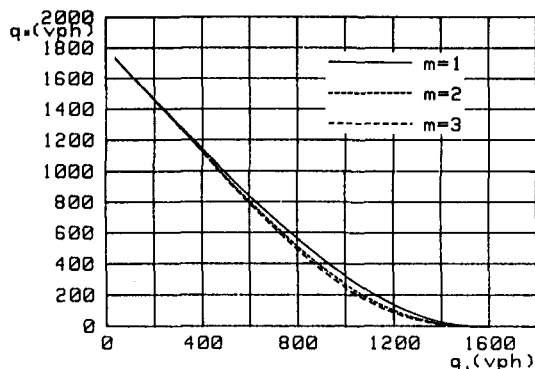


図-9 副交通流の最大合流可能交通量

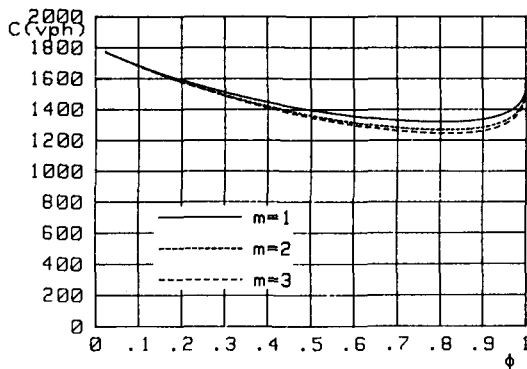


図-10 登坂合流部の交通容量

6. おわりに

本研究においては高速道路の登坂車線の適正利用を図るため、登坂終端部での本線との合流交通現象を待ち行列理論を応用して解析し、この部分の交通容量を算定する試みを行った。ただしここで算定した交通容量の値は1地点での観測データを基にして推定されたパラメーターを用いたものであり、したがって登坂合流部の交通容量を普遍的に表現するものではない。パラメーターの値は道路の勾配や線形等の道路条件および交通条件に依存するものと考えられ、今後これらの道路交通特性をモデルに組み込むことによって実用化を図っていきたいと考えている。

参考文献

- 1) Tanner, J.C. : A theoretical analysis of delays at an uncontrolled intersection, *Biometrika*, 49, pp.163~170, 1962
- 2) Oliver, R.M. and E.F. Bisbee : Queuing for gaps in high flow traffic streams, *Operations Research*, 10, pp.105~114, 1962
- 3) Evans, D.H., R. Herman and G.H. Weiss : The highway merging and queuing problem, *Operations Research*, 12, pp.832~857, 1964
- 4) Jewell, W.S. : Forced merging in traffic, *Operations Research*, 12, pp.858~869, 1964
- 5) Perchnok, P.A. and S.L. Levy : Application of digital simulation techniques to freeway on-ramp traffic operations, *Highway Research Board*, 39, pp.506, 1960
- 6) Drew, D.R., L.R. Lamotte, J.H. Buhr and J.A. Wattleworth : Gap acceptance in the freeway merging process, *Texas Transportation Institute Report 430-2*, 1967
- 7) Casey, T.W. : A study of three on-ramp merging capacity models, M. Sc. thesis, Brooklyn Polytechnic Institute, 1972
- 8) 阪神高速道路の合流部交通現象調査研究, 交通工学研究会, PP. 106~147, 1973
- 9) Inouye, H. : An analysis of highway on-ramp merging by queuing theory, *Memoirs of the School of Engineering Okayama University*, Vol.11, No.1, pp.32~43, 1976
- 10) Dunne, M.C. and D.J. Buckley : Delays and capacities at unsignalized intersections, *Proc. Australian Road Research Board*, Vol.6, 1972
- 11) Ashton, N.R., D.J. Buckley and A.J. Miller : Some aspects of capacity and queuing in the vicinity of slow vehicles on a rural two-lane road, *Proc. Australian Road Research Board*, Vol.41, 1968
- 12) 前掲 7)