

# 横断歩道での歩行者混雑状況最適化システム “POSE” の開発

若松和紀<sup>†</sup> 及川凜<sup>†</sup> 佐々木周<sup>†</sup> 杉浦茂樹<sup>††</sup>

本研究では、横断歩道における歩行者混雑の解消を目的に、歩行者モデルに基づく横断歩行者シミュレーションシステム「POSE (Pedestrians Optimization System for Efficiency)」を開発した。対象とする横断歩道は、東北学院大学法科大学院・総合研究棟前の横断歩道である。同横断歩道は、従来は信号機が設置されていなかったが、信号機設置後に横断歩行者の待ち時間増加および混雑が顕在化している。

二度の実地調査により取得した信号周期、歩行者数、歩行速度などのデータをもとに、現実の混雑状況を再現可能なシミュレーション環境を構築した。本シミュレーション環境を用いて、信号待ち時における歩行者の列数配置に着目し、列数の違いが通過人数や平均横断時間に与える影響を分析した。その結果、進行方向や歩行者流入特性によって、列数と平均横断時間の関係に差異が生じることを確認した。

## Development of “POSE”: Pedestrians Optimization System for Efficiency

Kazuki Wakamatsu<sup>†</sup>, Rin Oikawa<sup>†</sup>, Syu Sakaki<sup>†</sup>  
and Shigeki Sugiura<sup>††</sup>

This study aims to reduce pedestrian congestion at a signalized crosswalk.

A pedestrian simulation system named POSE (Pedestrians Optimization System for Efficiency) was developed based on a pedestrian behavior model. The target site is the crosswalk in front of the Law School and General Research Building at Tohoku Gakuin University. This crosswalk previously had no traffic signals. After the installation of traffic signals, pedestrian waiting time increased and congestion became apparent.

A simulation environment was constructed using data obtained from two field surveys,

including signal cycles, pedestrian volumes, and walking speeds. The developed simulation reproduces realistic congestion conditions at the crosswalk. The analysis focuses on the number of pedestrian queues during the signal waiting phase. The effects of different queue configurations the number of completed crossings and on average crossing time and were evaluated.

The results indicate that the relationship between queue configuration and average crossing time differs depending on walking direction and pedestrian inflow characteristics.

### 1. はじめに

本研究で対象とする東北学院大学 法科大学院・総合研究棟前の横断歩道は、従来は信号機が設置されておらず、横断歩行者の通行において大きな混雑は見られなかった。しかし、同横断歩道に歩行者用信号機が設置されたことにより、横断歩行者は信号待ちを伴う横断を強いられるようになった。

その結果、横断開始時には双方向から横断する横断歩行者同士の干渉が生じ、通行の円滑性が低下している。さらに、混雑緩和および危険回避のため警備員が常時配置される状況となっており、人的負担や運用面での課題も顕在化している。

横断歩道における混雑は、横断歩行者の多寡だけでなく、信号待ち時の横断歩行者の並び方や配置にも大きく影響されると考えられる。しかし、実環境において横断歩行者の並び方を系統的に変更し、その影響を定量的に分析することは困難である上、横断歩行者同士が衝突する危険性といった安全上の制約が伴う。このため、実環境における調査には多くの課題が存在する。

そこで本研究では、歩行者モデルに基づくシミュレーション環境を構築する。その後、シミュレーションを通して、横断歩道における信号待ち時の歩行者の列数配置に着目し、列数の違いが横断歩道を通過する人数および横断歩行者の横断時間に与える影響を分析する。

### 2. 関連研究

歩行者の行動をモデルで表現し、シミュレーションによって再現および分析する手法は、これまで広く研究されてきた。平井と西田 [1]は、歩行者の行動特性に着目し、前方推進力、反発力などの経験的事実に基づき、歩行者に作用する5つの外力を定義

<sup>†</sup> 東北学院大学教養学部情報科学科  
Department of Information Science, Faculty of Liberal Arts, Tohoku Gakuin University  
<sup>††</sup> 東北学院大学情報学部データサイエンス学科  
Department of Data Science, Faculty of Informatics, Tohoku Gakuin University

した歩行者モデルを提案している。Helbing と Molnár [2]は、歩行者の運動を「社会的な力 (Social Forces)」の作用で定義する歩行者モデルを提案している。このモデルでは、加速項、反発項、誘引効果などの複数の力を用いた運動方程式が採用されており、歩行者群集における自己組織化や集団的挙動を現実的に再現可能であることが示されている。歩行者モデルはその汎用性の高さから、現在に至るまで多くの歩行者シミュレーションに用いられている。

これらの先行研究は、群衆の中で歩行者がどのような行動選択をするかをシミュレーションを通して明らかにすることが主目的であり、モデルの妥当性や再現性の検証に重点が置かれている。一方で、表 1 のように、信号機付き横断歩道を対象に、信号待ち時における歩行者の並び方や列数配置といった運用面の要素が横断効率に与える影響を定量的に評価した研究は十分に行われていない。

本研究では歩行者モデルに基づくシミュレーション環境を構築するだけでなく、信号周期時間や壁の位置といった、実地調査に基づく条件設定のもとでシミュレーションを実行することによって、横断歩道における歩行者の列数配置が横断歩道を通過する人数および平均横断時間に与える影響を分析する。

表 1 本研究と既存研究の違い

	本研究	既存研究
歩行者モデルに基づいた行動選択の分析	○	○
歩行者モデルに基づいた横断歩道における横断効率の分析	○	×

### 3. 研究手法

本章では、本研究で実施した 2 つの研究手法について述べる。

本研究では、横断歩道における歩行者混雑の解消を目的に、歩行者モデルおよび歩行者横断条件に基づく横断歩行者シミュレーションシステム「POSE (Pedestrians Optimization System for Efficiency)」の開発と、東北学院大学 法科大学院・総合研究棟前の横断歩道における実地調査を並行して進めた。

実地調査により得られた信号周期、歩行者数、歩行速度などのデータをもとに POSE にて歩行者横断条件を設定し、シミュレーションを通して信号待ち歩行者の列数配置の違いが横断効率に与える影響を分析した。

3.1 節では POSE の開発手法について述べ、3.2 節ではシミュレーション条件設定に用いた実地調査の手法について述べる。

#### 3.1 POSE の開発手法

本研究における横断歩行者シミュレーションシステム「POSE」は、既存の歩行者モデルを基盤としたプロトタイプ版を構築した上で、横断効率の分析に必要な機能を段階的に拡張する構成を採用した。

本節では、開発環境と参考とする歩行者モデル、POSE のプロトタイプ版および完成版の開発について述べる。

##### (1) 開発環境

本システムの開発環境は、開発言語に Python を用い、数値計算に NumPy、データ処理に pandas、アニメーションに Matplotlib を使用した。また、JupyterLab 上でシミュレーションを実行する形式を採用した。

##### (2) 参考とする歩行者モデル

POSE における歩行者モデルは、平井・西田 [1] および Helbing・Molnár [2] によって提案された歩行者モデルを参考とする。これらの先行研究では、歩行者の行動を力学的視点から捉え、前方に進む力、他の歩行者や壁から受ける反発力などを通して、歩行者の心理状態をモデル化している。

##### (3) クラスの構成

POSE のプログラムは、オブジェクト指向に基づき、クラスを用いた構成で構築する。クラスの役割およびクラス間の関係を図 1 に示す。

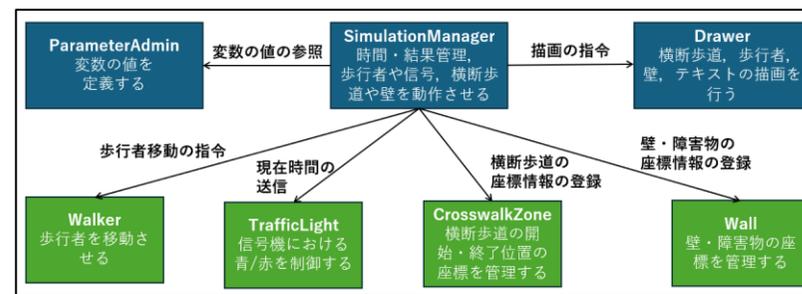


図 1 クラスの役割およびクラス間の関係

##### (4) プロトタイプ版の開発

開発初期段階では、平井・西田 [1]および Helbing・Molnár [2]の先行研究の歩行者モデルを参考に、前方推進、他の歩行者や壁からの回避、目的地への移動といった基

本的な要素を実装したプロトタイプ版を構築した。

### (5) 完成版の開発

プロトタイプ版の完成後、横断歩道における歩行者混雑の分析を可能とするため、完成版の開発に移行し、列数配置設定や混雑指標の算出など、歩行者混雑の分析に必要な追加機能の実装を段階的に追加した。完成版において追加した主な機能を表 2 に示す。

表 2 POSE 完成版の追加機能の実装計画表

スケジュール	開発内容
11/18~11/24	横断歩道を渡り切った人数のカウント
11/25~12/01	歩行者の目的地設定・目的地に向かう
12/02~12/08	歩行者の信号待ち・青点減時に急ぐ
12/09~12/15	混雑度指標の追加、アニメーション表示
12/16~12/22	実地情報を外部ファイルから読み込める
12/23~12/28	検証結果を外部ファイルに出力

### 3.2 実地調査の手法

POSE によるシミュレーションに実際の横断歩道における歩行者流動特性を反映させるため、東北学院大学 法科大学院・総合研究棟前の横断歩道（以下：対象横断歩道）において実地調査を実施した。

実地調査では、信号周期および歩行者の人流および行動特性に関するデータを取得し、シミュレーション条件の設定および分析対象時間帯の決定に用いた。

本節では、信号周期の調査手法と、歩行者流動に関する調査手法について述べる。

#### (1) 信号周期に関する調査

シミュレーションを行うにあたり、実際の横断歩道の状況を可能な限り再現するためには、実際に運用されている信号周期のデータが不可欠である。信号周期は歩行者の滞留人数や混雑状況に影響を与える要因であり、モデル構築において重要な入力データとなる。

調査手法は、調査時間帯を 7:00, 8:00, 16:00, 20:00 の 4 つの時間帯に設定し、各時間帯において、複数名の調査メンバーがストップウォッチ機能を用いて手動で信号周期の計測を行った。計測対象は歩行者信号の青信号時間、青信号点減時間、赤信号時間とし、同一時間帯につき 3 回計測を行い、その平均値を信号周期に採用した。

#### (2) 歩行者流動に関する実地調査

シミュレーションにおいて実際の混雑状況を再現するためには、横断歩道を利用す

る歩行者の流動データが不可欠である。本研究では、シミュレーションで使用する時間帯を決定する目的で、対象横断歩道において歩行者流動に関する実地調査を行った。

調査手法は、カウンターを用いた目視計測により実施した。

調査項目は、駐輪場側での信号待ち人数および列数、法科大学院側の信号待ち人数および列数、分岐先が 2 通りある法科大学院側への流出人数のうち法科大学院方向への流出確率、信号点減時に走行する歩行者の確率、歩きスマートフォンを行う歩行者の確率の 5 項目を調査した。信号点減時に走行する歩行者の確率および歩きスマートフォンを行う歩行者の確率は、駐輪場側から法科大学院側へ流出する歩行者を対象に調査する。

## 4. POSE シミュレーション構築

### (1) プロトタイプ版の構築

POSE における歩行者モデルは、平井・西田 [1]および Helbing・Molnár [2]によって提案された歩行者モデルを参考に構築している。本研究ではプロトタイプ版の構築にあたって、平井・西田 [1]において定義されている歩行者に働く 5 つの外力のうち、反発力  $F_{bi}$ 、他個体回避力  $F_{ci}$ 、壁からの反発力  $F_{di}$ 、目標に向かう力  $F_{ei}$  を基本に採用した。一方、前方推進力  $F_{ai}$  については時間経過で値が過大となるため、シミュレーション上で挙動が不安定となる問題が確認された。そのため、前方推進力については Helbing・Molnár [2]による目標速度への収束力  $F_{\alpha}^0$  を導入し、歩行者が目的地に向かって安定するモデルとした。

### (2) 完成版の構築

プロトタイプ版の構築後、本研究では横断効率の分析に必要な機能を段階的に拡張し、POSE 完成版の開発を行った。完成版において追加した機能を表 2 に示す。

まず、横断歩道を渡り切った歩行者の人数をカウントする機能を実装し、横断効率を定量的に評価可能とした。

次に、各歩行者に対して目的地を設定し、目的地へ確実に向かうことができるように移動する挙動を導入した。この段階で、歩行者同士や壁との回避行動により進行方向から逸脱する現象が顕在化したため、目的地への復帰を促すための復元力  $R_i$  を新規導入した。

復元力  $R_i$  は、歩行者が目的地から離れる方向に移動した場合に、進行方向成分を弱め、目的地方向への復帰を促すための係数で定義される。具体的には、歩行者に働く 5 つの外力を合成した後の歩行者位置と目的地との距離  $d_i^{next}$  が、現在の距離  $d_i^{current}$  より大きくなった場合に復元力を作用させる。復元力は距離に応じた単調増加関数  $f(d_i^{next})$  を用いて式(1)のように定義し、5 つの外力の合力に乗算することで歩行者の

運動に反映させた。この復元力 $R_i$ により、目的地からの逸脱が大きいほど進行が抑制され、目的地へ安定して向かう挙動を確認した。

$$R_i = 1 - f(d_i^{next}) \quad (1)$$

その後、信号点減時に歩行者が急ぐ状態を実装した。実装にあたっては、歩行者の平均速度を採用するため、Brown ら [3]の先行研究を参考に、歩行者の通常速度を5.19[km/h]、急ぎ歩きの速度を6.26[km/h]と設定した。

さらに、混雑状況を可視化するための混雑度指標を追加した。混雑度指標は一般人でも分かりやすいものとする観点から、歩行者が横断歩道を渡りきる平均時間（以下：平均横断時間）を採用した。

実地調査によって得られた歩行者数や信号周期などの条件は、POSE のプログラムコードからの変更から csv ファイルから読み込む形式に変更し、異なる条件下でのシミュレーションを容易にした。

最後に、平均横断時間や通過人数などのシミュレーション結果を csv ファイルへ出力する機能を実装し、追加機能の実装とともに統計的分析が可能な完成版を構築した。

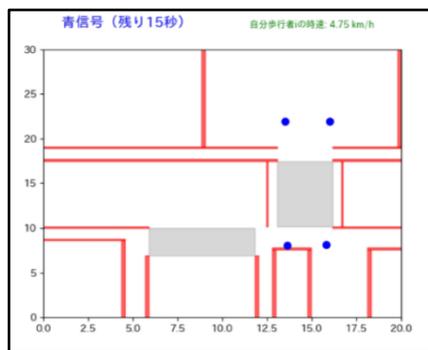


図 2 POSE プロトタイプ版の実行画面

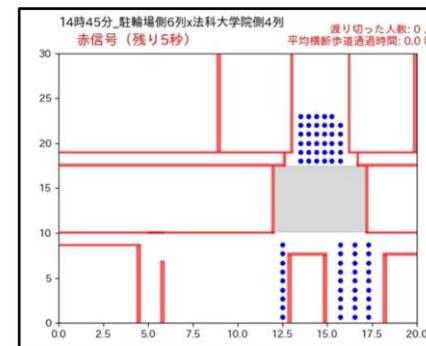


図 3 POSE 完成版の実行画面

## 5. 実地調査の結果

### 5.1 信号周期に関する調査結果

対象横断歩道における歩行者信号の信号周期を把握するため、実地調査により3つの時間帯で信号周期の計測を行った。調査により得られた信号周期の結果を表3に示す。

表 3 調査した対象横断歩道の信号周期 (単位: 秒)

特定時間帯における信号周期の調査結果 (秒)			
信号状態	青信号	青信号点減	赤信号
時間帯			
7:00	18	4	68
8:00	44	4	75
16:00	46	4	76
20:00	18	4	68

表3より、時間帯によって歩行者信号の青信号の時間が変化していることが確認された。この結果から、正確な信号周期を得るため宮城県警察へ開示請求を行った。開示請求により得られた信号周期を表4、信号周期の時刻による変化を表5に示す。

表 4 開示請求で得られた対象横断歩道の信号周期 (単位: 秒)

開示請求で得られた対象横断歩道の信号周期 (秒)				
パターン番号	パターン1	パターン2	パターン3	パターン4
信号状態				
青信号	15	18	45	45
青信号点滅	4	4	4	4
赤信号	51	68	76	76

表 5 開示請求で得られた信号周期の時刻による変化

平日におけるパターン変更 時刻とパターン番号	
時刻	パターン番号
8:00	3
9:00	2
10:00	4
10:45	2
12:15	4
12:45	2
14:30	4
15:00	2
16:30	4
17:00	2

表 4 および表 5 の結果より、対象横断歩道のパターンが 4 つ存在し、学生の通学が集中する時間帯において、対象横断歩道の歩行者信号における青信号時間が長く設定されていることが明らかになった。

### 5.2 歩行者流動に関する調査結果

歩行者流動に関する調査は、信号周期に関する開示請求データを踏まえ、以下の時間帯および日程で実施した。

- ・ 12月16日(火) 10:00, 12:15
- ・ 12月16日(火) 14:30
- ・ 12月17日(水) 16:30, 17:00
- ・ 12月23日(火) 14:30, 14:45 (法科大学院側から駐輪場側への歩行者のみ実施)

各時間帯において、駐輪場側と法科大学院側を結ぶ歩行者用信号機が青信号から赤信号に切り替わるまでを 1 回と定義し、それぞれ 3 回ずつ調査を行った。

14:30 の調査では、法科大学院側の流出人数のうち追加で到着した歩行者数について、調査日の 14:45 ごろに発生した法科大学院側の混雑により正確な計測が困難となったため、別日に 14:45 の調査を法科大学院側の歩行者に限定して追加で実施した。本時間帯に限り、信号点滅時に走行する歩行者の確率および歩きスマートフォンを行う歩行者の確率は法科大学院側の歩行者を参照する。調査結果を表 6 に示す。

表 6 実地調査による人流結果

実地調査 第二段階 結果	10:00	12:15	14:30	14:45	16:30	17:00
駐輪場側の横断流入人数(人)	9.33	22.33	38.66		49.66	3.00
うち追加で来た歩行者数(人)	4.66	14.66	3.00		10.33	0.66
駐輪場側の信号待ち列数(列)	2~4	5~6	5~6		5~6	2~3
法科大学院側の横断流入人数(人)	0.33	9.66	13	57.33	26.33	9.33
うち追加で来た歩行者数(人)	0.33	4.66	5.33	20.33	6.00	2.66
法科大学院側の信号待ち列数(列)	1	4	1~4	5	3~4	4~5
法科大学院の校舎に入っていく人数(人)	9.33	12.00	34.00		37.66	1.33
法科大学院の校舎に入っていく確率(%)	<b>100.0%</b>	<b>53.7%</b>	<b>87.9%</b>		<b>75.8%</b>	<b>44.3%</b>
走って横断した人数(人)	0.00	0.33	2.00	2.00	1.00	0
走って横断する確率(%)	<b>0.0%</b>	<b>1.4%</b>	<b>5.1%</b>	<b>3.4%</b>	<b>2.0%</b>	<b>0.0%</b>
歩きスマホをしながら横断した人数(人)	0.66	0.00	1.00	1.00	7.66	0
歩きスマホをしながら横断する確率(%)	<b>7.0%</b>	<b>0.0%</b>	<b>2.5%</b>	<b>1.7%</b>	<b>15.4%</b>	<b>0.0%</b>

表 6 の結果を東北学院大学の授業時程と照らし合わせたところ、講義開始前の時間帯では駐輪場側において混雑が発生し、講義終了後の時間帯では法科大学院側において混雑が発生する傾向が確認された。

また、信号点滅時に走行する歩行者および横断中にスマートフォンを使用するといった特徴的な歩行者について、14:30 および 14:45 の調査では、他の時間帯と比較して走行して横断する歩行者の割合が高い傾向が確認された。一方、16:30 の調査では、歩行中にスマートフォンを使用する歩行者の割合が高い傾向が確認された。

これらの結果から、特徴的な歩行者行動の発生頻度は、大学の講義開始および終了時間と密接に関係している可能性があることが示唆された。

## 6. シミュレーションの結果と歩行者列数評価

本章では、開発した POSE を用いて実施したシミュレーション結果を示し、横断歩道における歩行者の列数配置が横断効率に与える影響を分析および評価する。

実地調査に基づいて設定した複数の時間帯および歩行者流入条件のもとでシミュレーションを行い、列数配置の違いによる通過人数および平均横断時間の変化を比較する。

まず 6.1 節では、シミュレーション条件および歩行者流動の評価方法を決定する。次に 6.2 節では、シミュレーションの結果から歩行者列数の変化が横断歩道を通過する人数および横断歩行者の横断時間に与える影響を定量的に評価する。

### 6.1 シミュレーション条件および評価方法

シミュレーション実施においては、実地調査で確認された歩行者流動を再現し、多角的な評価を行う必要がある。そのため、本研究ではシミュレーション実施前に、対象時間帯と歩行者条件、歩行者の初期配置位置、試行回数および評価指標を決定した。

対象時間帯および歩行者条件設定では、実地調査により歩行者混雑の特徴が確認された 14:30、14:45、16:30 の 3 つの時間帯を対象にシミュレーションを実施した。各時間帯において、駐輪場側および法科大学院側それぞれの信号待ち領域における歩行者の列数、信号待ち人数、追加歩行者人数、歩きスマートフォンを行う歩行者および信号点滅時に走行する歩行者の確率を設定した。時間帯ごとの設定項目と設定値を、表 7 に示す。

表 7 時間帯ごとの設定項目と設定値

時間帯ごとの設定項目と設定値								
時間帯	駐輪場側待機人数 (人)	駐輪場側追加人数 (人)	駐輪場側列数 (列)	法科大学院側待機人数 (人)	法科大学院側追加人数 (人)	法科大学院側列数 (列)	歩きスマホ確率	点滅時走る確率
14:30	35	3	2~6	8	5	2~5	0.025	0.051
14:45	35	3	2~6	37	20	2~5	0.028	0.034
16:30	39	10	2~6	7	2	2~5	0.154	0.020

歩行者の初期配置位置では、各信号待ち領域の横幅を「列数+1」に等分し、分割点

のうち 1 列目から列数番目の位置に歩行者を配置する方法を採用した。この配置方法により、列数の違いによる横方向の密度変化にかかわらず、均等な間隔で歩行者を配置することができる。

シミュレーションでは、確率的要因による結果のばらつきを考慮し、各条件について試行回数を 3 回に設定し、平均値および標準偏差を算出した。

評価指標には、横断歩道通過人数と歩行者の平均した横断時間（以下：平均横断時間）の 2 項目を用い、各指標について平均値および標準偏差を求めた。さらに、平均横断時間については、平均値を散布図にプロットすることによって相関分析を行った。

また、非混雑状態の基準値は、歩行者 1 名のみが横断する条件における平均横断時間（以下：単独歩行者横断時間）と設定し、実地調査で得られた各時間帯の条件下で実施した全パターンのシミュレーション結果から算出した平均横断時間の平均値（以下：時間帯内平均横断時間）、およびその時間帯において平均横断時間が最短となった歩行者列数の組み合わせの平均横断時間（以下：最良平均横断時間）と比較した。

これらの比較により、列数配置の違いが横断効率に与える影響を評価した。

### 6.2 シミュレーション結果

決定したシミュレーション条件をもとに、POSE のシミュレーションにて、時間帯ごとに駐輪場側および法科大学院側の列数配置を変化させ、平均横断歩道通過人数と歩行者の平均横断時間を算出した。表 8 に平均横断歩道通過人数、表 9 に 3 つの時間帯の列数配置と平均横断時間を示す。

表 8 平均横断歩道通過人数

14:30のシミュレーション結果 平均横断歩道通過人数 (人)					14:45のシミュレーション結果 平均横断歩道通過人数 (人)					16:30のシミュレーション結果 平均横断歩道通過人数 (人)				
法科大学院側列数	2	3	4	5	法科大学院側列数	2	3	4	5	法科大学院側列数	2	3	4	5
駐輪場側列数	2	3	4	5	駐輪場側列数	2	3	4	5	駐輪場側列数	2	3	4	5
2	52	52	52	52	2	96	96	96	96	2	63	63	63	63
3	52	52	52	52	3	96	96	96	96	3	63	63	63	63
4	52	52	52	52	4	96	96	96	96	4	63	63	63	63
5	52	52	52	52	5	96	96	96	96	5	63	63	63	63
6	52	52	52	52	6	96	96	96	96	6	63	63	63	63

表 9 3つの時間帯の列数配置と平均横断時間

14:30のシミュレーション結果 平均横断時間 (秒)						14:45のシミュレーション結果 平均横断時間 (秒)						16:30のシミュレーション結果 平均横断時間 (秒)					
法科大学院側列数	2	3	4	5	平均値	法科大学院側列数	2	3	4	5	平均値	法科大学院側列数	2	3	4	5	平均値
駐輪場側列数	2	3	4	5		駐輪場側列数	2	3	4	5		駐輪場側列数	2	3	4	5	
	8.161	8.202	8.446	8.235	8.261		8.940	8.521	8.521	8.782	8.691		8.037	8.043	8.198	7.916	8.048
	8.013	8.287	8.096	8.143	8.132		8.820	8.522	8.616	8.576	8.633		7.931	7.965	7.882	7.932	7.927
	7.935	7.928	8.136	8.117	8.029		8.453	8.424	8.563	8.741	8.545		7.925	7.998	7.857	8.031	7.952
	8.041	8.009	8.039	8.234	8.080		8.644	8.832	8.490	8.668	8.658		7.839	7.912	7.876	7.686	7.828
	7.810	7.890	8.019	8.040	7.939		8.433	8.592	8.302	8.574	8.475		7.722	7.785	7.660	7.869	7.759
平均値	7.992	8.063	8.145	8.153	8.088	平均値	8.658	8.578	8.498	8.668	8.600	平均値	7.890	7.940	7.894	7.886	7.903

これらの結果をもとに、次に列数配置と平均横断時間の関係について相関分析を行った。その結果を図4から図6に示す。

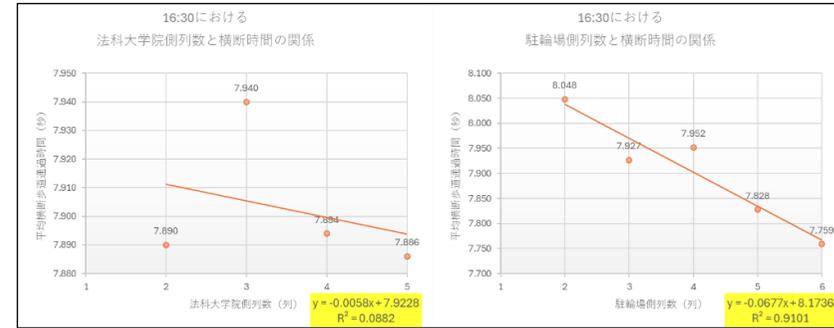


図 6 16:30における列数配置と平均横断時間の関係

次に、歩行者1名のみが横断する単独歩行者横断時間のシミュレーションを行った。その結果は7.300[秒]となった。この値を単独歩行者横断時間と定義し、時間帯内平均横断時間と最良平均横断時間を比較を行った。

比較方法の指標には「改善率[%]」を用いた。本指標は、時間帯内平均横断時間の単独歩行者横断時間からの増加時間に対して、最良平均横断時間の単独歩行者横断時間からの増加時間がどの程度抑制されているかを表す尺度である。改善率は式(2)のように定義される。

$$100 \times \left( 1 - \frac{\text{最良平均横断時間} - \text{単独歩行者横断時間}}{\text{時間帯内平均横断時間} - \text{単独歩行者横断時間}} \right) [\%] \quad (2)$$

改善率を用いて算出された各時間帯における改善度を表10に示す。

表 10 単独歩行者横断時間

単独歩行者横断時間 7.300[秒] に対する改善度				
	最良平均横断時間 (秒)	時間帯内平均横断時間 (秒)	改善時間 (秒)	改善率 (%)
14:30	7.810	8.088	0.278	35.27
14:45	8.302	8.600	0.298	22.92
16:30	7.660	7.903	0.243	40.29

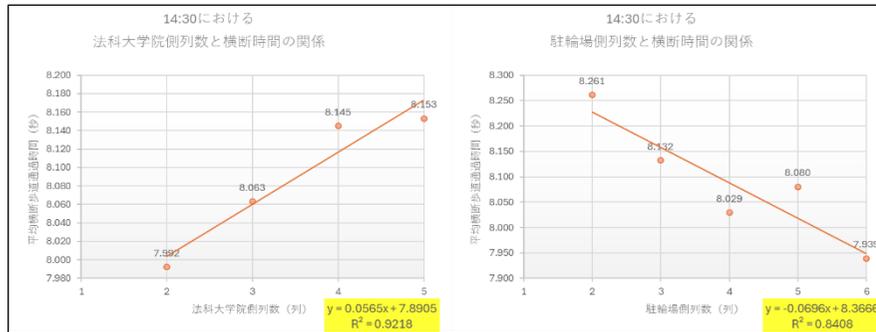


図 4 14:30における列数配置と平均横断時間の関係

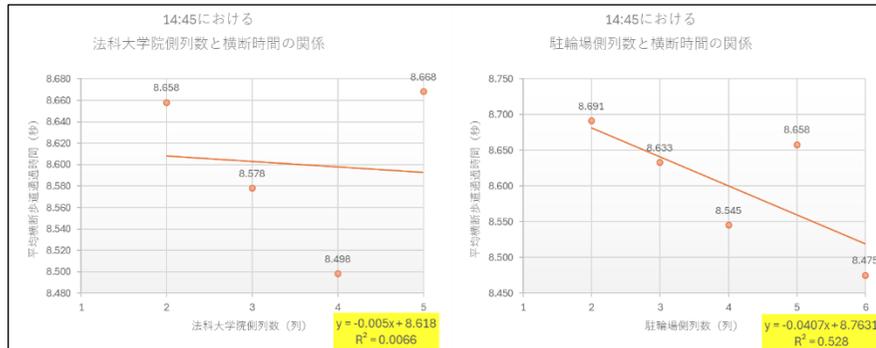


図 5 14:45における列数配置と平均横断時間の関係

### 6.3 シミュレーション結果の考察

シミュレーション結果をもとに、列数配置が歩行者の横断効率に与える影響について、列数配置と平均横断時間の関係および単独歩行者横断時間を基準にした改善率に着目する。

列数配置と平均横断時間の関係について、図4から図6に示した散布図より、いずれの時間帯においても、駐輪場側の列数を増やすことで平均横断時間が短縮される傾向が確認された。特に14:30および16:30の時間帯では、駐輪場側の歩行者の列数配置と平均横断時間の間に強い相関が見られ、列数の増加に伴い平均横断時間が系統的に改善する結果となった。これは、駐輪場側において歩行者密度を分散されることで、歩行者の回避行動回数が減少し、横断動線が安定したためであると考えられる。

次に、単独歩行者横断時間7.300[秒]を非混雑状態の基準に設定し、時間帯内平均横断時間と最良平均横断時間を改善率により比較した。表10の結果から、時間帯内平均横断時間と比較して、最良平均横断時間は22.92[%]から40.29[%]の改善が得られていることが確認された。このことから、混雑時の列数配置の適切な選択は、非混雑状態の横断時間に近づけることが可能であると考えられる。

以上より、POSEを用いたシミュレーション結果から、駐輪場側の列数を増加させる配置が横断効率の向上に寄与し、平均横断時間を非混雑状態に大幅に近づける効果が存在することが示された。この結果は、自動車交通において、車線数の増加が渋滞の緩和および解消につながると報告されている先行事例 [4][5]と同様の傾向であり、歩行者横断において列数管理が混雑緩和策で有効に機能する可能性を示唆している。

## 7. まとめ

本研究では、横断歩道における歩行者混雑の解消を目的に、歩行者モデルに基づく横断歩行者シミュレーションシステム「POSE (Pedestrians Optimization System for Efficiency)」を開発した。その後、シミュレーションを通して、横断歩道における信号待ち時の歩行者の列数配置に着目し、列数の違いが横断歩道を通過する人数および横断歩行者の横断時間に与える影響を分析した。

その結果、駐輪場側の歩行者列数を増加させる配置により、平均横断時間が短縮される傾向が確認された。駐輪場側の列数配置と平均横断時間の間に強い相関が見られ、列数配置の違いが横断効率に大きく影響することが示された。また、単独歩行者横断時間を非混雑状態の基準に設定した改善率の評価により、最適な列数配置を選択することで、時間帯内平均横断時間と比較して大幅な改善が得られることが示された。これにより、列数配置による歩行者横断時間短縮および混雑緩和の可能性を定量的に

示すことができた。

今後の展望に、POSEの機能拡張と統計的分析の強化が挙げられる。POSEの機能拡張には、自転車に乗り横断する歩行者などの特徴的な歩行者のパターンの追加導入や、歩行者の横断完了までの他歩行者回避回数の指標導入のような、横断中に生じる干渉や滞留の発生要因の詳細化が考えられる。統計的分析には、14:30における法科大学院側の列数配置と平均横断時間の間に強い相関が見られた要因について、歩行者滞留構造に着目した分析が考えられる。また、他の横断歩道を対象としたシミュレーションを通して、POSEの汎用性を検証することも今後の課題である。

これらの拡張により、POSEは実環境に即した歩行者混雑の解消に向けた対策の検討を支援するシミュレーション基盤へと発展することが期待される。

## 参考文献

- 1) 平井 一正, 西田 素之, 歩行者の行動モデルとシミュレーション, 人間工学, 13 巻, 5 号, p. 185-188 (1977)  
[https://www.jstage.jst.go.jp/article/jje1965/13/5/13\\_5\\_185/\\_pdf/-char/ja](https://www.jstage.jst.go.jp/article/jje1965/13/5/13_5_185/_pdf/-char/ja)
- 2) Helbing, D. & Molnár, P. Social force model for pedestrian dynamics. Physical Review E, Vol. 51, No. 5, pp. 4282–4286(1995)  
[https://www.researchgate.net/publication/333893439\\_Social\\_force\\_model\\_for\\_pedestrian\\_dynamics](https://www.researchgate.net/publication/333893439_Social_force_model_for_pedestrian_dynamics)
- 3) Brown KC, Hanson HM, Firmani F, Liu D, McAllister MM, Merali K, Puyat JH, Ashe MC. Gait Speed and Variability for Usual Pace and Pedestrian Crossing Conditions in Older Adults Using the GAITRite Walkway. Gerontol Geriatr Med. 2015 Dec 4;1:2333721415618858. doi: 10.1177/2333721415618858. PMID: 28138480; PMCID: PMC5119883.  
<https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC5119883>
- 4) 谷口雄一郎, 高速道路における渋滞対策～混雑等に応じた柔軟な料金体系の実現に向けて～, 令和6年度 第1回 新道路研究会, p. 4, 令和6年1月25日(2024)  
<https://www.jice.or.jp/cms/kokudo/pdf/reports/autonomy/roads/02/2024/siryo1.pdf>
- 5) 岐阜県, 4車線化で渋滞解消, 2008 道路整備効果事例集, データまとめ 平成20年(2008)  
<https://www.mlit.go.jp/road/koka8/4/4-11.html>