

パーソナルスペースを用いた歩行者モデルによる曲がり角の通路設計

西元 隆雄¹・大枝 良直²・外井 哲志³

¹学生会員 九州大学大学院 工学府 都市環境システム工学専攻 (〒819-0395 福岡市西区元岡744)

E-mail: notsyosyapp@gmail.com

²正会員 九州大学大学院 工学研究院環境社会部門 (〒819-0395 福岡市西区元岡744)

E-mail: oeda@civil.doc.kyushu-u.ac.jp

³正会員 九州大学大学院 工学研究院環境社会部門 (〒819-0395 福岡市西区元岡744)

E-mail: toi@civil.doc.kyushu-u.ac.jp

歩行者流動は式で表すことが困難なため、通路の設計に際してはシミュレーションで仮想的に再現する手法が多く取られている。現在では歩行者シミュレーションとして様々なものが提案されているが、本研究では今まで構築してきた、歩行者相互の影響を考慮できるパーソナルスペースを用いた歩行者モデルを使用した。以前はこのシミュレーションモデルでは曲がり方が定義されていなかったため、曲がり角などのシミュレーションを行うことができなかった。そこで本研究では歩行者の曲がりモデルを定め、「L字路」「T字路」「十字路」の通路についてシミュレーションを行い、通路型によって通路幅と歩行者を流す能力の関係が異なることを明らかにした。

Key Words: Pedestrian Simulation, Personal Space, Street Corner, Passage Design, Pedestrian Flow

1. 研究の背景と目的

近年、死傷者が出た群集事故として、平成 13 年の「明石花火大会歩道橋事故」や平成 28 年の「メナー群集事故」が挙げられる。こうした群集事故を繰り返さないためには、適切な歩行空間の設計が必要とされる。歩行空間の設計のためには、歩行者の挙動とそれに伴って生じる群衆流について知ることが必要であるが、群衆流の実測や定量化は複雑なため困難である。そのため、通路設計などの際に、仮想的に歩行者の挙動を再現する手段として、コンピューターシミュレーションが多く用いられる。現在では歩行者シミュレーションモデルとして一次元モデルやセルオートマトンモデルなど、様々なものが提案されているが¹⁾²⁾³⁾⁴⁾⁵⁾、本研究では空間を分割せず、歩行者相互の影響を考慮できるパーソナルスペース(以下 PS)を用いたシミュレーションモデルを用いる。

現在まで構築してきた PS を用いたシミュレーションでは、曲がり方が定義されておらず、直線通路や交差点に対して歩行者が真っ直ぐ進むことしかできない状況など、限定された範囲でしかシミュレーションを適用できなかった。それを踏まえて、本研究では過去の研究⁶⁾で定義した曲がり方モデルをシミュレーションに組み込み、

曲がり角の通路設計について活かしていくことを考察していく。

2. PS とシミュレーションモデル

(1) PS の定義

このシミュレーションに用いている PS とは、歩行者が他者とある程度の距離を維持しながら歩行することを定義するために想定された目に見えない空間のことである。これは図-1 に示したように、歩行者の進行方向である前方に長く、後方に短い卵型の領域であると仮定している。図-1 に示した前方の軸である長軸 a と後方の軸である短軸 b は先行研究である劉⁷⁾の論文より引用し、その値を表-1 にまとめた。ただし、シミュレーション上では短軸長は結果に大きな影響は与えないものとして、一律で 0.45m としている。

(2) シミュレーションモデル

本研究で用いているシミュレーションでは、前節で述べた PS という他者をどの範囲まで許容するかを定義し、その領域への干渉の程度によって各歩行者が回避行動や

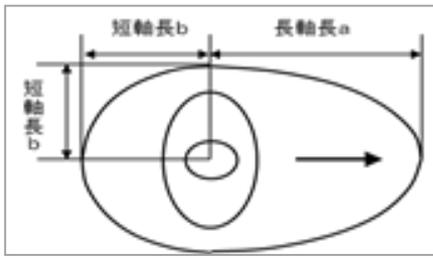


図-1 PSの概略図

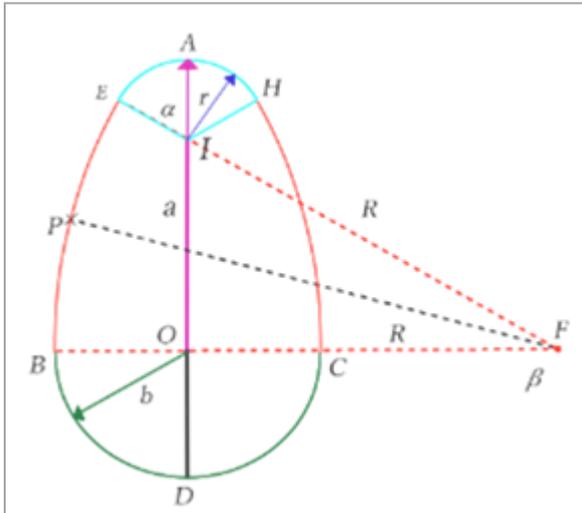


図-2 PSの作図

表-1 長軸長, 短軸長のまとめ

障害物対象	長軸(m)	短軸(m)	軸長の最小値(m)
対向者間	3	0.42	0.2
同方向者間	1.9-前の歩行者の短軸	0.41	0.2
柱	2.9	0.5	0.2
交差	1.9		0.2

追い越し行動を取る。この節では、シミュレーションに組み込む際に用いる PS を規定するための数式や最適経路を選択するためのアルゴリズムについて述べていく。

a) PSの作図

図-1 に示したような、楕円形のまま PS の接触計算をさせようとする、非常に複雑になってしまう。そのため、本研究で用いているシミュレーションでは、この楕円形状を 4つの円弧に区分して表現することで、接触判定を容易に行えるようにしている。図-2 に PS を円弧で区分した形で作図した様子を示す。

式(1a) ~ (1i) を用いて作図を行っていく。まず、長軸長 a と短軸長 b の PS を持つ歩行者 O を中心として、半径 b で円弧 BDC を描く。そして形状に関する方程式を用いて、点 I を中心として半径 r、角度 2α の円弧 EAH を描く。続いて、点 F を中心として半径 R、角度 β で円弧 BE を描く。最後に、点 F について、中心 O に対称な

点 G を中心に半径 R、角度 β で円弧 CH を描く。以上に述べた 4 つの円弧を組み合わせることで PS を表現している。

$$\overline{OA} = a, \overline{OB} = b \tag{1a}$$

$$e = \sqrt{a^2 + b^2} \tag{1b}$$

$$d = a - b \tag{1c}$$

$$r = \frac{e(e-d)}{2a} \tag{1d}$$

$$\overline{OI} = a - r = a - \overline{IA} \tag{1e}$$

$$\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{\overline{OF}}{\overline{OI}}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{a}{b}\right) \tag{1f}$$

$$R = \frac{e(e+d)}{2b} \tag{1g}$$

$$\overline{OF} = \overline{OG} = R - b \tag{1h}$$

$$\beta = \tan^{-1}\left(\frac{\overline{OI}}{\overline{OF}}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{b}{a}\right) \tag{1i}$$

b) 歩行速度の決定

歩行者は長軸長が最大の時は自由歩行速度で歩き、長軸長の短縮の程度によって歩行速度は落ち、長軸長が最小値になると静止するとしている。対向者間を対象としたときの歩行速度 V_{walk} は以下の式(2a) ~ (2c) で定義している。

$$V_{walk} [m/sec] = 1.84 \times \text{長軸長}(m) - 0.6 \tag{2a}$$

(長軸長 < 0.9m)

$$V_{walk} [m/sec] = 0.096 \times \text{長軸長}(m) + 0.97 \tag{2b}$$

(0.9m ≤ 長軸長 < 3m)

$$V_{walk} [m/sec] = 1.26 \tag{2c}$$

(3m ≤ 長軸長)

c) 経路選択アルゴリズム

歩行者は自身の PS 内に他者や障害物が存在すると、不快感などにより、回避行動を取る。その際に歩行者は進行方向を変えるか、自身の PS を短縮することで対応する。

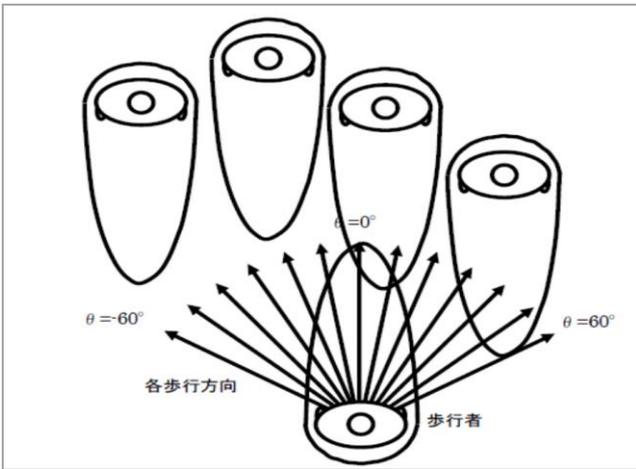


図-3 視野範囲内での歩行行動

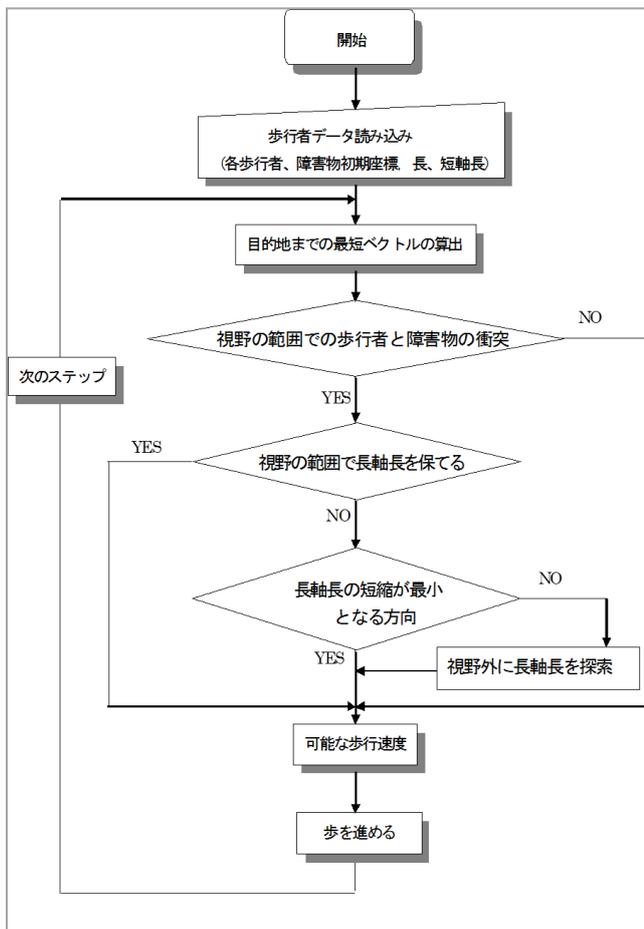


図-4 経路選択フローチャート

まず歩行者には目的地に向かって最短ベクトルを与え、長軸の値に応じた歩行速度を与える。その後、歩行させ他者の PS に接触するならば、視野の範囲内で長軸長が維持できる方向を探し、存在する場合その方向に歩行させる。視野の範囲は 120° とし、シミュレーション上での角度の刻みは 10° としている。この様子を図-3 に示す。

もし視野の範囲内で長軸長が維持できない場合、長軸

長を短縮させる。その際に選択する経路方向は、長軸長の短縮が最小になる方向とし、もし複数の経路が存在する場合は角度変化が最小の方向を選ぶ。長軸長の短縮に応じて短軸長も線形的に短縮させるようにする。短縮する際の単位短縮長さは 20cm としている。また長軸・短軸ともに短縮限界は、人体の寸法を参考にし 20cm としている。さらに、視野内で各方向に対して短縮限界の軸長の PS しか採択できない場合は視野外についても探索する。視野外の探索範囲は 180° としている。以上の経路選択のフローチャートを図-4 に示す。

3. 歩行者の曲がり方の定義

曲がり角の通路設計を考える上では、歩行者がどのように曲がるのかを定義し、シミュレーションに組み込む必要がある。よってこの章では歩行者の曲がり方を定義し、定式化することについて述べていく。

歩行者の曲がりの過程は、まずある地点から曲がり始め、曲がり角や壁からある距離を保ちながら、ある地点まで曲がり続ける。この曲がりの過程を単純化し、定式化するために、いくつかの段階に分けることにする。

図-5 にその概略図を示した。まず連続する曲がりの過程を、「曲がり始め」「曲がり角始点」「曲がり角終点」「曲がり終わりの点」の4つの点によって区切る。その各々の点を結ぶことによって、単純化した曲がりの軌道を表示する。

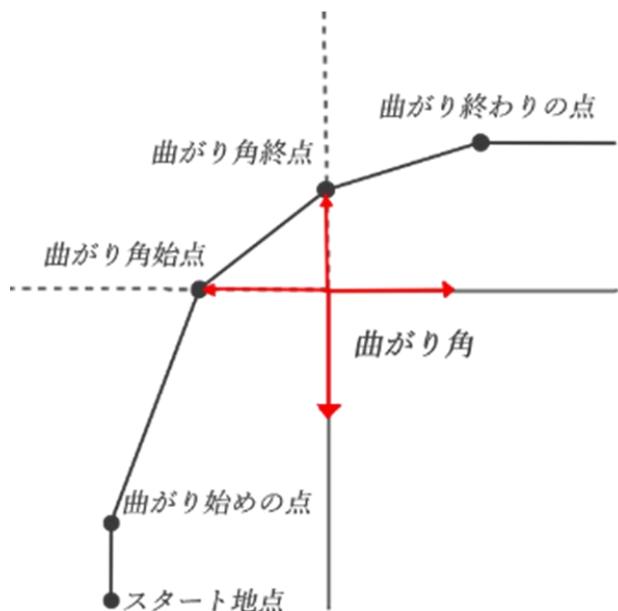


図-5 曲がり方モデルの概略

表-2 各点の相関係数

	スタート	曲がり始め	曲がり角始点	曲がり角終点	曲がり終わり(縦)	曲がり終わり(横)	曲がり終わり差
スタート	1.00						
曲がり始め	0.65	1.00					
曲がり角始点	0.68	0.32	1.00				
曲がり角終点	0.10	0.03	0.49	1.00			
曲がり終わり(縦)	0.06	0.05	0.26	0.76	1.00		
曲がり終わり(横)	-0.09	0.02	-0.06	0.24	0.66	1.00	
曲がり終わり差	-0.03	0.04	-0.16	0.02	0.66	0.75	1.00

表-3 各点座標の近似直線式

Y[cm]	X[cm]	近似直線式
曲がり始め(Y ₁)	スタート(X ₁)	$Y_1 = 1.5769X_1 - 97.9$
曲がり角始点(Y ₂)	スタート(X ₂)	$Y_2 = 0.2422X_2 + 90.556$
曲がり角終点(Y ₃)	曲がり角始点(X ₃)	$Y_3 = 0.3246X_3 + 82.857$
曲がり終わり(縦)(Y ₄)	曲がり角終点(X ₄)	$Y_4 = 1.0178X_4 + 50.078$
曲がり終わり(横)(Y ₅)	曲がり終わり差(X ₅)	$Y_5 = 2.3174X_5 + 74.168$

表-4 各点座標の分散の近似直線式

Y[cm]	X[cm]	近似直線式	分散の最小値
曲がり角始点の分散(Y ₁)	スタート(X ₁)	$Y_1 = 3.9248X_1 + 306.52$	440.82
曲がり角終点の分散(Y ₂)	曲がり角始点(X ₂)	$Y_2 = -5.1678X_2 + 1977.8$	615.23
曲がり終わり(縦)の分散(Y ₃)	曲がり角終点(X ₃)	$Y_3 = -7.0534X_3 + 1498.9$	162.5
曲がり終わり(横)の分散(Y ₄)	曲がり終わり差(X ₄)	$Y_4 = -16.537X_4 + 3787.6$	1440

先行研究⁹⁾で行った歩行実験によって得られた、各点以外のどの点に依存しているかを示す相関係数を表-2に示す。そして、この相関係数が最も強い点同士で求めた近似直線式を表-3にまとめた。この座標値は曲がり角を原点とした時の距離を表す。また、曲がり方には人それぞれで個人差があると考えられ、各点のばらつきを表現するために、正規分布を仮定し、その分散をまとめたものを表-4に示す。

4. 曲がり角の歩行シミュレーション

(1) 通路と歩行者の配置条件

ここまで述べてきたシミュレーションモデルを用いて、曲がり角を含む通路を仮定し、歩行シミュレーションを行っていく。まずこの節では、シミュレーション上で仮定した通路長や歩行者の配置などについて述べていく。

この研究で仮定する曲がり角を含んだ通路は、それぞれの通路長が等しい、「L字型の通路」、「T字路」と「十字路」の三つとしている。

通路幅については、建設設計標準⁸⁾で敷地内の通路は、二台の車椅子が離合できる長さとして、幅3mを設計上望ましい、最低限の通路幅であると規定しているため、この研究でも最低の通路幅は3mとし、最大10mの通路幅まで1m刻みでシミュレーションを行っていくことにする。

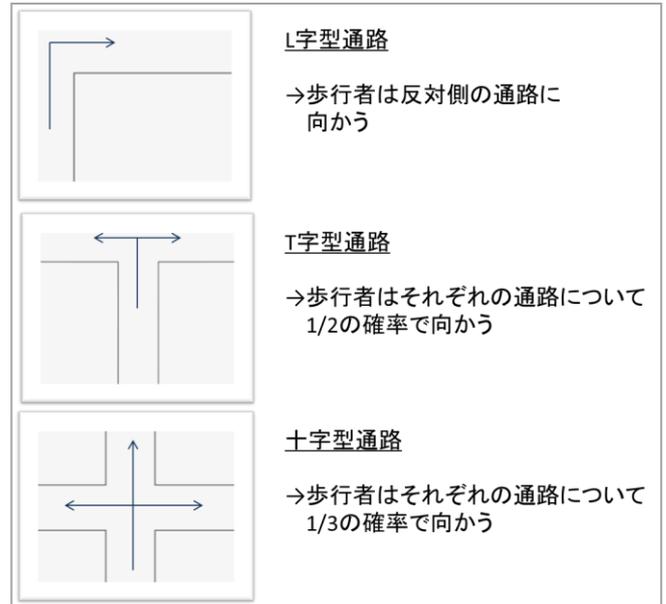


図-6 シミュレーションで仮定した通路

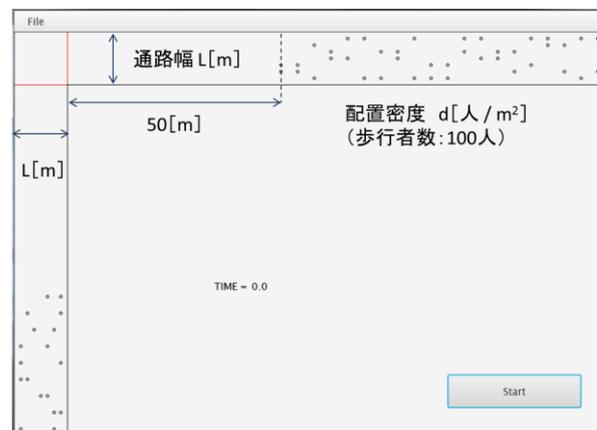


図-7 シミュレーションでの歩行者配置条件

また歩行者の選択する経路として、例えばT字型の通路であれば、歩行者がどの通りに向かうかどうか、二通りの選択肢があるが、図-6に示したように、それぞれの歩行者は等確率で通路を選択するようにする。

また図-7にシミュレーション上での歩行者の配置状況を示す。歩行者数は各通路100人とし、配置密度を定めて、曲がり角から50m離れた位置に歩行者を配置する。その後、同時に各歩行者を目的地となる通路に向けて動かすという条件でシミュレーションを行った。

(2) シミュレーション結果

それでは、「L字路」「T字路」「十字路」のそれぞれについて、3m~10mまで通路幅を1m刻みで変更し、配置密度を変えながらシミュレーションを行った結果を示していく。

ある値以上に配置密度を増していくと、歩行者を流し切ることができずに曲がり角付近で滞留を起こしてしまう。その滞留の形成過程を図-8にまとめた。

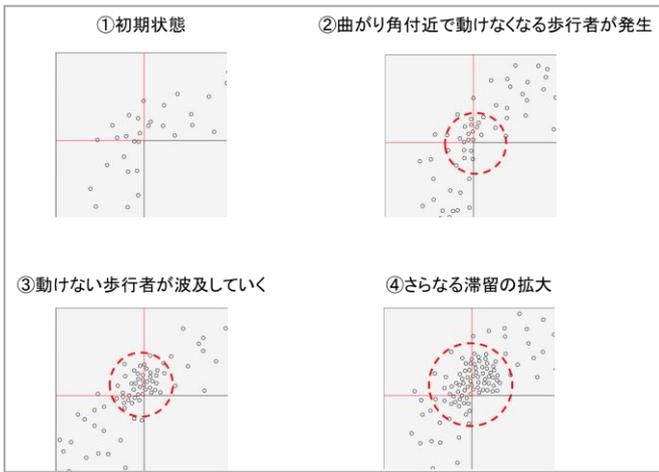


図-8 滞留の形成過程

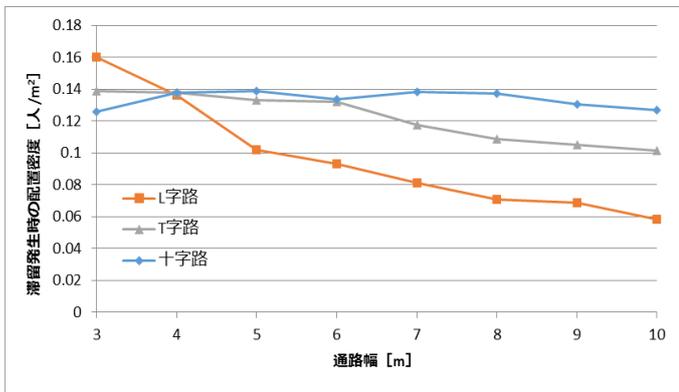


図-9 各通路型における通路幅と滞留を起こす配置密度の関係

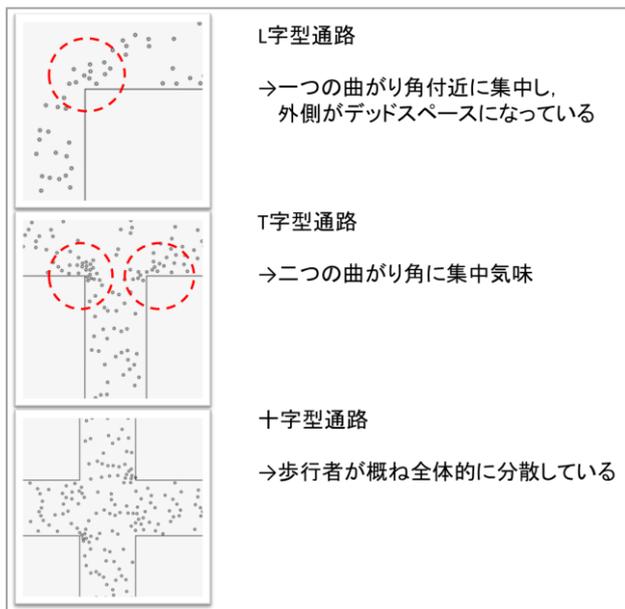


図-10 各通路型における歩行者の様子

図-9 にこのような滞留を起こすようになる通路幅と配置密度の関係を、「L字路」「T字路」「十字路」のそれぞれについてまとめた。傾向として L字路は通路幅

が増すにつれ、滞留が発生する配置密度は減少し、T字路はL字路より緩やかに減少、十字路ではほぼ横ばいになっていることが分かる。

この結果となった理由として、人が曲がる時に曲がり角に漸近しながら進む傾向があるためだと考えられる。例えば、通路幅がある程度広くなると、L字路ではある通路について、一方向にしか曲がる人がいないため、一つの曲がり角周辺に人が集中してしまう。しかしT字路では二方向に曲がる人が存在するため、一つの曲がり角に人が集中せず人が分散されている。十字路ではさらに一方向、選択できる経路が増えたため、通路全体を使って歩行者を流すことができるため、このような結果に繋がったと言える。図-10にここまで述べてきた様子を示した。

5. まとめ

本研究では、歩行者の曲がり方のモデルを定め、パーソナルスペースを用いた歩行者シミュレーションモデルに組み込むことで、曲がり角の通路について考えてきた。

「L字路」「T字路」「十字路」のそれぞれのシミュレーションを行うことから示唆されたこととして、通路幅の拡張によって、その通路の歩行者を流す能力の増し方は通路型によって異なるということである。例えば、図-9では、通路幅を二倍にして、歩行者を流す能力が二倍になるのであれば、滞留を起こす配置密度は通路幅に依存せず一定になるはずである。十字路では概ねその傾向が見て取れたが、T字路やL字路では減少傾向となっている。つまり、T字路やL字路では通路幅の拡張によって得られる歩行者を流す能力は十字路ほど伸びないということになる。

このことから、通路設計に際して、L字型通路やT字型通路を対象とする場合、通路幅の拡張がそのまま歩行者を流す能力の向上に繋がるとは限らないことを考慮する必要がある。通路の改善を行いたい場合、単に通路の拡張を行うだけでなく、代替経路を設けるなどの対策をしていく必要があるだろう。

また本研究の課題として、経路選択の改善が挙げられる。例えば図-8に示した滞留の形成過程において、現状のPSを用いた経路選択アルゴリズムでは、シミュレーション上の歩行者は滞留が起こっている箇所にも構わず進んでいってしまう傾向がある。これが滞留の拡大に影響を与えている可能性は大いにある。現実の歩行者は人が固まっている箇所は避けていく傾向があると考えられるため、滞留が起こっている箇所を避けるためのアルゴリズムについて考える必要があるといえるだろう。

参考文献

- 1) 山下 倫央ら,一次元歩行者モデルを用いた高速避難シミュレータの開発とその応用,情報処理学会論文誌,Vol.53,No.7,pp.1732-1744,(July 2012)
- 2) 森下 信ら,セルオートマトンによる緊急避難時の群衆流解析,機械力学・計測制御講演論文集,D&D,pp.308
- 3) 横山 秀史ら,避難行動解析へのポテンシャルモデルの応用,土木学会論文集,No. 513/I-31, pp. 225-232, 1995. 4
- 4) 岡崎 甚幸ら,建築空間における歩行のためのシミュレーションモデルの研究 その 1 磁気モデルの応用による歩行モデル,日本建築学会論文集,No.283,pp.111-117,1979
- 5) 杉本 太一ら,楕円形個別要素法を用いた避難行動解析に関する基礎的研究,土木学会地震工学論文集,Vol.27,pp.1-4
- 6) 西元 隆雄,大枝 良直,外井 哲志,曲がり角におけるパーソナルスペースを用いた歩行者モデルの構築に関する研究,平成 27 年度土木学会西部支部研究発表会, 2017
- 7) 劉 建宏,パーソナルスペースを用いた障害物を回避する歩行者の群集流動,土木学会論文集D Vol.64, No.4, 513-524,2008,10
- 8) 国土交通省:建築設計標準(平成 28 年度改正版),
http://www.mlit.go.jp/jutakukentiku/jutakukentiku_house_fr_000049.html
(2018, ?, ?受付)