

無信号横断歩道における車両の 歩行者回避挙動特性分析

井料 美帆¹・谷口 綾子²

¹正会員 東京大学生産技術研究所准教授 (〒153-8505 東京都目黒区駒場4-6-1)
E-mail:m-iryoo@iis.u-tokyo.ac.jp

²正会員 筑波大学大学院准教授 システム情報工学科 (〒305-8573 つくば市天王台1-1-1)
E-mail: taniguchi@risk.tsukuba.ac.jp

無信号横断歩道では、本来歩行者に通行の優先権があるものの、実際には歩行者に道を譲らないドライバが多い。これは、安全性の低下や、歩行者のサービスレベル低下の観点から望ましくない状況であり、歩行者の安全な横断機会を増やすことが望まれる。既往研究では、歩車間コミュニケーションによりドライバが道を譲る確率が上がることが示されているが、その譲り行動が安全性向上に結びついているかを検証することが必要である。本研究では、コミュニケーションや歩車の横断歩道到着タイミングが車両の意思決定タイミングや歩車間の交錯安全性に与える影響を分析した。状況によってはコミュニケーションが急減速等の危険挙動を誘発する可能性も指摘され、適切なタイミングでコミュニケーションを発することの必要性が示された。

Key Words : Pedestrian-vehicle conflict, unsignalized crosswalk, traffic safety, behavioral analysis

1. はじめに

道路交通法上、無信号の横断歩道では、横断歩行者は常に通行の優先権を持っており、交差する車両は横断歩道に対して道を譲らなければならない。しかし実際には、車両が横断歩行者に譲らない状況が多く観測され、歩行者交通の安全性・円滑性を損ねる要因となっている。

無信号横断歩道の車両や歩行者の挙動に関する研究は数多く存在する。このうち特に国内では、歩行者側のギャップ判断に関する研究がよくみられる¹⁾²⁾³⁾が、ここには、歩行者が非優先交通という暗黙の前提がある。しかし、通行の優先順位が本来歩行者側にあることを鑑みれば、車両がより積極的に、かつ安全に譲るように行動を変化させることが望ましい。そのためには、譲り率に影響を与える要因を理解し、無信号横断歩道の整備や安全教育等に反映していくことが求められる。

無信号横断歩道における車両の譲り率は、横断歩道の幾何構造や地域特性などによって決定づけられると考えられている⁴⁾⁵⁾。これに加えて谷口ら⁶⁾は、歩行者とドライバとのコミュニケーションが成立することで、協調行動(ドライバが歩行者に譲る行動)が起りやすくなることを明らかにした。さらに田辺ら⁷⁾は、各種のコミュニケーション行動のうち、挙手によるコミュニケーショ

ンの存在が譲り率向上に大きな影響を与えることや、車両接近速度が低いと譲り率が向上することを実験により示した。しかし、コミュニケーションを伴った譲り行動において、譲る際の車両の操作状況や、その結果としての安全性については十分に精査されていないのが現状である。

本論文では、田辺らの実験データを用いて車両側の回避行動をより詳細に分析することにより、車両の回避特性と回避時の安全性を明らかにすることを目的とする。

2. 実験概要

(1) 実験概要とデータ取得方法

田辺らは、筑波大学構内の大学公園前交差点において譲り行動把握のための実験を実施した。対象とする交差点は図-1の通りで、往復二車線道路で緩い右カーブの下流に位置する無信号交差点である。実験は調査員を2名配置して行った。調査員のうち1名は、接近車両から視認できないよう、横断歩道直近の街路樹の陰に待機する。交差点に直進車両が接近するタイミングに合わせて、待機していた調査員が歩行者として横断歩道に接近し、横断を試みる。横断歩道接近時、調査員は挙手やアイコンタクト等のコミュニケーション行動を取る。このときの

状況を、ビューポール⁸⁾によるビデオ撮影及びもう1名の調査員の目視にて把握した。なお、調査員の横断方向は、車両から見て左(Nearside)から右への横断のみとし、車両は自由走行（前方車に追従していない）車両のみを対象とした。また、調査員の横断歩道接近タイミングは、対象道路の制限速度30km/hで接近した時の車両の空走距離および制動距離を考慮し、停止線約22m上流の地点を車両が通過した時刻を基準とし、目視で判断した。横断歩道に接近する調査員は、全実験を通じて同じ人であった。したがって、横断行動の個人差はないものとみなせる。

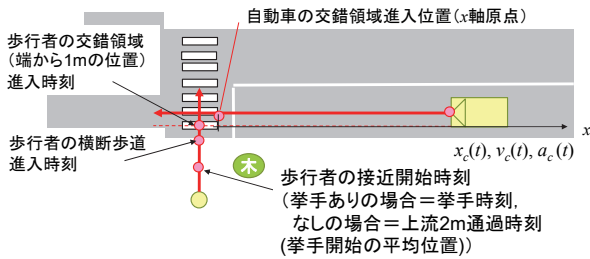


図-1：対象横断歩道と調査員配置

車両および歩行者(調査員)挙動は、ビデオ撮影画像から、鈴木ら⁹⁾の画像処理システムを用いて抽出した。車両については、映像上の車両の右前輪接地点座標を射影変換により実座標に変換したうえで、固定区間カルマンスムージングを行い、0.1秒毎の位置、速度、加速度を得た。ただし上記の手法では、射影変換時に道路面を平面と仮定しているため、歩道と車道との高低差により歩行者の位置座標の推定精度が低くなってしまふ。そこで歩行者については、歩車道境界上流2m、歩車道境界、歩車道境界下流1m（横断開始後1m）の各断面を通過した時刻を取得した。歩行者では、車両進行方向ではなく横断方向に対して上流・下流を設定していることに留意されたい。観測断面をこの位置に設定した理由は3.(1)にて後述する。

実験データのうち、ビデオ画像による観測が可能であったサンプル数は408であった。このうち、調査員が挙手をしたもの(アイコンタクトと挙手、またはアイコンタクトと会釈と挙手)が147、何もしないか、挙手以外のコミュニケーション行動(アイコンタクト、会釈等)をとったものが261であった。

(2) 既存研究における知見と本研究での分析の視点

田辺らの分析においては、歩行者の挙手が自動車の譲り行動を生起し、逆に歩行者出現時の自動車進入速度が高くなるほど譲る確率が低くなることが示されている。しかし、前後の運転挙動に関する分析が不十分であり、このような譲り行動が安全性を十分に確保できるものかどうかについての検証は不十分である。

本研究では、歩行者出現時と、その後の車両の行動変化に着目して分析を行う。また、歩行者出現から最終的な意思決定までに、車両挙動に迷いがみられる状況も観測されており、これについても分析を行う。

(3) 基礎集計

基準時刻 t_0 における車両の交錯点までの距離の分布は図-2の通りである。分布の平均値は25.5mであった。調査員の横断歩道接近タイミングの目安は停止線から約22mであり、停止線と横断歩道との距離約2mを加味すると概ね近い値である。分布にばらつきがあるのは、車両位置の目視確認によるタイミングのずれや、調査員の立ち位置の違いによるものと考えられる。この時の車両速度分布は図-3の通りで、30~50km/hに多くの車両が分布していることがわかる。

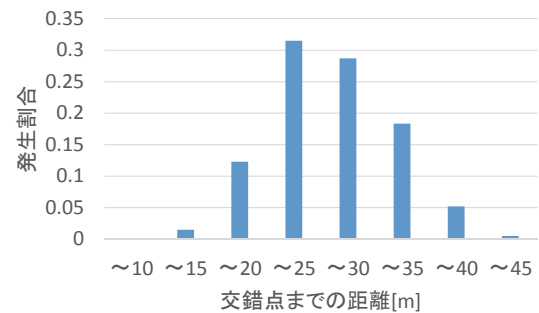


図-2：基準時刻における車両の交錯点までの距離 (N=408)

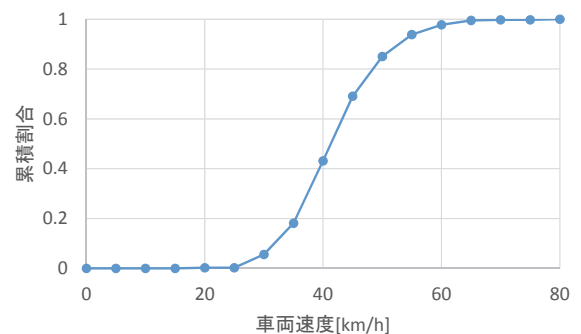


図-3：基準時刻における車両の交錯点までの距離 (N=408)

3. 譲り選択行動分析

(1) 予測PET

ドライバーは、歩行者出現時に交錯の安全性を考慮しつつ譲りの有無を決定する。この時の安全性を説明する指標として、予測PET(Post Encroachment Time)を導入する。予測PETとは、歩行者と車両が現在の行動を保ったまま進行したと仮定したときの、両者の横断歩道通過時刻の差と定義する。本研究では、車両が基準時刻 t_0 以降速度

一定で進行したと仮定する場合の $PET_{ev}(t_0)$ と、加速度一定で進行した場合 $PET_{ea}(t_0)$ の二種類の予測PETを検討する。これらは次式により定義される。

$$PET_{ev} = \frac{x_p(t_0)}{v_p(t_0)} - \frac{x_c(t_0)}{v_c(t_0)} \quad (1)$$

$$PET_{ea} = \frac{x_p(t_0)}{v_p(t_0)} - S(t_0) \quad (2)$$

$$S(t_0) = \begin{cases} \frac{-v_c(t_0) + \sqrt{v_c^2(t_0) + 2a_c(t_0)x_c(t_0)}}{a_c(t_0)} & \text{if } v_c^2(t_0) + 2a_c(t_0)x_c(t_0) \geq 0 \\ \infty & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

ここに、 $x_p(t_0), v_p(t_0)$ はそれぞれ時刻 t_0 における歩行者の交錯点までの距離、速度、 $x_c(t_0), v_c(t_0), a_c(t_0)$ はそれぞれ時刻 t_0 における車両の交錯点までの距離、速度、加速度である。予測PETは絶対値が大きいほど安全な交錯が見込まれ、0に近くなるほど車両・歩行者のいずれかあるいは両方が何らかの回避挙動を取ることが必要となる。これにより、車両が回避挙動を取らなければならない状況が分析可能である。

歩行者の速度は観測していないため、計算に当たっては便宜的に歩行速度を1m/sの固定値とした。また基準時刻 t_0 は、歩行者が歩車道境界上流2mの断面を通過した時刻とした。

基準時刻は車両が何らかの行動を起こす契機が発生した時刻、つまり歩行者を視認した時刻や、歩行者がコミュニケーション行動を行った時刻とするのが望ましい。本実験の観測条件では視認の可否を確認する術はないが、「挙手」を行ったケースでの、調査員が手を挙げ始めた位置の平均は歩車道境界の概ね2m上流であった。そこで、基準時刻を上述の通り設定した。また、交錯点までの距離は車両と歩行者の平均的な移動軌跡と交錯区間を鑑みて、車両の場合は横断歩道上流端までの距離、歩行者の場合は横断開始後1mの位置までの距離とした。

(2) 集計結果

車両が速度一定と仮定したときの予測PET別分布と、譲る／譲らないの選択結果との関係を図4に、同様に加速度一定と仮定したときの状況を図5に示す。いずれも、予測PETが負であれば歩行者の方が先に交錯点に到達できることを意味する。いずれも、予測PETの値が小さくなるほど、車両が譲る確率が高くなる。譲らない場合と譲る場合の分布は、いずれも有意水準1%で有意に異なっている。

速度一定を仮定した $PET_{ev}(t_0)$ では、予測PETが正でも譲る車両が存在する。一方加速度一定を仮定すると、譲った車両は予測PETが-0.6秒以下の車両に限られる。すなわち、歩行者出現時に既に減速中などで、歩行者が先に交錯点に進入することが明らかな状況でのみ譲り行動が発現していると解釈することができる。

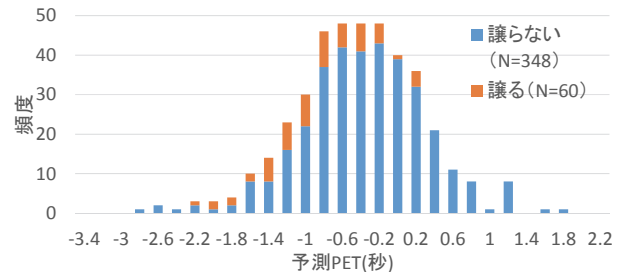


図4：予測PET分布と回避挙動との関係（速度一定）

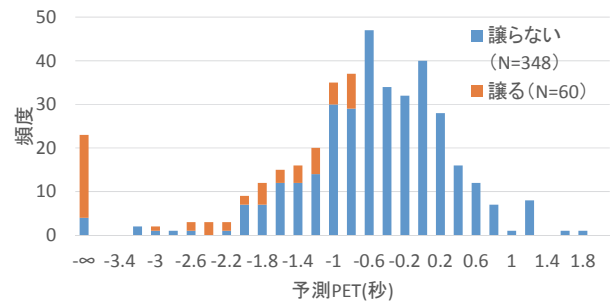
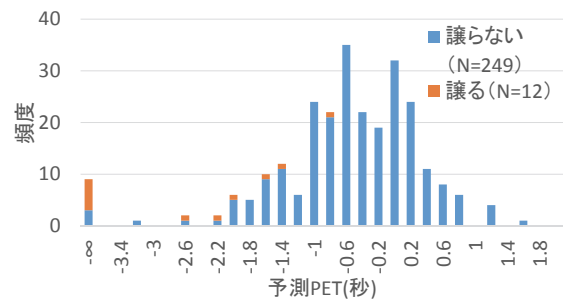
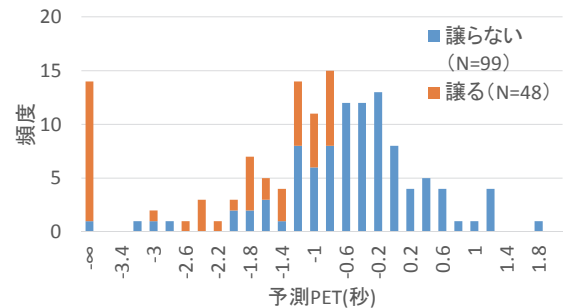


図5：予測PET分布と回避挙動との関係（加速度一定）



(a) 挙手なし



(b) 挙手あり

図6：挙手の有無別予測PET分布と回避挙動（加速度一定）

さらに、挙手の有無別の $PET_{ea}(t_0)$ 分布を図6に示す。挙手がない場合の譲る車両のサンプル数が少ないことに

留意すべきではあるが、挙手がある場合とない場合とで、譲る車両の $PET_{ea}(t_0)$ の分布範囲に違いは見られない。

(3) 譲り行動選択モデル

$PET_{ea}(t_0)$ 等を用いて、二項ロジットモデルにより譲り確率を推定した。その結果を表-1に示す。 $PET_{ea}(t_0)$ は車両が手前で停止できる場合に $-\infty$ の値となることから、 $-\infty$ の場合は別途ダミー変数を導入した。 $PET_{ea}(t_0)$ 、挙手、交錯点までの距離のいずれも1%有意となり、符号条件も合致している。推定結果の係数の比から、挙手による譲り確率向上の影響は、 $PET_{ea}(t_0)$ が約1.6秒増加した場合の効果に匹敵するといえる。

表-1：譲り確率選択モデル

説明変数	係数	t値
定数項	-2.35	-2.19
$PET_{ea}(t_0)$ ($-\infty$ を除く, 秒)	-2.50	-6.25
$PET_{ea}(t_0)$ ($-\infty$ ダミー)	4.89	6.13
挙手ダミー	4.01	6.24
基準時刻での交錯点までの距離 $x_c(t_0)$ (m)	-0.146	-3.80
Mcfadden's R ²	0.505	
AIC	158.95	

4. 車両挙動の安全性評価

本章では、車両が最終的に選択した挙動の安全性について、安全性評価指標を用いて分析する。指標には、交錯点通過速度と最大減速度とを用いる。このほかに一般的に用いられる指標には、実測PETがある。これは歩行者と車両の交錯点通過時刻の差の実測値であるが、本実験では対象車両を自由走行車両に限定しているため、対象車両が車群の先頭車で、かつ譲らなかつた場合のPETを観測することは不可能である。このようにサンプルの周辺状況と行動選択結果によってPETの観測可否が決まってしまうことから、本実験の評価指標としては望ましくないと判断した。

(1) 横断歩道通過時速度

図-7に、車両が譲らなかつた場合の横断歩道通過時車両速度分布を示す。挙手ありの方が、車両速度のばらつきが大きくなっている様子がわかる。F検定により、1%有意水準で車両速度の分散が異なることが示された。また、挙手の有無で速度の平均値には違いは見られなかつた。この結果から、挙手ありの場合は、ドライバは例え譲らなくても加速または減速の反応を行っていることが推察される。表-2は、譲る場合も含めた横断歩道通過時速度の平均値と標準偏差である。譲る場合は、その後の

横断歩道通過速度にコミュニケーションによる差異はみられない。

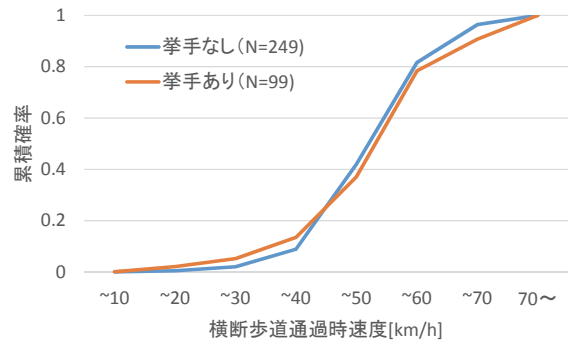


図-7：横断歩道通過時車両速度（譲らない場合）

表-2：横断歩道通過時車両速度の統計量

		平均(km/h)	標準偏差(km/h)
譲らない	挙手なし	41.6	9.2
	挙手あり	42.3	12.5
譲る	挙手なし	12.3	5.08
	挙手あり	12.1	4.75

(2) 最大減速度

最大減速度は基準時刻 t_0 から交錯点通過までの車両の最大減速度である。菊地ら¹⁰⁾は減速度と交通事故との相関を踏まえ、危険な減速度の閾値として0.3Gを提案していることから、本研究でも3.0 m/s²以上の減速度を危険な減速度として扱うこととした。最大減速度が3.0m/s²を超える急減速となった車両の割合を、譲る／譲らないの別、挙手の有無別に表-3にまとめた。全体として、譲らない車両よりも譲る車両、挙手なしよりも挙手ありの場合のほうが急減速を行う傾向がみられる。

この実験では、車両の交錯点までの距離が制動停止距離に近い位置に来た時に歩行者が横断歩道に接近しており、停止するためにどうしても急減速が必要な車両も存在していたと考えられる。実際には歩行者はもう少し余裕を持って横断歩道に接近すると考えられ、安全上の課題も小さくなると考えられる。

表-3：急減速車両の割合

急減速サンプル数／総サンプル数	譲る	譲らない
挙手なし	4/12(33%)	4/249(1.6%)
挙手あり	29/48(60%)	7/99(7.0%)

5. 結論と今後の課題

本研究では、無信号横断歩道において車両が歩行者を譲る際の、コミュニケーションの有無による車両挙動へ

の影響の違いについて分析した。減速度一定とみなしたときの予測PETや挙手、歩行者出現時の交差点までの距離によって車両の譲り行動が変化することが示された。一方、安全性指標の面からは、挙手によって譲らない車両の横断歩道通過時速度のばらつきが大きくなることや、譲る／譲らないに関わらず急減速車両の割合が高くなることが示された。

本実験で設定した歩行者接近タイミングは、車両の交差点までの距離がほぼ制動停止距離と合致する状況であり、ドライバーは即座に譲りの有無を選択する必要に迫られる。しかし、多くの場合歩行者はもう少し上流から余裕を持った行動を取っている。より安全に停止できるタイミングで歩行者がコミュニケーションサインを出すことができれば、挙手はより有用なコミュニケーション手段と言える。

本研究の知見は、あくまで1つの横断歩道における実験結果に基づく。より多様な幾何構造の横断歩道において分析の蓄積を行うことで、より一般的な知見を得ることが今後の課題である。

謝辞：本研究は一般社団法人日本損害保険協会の自賠責運用益拋出事業（研究支援）助成金「優先配慮行動を促す道路上のコミュニケーションと交通安全」（研究代表者：筑波大学谷口綾子）の研究助成を受けて実施したものである。

参考文献

1) 尾崎龍樹ら：無信号横断歩道における歩車錯綜時の

- 安全性評価，土木計画学研究・講演集，Vol.26，CD-ROM，2002.
- 2) 三井達郎ら：無信号横断歩道における高齢者の横断行動と安全対策に関する研究，土木計画学研究・論文集，Vol.15，pp.791-808，1998.
 - 3) 林勇朔，浜岡秀勝：二段階横断による歩行者の安全性向上効果，土木計画学研究・講演集，Vol.49，CD-ROM，2014.
 - 4) 松尾幸二郎ら：無信号横断歩道におけるドライバーの「譲り」に関する基礎的分析，土木計画学研究・講演集，Vol.48，CD-ROM，2013.
 - 5) Turner, S. et al.: Motorist Yielding to Pedestrians at Unsignalized Intersections: Findings from a National Study on Improving Pedestrian Safety. Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board 1982, pp. 1-12, 2006.
 - 6) 谷口綾子，吉村聡哉，石田東生：車両と歩行者・自転車間のコミュニケーションによる協調行動の生起に関する研究，土木学会論文集 D3, Vol.68, No.5, pp.I_1115-1122, 2012.
 - 7) 田辺太一ら：ドライバーの協調行動促進に歩行者コミュニケーションが及ぼす影響，土木計画学研究・講演集，Vol.52，CD-ROM，2015.
 - 8) 株式会社道路計画「ビューポール」
<http://www.doro.co.jp/gijutsu/viewpole.html>
 - 9) 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, 2006.
 - 10) 菊地春海ら：道路交通安全対策事業における急減速挙動データの活用可能性に関する研究，土木学会論文集 D3, Vol.68, No.5, pp. I_1193-1204, 2012.

(2016.4.22 受付)

ANALYSIS OF VEHICLE MANEUVER CHARACTERISTICS IN PEDESTRIAN AVOIDANCE AT UNSIGNALIZED CROSSWALKS

Miho IRYO and Ayako TANIGUCHI