セルオートマトンによる群集流動の特性に基づく歩行行動のモデル化

避難行動シミュレーションの開発 その1

MODELING OF WALKING BY CELLULAR AUTOMATA BASED ON CROWD FLOW MODEL

Development of evacuation behavior simulation Part 1

小山 維之*, 篠崎 喜彦**, 森下 信***

Shigeyuki KOYAMA, Nobuhiko SHINOZAKI and Shin MORISHITA

Pedestrian simulation model based on the public crowd flow model was proposed using Cellular Automata. In this model, two types of "personal space" and the transfer probability were introduced. One directional flow simulation were conducted to determine the transfer probability and to show the density – velocity / flow rate diagram, which showed good agreement with relations proposed on the Public Guideline for Evacuation. The flows in a bottleneck and a stairway, and also through a junction were simulated, which showed good agreement with the estimated results according to the Guideline.

Keywords : Evacuation simulation, Crowd flow, Density-Velocity-Flow rate, Bottleneck, Stairway, Junction

避難シミュレーション, 群集流動, 密度・速度・流率, ボトルネック, 階段, 合流

1. はじめに

東日本大震災を教訓として迅速な避難行動が求められ, またそれを建築計画や広域避難計画に反映させるために, 避難のモデル化によるコンピュータシミュレーションが注目を集め重要性を増している. その手法は人の動きをマクロな流体として導出した支配方程式により全体としての流動を見る手法と, セルオートマトン(Cellular Automata: CA), マルチエージェントシステム(Multi-Agent System: MAS)に代表される規則ベースのシミュレーション手法に大別される. CA も MAS も従来の支配方程式に基づくマクロな現象説明に対して, 現象を構成する複数の要素間の相互作用から現象を再現し, その再現過程を通して現象を解明することを特徴としたシステム論である. 人の流れの構成過程を考えれば, これらの手法は人の流れの再現に対して適しているといえる.

これまで人流のシミュレーションに関しては, 昭和40年代から歩行のモデル化やシミュレーションが開始され, 鉄道技術研究所を中心に多くの研究が行われてきた. 特に中祐一郎は交差流動のモデル化及びシミュレーションを行い, 歩行者を単位としたミクロ的扱いから歩行者の群を単位とするシミュレーションまで行った¹⁾. その後はコンピュータ処理能力の向上に伴ってミクロ的なモデル化が主流となっており, 近年では, 再現が困難な避難行動実験を補完するために, できるだけ詳細なエージェントの行動特性を組み込んだ精緻な避難者モデルを目指す研究や, 種々の複雑系数理分野の融合に

より現実現象を解明する研究が様々な分野で成果を上げ報告されている²⁾³⁾⁴⁾⁵⁾. また精緻な避難者モデルによる再現結果を, 既往研究データや告示などの現在の基準と比較検証して, その実用性を評価する動きも出てきている⁶⁾⁷⁾.

本研究は, 実用性を有する避難シミュレーションの開発を主目的として, 具体的には避難予測モデルの理論⁸⁾, 新・建築防災計画指針における避難計算法⁹⁾(以下「指針法」), 及び避難安全検証法¹⁰⁾(以下「検証法」)が前提としている避難行動状態を, シミュレーションにより再現することを目的とした. またその再現により, 従来の計算法では予測できない現象の視覚化や定量的な比較が可能となり, 実務的な建築計画における意思決定の有用なツールとなり得ること, 更に国土交通大臣認定の評価方法へ発展できるツールとなり得ることを目指している. 一方, 本報で提案するCAによる歩行行動モデルは, 近年の既往研究の主流である個々のエージェントの行動特性や自律的判断を組み込んだモデルとは異なる. 上記の避難行動状態の再現のための手段として, 全員が同一の歩行特性を有し, 設計者が計画した通路を整然と混乱なく避難すること⁸⁾を前提として, 指針法, 検証法の設定を基準とした単純なルールのみを設定した. そのため個々の歩行者における現実との精緻な対応を目指すものではないが, その反面, 実用的な避難シミュレーションとして, 火災時の人間挙動等に対する高度な知識を有する熟達者でなくても, シミュレーションの条件設定が容易である特徴を有している.

* 横浜国立大学大学院 大学院生

** アルモ設計建築設計部

*** 横浜国立大学環境情報研究院 教授

Graduate Student, Yokohama National University

ARMO Architects & Engineers, Architectural Design Division

Prof., Graduate School of Environment and Information Sciences, Yokohama National University, Dr.

本報では避難シミュレーションへの適用に先立ち、一方向流における3種の歩行状態（自由歩行、群集流動、滞留）及び合流の再現が、水平路及び階段において可能な歩行行動のモデル化を行った。従って本報で行うシミュレーションは、歩行行動シミュレーションと称している。また、その実用有効性を確認するために、4方向の通路の流動、出口通過の流率、T字路の合流、さらに階段部分の流動及び合流について検証した。

2. CAによる歩行行動モデル

CAは、現象を構成する要素間の局所の相互作用により、全体的な挙動が創発される現象をモデル化するのに適した手法である。その特徴により複雑系のモデル化手法の一つとして用いられている。具体的には、解析対象をセルと称する区分領域に分割し、各セル上に離散的状態量を定義する。さらに、近傍のセルとの状態量に関する相互作用を規定する局所近傍則により、離散時間ステップ毎に状態遷移則に従い各セルの状態量を推移させて全体としての現象を表現する数理モデルである¹¹⁾¹²⁾。この手法を用いて歩行行動シミュレーションを行った。

2-1. セルの設定

セルは矩形とし、1セルの大きさを30 cm×30 cmとした。1セル内には歩行者1人が存在できると設定した。各セルの状態は、①歩行者が存在する状態（歩行者セル）、②歩行者が存在しない移動可能な空間の状態（空間セル）、③柱、壁、什器など固定物があり歩行者が移動不可能な空間の状態（障害物セル）の3通りを定義した。セルの大きさを上記のように設定した理由は、最大で10人/m²程度の計画密度とすること、また建築計画において、通路、階段、扉巾は30cmの倍数を基準とする事が多いためである。またセルの形状は実際の身体寸法とは一致しないが、本モデルは離散的計算法であるCAを用いて、できるだけ簡便な方法で各歩行者が局所空間における密度と歩行者同士の位置に基づき速度を決定することにより、マクロ的な避難行動状態の再現を目指すものであるため、実際の身体寸法等との精緻な関係については、セルの形状の制約の中で抽象的にモデル化することとした。ただし本報においては、歩行者同士はセルの並びに対して直交方向に隣接するセルには入れず、1セル以上の空きセルを置くことを原則とした。従って、計画密度は最大で5.5人/m²までとしてモデル化を行った。

2-2. 方向ベクトル

歩行者は障害物セル以外のセルのうち、設計者が出口などに設定した目的地セルの中から現地点より最も近いセルを目指して移動し、目的地セル到達後も最終目的地セル到達までは次の目的地を選択して移動することとした。移動を行う方向ベクトルはセルの並びに対して直交方向及び45°方向の2種類とし、歩行者セル毎に設定する。従って、セルに配置した歩行者が時間ステップ毎に移動可能な隣接セルの方向は、4方向の直交方向及び4方向の45°方向の計8方向とした。歩行者が移動目標とする方向は、この8方向とは必ずしも一致しない場合があるが、図1、2に基づき、式(1)により算出される確率による優先順位で移動方向を選択した。第1候補方向のセルへ移動できない場合は第2候補の方向へ選択を変更する。

図1 方向ベクトル

図2 方向の選択

$$\left. \begin{aligned} \text{直交方向ベクトル } V_A \text{ を選択する確率} &: a/(a+b) \\ 45^\circ \text{ 方向ベクトル } V_B \text{ を選択する確率} &: b/(a+b) \\ \therefore a = \sqrt{2}|V|\cos(\pi/4 + \theta), \quad b = \sqrt{2}|V|\cos(\pi/2 - \theta) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

2-3. 歩行速度

歩行者の前方や周囲の密度が小さく、他の歩行者の影響による行動制限が無い自由歩行状態における自由歩行速度は、指針法、検証法における設定に基づき1.3m/sを上限とした。そのため、1離散時間ステップの実時間は、直交方向ベクトルにおける自由歩行速度が1.3m/sとなるように0.3m÷1.3 m/s(≈0.23s)と設定した。自由歩行速度vが1.3m/s未満の場合は、移動確率P=v/1.3として速度を調整する。また、45°方向ベクトルに対してはP=1/√2として自由歩行速度が等しくなるように設定した。

また前述の方向ベクトルについて、人間の歩行行動としての移動方向が直交方向及び45°方向のみとするのは拘束が強く、歩行行動を再現する上で不自然となるのではないかと危惧される。しかし、成人男性の平均1歩幅は75～80 cm程度¹³⁾であるので、本モデルにおける2～3離散時間ステップが通常の歩行者の1歩に相当する。図3の通り、その1歩における直交方向及び45°方向以外の自由歩行速度は1.21m/sと若干減少するが、8×3=24方向に対して自然な歩行状態の再現が十分可能と考えて問題を解決している。

図3 歩行者1歩単位における移動可能方向と自由歩行速度

2-4. 群集流動

(1) 基本的な考え方

歩行者の前方や周囲の密度が大きくなり他の歩行者の影響による行動制限が発生する群集流動状態では、密度の増加とともに歩行速度は低下する¹⁴⁾。既往研究における密度・歩行速度・流率の関係¹³⁾において、密度が1.0人/m²程度を超えると自由歩行状態から群集流動状態への状態変化が見られる。群集流動状態は密度ρ(人/m²)、速度v(m/s)、流率f(人/m・s)の3つの指標により、概ね4.0人/m²まで

の範囲において $f = \rho \cdot v$ の関係が成立し、その流率 f は戸川喜久二氏の提示式では $1.5 \text{ 人/m} \cdot \text{s}$ 程度が示され、また出口などの狭まった部分でも同様に $1.5 \text{ 人/m} \cdot \text{s}$ 程度となることが示されている¹⁵⁾。この流率 f は指針法の流動係数 $= 1.5 \text{ 人/m} \cdot \text{s}$ 、及び検証法の有効流動係数 $N_{eff} = 90 \text{ 人/m} \cdot \text{分}$ の設定根拠となっている。これらの研究及び現在の基準に従い、本モデルでは以下(2)(3)に示すパーソナルスペース及び局所近傍則を設定し、密度が概ね $1.0 \sim 4.0 \text{ 人/m}^2$ 程度までの範囲において、流率 f が $\rho \cdot v \approx 1.5 \text{ 人/m} \cdot \text{s}$ となる群集流動状態及び出口通過の流率再現を行った。

また、 4.0 人/m^2 以上では足取りを頻繁に変えなければならず低速でも停止する可能性がある「滞留状態」へ状態変化するが¹³⁾、この状態は先を争って押し合うことによる「将棋倒し」などが発生する可能性があるといわれている¹⁶⁾。指針法や検証法においては、避難経路内の密度が $3.3 \sim 5.0 \text{ 人/m}^2$ 以上になることを制限しているが、本モデルもその考えに基づき、主として自由歩行状態及び群集流動状態の現象を取り扱うこととする。従って再現が困難な密度 4.0 人/m^2 以上の滞留状態となる場合は、密度の増加に伴い流率を低減させ、最大計画密度 5.5 人/m^2 で完全停止することとした。ここで、再現目標とする自由歩行状態、群集流動状態及び滞留状態の密度 $\rho \text{ (人/m}^2)$ 、速度 $v \text{ (m/s)}$ 、流率 $f \text{ (人/m} \cdot \text{s)}$ の関係をまとめると図4のようになる。

(2) パーソナルスペース

人間のまわりにはパーソナルスペースと呼ばれる一種の「縄張り」が形成されていて、混み合いなどでこれが侵されると気詰まり・不快感により他人から離れたいと感じることが指摘されている¹³⁾。また歩行時のスペースに関しては、歩行動作をスムーズに行うために

必要な余裕を見込んだ幅 $70 \text{ cm} \times$ 長さ $100 \sim 200 \text{ cm}$ 程度の歩行帯や、群集流において各歩行者と前後左右の人との間の概ね左右 1.0 m 、前方 1.5 m 程度の離隔距離を表した歩行者間の相互間隔が既往研究により示されている¹³⁾。これらの既往研究を参考にし、また前述の密度が概ね 1.0 人/m^2 以上から他の歩行者の影響を受ける群集流動状態への状態変化が始まることを勘案して、本モデルでは図5に示す歩行者に対して前方に広がるパーソナルスペースを設定した。このパーソナルスペースに他の歩行者が存在する場合の移動確率に関する低減規則を与える局所近傍則を設定した。またこのパーソナルスペースは前述の2種類の方向ベクトルにそれぞれ対応させるため、直交方向型、 45° 方向型の2種類を用意しており、歩行者は方向ベクトルに対応したパーソナルスペースを選択して局所近傍則に基づく行動判断を行うこととした。本モデルのパーソナルスペースは、上記の既往研究¹³⁾で提示されたパーソナルスペースと精緻な一致はしていないが、前述の通り、本モデルはできるだけ簡便な方法によりマクロ的な避難行動状態の再現を目指すものであるため、セル形状の制約の中で抽象的にモデル化することとした。

(3) 局所近傍則

CAにおいては、従来の研究にみられるように、様々な局所近傍則や状態遷移則を設定することが可能である。本モデルでは、緊急状態に遭遇したときの反応行動などの行動モデルは導入せずに、できるだけ簡単な近傍則を与えて、更に図4に示す密度と速度と流率の関係を満足するように「移動確率」のみを調整することとした。ここでの移動確率とは、選択したパーソナルスペース内で、移動後に他の歩行者と共存することなく、かつ他の歩行者とも隣接せずに移動可能なセルが存在する場合に、歩行者がそのセルに移動する確率であり、この部分に本研究の特徴がある。移動可能なセルが存在しない場合には、歩行者は選択したパーソナルスペース内での移動は行わない。移動確率は下記の式(2)に従い設定を行った。

移動確率 = $(1.0 - P_{stop} \times C_{dens}) \times C_{dir}$ (2)

図5 パーソナルスペース

表1 停止確率 P_{stop} の設定値

停止確率	PS内での最近接歩行者の位置
1.0	1列目
0.4	2列目
0.2	3列目
0	誰もいない

表2 密度係数 C_{dens} の設定値

密度係数	PS内での他の歩行者の数
1.0	0~2人
0.6	3人
0.3	4人
0	5人以上

*PS:パーソナルスペース

図4 再現目標とする密度・速度・流率の関係(水平路)

ここで P_{stop} は停止する確率（停止確率）， C_{dens} はパーソナルスペースにいる他の歩行者の人数により決める係数（密度係数）， C_{dir} は移動方向によって決める係数（方向係数）である．これらの確率及び係数は表 1，表 2 のように設定した．また，方向係数 C_{dir} については直交方向に進むときは 1.0， 45° 方向に進むときは $1/\sqrt{2}$ とした．式 (2) 及び表 1，表 2 によれば，密度が高いほど移動確率が增加する設定となっている．これは， $3.0 \text{ 人}/\text{m}^2$ 程度以上の密度が高い状態では前述した移動可能なセルが少ない状況に相当するため，このような状況下での流率を維持するための設定であり，現象再現の過程において導出された特性である．計算の手順としては，シミュレーション空間上にいる歩行者をランダムに選定し，各歩行者が次の時間ステップに進む場所を確保して，ある時間ステップでの全歩行者の計算が終わった時点で一斉に移動を行う．

2-5. 階段の歩行行動

階段の歩行速度は，水平歩行時のピッチを維持したまま昇降するため水平歩行時の単位時間当たりの歩数によって規定され¹⁴⁾，標準的な蹴上げと踏み面の場合，階段の水平投影の歩行速度は水平廊下の半分程度になると指摘されている¹⁷⁾．本モデルにおける階段の自由歩行速度は，検証法における階段の歩行速度設定に基づき，上り歩行速度は水平部歩行速度の 0.45 倍，下り歩行速度は水平部歩行速度の 0.6 倍の移動確率を乗じて設定した．

また階段においても，水平部と同様に密度が高くなるに従い歩行速度が減少する群集流動状態が指摘されている¹⁴⁾．実務的な避難計算における階段の流率については，指針法では $1.3 \text{ 人}/\text{m}\cdot\text{s}$ ，検証法の有効流動係数では密度が $4.0 \text{ 人}/\text{m}^2$ までの範囲で $N_{eff}=80 \text{ 人}/\text{m}$ ・

分 ($1.33 \text{ 人}/\text{m}\cdot\text{s}$) とほぼ同様の値としている．本モデルにおける階段の群集流動の流率 f については，検証法に従い，水平部で設定した群集流動状態の局所近傍則に対して移動確率 $P=1.33/1.5$ を乗じて設定した．ここで階段における再現目標とする自由歩行状態及び群集流動状態の密度 ρ ($\text{人}/\text{m}^2$)，速度 v (m/s)，流率 f ($\text{人}/\text{m}\cdot\text{s}$) の関係をまとめると図 6 のようになる．

3. 水平路における歩行行動シミュレーション

3-1. 一方向流における歩行行動シミュレーション

(1) 平面モデルと設定条件

2 次元平面内の様々な方向で歩行行動シミュレーションが可能なことを示すために，(a) 直交方向，(b) 斜め $1/3$ 方向，(c) 斜め $1/2$ 方向，(d) 45° 方向の 4 方向における一方向流について，図 7 に示すような通路を設定して検証した．各モデルに灰色で示したセルが歩行者が目指す目的地セルである．それぞれの通路において，密度 $0.1 \sim 5.5 \text{ 人}/\text{m}^2$ の範囲で歩行者をランダムに配置し，自由歩行速度を $1.3 \text{ m}/\text{s}$ として矢印の方向へ移動させ，自由歩行状態及び群集流動状態を再現して，各初期設定密度における流率を計測した．流率は任意の 260 時間ステップ（実時間 60 秒相当）における流出人数に基づき計測した．また，周期境界条件を適用して，流出した歩行者は再び流入させ，通路内は常に一定の密度となるように設定した．また歩行者の平均速度は流率／密度として算出した．

(2) シミュレーション結果と考察

4 方向の通路モデルの密度，速度，流率の計測結果を図 8 に示す．密度 $0.1 \sim 1.0 \text{ 人}/\text{m}^2$ 程度の自由歩行状態については，4 方向とも再現目標値とほぼ一致した結果が示された．概ね密度 $1.0 \text{ 人}/\text{m}^2$ を超える辺りから 4 方向とも密度の増加に従い速度が減少することが示されて群集流動状態に近い現象が再現できていることが確認できた．流率は直交方向， 45° 方向においては狙い通り概ね $1.5 \text{ 人}/\text{m}\cdot\text{s}$ 近傍の値を示しているが，斜め $1/3$ 方向及び斜め $1/2$ 方向においては，直交方向や 45° 方向に比べ流率が若干低くなる傾向が見られた．これは元々設定上の自由歩行速度は $1.21 \text{ m}/\text{s}$ であり，直交方向， 45° 方向に対して約 7% 低下することにもよるが，通路方向が 2 種類の方向ベクトル（直交方向， 45° 方向）と一致しないため，通路型の

(a) 密度と速度の関係

(b) 密度と流率の関係

図 6 再現目標とする密度・速度・流率の関係(階段)

図 7 一方向流における歩行行動シミュレーションモデル

(a) 密度と速度の関係

(b) 密度と流率の関係

図8 再現目標とシミュレーション結果の関係(水平路)

モデルにおいては壁際セルにおいて移動可能なセルが減少して直交方向への移動に制限が生じるためである。その結果、平均の自由歩行速度は最小で約 1.1 m/s となり、また群集流動状態においても密度 2~4 人/m² 程度の範囲において、直交方向、45° 方向に対して約 10% 程度低下する傾向が見られた。また 4 方向とも密度 2.5 人/m² を超える辺りから密度が高くなるに従い流率が微減し、密度 4.0 人/m² を超える辺りから急激に減少していく傾向が示された。

以上に示すように 4 方向の通路モデルの計測結果は、直交方向、45° 方向については、前述の既往研究¹⁵⁾、指針法、検証法に基づく再現目標と概ね近似しており、平面状態における自由歩行状態及び群集流動状態の再現において、良好な現象表現が得られることが確認できた。斜め 1/3 方向、斜め 1/2 方向における歩行速度及び流率の低下については、避難行動状態を可視化して大局的な避難計画の問題を把握する場合や、安全側の避難時間を算出する場合では特に大きな問題にはならないが、精緻な避難時間計算を行う上での影響は無視できないため、これらの方向の通路に対する避難時間計算の適用については、更に精度を高める余地があると考えられる。

3-2. ネック部における歩行行動シミュレーション

(1) 平面モデルと設定条件

実際の建築計画において、居室から廊下、廊下から階段への出入口がボトルネックとなる場合は滞留が生じる。指針法、検証法によればこのような出入口における歩行者の流率も 1.5 人/m・s の値が用いられている。ここで、図 9 に示すような幅 1.5m と 0.9m の 2 つのネック部を設置した直交方向通路モデルを設定し、出入口における歩行者の流率の時間的変化を検証した。歩行者は初期配置せず、

左端より流率 1.5 人/m・s の歩行者を一定に流入し、自由歩行速度を 1.3m/s として矢印の方向へ移動させ、各ネック部における流率を計測した。灰色で示したセルが歩行者が目指す目的地セルである。流率は任意の 260 時間ステップ (60 秒) の通過人数の基づき計測した。

(2) シミュレーション結果と考察

ネック部における歩行行動シミュレーション結果を図 10、各ネック部における流率の時間的変化を図 11 に示す。図 10(a) に示すように、歩行者は計測開始後 13 秒程で幅 0.9m ネック部に到着し、その後図 11 に示すように概ね 25~90 秒の間、いずれのネック部でもほぼ流率 1.5 人/m・s で定常的に通過していることが確認できた。一方で、図 10(b)(c) に示すようにネック部を通過できなかった歩行者により各ネック部手前に滞留が発生し、時間経過に伴い滞留は移動方向とは反対の方向へ伝播した。幅 0.9m ネック部での滞留が幅 1.5m ネック部に到達すると、図 11 に示すように幅 1.5m ネック部での流率は徐々に低下し続け、0.9~0.95 人/m・s (流量 1.35~1.42 人/s) 程度で一定となった。幅 0.9m ネック部の流量は $1.5 \times 0.9 = 1.35$ 人/s であり、幅 1.5m ネック部での流量とほぼ一致していることにより、通路上の流量が最も狭いボトルネック部の流量により規定される状況が確認できた。

図9 ネック部における歩行行動シミュレーションモデル

図10 ネック部における歩行行動シミュレーション結果

図11 各ネック部における流率の時間的変化

3-3. 合流における歩行行動シミュレーション

(1) 平面モデルと設定条件

3-1 節で示した直交方向の一方向流同士が合流するケースについて、前述の既往研究¹⁵⁾、指針法、検証法に基づく再現目標のシミュレーションが可能であることを示すために、図 12 に示すような T 字路における合流を設定して検証した。初期条件として歩行者をランダムに配置して図中の矢印の方向へ移動させ、C 部において合流後、D 部方向へ移動させた。B 部の歩行者は B 部下端、B 部以外の歩行者は D 部右端を目的地セルと設定した。移動開始前の各部分の歩行者は同じ密度であり、移動開始後は滞留がない場合に同じ一定の密度が維持される流率の歩行者を A1 部及び B1 部にそれぞれ流入させた。シミュレーションは初期密度 0.3 人/㎡及び 0.7 人/㎡の 2 通りで実施し、A1 部、B1 部の流入量は初期密度 0.3 人/㎡では 0.39 人/㎡・s、初期密度 0.7 人/㎡では 0.91 人/㎡・s とし、自由歩行速度を 1.3 m/s とした。既往研究¹⁵⁾、指針法、検証法に基づく再現目標によると、概ね密度 1.0 人/㎡で歩行状態が自由歩行状態から群集流動状態へ遷移することから、初期密度 0.3 人/㎡では、C 部における合流後の密度は $0.3+0.3=0.6$ 人/㎡と増加するが、1.0 人/㎡より密度が低いため A 部及び B 部からの流量を受容でき、歩行状態は自由歩行状態のまま歩行速度に変化が発生しないことが予測された。また合流後の流率は $0.39+0.39=0.78$ 人/㎡・s 程度になることが予測された。一方、初期密度 0.7 人/㎡では、C 部における合流後の密度は $0.7+0.7=1.4$ 人/㎡となり、1.0 人/㎡より大きくなるため、C 部において A 部及び B 部からの流量を受容できずに時間経過とともに A2 部→A1 部、B2 部→B1 部へと流出人数の減少が発生すること、また合流後は群集流動状態になることが予測された。以上を再現目標として、各初期密度におけるシミュレーションについて、通路各部の流出人数 N 及びその密度 ρ 、流率 f 、速度 v を 0~260 時間ステップ (0~60 秒)、260~520 時間ステップ (60~120 秒)、及び 520~780 時間ステップ (120~180 秒) において計測した。

(2) シミュレーション結果と考察

初期密度 0.3 人/㎡でのシミュレーション結果を図 13(a) (b)、計測結果を表 3 に示す。計測結果では、合流前後において予測通りの流率が維持されているが、特に合流部 B2 部において、密度の上昇と速度の低下、また C、D 部においても速度の低下がみられた。これは合流部において、B 部からの歩行者が C 部への進入において A 部からの歩行者の妨害を受けているため、また C、D 部において局所的な密度に偏りが生じ、偏りを分散させるため一時的に歩行速度を低減させる歩行者が発生しているためである。D 部よりもさらに移動方向前方では、歩行者が徐々に分散し、自由歩行速度 1.3 m/s がほぼ維持されることが確認できた。

同様に初期密度 0.7 人/㎡でのシミュレーション結果を図 13(c)~(f)、計測結果を表 4 に示す。計測結果では B1、B2 部において、時間が経過するに従い流出人数が減少し、予測通りの結果が示されたが、A1、A2 部においては 180 秒までにおいて流出人数の変化は見られなかった。これは初期密度 0.3 人/㎡の場合と同様に B 部からの歩行者が、合流の際に全ての部分において A 部からの歩行者の影響を受けている一方で、A 部は図の下側 (B 部と反対側) を歩行する歩行者が B 部からの歩行者の影響を殆ど受けずに C 部へ流入していることに

図 12 T 字路の合流における歩行行動シミュレーションモデル

図 13 T 字路の合流における歩行行動シミュレーション結果

表 3 各部における流出人数・密度・流率・速度

[初期密度 0.3 人/㎡, 流入流率 0.39 人/㎡・s]

計測区間	A1	A2	B1	B2	C	D
N						
0~60s	74	74	73	76	145	134
60~120s	73	73	74	78	146	149
ρ						
0~60s	0.32	0.32	0.31	0.40	0.71	0.67
60~120s	0.31	0.32	0.32	0.44	0.72	0.71
f						
0~60s	0.41	0.41	0.41	0.42	0.80	0.74
60~120s	0.41	0.41	0.41	0.43	0.81	0.83
v						
0~60s	1.28	1.29	1.29	1.05	1.13	1.11
60~120s	1.31	1.28	1.29	0.99	1.13	1.16

N: 流出人数 (人), ρ : 密度 (人/㎡), f: 流率 (人/㎡・s), v: 速度 (m/s)

表 4 各部における流出人数・密度・流率・速度

[初期密度 0.7 人/㎡, 流入流率 0.91 人/㎡・s]

計測区間	A1	A2	B1	B2	C	D
N						
0~60s	163	155	163	157	273	249
60~120s	161	150	147	140	277	275
120~180s	157	151	124	137	273	271
ρ						
0~60s	0.70	1.21	0.72	1.92	2.69	1.55
60~120s	0.78	2.58	1.22	3.79	3.58	2.16
120~180s	1.05	3.69	3.71	4.63	3.69	2.27
f						
0~60s	0.90	0.86	0.91	0.87	1.52	1.38
60~120s	0.89	0.83	0.82	0.78	1.54	1.53
120~180s	0.87	0.84	0.69	0.76	1.52	1.51
v						
0~60s	1.28	0.72	1.25	0.46	0.57	0.89
60~120s	1.15	0.32	0.67	0.21	0.43	0.71
120~180s	0.84	0.23	0.19	0.16	0.41	0.66

N: 流出人数 (人), ρ : 密度 (人/㎡), f: 流率 (人/㎡・s), v: 速度 (m/s)

よるものと考えている。

ただし、密度と速度においては、A 部、B 部ともに時間経過に伴い密度は上昇し、速度が低下する傾向が示され、C 部へ流入できない歩行者が C 部手前で滞留して移動方向に対して後方へと滞留状態が伝播し、A 部及び B 部の歩行者の流れに影響を及ぼしている状況がシミュレーションにより確認できた。また、合流後の流率においては C 部、D 部ともに概ね $1.5 \text{ 人}/\text{m}\cdot\text{s}$ を定常的に維持しており、合流後の群集流動状態の良好な再現ができていたことが計測結果により確認できた。

4. 階段における歩行行動シミュレーション

4-1. 一方向流階段における歩行行動シミュレーション

(1) 階段モデルと設定条件

階段での歩行行動シミュレーションが可能なことを示すために、3-1 節の図 7(a) (d) と同じ平面の直交方向、 45° 方向における一方向流の階段モデル、及び図 14(a) で示す内法寸法 $2.7 \text{ m} \times 5.4 \text{ m}$ 、1~3 階の折返し階段モデルを設定して検証した。折返し階段モデルでは図 14 に灰色で示したセルを中間の目的地セルと設定して歩行者を下降または上昇させた。それぞれ密度 $0.1 \sim 5.5 \text{ 人}/\text{m}^2$ の範囲で歩行者をランダムに配置し、自由歩行速度を下り方向は 0.78 m/s 、上り方向は 0.585 m/s として、自由歩行状態及び群集流動状態を再現して、それぞれの密度における流率を計測した。流率は任意の 260 時間ステップ (60 秒) における流出人数に基づき計測した。3-1 節と同様に周期境界条件を適用し、流出した歩行者は再び流入させ階段内は常に一定の密度となるように設定した。また歩行者の平均速度は流率/密度として算出した。なお、折返し階段については 2 階からは流入させないこととした。

(2) シミュレーション結果と考察

直交方向、 45° 方向における一方向流の階段モデル及び折返し階段モデルの下り方向、上り方向における密度、速度、流率の計測結果を図 15 に示す。下り方向、上り方向とも 2-5 節で示した再現目標値とほぼ一致した結果が示され、直交方向、 45° 方向における一方向流、及び直交方向の折り返し階段において、自由歩行状態及び群集流動状態の良好な再現ができていたことを確認できた。

図 14 折返し階段における歩行行動シミュレーションモデル

4-2. 階段の合流における歩行行動シミュレーション

(1) 階段モデルと設定条件

階段での降下群集に通路群集が合流するケースについて、歩行行動シミュレーションが可能なことを示すために、図 14(a) で示す 1~3 階の折返し階段に対して、図 14(b) で示す 2 階階段入口から通路群集を流入させる階段モデルを追加設定して検証した。初期条件として歩行者を階段、通路にランダムに配置し、階段内を下降させると同時に、2 階入口から通路群集を流入し、合流した 2 群集を下降させ 1 階出口から退出させた。移動開始前の階段、通路の歩行者は同じ密度であり、移動開始後は滞留がない場合に同じ一定の密度が維持される流率の歩行者を 3 階入口及び 2 階通路入口部からそれぞれ流入させた。シミュレーションは初期密度 $0.5 \text{ 人}/\text{m}^2$ 及び $1.0 \text{ 人}/\text{m}^2$ の 2 通りで実施し、流入量は、初期密度 $0.5 \text{ 人}/\text{m}^2$ では 3 階階段入口は $0.39 \text{ 人}/\text{m}\cdot\text{s}$ 、2 階通路 B 部へは $0.65 \text{ 人}/\text{m}\cdot\text{s}$ 、初期密度 $1.0 \text{ 人}/\text{m}^2$ では 3 階階段入口は $0.78 \text{ 人}/\text{m}\cdot\text{s}$ 、2 階通路 B 部へは $1.3 \text{ 人}/\text{m}\cdot\text{s}$ とし、自由歩行速度を階段は 0.78 m/s 、通路は 1.3 m/s とした。指針法、検証法に基づく再現目標によると、概ね密度 $1.7 \text{ 人}/\text{m}^2$ で歩行状態が自由歩行状態から群集流動状態へ遷移することから、初期密度 $0.5 \text{ 人}/\text{m}^2$ では、C 部における合流後の密度は $0.5 + 0.5 = 1.0 \text{ 人}/\text{m}^2$ と増加するが、 $1.7 \text{ 人}/\text{m}^2$ より密度が低い A 部及び B 部からの流量を受容でき、合流後の歩行状態は自由歩行状態のまま歩行速度に変化が発生しないと予測された。また合流後の流率は、 $0.39 + 0.65 = 1.04 \text{ 人}/\text{m}\cdot\text{s}$ 程度となることが予測された。一方、初期密度 $1.0 \text{ 人}/\text{m}^2$ では、C 部における合流後の密度は $1.0 + 1.0 = 2.0 \text{ 人}/\text{m}^2$ となり、 $1.7 \text{ 人}/\text{m}^2$ より大きくなるため、A 部の流量 ($0.78 \times 1.2 \times 60 = 56.2 \text{ 人}/\text{分}$) 及び B 部の流量 ($1.3 \times 1.2 \times 60 = 93.6 \text{ 人}/\text{分}$) を受容できずに流出人数の減少が発生すること、また合流後は群集流動状態となることが予測された。以上を再現目標として、各初期密度におけるシミュレーションについて、各部の流出人数 N 及びその密度 ρ 、流率 f 、速度 v を 0~260 時間ステップ (0~60 秒)、260~520 時間ステップ (60~120 秒)、及び 520~780 時間ステップ (120~180 秒) において計測した。更に初期密度 $1.0 \text{ 人}/\text{m}^2$ について、C 部 (合流区画) の密度、階段降下群集、通路群集の流入人数を計測し、流入比率 (通路群集の流入人数/2 群集合計流入人数) 及び流率合流比率 (通路群集の流率/2 群集合計流率) を算出し、北後らの実験的再現¹⁸⁾と比較検証を行った。

(2) シミュレーション結果と考察

初期密度 $0.5 \text{ 人}/\text{m}^2$ の計測結果を表 5 に示す。計測結果では、合流後の C、D 部の歩行速度は $0.60 \sim 0.69 \text{ m/s}$ となり、若干の低下が確認された。流率については合流前後において概ね予測通りの流率が維持されていることが確認できた。密度については、全ての区間で予測値以上の上昇が見られ、特に C 部において著しい密度の上昇が見られた。これは通路群集の歩行速度が C 部への流入前後で $v = 1.3 \text{ m/s}$ から $v = 0.78 \text{ m/s}$ に低下することによるものであり、C、D 部の歩行速度の低下もこの密度上昇によるものと考えている。急激な密度の上昇は D 部において徐々に解消されるが、反対側の A、B 部に対しても若干の密度の上昇とそれに伴う歩行速度の低下を発生させていることが確認できた。

同様に初期密度 $1.0 \text{ 人}/\text{m}^2$ の計測結果を表 6 に示す。初期密度

(a) 密度と速度の関係(下り方向)

(b) 密度と流率の関係(下り方向)

(c) 密度と速度の関係(上り方向)

(d) 密度と流率の関係(上り方向)

図 15 再現目標とシミュレーション結果の関係(階段)

0.5 人/ m²での計測結果を考慮すると、前述の再現目標に加えて、C 部における著しい密度の上昇と D 部における若干の密度低下、及び反対側の A,B 部に対する密度の上昇とそれに伴う歩行速度の低下が予測された。計測結果では、A, B 部とも流出人数が減少し、予測通りの結果が示された。また C 部における著しい密度の上昇と D 部における若干の密度低下、及び反対側の A, B 部に対する密度の上昇とそれに伴う歩行速度の低下についても予測通りの結果が示された。合流後の流率については、C, D 部とも概ね 1.33 人/ m・s 前後を定常的に維持しており、合流後の群集流動状態の良好な再現ができていたことが、計測結果により確認できた。

更に初期密度 1.0 人/ m²の場合の C 部(合流区画)における 2 群集の密度、流入人数、流入比率の時間的推移を図 16 に、合流後の 2 群集の流入状態を表 7 に示す。表 7 において階段降下群集についての単位時間当たり流入人数を Na[人/ s], 流率を Fa[人/ m・s], 通路群集についての単位時間当たり流入人数を Nb[人/ s], 流率を Fb[人/ m・s]で示した。本階段モデル(2 階流入あり)では合流部への通路出入口幅及び階段幅が等しいため、単位時間当たりの流入比率(Nb/Na+Nb)と流率合流比率(Fb/Fa+Fb)は等しくなっている。

本モデルにおける流率合流比率のシミュレーション結果は約 66 ~ 69%であり、北後らの実験的再現における流率合流比率 60%前後¹⁸⁾に対して、やや高めの値を示していることが確認できた。この流率合流比率の差異については、両者の階段部の流率の違いによるものと考えている。先ず本モデルにおける階段部の群集流動状態における流率は、前述の通り、検証法の有効流動係数(Neff=80 人/ m・分)に従い、f=1.33 人/ m・s と設定している。一方、本シミュレーションが比較対象とした北後らの実験的再現¹⁸⁾における第 3 条件の結果では、73 秒の間に合計 140 人の通路群集と階段降下群集が、幅

1.2m の階段内の合流区画に流入しており、ここでの流率は単純計算で f≈1.6 人/ m・s となっている。従って、階段部の流率が相対的に低い設定となっている本モデルにおけるシミュレーションにおいて、通路群集の流入割合が相対的に高くなったと考えられる。本モデルは、検証法の設定に従った避難行動状態の再現を目指しているが、一方でこのような数少ない貴重な実測データ等を考慮して、今後、更に精度を高めるための検討も必要であると考えている。

表 5 各部における流出人数・密度・流率・速度
[初期密度 0.5 人/ m², 流入流率: 階段 0.39 人/ m・s, 通路 0.65 人/ m・s]

	計測区間	A	B	C	D
N	0~60s	27.9	46.8	73.0	68.2
	60~120s	28.1	47.6	75.2	74.9
ρ	0~60s	0.62	0.59	1.70	1.43
	60~120s	0.59	0.59	1.75	1.54
f	0~60s	0.40	0.66	1.04	0.98
	60~120s	0.39	0.67	1.05	1.05
v	0~60s	0.65	1.12	0.61	0.69
	60~120s	0.67	1.13	0.60	0.68

N: 流出人数(人), ρ: 密度(人/ m²), f: 流率(人/ m・s), v: 速度(m/ s)

表 6 各部における流出人数・密度・流率・速度
[初期密度 1.0 人/ m², 流入流率: 階段 0.78 人/ m・s, 通路 1.3 人/ m・s]

	計測区間	A	B	C	D
N	0~60s	34.7	68.5	98.5	87.7
	60~120s	31.1	68.4	99.2	96.9
	120~180s	29.9	67.0	96.5	96.8
ρ	0~60s	2.73	2.52	3.29	2.49
	60~120s	4.99	3.99	3.83	3.50
	120~180s	5.02	4.00	3.86	3.67
f	0~60s	0.49	0.97	1.39	1.24
	60~120s	0.44	0.96	1.39	1.35
	120~180s	0.42	0.94	1.35	1.35
v	0~60s	0.18	0.29	0.42	0.50
	60~120s	0.09	0.18	0.36	0.39
	120~180s	0.08	0.18	0.35	0.37

N: 流出人数(人), ρ: 密度(人/ m²), f: 流率(人/ m・s), v: 速度(m/ s)

(a) 各部の累計流入人数と合流区画密度

(b) 単位時間当たりの各部の流入人数と流入比率

図 16 階段降下群集と通路群集の流入状態の時間的推移

表 7 合流後の 2 群集の流入状態

計測区間	階段降下群集 (A部)		通路群集 (B部)		2群集合計 流入群集		流入比率 流率合流比率
	Na	Fa	Nb	Fb	Na+Nb	Fa+Fb	
0~60s	0.578	0.482	1.142	0.951	1.720	1.433	0.664
60~120s	0.518	0.432	1.140	0.950	1.658	1.382	0.687
120~180s	0.498	0.415	1.117	0.931	1.615	1.346	0.691

N: 単位時間当たりの流入人数 (人/s), F: 流率 (人/m・s)

5. 結論

本研究は、実用性を有する避難シミュレーションの開発を目的として、避難予測モデルの理論、指針法及び検証法が前提としている避難行動状態の再現を目指した。本報では避難シミュレーションへの適用に先立ち、単純な局所近傍則・状態遷移則を設定する CA において、歩行者の周囲にパーソナルスペースを設定し、歩行者の移動確率を調整することにより、指針法、検証法及び既往研究¹⁵⁾に示される歩行者の密度と速度と流率の関係を再現した歩行行動モデルを提案した。またその実用有効性を確認するために、4 方向の一方方向の流動、出口通過の流率、T 字路の合流、更に階段部分の流動・合流について検証した。その結果、本モデルにおいて以下の性状を確認した。

- 1) 水平路の直交方向及び 45° 方向の一方方向流の検証結果は、再現目標の自由歩行状態 ($v=1.3\text{m/s}$) 及び群集流動状態 ($f=1.5\text{人/m}\cdot\text{s}$) とほぼ一致した。斜め 1/3 方向及び斜め 1/2 方向の通路型モデルでは壁際セルで直交方向の移動に制限が生じるため、歩行速度、流率が再現目標に対して若干低下することが確認できた。

- 2) 水平路の直交方向の出口流出の検証結果は、再現目標の流率 ($f=1.5\text{人/m}\cdot\text{s}$) とほぼ一致した。
- 3) 水平路の直交方向 (T 字路) の合流前後の人流の検証結果は、再現目標に基づく自由歩行状態及び群集流動状態の再現予測とほぼ一致した。
- 4) 階段の直交方向、45° 方向及び折返し階段の一方方向流の検証結果は、再現目標の自由歩行状態 (下り $v=0.78\text{m/s}$, 上り $v=0.585\text{m/s}$) 及び群集流動状態 ($f=1.33\text{人/m}\cdot\text{s}$) とほぼ一致した。
- 5) 階段降下群集と通路群集との合流前後の人流の検証結果は、再現目標に基づく自由歩行状態及び群集流動状態の再現予測とほぼ一致した。
- 6) 階段降下群集と通路群集との流率合流比率については、北後らの実験結果の約 60% に対して、約 66~69% となることが確認できた。

以上より、本モデルについて、居室・通路・階段からなる建築物における避難シミュレーションへの適用可能性と適用範囲が示された。以上の性状を配慮した上での具体的な建築計画における避難シミュレーションの適用化検証は続報にて報告する。

参考文献

- 1) 中祐一郎：交錯流動のシミュレーションモデル, 日本建築学会論文報告集, No.267, pp.103-112, 1978
- 2) 松田泰治, 大塚久哲, 樗木武, 内田広明：セルオートマトン法を用いた地下街の避難行動シミュレーションに関する一考察, 地域安全学会論文集, No.2, pp.95-100, 2000.11
- 3) 小久保聡, 山本和弘, 山下博史：セルオートマトンによる火災時の避難行動のシミュレーション, 日本機械学会論文集 (B 編), 第 74 巻, 第 748 号, pp.2724-2730, 2008.12
- 4) 大鑄史男, 小野木基裕：セルオートマトン法による避難流動のシミュレーション, 日本オペレーションズ・リサーチ学会と文論文誌, 51 巻, pp.94-111, 2008
- 5) 谷本潤, 萩島理, 田中尉貴：避難口のボトルネック効果に関するマルチエージェントシミュレーションと平均場近似に基づく解析, 日本建築学会環境系論文集 第 74 巻 第 640 号, pp.753-757, 2009.6
- 6) 木村謙, 佐野友紀, 林田和人, 竹市尚広, 峯岸良和, 吉田克之, 渡辺 仁史：マルチエージェントモデルによる群集歩行性状の表現—歩行者シミュレーションシステム SimTread の構築—, 日本建築学会計画系論文集, 第 74 巻, 第 636 号, pp.371-377, 2009.2
- 7) 安福健祐：避難行動フレームワークを用いた群集歩行モデルの比較分析と避難安全検証への適用性, 日本建築学会計画系論文集, 第 75 巻, 第 655 号, pp.2081-2088, 2010.9
- 8) 国土開発技術研究センター監修：建築物の総合防火設計法 第 3 巻 避難安全設計法, 日本建築センター, pp.111-141, 1989
- 9) 建設省住宅局建築指導課ほか監修：新・建築防災計画指針—建築物の防火・避難計画の解説書, 日本建築センター, 第 5 章, 1995
- 10) 建築基準法施行令第 129 条の 2, 129 条の 2 の 2, 平成 12 年建設省告示第 1441 号, 第 1442 号
- 11) 森下信：セルオートマトン 複雑系の具象化, 養賢堂, 2003
- 12) Joel L. Schiff, 梅尾博司・Ferdinand Peper 監訳, 足立進・磯川梯次郎, 今井克暢・小松崎俊彦・李 佳訳：セルオートマトン Cellular Automata -A Discrete View of the World-, 共立出版, 2011
- 13) 日本建築学会編：建築設計資料集成 [人間], 丸善, 2003
- 14) 田中孝義：改訂版 建築火災安全工学入門, 日本建築センター, 2002
- 15) 戸川喜久二：群衆流の観測に基づく避難施設の研究, 学位論文, 1963
- 16) 日本建築学会編：建築物の煙制御計画指針 (案), 日本建築学会, 2011
- 17) 国土交通省住宅局建築指導課ほか編：2001 年版避難安全検証法の解説及び計算例とその解説, 井上書院, 2001
- 18) 北後明彦, 久保幸資, 室崎益輝：階段室における 2 群集の合流に関する実験的研究, 日本建築学会計画系論文報告集, 第 358 号, pp.37-43, 1985.12

(2012年12月6日原稿受理, 2013年6月3日採用決定)