

CAを用いた避難シミュレーションに関する一考察

EVACUATION SIMULATION BY CA

近田康夫*・浅地 剛成**・城戸 隆良***

Yasuo CHIAKTA, Takanari ASAJI and Takayoshi KIDO

*工博 金沢大学助教授 工学部土木建設工学科 (〒920-8667 金沢市小立野 2-40-20)

**富山県土木部

***博(工) 金沢大学工学部 前任技術専門職員

It is necessary to infer the behavior of pedestrians, to prevent the problem occurrence in a congestion and an emergency. CA(Cellular Automaton) is an effective approach to this problem. In this research, the problems of the simulation system reported previously were solved. As the result, the pedestrians show suitable action to avoid and a queue was not formed. Moreover, a pedestrian's speed was taken into consideration. As the result, behavior that a fast pedestrian passes a slow pedestrian has reappeared, and slow pedestrians become barrier to the fast ones.

Key Words : evacuation simulation, cellular automaton

キーワード：避難シミュレーション, セラ・オートマトン

1. はじめに

近年, 構造物は安全性, 経済性, 施工性ととも, 使いやすさ, 環境との調和などの点にも重点がおかれるようになった。歩行者によって利用される構造物ならば, 歩行行動が快適かつ安全な空間を有する必要がある, 特に不特定多数の人が利用する場合には混雑時や非常時に問題が生じないようにしなければならない。

1995年の阪神大震災以降, 緊急時の避難行動については特に注目が集まっており, 構造物の耐震性, 免震性, 耐火性などに加え, 災害時の避難計画などを構造物の防災性と関連づけて総合的に検討すべきであるということが強く認識されるようになった。この防災対策や計画を立案するうえで, 災害時の人間の行動を予測しておくことは極めて重要なことである。しかし, 設計段階で人の動きを実際に検証することは不可能であり, また災害時の避難行動などは実際に検証するには危険を伴う。そこで, 人間の歩行行動をシミュレーションする試みがなされている。例えば, 個別要素法を用いたシミュレーション手法の提案¹⁾, 火災時の延焼を考慮したシミュレーション(堀内ら²⁾), 防災要員と避難者間の情報伝達を考慮したノード・リンク・ネットワークモデルによる避難行動シミュレーション(瀧本ら³⁾), そして, 人間の主体性を考慮したシミュレーションモデルの開発⁴⁾等をあげることができる。また, 実測に基づく歩行者の障害物回避行動のモデル化^{6), 7)}も試みられている。これらの研究を通して, 避難時行動の詳細な再現を行う努力がなされている。

一方, セラオートマトン(CA:cellular automaton, 以下CA)を用いた例もある^{5), 8)}。CAを用い, 歩行者個人個人に歩行のための規則を適用させ, その相互作用として群衆歩行行動のシミュレーションモデルを構築する。これは群衆を群衆としてではなく歩行者の集合としてとらえる方法であり, より現実に沿ったシミュ

レーションモデルが構築できる。

筆者らもCAを使った避難行動のシミュレーションを試みている⁹⁾が, 既存のCAを用いたシミュレーションと異なる点は, 一人の人間の迷路脱出実験¹⁰⁾の結果に基づいて単独歩行CAモデルをまず構築し, そこに最小限の付加的な行動ルールを追加することで群集モデルを構築していることである。また, CA以外にも含めて既存のシミュレーションでは避難者が出口の位置をあらかじめ知っている設定が多いのに対して, 筆者らのアプローチでは出口位置を知らない状態でその位置を探索するアルゴリズムを組込んでいる。現実には, 出口を知っている人もいない人も混在するが, 最悪の状態を想定していることになる。

構築した群集モデルの妥当性は他の既存のシミュレーション結果との比較により行っている。これにより, 複雑な群集としてのルールを記述しなくても既存の群集モデルに相当するシミュレーションが可能かどうかを検証できる。

CAを用いた避難シミュレーションでは,

- 人の行動のモデル化の精緻化
- 避難を円滑に行わせるための構造の検討

という2つのアプローチが考えられる。

既報⁹⁾では, 既存のシミュレーション結果¹⁾のCAによる再現に主眼を置いたので, 避難シミュレーションとしての上記の視点からの検討が不十分であった。そこで本研究では, 以下の点を検討した。

- CA 個体属性の相違の検討
- 避難誘導標識の有効性の検討

これらは, 上述した2つのアプローチへの試みとなっている。

なお, CAによる歩行シミュレーションに関しての記述は, 説明上既報⁹⁾と重複するが, 詳細に関してはそちらを参照されたい。

2. セルオートマトン

CA は、同一にプログラムされ、他と相互作用するオートマトン (automata) を細胞状 (cellular) に配列させたものであり、この配列させたオートマトンのことをセル (cell:細胞) と呼ぶ。

CA は本質的には次にあげる三つの要素を有する。

状態 (state) :

実現可能な値の有限な数の集合に属する値をとる変数であり、その応用に依存した解釈が与えられるセルの性質。本研究で言えば、歩行者、障害物 (構造物)、歩行可能空間などにそれぞれ、例えば、1,2,3... と数値を割り当てることに相当する。

近傍 (neighborhood) :

注目しているセルの周辺のセルの集合。

遷移規則 (transition rules) :

あるセルの現在の状態とその近傍の状態をもとにそのセルの状態を変化させるための規則。

CA は空間、時間、および状態が離散的な活動的システムである。規則的な空間格子状のセルは、有限な状態の一つを有し、以前の時間ステップにおける状態と近傍の状態、ならびに局所的ルール (遷移規則) によってその状態を変化させる。すべてのセルは同期して変化するため、全体は離散的な時間刻みで変化する。

3. 歩行者とその空間のモデル化

3.1 空間のモデル化

シミュレーションモデルを構築するにあたり対象とする空間をモデル化する必要がある。本研究では2次元 CA モデルを採用し、空間格子としてもっとも代表的である図-1 のような空間格子をとるものとした。このメッシュ構造で分割されたそれぞれの要素をセルと呼ぶ。

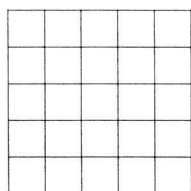


図-1 採用する空間格子

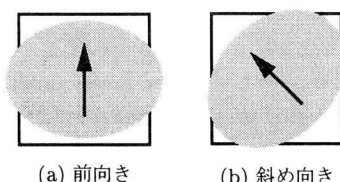


図-2 セルの寸法を 50cm とした時の人体楕円配置

3.2 歩行者のモデル化

シミュレーションに CA を採用するのであるから、セルのとりうる状態の1つとして、「歩行者」を設定する。つまり、図-1 で示したメッシュ構造の1つのセルに1人の人間が存在できるような空間モデルとする。それは、1つのセルに人間1人が存在できるとし、そこからセルの一边の寸法を定めることになる。

人体の平面図は人体楕円と呼ばれる楕円で表され¹¹⁾、その寸法は 45cm×60cm(縦×横)である。仮にセルの一边を 50cm とし、人体楕円を配置した様子を図-2 に示す。ここでは、セルの一边の寸法は 50cm でモデル

化するものとする。

セルのとりうる状態として、歩行者、障害物、歩行可能空間、の3つを考える。

障害物は、壁や柱等などの歩行者が移動できない空間である。また、歩行可能空間は、何もない空間や、扉、階段等の歩行者が移動できる空間である。ただし、本研究では平面空間だけを想定しているため、セルの状態として階段等は取り扱わない。

3.3 シミュレーションの原則

本研究で設定した、最少量の規則によるモデル化を目指した歩行シミュレーションの原則は以下の通りである。

空間 - 閉ざされた平面空間 たとえば地下空間や、部屋といったような空間を想定し、かつ階段等で上下に移動することはない。

歩行者の目的 - 空間からの脱出 すべての歩行者の目的は、現在いる空間からの脱出で統一する。

歩行者 - 個人的特徴はない 性別の差や個人の心理的要因の違い等は考慮せず、すべての歩行者は同一のルールによって動く。

歩行者の移動 - 隣接する8つのセル 時間ステップが1進むごとに、歩行者は隣接する8つのセルから1つを選択して移動する。しかし、場合によっては現在地に留まることも可能である。

4. 避難シミュレーション

4.1 シミュレーション条件

(1) 空間のモデル化

群集歩行のシミュレーションを行うにあたり、清野ら¹⁾の地下街における避難行動解析(図-3)を参考に図-4のように空間のモデル化を行っている。また、既存シミュレーションシステムは、平面空間しか対象としていないために地下空間から脱出するための階段入り口を出口に設定した。

清野らの避難行動解析は図-3 でモデル化された地下空間に、575 人の避難者を通路にランダムに配置させ、その避難行動を解析したものである。地震等の被災直後に、放送や現場での指示等に従って全避難者が一斉に適切な経路を選択して避難し始める状況を想定し、全避難者が最も近い出口に向かって避難を開始するものと仮定している。また、その際地下空間内部の変化や、火災・煙などの要因の影響は考慮していない。

(2) 歩行ルール

歩行者はシミュレーション開始と同時に一番近い出口を目的地とし、目的地に近づくように移動する。またその時、火災や煙等の要因の影響は考慮していない。シミュレーションシステムの基本条件を次に示す。

- 歩行者の目的は空間からの脱出
- 障害物をこえて進むことはできない
- 出口は階段の入り口
- 歩行者の目的地は一番近い出口
- 火災や煙等の環境的要因は考慮しない
- 全ての歩行者は同一の歩行ルールによって動く

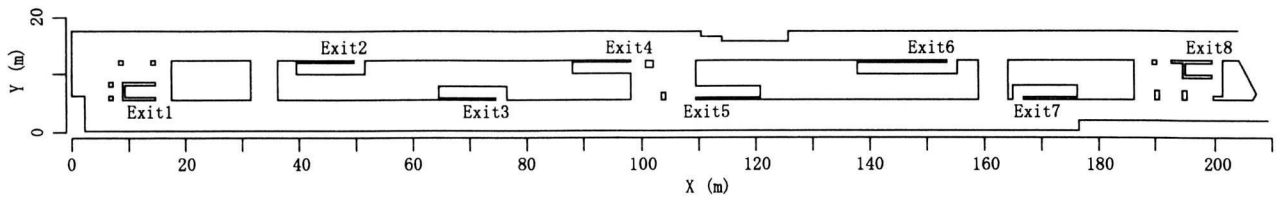


図-3 地下街平面モデル¹⁾

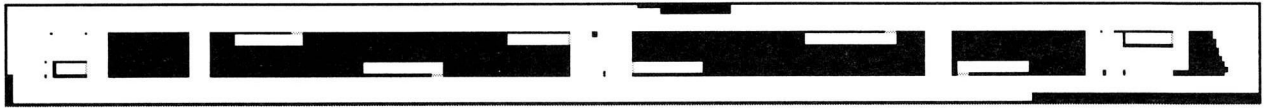


図-4 本研究における空間のモデル化

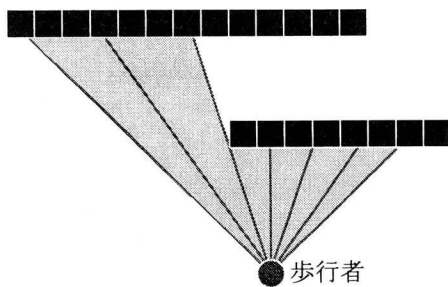


図-5 擬似的な視野の計算

(3) 視野の導入

構築したシミュレーションシステムでは、歩行者の目的地を視野の範囲内から設定するために、シミュレーションに視野を導入し、歩行者の現在地と進行方向から擬似的に視野を計算している。

図-5 に示すように、複数の線を歩行者から障害物にぶつかるまで伸ばし、その線の長さの和を擬似的な視野とする。その際進行方向を 0° とし、左右にそれぞれ 1° ごとに線を伸ばす。この歩行者から障害物まで伸ばされる線のことを以下「視野線」という言葉で表すことにする。視野角を α 、正面すなわち 0° の時の視野線の長さを C 、右側に i° の時の視野線の長さを $R(i)$ 、左側に i° の時の視野線の長さを $L(i)$ とすると、視野 V は次式で表される。

$$V = C + \sum_{i=1}^{\frac{\alpha}{2}} R(i) + \sum_{i=1}^{\frac{\alpha}{2}} L(i) \quad (1)$$

以下、特に注意書きのない場合は視野という言葉は、この方法で計算される擬似的な視野を指すものとする。

なお、隣接視野線の交差角度が 1° 、かつ、一つのセルの辺長が 50cm であることから、視野線の最大長を 57 セルとしている。

また、視野の導入目的は移動目的地の設定であり、後述する出口標識や誘導標識と障害物を認識することに用いる。障害物(壁)は天井までの高さを有し、標識類

は天井付近に設定されているものとし、人間の存在によって認識が妨げられないものとした。また、人間は近傍に入った場合にのみ障害物として認識して回避行動をとるものとし、視野内での認識対象とはしていない。

(4) 目的地の設定

歩行者の目的は空間からの脱出であり、それは出口や出口を指し示す標識を探すことと同じことである。視野に出口や標識が存在していれば、目的地を出口や標識にすればよい。視野に出口が存在しない場合には、以下の手順で目的地を設定する。

1. 進行方向を中心にして視野を左右に分割
2. 左右の視野のうち視野の広い方を選択
3. 選択した視野の中で一番長い視野線を選択
4. 選択した視野線の方向で、その視野線の長さの半分の地点が目的地

これは、最も遠くまで行けそうな方向に進むことをイメージしている。こうして、設定した目的地まで到達した後、再度次の目的地を設定するという手順を出口にたどり着くまで繰り返す。ただし、歩行者の目的は空間からの脱出であり、換言すれば出口を探すことであるので、目的地が出口もしくは出口標識以外の場合、移動中でも出口標識や誘導標識を探索することとする。この場合は次項で述べる視野角は 180° に設定する。

(5) 視野角

近づくように動く。そして目的地に到着後に新たな目的地を探索する。人間が快適に見ることのできる視野角は 60° から 70° 程度である¹¹⁾。しかし、ここでは、空間からの脱出という一種の探索行動であるので、目的地に到着したら周囲を見回すということを考慮して、視野角は 180° で設定する。また視野に入る地点を目的地としているので、障害物回避行動も自然とこの歩行ルールに含まれることとなる。

ただし最初の1回、つまり迷路に入った時(シミュレーション開始時)と出口や標識を見つけられないまま視野線中点に到達した場合には視野角を 360° に設定し、周囲の全てを見回し自ら進行方向を決める。

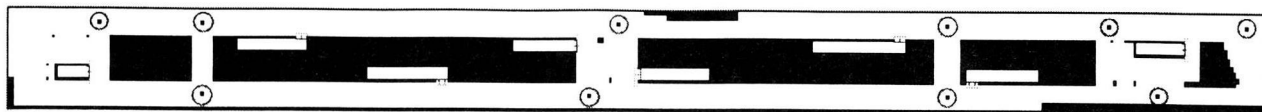
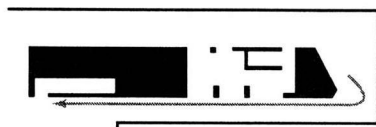


図-7 誘導標識の設置



Exit 8(図-3) を認識しない例

図-6 距離的に近い出口を認識しない例

4.2 新しい標識の設置

既報のシミュレーション⁹⁾では、出口の前にそれを示す標識が設置されているだけであった。つまり、防災上必要であるはず¹²⁾の進行方向の手掛かりとなる標識や死角にある出口を指し示すような標識はモデル化されていない。そのため、歩行者の近くに出口が存在していたとしても出口が視認できず、距離的に離れている出口を選択する場合が生じる。その例を図-6に示す。

このように出口が歩行者の視野の外、つまり死角にあるために、近くに存在する出口を認識できない。これは、既存のシミュレーション結果¹⁾の再現に主眼を置いたため、避難行動のシミュレーションとしては、行動ルールが不適切なのか、設定した構造が不適切なのか、を検討することになる。

現実にこのような事態が生じた場合、出口の存在を知り得るのは、出口の付近に出口が存在することを示す標識が存在するからである。

そこで、適当な場所に進行方向の手掛かりとなる標識や死角にある出口を指し示すような標識を設置する。既報⁹⁾で設置されていた出口前の標識を出口標識、今回設置する新しい標識を誘導標識と呼ぶこととする。

ここで考える誘導標識は、通路誘導灯¹⁾と働きがよく似ている。そこで、誘導標識の設置場所は通路誘導灯の設置場所を参考にする。法律で定められた通路誘導灯の設置場所は、「廊下の曲がり角に設けること」とある¹²⁾。これにならい、曲がり角計10箇所に誘導標識を設置した。図-7に誘導標識の設置場所の全体図を示す。丸で囲まれている正方形が誘導標識を表す。

出口標識は出口のすぐ前に設置されている。そのため、出口標識を探すことは出口を探すことと同じと言える。よって歩行者は、まず最初に出口標識を探し、出口標識に到着後に出口を探す。誘導標識は出口の前ではなく、曲がり角に設置してあり、出口の手掛かりとなるような位置に設置してある。よって歩行者は、出口標識を探し、確認ができなかった後に誘導標識を探すこととする。

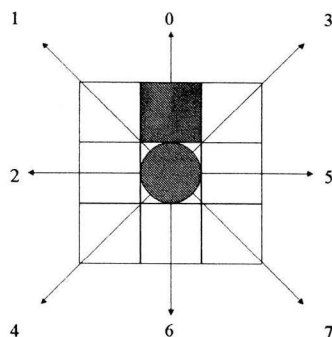


図-8 目的地が向かって左側の場合

歩行者の目的は空間からの脱出であり、出口を探すことでもある。よって、目的地が出口もしくは出口標識以外の場合、移動中でも出口標識や誘導標識を探索することとする。特に、目的地が視野線の中心点の場合は、出口標識と誘導標識を探し(視野角は180°)、それでも出口標識や誘導標識が見つからず目的地(もっとも長い視野線の中点)に到着した場合は、視野を360°に再設定し、新たに目的地を探索して設定する。

4.3 人間の行動・属性のモデル化

(1) 回避行動

回避行動の特徴は次の2つである。

1. 移動可能場所の探索順序
2. 目的地から遠くなる場所でも移動できること

1に関して、目的地が進行方向の左右どちらに存在するかによって、空いているセルの探索する順序を決定することとする。進行方向の左側に目的地がある場合は移動可能場所を左側中心に調べ、逆に進行方向の右側に目的地がある場合は右側中心に調べることとする。

空いているセルの探索順序の決定の例(目的地が左側にある場合)を図-8示す。進行方向(0の方向)に障害物や歩行者がいた場合に、図で示された1から7の順序で空いている空間を探索する。目的地が右側にある場合には、図を左右逆転させて探索する。

2に関して、回り込みを考慮して目的地から遠くなる場合でも、斜め後ろに移動可能であれば移動できるとした。しかし、回避行動をとるために進行方向の真後ろや目的地と正反対の方向に移動することは、ほとんどないであろう。よって、進行方向の真後ろ(図-8での6の方向)と目的地と正反対の方向(図-8での7の方向)に関しては移動しないとする。

回避行動のフローチャートを図-9に示す。

¹⁾ 通路誘導灯とは、廊下、階段、通路その他避難設備が設けられている場所の照度を避難上有効に保つ白色灯で、避難の方向を示す緑色の矢印・文字が示されたものである。

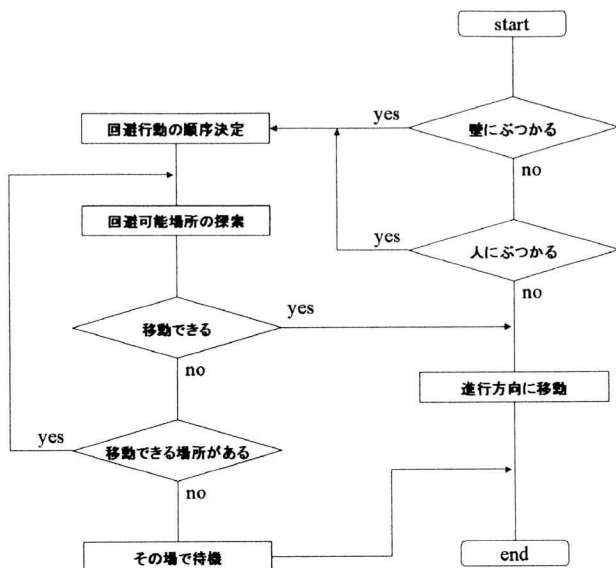


図-9 回避行動

(2) 歩行者速度

ここでは、歩行者の個性として歩行者速度を考える。歩行者速度を選んだ理由として、年齢、性別、身体の疲労、身体の障害等の個人的要因が最も顕著に影響を与えるのは、歩行者速度であると考えたからである。

歩行者速度は、速い、普通、遅いの3種類とする。これは、年齢、身体の障害、子供連れや荷物を持つといった従属的な要因等からの速度の違いをイメージしている。本研究では、速い速度の歩行者は1ステップに1度、普通の速度の歩行者は2ステップに1度、遅い速度の歩行者は3ステップに1度それぞれ動くことにより、シミュレーション上での速度の違いとする。また、シミュレーションで対象にした575人の歩行者の内、どのくらいの人数をどの速度とするかは、速い速度と遅い速度の歩行者が192人、普通の速度の歩行者が191人とし、ほぼ数的な偏りがないようにした。

なお、厳密には、着目セルの前後左右に移動する場合と、斜めに移動する場合では移動距離が異なる(前者は後者の $1/\sqrt{2}$ 倍)が、ここでは、両者を区別せず、1セル移動するステップ数で歩行者の速度を設定する。

(3) 時間のモデル化

シミュレーションの前に時間のモデル化、すなわち時間ステップの1ステップを何秒でモデル化するかを決めなければならない。歩行速度の決定要因として最も重要なものは、交通の密度である¹¹⁾。そこで、図-10のような単純な空間からの脱出という歩行シミュレーションを行い、時間のモデル化を行う。グレイの円が歩行者を表し、部屋の中に300人をランダムに配置した。

既報⁹⁾の場合、シミュレーションが終了するのに要した時間ステップの10回平均は146.1ステップであった。歩行者が全て速い、普通、遅いの速度の場合、シミュレーションが終了するのに要した時間ステップの10回平均を表-1の流動速度欄に示す。

出口は4つのセルからなっており、セルは一边0.5m

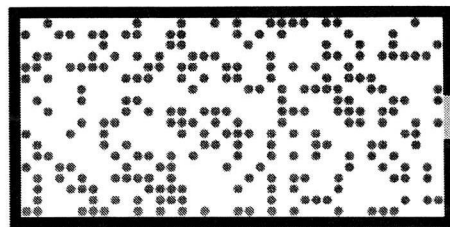


図-10 単純な群集歩行シミュレーション

表-1 時間ステップの平均値と流動速度

シミュレーションの種類	Time Step 数の平均値	流動速度 (人/Time Step)
既報 ⁹⁾	146.1	2.05
速い速度の歩行者のみ	104.8	2.86
普通の速度の歩行者のみ	207.6	1.45
遅い速度の歩行者のみ	315.3	0.95

でモデル化しているために、出口の幅員は2mとなる。民間用退避壕の入口幅員設計基準のための研究によれば、ほとんどの条件下で67人/m・分の流動が可能である¹¹⁾。これは2mの幅員で毎秒2.23人の流動が可能であることに等しい。

今回、速度が速い、普通、遅いの場合を計算した結果を表-1のに示す。2.23人/secに一番近いのは、速い速度の場合と普通の速度の場合の中間付近であるので、本研究の時間ステップは、1.5ステップを1秒とする。

5. シミュレーション結果の考察

5.1 誘導標識設置

誘導標識設置前、設置後のシミュレーション結果の例を図-11、図-12に示す。いずれの図も初期状態(Time Step 0)の状態と併せて示している。

Time Step 30における誘導標識設置前(図-11(b))と誘導標識設置後(図-12(b))を比較すると、歩行者が遠くの出口に向かうことなく、死角にある近くの出口に向かっていくことが確認できる。このことから、誘導標識設置の有効性が確認でき、最適配置問題への展開が可能となる。

5.2 回避行動変更

回避行動変更前後のシミュレーション結果の例を図-13、図-14に示す。いずれの図も初期状態(Time Step 0)の状態と併せて示している。

Time Step 20における回避行動変更前(図-13(b))と回避行動変更後(図-14(b))を比較すると、図-13(b)では待ち行列が形成されているのに比べて、図-14(b)では、歩行者が行列を形成するのではなく、出口に集まる現象が確認できる。これは、行列の後方にいた歩行者が前に回り込む動きができたためと考えられる。回避行動変更は人間の行動をよりよく表現するのに有効

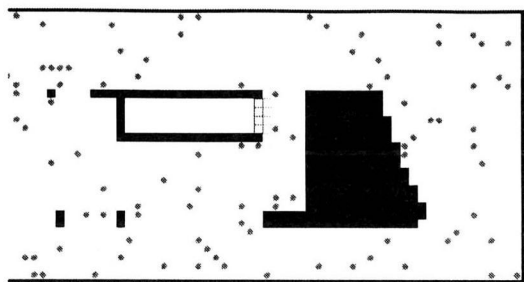


図-11(a) Time Step 0



図-11(b) Time Step 30

図-11 誘導標識設置前のシミュレーション結果の例

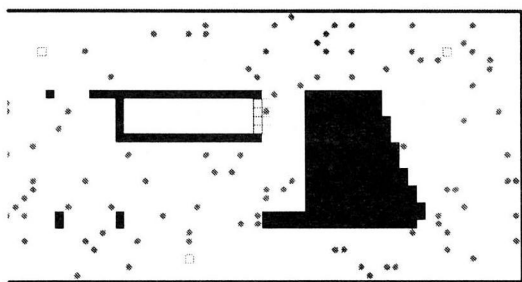


図-12(a) Time Step 0

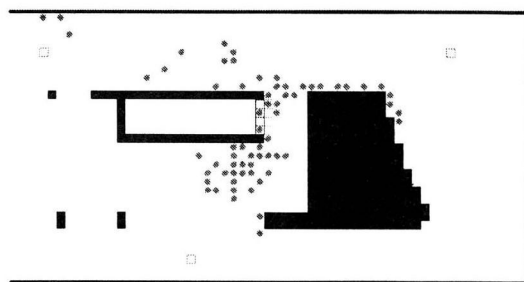


図-12(b) Time Step 30

図-12 誘導標識設置後のシミュレーション結果の例

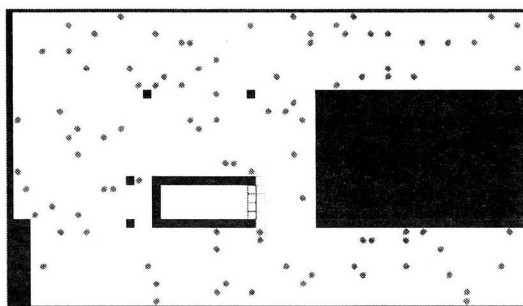


図-13(a) Time Step 0

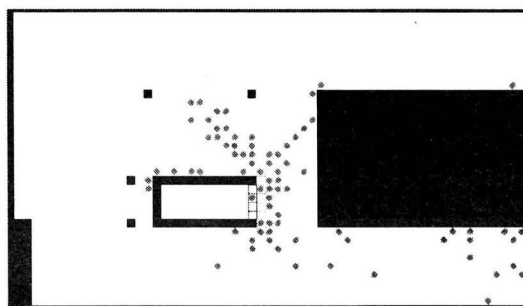


図-13(b) Time Step 20

図-13 回避行動設定前のシミュレーション結果の例

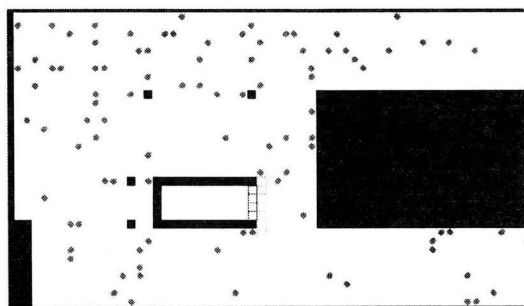


図-14(a) Time Step 0

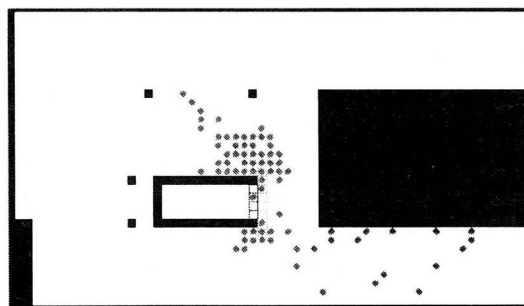


図-14(b) Time Step 20

図-14 回避行動設定後のシミュレーション結果の例

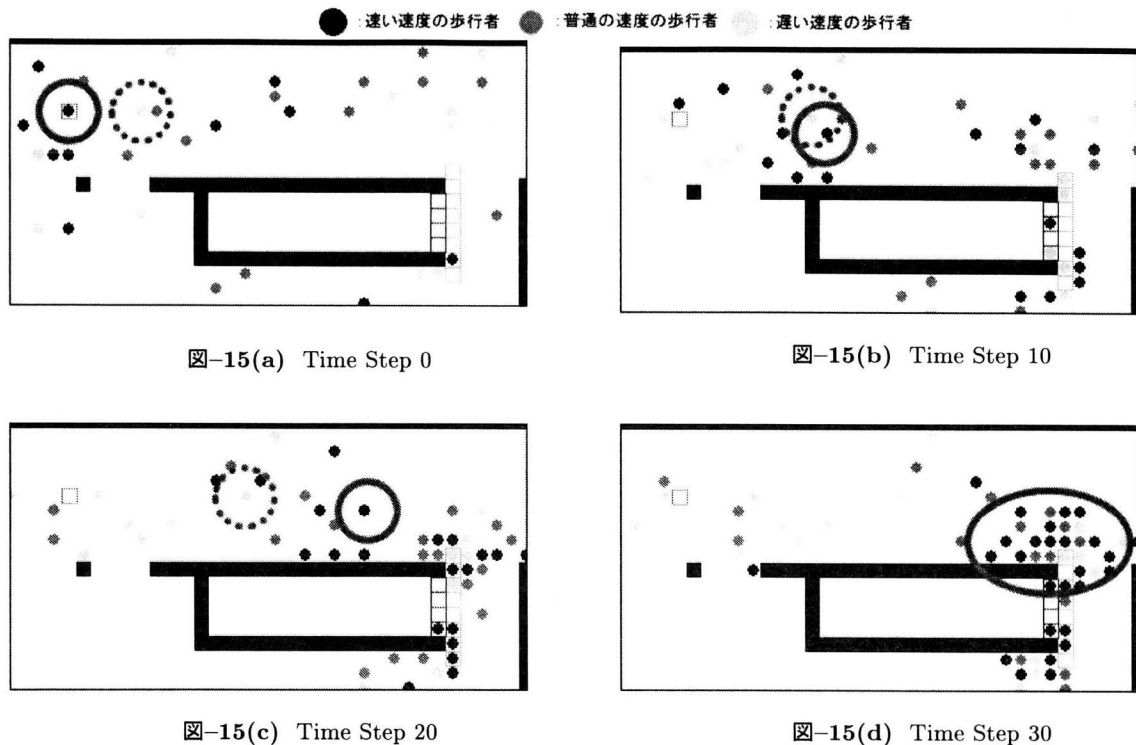


図-15 移動速度が混在した場合のシミュレーション結果の例

であることがわかる。

5.3 速度の追加

図-15(a), 図-15(b), 図-15(c)において, 実線の丸で囲まれた速い速度の歩行者と点線の丸で囲まれた遅い速度の歩行者に注目すると, 速い速度の歩行者が遅い速度の歩行者を追い抜いていく現象を確認できる。また図-15(d)では, 速い速度の歩行者がその他の速度の歩行者に進行を阻まれ, 脱出できないという現象を確認できる。これは, 現実の場合の避難行動でも起こりうる現象であり, また将棋倒しや群集雪崩といった重大な事故を引き起こす要因でもある。

以上より, 異なる歩行者速度を考慮することによって, より現実に近い状況を再現できたと言える。

6. 結論

6.1 まとめ

本研究では, CA を用いて避難シミュレーションを

- 人の行動のモデル化の精緻化
- 避難を円滑に行わせるための構造の検討

という2つの視点から捉え, 以下の3つの項目に関して検討を行った。

- 迂回行動を組み込むことができた。
- 移動速度の異なる人間をモデル化できた。
- 避難誘導標識の効果を確認することができた。

迂回行動, 異なる移動速度の導入は群衆行動の再現における人間の記述に関して, より現実に近づいたといえる。また, 避難誘導標識は実際の法令を再現した

ものといえるが, 既存の構造物への付加設備が避難速度向上に役立つことの一例を示している。

もとより, 筆者らの基本姿勢である最小限のルールでの避難行動の再現にはこれだけで必要十分な検討がなされたわけではない。

今後も, 様々な行動規則の導入とその効果の確認を行いつつ, 避難を考慮に入れた構造施設の配置や既設構造への付加設備の効果などを検討していきたいと考えている。特に, 移動障害物としての人間は今回の取り扱いでは視野内に存在しても近傍に入るまでは無視しているが, 人間の認識とそれに伴う行動ルールを付加することが群衆歩行モデル化の大きな課題となる。

参考文献

- 1) 清野純史, 三浦房紀, 八木宏晃: 個別要素法を用いた被災時の避難行動シミュレーション, 土木学会論文集, No.591/I-43, pp.365-378, 1998.
- 2) 堀内三郎, 小林正美: 都市防災計画のシステム化に関する研究(II)-防災システムのシミュレーション-, 日本建築学会論文報告集, 第258号, pp.123-129, 1975.
- 3) 瀧本浩一, 三浦房紀, 清野純史: 防災要員と避難者の間の情報の伝達を考慮に入れた避難行動シミュレーション, 土木学会論文集, No.537/I-35, pp.257-265, 1996.
- 4) 位寄和久, 池原義郎, 中島高史, 中村良三, 宇土正浩, 渡辺仁史: 人間-空間系の研究 建築計画のためのネットワーク・オートマトンモデル, 日本建築学会論文集, 第298号, pp.89-97, 1980.
- 5) 森下信, 山本英, 中野孝昭: セルラオートマトン法による群衆の流れの解析, 第46回応用力学連合講演会 講演予稿集, pp.179-180, 1996.
- 6) 建部謙治, 中島一: 静止した障害物に対する単独歩行者の回避行動 歩行者の回避行動に関する研究(I), 日本建築学会計

- 画系論文報告集, 第 418 号, pp.51-57, 1990.
- 7) 建部謙治, 辻本誠, 志田弘二: 回避行動開始点の判定と前方回避距離 歩行者の回避行動に関する研究 (II), 日本建築学会計画系論文集, 第 465 号, pp.95-104, 1994.
- 8) 内田広明, 松田泰治, 大塚久哲, 樗木 武: セルオートマトン法を用いた天神地下街の避難行動シミュレーションに関する研究, 第 56 回 土木学会年次学術講演会講演概要集 (CD-ROM), CS4-001, 2001.10.
- 9) 近田康夫, 廣瀬智士, 城戸隆良: CA を用いた歩行シミュレーションモデルの構築, 土木情報システム論文集, Vol.9, pp.19-30, 2000.10.
- 10) 横山秀史, 永田茂, 山崎文雄, 海老原学: 迷路実験による緊急時の人間行動特性, 土木学会論文集 No.441/ I -18, pp.107-115, 1992.
- 11) ジョン・J・フルーイン 著, 長島正充 訳: 歩行者の空間, pp.27-74, 134-138, 鹿島出版会, 1974.
- 12) 東京消防行政研究会: 火災予防条例の解説, pp.396-400, 全国加除法令出版株式会社, 1982.8.

(2002年9月13日受付)