

令和 6 年 6 月 19 日現在

機関番号：13901

研究種目：若手研究

研究期間：2022～2023

課題番号：22K14335

研究課題名（和文）左折車の法令遵守率向上と円滑性の両立に寄与する信号交差点制御手法に関する研究

研究課題名（英文）Research on signalized intersection control methods that contribute to both improved legal compliance and smoothness for left-turning vehicles

研究代表者

張 馨 (Zhang, Xin)

名古屋大学・環境学研究科・講師

研究者番号：60825115

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 1,800,000円

研究成果の概要（和文）：日本の道路交通法では、車両は横断歩道を通行する際、接近する歩行者に進路を譲ることが定められているが、車両が横断歩行者の前を横切る場合も多く、交差点の効率に影響を及ぼしている。そこで本研究では、歩行者交通量、横断歩道の幾何構造、信号現示を考慮した車両の歩行者に対する譲り挙動特性を明らかにし、左折車の譲り挙動モデルを構築した。この譲り挙動モデルに基づくモンテカルロシミュレーションを実施し、遵守状況に応じて左折車線の交通容量の相違点を明らかにし、その変化に対応できる現行の交通容量推定手法の改善を提案した。さらに、歩行者の安全性と自動車の円滑性の双方を考慮した合理的な信号制御方式の選定方法を提示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、さまざまな幾何構造や信号現示や交通状況を持つ交差点において実態調査を行い、法令を遵守している・遵守していない左折車の挙動を分析したうえで、横断歩道付近における車両の状況による遵守判断挙動が幾何構造や交通状況との関係を明らかにし、これらの関係をモデル化した。信号交差点での車両の法令遵守状況に着目して左折車線の交通容量の推定手法の改善も提案した。さらに、信号交差点の幾何構造や交通条件に応じた合理的な幾何構造と信号現示方式を提案することで、信号交差点を計画する段階や改良検討を行う時に、実務上に制御方式の選定に重要な参考資料となるものである。

研究成果の概要（英文）：Japan's Road Traffic Act requires that vehicles must yield to approaching pedestrians when crossing a pedestrian crosswalk, but vehicles often cross in front of pedestrians, affecting the efficiency of intersections. Therefore, in this study, we clarified the yielding behavior characteristics of left turning vehicles to pedestrians, taking into account pedestrian traffic volume, crosswalk geometric geometry, and signal phases, and developed a yielding behavior model for left-turning vehicles. A Monte Carlo simulation is conducted based on this yielding behavior model to clarify the differences in traffic capacity of left-turn lanes depending on compliance, and proposed an improvement to the current traffic capacity estimation method that can respond to these changes. Furthermore, a method for selecting a rational signal control method was proposed that considers both pedestrian safety and smooth traffic flow of vehicles.

研究分野：交通工学

キーワード：信号制御 譲り挙動 交通容量

様式 C-19、F-19-1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

日本の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約 2 割が信号交差点における横断歩道横断中の事故であり、そのうち、右左折車による安全不確認による事故が 8 割程度を示している。このため、横断歩道をはじめとした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。日本の道路交通法によると、横断歩道では歩行者優先であり、左折車と横断歩道上の歩行者の軌跡が交錯する場合、歩行者が交錯点を通過するまでの間、運転者には横断歩道手前での減速義務や停止義務がある。しかしながら、現状では左折車は必ずしもこれを遵守しておらず、歩行者の前を通過する場面も多々存在する。特に、横断歩道長の長い場合、運転手はまだ歩車間の距離が十分にあると判断したり、長い待ち時間などにより、歩行者が横断歩道に入っているにもかかわらず、横断歩道を通過することも多いと考えられる。そのため、法令遵守率を向上させるためには、横断歩道などの交差点幾何構造、交通状況、信号現示などとの関係を明らかにし、利用者の挙動に応じて改良する必要がある。

歩車分離信号制御も交錯の減少や遵守率を向上に期待できる効果的な対策であると考えられる。しかし、都市部のボトルネック交差点では、横断歩道が長ければ、歩行者最小青時間の制約により信号パラメータの改良が困難となっている箇所も多く見られる。横断歩道の全長に対して横断歩行者に譲ることになると、横断歩道が長ければ、左折車交通容量が大幅に減少し、遅れが大きくなることが予測される。そこで、交差点の改良に際して、横断歩道長などの構造的な改良と歩車分離信号現示などの時間的な分離を合わせて行うことで相乗効果があると期待できるが、適応できる交差点の条件やそれによる改良後の交差点性能の変化は、これまでほとんど分析されていない。

2. 研究の目的

本研究では、交差点の幾何構造や信号現示、交通状況などに応じて左折車の法令への遵守状況を分析し、それに伴って左折車線の交通容量など円滑性を定量的に評価することで、左折車の法令遵守率の向上と円滑性の両立に寄与できるような、信号交差点の幾何構造や交通条件に応じた合理的な幾何構造と信号現示方式を提案することを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 左折車両の譲り確率

本研究では、横断歩道の方角に基づいて、横断歩行者を near-side 歩行者と far-side 歩行者の 2 つのグループに分類する。異なる方向からの歩行者のための 5 つのエリア N1、N2、F1、F2、および F3(図-1)を定義した。これらのエリアのサイズは、左折車両の流出車線の選択に基づいて変化する。平面交差の計画と設計のマニュアル¹⁾で定義されている衝突エリア(N2 と F1)の歩行者は、左折車両の挙動に影響を与えるだけでなく、横断歩道の残りの半分(F2)と待機エリア(N1 と F3)にも影響する。日本の道路交通法に基づき、左折車両は横断しようとしている歩行者に道を譲る必要がある。したがって、車両譲り挙動と歩行者数の関係を調査するために、5 つのエリアにある横断歩行者数をそれぞれ記録する。

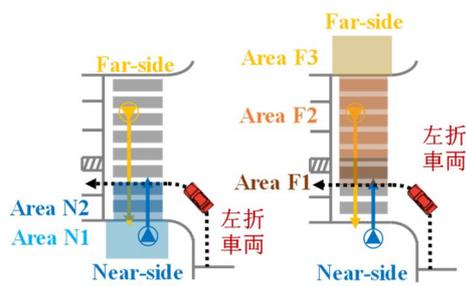


図-1 横断歩行者存在領域の定義

また、左折車線の容量に影響を与える譲り確率に基づいて車両の譲り挙動を分析した。譲り確率 ($P(\text{yielding})$) は一定時間内に横断歩道を通過する左折車両の総数に対する停止線を通過する際に横断歩行者に道を譲るために減速または停止を選択する左折車両の割合である。幾何構造と信号現示など各要因の影響を分析するために、譲り確率を 2 秒ごとに集計した。歩行者量は 15 分間で大きなばらつきを示さなかったため、15 分間の各時間間隔での譲り確率の平均値が推定された。

また、左折車線の容量に影響を与える譲り確率に基づいて車両の譲り挙動を分析した。譲り確率 ($P(\text{yielding})$) は一定時間内に横断歩道を通過する左折車両の総数に対する停止線を通過する際に横断歩行者に道を譲るために減速または停止を選択する左折車両の割合である。幾何構造と信号現示など各要因の影響を分析するために、譲り確率を 2 秒ごとに集計した。歩行者量は 15 分間で大きなばらつきを示さなかったため、15 分間の各時間間隔での譲り確率の平均値が推定された。

(2) 左折車両の譲り挙動モデル

左折車両の譲り挙動の実証分析に基づき、車両の譲り確率は式(1)に示すような非線形回帰モデルであると仮定する。最終的に、この式は、横断歩行者数、横断歩道の幾何構造、信号現示を組み込んだ線形多重回帰モデルの指数を持つ負の指数関数に従う。このモデルは、他のモデルと比較した適合度を反映した、より大きな R 二乗とより小さな赤池情報量基準(AIC)値に基づいて選択された。

$$P(\text{yielding}) = 1 - e^{-(ax_1 + bx_2 + cx_3 + dx_4 + ex_5 + ft + gL + h)} \quad (1)$$

ここで、 x_1-x_5 は、それぞれ N1、N2、F1、F2、F3 の平均歩行者数 (歩行者/サイクル/2 秒) を表し、範囲は 0~6 歩行者/サイクルである。t は PG 開始からの経過時間 (秒); L は横断歩道長 (m); a~h は係数である。

(3) 左折混用車線交通流率の推定

仮定の信号交差点において指定の歩行者交通量を設定し、モンテカルロシミュレーションによって左直混用車線における 1 時間当たりの最大捌け交通量を推定する。モンテカルロシミュ

レーションでは2秒毎に車両が停止線を通過することを仮定して、1サイクルの青時間中に左折・直進車両の捌け台数をカウントする。また、横断歩行者を待つ左折待機車両が2台以上滞留した場合、後続の直進車が停止することを仮定している。モンテカルロシミュレーションのフローチャートを図-2に示す。

横断歩行者の分布は示す横断歩行者密度分布であるPPPモデル²⁾を用いて、2秒毎に横断歩行者が歩行者待機エリアと交錯エリアにそれぞれ何人存在するのかを求める。交錯エリアに歩行者が存在しない場合、左折車両は通過することができる。ばらつきを考慮し10回試行した1時間当たりの最大捌け交通量の平均値を交通容量 c (台/時)とする。本研究では歩行者と左折車両の交錯が左直混用車線の飽和交通流率に及ぼす影響を分析するため、歩行者交通量と左折率ごとに飽和交通流率を求める。モンテカルロシミュレーションによって推定した交通容量 c を飽和交通流率 s (台/時)に換算し、歩車分離程度の異なる各信号現示の左直混用車線における飽和交通流率を比較する。

(4) 交差点の平均遅れ時間

遅れ時間とは、交通流が自由走行時と比較して余分に要した時間である。左直混用車線について、車両が一様到着であるので、 D : 総遅れ時間(秒)、 q : 流入部の車両流入交通量(台/時)、 q_{SL} : 左直混用車線の車両流入交通量(台/時)、 q_{ped} : 横断歩行者交通量(人/時)、 s_{SL} : 左直混用車線の飽和交通流率(台/時)、 C : サイクル長(秒)、 G : 有効青時間長(秒)、 R : 赤時間長(秒)とする。左直混用車線の遅れ時間は図-3に示す。右折車両や歩行者も同様な方法で遅れ時間を推定する。次に、本研究で信号交差点の円滑性の指標として用いる平均遅れ時間 \bar{d} (秒/人)である。

$$\bar{d} = D / (q / 3600 \times C \times (\text{平均乗車人数}) + q_{ped} / 3600 \times C) \quad (2)$$

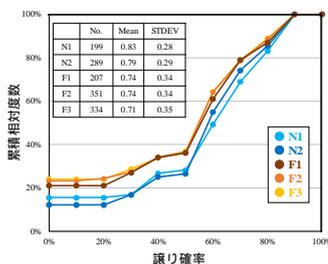
4. 研究成果

(1) 左折車両の譲り確率

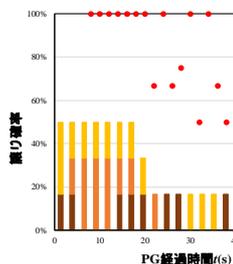
図-4(a)は、各エリアの譲り確率と歩行者数の関係と比較すると、N1とN2のnear-side歩行者数はfar-side歩行者数よりも車両譲り挙動に大きな影響を与えることがわかった。これはドライバーが停止線を通過した後、すぐにN1とN2の歩行者に気づき、最初に反応できるためと考えられる。さらに、far-side歩行者と左折車両間の距離が長く、ギャップも大きいためそれらの関係が弱まり、左折車両が横断するのに十分な時間を確保できる。

図-4(b)は、PGの経過時間 t とともに車両の譲り確率が変化することを示している。PG開始から42秒後に開始する。左折車両が26、28、46秒でそれぞれ同様のエリアで同様の数の歩行者に遭遇した場合、PG中の譲り確率はPG中より低くなる。これは、左折車両がPG中に歩行者を待っている間に次のサイクルを待ちたくないためと考えられる。

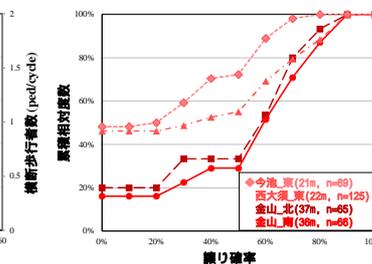
図-4(c)は、横断歩道長に対する譲り確率を示している。これらの場所では、横断歩道が長くなるとともに譲り確率が増加する。この理由は、長い横断歩道では歩行者が連続して通過するため、車両が横断する適切な隙間を選択できなくなることが挙げられる。



(a) 各エリアの歩行者数



(b) PG経過時間



(c) 横断歩道長

図-4 各要因が車両譲り確率へ与える影響

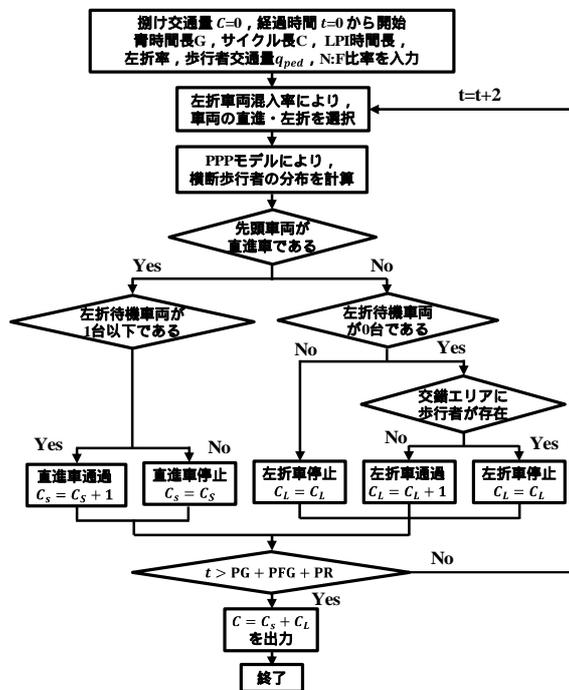


図-2 フローチャート

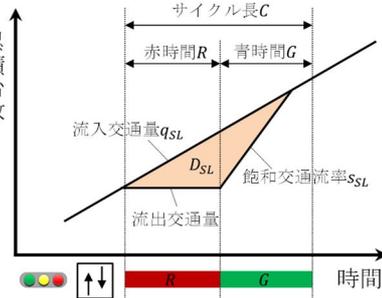


図-3 遅れ時間 D_{SL}

(2) 左折車両の譲り挙動モデル

車両譲り挙動モデルの説明変数係数の推定結果を表-1に示す。歩行者数(x_1-x_5)とLは車両譲り確率に正の影響を与えるが、tは負の影響を与える。結果から、左折車両に近いエリアの歩行者数は車両譲り挙動に強い影響を与えることがわかった。

結果に基づくと、near-side 歩行者は左折車両に近いので、車両譲り挙動に大きな影響を与える。far-side 歩行者の場合、F1 と F2 の歩行者は車両譲り挙動にほぼ同様の影響を与える。この現象は、ほとんどの横断歩道でF1のサイズが非常に小さいという事実に起因する可能性がある。したがって、F1はF2の歩行者と同様に譲り挙動に影響を与えた。また、他の横断歩道での異なる幾何構造条件下での追加データを、今後の研究に含める必要がある。

表-1 左折車両の譲り挙動モデルの推定結果

パラメータ	係数	標準偏差	95%信頼区間		
			下限	上限	
N1に存在する歩行者数 x_1	1.95×100	3.96×10^{-1}	1.18×100	2.73×100	
N2に存在する歩行者数 x_2	1.55×100	2.77×10^{-1}	1.00×100	2.09×100	
F1に存在する歩行者数 x_3	3.39×10^{-1}	9.27×10^{-2}	1.57×10^{-1}	5.21×10^{-1}	
F2に存在する歩行者数 x_4	3.83×10^{-1}	1.35×10^{-1}	1.19×10^{-1}	6.47×10^{-1}	
F3に存在する歩行者数 x_5	1.79×10^{-1}	1.70×10^{-1}	-1.55×10^{-1}	5.13×10^{-1}	
歩行者青時間PGの経過時間 t (s)	-8.09×10^{-3}	2.20×10^{-3}	-1.24×10^{-2}	-3.77×10^{-3}	
横断歩道長 L (m)	9.57×10^{-3}	5.82×10^{-3}	-1.86×10^{-3}	2.10×10^{-2}	
定数項	3.34×10^{-1}	1.16×10^{-1}	9.28×10^{-3}	6.60×10^{-1}	
R^2	0.526	サンプル数	585	AIC	507.16

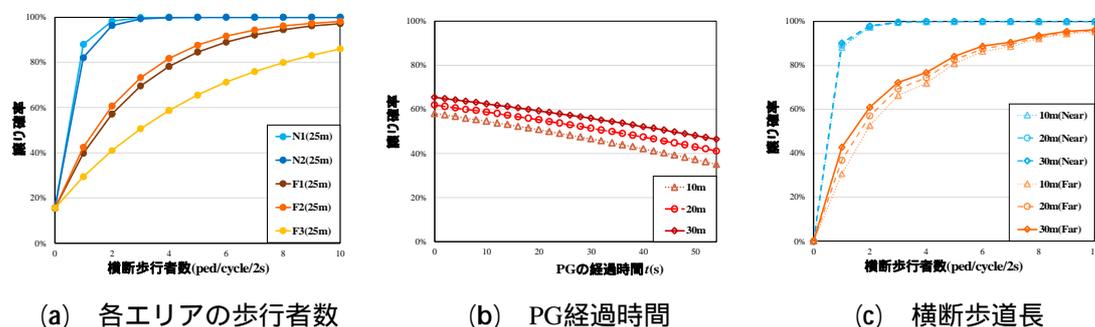


図-5 感度分析

図-5は、各エリアの歩行者数、PGの経過時間および横断歩道長に対する車両譲り確率の感度を示している。PGが終了する直前に譲り確率の変化がより顕著になることを考慮して、歩行者数と横断歩道長の感度分析を行うために経過時間50秒を選択した。

図-5(a)は、各エリアの歩行者数の影響を確認するため、該当エリア以外の歩行者数はゼロとした。N1とN2は左折車両との交錯領域に近いので、ほとんどの車両が譲ることにある。ただし、F1とF2の場合、譲り確率も歩行者数によって大きく異なる。車両のドライバーが譲るべきか横断すべきかを検討する場合、エリア内の歩行者数を確認し、適切な隙間を見つけている。これはF1~F3の歩行者に譲った場合、車両が通過するまでにかかなりの時間を要するためと考えられる。図-5(b)には、PG経過時間の増加につれて、譲り確率がほぼ一定の低下率で減少していることが分かった。図-5(c)は、最も明らかな変化を判定するために、far-sideとnear-sideで同数の歩行者(N1とF3では1人/サイクル)が選択された。横断歩道長は、near-side歩行者に対する車両譲り挙動に大きな影響を与えない。far-side歩行者の場合、横断歩道が長いほど、車両が歩行者に道を譲る確率が高くなる。これは、このモデルで使用した経験的データでは、長い横断歩道では通常、歩行者数が多かったためである。歩行者交通量が高い場合、車両は歩行者が絶えず横断歩道を通して占有するため、車両が適切な隙間を見つけて追い越すことは困難である。そのため、車両は歩行者「赤」時間しか使用できず、これは短い期間にすぎない。

(3) 左折車線飽和交通流率の推定

図-6に示すような信号交差点において、四現示制御、LPI、歩車分離方式のそれぞれについてモンテカルロシミュレーションによって推定した左直混用車線における飽和交通流率を図-7に示す。左折率が大きくなると左折車両が多くなり、歩行者交通量が大きくなると横断歩道上の歩行者が多くなる。そのため、左折待機車両の滞留が生じる確率が高まり最大捌け台数が減少する。よって、歩行者交通量と左折率が増加すると飽和交通流率が減少する。そして、四現示制御とLPIを比べると、LPIの方が歩行者交通量と左折率の増加に伴う飽和交通流率の低下具合が小さい。LPIの間に待機歩行者が横断歩道を横断してから車両が青信号になるため、左折車両が横断歩行者を待つ機会が少なくなるためである。

(4) 平均遅れ時間の推定

図-8 に示すように、1 流入部の各車線の 1 サイクル当たりの平均遅れ時間を確認した。左直混用車線では信号現示によって左折率と歩行者交通量の増加による遅れ時間の増大具合に違いが出てくる。そのため、交差点全体の各信号現示の総遅れ時間は、歩行者交通量や左折率によってその大小関係が逆転する可能性が存在する。ただし、総遅れ時間は交通量によってその値を大きく変え交通量ごとの比較が困難になる。そこで、信号交差点の利用者 1 人あたりへの影響として平均遅れ時間(秒/人)を指標として円滑性を分析する。本研究では、車両の平均乗車人数は 1.3 (人/台) とする。また、車両交通量によってサイクル長や有効青時間が変化するため車両交通量を 100 (台/時) ごとに平均遅れ時間を分析する。

車両交通量によっては歩行者交通量が変化すると、信号現示による平均遅れ時間の大小が逆転することが確認された。特に車両交通量が小さい場合、歩行者交通量が小さいと、四現示制御の平均遅れ時間が最も小さくなるが、歩行者交通量が大きくなると歩車分離方式の平均遅れ時間が最も小さくなる。車両交通量が大きくなると四現示制御の平均遅れ時間が小さくなり、他の信号現示の平均遅れ時間と比べてもその差が広がっていくことが分かる。

(5) 信号現示の適応条件

横軸を車両交通量、縦軸を歩行者交通量として最も平均遅れが小さくなる信号現示をプロットしたものを図-9 に示す。左折率による有意差がないことを確認したため、左折率 30% を代表として図示する。先ほど述べた通り、車両交通量が小さい場合、歩行者交通量が小さいと四現示制御の平均遅れ時間が有利となり、歩行者交通量が大きくなると歩車分離方式が効果的となる。車両交通量が大きくなると四現示制御が最も有利となる。

以上より、本研究で構築した左折車両の譲り挙動モデルに基づくモンテカルロシミュレーションを実施し、譲り状況に応じて左折専用・混用車線の飽和交通流率の相違点を明らかにし、その変化に対応できる現行の交通容量推定手法の改善を提案した。さらに、交差点利用者の平均遅れ時間と分離の程度により、歩行者の安全性と自動車の円滑性の双方を考慮した信号制御方式の選定方法を提示した。ケーススタディにより、車両交通量と歩行者交通量により、選定する信号現示制御を示した。

参考文献

- 1) 一般社団法人 交通工学研究会(2018)：平面酵素の計画と設計 基礎編 計画・設計・交通信号制御の手引き。
- 2) Emagnu, M. Y., Zhang, X., Iryo-Asano, M., and Nakamura, H. (2021): Estimation Method of Left-turn Lane Capacity under the Influence of Pedestrians and Crosswalk Layout at Signalized Crosswalks, Journal of Civil Engineering, Vol. 36, No.1, pp. 32-40 .

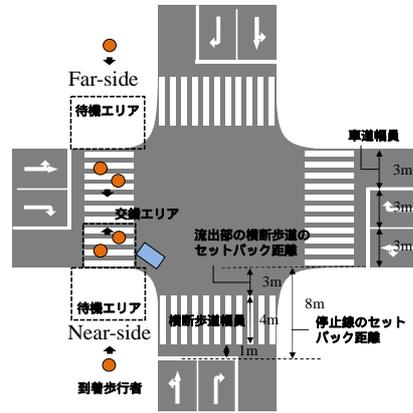
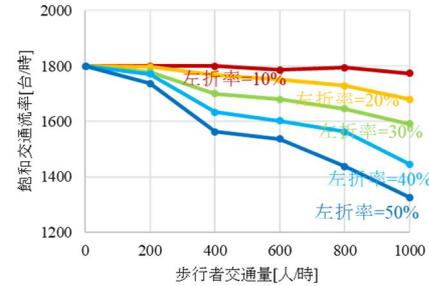
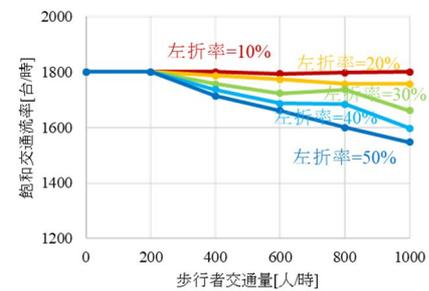


図-6 分析対象交差点の幾何構造設定



(a) 四現示制御



(b) LPI

図-7 各信号現示の左直混用車線における飽和交通流率

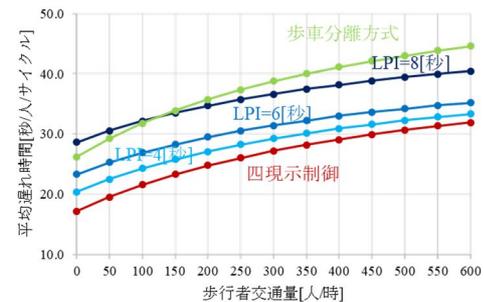


図-8 平均遅れ時間(車両交通量:400 台/時、LPI:4 秒)

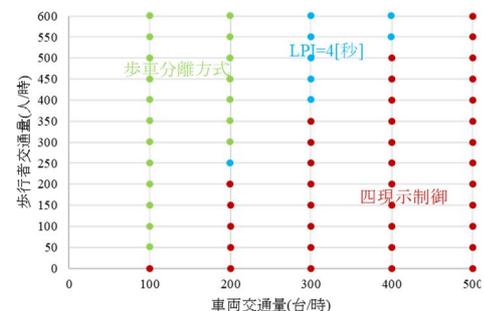


図-9 平均遅れ時間が小さい信号現示 (LPI=4[秒]導入)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Wang Yifei, Zhang Xin, Nakamura Hideki	4. 巻 16
2. 論文標題 Left-Turn Lane Capacity Estimation based on the Vehicle Yielding Maneuver Model to Pedestrians at Signalized Intersections	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Sustainability	6. 最初と最後の頁 2313 ~ 2313
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/su16062313	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Wang Yifei
2. 発表標題 Influence of Vehicle Yielding Maneuver to Pedestrians on Capacity of Left-Turn Lane at Signalized Intersections
3. 学会等名 Proceeding of Infrastructure Planning
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Wang, Y., Zhang, X. and Nakamura, H.
2. 発表標題 Left-turn Lane Capacity Estimation based on the Vehicle Yielding Maneuver Model to Pedestrians at Signalized Intersections
3. 学会等名 World Conference on Transport Research (WCTR) (国際学会)
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------