

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**・鹿田成則***・片倉正彦****・大口敬*****

By Yoshiyuki KAWAI**・Shigenori SHIKATA***・Masahiko KATAKURA****・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。交通渋滞は、左折車両・駐停車などにより最外側車線の利用低下が原因となっている箇所が多く、このような箇所では、最外側車線の利用を促すことによって現状の渋滞を解消できる。

左折交通の基本値である飽和交通流率に関して幾何構造（轉向半径）が及ぼす影響について定量化を行った。しかしながら、左折交通容量を推定するに際して、横断歩行者等が大きな要因であるにもかかわらず、様々な条件に適合する定量的な算出方法が確立されていない。本研究では左折交通容量の推定値を算出するために、横断歩行者と左折車両が交錯する地点において横断歩行者・自転車（以下：歩行者等）について解析を行い、横断歩行者等の特性について明らかにすることによってモデル化を図ったものである。

2. 既存研究のレビュー

横断歩行者等が左折飽和交通流率の影響要因であることに着目した研究は、日本および欧米において多様な方法が案出されている。

日本における現行基準は、シミュレーションを活用して横断歩行者を出現させ、左折車両が利用可能な前方・後方歩行者ギャップを与え算出した基準¹⁾と実測による歩行者交通量を左折交錯点（コンフリクトゾーン）における歩行者密度に変換し、これから左折の停止確率求めて算出した基準^{2),3)}がある。

欧米では、横断歩行者の影響要因を算定し交通容量を算出する方法は、左折交錯点を適用した方法が主流であり、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⁴⁾では、横断歩行者の発生をポアソン分布と仮定し、左折交錯点を左折車両が通行可能な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、Andrzej Tarko⁵⁾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。最近の研究ではJoseph S. Milazzo⁶⁾が、横断歩行者と自転車専用車線を通行する自転車が左折交錯点を歩行者青時間の間に占有する時間比率を定式化し、飽和交通流率を算出している。一方、S. Tepley⁷⁾は、歩行者交通量から左折飽和交通流率の補正値を回帰して算出している例もある。

3. 本研究の基本的な考え方

一般街路において限られた道路用地の中でより良い交通環境を実現するためには、信号交差点の運用方法の適正化を図る必要がある。とりわけ、最外側車線の有効な利用がなされているとは言い難い実態がある。特に左折交通容量の推定値が十分ではなく、既存研究においても、横断歩道幅員や横断自転車を取り扱っている例は殆ど無いことから、影響要因である横断歩行者等の推定手法に着目した。本研究では、左折交通容量の推定値を算出するために、横断歩道幅員や横断自転車を考慮したモデルを構築した。この結果を踏まえて最外側車線における飽和交通流率の推定手法の確立および信号交差点の適正な運用に資することを目的とする。

4. 横断歩行者等の観測と実測結果

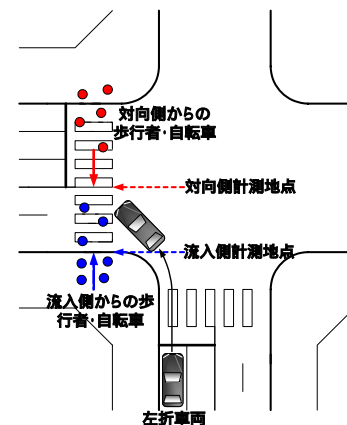


図-1 調査地点のイメージ図および計測箇所

本研究では東京都内の業務中・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する方法で行った。調査方法は、図-1に示すようにサイクル単位で対象横断歩道を歩行者・自転車の別に流入側・対向側計測断面を通過する時刻を観測し、併せて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時間の撮影を実施した。

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。計23,385人の読み取りを行い、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数は、332人/時から1,475人/時、自転車混入率は、4.8%から44.9%であり、交通条件の異なるデータの収集が図られた。

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。計23,385人の読み取りを行い、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数は、332人/時から1,475人/時、自転車混入率は、4.8%から44.9%であり、交通条件の異なるデータの収集が図られた。

5. モデルの概念

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が左折交錯点を通過する時間を考えた。信号待ちで横断歩道上に滞留した歩行者等群が青表示開始時間後に群として発進する。この時、流入側の横断歩行者等群が左折交錯点を通過し、その後は歩行者等の到着分布に従って通過する。一方、対向側を群で発進した歩行者等は左折交錯点まで距離があるため、左折交錯点を通過する時点に群の拡散が生じると考えた。この群が左折交錯点を通過している間は、左折車両は通行することが出来ず、通行可能な時間は流入側群終了時

* 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 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 工博 同上

***** 正員 博(工) 同上

〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1

0427-77-1111 FAX0426-77-2772

表 - 1 実測結果の概要および横断歩道当の諸元

		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	10.70
	対向側から	1,694	934	760	1,045	649	5.8	294							
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	13.50
	対向側から	1,277	1,145	132	887	390	3.6	357							
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	13.05
	対向側から	3,989	3,782	207	2,996	993	5.4	742							
西巣鴨	流入側から	915	627	288	643	272	4.9	189	130	33.6	3.50	1.40	4.90	14.35	8.20
	対向側から	941	635	306	645	296	4.9	194							
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	12.00
	対向側から	2,805	2,635	170	-	-	5.0	557							
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	12.60
	対向側から	960	800	160	631	329	5.5	176							
計		23,378	19,835	3,543	13,808	6,765	60	-	-	-	-	-	-	-	-

青時間は、亀戸4丁目と西巣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。

と対向側群の到着時の差および対向側群の終了時以降である。
また、横断歩道幅員の影響を考慮するため、群の最初に発進した歩行者等から最後に発進した歩行者等の時間で除した横断歩行者等の人数を横断歩道幅員1m当りに換算した値を発進流率と定義した。

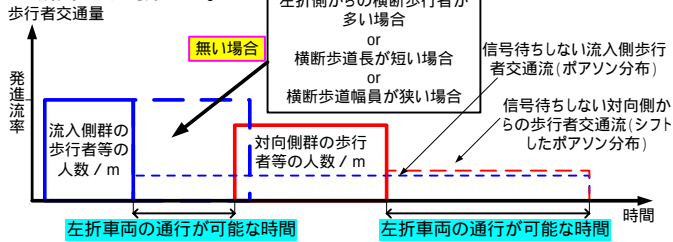


図 - 2 モデル概念図

6. 解析結果

(1) 流入側群の特性について

滞留人数4人以下では、横断歩道上を一列に併進して横断が可能のため、このようなケースは発進流率は高く、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関係がみられた。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した。

初めに歩行者等の流入側群の発進流率の結果を表 - 2 に示す(5人以上の滞留があったサイクルを抽出)。

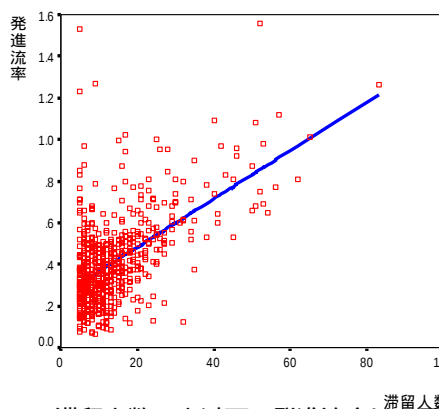
表 - 2 流入側歩行者等群の発進流率

	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
西巣鴨	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

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から0.51であり、歩行者等交通量の

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。しかしながら、収集データは滞留人数の多いデータが少なかったため、実測結果に既存研究の実測値⁹⁾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)。

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で取り扱うこととした。
 $f = 0.0121N + 0.251$
(f:発進流率,N: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。

$$f = 0.416(n=139)$$

(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、横断方向の右折専用の後に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。

表 - 3 歩行者等群のフライング数

	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%
西巣鴨	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%

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。

(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。HCM2000⁷⁾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には不可欠な要因である。

集計は、各地点で歩行者・自転車毎に集計した。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丁目を除いて1%水準で有意差がみられなかった。このことが

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

表 - 4 対向側流率(実測)

	発進流率
亀戸4丁目	0.19
小川町	0.2
神保町	0.26
西巣鴨	0.23
日本橋	-
本八丁堀	0.15

対向側歩行者群等の流率として計測断面を車道中央線とした。計測結果は、表 - 4 に示すとおりであるが、同一地点で横断歩行者等の交通の質が同様であるとする、計測断面において相当な発進流率からの低下が見られた。

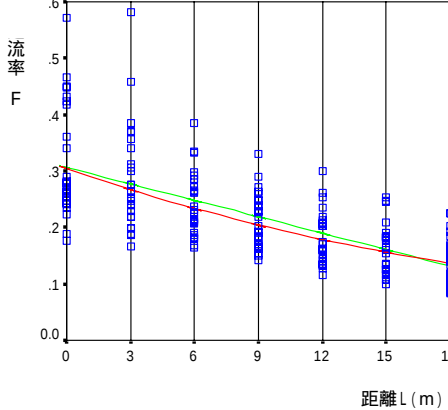
そこで、歩行者等群が拡散は物質移動の拡散現象と同様に扱えると仮定した。即ち単位時間に単位面積を通過して移動する流率が、これを考えている地点でのポテンシャル差（密度差）の1乗に比例する。これは、

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

であり、各横断歩行者速度は横断中一定であると仮定すれば、

$$F = -\alpha \frac{\partial F}{\partial L} \quad (\alpha: \text{定数}) \text{となり、流率の緩和する速度が距離 } L \text{ に比例することとなる。これを整理すれば、}$$

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



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。この結果を基に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。

図 - 4 流率と横断距離の関係
回帰は、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単回帰と負の指数回帰で行った。サイクル単位では、単回帰：R=0.67, R²=0.45, 指数：R=0.72, R²=0.51となり（図 - 4 参照）、全サイクル平均値では、単回帰：R=0.99, R²=0.98, 指数：R≒1, R²≒1となった。回帰式は以下のとおりである。

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

表 - 5 回帰式と実測値の比較

	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

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一定であるならば、一般化が可能である。そこで、回帰式と計測値を地点毎に比較したものが表 - 5 である。結果は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が混入している

時よりも拡散が少なく、定数 $\gamma = -0.033$ (サイクル単位：r=0.52, サイクル平均：r=0.97) が得られた。

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

歩行者の到着分布が、ポアソン分布に従うと仮定しこれを検証した。ポアソン過程の時初期発生時間が指数分布となることからこれを用いて検証した。

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、対向側横断距離で除した値をシフトした時間とし、この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点に到達する歩行者・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点に到達する時間に着目した。流入側での現象とは異なり歩行者・自転車は速度差を有することから、自転車の有無が左折交錯点に到達する時間が異なるためである。この現象をモデル化するために、歩行者・自転車の到達確率をそれぞれの

表 - 6 自転車が左折交錯点に到達したサイクル数				
	調査サイクル数	自転車混入率(%)	自転車の存在したサイクル数 / (%)	自転車が最初に到達したサイクル数 / (%)
亀戸4丁目	154	44.9%	142 / 92.2%	123 / 86.6%
小川町	101	10.3%	66 / 65.3%	47 / 71.2%
神保町	149	5.2%	94 / 63.1%	59 / 62.8%
西巣鴨	138	32.5%	101 / 73.2%	75 / 74.3%
八丁堀	153	16.7%	82 / 53.6%	65 / 79.3%

速度分布を持つ、共に独立な対数正規分布を混入率で重み付けした線形結合で近似する混合分布で表す。実測結果は、表 - 6 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横断者が自転車である比率が多くサイクル数を占めており、最初に到達する横断者の時間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。

本節の最初の仮定である歩行者および自転車の速度分布が対数正規分布と仮定したことについて検証を行った。亀戸4丁目の5人以上の歩行者等群の速度データから、カイ乗検定を行った。得られたデータは、歩行者 ($\mu=1.29, \sigma=0.25, N=179$), 自転車 ($\mu=2.27, \sigma=0.54, N=148$) である。

表 - 7 自転車存在しないサイクル数

	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
西巣鴨	37	32
本八丁堀	54	55

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、

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

$$m = \frac{Vt}{T} \quad (V: \text{自転車交通量}, T: \text{観測時間(秒)})$$

によって実測回数と比較検証した(表-7)

この結果から、自転車の存在しないサイクル数の決定は、ポアソン分布を適用して算出することとした。

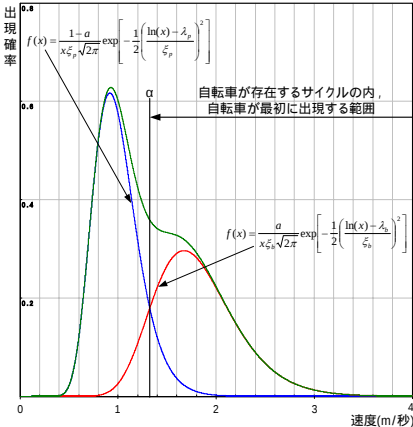


図-5 信号待ちする歩行者・自転車の出現確率

	実測比率	理論比率
亀戸4丁目	87%	88%
小川町	71%	71%
神保町	62%	63%
西巣鴨	74%	84%
本八丁堀	79%	77%

比率は実測比率に適合しており、自転車が存在するサイクルにおける自転車の出現確率の推定方法として混合分布を適用した方法により推定できることが確認された。

(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
左折の交通容量を算定するに当たって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。自転車および歩行者の速度分布が対数正規分布で近似できることを利用して、歩行者等の滞留人数(n)から n 番目順序統計量(最も速度の高い速度)を求め、この時の速度を流入側から発進する歩行者等の最速横断者の速度の推定値とするものである。本研究では、 i 番目順序統計量である v_i を決定する非超過確率 $F(v_i)$ 値を推定する手法として、平均ランク法とメジアンランク法を用いた。
平均ランク法：
$$E(F(v_i)) = \frac{i}{n+1} \quad (\text{for } n > 20)$$

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

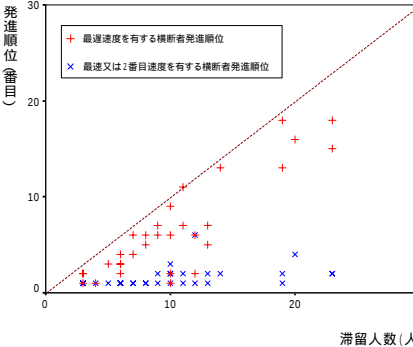


図-6 滞留人数と速度順による発進順位の関係

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

次に、自転車が存在するサイクルにおいて、左折交錯点に最初に到達する自転車の比率と理論分布から導出される比率と適合の検証を行った。対向側の歩道縁石断面において出現する歩行者と自転車の確率分布は、図-5に示すとおりであるが、左折

交錯点において自転車が最初に到達する確率は歩行者と自転車の分布関数が交錯する点 α を下限とした自転車密度関数の積分値である。

表-8に示すように理論

交錯点に到達する歩行者等速度の推定値と実測結果を比較した(表-9)

表-9 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)	推定値	実測値	平均自転車数(人/サイクル)	推定値	実測値	平均歩行者数(人/サイクル)	推定値
	最速歩行者の順序統計量(%)	最速歩行者速度(m/秒)	平均最速歩行者速度(m/秒)	最速自転車の順序統計量(%)	最速自転車速度(m/秒)	平均最速自転車速度(m/秒)		
亀戸4	7.0	90.5%	1.62	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
西巣鴨	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

この結果から、モデル化に当たっては、対向側から左折交錯点に最初に到達する歩行者等の推定方法として順序統計量を使用し推定を行うこととした。

7. まとめ

図-2で示したように、流入側から発進する歩行者等群は、平均1秒の発進遅れで発生し、歩行者等群による左折閉塞時間(歩行者滞留人数/(発進流率×横断歩道幅員))で推定される。この時の発進流率は、 $f = 0.012N + 0.251$ (5人以上)であり、その後はポアソン分布で発生する。

対向側から発生する歩行者等群は、発進遅れ1秒の後、自転車混入率から推定される(1)歩行者のみで構成されるサイクルの比率、(2)歩行者・自転車が存在するが歩行者が最初に左折交錯点に到達するサイクルの比率、(3)歩行者・自転車が存在して自転車が最初に左折交錯点に到達する比率をポアソン分布および重み付け対数正規分布の交点 α から算出する。次に歩行者等の滞留人数から対向側縁石における発進流率を推定し、拡散する左折交錯点での流率を負の指数関数を用いて算出する対向側縁石発進流率 $\times e^{-0.045L}$ (5人以上)。歩行者のみで構成されるサイクルでは0.033(5人以上)を用いて流率を推定する。左折車両を閉塞する時間は、先の先頭者速度から左折交錯点への到達時間が推定可能であるため、補正した流率と滞留人数から歩行者等群の通過終了時間を算出する。

本研究で案出したモデルは、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、左折容量の推定値の確立を図ることである。最後に、歩行者本研究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)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
- 2)池ノ上慶一郎、斎藤威：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
- 3)交通工学研究会編：交通信号の手引、平成6年
- 4)Karl-Lennart Bang, Swedish Capacity Manual: Part 3. Capacity of Signalized Intersections, TRR667, 1978
- 5)Andrzej Tarko & Stanislaw Gaca, Pedestrians at signalized Intersections, Highway Capacity and Level of Service, 1991
- 6)JOSEPH S. MILAZZO II, NAGUI M. ROUPHAIL, JOSEPH E. HUMMER, AND D. PATRICK ALLEN, Effect of Pedestrians on Capacity of Signalized Intersections, TRR1646, 1998
- 7)Transportation Research Board, Highway Capacity Manual(HCM2000), 2000
- 8)S.Teply, D.I Allingham, D.B.Richardson, B.W.Stephenson, Canadian Capacity Guide for Signalized Intersections, 1995
- 9)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