

横断歩道長と歩行者青経過時間を考慮した 横断歩行速度のモデル化

張 馨¹・中村 英樹²・浅野 美帆³・陳 鵬⁴

¹正会員 名古屋大学大学院技術補佐員 工学研究科 社会基盤工学専攻
(〒464-8603 名古屋市千種区不老町C1-2 (651))
E-mail:zhang@genv.nagoya-u.ac.jp

²フェロー会員 名古屋大学大学院教授 工学研究科 社会基盤工学専攻 (同上)
E-mail:nakamura@genv.nagoya-u.ac.jp

³正会員 名古屋大学大学院助教 工学研究科 社会基盤工学専攻 (同上)
E-mail:asano@genv.nagoya-u.ac.jp

⁴正会員 名古屋大学大学院研究員 工学研究科 社会基盤工学専攻 (同上)
E-mail:peng@genv.nagoya-u.ac.jp

信号交差点における横断歩行者の歩行速度特性を知ることは、歩行者信号表示の適切な設定や安全性の向上に極めて重要である。そのため、横断歩道の幾何構造および信号現示等による横断歩行速度の変化を定量的に評価する必要がある。そこで本研究では、様々な横断歩道長や歩行者青時間長の横断歩道における歩行者青(PG)時の横断歩行速度を、横断の前半・後半速度に分けて分析し、これらを一般的に説明するモデルの推定を行った。その結果、横断歩道長が長くなるほど、また青時間開始時間から時間が経つほど、横断歩行速度が速くなることが明らかになった。さらに、これを既存の歩行者青点減時間(PFG)における横断歩行速度モデルと比較したところ、青点減時間中の横断歩行速度の方が全体的に速く、バラツキが大きい傾向がみられた。

Key Words : *pedestrian speed, crosswalk length, pedestrian green time, crossing direction*

1. はじめに

信号交差点において、横断歩行者の行動特性を知り、それらを横断歩道の設計や歩行者信号表示の適切な設定に反映することは極めて重要である。

日本の信号交差点での死亡事故件数のうち、横断中の歩行者対車両の事故が全体の約3割を占めており¹⁾、横断歩道上での歩行者の安全性が問題となっている。例えば、左折車両の衝突回避挙動は横断歩行者に対するギャップ選択によって左右されるが、実際に発生するギャップは各歩行者の横断歩行速度に依存している。そのため、横断歩行速度のバラツキを考慮することは、横断歩道近傍での安全性を定量的に評価する上で不可欠といえる。

また、改訂交通信号の手引²⁾によると、歩行者青現示時間の最小値は一定の横断歩行速度 (1 m/sec) を用いて設定することとしているが、実際には横断歩行速度は横断歩道の幾何構造や信号現示、周囲の影響等により変化すると考えられる。そのため、横断歩道の幾何構造およ

び信号現示等による横断歩行速度の変化を定量的に評価する必要がある。

本研究では、様々な横断歩道長や歩行者青時間長の横断歩道における歩行者青(PG)表示時の歩行速度を分析し、これを一般的に説明するモデルを推定する。さらに、既存の歩行者青点減時間(PFG)における横断歩行速度モデルとこれを比較し、横断歩行速度分布の平均とバラツキの違いについて考察を行うことを目的とする。

2. 歩行速度に関する既往研究

Gohら³⁾は、マレーシアの信号交差点と無信号交差点における歩行者の横断歩行速度について分析を行い、無信号横断歩道における横断歩行速度は信号機付き横断歩道より高いことを示している。また、年齢、性別等の歩行者属性は、横断歩行速度に大きく影響することも明らかにした。

また、鈴木ら⁴⁾は、横断歩道における青時間(PG)に対する意識と横断歩行速度について分析した。通常の歩行速度が遅い人ほど、自分が横断に必要とする時間に比べて青時間長が短いと感じるため、意識的に急ぎ足で横断する傾向がみられた。

しかしながら既往研究では、横断歩行速度に大きく影響を与えると予想される横断歩道の幾何構造や、横断開始タイミング・青時間長等による要因は考慮されていない。交差点構造や信号表示の適切な設計を行うためには、これらの影響を定量的に評価することが必要である。

これらを考慮した研究として、Asano et al.⁵⁾は、青点減(PFG)中の横断歩行速度について、横断歩道長や青点減開始時の速度・位置や歩行者交通量との関係によりモデル化を行っている。歩行者は限られた青点減時間内に横断を終える必要があるため、横断歩道が長いほど、また横断開始タイミングが遅いほど、急いで横断する傾向がみられた。この研究は歩行者青点減(PFG)時のみに着目しているが、これらの要因が歩行者青時間(PG)時の横断歩行速度に及ぼす影響についても評価する必要がある。

3. 横断歩行者速度の実態調査

(1) 対象とする歩行者

本研究は歩行者青時間(PG)内に横断を開始した全歩行者を対象として分析を行う。ただし、今回のいずれの調査箇所においても歩行者には青年・壮年層が多く、高齢者はほとんど見られず、分析に際して年齢属性を考慮することが困難であった。そのため、挙動特性が明らかに異なる高齢者と集団登校中の小学生は対象としない。さらに、歩行者交通量が非常に多い通勤通学ピーク時間帯は観測対象から除外した。

(2) 調査概要

名古屋市内の5箇所の信号交差点を対象としてビデオ撮影を行った。表-1に調査の観測時間およびサンプル数等を示す。

表-1 観測時間およびサンプル数

交差点名	横断歩道位置	観測日時	分析サンプル数		
			Near-side	Far-side	合計
金山新橋南	東	2012/10/19 9:00-13:00	345	250	595
	北		650	578	
植田一本松	東	2012/11/29-30 7:00-10:00, 14:00-16:30	166	136	302
	南		179	188	
桜通大津	西	2012/10/31 10:00-11:00, 14:00-15:00	188	257	445
広小路伏見	南	2012/11/5 10:00-11:00, 14:00-15:00	271	319	590
山田四丁目	東	2012/11/8-9 7:00-9:30, 14:30-17:00	278	155	433

また、対象交差点の幾何構造、歩行者信号時間長および観測時の歩行者・左折車両交通量を表-2に示す。横断歩道長の範囲は16mから36mまでである。なお、分析対象とする横断歩道にはすべて約2mの自転車横断帯が付帯している。本来、横断歩道と自転車横断帯は用途の異なる空間であるが、実態としてはどちらも横断歩行者に通行空間として利用されているため、本研究では、自転車横断帯も含めた一帯を横断歩道とみなして分析を行う。山田四丁目交差点を除くすべての交差点は単純四現示制御である。また、山田四丁目交差点は東西方面時差式制御であるが、今回の分析対象とする東側横断歩道に対しては、歩行者・右左折車両とも単純四現示制御と同じ信号現示が表示されるため、これもあわせて分析に使用する。

これらの交差点において、ビデオ観測による歩行者挙動の取得を行った。0.5秒ごとの歩行者位置を画像処理システム⁶⁾により取得し、射影変換により実座標への変換を行った上で、固定カルマンスムージングにより歩行者の瞬間速度を補完推定した。

表-2 対象交差点の幾何構造、歩行者信号時間長および観測時の歩行者・左折車両交通量

交差点名	横断歩道位置	横断歩道幾何構造[m]		歩行者信号時間長[sec]		サイクル長[sec]	歩行者交通量[ped/h]	左折車両交通量[veh/h]
		長さ	幅員	PG	PFG			
金山新橋南	東	16.2	5.8	54	6	160	180	148
	北	36.2	5.8	39	9		335	124
植田一本松	東	28.7	5.7	45	10	160	34	46
	南	20.8	5.2	54	8		90	176
桜通大津	西	34.1	6.3	37	10	160	288	94
広小路伏見	南	35.4	6	40	10	160	326	122
山田四丁目	東	15.2	5.7	80	6	170	43	50

(3) 変数の定義

ここでは、歩行者青時間(PG)内に横断開始した歩行者をPG歩行者、青点滅(PFG)時間内に横断開始した歩行者をPFG歩行者と呼ぶこととする。青時間(PG)と青点滅(PFG)では、横断歩道における歩行速度特性が明らかに異なると予想され、両者を分けて分析する必要がある。Asano et al.⁹⁾はPFG歩行者の横断歩行速度を図-1のように定義し分析しているため、本研究でも、PG歩行者に対してこれと同様の定義を用いる。

a) 横断方向

横断歩道のうち、流出する右左折車両と交錯のある側をNear-side、反対側をFar-sideとする。本研究では、Near-sideから進入する歩行者をNear-side歩行者、Far-sideから進入する歩行者をFar-side歩行者と呼ぶこととする。

b) 横断歩行速度

横断歩行速度は、横断前半速度 v_1 と横断後半速度 v_2 の2つによって定義する。図-1に示すとおり、歩車道境界断面から中央分離帯まで、および中央分離帯から歩車道境界断面までの移動距離を、その間の移動時間で除したものをそれぞれ横断前半速度、横断後半速度と呼ぶ。

なお、横断方向によってそれぞれ横断歩道上での位置が反転することに注意されたい。Near-side歩行者は横断前半に左折車両との交錯があるが、Far-side歩行者はこれが横断後半になる。

c) PG経過割合

PG歩行者に対して、歩行者がPG内のどのタイミングで横断を開始したかは、横断歩行速度に大きく影響すると考えられる。例えば、PG開始直後に横断開始する場合は、ある程度余裕をもって横断を行えるのに対して、PGの終盤に横断開始する場合は横断途中で青点滅に切り替わり急いで横断する可能性が生じたりする。このように、横断歩道に到着タイミングによって異なる横断状況を考慮するため、PG経過割合を定義する。

PG経過割合は、PG開始から横断開始までの経過時間を青時間長で除すことによって求める。経過時間を青時間長で一般化する理由は、横断歩道によって青時間長が異なり、横断開始時に周辺の他歩行者や右左折車両の状況もこれに依存すると考えられるためである。

d) 進入時速度

PG歩行者については、信号待ちをした歩行者とそうでない歩行者や待機位置の違いなどを区別するため、図-1に示すとおり、進入時速度 v_e を考慮する。進入時速度 v_e は、横断歩道進入時の歩車道境界断面通過瞬間速度とする。

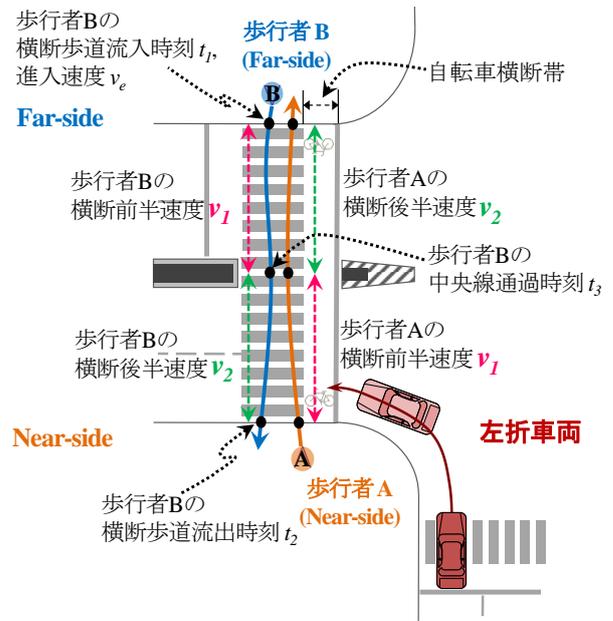


図-1 横断歩行速度の定義

4. 分析結果

図-3に、植田一本松交差点の東側横断歩道のNear-side歩行者の横断前半・後半速度の分布を示す。基本的にPG歩行者には、横断歩行速度が2.8m/secより速い歩行者が少なく、分布のバラツキも小さいことがわかる。PG中には横断歩道上の優先権が歩行者にあり、右左折車両により急かされるといった事象が少ないためと考えられる。図-3では、横断前半速度が横断後半速度より速い傾向がある。有意水準5%のt検定により、横断前半速度と横断後半速度には有意な差が示されている。

しかしながら、これらの特徴は横断歩道幾何構造や歩行者の進入状況によって変化すると考えられる。このため、以降では、PG歩行者の横断速度に対する影響要因として、(1)横断歩道長、(2)PG経過割合および(3)横断方向に関する分析を行う。

(1) 横断歩道長による影響

図-4に、長さの異なる2つの横断歩道におけるNear-side歩行者の横断前半・後半速度分布を示す。これらは金山新橋南交差点の北側横断歩道(36.2m)と東側横断歩道(16.2m)である。これより、横断歩道長が長いほど、分布が右側にシフトし、横断歩行速度が上がる傾向がみられる。PG歩行者には横断に十分な時間があるにもかかわらず、横断歩道長による影響を受けていることから、歩行者が横断歩道を車両との衝突の危険性のある領域と認識し、これが長く続く場合にはできるだけ早く横断を終えようとしていることが推測される。

(2) PG経過割合による影響

図-5 に、金山新橋南交差点の北側横断歩道における Near-side 歩行者の PG 経過割合別の横断前半速度分布を示す。PG 経過割合が高くなるほど、横断前半速度が速くなる傾向がみられる。これは、PG 開始直後に横断した歩行者が余裕をもって横断できるのに対して、途中から横断し始める歩行者は残りの青時間が不確かなため、できるだけ早く横断を終えようとするためと考えられる。特に、PG の終盤に相当する PG 経過割合が 80~100[%] の場合は、明らかに横断歩行速度が速くなることがわかる。このタイミングで横断開始した歩行者は、PG 終了時に横断を終えられなかった可能性が高く、青点減切り替わり後に急いで渡りきったため速度が上がったと考えられる。横断後半速度についても同様の傾向がみられる。

(3) 横断方向による影響

図-6 は、PG 経過割合と横断前半速度・後半速度平均値の関係を、横断方向別に示したものである。Near-side 歩行者については、これまでの分析(図-2)同様、横断後半速度は横断前半速度より低い傾向にある。これは、Near-side 歩行者が、右左折車両との交錯領域を前半に横断し終わるので、後半では車両を確認する必要もなく、急かされることもないためと考えられる。これに対して、Far-side 歩行者については、横断後半速度は横断前半速度より高くなる。これは、Far-side 歩行者が横断後半に左折車両と交錯するため、この領域を早く通過しようとするためと考えられる。

5. 歩行者横断前半・後半速度モデル

(1) モデル推定結果

前章の分析結果より、横断歩行速度は左右非対称に分布していることが明らかである。左右非対称な確率分布形には対数正規分布やガンマ分布等様々なものがあるが、本研究では、確率的特性を考慮するため、横断歩行速度がガンマ分布に従うと仮定し、ガンマ分布の形状パラメータ α と尺度パラメータ β が影響要因の線形関数になるとみなして、最尤法によるパラメータ推定を行った。ガンマ分布では、形状パラメータ α が小さいほど分布のバラツキが小さくなり、また尺度パラメータ β が大きいほど歪度が小さくなると同時に分布の平均値も大きくなる。

横断歩道長やPG経過割合、横断方向といった様々な影響要因について検討したところ、横断前半速度と横断後半速度では影響要因が異なることが分かったため、これらを別々にモデル推定した。表-3と表-4に横断前半速度と横断後半速度のモデル推定結果を示す。

横断前半速度に対しては進入時速度が、横断後半速度

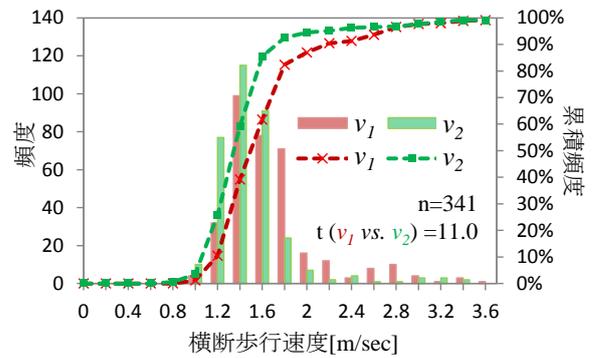


図-3 横断歩行速度の分布(植田一本松・東・Near-side)

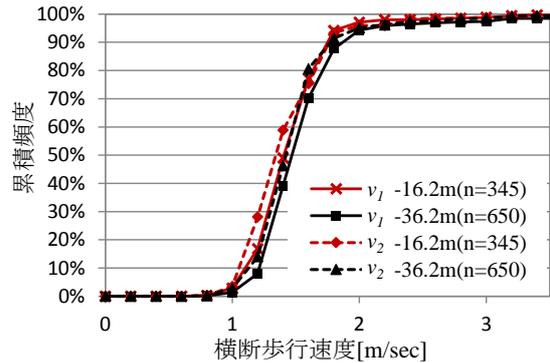


図-4 横断歩道長別の横断速度分布

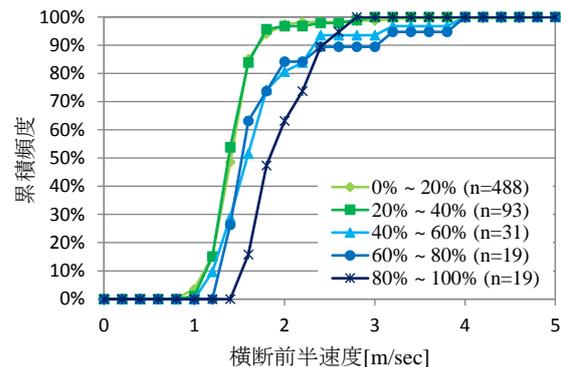


図-5 PG経過割合別の横断前半速度分布

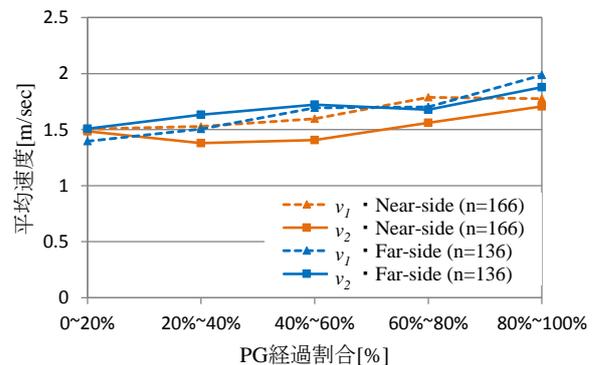


図-6 PG経過割合と横断速度平均値の関係

に対しては横断前半速度が非常に有意に働いており、直前の速度に強い影響を受けていることがわかる。横断歩道長が形状パラメータ α に対して正となっている。横断歩道長が長いほど、歩行者は速度を上げる傾向が示された。また、横断方向ダミーが形状パラメータ α に対し

表-3 横断前半速度モデル

	説明変数	横断前半速度	
		係数	t 値
形状 パラメータ α	進入時速度 [m/sec]	7.47	17.7
	横断歩道長 [m]	0.720	14.3
	Near-side:0, Far-side:1	4.19	7.62
	定数項	1.93	1.40
尺度 パラメータ β	進入時速度 [m/sec]	3.91×10^3	9.65
	横断歩道長 [m]	-1.06×10^3	-13.7
	Near-side:0, Far-side:1	-4.14×10^3	-6.55
	PG経過割合 [%]	1.85×10^3	3.98
	定数項	0.0697	25.4
サンプル数		3960	
対数尤度		-126	
初期尤度		-1430	
χ^2 値		2608	
修正済み決定係数 R^2		0.912	

表-4 横断後半速度モデル

	説明変数	横断後半速度	
		係数	t 値
形状 パラメータ α	横断前半速度 [m/sec]	-2.10	-4.24
	横断歩道長 [m]	0.695	14.5
	Near-side:0, Far-side:1	4.10	6.80
	定数項	22.8	13.0
尺度 パラメータ β	横断前半速度 [m/sec]	0.0199	25.8
	横断歩道長 [m]	-6.00×10^4	-12.3
	Near-side:0, Far-side:1	-1.59×10^3	-3.20
	定数項	0.0256	12.4
サンプル数		3960	
対数尤度		-150	
初期尤度		-1511	
χ^2 値		2722	
修正済み決定係数 R^2		0.901	

て正となっており、Far-side歩行者の方がNear-side歩行者より速度が高いことも、前節までの分析結果と一致する。PG経過割合については、横断前半速度の尺度パラメータ β に対してのみ有意となった。PG経過割合は横断開始タイミングを暗示する変数であるが、歩行者は残りの青時間を正確に認識できるわけではないため、全ての歩行者の横断開始タイミングが遅いからといって速度を上げるとは限らず、このような不確実性が特に横断前半の分布のバラツキに影響するためと考えられる。

上記に示した以外の要因として、ピーク・オフピークでの歩行者属性の違いや左折車両の存在の影響なども分析したが、いずれも有意な結果とはならなかったため、モデルからは除外した。

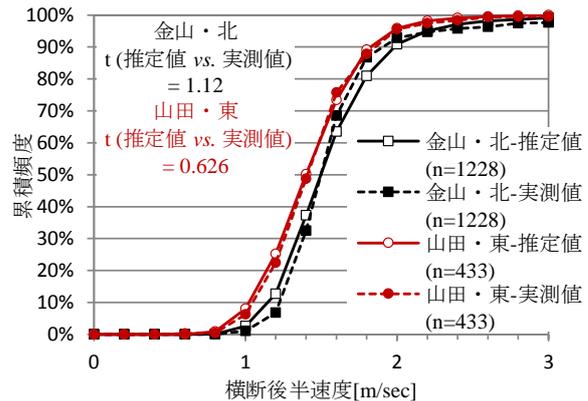
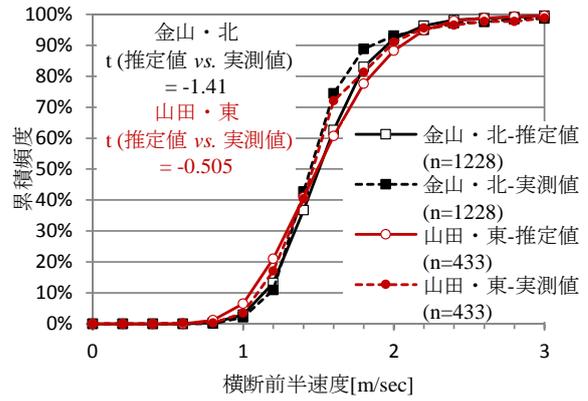


図-7 横断前半・後半速度モデルの推定値と実測値の比較

(2) モデルの検証

モデルの再現性を検証するため、金山新橋南および山田四丁目交差点における歩行者について、実測サンプル数と同数の歩行者によるモンテカルロシミュレーションを行い、得られた推定値を実測値と比較する。PG経過割合、進入時速度と横断前半速度(横断後半速度推定時)は実測値の分布に従うものとする。歩行者の横断方向は、方向別の割合によって決定する。横断前半、後半速度の推定値と観測値の分布をそれぞれ図-7に示す。推定された分布と実測分布には有意水準5%で有意な差がみられず、各モデルの再現性は良好といえる。

(3) 感度分析

本モデルによって、横断歩行速度と各種説明変数との関係を示すパラメータが推定された。これらの説明変数が、現実的な範囲でどの程度感度があるものかを調べるため、感度分析を実施する。ここでは、着目する変数以外の各説明変数を以下に示す基本設定値に固定し、対象変数の感度をみる。

- 横断歩道長：30m,
- 横断方向：Near-side,
- 進入時速度(PG)：1.5m/sec,
- PG経過割合：50%.

横断前半速度モデルの説明変数の感度分析結果を、図-8に示す。(a)は進入時速度を1.2~2.1[m/sec]まで変化させ

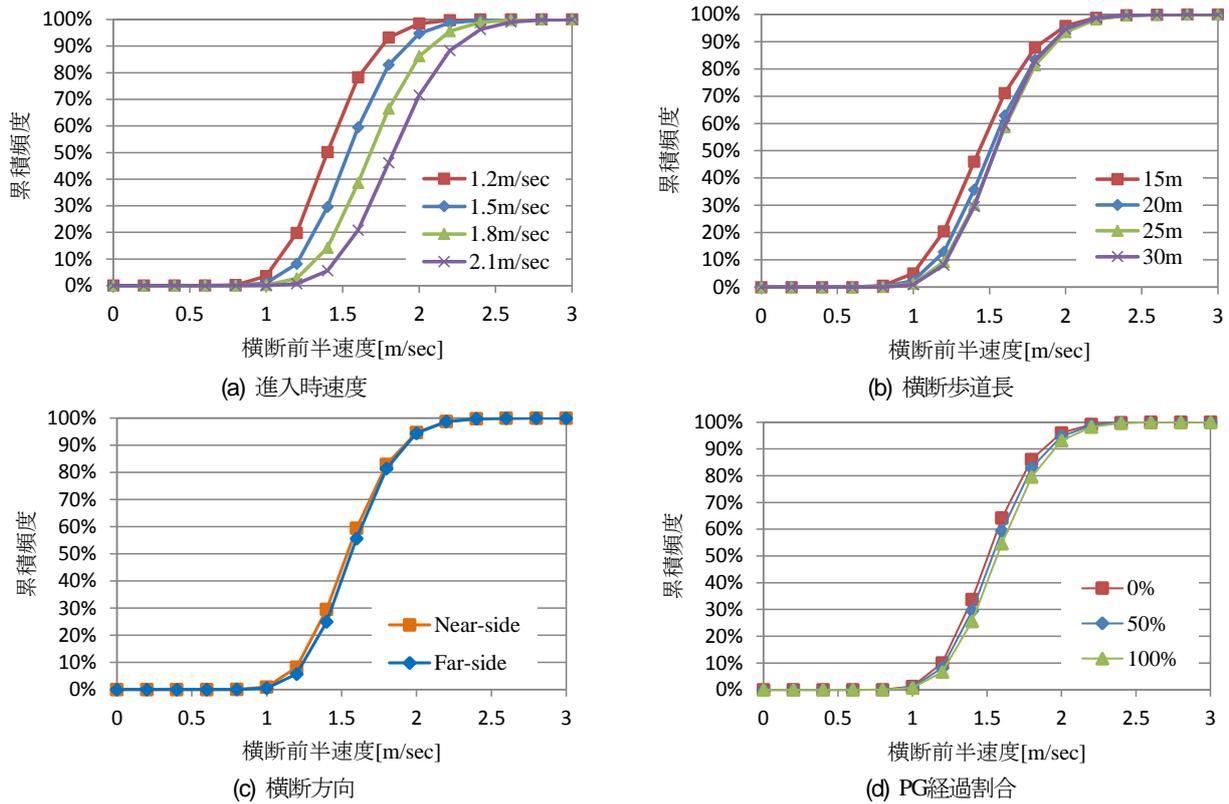


図-8 横断前半速度モデルの感度分析

たときの分布の変化を表しており、進入時速度が高くなるほど、横断前半速度が高くなることわかる。(b)は横断歩道長を15~30[m]まで変化させたときの変化を表し、横断歩道が長いほど横断前半速度も高くなる。(c)は横断方向別に横断前半速度分布を表したもので、Far-sideの方が速度が高い傾向がみられるが、その傾向はわずかである。(d)はPG経過割合を0~100[%]まで変化させた場合で、これが大きくなる、すなわち、PG開始時から時間が経つほど、横断前半速度が速くなることわかる。

同様に、横断後半速度モデルについても感度分析を行った。その結果は横断前半速度と類似している。横断方向による影響については、Far-sideの方がNear-sideよりも速度が高くなる傾向が、横断前半速度のとときと比べて大きいことわかる。これは、Far-sideの場合に横断後半に速度が高くなる分析結果と一致する。

(4) PFG歩行者の速度モデルとの比較

信号現示が歩行者の横断歩行速度に与える影響を調べるために、Asano et al.⁹⁾が構築したPFG歩行者に対するモデルを用いて横断前半・後半速度を推定し、(1)節のPG行者モデルの結果と比較する。金山新橋南交差点の北側横断歩道におけるPGおよびPFG歩行者について、モンテカルロシミュレーションを行う。ここでは、各説明変数が以下に示す基本設定値である。

- 横断歩道長：36.2m,
- 横断方向：Near-side,

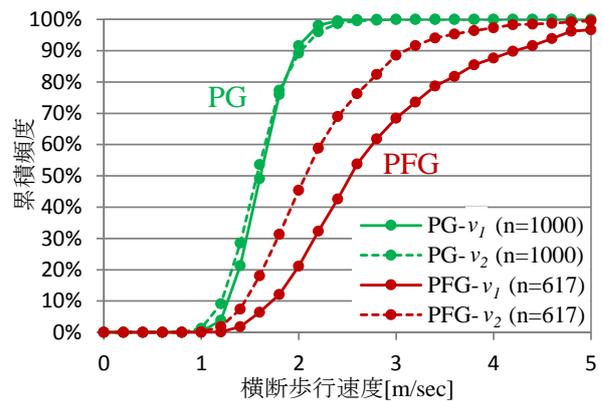


図-9 PGとPFG歩行者の横断歩行速度分布の比較

- 進入時速度(PG)：1.8m/sec,
- 接近速度(PFG)：1.8m/sec,
- PG経過割合(PG)：ランダムに発生させる,
- 横断歩道進入時間(PFG)：ランダムに発生させる。

シミュレーションでは、PGとPFG歩行者をそれぞれ1000人発生させる。PG歩行者は全員横断歩道に進入するが、PFG歩行者は、PFG開始と同時に横断/停止判断⁹⁾を行い、横断を選択した歩行者のみが横断歩道に進入する。従って、PG歩行者は1000人全員の横断速度が得られるが、PFG歩行者は横断を選択した617人のみの推定結果となる。

PGとPFG歩行者の横断前半・後半速度の分布をそれぞれ図-9に示す。PFG歩行者の横断歩行速度分布はPG歩行者に比べると、全体的に速いことがわかった。PGとPFG

歩行者のどちらも横断前半速度は横断後半速度より速い傾向があり、特にPFG歩行者にその傾向が顕著である。これは、歩行者は速い速度で横断歩道に進入し、横断を終了する時に速度が低下する傾向があるためである。PG歩行者は余裕をもって横断できるため、横断中の速度変化が少ない。一方、PFG歩行者は速い速度で横断歩道に駆け込む変化が大きい、その結果PFG歩行者は左折車両のドライバーにとって予測しにくくなり、交錯の危険性がより高くなると考えられる。

6. おわりに

本研究では、PG歩行者の横断前半・後半速度を分析し、これらを推定するモデルを構築した。その結果歩行者の横断速度は横断歩道長、PG経過割合および横断方向に影響されることが明らかになった。

分析結果から、横断歩道長が長いほど、また青時間開始時から時間が経つほど、横断前半・後半速度が速くなることが示された。横断歩行速度に影響する様々な要因を考慮するため、ガンマ分布によって横断前半・後半速度を推定した。横断前半速度モデルでは、進入時速度と横断歩道長が極めて重要なパラメータであるほか、PG経過割合は横断歩行速度分布のバラツキに影響している。また、横断後半速度モデルにおける横断方向の影響は、横断前半速度モデルより大きいことがわかった。これはFar-side歩行者が横断後半に入ると速度を上げ、左折車両との潜在的な交錯を避けているためと考えられる。

さらに、青時間における横断歩行速度を青点滅における横断歩行速度と比較することにより、青点滅時の横断歩行速度の方が全体的に速く、バラツキが大きい傾向がみられた。これは、青点滅時間中の歩行者挙動は左折車

両のドライバーにとって予測しにくくなり、左折車両対横断歩行者の交錯危険性がより高くなることを示唆している。

ただし、本研究では年齢、性別、トリップ目的などによる影響要因を考慮していないため、今後これら多様な属性の歩行者について行動特性を分析することが必要である。

謝辞：本研究は、(独)日本学術振興会・科学研究費基盤研究(B)、および国土交通省道路局・新道路技術会議による研究助成を受けている。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 警察庁交通局：平成 24 年中の交通事故発生状況，2013.
- 2) 交通工学研究会：改訂 交通信号の手引，p.49, 2006.
- 3) Goh, B.H., Subramaniam, K., Wai, Y.T. and Ali A.: Pedestrian Crossing Speed: The Case of Malaysia. International Journal for Traffic and Transport Engineering, Volume2(4), pp. 323-332, 2012.
- 4) 鈴木隆，山田稔，山形耕一：横断歩道における青時間に対する意識と歩行速度に関する研究，土木学会第 52 回年次学術講演会，pp. 106-107, 1997.
- 5) Asano, M., Alhajyaseen, W.K.M., Nakamura, H. and Zhang, X.: Stochastic approach for modeling pedestrian crossing behavior after the onset of pedestrian flashing green signal indication, Paper presented at the Proceedings of the 13th World Conference on Transportation Research, Rio de Janeiro, Brazil, In press, 2013.
- 6) 鈴木一史，中村英樹：交通流解析のためのビデオ画像処理システム TrafficAnalyzer の開発と性能検証，土木学会論文集 D, Vol.62, No.3, pp.276-287.

(?)

MODELING PEDESTRIAN SPEED AT SIGNALIZED CROSSWALKS CONSIDERING CROSSWALK LENGTH AND ELAPSED PEDESTRIAN GREEN TIME

Xin ZHANG, Hideki NAKAMURA, Miho ASANO and Peng CHEN

Quantifying the effects of crosswalk length and signal timing on pedestrian walking speed is an important requirement for providing a rational safety assessment and improving existing operational policies at signalized intersections. This study investigates the effects of pedestrian green time (PG), crosswalk length and pedestrian crossing direction on pedestrian walking speed at signalized crosswalk. It is assumed that the pedestrian walking speeds consist of two components v_1 and v_2 at two consecutive halves of crosswalk. Empirical analysis shows that the longer crosswalk tends to induce the higher walking speed. Pedestrian walking speed increases as PG proceeds. Furthermore, a comparison of pedestrian speed models for PG and PFG (pedestrian flashing green time) demonstrates that pedestrian walking speeds at PFG are higher and more variable than at PG.