

避難者間の情報伝達を考慮した地下街からの避難シミュレーション Simulation of evacuation behavior in underground shopping mall in relation to the effect of information transmission between evacuees

麻生稔彦*, 佐々野輝敏**, 朝位孝二*

Toshihiko ASO, Terutoshi SASANO and Koji ASAI

Behavior of evacuees in an underground space is influenced by various factors. One important factor is the transfer of information between evacuees. In this research, an evacuation simulation from underground shopping mall was conducted considering the effect of communication between evacuees. Evacuation behavior is analyzed using the concept of cellular automata. In this simulation, the disaster outbreak information and exit blockade information are transferred between evacuees. This paper discusses the relationship between evacuation characteristics and information transfer based on the calculation results. It was found that the behavior of evacuees is strongly influenced by the transmission of information during the first stage of disaster.

Key words: evacuation, information transfer, underground mall, cell automata

1. まえがき

構造物を建設する際、安全性、経済性、施工性、利便性、将来性、環境との調和などを考慮することは不可欠である。これらに加え、防災性を考慮に入れ、人的被害を最小限に留めることは大変重要であり、防災対策や避難計画を立案する上で、災害時における人間の行動を予測することは極めて重要である。

災害時の避難行動をシミュレートする方法はこれまでも種々研究されている。清野らは個別要素法を用いて人間行動をシミュレートする方法を提案しており¹⁾、横山らはポテンシャルモデルによるシミュレーション手法の避難行動への適用性を検討している²⁾。一方、簡単なルールにより人間の行動を再現する試みとして、セルオートマトンを用いた避難行動シミュレーションに関する研究が近年行われている。松田らはセルオートマトンの状態量として出口までの距離、障害物、堂々巡り、環境、誘導灯、出火点、他の人間の向きを考慮し、福岡市天神地下街を対象とした種々の検討を行っている^{3),4)}。また、近田らもセルオートマトンを用いた歩行・避難シミュレーションに関する報告を行っている^{5),6)}。

既往のこれらの研究では、災害発生時点から全ての避難者が同時に避難を開始することとされている。しかし、火災や浸水といった災害では災害発生の認知が局所的であり、対象空間内に存在する全ての人間に災害情報が伝達されるまでには時間差が生じる場合がある。このような場合には、避難行動は局所的に開始され、災害情報の伝達に伴って、避難行動が開始されるとする必要がある。また、避難経路の選択にあたって

キーワード：避難，情報伝達，地下街，セルオートマトン

* 正会員 博(工) 山口大学助教授 工学部社会建設工学科

** 学生会員 山口大学大学院 理工学研究科社会建設工学専攻

は、避難者にとって既知の避難口が使用不可能な状態になることも想定され、この場合にも避難者間の情報の受け渡しにより、新たな避難経路が選定される。もとより、災害時の避難行動には種々の要因が影響するが、避難者間の情報伝達も避難行動の様式を決定する大きな要因の一つであると考えられる。

そこで本研究では、避難者間の情報伝達に着目した避難シミュレーションを行い、情報の取得による避難行動について検討をおこなう。さらに、本検討により、避難シミュレーションにおける情報伝達の必要性を確認する。このために本論文では、①火災初期状態における情報の伝わりと避難開始行動、②出口が途絶された場合の情報の伝わりと避難経路の変更について検討を行う。本研究で用いる避難シミュレーションは個々の人間ごとに特性を設定する必要があるため、セルオートマトン法を用いた。シミュレーションプログラムを構築するにあたり、本研究では①災害発生までの人間の行動である初期運動、②避難開始点から避難口にいたるまでの中間目標および③避難者が密集した場合の回避・待機行動を取り入れ、より現実的な避難行動のシミュレーションを試みる。

2. 避難行動シミュレーションの概要

セルオートマトンを用いた避難シミュレーションについては、既往の論文でも多く示されている。そこで、ここでは本研究のシミュレーションの概要を述べるにとどめる。

2.1 人および空間のモデル化

本研究では人間を直径 0.5m の円にモデル化し、対象空間を人間一人が入れる大きさのセルにより均等に分割する。これにより、1つのセルには避難者1人のみしか存在できないこととなる。各セルは、人間セル、障害物セル、移動可能セルのいずれかとする。ここで障害物セルとは、壁や柱などの人間が存在し得ないセルであり、移動可能セルとは何も無い空間や出口を指す。避難者は次計算ステップにおいて、近傍の8つのセルのいずれかへの移動または現時点でのセルでの待機のいずれかの挙動をすることとする。なお、全ての避難者が使用可能な出口セルに到達したら避難完了とする。

8	1	2
7	●	3
6	5	4

図-1 近傍セル

2.2 局所近傍則と状態量

これまでのセルオートマトンを用いた避難シミュレーションによる研究を参考に、本研究では避難者が存在するセルの近傍8つのセルに対して、以下の状態量をそれぞれ算出する。ここで、添字の i ($i=1-8$)は図-1に示す近傍セルの番号である。

- | | | | |
|---------------|-------------|------------|-----------------|
| ① 目標へ方向による状態量 | $f_D^{(i)}$ | ② 視程による状態量 | $f_V^{(i)}$ |
| ③ 履歴による状態量 | $f_H^{(i)}$ | ④ 密度による状態量 | $f_{den}^{(i)}$ |

これら4つの状態量の総和を各近傍セルの状態量とし、本シミュレーションでは局所近傍則を、「近傍セルの中で状態量が最も小さいセルが次ステップの自身セルとなる。」と定める。4つの状態量の合計を $f^{(i)}$ とするとセルの状態量は(1)式となる。

$$f^{(i)} = f_D^{(i)} + f_V^{(i)} + f_H^{(i)} + f_{den}^{(i)} \quad (1)$$

今回のシミュレーションではできるだけ単純な状態量を用いて避難者の移動を表現することを目指した。そのために、後に述べる中間目標を各避難者が設定し脱出経路を細分化することにより、上記の状態量でのスムーズな移動を可能とした。

2.2.1 方向による状態量 f_D

この状態量は人間が出口に向かう挙動を表現するために、現在位置から目標セルへ方向により決定し、

左右方向 f_{DH} 、上下方向 f_{DV} および角度 f_{DR} の3つの視点から判断する。これら3つの方向による状態量 f_{DH} 、 f_{DV} 、 f_{DR} の総和を方向による状態量 f_v とする。

$$f_v^{(i)} = f_{DH}^{(i)} + f_{DV}^{(i)} + f_{DR}^{(i)} \quad (2)$$

ここで、本シミュレーションでは想定する空間の左上隅を原点とし、右へ数えたセル数を x 座標値、下へ数えたセル数を y 座標値とする。目標セルの座標を (x_D, y_D) 、現在の自身セルの座標を (x_P, y_P) とする。

(i) 左右方向 f_{DH}

目標セルが左右どちらの方向にあるかにより次の状態量を与える。 $(x_D - x_P) > 0$ では6、7、8番の近傍セルに状態量 f_{DH} を与え、 $(x_D - x_P) < 0$ では2、3、4番の近傍セルに状態量 f_{DH} を与える。

(ii) 上下方向 f_{DV}

目標セルが上下どちらの方向にあるかにより次の状態量を与える。 $(y_D - y_P) > 0$ のとき1、2、8番の近傍セルに状態量 f_{DV} を与え、 $(y_D - y_P) < 0$ のとき4、5、6番の近傍セルに状態量 f_{DV} を与える。

(iii) 角度 f_{DR}

目標セルがどの角度にあるかにより次の状態量を与える。現在の自身セルと目標セルとのなす角度 θ は次式により求める。

$$\theta = \tan^{-1} \frac{y_D - y_P}{x_D - x_P} \quad (3)$$

自身セルの周りを8等分し、 θ が対応する領域以外のセルに状態量 f_{DR} を与える。

今回のシミュレーションでは $f_{DH} = 20$ 、 $f_{DV} = 20$ 、 $f_{DR} = 10$ とする。

2.2.2 視程による状態量 f_v

避難者が避難する場合に、広い空間に移動するという心理面を考慮するために視程による状態量 f_v を導入する。

$$f_v = \alpha \frac{1}{N_i} + \beta \quad (i = 1 \sim 8) \quad (4)$$

ここで、 N_i は近傍セル方向(8方向)の障害物までのセル数を表しており、 α 、 β は定数である。これにより障害物までのセル数が大きいほど状態量が小さくなる。なお本研究では $\alpha = 3.0$ 、 $\beta = 0.0$ を用いることとした。

2.2.3 履歴による状態量 f_H

一度通ったセルには戻らず、後ずさりしないことを考慮するために、履歴による状態量 f_H を用いる。前ステップに自身が存在したセルに状態量として f_H を加える。なお、本研究では $f_H = 30$ とする。

2.2.4 密度による状態量 f_{den}

避難者は速やかに避難するため密集を避けることが考えられる。そこで、本研究では、密度の要因を取り入れる。この状態量は、現在の自身セルから近傍セル8つの方向に対して3つ先のセルとその周りのセルの合計9つのセルに存在する避難者の数を確認する。密度による状態量関数は次式により算出する。

$$f_{den} = A \cdot D_i + B \quad (i = 1 \sim 8) \quad (5)$$

ここで、 D_i は3つ先のセルの周りにいる避難者の数を表す。なお、本研究では $A = 0.4$ 、 $B = 5.0$ としている。

2.3 中間目標

一般に人の移動では最終目的地があり、そこへ到達するまでにはいくつかの中間目標が無意識のうちに設

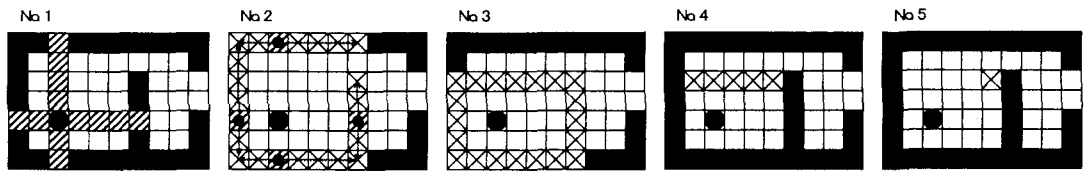


図-2 中間目標の設定

定されることが考えられる。そこで本研究では、最終目的地を使用が可能な出口とし、そこへ到達するまでに避難者ごとに中間目標を設定することとする。以下に、今回用いた中間目標を設定する手順を示す。

- ① 上下・左右に自身から腕を伸ばし最も近い障害物との交点を探す。(図-2のNo.1参照)
- ② ①の交点から腕を伸ばした方向と直角方向に、①で求めた交点までのセル数内にある障害物の切れ目を探す。探索する腕が交差した場合には切れ目なしとする。(図-2のNo.2参照)
- ③ 切れ目までのセル数が障害物までのセル数よりも少なければ、腕の長さを縮める。最終的な腕を囲むような長方形を最小範囲と呼ぶ。(図-2のNo.3参照)
- ④ この最小範囲上のセルの中で移動可能セルが中間目標候補セル群となる。(図-2のNo.4参照)
- ⑤ この中間目標候補セル群の中で、自身セルから中間目標候補セルまでの距離と中間目標候補セルから出口までの距離の和が最も小さいセルを中間目標とする。(図-2のNo.5参照)

以上の中間目標は、避難を開始した避難者全員に対し、毎ステップごとに設定する。

図-3はこの中間目標の設定を用いて行った、20×30セルの空間における単独避難時の避難者の軌跡である。中間目標を設定することにより、ほぼ最短経路での脱出が表現できている。

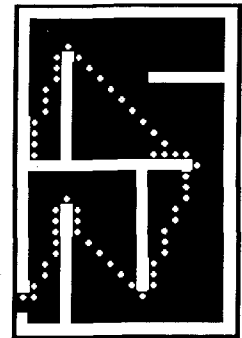


図-3 中間目標を用いた避難

2.4 回避・待機行動

避難者が複数存在して密集している場合には、次ステップに複数の避難者が同じセルを移動先に選定することが考えられる。この場合には、シミュレーションの原則である「1つのセルには避難者1人のみ存在できる」に違反する。そこで本研究では、回避・待機行動を取り入れることにより対応する。ここで回避行動とは、移動先に選んだセルとは別なセルを移動先に選んで移動することを示し、待機行動とは、現ステップのセルにそのまま残ることを示す。

2.4.1 優先順位

移動先のセルが他者と重なった場合、セルを1人の避難者が選択できるように優先順位をつける。これは、優先順位をつけることで移動先のセルが重なった場合の選択優先権を与えるものである。優先順位は、出口セルに近い者から順に若い番号をつけていく。出口セルが複数ある場合には、それぞれの避難者に対して、最も近い出口セルを用いて判断する。

2.4.2 回避・待機行動

次ステップのセルを自身より優先順位の若い避難者が選んだ場合、回避・待機行動をとる。回避行動をとる場合、移動可能なセルを探索し中間目標までの距離が最も短いセルを次ステップのセルとする。ここでの移動可能セルとは、障害物セルまたは、火災区域セル以外のセルであり、かつ自身より優先順位の若い避難者が移動または回避する予定のないセルである。移動可能セルがない場合には待機行動をとり、現ステップのセルに留まる。

図-4は20×30セルの空間に126人の避難者を均等に配置し、回避・待機行動を考慮して行った避難シミュレーションの5ステップごとの状況である。回避・待機行動を考慮することにより出口付近でアーチが形成されており、実際の現象に近い挙動が表現できる。

2.5 情報伝達

2.5.1 災害発生情報

本研究におけるシミュレーションでは、火災を想定している。計算ステップ数が、あらかじめ定めた火災発生ステップになると、火災が発生する区域のセルに火災区域を表す状態量を与える。避難者の近傍セルおよび自身セルの計9つのセルの中に火災を表す状態量を持ったセルが存在すれば、その避難者は火災を認識し避難を開始するものとする。

避難を開始した避難者は、被害を最小限に留めるために災害発生情報を他の避難者に伝え、他者の避難を促すことが考えられる。そこで、本研究では災害発生情報の共有を考慮する。各避難者は、近傍の8つのセルに災害発生情報を持っていない避難者が存在すれば、その避難者に災害発生情報を伝える。災害発生情報を得た人は避難を開始する。

2.5.2 出口途絶情報

火災発生情報の他に出口途絶情報も避難する際には重要な情報となる。通常使用できる出口が使用できない状態にあるとき、その情報を知った者と知らない者では、前者の方が速やかに避難できる。本研究では、この出口途絶情報の伝達にも着目した。

避難者は、近傍の8つのセルの中に出口があれば、その出口が使用できるか判断し、出口が使用できなければ他の出口を目指して避難する。この際、使用できない出口が存在すれば、避難者はその出口を構成するセル群の全てのセルを避難できないセルとみなす。火災情報と同様に避難者は被害を最小限に留めようと自身が持っている情報を他の避難者に伝えながら避難すると考えられる。各避難者は、近傍の8つのセルに他の避難者が存在すれば、出口情報の共有を行う。自身が持っている使用できない出口情報を近傍セルに存在する他の避難者に供給し、もし自分の知らない出口情報を相手を持っているならば、その出口情報を供給してもらう。

2.6 シミュレーションの流れ

図-5に本シミュレーションのフローチャートを示す。本研究での避難者は、中間目標を各自設定して、その中間目標に向かって移動する。本研究では、火災が発生することを想定しており、火災を認識した避難者は避難行動を開始する。また、火災が発生したことを全ての避難者に火災発生後、時間をおいて伝える。火災発生を全ての避難者に伝えた後は、全ての避難者は、火災を認識し、避難行動を開始する。

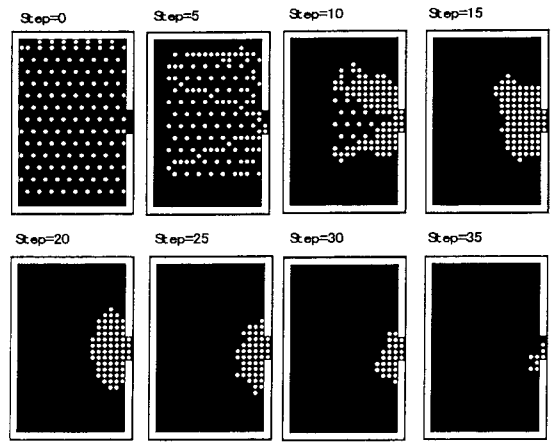


図-4 回避・待機行動

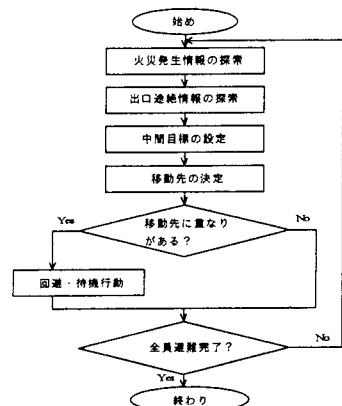


図-5 シミュレーションの流れ

3. 避難シミュレーション

災害には、地震、火災、浸水などの水害等が考えられる。地震は発生すると同時に施設を利用する全員に災害が発生したことが認識され、避難行動はほぼ全員が同時に開始する。しかし、火災や水害は、局所的に発生するため災害発生情報は局所的にしか伝わらないと考えられ、避難行動の開始時間に個人差が生まれることが考えられる。本研究では、災害として火災を想定し避難者が火災発生を認識してから避難行動を開始する。本研究のように

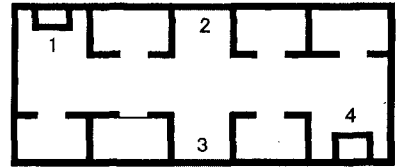


図-6 空間モデル

情報の伝達を図る場合には災害発生以前には各々の人間が独立に移動していることが必要である。そこで、火災発生情報を持っていない避難者は、上述の視程および密度による状態量のみで移動するものとする。ただし、出口セルには移動しないものとした。

図-6に本研究でシミュレーションの対象とした地下空間モデルを示す。対象空間は横28m、縦12mであり、内部に店舗を有するものとした。このモデルは実際の地下街に比べて非常に小規模であるが、本研究では避難者間の情報伝達に主眼を置くためこのようなモデルとした。この空間内には4カ所の出口があり、図中左下の斜線の部分が火災発生区域である

3.1 火災発生情報の伝達と避難行動

局所的に発生した火災に対しての避難シミュレーションをおこなった。シミュレーションでは計算開始から10ステップ目に火災が発生し、火災を認識するか避難者からの火災情報を得た場合に避難を開始する。火災発生後、火災報知器を想定して避難者全員に火災情報を与える。この火災情報を与えるステップを一斉伝達ステップと呼び、一斉伝達ステップとして10～100ステップまで10ステップごととした。初期避難者数は60、80、100、120、140人の5通りとし、それぞれの避難者数の場合について、一斉伝達ステップを変化させた計算をおこなった。

図-7は避難者数100人、一斉伝達ステップ60の場合の避難行動である。図中の黒丸は避難を開始している

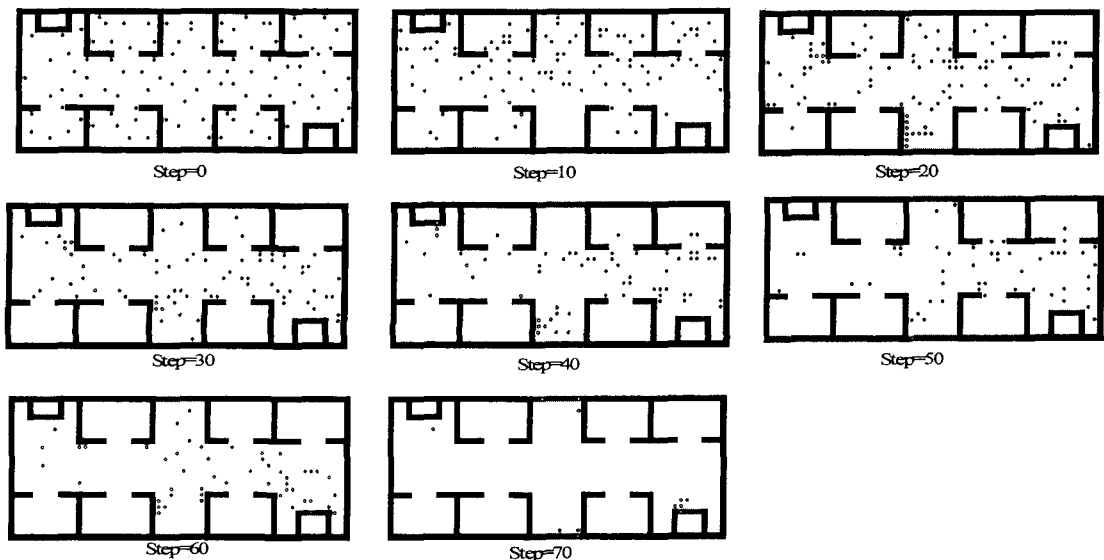


図-7 情報伝達による避難行動の開始

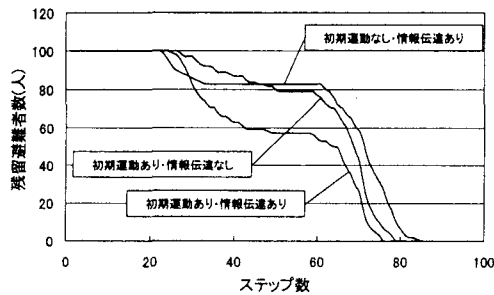


図-8 残留避難者数

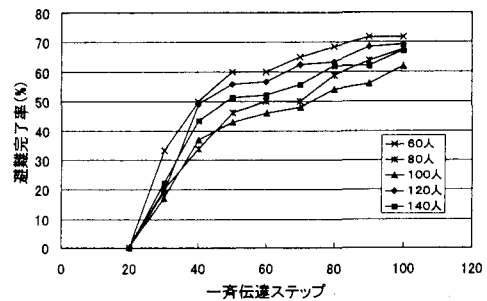


図-9 避難完了率

ない状態であり、白丸は避難を開始した避難者を示す。火災発生と同時に火災区域にいる避難者が避難を開始し、これらの避難者から情報を得た避難者が順次避難を開始する様が見て取れる。その結果、対象空間の左側では40ステップ程度以降は存在する人が少ないのに対し、情報が伝わらない右側では多くの人が残留する。60ステップ目に火災報知器が作動し、火災情報が全ての人に伝達されると、全員が避難を開始する。このシミュレーションにより局所的な避難の開始と情報の授受による避難行動の開始が再現できたと考えられる。図-8はこの場合の残留避難者数の推移である。この図には比較のために、初期運動があり情報伝達が無い場合および初期運動と情報伝達のいずれも無い場合を併せて示す。この図より、火災発生から全避難者へ情報が伝えられるまでの間に局所的な避難行動が発生し、多くの避難者が避難していることがわかる。

局所的な避難行動を評価するために、一斉伝達ステップでの避難完了率を図-9に示す。初期避難者数に関わらず一斉伝達ステップが遅くなるにつれ、その時点での避難完了率は増加する。また、初期避難者数によらず一斉伝達ステップが60ステップまでは避難完了率が大きく増加し、その後傾きは小さくなる。今回のシミュレーションでは全ての出口を使用可能としているため、火災現場周辺の避難者が60ステップまでに多く避難を完了するためと考えられ、空間の特性によると考えられる。

このような初期の避難行動は従来あまり考慮されていないが、防災計画を策定する上では無視できない挙動であると考えられる。本シミュレーションより、災害発生時の人間の行動を表現するのに災害発生情報およびその伝達は欠かせない要素であることがわかる。

3.2 出口途絶情報の伝達と避難行動

実際の災害時には通常用いられる全ての出口が有効である保証はない。そこで本研究では、出口の途絶を想定したシミュレーションを行い、出口途絶情報の伝達が避難行動にもたらす影響を検討した。

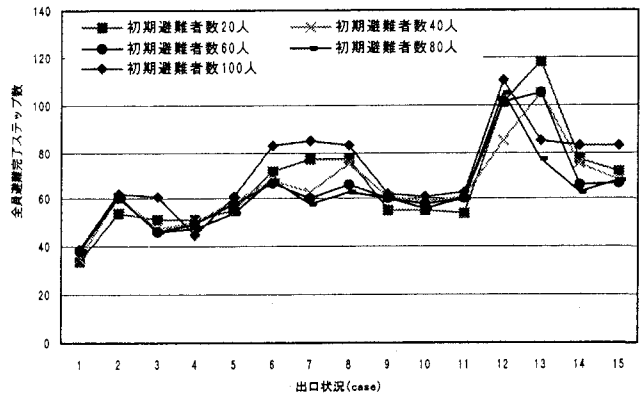
図-6に示すモデルには4つの出口があり、出口途絶の状況として、表-1に示す15通りを想定した。なお、表中の○は使用可能な出口を、×は使用不可能な出口をそれぞれ表している。これら15通りの出口状況に対して、避難者数を20人から100人まで20人ずつ変えてシミュレーションを行った。火災発生は、10ステップ目に設定し、火災情報一斉伝達は20ステップ目としている。

図-10は、途絶情報の変化に伴う全員が避難完了するのに要したステップ数の変化を示したものである。横軸は使用可能出口、縦軸は全員が避難を完了するのに要したステップ数である。出口途絶の

表-1 出口情報

Case	出口情報			
	1	2	3	4
1	○	○	○	○
2	×	○	○	○
3	○	×	○	○
4	○	○	×	○
5	○	○	○	×
6	×	×	○	○
7	○	×	×	○
8	○	○	×	×
9	×	○	○	×
10	○	×	○	×
11	×	○	×	○
12	×	×	×	○
13	○	×	×	×
14	×	○	×	×
15	×	×	○	×

情報が変わると、避難完了に要するステップ数が変化することがわかる。また、途絶出口の数が同じでも避難完了に要するステップ数は異なる。避難者 20 人の場合をみると case13 のときに避難に最も時間がかかる。しかし、途絶出口が同じ 3 つであるにも関わらず、case14 や case15 では、途絶出口が 2 つの場合と避難時間は変わらない。途絶出口の組み合わせによっては、出口途絶情報がうまく伝わらず、使用できない出口全てを自分で確かめる者が現れる。したがって、使用できない出口数が同じであっても組み合わせにより無駄な動きが多くなり避難時間を多く要する場合がありますと考えられる。



図・10 避難完了ステップ数

図-11 に出口途絶情報 case13、避難者 100 人とした場合の挙動を、図-12 に出口途絶情報 case13、避難者 20 人とした場合の挙動をそれぞれ示す。なお、これらの図中で白丸は出口途絶情報を得た避難者を示す。いずれの場合にも、出口 1 の周辺に存在した避難者は、一斉伝達ステップになると出口 1 を目指し速やかに避難を完了する。また、出口 2～4 の周辺に存在した避難者はそれぞれ近くにある出口へ向かうがいずれの出口も使用できず目標を別な出口に変えて避難する。図-11 に示した避難者 100 人の場合には、大半の避難者は途中で自身と違う出口情報を持った避難者に遭遇して情報を共有し、互いに使用できない出口を認識するため使用可能な出口へと向かい避難を完了した。これに対して図-12 に示した避難者 20 人の場合には、出口情報の共有が全く行えず、途絶した出口を全てまわる避難者が発生した。このため、全員が避難を終えるのに時間を要している。

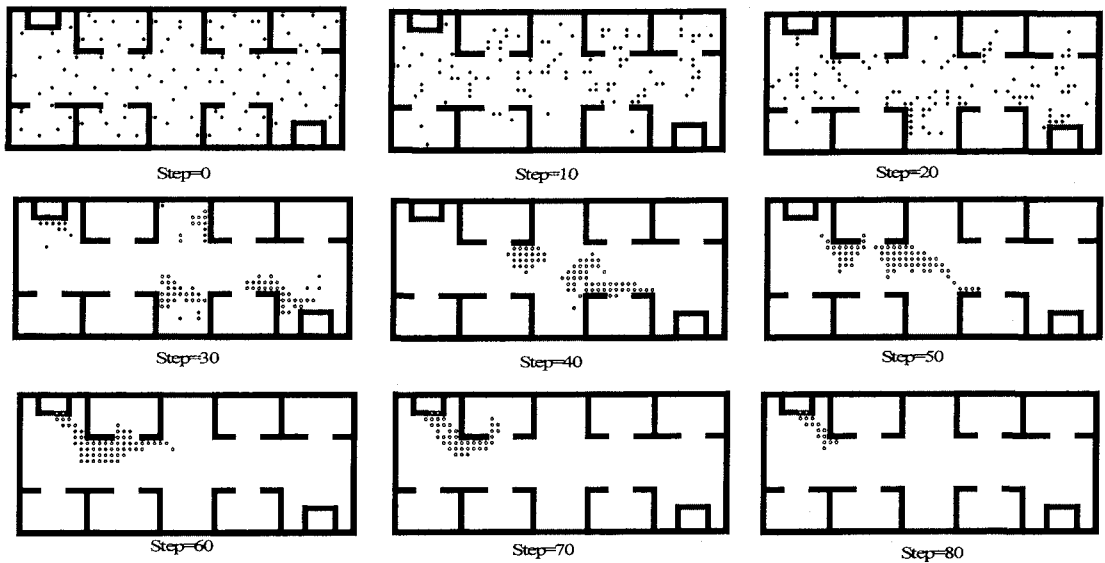


図-11 情報伝達による避難経路選択 (避難者数 100 人)

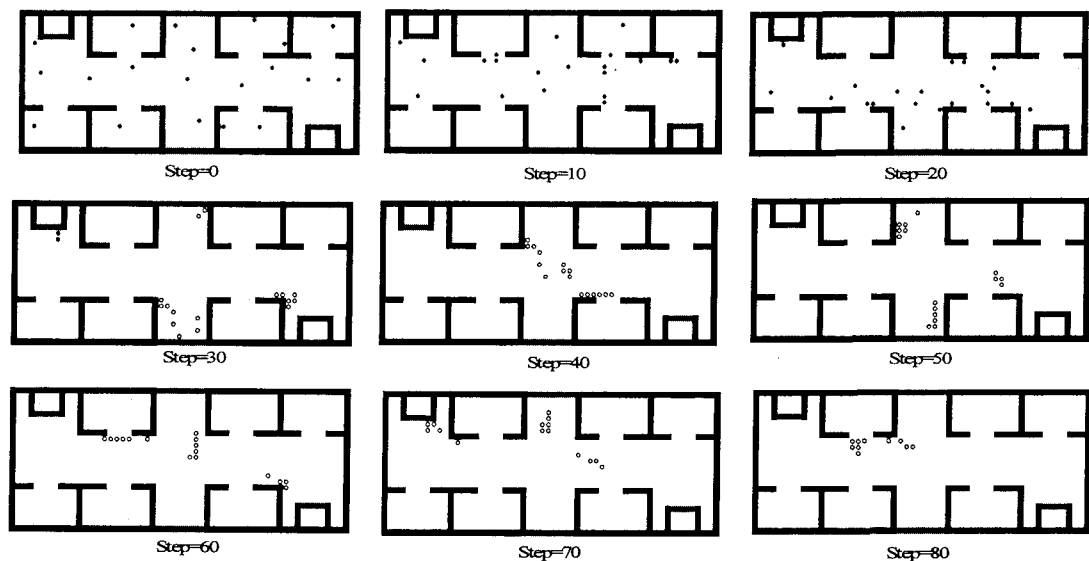


図-12 情報伝達による避難経路選択（避難者数 20 人）

出口途絶情報の伝達がスムーズに行われ、全ての避難者が正確な空間状況を把握すれば速やかに避難を終えることが出来る。このため、災害時には災害発生情報だけではなく出口途絶情報を正確に避難者に伝える必要がある。

4. まとめ

避難行動は、集団行動である。災害時には被害を最小限に留めようという心理が働き、避難者同士助け合えることが考えられる。避難をする上で有用な情報を共有し合うことは、このための方法の一つであろう。

本研究では避難者間の情報伝達に着目した避難シミュレーションを実施した。その結果、情報伝達により、避難行動の開始および避難経路の選択が大きく影響されることが確認され、避難行動シミュレーションには情報の共有を考慮に入れる必要があることが示された。特に、災害発生直後の避難者の挙動を検討する際には、情報の授受は必要不可欠であると考えられる。さらに、正確な出口情報の供給も、効率的な避難のためには必要である。

一方、避難行動が伝聞情報のみで開始されるかについてはさらに検討が必要である。現実にも火災報知器の作動のみで避難を開始する人は希であり、炎や煙の視認、異臭の関知、多くの避難者の視認などいくつかの要因が重なり合い、補完されることにより避難行動が開始されると考えられる。今後、人が密集した閉鎖空間内でのテロや災害に対する合理的な防災対策の資料とするために、避難行動の開始に与える種々の要因について研究を進める予定である。また、本研究では避難者同士は常に情報を交換するとの前提を設けている。しかし、災害発生初期においての混乱状態では、情報交換の様態は理想的な状態ではないこともありうる。この点についても今後シミュレーションに取り入れる予定である。

5. 参考文献

- 1) 清野純史・三浦房紀・瀧本浩一：被災時の群集避難行動シミュレーションへの個別要素法の適用について，土木学会論文集 No.533/I-35, pp.233-244, 1996.

- 2) 横山秀史・目黒公郎・片山恒雄：避難行動解析へのポテンシャルモデルの適用，土木学会論文集 No.513 / I-31, pp.225-232, 1995.
- 3) 松田泰治・大塚久哲・樽木武・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.
- 4) 松田泰治・大塚久哲・樽木武・大野勝：天神地下街における人間の個体差及び相互作用を考慮した群集の避難行動シミュレーションに関する研究，地下空間シンポジウム論文報告集，第8巻，pp.19-28, 2002.
- 5) 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開発，土木情報システム論文集 Vol.9, pp.19-30, 2000.
- 6) 近田康夫・浅地剛成・城戸隆良：CAを用いた避難シミュレーションに関する一考察，構造工学論文集 Vol.49A, pp.217-224, 2003.