

歩行者先行信号現示(LPI)と交差点性能との関係について

張 馨¹・中村 英樹²

¹正会員 名古屋大学大学院研究員 環境学研究科 都市環境学専攻
(〒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 環境学研究科 都市環境学専攻(同上)

E-mail: nakamura@genv.nagoya-u.ac.jp

信号交差点での横断歩行者と左折車との交錯を減らすための対策として、歩車分離式信号制御や歩行者先行現示(Leading Pedestrian Interval; LPI)方式が挙げられる。このうちLPIとは、歩行者青を車両青よりも数秒先に表示し、先行する一部の時間のみ歩行者と車両を分離するものである。この方式は、安全性と円滑性の観点から、四現示など歩行者と車両を同一現示で処理する標準的な方式と歩車分離式との間に位置付けることができる。そこで本研究では、これら3つの信号制御方式について、歩行者および車両遅れ時間、車両のDegree of saturation、交通容量や、歩行者の暴露時間などの交差点性能に関する比較分析を行った。そして、特にLPIの適用範囲や歩車分離との境界条件などを明らかにした。

Key Words : pedestrian signal phasing, signal timing, pedestrian safety, operational performance, crosswalk length

1. はじめに

日本においては、交通事故件数は年々減少傾向を示しているものの、人対車両の交通事故件数の3割が横断歩道横断中の事故¹⁾であり、この割合は近年変わっていないのが現状である。このため、横断歩道をはじめとして横断歩行者の安全性を向上することが重要な課題となっている。

横断歩行者対車両の事故が発生しやすいことの一つの理由として、多くの信号交差点において、横断歩行者と交錯のある右左折車両用青信号が歩行者用青と同時に表示されていることが考えられる。都市部では右折専用現示を有する信号交差点が多く、青丸信号時には直進交通量が多く右折車がギャップ選択する機会が少ないと考えられる。これに対して、左折車と横断歩行者の交錯が頻発していると考えられる。そこで本研究では、左折車と横断歩行者の交錯に着目する。左折車と横断歩行者の交錯の危険性を排除するために、歩行者と車両の通行を分離することが進められている。歩道橋等による空間で動線を分離する方法もあるが、空間的・経済的な制約がある場合が多いため、「歩車分離式信号制御」による時間的分離の対策が一般的である。また、信号交差点にお

ける歩行者等の安全を確保するため、警察庁は2002年9月に「歩行者分離信号に関する指針」²⁾を発出し、以来全国で本格的に導入されてきた。歩車分離式にはいくつかの方式があるが、歩行者専用現示を設定する場合、各方向の車両の青時間の減少し車両の交通容量が低減するとともに、遅れ時間が増加する可能性が高い。例えば小川・川居³⁾は、交差点のシミュレーションモデルを構築し、歩車分離式信号の導入による交差点の交通処理能力について比較し、処理能力が低下することを確認している。また、阿部・安井⁴⁾は、歩車分離信号の導入前後の利用者意識に関するアンケート調査を行ったところ6割強の回答者から安全性が向上したとの回答が得られている一方で、遅れ時間の増加についても確認している。

一方、近年海外では、交差点横断歩行者への安全対策として歩行者先行現示(Leading Pedestrian Interval; LPI)が注目されている。LPIとは、歩行者青を車両青よりも数秒先に表示し、車両用青に先行する一部の時間のみ歩行者と車両を分離する現示である。この方式は、安全性と円滑性の観点から、四現示など歩行者と車両を同一現示で処理する標準的な方式と歩車分離式との間に位置付けることができる。日本では、LPIの実例は少ないものの、2015年に愛知県警察が、名古屋市において試験的に導入

した。しかしながら、LPIを導入するための条件や、交通容量や遅れ時間等の交差点性能への影響は、これまでほとんど分析されていない。また、LPI、歩車分離しない標準的な方式、並びに完全歩車分離式での性能比較やそれぞれの適用範囲については、十分明らかになっていない。

そこで本研究では、これら3つの信号制御方式について、歩行者および車両遅れ時間、車両のDegree of saturation、交通容量や、歩行者の暴露時間などの交差点性能に関する比較分析を行い、特にLPIの適用範囲や歩車分離との境界条件などを明らかにすることを目的とする。

2. 分析方法

(1) 分析対象の信号

本研究では、歩車分離しない標準方式と完全歩車分離式、LPI方式の性能を比較するため、それぞれ下記の代表的な制御方式を選定する。これらの設定現示を図-1に示す。また、本研究では左折車と横断歩行者の交錯に主眼を置くため、これらのいずれの方式においてもすべての流入部に右折専用現示を設けることで右直分離を行っている。

a) 四現示

歩行者青と同一方向の車両青を同時に表示する方式で、左折車と横断歩行者を分離しない標準的なものである。本論文では、四現示と呼ぶ。

b) 歩行者専用現示

完全歩車分離制御である。全ての方向の車両を停止させている間に、全方向からの歩行者を横断させる制御であるが、斜め横断を認めないものである。本論文では、歩行者専用現示と呼ぶ。

c) 歩行者先行現示(LPI)

部分歩車分離制御として位置づけられる。歩行者青を車両青よりも数秒先に表示し、その後は歩車ともに同一現示の利用を基本とする。本論文では、LPIと呼ぶ。

(2) 用語と変数の定義

a) Near-sideとFar-side

信号交差点における左折車両から見て、左折後に左の歩道側をNear-side、右側をFar-sideとして区別する。同様に、Near-side、Far-sideから横断を開始する歩行者を、それぞれNear-side歩行者、Far-side歩行者と呼ぶこととする。図-2に示すように、横断方向は歩行者青の時間経過に伴う歩行者位置に大きく影響するため、別々に分析する必要がある。

b) Queuing車両とArriving車両

本論文では、車両黄時間開始から捌け終わるまでの間

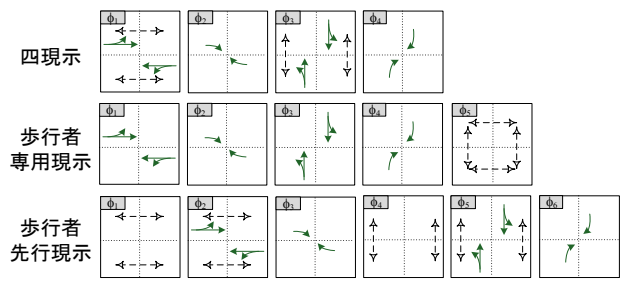


図-1 現示の例

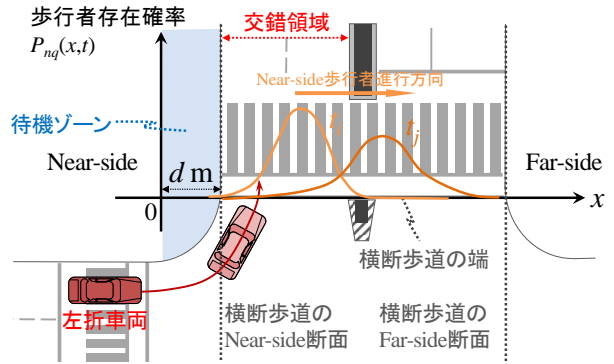


図-2 Queuing歩行者存在確率の考え方

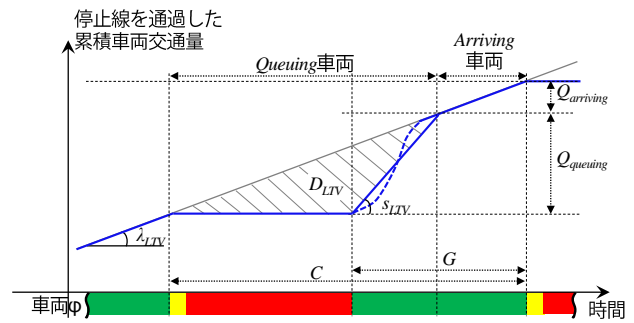


図-3 左直混用車線における車両遅れ時間

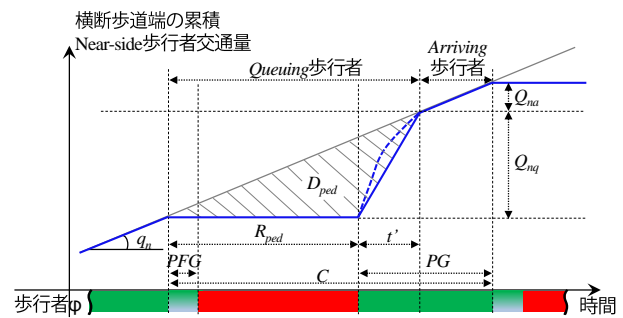


図-4 Near-side歩行者の遅れ時間

に到着した車両をQueuing車両と定義し、残りの車両をArriving車両と定義する。Queuing車両およびArriving車両の交通量を、それぞれ $Q_{queuing}$ と $Q_{arriving}$ とする(図-3)。モデル化に際しては車両の到着交通と発進交通のいずれについても一様到着分布を仮定し、左直混用車線、直進車線および右折車線の車両到着交通流率と飽和交通流率を、それぞれ λ_{LTV} 、 λ_{th} 、 λ_{RTV} 、並びに s_{LTV} 、 s_{th} 、 s_{RTV} で表す。図-3

車線における到着交通と発進交通の例を示す。車線別の車両到着交通流率の値を一定値で与えている。また、信号制御方式によって歩行者の影響が異なるため、飽和交通流率も異なってくる。

c) Queuing歩行者とArriving歩行者

Near-side歩行者とFar-side歩行者の到着交通流は車両と同様にいずれも一様到着を仮定し、到着交通流率をそれぞれ一定値の q_n , q_f とする。歩行者青点滅(PFG)開始以降に横断歩道に到着した歩行者は横断歩道に進入することなく手前で待機し、次の歩行者青時間になってから、横断歩道に進入することとする。

歩行者の横断歩道上流端への到着タイミングによって、本研究では、Queuing歩行者とArriving歩行者を定義する。Queuing歩行者とは、歩行者青時間の開始前に横断歩道手前に到着し、歩行者青開始後に一団となって横断歩道に進入する歩行者を意味する。すなわち、歩行者青時間の最初の t 秒間をQueuing歩行者が横断歩道に進入する時間と仮定したとき、 $t \leq t'$ に横断歩道手前に到着した歩行者がQueuing歩行者と定義される。これらの歩行者は、 λ_n よりも大きい交通流率で横断歩道に進入することになる。一方、Arriving歩行者とは、歩行者青時間が開始した後に横断歩道付近に到着し、 $t > t'$ に横断歩道に進入する歩行者であり、横断歩道への進入交通流率は q_n のままとなる。ここで、 t' は信号現示長や歩行者交通量、並びに横断歩道の幾何構造に影響されることが考えられるが、著者らの既往研究⁵⁾の分析結果により、Queuing歩行者からArriving歩行者に変化する境界となる経過時間 t' を8secとする。

d) 歩行者存在確率

交差点空間内の歩行者位置を、横断歩道端を基準として定義する。図-2に示すように、歩行者対車両の交錯位置を検討する上では、幅員による影響よりも、進行方向の位置が重要であるため、横断歩道端(自転車横断帯を有する場合は、自転車横断帯の交差点側端部)を x 軸として定義し、ここでは x 軸上での位置のみに着目する。横断歩行者と交錯する左折車両は、一般に歩行者の横断歩道の左右方向の位置に関わらず横断歩道の手前で待機するため、このように簡略化しても大きな支障はないと考えた。さらに、歩行者信号が青に切り替わる前の歩道上での待機状況を表すため、横断歩道の起点から上流 d [m]の区間のスペースを待機ゾーンと定義し(図-2)、 x 軸の始点を横断歩道起点から d [m]上流の箇所とした。また、横断歩道上で左折車両と交錯する部分を、交錯領域と定義する。

歩行者位置分布を推定する上では、信号現示も重要な影響要因の一つである。ここで、ある信号サイクルにおける経過時間と歩行者の位置の関係を表すため、歩行者青経過時間 t を歩行者青時間(PG)開始からの秒数として

定義する。

ここで、1サイクル内のNear-sideのQueuing歩行者およびArriving歩行者の交通量を、それぞれ Q_{nq} と Q_{na} とする(図-4)。時空間的に歩行者の位置分布を分析するため、任意のPG経過時間 t と位置 x における歩行者存在人数の全横断歩行者数に対する割合を、歩行者存在確率と定義する(図-2)。この歩行者存在確率は、歩行者交通量の影響を受ける。また、Queuing歩行者とArriving歩行者の横断歩道における密度分布が異なっているため、歩行者存在確率の分析に際しては、これらの2つの部分に分けて考える。

3. 交差点性能の定式化

(1) 車両遅れ時間と交通容量

左直混用車線、直進車線と右折車線の車線別の車両総遅れ時間をそれぞれ D_{LTV} , D_m , D_{RV} とする。計算方法は共通であるため、ここでは左直混用車線を例として説明する。1サイクル内の車線ごとの車両到着交通流率 λ_{LTV} を一定と仮定し、車両の有効青時間 G の開始とともに、飽和交通流率 s_{LTV} で交差点から流出する。左直混用車線の飽和交通流率は直進車線の飽和交通流率(2000veh/青1時間)と左折車混入による補正率 α_{LTV} の積で表される(式(1))。式(2)に示すように、車線の需要率 ρ_{LTV} は車両到着交通流率 λ_{LTV} を飽和交通流率 s_{LTV} で除した値である。そして、1サイクルあたりの車両総遅れ D_{LTV} は、図-3の斜線部の三角形の面積となり、式(3)で求められる。

$$s_{LTV} = 2000 \times \alpha_{LTV} \quad (1)$$

$$\rho_{LTV} = \frac{\lambda_{LTV}}{s_{LTV}} \quad (2)$$

$$D_{LTV} = \frac{\lambda_{LTV} \times (C - G)^2}{2 \times (1 - \rho_{LTV})} = \frac{s_{LTV} \times \lambda_{LTV} \times (C - G)^2}{2 \times (s_{LTV} - \lambda_{LTV})} \quad (3)$$

ここに、 C :サイクル長、 G :左折と直進車両用現示の有効青時間である。また、発進損失とクリアランス損失等の損失時間の合計を、車両黄時間 Y および全赤時間 AR の和とする。

対象とする3つの信号制御方式の中で、歩車分離しない四現示制御の車両総遅れ時間が一番短いことが想定できるため、歩行者専用現示とLPIの車両総遅れ時間が四現示に対して増加した割合を車両総遅れ時間の増加率 P_D として定義する。さらに、四現示、LPI、歩行者専用現示方式における車両総遅れ時間は、それぞれ D_{con} , D_{LPI} , D_{ex} である。四現示方式を基準とした歩行者専用現示方式とLPIの車両総遅れ時間の増加率 $P_{D,LPI}$, $P_{D,ex}$ は、それ

ぞれ式(4)、式(5)のように算出できる。

$$P_{D_LPI} = \frac{D_{LPI}}{D_{con}} - 1 \quad (4)$$

$$P_{D_ex} = \frac{D_{ex}}{D_{con}} - 1 \quad (5)$$

また、式(6)に示すように、左直混用車線の交通容量 Ca_{LTV} は飽和交通流率 S_{LTV} と有効青時間比 g の積で表される。

$$Ca_{LTV} = S_{LTV} \times g = S_{LTV} \times \frac{G}{C} \quad (6)$$

ここに、 C : サイクル長、 G : 左折と直進車両用現示の有効青時間である。

(2) 歩行者の遅れ時間

図-4に示すように、本論文では1サイクル内のNear-side歩行者到着交通流率 q_n を一定と仮定しているため、1サイクルあたりの歩行者交通量は式(7)のように Q_n となる。従って、1サイクル内のQueuing歩行者交通量 Q_{nq} とArriving歩行者交通量 Q_{na} は、それぞれ式(8)と式(9)で求められる。

$$Q_n = Q_{nq} + Q_{na} = q_n \times C \quad (7)$$

$$Q_{nq} = q_n \times (C - PG + t') \quad (8)$$

$$Q_{na} = q_n \times (PG - t') \quad (9)$$

Queuing歩行者は横断歩道に進入する際の進入率は曲線のようにになっているが、ここで直線で簡略化した。また、Queuing歩行者が横断歩道に進入する時間を t' で固定すると、1サイクルあたりのNear-side歩行者の総遅れ時間 D_{n_ped} は図の斜線部の三角形の面積となり、式(10)で表される。

$$\begin{aligned} D_{n_ped} &= \frac{q_n \times (C - PG + t')^2}{2} - \frac{q_n \times (C - PG + t') \times t'}{2} \\ &= \frac{q_n \times (C - PG + t') \times (C - PG)}{2} \end{aligned} \quad (10)$$

(3) 歩行者分離割合

著者らの先行研究⁹⁾では、 x 軸上における歩行者存在確率分布をワイブル分布を適用してモデル化を行った。そして、ワイブル分布のパラメータ α , β が式(11)のように各種影響変数の線形関数で表されるものと仮定し、これらの係数の推定を行っている。歩行者存在確率モデルの推定結果を表-1に示す。本モデルの説明変数はPG経過

表-1 Queuing歩行者存在確率モデルの推定結果

	説明変数	係数	t 値
形状 パラメータ α	PG経過時間 t (sec)	0.143	60.0
	歩行者赤時間 R_{ped} (sec)	0.247	6.49
	横断歩道長 L (m)	-0.0949	-21.7
	歩行者到着交通流率 q_n (ped/sec)	-2.62	-14.9
	定数項	3.54	9.91
尺度 パラメータ β	PG経過時間 t (sec)	1.30	389
	歩行者到着交通流率 q_n (ped/sec)	-1.04	-3.01
	定数項	6.49	115
サンプル数		996	
対数尤度		-84407	
初期尤度		-11583	
χ^2 値		4128	
修正済み決定係数 R^2		0.244	

時間 t 、歩行者赤時間長 ($R_{ped} = C - PG$)、横断歩道長 L 、歩行者交通流率 q_{naf} の4つである。

$$f(x; \alpha, \beta) = \frac{\alpha}{\beta} \left(\frac{x}{\beta} \right)^{\alpha-1} e^{-\left(\frac{x}{\beta} \right)^\alpha} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \alpha &= f(y_{1,1}, y_{1,2}, \dots, y_{1,n}) = \alpha_{1,1}y_{1,1} + \alpha_{1,2}y_{1,2} + \dots + \alpha_{1,n}y_{1,n} + \alpha_{1,n+1} \\ \beta &= f(y_{2,1}, y_{2,2}, \dots, y_{2,n}) = \alpha_{2,1}y_{2,1} + \alpha_{2,2}y_{2,2} + \dots + \alpha_{2,n}y_{2,n} + \alpha_{2,n+1} \end{aligned}$$

ここに、 f : 歩行者存在確率分布、 α : 形状パラメータ、 β : 尺度パラメータ、 $y_{i,b}, \dots, y_{i,n}$: 各種説明変数、 $\alpha_{1,1}, \dots, \alpha_{1,n}$ および $\alpha_{2,1}, \dots, \alpha_{2,n}$: 重回帰式の係数である。

Queuing歩行者存在確率 $P_{nq}(x, t)$ を用いると、Near-side歩行者の全サイクル歩行者の存在確率分布 $P_n(x, t)$ は、式(12)のようにQueuing歩行者とArriving歩行者それぞれの歩行者確率分布 ($P_{nq}(x, t)$ と $P_{na}(x, t)$) の交通量 (q_{nq} と q_{na}) による加重平均で求めることができる。

$$P_n(x, t) = \frac{Q_{nq} \times P_{nq}(x, t) + Q_{na} \times P_{na}(x, t)}{Q_{naf}} \quad (12)$$

ここまでに於いて、Near-side歩行者の存在確率分布を取り扱ってきたが、横断歩道における歩行者対左折車両の交錯を分析するには、両方向を合わせた全歩行者の存在確率分布 $P_{af}(x, t)$ を考慮する必要がある。本研究では、Far-side歩行者の存在確率分布 $P_f(x, t)$ を、式(13)のようにNear-side歩行者の存在確率分布 $P_n(x, t)$ と左右対称形のモデルで表すことを考える。全歩行者の存在確率分布 $P_{af}(x, t)$ は、式(14)のようにNear-side歩行者とFar-side歩行者それぞれの歩行者確率分布 ($P_n(x, t)$ と $P_f(x, t)$) を交通量 (Q_n と Q_f) の加重平均として表すことができる。

$$P_f(x, t) = P_n((-x + L + 2t'), t) \quad (13)$$

$$P_{naf}(x, t) = \frac{Q_n \times P_n(x, t) + Q_f \times P_f(x, t)}{Q_n + Q_f} \quad (14)$$

さらに、歩車分離を考慮するために必要となる、PG 経過時間 t のときの Near-side 歩行者および Far-side 歩行者が交錯領域を通過したパーセンタイル値 PR_{con_n} および PR_{con_f} は、式(14)及び式(15)で表すことができる。ここで、 x_{con_i} と x_{con_j} は、それぞれ Near-side 側と Far-side 側の交錯領域端である。

$$PR_{con_n} = \int_{x_{con_j}}^{\infty} P_n(x, t) dx \quad (14)$$

$$PR_{con_f} = \int_{-\infty}^{x_{con_i}} P_f(x, t) dx \quad (15)$$

(4) 総暴露時間

歩車分離状況を評価するため、本研究では、歩行者と左折車の交錯の発生し得る時間と交錯し得る歩行者数の積を総暴露時間と定義する。このとき、歩行者専用現示方式の総暴露時間は0となる。それ以外の方式における Near-side 歩行者、Far-side 歩行者と両方向合計の総暴露時間 TE_n, TE_f, TE_{naf} は、それぞれ式(17)~式(19)のように表される。歩車分離しない四現示制御方式における総暴露時間は、 $LPI=0$ を式(17)と式(18)に代入することで求められる。

$$TE_n = (PG + PFG - LPI) \times (Q_{nq} \times (1 - PR_{con_n}) + Q_{na}) \quad (17)$$

$$TE_f = (PG + PFG - LPI) \times (Q_{fq} \times (1 - PR_{con_f}) + Q_{fa}) \quad (18)$$

$$TE_{naf} = TE_n + TE_f \quad (19)$$

また、3つの信号制御方式の中で、歩車分離しない四現示制御の総暴露時間が一番長いことは自明であるため、歩行者専用現示とLPIの総暴露時間は四現示に対して減少した割合を総暴露時間減少率 P_{TE} と定義する。ひとつの横断歩道における四現示、LPI、歩車専用現示の総暴露時間をそれぞれ $TE_{naf_con}, TE_{naf_LPI}, TE_{naf_ex}$ とする。四現示と歩行者専用現示方式の総暴露時間減少率 P_{TE_con}, P_{TE_ex} は、それぞれ0%, 100%となり、LPIの総暴露時間減少率 P_{TE_LPI} は式(20)で算出できる。

$$P_{TE_LPI} = 1 - \frac{TE_{naf_LPI}}{TE_{naf_con}} \quad (20)$$

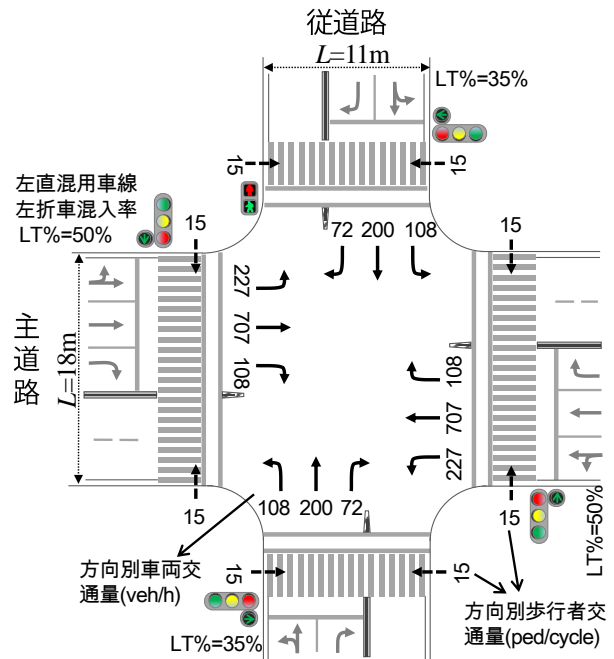


図-5 ケーススタディの仮想交差点と方向別利用者交通量

表-2 左折率、直進率と右折率

	左折率	直進率	右折率	流入部交通量の合計	主道路割合
主道路	21.8%	67.9%	10.3%	1,171	73%
従道路	28.4%	52.7%	19.0%	427	

表-3 ケーススタディの基本入力値

基本設定	歩行者専用現示		四現示		LPI	
	主道路	従道路	主道路	従道路	主道路	従道路
サイクル長(sec)	120					
損失時間(sec)	22		18		18	
左折混入率	50%	35%	50%	35%	50%	35%
歩行者の影響	なし	なし	多い	多い	多い	多い
左折車混入による補正率 α_{LT}	0.95	0.96	0.67	0.76	0.67	0.76

4. ケーススタディ

(1) ケーススタディ交差点の条件設定

ケーススタディに使用する仮想交差点の幾何構造および交通状況を図-5と表-2にそれぞれ示す。この交差点の幾何構造は東西流入部と南北流入部はそれぞれ対照となっており、東西方面は主道路で南北方面は従道路となる。車線別車両交通量と横断方向別の歩行者交通量も図-5に表示されており、車両の左折率、直進率および右折率は表-2に示す。右折車と横断歩行者の交錯を排除するため、全ての流入部に右折専用車線があり、現示は全て右直分離となっていると仮定する。本研究で、歩行者専用現示と四現示とLPIの3つの信号現示をサイクル長が120secに決定された条件の基に設計し、それぞれのフローは、図

6-図-8に紹介する。ケーススタディの基本入力値は表-3に示す。

まず、Degree of saturation(DS)が高いと予想される歩行者専用現示を図-6のフローに従って設計し、全車線のDS=0.8になるように、交通量を設定する。ここで、計算上、左直混用車線の左折車混入率(表-3)が固定している。歩行者専用青時間 t_{ped} を算出する際に、 v_{ped} が1m/secでとし、横断歩道長のLは交差点の横断歩道長の最大値とする。損失時間 t_L を表-3のように固定し、サイクル長Cから t_L を除き、残りの時間を現示の需要率で比例配分する。車線の需要率の最大値を現示の需要率とする。飽和交通流率sを算出する際、幅員、縦断勾配、大型車による影響がないと仮定し、左直混用車線の飽和交通流率 s_{LTV} は左折車混入率と歩行者の影響のみ考慮し、表-3の左折混入による補正係数 α_{LTV} は改訂交通信号の手引き⁹⁾の表3.4.7の値を用いる。しかしながら、歩行者専用現示は歩車完全分離となっており、歩行者の影響がない場合の値は改訂交通信号の手引き⁹⁾の式3.4.9と3.4.10より計算される。

次に、図-7の四現示を設計するフローに従う。ここで、交通量q、サイクル長Cおよび損失時間 t_L が固定となっており、サイクル長Cから t_L を除き、残りの時間を車両有効青時間に配分する。ここで、右折専用現示は歩行者専用現示の場合と同じ長さに固定し、その以外に左折車と直進車用の現示の需要率で比例配分する。また、左直混用車線の飽和交通流率 s_{LTV} を算出する際、表-3の左折混入による補正係数 α_{LTV} は改訂交通信号の手引き⁹⁾の表3.4.7の歩行者の影響が多い場合の値を用いる。

最後に、歩行者先行現示(LPI)を図-8のフローに従って設計を行う。基本的に四現示の信号現示の長さと同じように設定し、左折・直進車用の現示から、LPIの長さ分のみを遅らせる。ここで、車線のDegree of saturation ≥ 0.9 にならないように、LPIの最大値を設定する。

以上のフローにより設計した3つの信号現示の詳細を表-4-表-6に示す。

(2) 3種類の信号制御別の交差点性能の比較

前節で設計した交差点の信号現示を用いて、四現示制御やLPIや歩行者専用現示における車線別の車両総遅れ時間、Degree of saturation、交通容量および横断歩道別の歩行者総遅れ時間と総暴露時間を計算し、それぞれ図-9-図-13に示す。ここで、従道路と主道路上の横断歩道におけるLPIの長さはそれぞれ9secと6secである。

図-9の車線別の車両総遅れ時間に関しては、左直混用と直進車線において、車両総遅れ時間は四現示<LPI<歩行者専用現示の順になっていることが確認できた。また、バラツキについて比較すると、主道路のバラツキは従道路より大きいことがわかった。これは主道路の交通量が多いため、数秒のみ分離しても、多くの車両の待ち

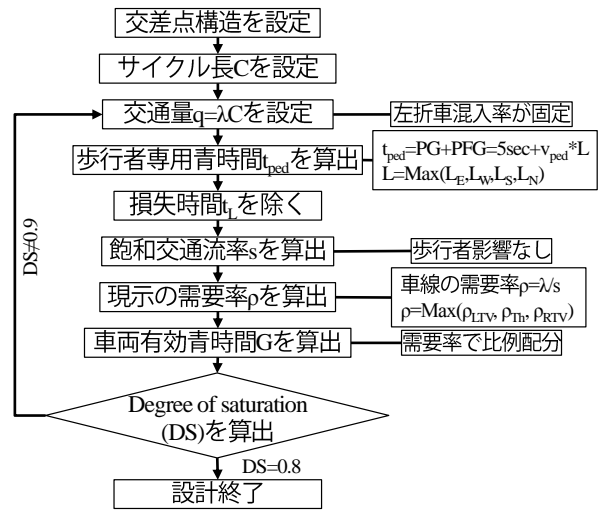


図-6 歩行者専用現示設計のフロー

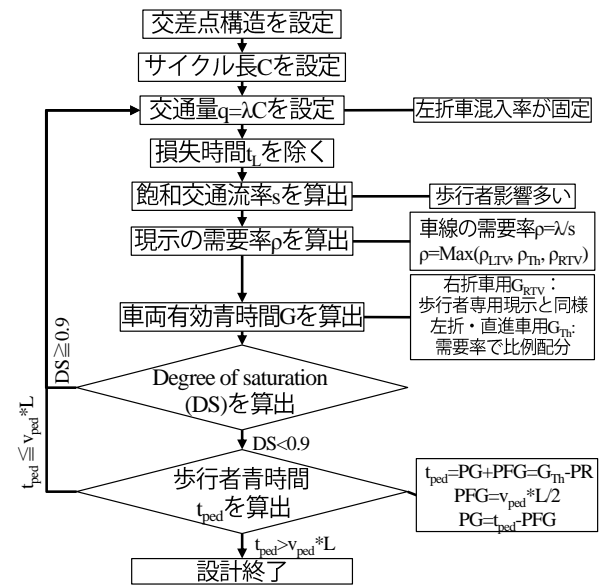


図-7 四現示設計のフロー

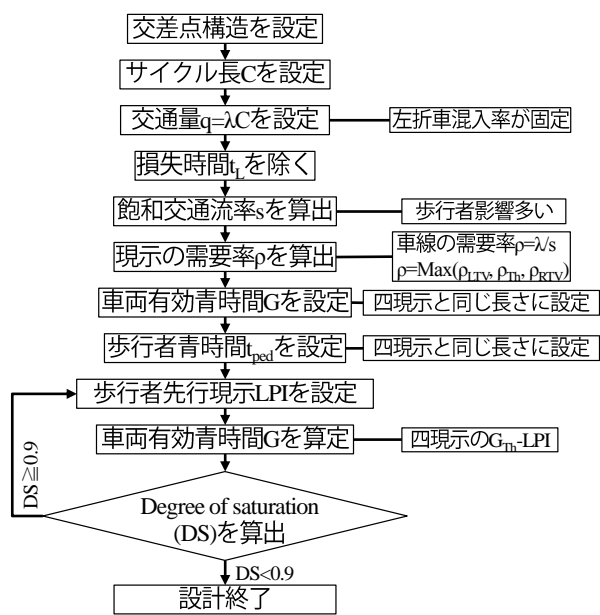


図-8 歩行者先行現示(LPI)設計のフロー

表-4 歩行者専用現示の信号階段図

現示階梯		時間長[秒]													サイクル長[秒]
		φ ₁			φ ₂			φ ₃			φ ₄			φ ₅	
東西方面	全車両	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	120
	右折車両														
南北方面	全車両														
	右折車両														
全方面	歩行者														
歩行者専用現示															

表-5 四現示の信号階段図

現示階梯		時間長[秒]														サイクル長[秒]
		φ ₁				φ ₂				φ ₃				φ ₄		
東西方面	全車両	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	120
	歩行者															
南北方面	全車両															
	歩行者															
右折車両	全車両															
	歩行者															
四現示																

表-6 歩行者先行現示の信号階段図

現示階梯		時間長[秒]																サイクル長[秒]
		φ ₁				φ ₂				φ ₃				φ ₄				
東西方面	全車両	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	120
	歩行者																	
南北方面	全車両																	
	歩行者																	
右折車両	全車両																	
	歩行者																	
歩行者先行現示																		

時間が増えることが考えられる。また、LPIを導入する際、主道路の有効青時間から9secも引いたため、遅れ時間が増加したと考えられる。車両の総遅れ時間は信号現示の長さだけでなく、車両交通量の配分に強く影響されていると考えられ、今後の課題として、車両交通量が変わった際の総遅れ時間を分析すべきと考えられる。

図-10に車線別のDegree of saturationを示す。すべてのDSは0.9より小さくなっていることが確認できた。左直混用車線において、LPI>歩行者専用現示>四現示の順になっているが、直進車線の場合は、歩行者専用現示>LPI>単純四現示の順に変化した。この理由としては、今回左折車混入率と車線交通量は固定されており、また、左直混用車線の飽和交通流率は直進車線より低いため、飽和になりやすいと考えられる。実際に左直混用車線が混雑するとき、直進車は直進車線へ車線変更するはずなので、今後の課題として車線変更も考慮すべきである。

同様の理由で図-11に示す交通容量も左直混用車線と直進車線のLPIと四現示制御の位置が入れ替わったことに説明することができる。

すべての現示方式において、右折車線の性能が変わらないことが確認できた。この理由としては、前節の設計時に現示方式問わず、右折専用現示の長さを同じように

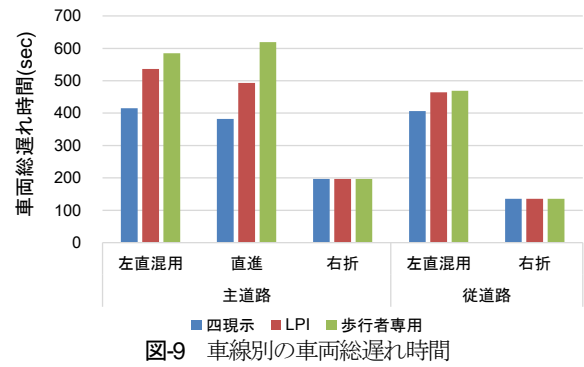


図-9 車線別の車両総遅れ時間

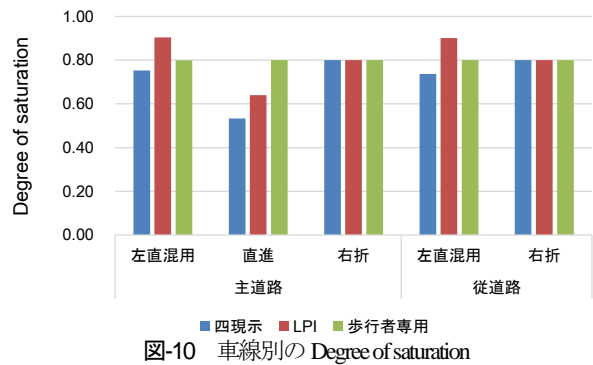


図-10 車線別のDegree of saturation

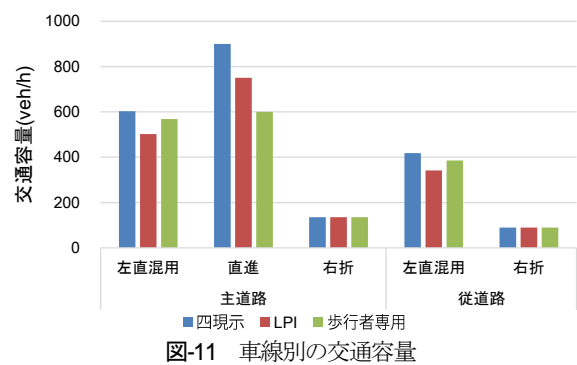


図-11 車線別の交通容量

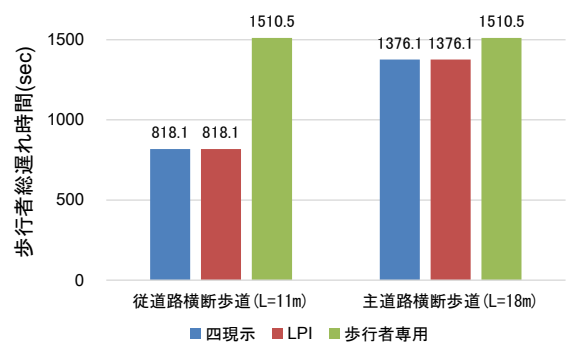


図-12 横断歩道別の歩行者総遅れ時間

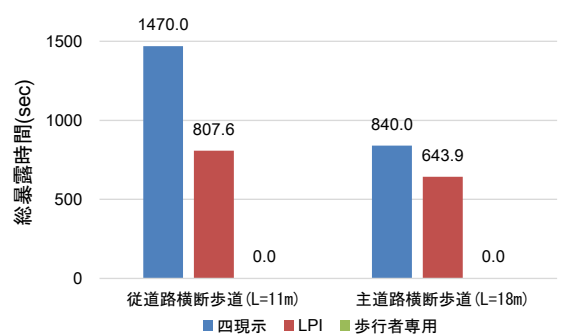


図-13 横断歩道別総暴露時間

設定したためである。交差点内の他の利用者は右折車両からの影響を受けないことが確認できた。

横断歩道別の歩行者遅れ時間(図-12)から、四現示とLPIにおいて同じ値となっていることがわかった。主道路横断歩道において歩行者専用現示との差があまり大きく見られないが、従道路横断歩道において歩行者専用現示は四現示およびLPIの2倍程度になっている。従道路の横断歩道長は短くて、もし歩行者の遅れ時間が2倍になってしまったら、逆に歩行者も信号無視の恐れがあるため、部分分離のLPIの方がよいと考えれる。

図-13に示す横断歩道の総暴露時間に関しては、四現示>LPI>歩行者専用現示の順になっていることがわかった。また、従道路の横断歩道における暴露時間のバラツキは主道路横断歩道より大きく、LPI導入後の総暴露時間は導入前の四現示の約半分になったことができる。歩行者遅れ時間と合わせて、従道路横断歩道は主道路横断歩道よりLPIに適しており、主道路横断歩道において3つ信号制御の性能はほとんど同レベルになっていると言える。

ここまでの議論はLPIの長さ(従道路:6sec, 主道路:9sec)が固定する前提で行った。さまざまな指標からLPIは四現示制御と歩行者専用現示の中間に位置づけられることが確認できた。次に、LPIの長さによる違いを比較するため、歩行者の総暴露時間は交錯領域通過した歩行者の割合に依存しているため、歩行者確率モデル(表-1)を用いて、式(14)と式(15)でNear-side歩行者およびFar-side歩行者が交錯領域を通過したパーセンタイル値 $PR_{con,n}$ および $PR_{con,f}$ を計算し、これらの結果を図-14に示す。同じLPIの場合に、Near-side歩行者の通過割合はFar-side歩行者より高いこと、短い横断歩道における通過割合は長い横断歩道より高いことが確認できる。また、LPIの長さの増加に対して、歩行者の割合の敏感度が変化している。主道路の横断歩道において、Near-sideは4secで、Far-sideは7secから変化が大きくなる。逆にLPIは長すぎると、歩行者の割合の変化が小さくなるため、あまり効果がないことが分かる。そして、両方向からの歩行者を考慮し、横断歩道における歩行者の総暴露時間減少率を計算し、図-15に示す。さらに、図-15に示すように車両総遅れ時間の増加率も算出し、両方の評価指標に基づき、LPIの設計適用条件を検討する。ここで、LPIの増加とともに、総暴露時間減少率の低下と車両総遅れ時間の増加率の上昇を確認した。LPIは6sec以上で14sec以下の間に総暴露時間減少率が一番敏感に変化していることが分かる。また $DS > 0.9$ にならないように、主道路と従道路の横断歩道におけるLPIの最大値はそれぞれ6secと9secとなっていることが分かる。さらに、歩行者専用現示の車両総遅れ時間の増加率はそれぞれ主道路:51.0%、従道路:15.6%になっており、主道路と従道路の横断歩道におけるLPI

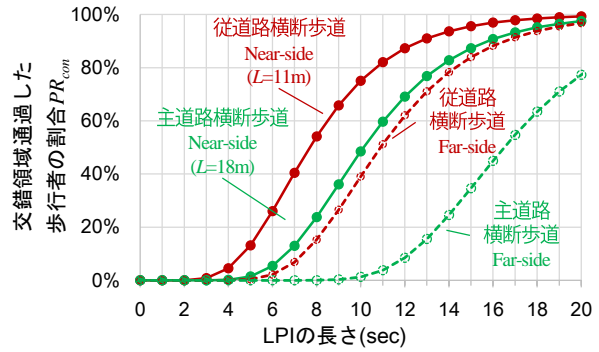


図-14 交錯領域通過した歩行者の割合

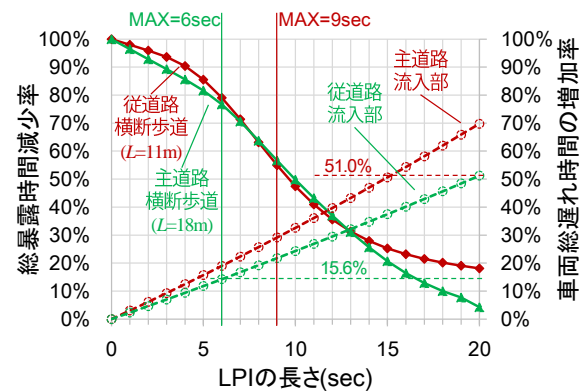


図-15 総暴露時間減少率と車両総遅れ時間の増加率

はそれぞれ6secと15secを超えたら、LPIではなく、歩行者専用現示の方がよいと言える。

5. おわりに

本研究では、歩車分離しない四現示制御と歩車完全分離の歩行者専用現示制御および歩車部分分離のLPIの3つの信号現示制御について、車線別の車両の遅れ時間、Degree of saturation, 交通容量、および横断歩道別の歩行者総遅れ時間と総暴露時間などの交差点性能について算出方法を定式化した。これらの3つの信号現示制御をフローに従って設計を行い、その信号現示長を用いて、各指標を算出し結果を比較した。さらに、3つの信号現示、特に、LPIについての位置づけや適用範囲や条件などの検討を行った。

基本的には、車両の遅れ時間は四現示<LPI<歩行者専用現示の順になっており、主道路の変化のバラツキが従道路より大きいことがわかった。車線別のDegree of saturationや交通容量に関しては、左直混用車線において歩行者専用現示とLPIの順序が逆になっていることを確認した。その理由として、左直混用車線の飽和交通流率が低く、飽和になりやすいためであると考えられる。実際にはLPIを導入の歩行者からの影響は小さくなるはずなので、今後の課題として精査する必要がある。歩行者

の遅れ時間と総暴露時間を比較すると、従道路上の横断歩道は主道路上の横断歩道よりLPIに適していることがわかった。従道路横断歩道の長さが短く、有効青時間の余裕があるためと考えられる。また、総暴露時間減少率はLPIが6~14secの間に一番敏感に変化していることがわかった。車両総遅れ時間の増加率より、主道路と従道路の横断歩道におけるLPIはそれぞれ6secと15secを超えたら、LPIではなく、歩行者専用現示の方が適していることが言える。

今後の課題として、車両交通量と歩行者交通量の配分の影響や歩行者が左直混用車線の飽和交通流率への影響や需要率の変化により車線利用の変化について精査する必要がある。また、今回サイクル長が固定しているため、今後サイクル長を各信号現示の最適長に設計し、分析する必要があると考えられる。

参考文献

- 1) 警察庁交通局：平成 24-26 年中の交通事故発生状況，2013-2015.
- 2) 警察庁交通局交通規制課長：歩車分離式信号に関する指針の制定について(通達)，平成 14 年 9 月 12 日付け警察庁丁規発第 86 号，2002.
- 3) 小川圭一，川居卓也：歩車分離式信号による交差点の交通処理能力の変化に関する分析，土木計画学研究・講演集，CD-ROM, 2008.
- 4) 阿部浩幸，高田邦道：歩車分離式信号の効果に関する研究，第 25 回交通工学研究発表会報告書，pp.9-12, 2005.
- 5) 張馨，中村英樹：信号交差点の横断歩行者密度分布モデルとその歩行者先行現示(LPI)設定への適用，交通工学論文集，第 2 巻，第 2 号(特集号 A)，pp. A_183-A_192, 2016.
- 6) (社)交通工学研究会：改訂 交通信号の手引き，pp.37, 2006.

(2016.4.22 受付)

ON THE RELATIONSHIP BETWEEN LEADING PEDESTRIAN INTERVAL(LPI) AND PERFORMANCE OF SIGNALIZED INTERSECTION

Xin ZHANG and Hideki NAKAMURA