

信号交差点における左折交通に及ぼす横断歩行者及び自転車の特性と定量化について*

Characteristics and Quantitative Analysis of Crossing Pedestrian and Bicycles Affecting the Left-turn Flow at Signalized Intersections*

河合芳之**・片倉正彦***・鹿田成則****・大口敬*****

By Yoshiyuki KAWAI**・Masahiko KATAKURA***・Shigenori SHIKATA****・Takashi OGUCHI*****

1. はじめに

都市内街路における交通渋滞は、主要な信号交差点で発生している。信号交差点の流入部は、最外側車線を直進・左折混用車線とし、横断歩行者・自転車（以下：横断歩行者等）と同一現示で処理することが一般的である。このような最外側車線は、横断歩行者等の影響により左折車両の閉塞が生じ、併せて直進車両の消極的な車線選択による交通容量の低下が見られる。

左折交通の飽和交通流率に及ぼす影響のうち幾何構造（転向半径）について筆者らは、すでに定量化を行っている¹⁾。左折飽和交通流率は、横断歩行者等との交錯により低減する。交錯による影響は青開始後の時間の推移によって変化し、左折車両は通過可能な横断歩行者等の間隔が出現するまで停止していなければならない。横断歩行者等は二方向から横断歩道上に進入し、左折車両が停止させられる時間帯はそれぞれの方向で異なる。左折車両と横断歩行者等との交錯の影響を表現する必要がある。従来、この点を明示的に具体的に扱った研究例はほとんどなく、特に横断歩行者とともに横断自転車を扱った研究事例はわが国では皆無といつてよい。

横断歩行者等と左折車両が交錯する地点における横断歩行者等の実態とその特性について明らかにし、横断歩行者等の横断挙動の定量化を行った。信号待ちの状態から発進する歩行者等の流率は、滞留人数を変数とした関数で近似でき、横断距離を変数とした拡散現象で表すことを示した。さらに、横断歩行者等の自転車交通量を用いて、最初に左折車両と交錯する地点に到達する歩行者等の属性の推定手法を案出し、この歩行者等の横断速度算出手法の導出を

行った。これらの結果を統合して、横断歩行者等が左折車両を閉塞する時間の算出方法を確立した。

2. 既存研究のレビュー

横断歩行者等による影響要因は、左折飽和交通流率の補正率の形で表現することが一般的であり、日本および欧米において種々な手法が案出されている。

わが国では、シミュレーション（横断歩行者の前方・後方ギャップより左折車の停止と通過を表現）を用いて横断歩行者と交錯する左折車の最大流率を求め、横断歩行者のない左折の交通容量との比に基づいて補正率を算出したもの²⁾と、左折交錯点（コンフリクトゾーン）における歩行者交通量を歩行者密度に変換し、これから左折の停止確率求めて補正率としたものがある^{3),4)}。

欧米では、左折交通容量を算出する際、横断歩行者の影響を補正率で表し、この補正率を算出する方法に左折交錯点を適用した方法を主として用いている。左折交錯点という概念は、1966年にオーストラリアのGordon&Miller, 1975年に西ドイツのKrauss & Trappらによって提案されたものである。スウェーデン交通容量マニュアル⁵⁾は、横断歩行者の発生をポアソン分布と仮定し、左折交錯点において左折車両が通行できる歩行者ギャップを設定して左折交通容量を算出している。また、Tarkoら⁶⁾は、歩行者交通量と左折交錯点における左折車両の閉塞時間を回帰モデルにより定式化しこれにより左折交通容量を算出している。このモデルは、現行のドイツの交通容量マニュアルであるHBS2001⁷⁾で採用されている。最近の研究では、Milazzoら⁸⁾⁹⁾が、横断歩行者と自転車専用車線を通行する自転車の左折交錯点占有時間比率を補正率とし、飽和交通流率を算出している。一方、Teplyら¹⁰⁾は、歩行者交通量と左折飽和交通流率の関係を回帰モデルにより算出している。

* キーワーズ: 横断歩行者, 自転車, 左折交通容量, 信号交差点

** 正員 博(工) 株式会社 公共計画研究所

*** 正員 工博 東京都立大学大学院工学研究科土木工学専攻

**** 正員 工修 同上

***** 正員 博(工) 同上

〒150-0002 東京都渋谷区渋谷3-11-2

TEL 03-3407-2055 FAX 03-3407-2015

3. 横断歩行者等の観測と実測結果

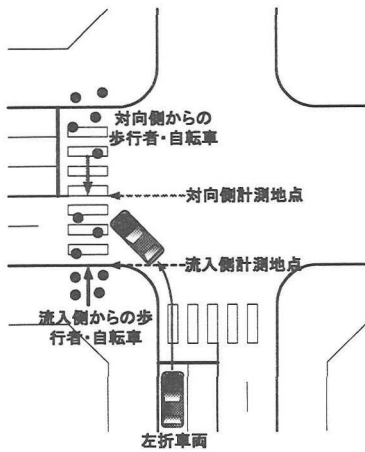


図-1 調査地点のイメージ図および計測箇所

横断歩道に着目し、サイクル単位で歩行者・自転車の別に流入側・対向側計測断面の通過時刻を計測した。併せて、この時の信号現示時間を記録した。調査時間は、各地点4時間から6時間である。

各調査地点における実測結果の概要および横断歩道の諸元を表-1に示す。実測結果は、合計で23,385人であり、各調査地点の解析時間は、3.6時間から5.8時間である。各調査地点における時間平均歩行者等は、332人/時から1,475人/時、自転車混入率は、4.8%から44.9%であった。

4. 歩行者等の横断挙動モデルの概念

本研究では東京都内の業務・商業中心地区の中から6箇所の交差点において観測を行った。観測方法は、高所よりビデオカメラによって撮影した。調査方法は、

図-1に示すように対象横

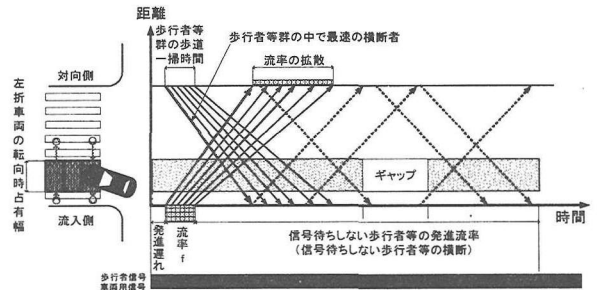


図-2 モデルの概念図

本研究は、横断歩行者等の横断挙動について時間を変数としたモデルを構築した。本研究で考案したモデルは、図-2に示すように横断歩行者等と左折車両が横断歩道上で交錯する場所を交錯エリアとし、横断歩行者等が左折交錯エリアを通過する時刻を推定するための横断挙動をモデル化した。本モデルでは、図-1に示すように、左折巻き込み側歩道から発進する歩行者を流入側歩行者とし、対向側歩道から発進する歩行者を対向側歩行者と定義する。また、本研究で用いる群は、信号待ちする横断歩行者等の横断時の集合を表す。モデルの概要は、以下に記述するとおりである。

信号待ちで歩道上に滞留した歩行者等群は、青表示開始時刻から発進遅れ時間の後、発進する。信号待ちの流入側横断歩行者等群が流出し左折交錯エリアを通過している間は、左折車両は通過できない。信号待ちの流入側歩行者等群が流出し終わった後、信号待ちしない流入側歩行者等は、到着分布に従って横断を行う。

一方、対向側の歩道縁石線を発進する歩行者等は、流入側歩行者等群と同様の発進遅れを伴い、横断を

表-1 実測結果の概要および横断歩道等の諸元

	全歩行者等数(人)	歩行者数(人)	自転車数(人)	信号待ち歩行者等数(人)	信号待ち無歩行者等数(人)	解析時間(時)	時間当り歩行者数(人/時)	平均サイクル長(秒)	平均青時間(秒)	横断歩道幅員(m)	自転車横断帯幅員(m)	横断帯幅員合計(m)	全横断距離(m)	対向側横断距離(m)
亀戸4丁目	流入側から	1,959	1,146	813	1,356	603	5.8	340	138	48.5	4.25	1.75	6.00	18.00
	対向側から	1,694	934	760	1,045	649	5.8	294						10.70
小川町	流入側から	1,330	1,175	155	890	440	3.6	372	132	45.1	4.20	1.75	5.95	24.00
	対向側から	1,277	1,145	132	887	390	3.6	357						13.50
神保町	流入側から	3,942	3,754	188	2,670	1,272	5.4	733	132	47.8	4.40	1.70	6.10	22.50
	対向側から	3,989	3,782	207	2,996	993	5.4	742						13.05
西巢鴨	流入側から	915	627	288	643	272	4.9	189	130	33.6	3.50	1.40	4.90	14.35
	対向側から	941	635	306	645	296	4.9	194						8.20
日本橋	流入側から	2,712	2,510	202	1,541	1,171	5.0	538	132	61.8	6.10	0.00	6.10	22.00
	対向側から	2,805	2,635	170	-	-	5.0	557						12.00
本八丁堀	流入側から	854	692	162	504	350	5.5	156	132	51.6	4.90	2.00	6.90	22.10
	対向側から	960	800	160	631	329	5.5	176						12.60
計		23,378	19,835	3,543	13,808	6,765	60	-	-	-	-	-	-	-

※ 青時間は、亀戸4丁目と西巢鴨については歩行者青時間であり、その他の地点は、車両用信号の青時間である。日本橋の対向側については、撮影上の制約から信号待ちの有無については読み取りができなかった。

開始する。しかしながら、対向側歩行者等群は、最初に左折交錯エリアに到達するまでに距離があるため、左折交錯エリアでは、対向側歩行者等群に拡散が生じると考えた。

対向側歩行者等群が最初に左折交錯エリアに到達する時間は、対向側歩行者等群の中で最も速度の高い歩行者または自転車が左折交錯エリアに到達する時間である。その後、拡散した対向側歩行者等群が左折交錯エリアを通過している間も左折車は通過できない。信号待ちの対向側歩行者等群が左折交錯エリアを流出し終わった後、信号待ちしない対向側歩行者等は、到着分布に従って横断を行う。

左折車両が通過可能な時間は、

(1) 左折交錯エリアを流入側歩行者等群の最終横断者通過終了時刻と、対向側歩行者等群の先頭者到着時刻の時間差が、左折車両通過に必要なギャップ以上の時間

(2) 対向側歩行者等群の最終横断者が左折交錯エリアを通過終了時刻後の時間

である。

本研究では、横断歩道幅員、横断歩道長および歩行者等交通量が調査地点毎に異なることから、横断歩行者等の横断特性を表す指標として発進流率を用いた。発進流率 f は、横断歩道幅員 1 m 当りに換算した横断歩行者等の滞留人数を歩行者等群の最速歩行者等と最遅歩行者等の時間差で除した値「(人/[秒・m])」とした。

5. 解析結果

(1) 流入側歩行者等群の特性について

滞留人数 4 人以下では、横断歩道上を併進するケースでは発進流率は高く、一方縦列で発進するケースでは発進流率は低くなり、発進流率のばらつきが大きい結果となった。滞留人数 5 人以上では横断歩道幅員の物理的制約から縦列で発進するため、滞留人数と発進流率の間に相関関係がみられ、滞留人数の増加に伴い発進流率が高くなる傾向が見られた。そこで、滞留人数 5 人以上と 4 人以下では等質ではないと考えクラス分けを行って解析を行うこととした。

初めに流入側歩行者等群の発進流率の結果を表一

表一 2 流入側歩行者等群の発進流率

	発進流率	データ数	標準偏差
亀戸4丁目	0.31	135	0.18
小川町	0.35	88	0.12
神保町	0.51	149	0.21
西巢鴨	0.43	63	0.22
日本橋	0.36	124	0.11
本八丁堀	0.25	38	0.1
計	0.38	597	0.19

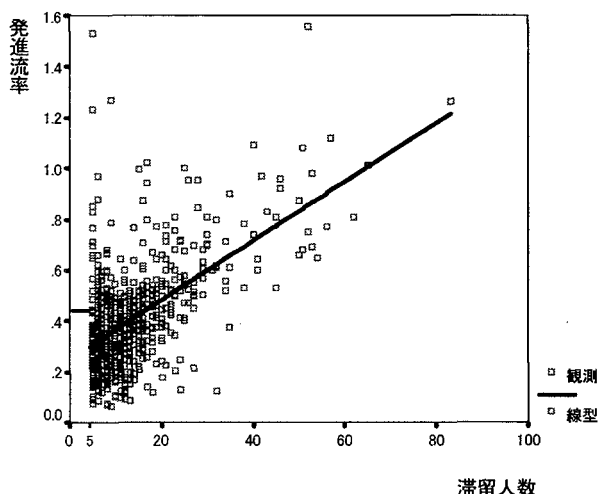
2 に示す(5 人以上の滞留があったサイクルを抽出)。

歩行者等の発進流率を調査地点毎にみると、平均値で 0.25 (人/[秒・m]) から 0.51 (人/[秒・m]) であり、歩行者等交通量の多い地点で発進流率が高い結果となり、滞留人数が増加すると発進流率も増加する傾向が伺えた。実測結果に既存研究の実測値¹⁾を補完し、地点合計($n=636$)のサイクル毎の滞留人数と発進流率の相関図を作成した(図-3 参照)。

相関係数は、 $R=0.57$ であり、滞留人数が少ない時は、発進流率のばらつきが大きいものの滞留人数が多くなるに従って発進流率が高くなりばらつきも小さくなる傾向がある。以上の理由から、滞留人数 5 人以上の発進流率は滞留人数を変数とする関数とした。

$$f = 0.0121N + 0.251 \quad (f: \text{発進流率}, N: \text{滞留人数})$$

滞留人数 4 人以下の発進流率は、平均値を用い算出した。 $f = 0.416$ (データ数: $n=139$)



図一 3 滞留人数と発進流率の関係

(2) 流入側歩行者等群のフライング

主要な信号交差点では、右折交通を処理するため

に右折専用現示を設置している箇所が多く、通常、右折専用現示の次の現示で歩行者に通行権が与えられるため横断歩行者等は信号開始時刻に従わず横断を開始する所謂フライング(Jumping the Gun)をする状況が見受けられる。実測結果を表-3に示す。

この結果から、横断する歩行者等でフライングする比率は少ないものの、サイクル単位でみるとフライングのあったサイクル数の比率が高いことが分かる。従って、実現象を再現する目的から判断して、歩行者群等の発進にこのフライングの実態を含めて解析することとした。

	歩行者 等群数	フライン グ数	比率	サイク ル数	フライン グ サイクル数	比率
亀戸4丁目	1,356	34	2.5%	154	25	16.2%
小川町	890	48	5.4%	101	21	20.8%
神保町	2,670	164	6.1%	150	46	30.7%
西巢鴨	643	34	5.3%	154	25	16.2%
日本橋	1,541	23	1.5%	140	13	9.3%
本八丁堀	504	11	2.2%	141	7	5.0%

表－3 歩行者等群のフライング数

(3) 流入側歩行者等群の発進遅れ時間

歩行者青表示開始から流入側歩行者等群の最初の横断者が横断開始をする時間を集計した。HCM2000⁹⁾では、この値を3.2秒としており、歩行者等群の左折交錯点通過時間を推定するためには不可欠なパラメータである。

表－4 信号待ち歩行者の遅れ時間

		遅れ秒数	標準偏差	データ数
亀戸	計	0.93	1.00	154
	歩行者	0.79	1.04	100
	自転車	1.21	0.96	54
小川町	計	1.16	2.48	101
	歩行者	1.17	2.21	88
	自転車	1.11	3.98	13
神保町	計	0.01	2.20	150
	歩行者	0.20	1.94	131
	自転車	-1.30	3.35	19
西巢鴨	計	1.32	1.51	132
	歩行者	1.47	1.52	79
	自転車	1.28	1.27	53
日本橋	計	1.11	1.20	140
	歩行者	1.11	1.24	128
	自転車	1.21	0.64	12
本八丁堀	計	1.65	1.92	141
	歩行者	1.69	2.08	111
	自転車	1.52	1.21	30
合計		1.01	-	818

各地点で歩行者・自転車毎に集計した(表-4 参照)。

この結果、どの地点においても概ね1秒であった。

また、各地点において歩行者と自転車の平均値の差をt検定したところ、亀戸4丁目を除いた地点では、1%水準で有意差がみられなかった。米国では、信号制御方式として右折先出しが一般的であるため、横断歩行者等がフライングすることが事実上困難であるのに対して、我が国では、信号制御方式の違いによりフライングが相当数観測され、発進遅れ時間は、米国に比べ小さいことが示された。このことから歩行者等群の発進遅れ時間は、歩行者・自転車に関わらず1秒とした。

(4) 対向側歩行者等群の拡散

対向側歩行者等群の発進流率が横断距離を変数とした関数で表すことが可能であると考え、横断歩道の縁石からの距離に応じた発進流率の変化(流率)を分析した。本研究では、対向側の歩行者等群が発進した後車道中央線を通過するときの流率を計測した。表-5は、この流率と流入側歩行者等群の発進流率(縁石線上)を比較した結果であり、計測断面の流率は、発進流率に比べ低い値が得られた。

表－5 対向側歩行者等群の拡散(実測)

	対向側歩行者等群 の流率 (車道中央線断面)	流入側歩行者等 群の発進流率
亀戸	0.19	0.35
小川町	0.20	0.34
神保町	0.26	0.51
西巢鴨	0.23	0.47
日本橋	-	0.37
本八丁堀	0.15	0.31

そこで、歩行者等群の拡散は、物質移動の拡散現象と同様に扱えると仮定した。即ち単位時間に単位面積を通過して移動する流率が、これを考えている地点でのポテンシャル差(密度差)の1乗に比例するとする。これは、

$$F = -\mu \frac{\partial \sigma}{\partial L}$$
 (F:流率 σ:密度, L:距離, μ:拡散係数)

であり、各横断歩行者速度は横断中一定であると仮定すると、

$$F = -\alpha \frac{\partial F}{\partial L}$$
 (α:定数)

となり、上式は、流率の緩和する速度が距離Lに比例することである。上式は、以下のように整理できる。

$$\int \frac{dF}{F} = \int -\gamma \times dL \quad (\text{ここで, } \gamma = \frac{1}{\alpha} \text{と置く})$$

$$\log|F| = -\gamma \times L + C \quad (C: \text{定数})$$

$$F = \pm e^C e^{-\gamma L}$$

ここで、 $A = \pm e^C$ とおくと、

$$F = Ae^{-\gamma L} \quad (A, \gamma: \text{定数})$$

となる。

これを検証するために、亀戸4丁目のデータを使って歩行者等群5人以上存在するサイクルを1時間分無作為に抽出し、3m間隔(0, 3, 6...18m)7断面で横断者等それぞれの通過時刻を計測した。この結果に基づき各断面における流率と距離との関係に拡散現象が存在するか検証をおこなった。

各サイクル単位のデータと全サイクル平均値のデータを用いて単回帰と負の指数回帰を行った。

サイクル単位では、単回帰: $R=0.67$, $R^2=0.45$, 指数回帰: $R=0.72$, $R^2=0.51$ となった

全サイクル平均値では、単回帰: $R=0.99$, $R^2=0.98$, 指数回帰: $R \approx 1$, $R^2 \approx 1$ となった(図-5参照)。

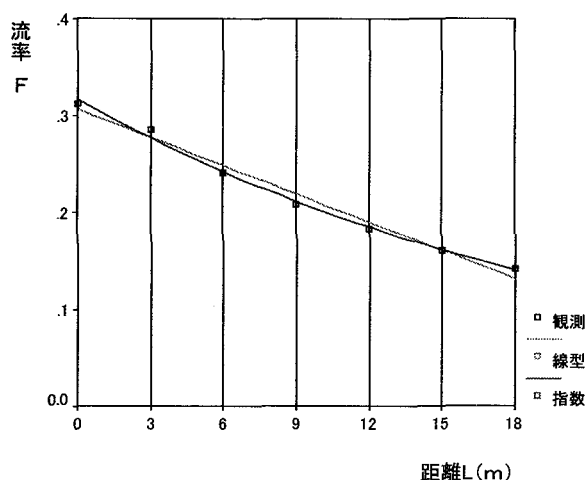


図-5 サイクル平均の流率と距離の関係

回帰式は以下のとおりである。

$$F = 0.31e^{-0.045L}$$

ここで上記の0.31は歩道縁石の発進流率であり、定数 $\gamma = -0.045$ が歩行者等の拡散を表す定数として他の地点でも定数が一定であるならば、一般化が可能である。そこで、回帰式と車道中央線での計測値を地点毎に比較したものが表-6である。結果は指数回帰式と実測値は適合しており、対向側の流率は、横断距離 L を変数とした負の指数分布

$F = \text{歩道縁石発進流率} \times e^{-0.045L}$ で近似することが可能である。また、歩行者のみで構成される拡散は自転車

	回帰値	実測値
亀戸4丁目	0.19	0.19
小川町	0.19	0.2
神保町	0.28	0.26
西巣鴨	0.30	0.23
本八丁堀	0.14	0.15

が混入している時よりも小さいことが示された。回帰結果は、定数 $\gamma = -0.033$ (サイク

ル単位: $r=0.52$, サイクル平均: $r=0.97$)である。

次に滞留人数4人以下のケースにおいて、先に算出した歩道端における4人以下の発進流率が拡散を生じ車道中央線の流率となると仮定し、定数を推定した。この結果、自転車が存在するケースでは定数 $\gamma = -0.096$, 歩行者のみで構成されるケースでは、定数 $\gamma = -0.072$ が得られた。

(5) 信号待ちしない歩行者の到着分布

歩行者の到着分布は、ポアソン分布に従うと仮定し、これを検証した。歩行者等群が流出し終えた後の信号待ちしない歩行者等の最初の発生時間である初期発生時間は、ポアソン過程では指数分布となる。このため、初期発生時間について指数分布の適合度について検証を行った。

流入側6地点のうち神保町を除く5地点において5%有意水準で仮説が棄却されない結果となった。

また、対向側歩行者については、歩行速度を1.25m/秒と仮定し、対向側横断距離(車道中央線)で除した値をシフトした指数分布の適合の検定を行った。この結果、神保町と西巣鴨は、仮説が棄却されない結果となった。

以上のことから、信号待ちをしない歩行者は、ポアソン到着として取り扱うこととする。

(6) 対向側から左折交錯エリアに到達する歩行者・自転車の出現

本研究では、対向側の歩行者等群の中から最初に左折交錯エリアに到達する横断歩行者等の属性に着目した。対向側から左折交錯エリアに到達する横断歩行者等は、歩行者・自転車の速度差があるため、自転車の有無によって、左折交錯エリアに到達する最初の横断者等の属性が異なるためである。

実測結果は、表-7に示すように自転車混入率の非

常に少ない地点であっても、左折交錯地点に到達する最初の歩行者等の属性が自転車であるサイクルの比率が高く、最初に到達する横断者の属性が、左折車両の通行の可否を決定する大きな要因となることから解析を行った。

表－7 自転車が左折交錯点に到達したサイクル数				
	①調査サイクル数	自転車混入率(%)	②自転車の存在したサイクル数 ②／①(%)	③自転車が最初に到達したサイクル数 ③／②(%)
亀戸4丁目	154	44.9%	142	123
			92.2%	86.6%
小川町	101	10.3%	66	47
			65.3%	71.2%
神保町	149	5.2%	94	59
			63.1%	62.8%
西巢鴨	138	32.5%	101	75
			73.2%	74.3%
本八丁堀	153	16.7%	82	65
			53.6%	79.3%

はじめに、歩行者および自転車の速度分布は、対数正規分布と仮定し、この仮定の検証を行った。亀戸4丁目において5人以上の歩行者等群の速度データから、カイ自乗検定を行った。得られたデータは、歩行者（平均値： $\mu=1.29$ ，標準偏差： $\sigma=0.25$ ，データ数： $N=179$ ），自転車（ $\mu=2.27$ ， $\sigma=0.54$ ， $N=148$ ）である。検定の結果は、有意水準5％で棄却されない結果となった。

次に、自転車の存在の有無別サイクル数の推定を行った。自転車の存在しないサイクル数を求めるに当たって、自転車の到着をポアソン分布と仮定した。これは、対象サイクル中に自転車が来ない確率に等しいことから、

$$P=e^{-\frac{Vt}{3600}}$$

(V：自転車交通量(台／時)，t：サイクル長(秒))
 によって実測回数と比較検証した（表－8）。

	実測回数	理論回数
亀戸4丁目	12	6
小川町	35	35
神保町	55	51
西巢鴨	37	32
本八丁堀	54	55

結果は、理論回数と実測回数が適合していることが示された。自転車の存在しないサイクル数の推定は、自転車の到着確率分布にポアソン分布を仮定することとした。

さらに、自転車の存在するサイクルの速度分布の

推定を行った。歩行者と自転車の速度分布に対数正規分布をあてはめ互いに独立と仮定し、これらを線形結合した分布（混合分布）を考える。この分布は、次式で表すことができ、結合パラメータ w_j に自転車混入率 a と歩行者混入率 $1-a$ を適用すれば、自転車と歩行者のそれぞれの混入率で重み付けした1つの確率分布と見なすことができる（図－6）。混入率は、信号待ちしている歩行者・自転車の合計に対する歩行者、自転車の割合である。

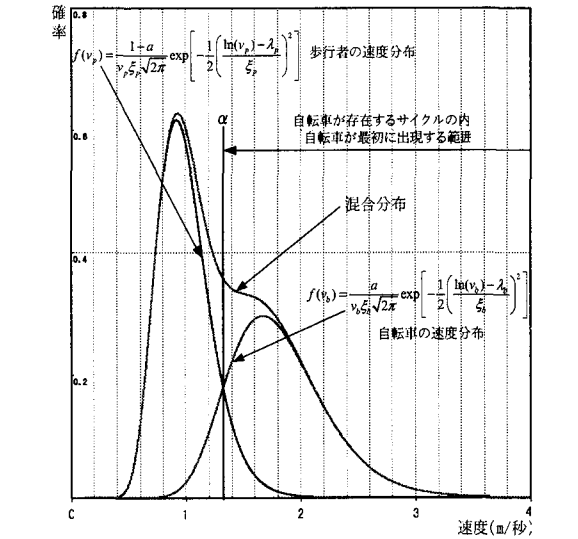
$$f(v)=\sum_{j=1}^Nw_jf_j(v)$$

$$\sum_{j=1}^Nw_j=1\quad ,\quad 0\leq w_j\leq 1$$

を満たすものである。
 このとき歩行者と自転車の速度分布を線形結合した分布の確率密度関数は次式で与えられる。

$$f(v)=\frac{1-a}{v_p\xi_p\sqrt{2\pi}}\exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln(v_p)-\lambda_p}{\xi_p}\right)^2\right]+\frac{a}{v_b\xi_b\sqrt{2\pi}}\exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln(v_b)-\lambda_b}{\xi_b}\right)^2\right]$$

ここで、 v_p,v_b は、それぞれ歩行者と自転車の速度、 λ は速度の期待値、 ξ は標準偏差である（図-6 参照）。



図－6 横断歩行者・自転車の速度分布と混合分布
 歩行者と自転車の速度は、平均的に $\lambda_p<\lambda_b$ であるが(例えば亀戸4丁目で歩行者の平均速度1.3m／秒、自転車2.3m／秒)、図－6にみられるように自転車の速度より高い速度の歩行者が存在し、常に自転車の速度が歩行者の速度より高いとは限らない。したが

って、左折との交錯エリアに最初に到達する歩行者等が必ずしも自転車であるとはいえない。

そこで、左折交錯エリアに最初に自転車が到達する確率を以下のように表すこととした。歩行者と自転車の混入率で重み付けした速度分布が交わる時の速度（図-6の α ）を求め、自転車の速度分布においてこの速度より高い速度領域の確率、すなわち

$$P = \int_{\alpha}^{\infty} f_b(v) dv$$

を上記の確率とした。ここで、 $f_b(v)$ は、自転車の速度の確率密度関数である。

上記の仮説を検証するために、実測データを基に分析を行った。前述したように、歩行者・自転車別に混入率で重み付けした対数正規分布の交点 α より高い速度領域の確率を理論出現確率として求め（交点 α は数値計算によって算出）、実測出現確率（自転

表-9 自転車の出現確率の検証

	実測出現確率	理論出現確率
亀戸4丁目	87%	88%
小川町	71%	71%
神保町	62%	63%
西巢鴨	74%	84%
本八丁堀	79%	77%

車のいたサイクル数中で自転車が左折交錯エリアに最初に到達したサイクルの割合）と比較したのが表-9である。理論値は、実測によく適合することがわかった。

(7) 対向側から左折交錯点に到達する歩行者・自転車の速度の推定

対向側から到達する歩行者等による左折車両の閉塞は、左折交錯点に対向側から到達する最初の横断者によって発生する。本研究では、対向側から左折交錯点に到達する最初の横断者の速度を推定するために順序統計量を用いた。歩行者等の滞留人数(n)から n 番目順序統計量（最も速度が高い）を求め、この時の速度を対向側から左折交錯エリアに最初に到達する歩行者または自転車の速度の推定値とするものである。

はじめに、順序統計量について概説する。

確率密度関数 $f(v)$ 、累加分布関数 $F(v)$ をもつ母集団から n 個の観測値が得られたとき、これらの観測値を昇順に並び換えたものであり、 i 番目の変量 v_i を i 番目順序統計量という。これら n 個の順序統計量を

表す確率変数を考えると次のことが成り立つ。

i 番目順序統計量が v_i という値を取るとき、これに対する非超過確率 $F(v_i)$ は、

$$F(v_i) = \int_{-\infty}^{v_i} f(v) dv$$

であり、超過確率 $W(v_i)$ は、

$$W(v_i) = \int_{v_i}^{\infty} f(v) dv = 1 - F(v_i)$$

である。変量 v が v_i のときの確率要素（ v_i と $v_i + dv$ との間に生ずる確率）は、

$$dF(v_i) = f(v_i) dv$$

そうすると、 i 番目順序統計量 v_i の確率要素は、

$$f(v_i) dv = \frac{n!}{(i-1)!(n-i)!} F(v_i)^{i-1} W(v_i)^{n-i} f(v_i) dv$$

で表される。

ここで、 $F(v_i)$ の期待値 $E(F(v_i))$ を考えると、

$$\begin{aligned} E(F(v_i)) &= \int_0^1 F(v_i) \times \frac{n!}{(i-1)!(n-i)!} F(v_i)^{i-1} W(v_i)^{n-i} dF(v_i) \\ &= \frac{n!}{(i-1)!(n-i)!} \int_0^1 F(v_i)^i \{1 - F(v_i)\}^{n-i} dF(v_i) \end{aligned}$$

である。

ここで、 α 、 β をパラメータとするベータ関数 $B(\alpha, \beta)$ は、

$$\int_0^1 F(v_i)^{\alpha-1} [1 - F(v_i)]^{\beta-1} dt = B(\alpha, \beta)$$

であり、

$$B(\alpha, \beta) = \frac{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)}{\Gamma(\alpha+\beta)}$$

を用いて

$$\begin{aligned} E(F(v_i)) &= \frac{n!}{(i-1)!(n-i)!} B(i+1, n-i+1) \\ &= \frac{n!}{(i-1)!(n-i)!} \times \frac{\Gamma(i+1)\Gamma(n-i+1)}{\Gamma(n+2)} \end{aligned}$$

となる。ガンマ関数は i が自然数のとき、

$\Gamma(i) = (i-1)!$ であるから、 $F(v_i)$ の期待値として

$$E(F(v_i)) = \frac{i}{n+1}$$

が得られる。

この期待値を改めて、 $F(v_i) = \frac{i}{n+1}$ と表し、これ

が小さいほうから数えて i 番目に位置する i 番目順序統計量 v_i の期待値である（この式によって期待値を求める方法を平均ランク法と呼んでいる）。

順序統計量を用いて、サイクル平均滞留歩行者等群 n 人の時の n 番目（対向側歩行者群の中で最も速度が高い）の速度を推定した。

この n 番目の歩行者群等の $F(v_n)$ は、 $\frac{n}{n+1}$ であり、

この $F(v_n)$ の時の v_n を先頭歩行者等の速度とする。また、 n が小さい場合（ $n < 20$ ）には、メジアンランク法が適合しており、この近似式として、

$$F(v_n) = \frac{n-0.3}{n+0.4} \quad (i=1,2,3,\dots,n)$$

がある（A.Benard & E.C.Bos _ Levenbach(1953)）。

従って、信号待ちする対向側横断歩行者等のサイクル当りの平均滞留人数に応じて平均ランク法とメジアンランク法を用いて、最も早い横断歩行者等の速度を推定することとした。

平均ランク法： $E(F(v_i)) = \frac{i}{n+1}$ (for $n > 20$)

メジアンランク法： $M(F(v_i)) = \frac{i-0.3}{n+0.4}$ (for $n \leq 20$)

次に、亀戸4丁目交差点の1時間データを基にしたサイクル毎の滞留人数と速度順による発進順位の関係を図-7に示す。最も高い又は2番目に高い速度の横断者の発進順位は2サイクルを除き1位又は

2位である。一方、最も速度の遅い横断者の発進順位は規則性が見出せないが、傾向として滞留人数の後半に発進することが伺える。この事実を踏まえて対向側から最初に左折交錯点に到達する歩行者等は、最初に横断を開始する歩行者・自転車であると仮定し、横断歩行者等の速度を推定した。横断歩行者等群の速度分布を対数正規分布で仮定し、最速歩行者または最速自転車の速度の累加確率を順序統計量にメジアンランク法または平均ランク法を用いて、この時の累加確率に対応する最速者速度を算出した。最速者の速度推定値と実測結果は、表-10に示す。

表-10 最初に左折交錯点に到達する歩行者等の実測結果と推定値の比較

	自転車が存在しないケース				自転車が存在するケース			
	平均歩行者数(人/サイクル)	推定最速歩行者の順序統計量(%)	推定最速歩行者速度(m/秒)	実測最速歩行者速度(m/秒)	平均自転車数(人/サイクル)	推定最速自転車の順序統計量(%)	推定最速自転車速度(m/秒)	実測最速自転車速度(m/秒)
亀戸4	7.0	90.5%	1.62	1.90	3.2	79.4%	2.67	2.45
小川町	9.1	92.6%	1.67	1.90	1.4	50.0%	2.21	2.40
神保町	20.4	96.6%	1.79	1.80	1.6	70.8%	2.51	2.40
西果鴨	4.8	87.0%	1.56	1.52	2.0	70.8%	2.51	2.00
本八丁堀	4.2	84.1%	1.54	1.34	1.1	50.0%	2.21	2.10

自転車が存在しないケースと自転車が存在するケースのどちらにおいても、推定値と実測値は、おおむね適合していることが示された。この結果から、対向側から左折交錯エリアに最初に到達する歩行者等の速度の推定方法として順序統計量を用いることとした。

6. まとめ

(1)横断歩行者等の発進流率

流入側の横断歩行者等群は、図-2で示したように、平均1秒の発進遅れで発生し、歩行者等群が左折交錯エリアを通過する間中、左折車両は閉塞される。この時の左折閉塞時間は、(歩行者滞留人数/(発進流率×横断歩道幅員))で算出される。発進流率は、 $f = 0.012N + 0.251$ (5人以上)であり、その後信号待ちしない歩行者等群の発生は、ポアソン分布で近似できる。

(2)対向側の横断歩行者等群の流率

対向側の横断歩行者等群の発進は、平均1秒の発進遅れで発進し、滞留人数から対向側縁石線における発進流率を算出し、次に歩行者等群が左折交錯エリアに到達する時の流率を推定する。流率は、横断距離を変数とした拡散現象で表すことが示された。

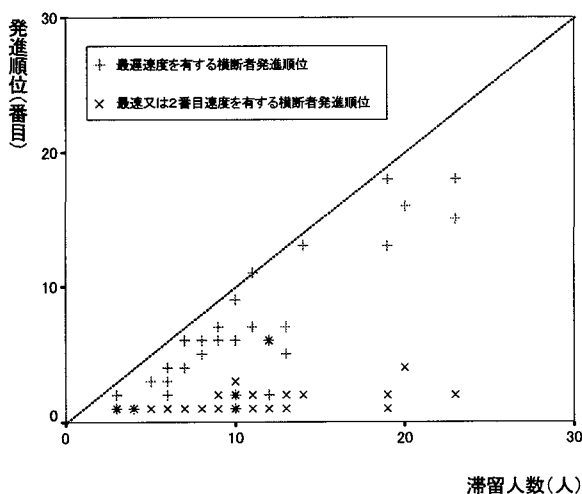


図-7 滞留人数と発進順位の関係

流率の推定方法は、左折交錯エリアまでの距離を L とし、負の指数関数（対向側縁石発進流率 $\times e^{-0.045L}$ ）を用いて算出する（5人以上）。歩行者のみで構成されるサイクルでは、（対向側縁石発進流率 $\times e^{-0.033L}$ ）を用いて流率を推定する（5人以上）。

(3) 対向側から左折交錯エリアに最初に到達する歩行者等の属性の推定

はじめに、自転車交通量を用いて横断歩行者等の中に自転車の存在するサイクル数を推定する。

次に、自転車の存在するサイクルの中で、左折交錯エリアに最初に到達する歩行者等が自転車である確率は、自転車と歩行者の混入率で重み付けした対数正規速度分布を用いて推定した。自転車の出現確率の算出方法は、2つの速度分布の交点 α 以上である自転車の速度分布の積分値である。

(4) 左折交錯エリアに最初に到達する横断歩行者等の速度の推定

左折交錯エリアの最初に到達する横断歩行者等の速度は、順序統計量を用いて推定した。

(5) 左折交錯エリアにおける横断歩行者等が左折車両を閉塞する時間の推定

流入側歩行者等群の閉塞時間は、(1)の結果を用いて左折交錯エリアの到達時間および左折交錯エリアからの流出時間の算定を行う。

一方、対向側歩行者等群の閉塞開始時間は、(2), (3), (4)で示したように自転車交通量と自転車混入率を用いて左折交錯エリアに最初に到達する歩行者等の属性及び速度を推定し閉塞開始時間の算定を行う。対向側歩行者等群の左折車両閉塞時間は、歩行者等群の左折交錯エリア通過終了時刻から歩行者等群の先頭横断歩行者等の到達時刻を減じた値で

算定できる。

本研究で案出した手法は、左折車両を閉塞する時間の算出をする目的で構築したものであるが、信号交差点における自転車交通の影響評価、横断歩道幅員の決定や変更に伴う影響評価、歩車分離信号機の計画・評価、信号現示企画の設計、車線運用方法の計画・評価等に応用できると考える。

今後の課題としては、本モデルの精度検定および左折車両が通行可能な歩行者ギャップの推定モデルの構築を図り、左折容量の推定手法の確立を図ることである。

最後に、歩行者本研究は財団法人三井住友海上福祉財団平成13年度交通安全・高齢者福祉助成金を得て実施したことを記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 信号交差点における転向半径と転向角度が左折飽和交通流率に与える影響について、土木計画学研究・論文集, Vol.25, H14.6, 河合芳之, 鹿田成則, 片倉正彦, 大口敬
- 2) 交通工学研究会編：平面交差の計画と設計－基礎編－, 昭和59年
- 3) 池ノ上慶一郎, 齊藤威：シミュレーションのための信号交差点における転向車両の横断歩行者による停止確率の算出法, 科学警察研究所報告交通編, 1972
- 4) 交通工学研究会編：交通信号の手引, 平成6年
- 5) Karl-Lennart Bang, Swedish Capacity Manual: Part 3. Capacity of Signalized Intersections, TRR667, 1978
- 6) Andrzej Tarko & Stanislaw Gaca, Pedestrians at signalized Intersections, Highway Capacity and Level of Service, 1991
- 7) Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (HBS2001), FGSV, Deyember 2001
- 8) JOSEPH S. MILAZZO II, NAGUI M. ROUPHAIL, JOSEPH E. HUMMER, AND D. PATRICK ALLEN, Effect of Pedestrians on Capacity of Signalized Intersections, TRR1646, 1998
- 9) Transportation Research Board, Highway Capacity Manual (HCM2000), 2000
- 10) S. Teply, D. I. Allingham, D. B. Richardson, B. W. Stephenson, Canadian Capacity Guide for Signalized Intersections, 1995
- 11) 松本弘之, 村田隆裕：歩行目的別横断歩行者流の調査結果について, 科学警察研究所報告交通編, 1980

河合芳之**・片倉正彦***・鹿田成則****・大口敬*****

信号交差点の流入部は、最外側車線を直進・左折混用車線とし、横断歩行者・自転車（以下：横断歩行者等）と同一現示で処理することが一般的である。このような最外側車線は、横断歩行者等の影響により左折車両の閉塞が生じ、併せて直進車両の消極的な車線選択による交通容量の低下が見られる。

本研究は、左折交通流率の影響要因である横断歩行者等の量や行動特性に着目し、横断歩行者等と左折車両が交錯する地点における横断歩行者等の実態とその特性について明らかにし、横断歩行者等の横断挙動の定量化を行ったものである。

信号待ちの状態から発進する歩行者等の流率は、滞留人数を変数とした関数で近似でき、横断距離を変数とした拡散現象で表すことを示した。さらに、横断歩行者等の自転車混入率を用いて、最初に左折車両と交錯する地点に到達する歩行者等の属性の推定手法を案出し、この歩行者等の横断速度算出手法の導出を行った。これらの結果を統合して、横断歩行者等が左折車両を閉塞する時間の算出方法を確立した。本研究で案出したモデルは、信号制御を中心とする歩車分離信号の導入の効果やその基準の設定等、平面交差点の設計に供すると考える。

Characteristics and Quantitative Analysis of Crossing Pedestrians and Bicycles Affecting the Left-turn Flow at Signalized Intersections *

By Yoshiyuki KAWAI**・Masahiko KATAKURA***・Shigenori SHIKATA****・Takashi OGUCHI*****

In this Paper, The purpose of this paper is to investigate the factors affecting saturation flow rate of left-turn traffic. The actual conditions and characteristics of pedestrians/bicycles at the conflict area where pedestrians/bicycles and left-turn vehicles cross are clarified in order to quantify the behavior of pedestrians/bicycles. The model devised in this study is expected to contribute to the development of signalized intersection planning.
