

# 信号交差点に隣接する単路部無信号横断施設の交通円滑性への影響分析

千田 浩貴<sup>1</sup>・井料 美帆<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 非会員 元名古屋大学 工学部環境土木・建築工学科 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

E-mail: kezeket\_fel@ezweb.ne.jp

<sup>2</sup> 正会員 名古屋大学大学院准教授 環境学研究科都市環境学専攻 (同上)

E-mail: iryo@nagoya-u.jp (Corresponding Author)

歩行者の安全な道路横断機会を増やすためには、単路部の無信号横断施設の効果的な配置が求められる。市街地では信号交差点が比較的密に設置されており、無信号横断施設の追加的な設置を検討するためには、信号交差点と無信号横断施設が相互に交通円滑性に与える影響を定量化する必要がある。本研究は、単路部無信号横断施設の位置や交通需要が、歩行者の遅れ時間や自動車交通容量に与える影響を明らかにする。ショックウェーブ理論およびギャップアクセプタンス理論を用いた計算の結果、信号交差点からの車群の到着状況を考慮することにより、信号がない場合に比べて歩行者の平均遅れ時間が大きく減少することや、二段階横断施設による遅れの減少効果、自動車交通容量を低下させないための横断施設位置と交通需要の条件を示した。

**Key Words:** *unsignalized pedestrian crossings, delay, midblock, signalized intersection*

## 1. 背景と目的

我が国の歩行中の交通事故死者のうち、横断違反（横断歩道外横断を含む）を理由とする者は、高齢者で32%、高齢者以外で16%である。横断歩道外横断では横断歩道上の横断に比べて運転者から横断者が認知されにくいことから、安全な横断機会を適切に提供することが重要である。

しかし、特に都市部においては、既に信号交差点が比較的密に設置されている中、新たに信号付き横断歩道を設置することは、車両の旅行速度低下の影響が大きく、メンテナンスコストもかかるため、必ずしも適切ではない。そのため、二段階横断施設を含めた無信号横断施設を設置することが考えられる。わが国でも無信号二段階横断施設の導入方法について検討が進められており、横断歩道があるものだけではなく、横断位置を明示しない交通島だけのものも海外事例として示されている<sup>1)</sup> (図-1)。横断歩道のない施設では必ずしも車両側に停止義務がないことから、自動車の交通円滑性を損ねることがない一方で、歩行者の横断待ち時間は横断歩道に比べると長くなると考えられる。横断施設を適切に設置するためには、自動車と歩行者それぞれの遅れを考慮することが求められる。その際、都市部のように信号交差点が密

横断施設の種類	横断の数	通行の優先権
通常の横断歩道 	一段階横断 両車線を一度に横断しなければならない。	歩行者に優先権がある。しかし、実際には一部の車両しか道を譲らない。
二段階横断歩道 	二段階横断 横断できるタイミングが両車線で揃っていないくても、交通島を介して横断できる。	
交通島のみ 		車両に優先権があり、歩行者への譲り挙動は想定しない。

図-1 無信号横断施設の種類

に設置されている箇所では、隣接する信号交差点が車両到着パターンに与える影響を考慮して評価することが重要と考えられる。

Highway Capacity Manual (以下 HCM)<sup>2)</sup> では、無信号横断施設における歩行者の遅れの推定式が提示されているが、近隣に信号交差点がある場合に関しては考慮されていない。隣接信号交差点を考慮した横断施設の遅れに関する研究として、Abdullah and Iryo<sup>3)</sup>は連続する信号交差点間に、新たに信号付き単路部横断施設を導入した際の遅れを計算している。足ら<sup>4)</sup>は、自動車・歩行者双方の円滑性を考慮して、単路部における無信号二段階横断施設同士の設置間隔について分析している。これらは、信

号付き横断施設同士、無信号横断施設同士をそれぞれ比較しており、無信号横断施設と信号交差点の組合せを検討したものではない。また、杉山ら<sup>2)</sup>は、信号交差点から 200m 離れた地点に無信号二段階横断施設を設置したときの、自動車・歩行者の遅れを計算している。しかし、遅れ時間に影響すると考えられる、信号交差点と横断施設との設置間隔や信号パラメータの値については考慮されていない。

以上のように、隣接する信号交差点の影響が無視できない単路部において、無信号横断施設の設置が自動車の交通円滑性に与える影響や、歩行者の横断待ち時間に与える影響についての定量的な知見は得られていないのが現状である。そこで本研究では、信号交差点と単路部横断施設との距離や横断施設の種類の、歩行者・自動車双方の交通円滑性に与える影響を明らかにする。

## 2. 本研究の前提条件と着眼点の整理

### (1) 対象とする道路空間と通行の前提条件

本研究では、往復二車線の道路区間に信号交差点が一つ設置されており、その近くに新たに単路部横断施設を導入する場合を対象とする。信号交差点の交差道路からの車両の流入は考慮しない。

横断施設の種類の、図-1 で示す 3 種類と、横断施設が全くない場合とを検討する。遅れ時間の検討においては安全側を想定し、自動車・歩行者それぞれが被る最大の遅れについて検討する。すなわち、通常の無信号横断歩道や無信号二段階横断歩道では、横断歩行者は必ず車両に対して優先権があると想定する。また、交通島のみまたは横断施設がない場合は、車両は歩行者に対して譲る義務はないと考え、車両が全く歩行者に対して譲らない状況を想定する。

無信号二段階横断歩道と交通島のみケースでは、交通島の両側の横断を独立に考える。つまり、無信号二段階横断歩道の片側を歩行者が横断しているとき、反対側の横断歩道を渡ろうとする歩行者がいなければ、自動車は横断歩道を通過することができる。交通島のみ場合は、歩行者は横断しようとしている側の車両の到着ギャップのみをみて横断判断を行う。

### (2) 信号交差点の車両交通容量の低下

横断歩道のある横断施設では、車両が横断歩行者に通行権を譲ることで、隣接する信号交差点の処理能力に影響を与える可能性がある。信号交差点の直上流に横断施設があると、信号待ち行列中の車両が横断歩行者に譲る

ことで信号青時間が有効に活用されないおそれがある。一方、信号交差点の直下流に横断移設があると、横断施設を先頭とする車両の待ち行列が信号交差点まで延伸し、先詰まりが発生してしまう可能性がある。本研究では、横断施設の配置や横断歩行者交通量が信号交差点の交通処理能力に与える影響を分析する。

### (3) 歩行者の遅れ時間の検討

交通島のみ、または横断施設が存在しないときには、歩行者は車両の到着ギャップを見て横断判断を行う。信号交差点から横断地点に到着する車両の到着分布は信号パラメータに依存する。これを考慮しつつ、横断歩行者の期待遅れ時間を導出する。

## 3. 無信号横断歩道の設置による信号交差点の車両交通容量低下要件の分析

### (1) 横断施設に求められる条件の整理

通常の無信号横断歩道または無信号二段階横断歩道で、車両が確実に横断歩行者に対して譲る場合を考える。

2.(2)に示した観点を踏まえると、隣接横断施設に求められる条件は以下の通りである。

(条件 1)自動車交通需要以上の交通容量が確保できる。

(条件 2)上流交差点への先詰まりが発生しないか、一時的に発生しても交通容量に影響のない範囲に留まる。

(条件 3)下流交差点に青時間中に到着すべき車両が、その青時間中に交差点に到達することができる。

### (2) 無信号横断歩道における交通容量式

自動車の譲り率を 100%とすると、自動車は横断歩行者のギャップをぬって横断歩道を通過する。この時の交通容量について、HCM では歩行者による占有率を交通容量の補正係数として求めている。

$$f_{pb} = \frac{v_x * \frac{W_{cp}}{s_p}}{3600} \quad (1)$$

ここに、 $f_{pb}$ : 歩行者占有率、 $v_x$ : 一時間当たりの歩行者群の数、 $W_{cp}$ : コンフリクトエリアの横断長、 $s_p$ : 歩行速度である。しかし、この補正係数は、歩行者交通量ではなく歩行者群の量を求める必要があり、複数の歩行者群がコンフリクトエリア上に同時に存在することは想定していないといった課題がある。

そのため本研究では、横断歩行者を主方向、自動車を従方向とみなし、HCM の Two Way Stop Control の交通容量の式を援用して歩行者の横断待ちを行う自動車の交通

容量を表すこととする。

$$C_c = q_p \frac{\exp(-\frac{q_p t_{cv}}{3600})}{1 - \exp(-\frac{q_p t_f}{3600})} \quad (2)$$

ここに、 $C_c$ は横断施設での車両の交通容量(veh/h)、 $q_p$ は歩行者交通量(ped/h)、 $t_{cv}$ は横断歩行者に対する車両のクリティカルギャップ(sec)、 $t_f$ は追従車頭時間(sec)である。このときのクリティカルギャップは、横断歩行者がコンフリクトエリアに流入してから、次の横断歩行者がコンフリクトエリアに流入するまでの時間と定義する。 $t_f$ は、ここでは飽和交通流率の基本値の逆数として、1.8秒と定めた。条件1より、交通需要よりも大きい値となることが前提であるため、自動車交通需要を $q$ とすると

$$C_c > q \quad (3)$$

以下ではこの交通容量の値を用いて、条件 2, 3 に関する隣接する信号交差点への影響を検討する。この式の交通容量は単位時間における平均的な値であり、微小時間で見ると歩行者の存在の有無により交通容量は増減する。しかし、以下では、無信号横断歩道の位置において常にこの平均的な交通容量が実現されるとみなし、時空間図を用いて容量低下の条件を検討する。

### (3) 下流に横断施設がある場合の容量低下条件

条件 2 について検討するため、横断施設が信号交差点の下流にあるときの待ち行列の発生状況を、時空間図を用いて説明する。まず、自動車交通流は図-2の三角形のQ-K図に従うとみなし、車両の加減速は考慮しない。ここに、 $q$ ：交通需要、 $s$ ：飽和交通流率、 $v$ ：自由流速度、 $w$ ：渋滞流の wave speed、 $k$ ：車両交通量が  $q$  のときの車両密度、 $k_c$ ：横断施設での車両密度、 $k_j$ ：飽和密度である。車両の到着は一様到着とする。このとき、図-3のような時空間図を描くことができる。ここで、原点を信号交差点の停止線位置にとり、信号交差点からみて上流方向を正とする。横断施設の位置を  $x_c$  ( $x_c < 0$ ) とする。図中の①～⑥はそれぞれ異なる交通状態を示しており、図-2の各点の状態に対応する。青時間中に信号交差点を発進した車群が横断施設に到達する(点 B)と、横断施設の交通容量は飽和交通流率よりも小さいことから、横断施設を起点とした速度低下が生じ、後方へのショックウェーブが発生する。これにより、図-3の⑤のように新たに領域が作成される。実際には、車両はこの⑤の領域の中で細かい停止/発進挙動を繰り返すが、ここでは横断施設の交通容量を平均値で扱っていることから、この図のような速度低下領域として表現される。

最後の信号待ち車両がショックウェーブに到達した時

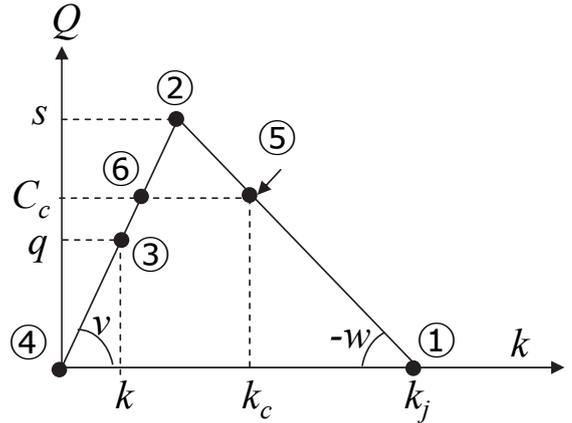


図-2 Q-K図と時空間図内領域との対応関係

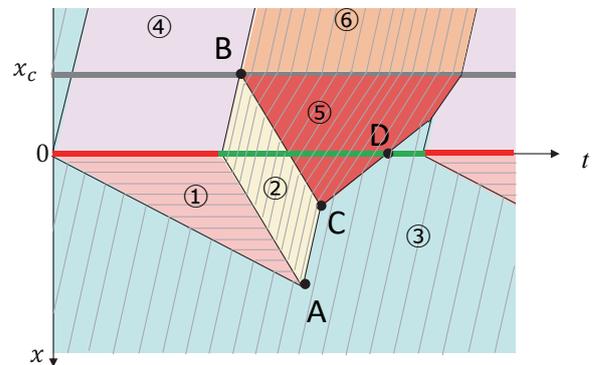


図-3 下流横断歩道の存在によるショックウェーブの発生

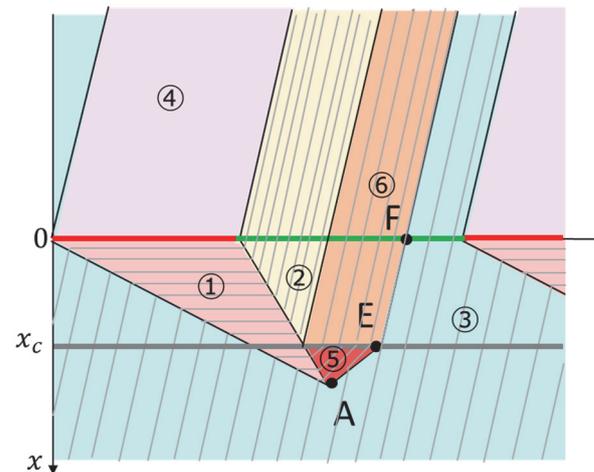


図-4 上流横断歩道の存在によるショックウェーブの発生

刻(点 C)が、速度低下領域が最も上流に到達する時刻となる。その後この領域は徐々に短くなり、解消する。先詰まりが信号交差点に到着しないためには、点 C が交差点よりも下流側となればよい。この条件はショックウェーブ理論を用いると、以下の通りとなる。

$$x_c \leq \frac{wqR}{q + w(k - k_j)} \quad (4)$$

ここに、 $R$  : 信号赤表示時間である。

さらに、速度低下領域が縮小する時のショックウェーブが信号交差点の停止線に到達する点を点Dとする。たとえ点Cが信号交差点の上流に到達し、一時的に先詰まりが発生しても、点Dの時刻が青時間終了より前であれば、そのサイクル中に信号交差点に到着した車両が交差点を通過することが可能であり、信号交差点の交通容量は低下しない。このときの条件は、同様に時空間図から幾何的に計算することにより、以下の式で求められる。

$$x_c < \frac{C - t_{PA} - w(t_{PA} - R) \frac{k_c - k}{C_c - q}}{\frac{k_c - k}{C_c - q} - \frac{1}{v}} \quad (5)$$

$$t_{PA} = \frac{Rw(k - k_j)}{q + w(k - k_j)} \quad (6)$$

ここに、 $C$  : サイクル長、 $t_{PA}$  : 点 A の時刻である。

#### (4) 上流に横断施設がある場合の容量低下条件

上流に横断施設がある場合、すなわち  $x_c > 0$  のとき、信号交差点の最大待ち行列長よりも上流に横断施設があれば交通容量への影響はない。横断施設の位置が待ち行列長よりも信号交差点寄りに設置されている場合は、時空間図は図-4の通りとなる。下流にある場合と同様、横断施設の位置を起点として速度低下が生じることから、信号待ち車両が交差点を通過完了する時刻は、横断施設がない場合と比べて遅くなる。ここで、領域⑤が解消する点を点 E、領域⑤を経由した最後の車両が信号交差点の停止線を通る点を F とする。点 F の時刻を  $t_{PF}$  とする。交差点交通容量に影響がないためには、

$$t_{PF} < C \quad (7)$$

となればよい。この条件を同様に時空間図から求めると、

$$x_c > - \frac{C - t_{PA} - w(t_{PA} - R) \frac{k_c - k}{C_c - q}}{\frac{k_c - k}{C_c - q} - \frac{1}{v}} \quad (8)$$

#### (5) 容量低下条件の計算結果と考察

以上から、式(3)を満たす容量条件のときに、式(5)、(8)を満たす位置に横断施設を配置すればよいことになる。

まず式(2)による、横断歩行者交通量と横断施設設置位置の交通容量の関係を図-5に示す。クリティカルギャップに関しては、往復4車線以上の信号交差点での左折車と横断歩行者の交錯において、横断歩行者の進行方向に応じたクリティカルギャップが4.5~7秒程度になるという観測結果<sup>9)</sup>があるが、単路無信号横断施設に関するものは見られない。そのためこの図では、自動車のクリティカルギャップ  $t_w$  を6~10秒の範囲で変動させている。

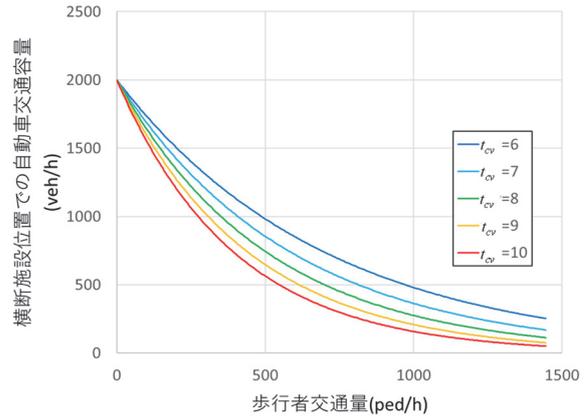


図-5 歩行者交通量-自動車交通容量の関係

表-1 計算条件

変数		値
横断歩道長 (m)	$L_{cv}$	7.0, 3.5
横断歩道幅員 (m)	$W_{cv}$	3.0
歩行速度 (m/s)	$v_p$	1.0
スタートアップ時間 (s)	$t_s$	3.0
信号赤時間 (s)	$R$	60
信号 (有効) 青時間 (s)	$G$	60
横断施設の位置 (m)	$x_c$	10~299
自動車交通需要 (pcu/h/方向)	$q$	600~1000
飽和交通流率 (pcu/有効青 1 時間)	$s$	2000
飽和密度 (pcu/km)	$k_j$	150
車両の自由速度 (km/h)	$v$	50
渋滞流の wave speed (km/h) (他条件より導出)	$w$	18.2

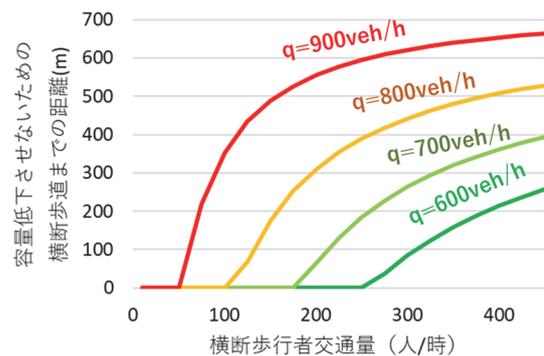


図-6 信号交差点の容量を低下させないための横断歩道との距離 ( $t_w=8$  秒)

杉山ら<sup>9)</sup>の二段階横断施設におけるシミュレーション上での交通容量上の不成立条件は、この図で  $t_w=8$  秒とした場合にほぼ対応する。

次に、式(5)と(8)の条件による横断施設設置可能位置

について検討する。式(5)の右辺と式(8)の右辺の絶対値は同じであるため、横断施設の配置が可能な範囲は、停止線位置に対して上流と下流で対称の関係になる。表-1の計算条件と、図-5の $t_0=8$ 秒の時の関係を用いて求めた容量低下条件の境界を、図-6に示す。なお、自動車の交通需要は、両方向で同一とした。この図は、信号交差点の交通容量を低下させずに横断施設を設置可能な最小距離を、横断歩行者交通量・自動車交通量別に示している。自動車・歩行者交通量が少なく、横断施設が交差点近傍にある場合には、信号の青時間中に一時的に飽和交通流率で交通を捌くことができなくても、期待値としては青終了時まで信号待ち行列を解消することができると思われる。

同様に、 $t_0=10$ 秒として計算したものが図-7である。同じ交通条件でも、信号交差点と横断施設との距離をより長く確保する必要があることがわかる。通常の横断歩道での $t_0$ の値は、この図のように、二段階横断施設よりも大きくなると想定される。また、 $t_0=8$ 秒で、スプリットを維持したままサイクル長を120秒から150秒に延長した場合の結果が図-8である。この場合も赤時間での待ち行列長が長くなる分だけより長い距離を確保しなければならない。

#### 4. 歩行者に優先権がない場合の横断歩行者遅れ時間の計算方法

次に、横断歩道がなく、歩行者に優先権がない場合を考える。このとき、歩行者は車両到着の間隙を縫って横断する。交通島のみしか設置されていない場合や、横断施設がない場合、また横断歩道があっても、車両側が歩行者に対して全く譲らない場合が相当する。本章では、この時の横断時の遅れ時間の計算方法を示す。

##### (1) 自動車交通が一方向の場合

##### a) 時空間図の領域ごとの歩行者遅れ時間の考え方

簡単のため、車両交通が片方向のみから到着するときの計算を先に考える。歩行者の横断機会は、車両の横断歩道への到着状況によって決まる。図-2のq-k図を仮定すると、信号の切り替わりに伴うショックウェーブの発生により、自動車の交通状態は図-9の4つの領域に分割される。歩行者の横断位置を $x_c$ とすると、歩行者の遅れ時間は、歩行者が横断位置 $x_c$ に到着した時の自動車交通の状態によって変動する。領域①は自動車が停止している状態であり、歩行者は停止車両の間を縫って遅れ0で横断できると考える。領域②は、信号待ち行列を形成していた車群が飽和交通流率にて発進する領域で、歩行者

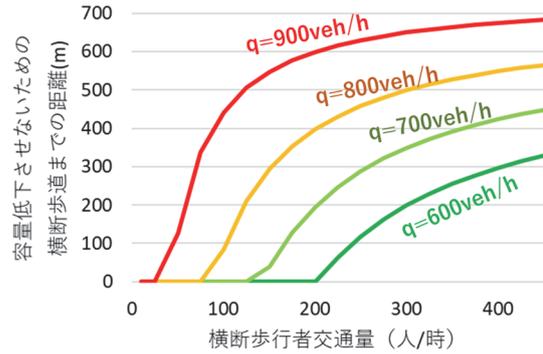


図-7 信号交差点の容量を低下させないための横断歩道との距離 ( $t_0=10$ 秒)

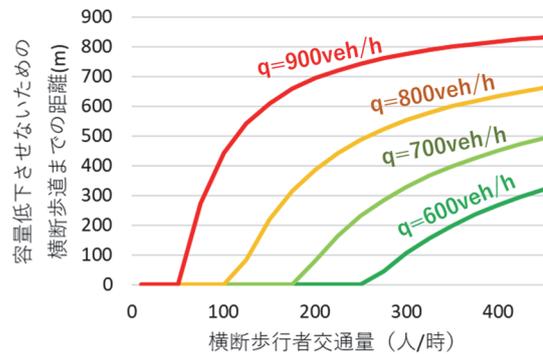


図-8 信号交差点の容量を低下させないための横断歩道との距離 ( $t_0=8$ 秒,  $C=150$ 秒,  $R=75$ 秒)

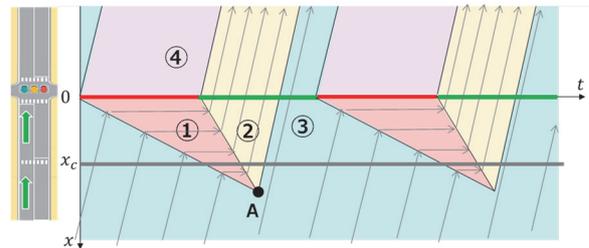


図-9 時空間図による領域分割

は領域②内では横断できず、次の領域③の時間まで横断機会を待つこととなる。領域③では、歩行者は車両と車両の到着の間隙を縫って横断できるとする。領域④は赤信号の下流であり自動車が到達しないため、歩行者は領域①と同様に遅れ0で横断できるとする。

以降では、歩行者の遅れ時間をギャップアクセプタンスの考え方をを用いて計算していく。この時に車両の到着分布がランダムであることを仮定しており、図-9の領域の計算も本来上流からのランダム到着を考慮して算出すべきである。ただし複雑な確率計算を伴うため、ここでは一様到着を仮定して直線の境界線を描いている。

##### b) 継続時間に制約のある領域でのギャップアクセプタ

ンスによる遅れ時間

領域③では、上流から車両がランダム到着すると仮定すると、ギャップアクセプタンス理論に基づき歩行者遅れを計算することができる。ただし、車両の到着状況によっては領域③の時間帯の間に横断機会がないまま次の領域に移行する場合も考えられるため、次の領域まで待たなければならない歩行者が存在しうることも考慮して、平均の遅れ時間を計算する。

ギャップアクセプタンス理論による遅れの推定式は、HCM では以下の式が提示されている。

$$d_g = \frac{1}{q} (e^{qt_p} - qt_p - 1) \tag{9}$$

ここに、 $d_g$ ：歩行者遅れ、 $t_p$ は歩行者が横断可否を選択するためのクリティカルギャップを表し、次式を用いて計算する。

$$t_p = \frac{L_{cw}}{v_p} + t_s \tag{10}$$

ここに、 $L_{cw}$ ：横断歩道長、 $v_p$ ：歩行速度、 $t_s$ ：横断開始までのスタートアップ時間である。式(9)では歩行者の待ち時間の最大値に制約が無いため、非常に長い時間遅れを被った歩行者も含めて遅れ時間の期待値が算出される。一方、本研究では、車両がランダム到着するのは領域③の時間内に限られるため、領域③の継続時間内に横断できた歩行者のみの遅れ時間の期待値と、横断できずに次の領域まで待機する歩行者の発生確率を求めなければならない。このような条件の下での既存の遅れ推定式は存在しないことから、モンテカルロシミュレーションにて車両交通需要と領域継続時間の各設定値に対して 1000 回ごとの試行を行い、

- ・領域③の開始時に既に横断位置に到着していた歩行者
  - ・領域③の途中で横断位置に到着した歩行者
- のそれぞれの場合の期待遅れ時間と領域継続時間中に横断できない歩行者の割合を算出した。

c) 横断位置ごとの平均遅れ時間

- ・横断位置  $x_c < 0$  のとき

信号交差点の下流で横断する場合、歩行者は図-9の領域②～④のいずれかのタイミングで到着する。歩行者の到着分布を一樣と仮定し、横断位置  $x_c$  での領域②～④の継続時間をそれぞれ  $t_2(x_c), t_3(x_c), t_4(x_c)$  とすると、それぞれの領域での歩行者の到着確率  $P_2, P_3, P_4$  は、領域の継続時間の割合で表される。

$$P_2(x_c) = \frac{t_2(x_c)}{C} \tag{11}$$

$$P_3(x_c) = \frac{t_3(x_c)}{C} \tag{12}$$

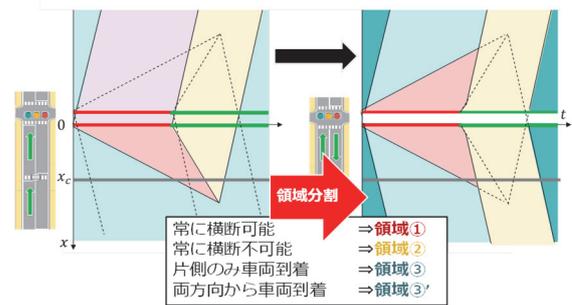


図-10 時空間図の重ね合わせ

$$P_4(x_c) = \frac{t_4(x_c)}{C} \tag{13}$$

歩行者の平均遅れ時間は、これらの到着確率と、各領域で到着した歩行者の期待遅れ時間により求められる。

領域②で到着した歩行者の期待遅れ時間は、領域②の中での期待遅れ時間  $t_2(x_c)/2$  に領域③以降での遅れ時間を加えたものとなる。領域③で横断することができた歩行者の期待遅れ時間は  $b)$  の計算にて算出される。また、領域③でも横断できなかった歩行者は  $t_3(x_c)$  の遅れ時間を被ったのち、領域④の開始時に横断することができる。これらの条件ごとの期待遅れ時間および各条件の発生確率を乗ずることで、領域②での期待遅れ時間を求める。

領域③で到着した歩行者も同様に、 $b)$  の計算結果を用いて、領域③で横断することができた歩行者の期待遅れ時間と、横断できなかった場合の期待遅れ時間に分けて遅れ時間を求める。また、領域④で到着する歩行者の遅れ時間は 0 である。

- ・横断位置  $x_c > 0$  のとき

図-9の点 A (車両の待ち行列末尾) よりも信号交差点に近い位置の場合は、 $x_c < 0$  のときと比べて領域④と領域①とが入れ替わっているだけであり、これらの領域はいずれも歩行者は遅れ 0 で横断可としているため、計算方法も前項と同様である。車両の待ち行列末尾よりも上流での横断の場合は、HCM の式(9)により遅れを計算可能である。

(2) 二方向の場合の歩行者遅れの計算

(1)節の計算過程を応用して、自動車が両方向から到着する場合の歩行者遅れを計算する。本節では自動車が譲らない場合の通常横断歩道 (または横断歩道外横断) と、交通島のみの二段階横断施設の 2 種類について、それぞれの遅れの計算方法を説明する。

a) 自動車が譲らない場合の一段階横断

両方向のいずれからも車両が到着しない場合のみ横断が可能となるため、(1)節と同様に時空間図を描画すると、図-10の通りとなる。これは、図-9の時空間図と、

図-9を上下反転させたものを組み合わせたものとなる。この図の領域①, ②は, 前章と同様にそれぞれ常に横断可能, 常に横断不可能である。領域③は, 前節と同様に片側からのみ車両が到着する場合で, 領域③'としている箇所は, 両方向から車両が到着する場合である。この領域分割をもとに, 前節と同様に場合分けを行い遅れを計算する。

b) 交通島だけの二段階横断

交通島がある場合, 二回の横断それぞれでは片方向のみの車両の到着に着目すればよい。簡単のため, 歩行者の到着時刻の分布がそれぞれの横断で独立と考えると, 各車線の期待遅れを足し合わせることで二段階横断施設の遅れを計算できる。

5. 歩行者に優先権がない場合の横断遅れ時間の計算結果

4章で説明した歩行者旅行時間の計算方法を用いて, シナリオ分析を行った。シナリオは3章と同じく, 表-1の通りとした。

横断施設が通常の横断歩道の場合と, 二段階横断歩道の場合について, 自動車交通量別の横断施設の位置と歩行者遅れ時間の関係を図-11と図-12にそれぞれ示す。グラフの実線は隣接信号交差点が存在する場合を, 破線は信号交差点が存在しない場合を表す。信号なしの場合, 遅れは式(9)によって表され, 横断施設の位置に依存しないため一定の値となる。信号ありの場合, まず信号に近い位置では, 信号に近いほど領域分割に占める領域①の割合が大きくなり, 遅れが小さくなる。この計算方法では車群の拡散を考慮していないことから, 車両の待ち行列末尾よりも上流では各領域の割合が一定のため, 遅れも一定の値となる。待ち行列末尾を境にして遅れ時間の値が不連続となっているが, これは, 領域①の時間帯がないと歩行者が1サイクルを超えて横断待ちを行う状況が発生しうするためである。

横断施設の種類ごとに考察すると, まず通常横断では, 信号ありの遅れが信号なしの場合の遅れよりもはるかに小さく, この設定値の下では信号なしの場合は1サイクル(120秒)以上の遅れ時間が生じ得る。信号ありの場合には車群が途切れる時間帯があるため, 平均遅れが小さくなったと考えられる。

二段階横断の遅れでは, 隣接信号交差点の有無による遅れの違いは比較的小さい。また, 信号交差点から離れた位置では, 信号ありの方がなしの場合よりも遅れが大きくなる。これは, 歩行者のクリティカルギャップが式

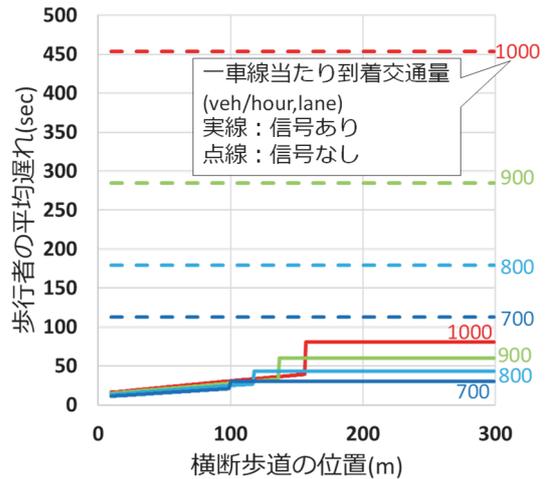


図-11 横断施設の位置と遅れの関係 (通常横断)

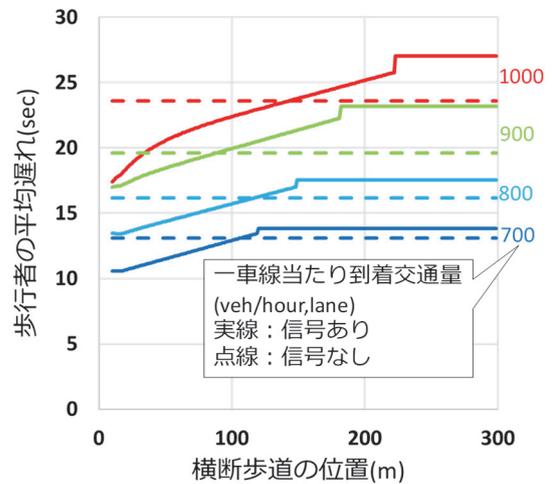


図-12 横断施設の位置と遅れの関係 (二段階横断)

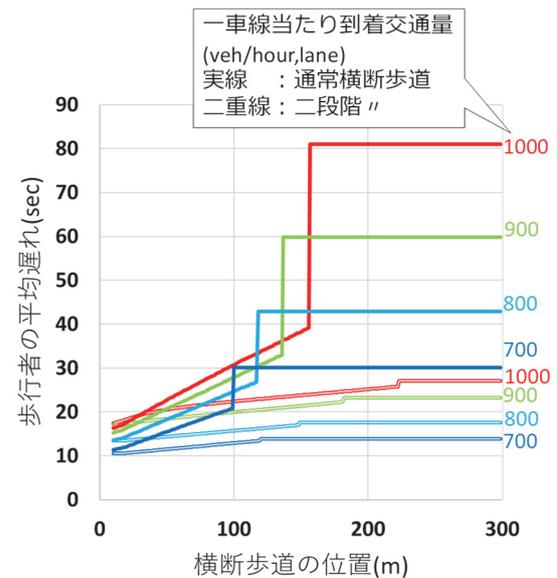


図-13 通常横断と二段階横断での遅れの比較

(10)の通り横断距離に依存しており, 二段階横断では小

さいギャップが選択可能であるため、領域③での遅れ時間が相対的に小さくなる一方で、信号ありの場合は飽和交通流率で車両が通行する領域②での遅れが発生するためであると考えられる。

通常横断と二段階横断とで遅れを比較したものが図-13 である。通常横断よりも二段階横断の方がおおむね遅れが小さいと言えるが、信号交差点に近い位置では両者の遅れの差が小さくなる。これは、ギャップアクセプタンスで横断する領域③の時間割合が小さくなり、二段階横断によるクリティカルギャップの減少効果が小さくなるためと考えられる。

## 6. 結論と今後の課題

### (1) 本研究の成果

本研究では、信号交差点に隣接する横断施設について、自動車が 100%歩行者に譲ると仮定した場合に信号交差点の交通容量に支障が出ないための条件と、100%譲らないと仮定した場合の歩行者の遅れ時間について検討を行った。

自動車が 100%譲る場合については、信号交差点の交通容量を低下させないための条件を、信号パラメータ、歩行者・自動車交通量の式として定式化した。信号交差点の交通量-交通容量比に余裕がある場合は、横断施設を信号交差点の近傍に置いても交通容量への影響は少ないことが示された。

自動車が全く譲らない場合の歩行者の遅れ時間については、一段階（通常）横断では、隣接する信号交差点を考慮することにより、歩行者の遅れ時間は大幅に減少することを示した。また二段階横断では、隣接する信号交差点の有無による歩行者遅れの増減量は小さいものの、全体として交通島を設置しない場合よりも遅れは小さくなることを示した。なお、この条件での通常横断は、横断歩道外横断とほぼ同じ状況であるともいえる。信号交差点が存在することにより歩行者の平均遅れが減少し、横断機会が増えることから、歩行者の OD の位置によっては、信号交差点に向かわず単路部での横断歩道外横断を行う歩行者が発生しやすくなる可能性も示唆している。

### (2) 今後の課題

本研究では、歩行者の横断位置ごとの自動車の交通流への影響や、歩行者の遅れ時間の分析を行っているが、実際には歩行者は OD の位置に応じて適切な横断位置や経路の選択を行うはずである。経路を含めた歩行者の旅行時間の検討は今後の課題である。

また、計算時に設定したさまざまな仮定について検証が必要である。待ち行列の延伸・解消の領域設定において、車両が一樣到着する、横断歩道の容量が全時間平均的に低下するという仮定を設けた。その一方、遅れの計算にあたっては、車両がランダム到着する仮定のもと、ギャップアクセプタンスにより計算を行っており、不整合が生じている。ショックウェーブの延伸状況については、和田ら<sup>7)</sup>のようにランダム到着の変動を考慮した期待値を用いて計算することがより適切と考えられることから、今後の課題としたい。

また、信号交差点からの距離に応じて車群が拡散する状況や、譲り率のより妥当な設定値についても検討する必要がある。さらに、今回は遅れ時間のみに着目して評価したが、車両待ち行列の間を抜けて横断するなど、各種の横断状況の安全性についても総合的に評価すべきである。

**謝辞：**本研究は、科学研究費補助金（基盤研究（C））、課題番号 20K04720）による成果の一部である。ここに記して謝意を表す。

### 参考文献

- 1) （一社）交通工学研究会：無信号二段階横断施設導入の手引き（案），2021。  
<http://www.jste.or.jp/Activity/h30-r02.pdf>
- 2) Transportation Research Board: Highway Capacity Manual 6th Edition, 2016.
- 3) Abdullah, M. and Iryo, M.: Vehicle and Pedestrian Delay Estimation at Unsignalized Crosswalks Considering Adjacent Traffic Signals, 第 53 回土木計画学研究発表会・講演集, CD-ROM, 2016.
- 4) 足立 国大, 永脇 有里子, 鈴木 弘司: 乱横断事故特性と二段階横断施設の適用性に関する分析, 第 62 回土木計画学研究発表会・講演集, CD-ROM, 2020.
- 5) 杉山 大祐, 大橋 幸子, 小林 寛: 二段階横断施設運用時に発生する遅れ時間と交通条件が与える影響の分析, 土木学会論文集 D3 (土木計画学), Vol.75, No.6 (土木計画学研究・論文集第 37 巻), I\_675-I\_682, 2020.
- 6) Alhajyaseen, W.K.M., Asano M., Nakamura H.: Left-turn gap acceptance models considering pedestrian movement characteristics, Accident Analysis and Prevention, Vol.50, pp. 175-185, 2013.
- 7) 和田健太郎, 臼井健人, 大口敬, 井料 (浅野) 美帆: 交通流の変分原理に基づく系統信号路線の期待遅れ評価法, 土木学会論文集 D3, Vol.73, No.1, pp.85-96, 2017.

(Received October 1, 2021)

## ANALYSIS OF THE IMPACT ON EFFICIENCY OF UNSIGNALIZED MIDBLOCK CROSSING FACILITIES ADJACENT TO SIGNALIZED INTERSECTIONS

Hiroki SENDA, Miho IRYO

It is important to effectively arrange unsignalized midblock crossing facilities to increase opportunities of pedestrians' safe road crossings. When installing the crossing facilities in urban areas, it is necessary to evaluate its impacts on efficiency considering adjacent signalized intersections. This research aims at clarifying the impact of location of the unsignalized crossings and traffic demand on pedestrian delay and vehicle capacity. The calculation results by shockwave and gap acceptance theory showed the decrease of average pedestrian delay when considering signalized intersections and applying two-stage crossings, and the requirements of crosswalk location and traffic demand not to decrease the vehicle capacity.