

公共スペース通路における歩行者集団のセルオートマトン交通流解析

Cellular Automata Traffic Flow Analysis for Walking People at the Passage in Public Space

三末 航平¹⁾ 小林 孝平¹⁾ 川元 佳一郎²⁾ 喜渡 智之¹⁾ 平野 元久¹⁾

Kohei Misue, Kohei Kobayashi, Keichirou Kawamoto, Tomoyuki Kido, and Motohisa Hirano

¹⁾ 法政大学理工学部機械工学科

²⁾ ディーピーティー株式会社

This study constructs the cellular automata (CA) model for walking people traffic flow observed in public passages to elucidate how local interactions between neighboring walking people affect the global behavior of pedestrian group. By using the CA model, we have discussed to clarify how the daily walking rules in station yards and annoying acts such as smartphone texting while walking influence the global behavior of pedestrian group, thus discussing how to reduce traffic congestion that occurs at cross roads and stairs, to ensure physical safety, and to alleviate mental stress.

Keywords : Cellular automata, Discrete model, Simulation, Traffic flow analysis, Walking people

1. はじめに

未知の現象を理解しようとする場合、近代科学の方法論では、現象をなるべく単純な要素に分割する手法がとられてきた。要素からモデルを構成し、そのモデルを、数式を用いて記述すると、モデルが示す現象を説明することが可能になり、現象予測や工学応用が実現する。このような科学の方法により、多くの法則性が導かれ多くの工学応用が実現した。

これに対し、生命・知能・社会など、いわば「生きている」システムについては、これらを要素に分割してもそれらの本性を理解することは不可能である。人間は 10^{27} 個の原子・分子から構成されている。これらの膨大な数の原子・分子の集団が人間として機能するには、個々の構成要素が絶妙な仕組みで組織化される必要がある。生命の原理に向き合う場合、構成物質の物性を突き詰めることだけでは不十分であり、構成要素の組織化の在り方に迫るアプローチが必要とされている。例えば、人間の骨や筋肉の構成物質はおよそ1年で物質的にはすべて入れ替わっている。つまり1年前と現在の自身とは物質的には

全く異なるにもかかわらず、同一人物であり続ける。社会においても、それを構成する人間は生死を繰り返し構成要素は絶えず変化するが、社会全体としては一つのまとまりとして存在する。このような不思議で複雑な対象を解明する手掛かりとして「自己組織化」の概念がある。人が介在することなく組織が自然に形成されることを自己組織化といい、例えば、表面張力による球状の水滴の形成、動物の斑点や縞の紋様の形成、混雑時の渋滞の発生などは身近な日常に観察される。自己組織化の大きな特徴は、誰かの指示や意図によって組織形成が実現するのではなく、流体では構成要素としての分子、生体では細胞、社会・経済では個人が周囲との相互作用（居所相互作用）を積み重ねるうちに組織形成が自然に行われる点にある。

自己組織化現象の一つの解析手法としてセルオートマトン (Cellular Automata, 以下 CA と称する) がある。CA は離散的数学モデル化手法であり、1940年代にフォン・ノイマンと数学者のウラムにより自己増殖可能なオートマトン (自動機械) とし

て提案された。1970年代には流体解析を目的として格子ガス・オートマトンとして進化し、統計的取り扱いの導入により Navier-Stokes 方程式の計算結果と同等の結果が得られることが証明された。

CA はセル構造（細胞を連想する区画）を有するオートマトンであり、個々の自動機械は入力部と過去の状態を記憶する内部状態をもち、入力信号とその内部状態から出力信号（次の内部状態）が決まる信号処理機械である。CA によれば、簡単なセル間の局所相互作用から自己組織化現象を再現することが可能になり、流体力学、生体組織形成をはじめとするさまざまな物理・化学現象、交通・材料・電子回路特性、さらには社会・経済現象などに幅広く応用されるようになった。

本研究が考察する歩行者の群集流解析の問題では、歩行者間の局所的な相互作用から歩行者行動が決まり、個々の歩行者行動が時間とともに蓄積して歩行者集団全体の大域的な群集流の様相に影響し、全体挙動の振舞いを示すことができる。緊急時の群集の避難行動や店舗における消費者行動の解析も CA の重要課題である [1, 2]。本研究は、近隣の歩行者間の局所的相互作用が歩行者群の全体的な行動にどのように影響するかを明らかにするために、公共通路で観察される歩行者の交通流に関するセルオートマトン (CA) モデルを構築する。CA モデルを用いて、駅構内の日々の歩行ルールやスマートフォンのマナー違反行為が歩行者集団の全体行動にどのように影響するかを明らかにし、交差点や階段で発生する混雑の解消方法、身体的安全確保、精神的ストレス軽減方法についても議論する。

2. セルオートマトン法による歩行者集団の交通流解析

2.1 群集流モデル

セルオートマトン法は空間的・時間的に表われる現象を離散的に扱う。空間をセルと呼ばれる格子状領域に分割し、各セルに状態量を与え近傍のセルの状態によって次の時間ステップでのセル状態を局所近傍則によって決定し、離散時間ごとにセルの内部状態を更新する。単純なルールに従って時間ステップごとに多数のセル状態を更新し、複雑なパターン形成や道路・通路における自動車や歩行者の交通量の全体挙動を大域的かつ定量的に調べることが可能となる。

歩行者の振舞いを二次元平面内で表現するために、その二次元平面を例えば駅構内の通路と想定し、

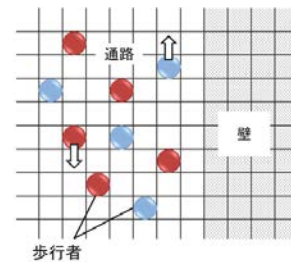


図1 群集流モデル

Figure 1 Cellular automaton traffic flow model

格子状に分割して多数のセルで表現し、各セルに状態量として歩行者・壁などの有無を指定する。群集流シミュレーションを行うには、各歩行者セルの状態を「局所近傍則」によって定め、全歩行者の歩行行動を決定し、歩行者集団としての群集流の大域的振舞いを調べる。

図1に示すように通路を格子状セルに分割し、各セルに状態量として、人・壁の有無を与える。状態量は「人」、「壁」、「何もない」のいずれかとなる。「人」のいるセルについては、「移動の方向（上下）」と「移動の速さ（早歩きと通常歩行）」を与える。通常歩行では、単位時間ステップあたり1セルずつ人を移動させる。早歩きを表現するには、単位時間ステップあたり2セルずつ人を移動させる。

2.2 局所近傍則

歩行者は周囲の混雑状況を観察・判断しながら次に歩を進める位置を決める。個人心理的には、同方向前方を歩く歩行者の後を追おうとする。壁伝いに歩く傾向もある。個人心理をアルゴリズム化し「局所近傍則」を設定する。三つの移動候補地セルに局所近傍則にしたがって得点を付け、最高得点のセルに移動するアルゴリズムを作成する。各候補地の左右と正面3セルと前方6セルの合計9セルの領域で得点を計算する。この合計9セルは人の視野の及ぶ範囲と考える。同方向に進む歩行者がいるとプラス2点、逆方向に対向する歩行者がいるとマイナス2点、壁に隣接するセルにはプラス1点を各セル候補地の得点として集計する。候補地は歩行者の隣接する前方3セルである。セル移動の決定手順を図2の①から⑤に示す。早歩きの歩行者については、各セル候補地セルの前方3セルについて得点計算を行う。時間ステップ1秒とし、セルの幅1m、長さ1m（1秒間に進む距離）と想定すると、障害物がない場合、通常歩行の速度は1セル/秒 = 3.6 km/時、早歩きの速度は7.2 km/時となる。通路幅をパラメータとして数値シミュレーションした。上述

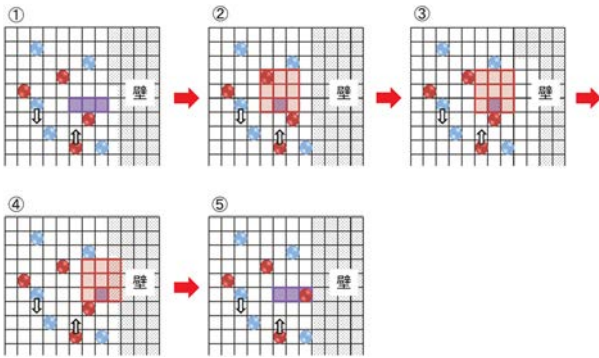


図2 歩行ルールの操作手順

Figure 2 Procedure for managing traffic flow in automaton model

した局所近傍則にしたがって歩行行動を実現するために、プログラムにより次の手順を作成し繰り返し計算を実行する。

- ① 候補地の3カ所の状態を確認し、3つの状態の中から一つを選ぶ。
- ② 視野の部分にあたるセルの得点計算を行う。
- ③ 移動先の座標を決定する。
- ④ 決定した座標情報をセル配列に渡す。

この計算手順を<近傍則1>とする。これに加えて、<近傍則0>（得点計算を行わない）と<近傍則L>を考える。<近傍則L>では入口の左側半分のセル列から歩行者を流入させて<近傍則1>を用いて左側通行を実現する。

2.3 プログラム設計

プログラミングでは、C++ [3, 4] と OpenGL [5] を用いた。通路、壁を作成し各セルに与えられた値の格納などのセルマップに関するクラス、局所近傍則に従って歩行者の歩行行動を扱うクラス、歩行者の作成に関するクラスを作成した。2次元ベクトル演算に関するクラスを作成し、グラフィックス OpenGL の関数間でプログラム命令を制御し群集流シミュレーションを実行する。クラスを元にオブジェクトを作成するインスタンス化を行いオブジェクトがもつ変数と関数へのアクセスを可能にした。

2.4 シミュレーション結果

2.4.1 歩行者の局所近傍則と群集流の形成

図3は、通路幅と歩行者流入率（単位時間当たりの流入人数）をパラメータとした結果の一例を示す。<近傍則1>を用いた。通路全長を40セルとし、通路幅を15セルから30セルまで5セルずつ変化させた。歩行者の流入は全幅の一部のセルをランダムに選択し、流入率は通路幅の1.5割とし小数点以下

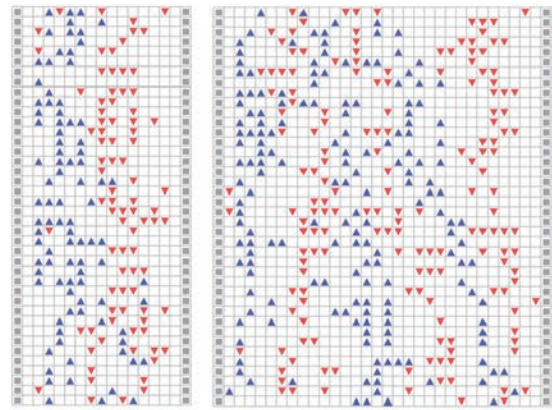


図3 歩行者の隊列の形成と通路幅

Figure 3 Formation of stream lines and passage width

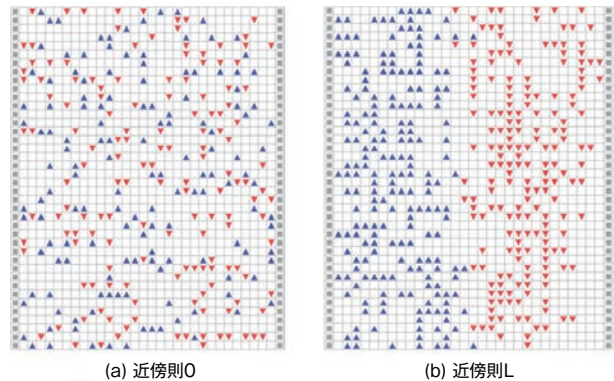


図4 <近傍則0>と<近傍則L>の特徴

Figure 4 <local rule 0> and <local rule L>

は切り捨てた。観察時間は500ステップとし各条件で5回ずつ観察した。すべてのケースで歩行者の隊列が形成され、その隊列の数は通路幅の増加とともに増えた。

図4は通路幅30セルとした、<近傍則0>と<近傍則L>の結果を示す。<近傍則0>では歩行者は空いた候補地セルにランダムに移動する。<近傍則0>では、隊列の形成は見られなかった(図4(a))。<近傍則L>では歩行者の流入を左側に制限することによって群集流が2列の集団になった(図4(b))。

2.4.2 群集流挙動に対する障害物の影響

通路の左壁から4セルの場所に、4セル×4セルの障害物を設置し流れに支障が出るかを調べた。歩行者流入率を4人/秒とし、<近傍則0>、<近傍則1>、<近傍則L>の近傍則について観察した。観察の結果、<近傍則0>と<近傍則1>で

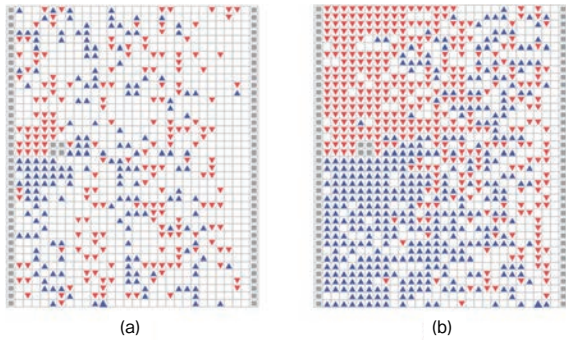


図5 障害物によるクラスター状堆積の形成
Figure 5 Formation of clustered crowd formed by obstacles

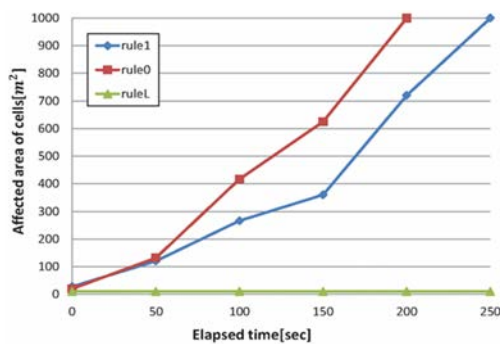


図6 障害物によるクラスター成長の時間変化
Figure 6 Growth of clustered crowd made by obstacles

は、壁と障害物の間で流れが閉塞して群集が堆積し、その堆積は時間経過とともに成長し通路全体に拡大した。その様子を<近傍則1>について図5に示す。120ステップから10ステップごとに群集の堆積推移を観察した。渋滞区域が崩れたり成長したりしながら全体に広がるのが観察できた。図5から、小さな障害(図5(a))の影響が通路全体に広がり(図5(b))、全域にわたる渋滞状況になった。

図6は図5に示したクラスターが成長する時間経過を示す。<近傍則0>では<近傍則1>に比べてクラスターが全域に成長する速度が約50ステップも早くなる。パニック的な非常時には、このような渋滞が急速に起こる危険性を示している。

2.5 群集流の相変化・臨界現象とフラクタル

歩行者集団の塊をクラスターとして捉えることにより、クラスターの出現・結合を相変化における臨界現象として扱うことができると考えた。ランダムな配置の歩行者集団の群集流の無秩序相から、ある条件のもとに隊列を組んで歩行者が移動する歩行者集団の秩序相ができたと考えよう。この場合、隊列同

士が結合してクラスターが形成される一種の相転移を観測したことになる。この相転移をパーコレーションの臨界現象と捉えれば、フラクタル解析によりクラスター間の結合を相関距離の視点から定量化できる可能性がある。障害物シミュレーションではこの臨界現象が現れているかもしれない。また、スマホ歩きのような交通流の障害要因も相変化の原因となる。「隊列の定義」の問題も相関距離の視点からのアプローチする価値がある。

2.6 本章のまとめ

通路歩行者の群集流の集団的・大域的な振舞いを、セルオートマトン法により定量解析し、個々の要素の局所的相互作用から系全体の大域的挙動が発現する創発的現象を示した。主な結論をまとめる。

1. 局所近傍則にしたがって、いろいろな全体的振舞いが現れる群集流セルオートマトンモデルを構築した。今後、境界条件の異なるモデルとして、交差路等への応用が期待される。
2. 障害物通路モデルの解析から、ごく近傍の局所的相互作用が遠距離に伝播し、最終的に系全体の振舞いに波及する現象を示した。
3. 実験との比較や群集流制御は将来課題である。

3. 多様なオブジェクト属性を備えた歩行者集団の集流解析 — スマホ歩きの集団行動への影響 —

3.1 スマホ歩きのモデル化

混雑時のスマホ歩きによる迷惑行為は、多くの人がその危険性を認めているが、個人の協調性の欠如により社会の安全・安心を損ない、個人の心的ストレスの増長にも影響する懸念がある。本章では、2章で構築した群集流セルオートマトンモデルにスマホ歩きの歩行者属性を加えてモデルを高度化し、スマホ歩きの危険性を数値的に示すとともに、スマホ歩きの局所的な障害要因が歩行者集団全体の全域的な歩行行動にどう影響するかを解明する。

セルオートマトン通路モデルの構成方法とアルゴリズムは2章と同様であるが、「人」の状態について、スマホ歩きの歩行者属性を加えることとする。通常速度の歩行者では、時間ステップあたり1セル移動させ、スマホ歩きについては、2つの時間ステップあたり1セル移動させ、端的にはゆっくり歩かせることにする。時間ステップを1秒、セルの大きさを

幅 1 m、長さ 1 m とすると、通常の歩行者の歩行速度は 1 セル/秒 = 3.6 km/時、スマホ歩きの人歩行速度は 1.8 km/時となる。通路幅をパラメータとして群集流シミュレーションを行った。歩行アルゴリズムについては 2 章と同じ「局所近傍則」を用いた。

3.2 群集流のフラクタル次元

フラクタル次元は自己相似図形について定義される次元数であり、通常図形の次元の値とは異なり小数値も取りえる [6]。例えば、整然と整列した群集流にスマホ歩きの攪乱が加わり、その整列が崩れた場合、攪乱発生前後の隊列のフラクタル次元を算出・比較することにより、スマホ歩きの攪乱が全体集団の群集流に与える全域的な乱れの程度を数値化することが可能となると考えている。

フラクタル次元を求める方法としてボックスカウント法を用いる。シミュレーション動画を画像データ配列として扱い、そのデータ配列に対してボックスカウント法を用いることにより、群集流のフラクタル次元の計算が以下の手順によって可能となる。

- ① 計算対象の図形を矩形形状に区切る。
- ② 計算対象の図形を含む矩形の数を数える。
- ③ 矩形の大きさを大きくし、操作を繰り返す。
- ①～③の計算を繰り返し、以下の式 (1) を用いればフラクタル次元を計算できる。

$$D = -\lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{\log N(\delta)}{\log \delta} \quad (1)$$

プログラミング言語は JavaScript であり、シミュレーションプログラムは、セルマップの状況を格納する二次元配列、歩行者の基本情報を扱う基本クラス、それを継承する各オブジェクト属性を備えたクラスの関数間でプログラム命令を制御し群集流シミュレーションを実行する。歩行者の行動を実現するためにプログラムで次の手順を繰り返す。

- ① 計算対象の配置されたセルを初期化する。
- ② 候補地の 3 カ所の状態を確認する。
- ③ 視野の部分にあたるセルの得点計算を行う。
- ④ 移動先の座標を決定する。
- ⑤ 決定した座標情報をセルに保存する。

この計算手順を実現する手順を <近傍則 1> とする。この規則に加えて <近傍則 0> (得点計算を行わない) と <近傍則 SMP> (スマホ歩きの再現) も用いた。

3.3 シミュレーション結果

3.3.1 局所近傍測の妥当性の検証

<近傍則 1> と <近傍則 0> についてシミュレーションを行った、通路全長 40 セル、幅 20 セルとした。<近傍則 0> の計算では上下方向の歩行者が均一に混ざるのに対し、<近傍則 1> の計算では対向方向からの歩行者が互いに避け合い、同方向の歩行者の後ろ追いかけて隊列が形成されることを確認した。JavaScript による群集流セルオートマトンモデルを構築できたことを確認した。

3.3.2 群集流挙動に対するスマホ歩きの影響

通行量を比較・計測するために、以下の三つの群集流の計算を行った。

群集流 A: <近傍則 1> の計算

群集流 B: <近傍則 0> の計算

群集流 C: <近傍則 1> の計算中、5 ステップに

1 回 <近傍則 SMP> の計算追加実行

図 7 は群集流 A、B、C のシミュレーション結果の一例を示す。歩行者流入数は 1 人/ステップ、通路全長 20 セル、通路幅 12 セルとした。それぞれの計算について、100、200、300 ステップの経過時間で通過人数を記録した。10 回計測しその平均値と経過時間の関係を図 8 に示した。300 秒経過した時点ではスマホ歩きが混入することにより、交通量が合計 400 人減少することがわかった。

3.3.3 群集流の相変化の臨界現象とフラクタル解析

群集流 A の計算の実行中に、一時的にスマホ歩きの JavaScript クラスを途中から動作させた計算を行なった (図 9)。フラクタル次元を算出する都合上、通路全長、通路幅をともに 12 セルとした。スマホ歩き計算開始前後についてフラクタル次元を計算し、10 回計測の平均値を表 1 に示す。計算から、

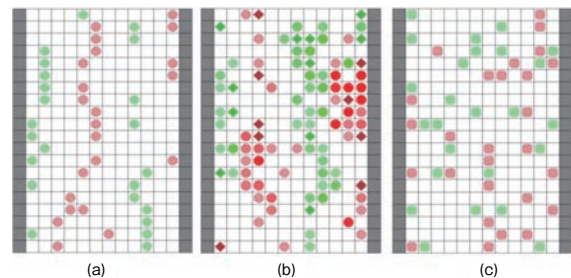


図 7 群集流 A、B、C のシミュレーション
群集流 C がスマホモデル

Figure 7 Cellular automaton traffic flow simulations for A, B, and C models

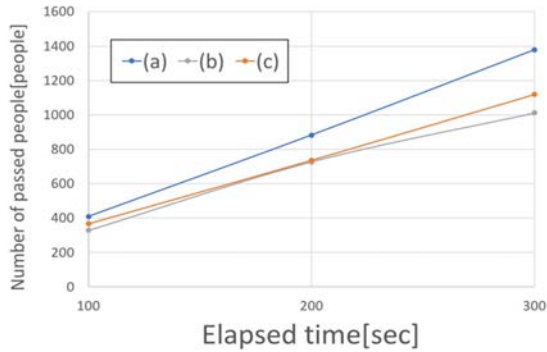


図8 群集流 A、B、C の交通量の比較
Figure 8 Comparison of traffic flow for A, B, and C models

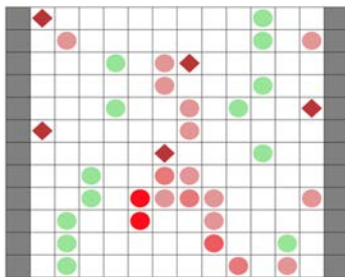


図9 スマホ歩きを含むモデル
Figure 9 Model including texting while walking people

表1 フラクタル次元の計算結果
Table 1 Calculated fractal dimension

	近傍則Sのモデル数			
	0 (平常時)	1	3	5
フラクタル次元	1.01	1.21	1.3	1.31

スマホ歩きがあると通行量が30%程度減少し、フラクタル次元は0.3程度上昇した。フラクタル次元の増加は、行列の乱れ意味し、スマホ歩きの阻害要因を数値的に示した。

3.4 本章のまとめ

歩行者の集団的な振舞いを、セルオートマトン法を用いて定量解析し、スマホ歩きの影響を定量的に示した。JavaScriptによるセルオートマトンモデルから得られた結論を以下にまとめる。

1. 通常モデルの群集流にスマホ歩きが混入すると、通行量が30%程度減少する。
2. スマホ歩きの混入により、群集流のフラクタル次元が行列の1.0から1.3程度に増加する。
3. 将来課題として、メンタルストレスなどの心因要因の定量化や、いろいろなオブジェクト

属性の追加し現実系の計算を目指す。

4. 出入口が指定された通路での通行量制御の可能性

4.1 交差する通路での群集モデル

混雑時の駅構内で歩行者同士が交差する交差点では、衝突の危険性が高まり、安全不安やメンタルストレスの要因が増す。本章では、出入口を指定した通路で交差する群集流モデルを構成するために、候補地セルの得点計算において、セルに「何もいない」場合、出口方向の候補地セルに優先的に移動させるように、出口方向の候補地セルの得点に2倍重み付けした。この新しい局所近傍測を<近傍則CR>とした。セルの大きさを幅1セル、長さ1セルとし、歩行速度を1セル/秒=3.6km/時とした。通路幅をパラメータとして交差モデルシミュレーションを行った。

4.2 シミュレーション結果

4.2.1 交差モデルの妥当性の検証

<近傍則1>、<近傍則0>、<近傍則CR>のシミュレーションを行った。通路長24セル、通路幅24セルとした。<近傍則0>では、右側通行を指定して右側通行が実現される。<近傍則1>では、対向する歩行者を避け、同方向の歩行者に追従するアルゴリズムより上下方向の隊列が形成される。<近傍則CR>では、通路の右半分を入口、左半分を出口とし上下方向から対面通行する歩行者が通路の中間地点付近で交差し、出口に向かう様子を確認した。セルオートマトンによる群集流解析プログラムは正常に機能した。

4.2.2 群集流挙動に対する出入口を指定した通路の影響

通過量計測のために三つの群集流を作成した。

群集流A: <近傍則CR>の歩行規則

群集流B: <近傍則1>の歩行規則

群集流C: <近傍則0>の歩行規則

図10は群集流A、B、Cのシミュレーション結果を示す。歩行者追加入数は1人/ステップ、通路全長24セル、通路幅24セルとした。それぞれの群集流シミュレーションでは、20000ステップの経過時間内の通過人数を記録した。10回のシミュレーションを実施・計測し平均値と経過時間の関係を図11に示した。20000ステップ経過した時点で通過人数を比較すると、<近傍則CR>での通過人数

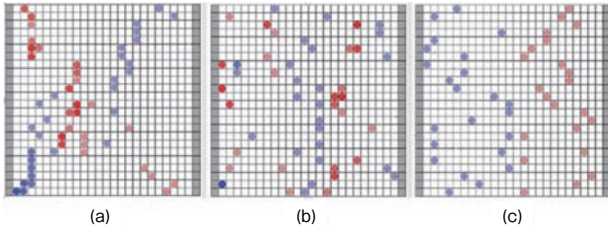


図 10 交差する通路と交差しない通路
Figure 10 Cross road and non-cross road models

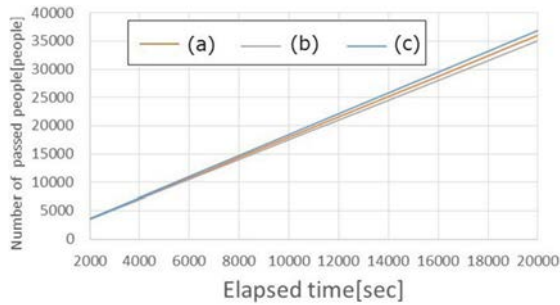


図 11 交差する通路と交差しない通路の通行量比較
Figure 11 Comparison of traffic flow for cross road and non-cross road models

は <近傍則 0> での通過人数と比べて 800 人減少した。<近傍則 CR>での通過人数は、<近傍則 1>の通過人数と比べて 900 人増加したことがわかった。

4.2.3 時間ステップ当たりの追加人数とフラクタル解析

群集流 A の時間ステップ当たりの追加人数を 1 人、2 人、3 人に設定した。これらの三つの群集流のシミュレーション結果を図 12 に示す。通路全長と通路幅をともに 24 セルとし、指定の出口への到達人数と到達できなかった人数を計測し、群集流の大域的なパターンのフラクタル次元解析を行った。10 回のシミュレーションと計測を行いその平均値を表 2 と表 3 に示す。

4.2.4 出入口指定モデルでの通路幅の影響

群集流 A について、通路全長と通路幅がともに 12 セル、24 セル、48 セルの 3 種類の群集流シミュレーションを実施し、それぞれの出口到達人数を計測した。10 回のシミュレーションと計測を実施し、平均値と経過時間の関係を図 13 に示す。10,000 秒経過した時点で通過人数を比較すると、24 セル×24 セルの到達人数に比べて、48 セル×48 セルの到達人数は 1000 人（約 5%）増加し、12 セル×12 セルの到達人数は 4500 人（約 25%）減少しているこ

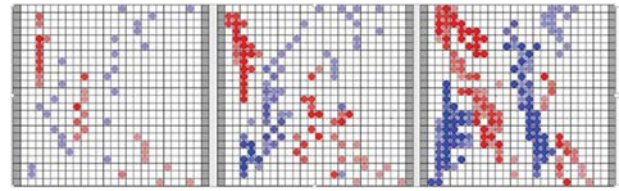


図 12 交差する通路での混雑の影響
Figure 12 Traffic jam occurred in cross road model

表 2 通過人数結果
Table 2 Calculated traffic number of people

		出口到達人数	出口未到達人数	出口 × 割合
追加人数	1人	36010	690	1.90%
	2人	65190	3130	4.60%
	3人	86340	8820	9.20%

表 3 群集流のフラクタル次元
Table 3 Calculated fractal dimension for traffic flow of walking people

		フラクタル次元
追加人数	1人	1.01
	2人	1.24
	3人	1.39

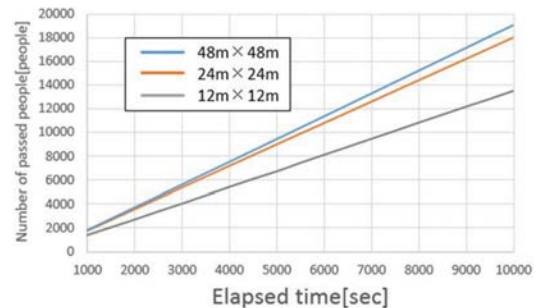


図 13 交差する通路での通路幅の影響
Figure 13 Number of passed people and passage width

とがわかった。

4.3 本章のまとめ

本研究では、通路歩行者の群集流の集団的・大域的振舞いをセルオートマトン法を用いて出入口を指定するなどいろいろな通路での通過人数を定量的に調べ、以下を明らかにした。

1. JavaScript を活用して開発したセルオートマトンシミュレーションを実現可能なプログラムを作成した。
2. 出入口を指定することにより、群集流が交差

するシミュレーションを実施したところ、群集流の交差によって通過人数は、右側通行シミュレーションの通過人数と比べて約 2% 減少し、<近傍則 1> の出入口を指定しない場合の通過人数と比べ約 3% 増加することがわかった。

3. 交差規則<近傍則 CR>では、時間ステップあたりの追加人数を増すと指定出口に到達できない人数割合が増加し、これに伴って群集流の大域的なパターンが複雑となってそのフラクタル次元が増加上昇することがわかった。
4. 交差規則<近傍則 CR>において、通路幅セル数を多くすると通過量（通過人数）が増加することがわかった。

5. 階段を備えた通路での通過時間の計測

5.1 階段のある通路モデル

建物内の通路に設置される階段は高低差のある場所への移動に不可欠の構造物である。非常時には、パニック的な混雑や事故発生が懸念される場所にもなる。災害避難時には、駅・ショッピングセンターなど混雑場所での階段歩行には危険が伴う。被害の防止には、速やかで安全な避難が重要となるが、現地での避難実験は容易でなく、移動時間の計測は現実的ではない。したがって、コンピュータシミュレーションが威力を発揮する現象ともいえる。本章では、さまざまな方式の階段を配置した通路モデルの群集流セルオートマトンモデルを構築し、群集流の交通量や歩行者の通過時間を階段の設置方式の視点から調べ、階段歩行の安全性について議論する。

図 14 は階段のある通路の一例を示す。本研究の通路モデルとして、鉄道駅のホームから階の異なる改札口に至る通路を想定している。図 14 に示すように、格子状セルで分割した二次元平面を通路とし、各セルの状態量として、「上向き歩行者」、「下向き歩行者」、「壁」、「上り階段」、「下り階段」、「何も無い」を考える。歩行者に対しては平坦な通路と階段通路での「歩行速度」を与える。

5.1.1 階段モデルの局所近傍則

通路を歩くとき、人は周囲の状況を判断して次の移動位置を決定する。同方向に歩行者がいればその後ろを追おうとする。対面方向から来る人を避けようとする。駅のホームでは通路の端には寄らない傾向もある。このような行動傾向を実現する局所近傍則を設定した。移動する候補地セルを移動する人の

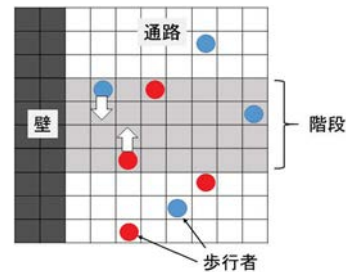


図 14 階段通路モデル
Figure 14 Stairway passage model

左前・正面・右前のセルとする。各候補地セルを含む一定範囲のセル領域内の得点を計算し、最高得点のセルに移動させる。得点の計算範囲は各候補地セルの左右 2 セル前方 9 セルの合計 11 セルとした。この 11 セルを人の視野の領域と考えた。その領域に同方向へ進む人がいると +3 点、逆方向に進む人がいると -3 点、壁があるセルは 0 点を加算する。得点計算例を図 15 に示す。時間ステップを 1 秒、セルの大きさについては、幅 1 m、長さ 1 m（1 秒間に進む距離）と想定すると、歩行者の速度は 1 セル / 秒 = 3.6 km / 時となる。

作成した Java セルオートマトンプログラムは 15 個のクラスファイルから構成され、以下のアルゴリズムを実現する。

- ① 候補地の 3 カ所の状態を確認。
- ② 視野エリアの相当するセルの得点を計算。
- ③ 移動先の座標を決定。
- ④ 決定した座標情報をセル配列に渡す。

この計算手順を実現する手順を<近傍則 1>とする。得点計算を行わない規則を<近傍則 0>とした。

5.1.2 階段モデル

3次元構造物である階段を2次元平面でモデル化する(図16)。ドイツで行われた階段の歩行速度に関する実験[7]によると、12段の階段(蹴上げ寸法15cm、踏み面寸法37cm)に対して、混雑していないときの上りの速度は0.78m/秒、下りの速度は0.83m/秒と測定された。このデータを基に、上り階段では時間ステップあたり0.72セル、下り階段では時間ステップあたり0.60セルとして歩行速度を設定した。階段部分では局所近傍則の得点計算に加えて、階段での平均歩行速度を下げたため、条件付きの移動制限停止を与えた。階段では、[0~1]の一様乱数と階段での歩行速度とを比較し、階段で

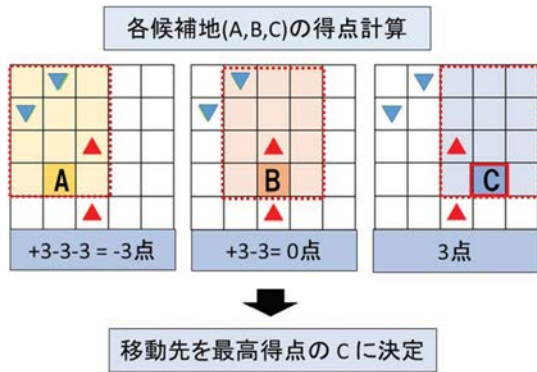


図 15 得点計算例

Figure 15 Scoring examples for destination candidate cells

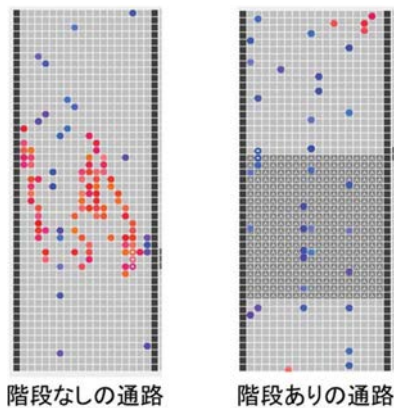


図 16 階段モデル

Figure 16 Passage models without and with stairway

の歩行速度が乱数値より小さい場合進ませ、それ以外では停止させた。

5.1.3 通路への人の追加方法

人の集団が通路を移動するとき、混雑状況によって様々な移動の状況が現れる。例えば、混雑した電車から降りた乗客は集団となって通路を移動するであろう。混雑していない電車から降車した乗客は、互いに距離をとってバラバラに移動するであろう。このことを考慮し、歩行者を通路に追加する方法について2種類のアルゴリズムを提案し、集団を形成する歩行者と集団を形成しない歩行者の双方を実現できる二つの歩行者追加アルゴリズム式として(2.a)と(2.b)を作成した。シミュレーションでは、階段を降りる人に対しては集団を形成しない追加方法とし、階段を昇る人については集団を形成する追加方法とした。

・集団を形成する場合

$$y = \frac{A}{r} \times \sin\left(2\pi \times \frac{t}{T}\right) - (1-r) \quad (2.a)$$

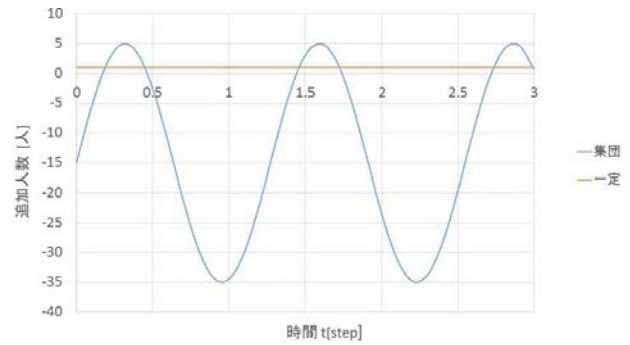


図 17 集団を形成する場合と形成しない場合

Figure 17 Input method of people in cellular automaton model

・集団を形成しない場合（一定人数追加）

$$y = A \quad (2.b)$$

ここで、 y ：追加人数 [人]、 A ：1 ステップ当たり最大追加人数 [人]、 r ：波のピークの割合、 T ：周期 [step]、 t ：時間 [step] とした。

5.1.4 渋滞の表現

階段では歩行者の渋滞が起こりやすいといえる。ここでは、通路での渋滞の場所や規模を可視化するために歩行者が停止して足踏みすると、赤丸で表示した歩行者に対して赤丸の中心に白抜き丸を描画するようにした(図 18 の上部)。白抜き丸を停止回数に応じて3段階の大きさに変化させる。実行画面(図 18)には、セルで区切られた通路の行ごとに、全歩行者の停止回数の積算値を、数値と柱状グラフ(停止回数グラフ)で表し通路の右側に描画した(図 18)。平均通過時間や通過人数をテキスト表示した。

5.2 シミュレーション結果

5.2.1 階段での歩行速度の検証

5.1.2 節で述べた、一様乱数を用いて階段での平均歩行速度を設定する方法を実証した。通路長 50 セル、幅 10 セルとした平坦通路モデルと階段モデルを作成し、式(2)の方法により階段モデルの平均速度は半減することを確認した。計算条件として、式(2)において $A = 0.1$ とし、階段での下り速度を時間ステップあたり 0.50 セルとし、1000 時間ステップの計算を行った。

5.2.2 局所近傍則の妥当性の検証

通路長 50 セル、通路幅 20 セル、階段幅 20 セル、階段長さの合計 20 セルとして <近傍則 0> と <近傍則 1> のシミュレーションを行った(図 19)。

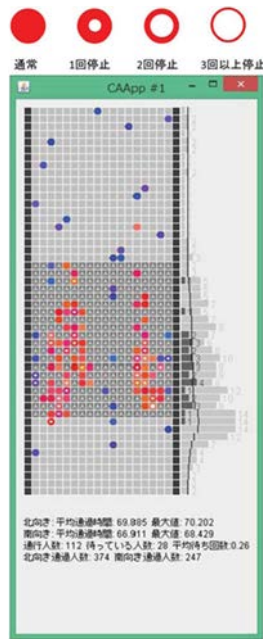


図 18 渋滞の表示と実行画面
Figure 18 Display for traffic jam

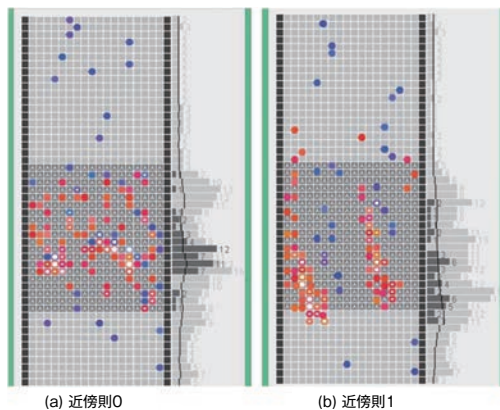


図 19 近傍測の比較

Figure 19 Comparison of traffic flow for local rule 0 and 1

式 (2) のパラメータとして、下向きの人の $A = 0.5$ 、上向きの人の $A = 5$ 、 $r = 0.25$ 、 $T = 100$ とした。<近傍則 0> (図 21(a)) では上下方向の歩行者モデルは混ざり合うのに対し、<近傍則 1> では、上下に進む互いの歩行者を避け、かつ先の歩行者を追うため隊列が形成された。また、階段の手前付近で停止回数が増加し、階段の手前で渋滞の発生を確認した。

5.2.3 踊場の設置と通路内の通過時間

踊場長さと設置数が歩行者流れにどう影響するかを調べた。図 20 と図 21 に示す階段モデル (a) ~ (h) の 8 種類を考案し、上向き歩行者の通過時間を比

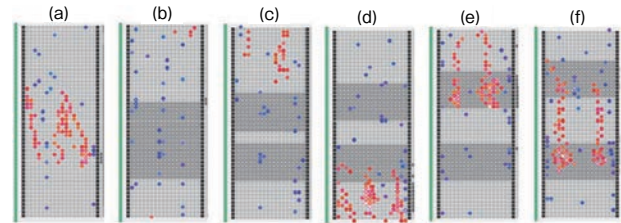


図 20 A グループの階段通路モデル
Figure 20 Stairway passage model for A group

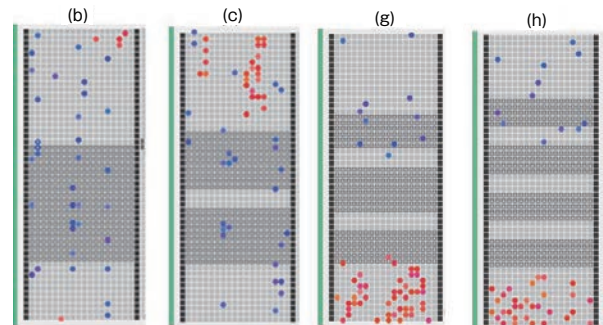


図 21 B グループの階段通路モデル
Figure 21 Stairway passage model for B group

較した。A グループは踊場の長さの影響を調べる標本 ((a) ~ (f) の 6 モデル) とし、B グループは踊場の設置数を調べる標本 ((b), (c), (g), (h) の 4 モデル) とした。階段モデル (a) ~ (g) の仕様を以下に示す。

- (a) 階段なし
- (b) 階段あり、踊場設置数 1、踊場 0 セル
- (c) 階段あり、踊場設置数 1、踊場 3 セル
- (d) 階段あり、踊場設置数 1、踊場 6 セル
- (e) 階段あり、踊場設置数 1、踊場 9 セル
- (f) 階段あり、踊場設置数 1、踊場 12 セル
- (g) 階段あり、踊場設置数 2、踊場 3 セル
- (h) 階段あり、踊場設置数 3、踊場 3 セル

計算パラメータとして、通路全長 50 セル、幅 20 セル、階段長さ合計 20 セルとした。人の追加方法式 (2) のパラメータとして、下向きの人の $A = 0.5$ 、上向きの人の $A = 5$ 、 $r = 0.25$ 、 $T = 100$ とした。43,200 時間ステップ (実時間 12 時間相当) のシミュレーションを 10 回行い、通過時間の平均値を求めた。

図 22 は A グループについての通過時間を示す。通路 (a) を除いた残りのグループで通過時間が最短となった通路は (b) であり、踊場の長さが増えると

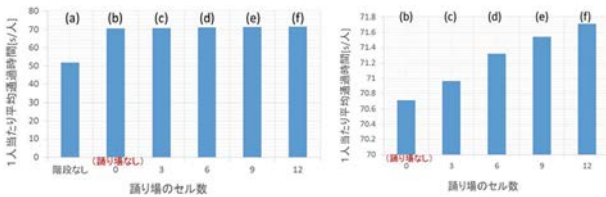


図 22 A グループの階段通路モデルの通過時間
Figure 22 Passing time for A group.

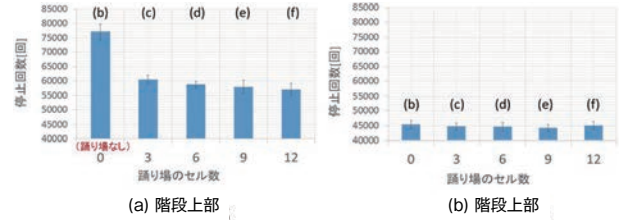


図 24 階段上部・下部での停止回数
Figure 24 Number of suspending action upper and lower area of stairway

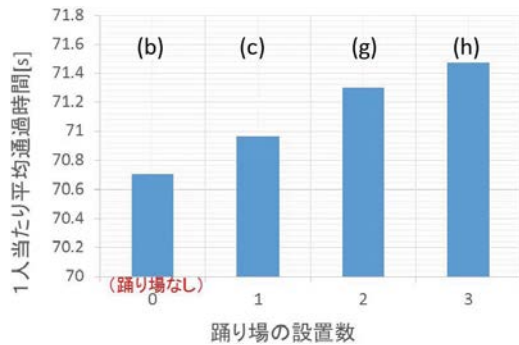


図 23 B グループの階段通路モデルの通過時間
Figure 23 Passing time for B group

わずかに通過時間が増加する（図 20 の右図）。

図 23 は B グループについての通過時間を示す。(b) の階段モデルの通過時間が最短となった。踊場の設置数が増えると通過時間が増加する。

5.2.4 停止回数の計測

階段通路の安全性評価を目的として階段で発生する歩行者の停止回数を調べた。停止回数が多いほど渋滞が発生しやすくなる。前節で延べた通過時間の計測で使用した A グループの通路モデルを用いた。踊場を境目にしてそれぞれ 10 セルの上部階段と下部階段に分け、それぞれの上・下部階段での歩行者の停止回数を計測した。10,800 時間ステップ（実時間の 3 時間相当）のシミュレーションを 10 回行い通過時間の平均値を求め、これを図 22 に示す。

図 22(a) に示すように、下部階段の停止回数については、踊場がない (b) の階段通路モデルと、踊場のある (c) ~ (f) の階段通路モデルを比較すると、踊場があるモデルでは停止回数が約 17,000 回減少した。また、踊場が長くなるほど停止回数が減少した。一方、図 22(b) から、上部階段では、各モデルでの停止回数には差は認められなかった。

前節で示したように、通過時間は、踊場の長さや設置数が増えると通過時間は増えた。一方、停止回数の計測結果（図 22）から、踊場があると踊場で

歩行者が停止して足踏みをし、いわゆる渋滞による速度低下が起こった。このことから、踊場の設置によって渋滞が発生し、渋滞領域の範囲・長さも増加して前節で示した通過時間の増加が生じたと考えられる。

一方、停止回数は、踊場の無い階段に踊場を設置することによって、階段下部での停止回数が大きく減少した。一方、階段上部では踊場設置による渋滞の発生なく、停止回数にも変化は見られなかった。渋滞は発生位置から後部方向に伝播する。階段下部での渋滞の原因は、階段上部の入口付近と踊場で発生する歩行者の停止、すなわち歩行者の流れの滞りである。このため、階段下部においてのみ渋滞が発生し、階段上部ではその上に踊場がなかったために渋滞は起こらなかったと考えられる。また、長い踊場がある場合では、階段上部入口付近の停滞が起こらず長い踊場で停滞を吸収するために、長い踊場通路での階段下部では渋滞が起こりにくかったと考えられる。このような長い踊場を有する通路は安全な階段であり、踊場は、渋滞に起因する歩行者転倒の防止に有効と考えられる。

5.3 本章のまとめ

Java プログラミングを用いたセルオートマトン解析により、通路内の階段による歩行者集団への影響を定量解析し以下の結論を得た。

1. 階段のある通路での通過時間を減少するには、踊場の長さを短くことは効果的である。
2. 階段での停止回数を減少するには、踊場を設置することと、踊場の長さを増すことである。
3. 踊場の設置は、階段での渋滞を減少させるのに有効であり、踊場は、渋滞に起因する歩行者の転倒防止に有効と考えられる。
4. 将来課題として建築基準法を考慮した屋内

外の階段設計の課題研究に備えることや、階段歩行時の慣性と踊場スペースの最適化などの課題が考えられる。

参考文献

- [1] 森下信,セルオートマトン - 複雑系の具象化 -, 養賢堂, 2003.
- [2] 森下信, 原田真太郎, 中野孝昭, 日本機械学会第6回交通・物流部門大会講演論文集, pp.539, 1997.
- [3] ハーバード・シルト, 独習 C, 翔泳社, 2007.
- [4] ハーバード・シルト, 独習 C++, 翔泳社, 2010.
- [5] 林武文, 加藤清敬, OpenGL による 3 次元 CG プログラミング, コロナ社, 2003.
- [6] 高安秀樹 他, フラクタル科学, 朝倉書店, 1990.
- [7] 西成活裕, クルマの渋滞アリの行列 - 渋滞学が教える「混雑」の真相 -, 技術評論社, 2007.