

# 防災要員と避難者間の情報の伝達を 考慮に入れた避難行動シミュレーション

瀧本浩一<sup>1</sup>・三浦房紀<sup>2</sup>・清野純史<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 工修 山口大学助手 工学部知能情報システム工学科 (〒 755山口県宇都市常盤台 2557)  
<sup>2</sup>正会員 工博 山口大学教授 工学部知能情報システム工学科 (〒 755山口県宇都市常盤台 2557)  
<sup>3</sup>正会員 工博 山口大学助教授 工学部知能情報システム工学科 (〒 755山口県宇都市常盤台 2557)

本研究は、今まで災害時の人間行動シミュレーションでは扱われなかった防災要員に焦点をあて、避難者や防災要員各々の状態をコード列状に記述、規定して行動させ、コードの一部を相手のコードに上書きさせることによって、防災要員が避難者に対して避難経路の情報を与えるといった情報伝達を考慮に入れたシミュレーション手法を提案するものである。本手法を実際の地下街に適用して、防災要員による活動の効果をみるためにパラメトリックスタディを行った。その結果、防災要員の数が多きほど死亡する避難者は少なく、防災要員は巡回して活動した方が固定したそれより効果的であることがわかった。

*Key Words : fire, human evacuation behavior, guides, information transmission, genetic code, numerical simulation*

## 1. まえがき

地下街や百貨店などの日常不特定多数の人が多く集まる場所において、万一災害が発生した際の人間行動を予測しておくことは、防災対策や計画をたてる上で極めて重要である。しかしながら、非常時の人間行動を人を使って実際の構造物内で調査することは、危険性を伴うことから事実上不可能である。そこで、このような実験を再現するために近年コンピュータを用いた災害時の避難行動シミュレーションが開発されてきている。この問題に関しては、これまで多くの研究がなされ、避難者の行動の軌跡や避難時間等を推定することが試みられている。大槻らはオブジェクト指向型言語を用い、避難者の意志決定プロセスを考慮に入れたシミュレーションを<sup>1)</sup>、また、位奇らは避難者の認識と心理を変化させることで、火災の状況を考慮する避難行動シミュレーションを開発した<sup>2)</sup>。さらに、横山らは人間の災害時の行動をポテンシャルで規定し、地下街の安全性の検討を行っている<sup>3)</sup>。しかし、これらの避難シミュレーションモデルでは、単に避難者の行動を再現するだけであって、災害時に活動する防災要員が避難者へ避難情報を与える等の行動が考慮されていない。実際の災害時には地下街の防災設備や避難者の行動だけではなく、店員や防災担当者による避難

誘導を行うことによって、迅速な避難がなされる。このように防災要員の活動によって避難時間、死傷者数が左右されることが考えられ、この効果を考慮に入れることによってより現実的なシミュレーションが可能になるものと考えられる。

そこで、本研究は、遺伝的アルゴリズムの遺伝子コード列の表現方法<sup>4)</sup>に着目し、避難者や防災要員の内面の状態や空間的状况をコード列状に記述して行動させる。そしてその際、これら防災要員のコード列の一部と避難者のコード列の一部を交換することにより、いわゆる遺伝的アルゴリズムの交叉を行うことにより、防災要員と避難者間での情報のやりとりができる避難行動シミュレーションモデルの構築を試みたものである。これにより、単に避難者の火災時における避難行動を推定するだけではなく、防災要員の数や配置、行動をいろいろ変えることによって、災害時における防災要員の重要性について考察することが可能となった。

## 2. シミュレーションモデルの構成

本研究で用いるシミュレーションは以下に述べる空間モデル、火災モデル、人間モデルから構成される。以下、順にこれらの説明を行う。

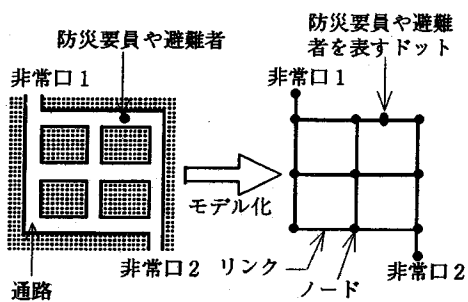


図-1 空間のモデル化

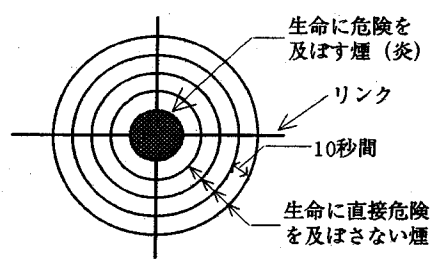
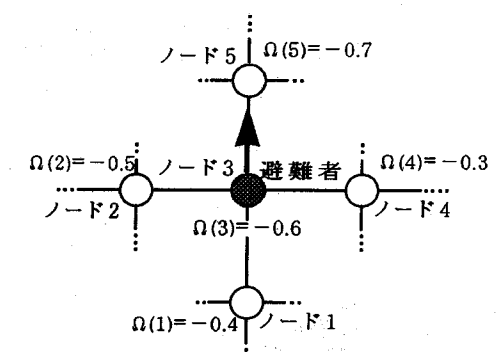
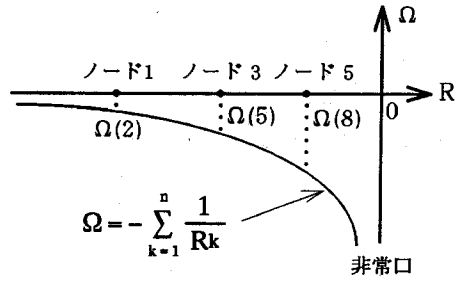


図-2 火災のモデル化



(a) 方向決定とポテンシャル値の関係



(b) ポテンシャルの分布

図-3 ノード上における方向決定の一例

(1) 空間モデル

まず、対象とする地下街や百貨店等の空間は、大槻らのシミュレーションモデルで用いられているノードとリンクから構成されるネットワーク<sup>1)</sup>を用いてモデル化した。その一例を図-1に示す。図-1におけるリンク部分は地下街等の通路部分を表し、ノードはそれら通路と通路の交差点を表している。防災要員や避難者等の人間はドットで表し、ノードとリンク上を自由に移動することが出来るようになっている。なお、空間をノードとリンクで表す理由としては、防災要員の動きを再現するためには空間をそのままモデル化せず、ノードとリンクで表す方がよいと考えたからである。

(2) 火災モデル

火災による煙の拡散は、天井を伝わって遠方の空間から降下するといった3次元的な挙動をするなど複雑であることは知られているが、ここでは第一近似として、煙の拡散は火災の発生点から同心円状に等速度で拡散するという単純なモデルとした。すなわち、図-2に示すように火災が発生するとまず発生点から人命に無害な煙が0.5m/sの速度で同心円状に広がり、続いて40秒後に生命に危険を及ぼす煙

が同心円状に広がるものと仮定した。なお、本シミュレーションでの火災は煙が天井を伝わったり、降下してきたりといった3次元的な拡散は考えないものとする。また、簡単のため火災はノード上でのみ発生するものとする。

(3) 人間の行動モデル

本シミュレーションでは避難者と、それを避難させる防災要員の2通りの人間モデルを設定する。

a) 避難者のモデル

地下街等を利用している者には、そこを普段からよく利用し、通路や非常口の位置といった内部構造をよく把握している者と、そこを初めて利用した、あるいは方向音痴などの理由で内部構造を知らない者の2通りがあり、これらは避難時において行動が大きく異なると考えられる。そこで、本シミュレーションでの避難者のモデルとしては、対象とするすべての非常口への経路を知っている避難者、経路を全く知らない避難者の2種類のモデルを設定した。また、一般に大規模な地下街やショッピングセンター等の空間では、目的を持たない歩行者は探索歩行になると考えられている<sup>5)</sup>。これは大都市の地下街やショッピングセンターなど複雑な空間において、

歩行者が目的地への経路を考えずに歩く歩行である。そして、実際の地下街ではそのような探索歩行をする者とそこを単に通過するために通ったり、そこにある特定の場所へ向かおうとする者が混在している。しかし、後者の行動を考慮に入れると、非常口での流出、流入により対象とする空間内の人数が変動し、シミュレーション結果の検討が複雑となる。そこで、ここでは災害が発生する以前には非常口での流出、流入はないものとし、探索歩行を行わせ、発災後は、非常口の場所を知っている避難者は最短経路を通る歩行に変更し、非常口を知らない避難者はそのまま探索歩行を続けるものとした。

火災発生前後の避難者の行動は、以下のようにして決定した。

- ①避難行動および方向決定には、横山らの研究で提案された式(1)で与えられる非常口で無限に小さくなるようなポテンシャル分布 $\Omega$ をノードに与え、このノードのポテンシャル値の最小の方向へ動くものとする。

$$\Omega = - \sum_{k=1}^n \frac{1}{R_k} \quad (1)$$

ここに

$R_k$ : 避難者の位置から $k$ 番目の非常口までの距離  
 $n$ : 非常口の数

図-3に避難者の方向決定の一例を示す。この場合、ノード3にいる避難者は、隣接する各ノードのポテンシャルの値の大きさを比較し、そのうち最小の値を持つノード5へ進むことになる。

- ②火災発生前の避難者の探索歩行の際の方向決定は1秒毎に式(1)の $R$ の値を乱数で与え、ポテンシャル分布を毎秒変化させる。これにより、避難者にそのポテンシャルに従ってランダムな歩行を行わせることで、探索歩行を表すものとした。なお、その際の歩行速度としては、人間の標準歩行速度である1.3 m/sとした。
- ③火災発生後には、出火点であるノードのポテンシャル値を最大の0とし、その後、生命に危険を及ぼす煙の円に沿ってポテンシャル値が0のノードが拡がっていく。これにより、生命に危険を及ぼす煙が到達したノードは他の到達していないノードよりポテンシャル値が高くなるので、避難者が煙から逃れようとする動きを再現することができる。
- ④非常口への経路を知っている避難者の進行方向は、式(1)に従うものとする。また、非常口を知らない避難者には、②と同じ探索歩行を続けさせる。

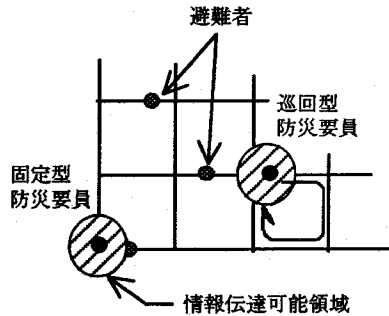


図-4 防災要員による情報伝達の範囲とその巡回パターン

- ⑤避難者が火災発生点を見通せる交差点、あるいは、通路上来ると火を目撃したとし、歩行速度を小走り程度である2.3m/sに上昇させる。
- ⑥もし、避難者が出口付近に殺到してもアーチアクションや競合は起きない。
- ⑦生命に危険を及ぼす煙の円内に避難者が取り込まれると、30秒経過するごとに歩行速度が0.2m/sずつ低下し、90秒後に死亡するものと仮定した。

#### b) 防災要員のモデル

次に災害時に避難者を安全に非常口へ誘導する役防災要員には、ノード上で静止して、接近して来た避難者に対して非常口への経路の情報を与える固定型の防災要員と、決められた順路を巡回する巡回型の防災要員の2種類を設定した。

防災要員の設置場所および活動方法は以下のようにした。

- ①防災要員設置場所としては、非常口が見通せる通路の交差点の位置と地下街の外周の通路に配置する。
- ②火災前の平常時には防災要員は設置場所に固定または巡回させながら、待機させておく。なお、この時点では避難者に対して非常口の経路の情報は与えない。
- ③防災要員を巡回させる場合には、あらかじめ決めた $2 \times 2$ または $3 \times 2$ のノードで形成される長方形のリンクを右回りに巡回させる。
- ④防災要員はあらかじめ設定した場所に固定、または設定した経路を早足の速度2.0m/s<sup>⑥</sup>で巡回する。
- ⑤防災要員が図-4のように半径5mの情報伝達可能領域の円内に避難者をとらえると、経路を知っている避難者に対しては歩行速度を2.3m/sに上昇させ、経路を知らない避難者には、煙の位置を考慮に入れた安全な非常口への最適経路の情報を、

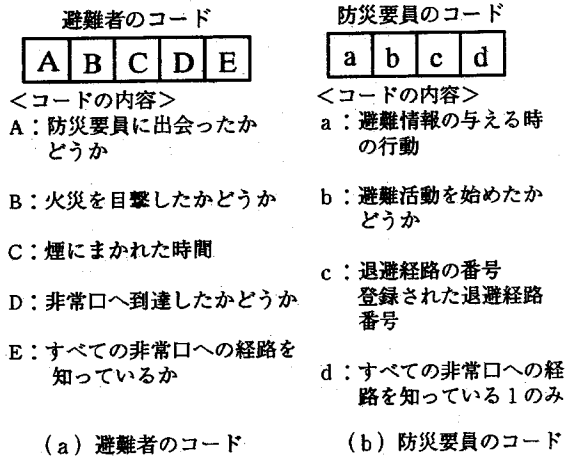


図-5 コードの内容

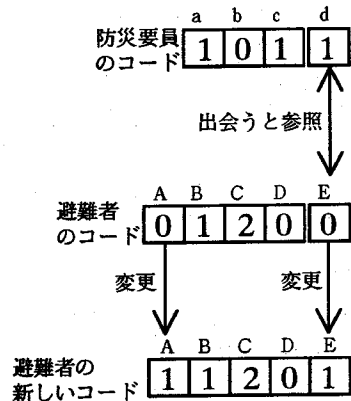


図-6 非常口情報の交換の一例

与え、速度も2.3m/sに上昇させる。

- ⑥ 防災要員は避難者に対して非常口への経路の情報を与えるのみで、誘導は行わない。
- ⑦ 防災要員は生命に危険を及ぼす円内に入るまで情報の伝達を続け、その後、あらかじめ設定しておいた非常口への最短経路を通して退避する。なお、防災要員は生命に危険を及ぼす煙の圏内に入っても避難者のように歩行速度は低下しないものとした。

### 3. 情報のコード化

#### (1) 人間の状態のコードによる表現

本シミュレーションでは遺伝的アルゴリズムにおける遺伝子コードの表現方法を参考に、避難者や防災要員の行動やそのおかれた状態、避難経路を知っているか否か等を、項目毎にコード列状に記述し、これを避難者と防災要員それぞれ個人毎に設ける。避難者と防災要員のコードは、図-5に示すようにCとcを除いて、それぞれ1か0の数で表し、Cは0~4、cは1~4の数値で表現する。

まず、図-5(a)の避難者のコード列について説明する。左から順に

- A: 防災要員に出会ったかどうか  
出会っていない: 0  
出会った: 1
- B: 火災を目撃したかどうか  
目撃していない: 0  
目撃した: 1

C: 煙にまかれた時間

- 0秒: 0
- 0~29秒: 1
- 30~59秒: 2
- 60~89秒: 3
- 90秒以上: 4

D: 非常口へ到達したかどうか

- 到達していない: 0
- 到達した: 1

E: すべての非常口への経路を知っているか

- すべて知らない: 0
- すべて知っている: 1

の5項目の情報を持って行動する。

次に、図-5(b)に示すように防災要員のコード列は左から

a: 避難情報の与える時の行動

- 固定: 0
- 巡回: 1

b: 避難活動を始めたかどうか

- 始めている: 0
- 始めた: 1

c: 退避経路の番号

登録された退避経路番号

d: すべての非常口への経路

- すべて知っている: 1のみ

このように、コードの値の違いによって人間モデルそれぞれの個人差を表現することができる。

#### (2) 防災要員から避難者への情報の伝達

避難者が防災要員を中心とする半径5mの円内に

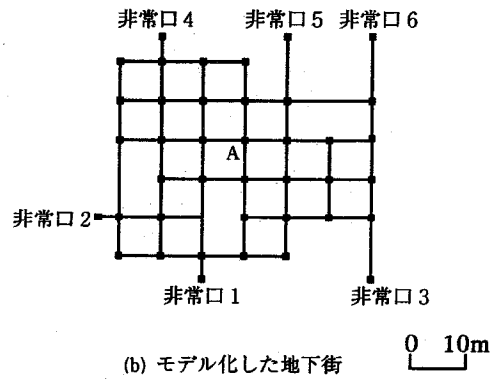
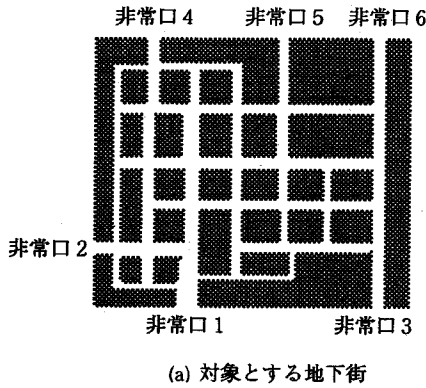


図-7 地下街のモデル化

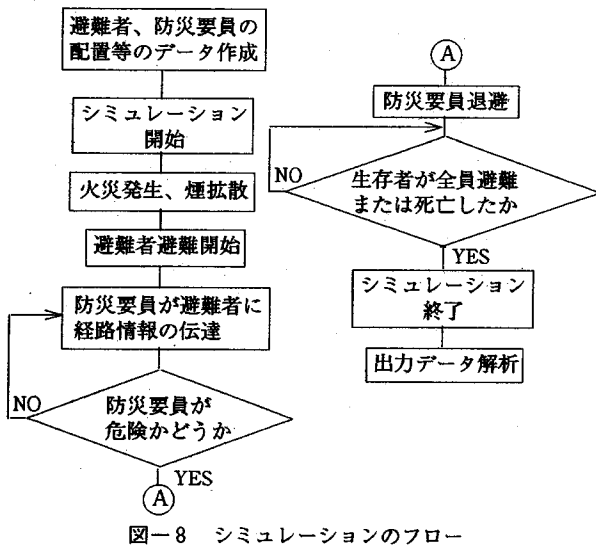


図-8 シミュレーションのフロー

表-1 シミュレーションケース

		避難者50人中出口への経路を知っている避難者の割合 (%)		
		0	50	100
防災要員の数 (人)	0	—	—	—
	2	固定/巡回	固定/巡回	固定/巡回
	4	固定/巡回	固定/巡回	固定/巡回
	6	固定/巡回	固定/巡回	固定/巡回
	8	固定/巡回	固定/巡回	固定/巡回
	10	固定/巡回	固定/巡回	固定/巡回

固定：防災要員を固定  
巡回：防災要員を巡回

入ると、防災要員の持っている非常口へのルート  
の情報を得る。具体的には避難者のコードEが0の場  
合には防災要員の非常口への経路の情報を表した部  
分dの1と入れ換える。この時、Aの部分も連動し  
て1になる。すなわち、防災要員に出会ったとい  
う情報を持つことになる。そして、防災要員にす  
でに会った避難者が再度防災要員に出会っても、  
コードの変更は何ら行われない。

#### 4. シミュレーション例

##### (1) シミュレーションモデル

本研究で提案したモデルを、実際の地下街をモデ

ル化した空間に適用して避難シミュレーションを行  
う。扱った地下街の平面図、およびそれをノードと  
リンクでモデル化したものを図-7に示す。シミュ  
レーションのシナリオとしては、避難者総数を50  
人を片寄らないように地下街全体に配置し、シミュ  
レーション開始から30秒後にA点から出火させ、同  
時に防災要員の活動を開始させた。避難完了時間  
は、避難者が最後に無事に非常口に到達した時間と  
する。ただし、必ずしも全員が避難できるとは限ら  
ず、何人か死亡することもあるが、その場合も最  
後の避難者が無事に非常口に達した時間をもって  
避難完了時間とした。また、逃げ遅れた避難者が  
全員死亡すると、シミュレーションを終了させた。  
以上のシミュレーションのフローチャートを図-7に  
示す。

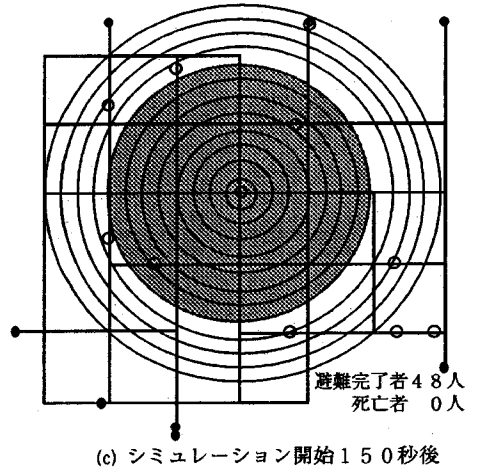
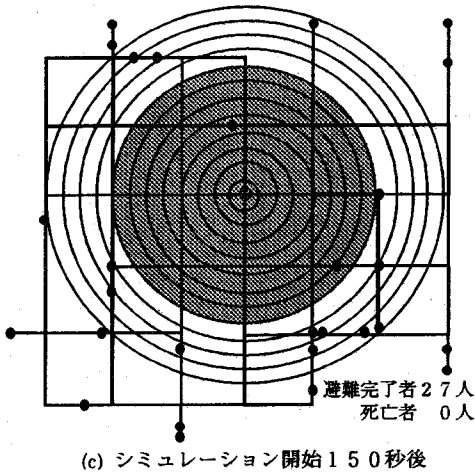
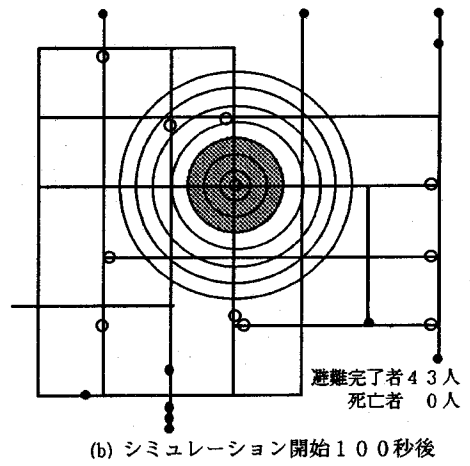
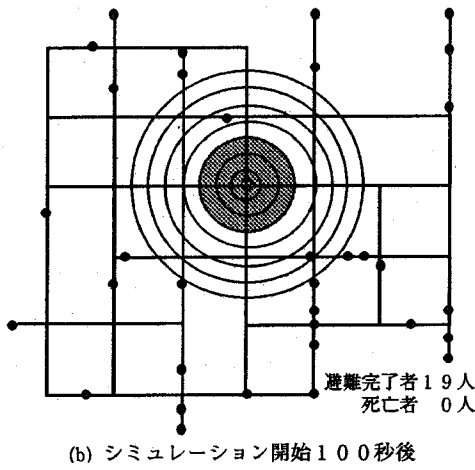
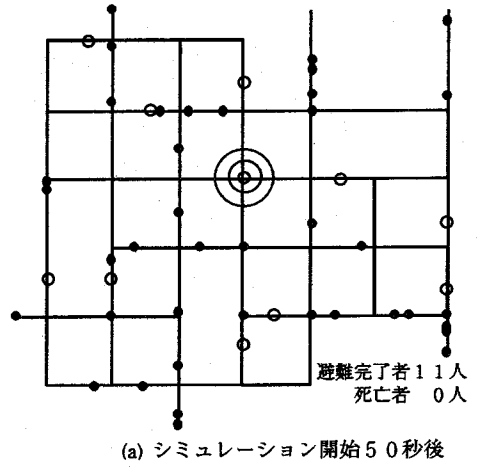
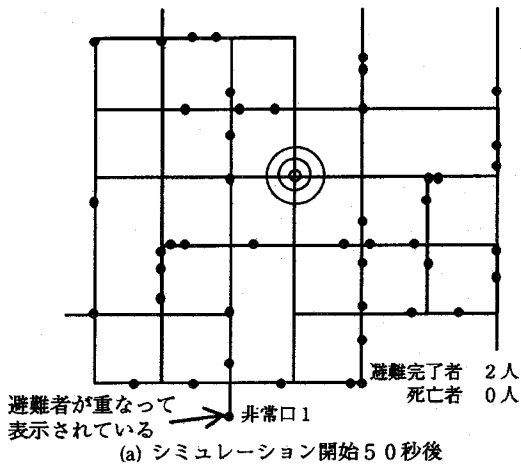
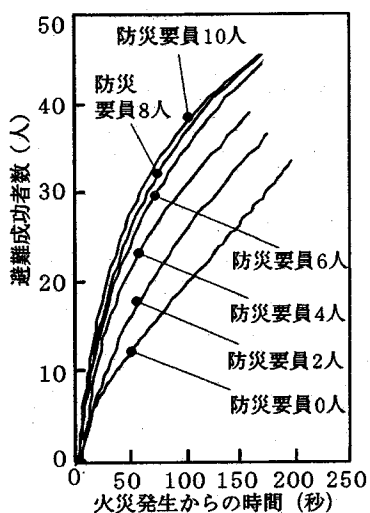
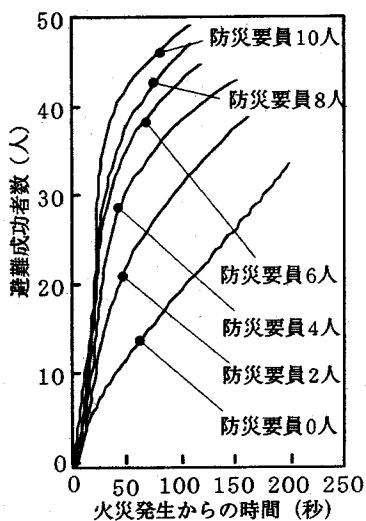


図-9 シミュレーション画面  
(防災要員なし)

図-10 シミュレーション画面  
(防災要員10人が巡回)

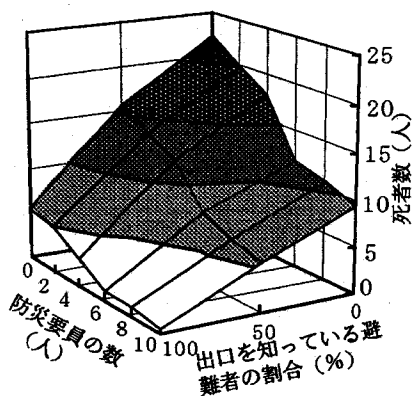


(a) 防災要員を固定させた場合

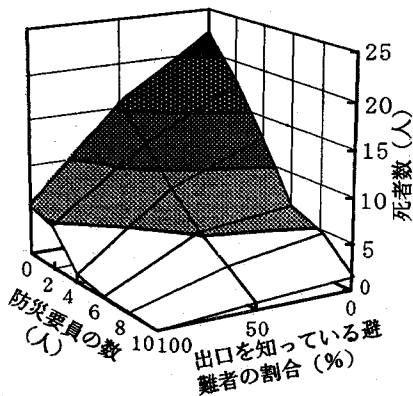


(b) 防災要員を巡回させた場合

図-11 避難者が出口へのルートを知っている避難者の割合が50%の場合の避難成功者数の時間的推移



(a) 防災要員を固定させた場合



(b) 防災要員を巡回させた場合

図-12 防災要員の活動方法による死者数の違い

## (2) シミュレーションケース

シミュレーションは表-1に示すように防災要員の数を0人、2人、4人、6人、8人、10人、活動方法を固定と巡回、出口を知っている避難者の割合を0%、50%、100%と変えて行った。その際、各条件でそれぞれ3回ずつ避難者の初期配置を変え、避難完了時間および死者数について各条件毎にその平均をとった。これにより、避難者の非常口への経路を知っている者の割合や防災要員の数および活動方法の違いなどが死者数や避難完了時間にどのような影響を与えるかを見ることができる。

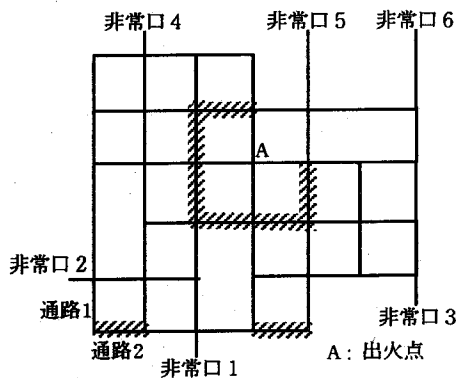


図-13 死亡した多くの避難者が火災前にいた通路

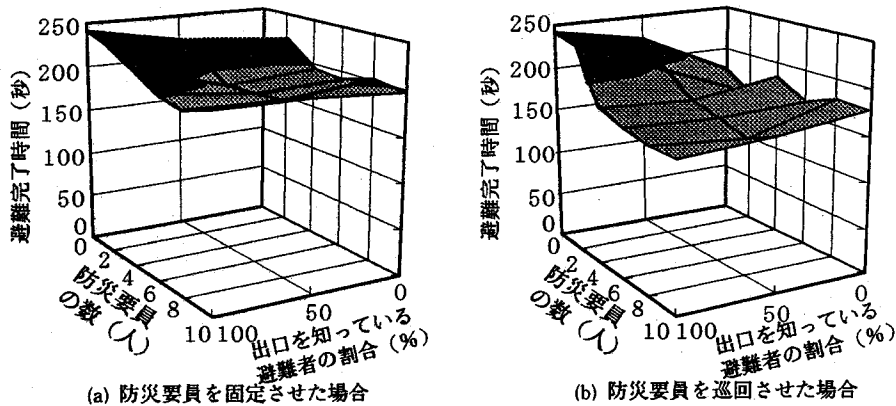


図-14 防災要員の活動方法による避難完了時間の違い

### (3) シミュレーション結果

非常口へのルートを知っている避難者の割合が50%、即ち、避難者50人中25人は非常口への経路を知っているという条件下で、防災要員がいない場合と、10人の防災要員を巡回させた場合のシミュレーション画面の一部を、図-9、図-10に示す。シミュレーション画面における●印が避難者、○印が防災要員、拡散する人命に無害な煙は白い円で、生命に危険を及ぼす煙は灰色の円で表示されている。図-9(a)はシミュレーション開始後50秒後(火災発生から20秒後)の状態、この時点で避難完了者は2人であり、両者とも非常口1から避難している。なお、シミュレーション画面中の非常口1には避難者を表す●印が1つしか表示されていないが、実際には2つ重なっている。さらに50秒後の(b)では非常口で重なって見えない3人を加え、計31人が避難中である。(c)では煙が地下街のほぼ全域に広がり、非常口周辺に近づいて来てはいるものの、煙に巻かれ危険な状態である避難者が多くいることが分かる。図-10は防災要員10人を巡回させた場合である。図-9と同じ時刻でそれぞれ比較してみると、(a)では避難を完了した人間が11人、(b)では43人が、(c)では避難者2人を除いてほぼ避難が完了していることが分かる。

非常口への経路を知っている避難者の割合が50%という同じ条件下で、防災要員の数と活動方法を変えた場合の避難完了者の人数の時間的な変化を図-11に示す。避難完了時間および避難成功者数を防災要員の数について比較すると、固定、巡回いずれの活動方法とも、その数が多いほど避難完了者数は多い。さらに、活動方法で比較すると、防災要員を固定した場合より巡回させた時の方が、全体として

早期に避難が終了していることが分かる。

次に、出口への経路を知っている避難者の割合および防災要員の数を変えて各々得られた死者数を、防災要員を固定させた場合と巡回させた場合について図-12に示す。図-12(a)は防災要員を固定した場合で、図-12(b)は巡回させた場合である。これより防災要員を固定した場合と巡回させた場合の両方法とも、防災要員の人数が多い程、死者数は減少していることが分かる。また、防災要員が巡回した方が固定した場合と比べ全体的に死者数は少なく、防災要員の巡回による効果が出ているものと考えられ、特に非常口への経路を知っている避難者の割合が多いほど死者数は少ない。

さらに、死亡者が多かった避難者の最初の位置を図-13に示す。図中の斜線部分は火災発生前に避難者がいた通路のうち、多くの死者を出した通路を示しており、これらは火災発生点の周辺と地下街モデルの曲がり角付近の通路であった。前者に死者が多かった理由としては、拡散してくる煙にまかれて逃げ切れなかったことが考えられる。また後者については、通路1と通路2のように曲がった通路では、煙が到達した場合、両方の通路から煙が流れ込んでくるため、非常口への経路を知らず、防災要員にも出会わなかった避難者が、逃げ道を失い、死亡したものと考えられる。なお、他の曲がり角で死者が少なかったのは、そこにいた避難者は非常口への経路を知っていて、火災発生後すぐに避難ができたからであると考えられる。

次に、全ケースにおける防災要員を固定させた場合と巡回させた場合の避難完了時間を、図-13に示す。これより、防災要員を固定した場合よりも巡回させた場合の方が、全体的に避難完了時間が早い。



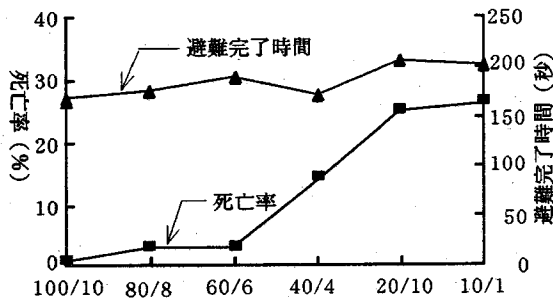


図-15 避難者人数/巡回する防災要員人数と避難完了時間および死亡率との関係

なお、防災要員の数が0人で非常口への経路を知っている避難者の割合が0%の時、他のケースと比べて避難完了時間が減少している。この理由は、本研究では、避難完了時間を最後に避難できた者が非常口に到達した時間と定義しているため、決して全員が早く避難できたということの意味するものではない。図-12の通り、死者数はこの場合が最も多くなっている。

次に、非常口への経路を知っている避難者の割合が50%という同じ条件で、巡回を行う防災要員1人に対する避難者の数を10から1人まで2人ずつ減らして、避難完了時間と死亡率について各ケース3回ずつシミュレーションを行って平均し、比較した。その結果を図-14に示す。これより防災要員と避難者の割合が同じでも防災要員の数が減るに従って避難時間、死亡率とも増加し、防災要員による避難経路に関する情報伝達の効率が低くなること分かる。

## 5. 結論

本研究は災害時に地下街などの空間で避難を行う際の防災要員の活動による効果をみるために、遺伝的アルゴリズムにおけるコードの考え方を取り入れたシミュレーションモデルの構築を試みたものである。さらに、このモデルを実際の地下街に適用して、シミュレーションを行った結果、以下の知見を得た。

①死者数および避難完了までの時間は、防災要員の数やその活動方法、避難者の非常口へのルートに関する知識の有無などによって大きく左右される。特に巡回する防災要員の数が多く、非常口へのルートを知る避難者の割合が多いほど、死者数は減少し、早期に避難がなされ、避難時間が短縮され

る。

②死者数および避難完了時間の結果から、防災要員を固定するより巡回させた方が、より効果的に避難を行わせることができる。

③防災要員と避難者の割合を一定にしたシミュレーションから、両者の割合が同じでも、防災要員の数が少なくなるにつれて避難時間および死亡率は増加する。

以上より、災害時の避難において、防災要員の活動が重要であることを示すことができた。これにより、本シミュレーションが地下街や百貨店等で防災計画を立てる際の資料として、あるいは防災担当者の教育用教材としても活用できると考える。

今後の課題としては、火災のシミュレーションモデルをより現実に近いものに改良すること、避難者や防災要員の行動を再現するための個人の特徴を表すコードの追加、より現実的な防災要員の動きの表現、災害例への適用とその検討等があげられる。さらに、今回提案したシミュレーションモデルの妥当性を検証する上で、既存のモデルとの比較や整合性の検討を行う必要がある。これらについては今後引き続き検討を進めていく予定である。

謝辞：本研究を行うに際し、山口大学工学部中村秀明助手にはプログラム作成に関してご助言を頂いた。この場をかりて謝意を表す。また、数値シミュレーションに関しては、山口大学大学院の八木宏晃君の努力に負うところが大きい。

## 参考文献

- 1) 大槻 明：オブジェクト指向言語による地下街の地震時避難シミュレーション、コンピュータ・シミュレーション、コンピュータ・エンジニアリング社、Vol. 2-4, pp. 78-83, 1991.
- 2) 位奇和久：避難行動モデルに関する研究—火災状況の認識と心理状態を考慮したモデルの提案—、日本建築学会論文報告集, No. 325, pp. 125-132, 1983.
- 3) 横山秀史, 目黒公郎, 片山恒雄：人間行動シミュレーションによる地下街の安全性評価に関する研究、地域安全学会論文報告集, No. 3, pp. 161-164, 1993.
- 4) 北野明宏他：遺伝的アルゴリズム、北野明宏編、産業図書、1993.
- 5) 松下 聡, 岡崎甚幸：巨大迷路歩行実験による探索歩行のためのシミュレーションモデルの研究、日本

建築学会計画系論文報告集, 第 429号, pp. 51-59,  
1991.

- 6) 室崎益輝: 近代建築学—建築防災・安全—, 鹿島出版会, pp. 36, 1993.

(1995. 7. 11 受付)

## SIMULATION OF EVACUATION BEHAVIOR IN A DISASTER AND ITS INTERACTION WITH GUIDE'S INSTRUCTIONS

Kouichi TAKIMOTO, Junji KIYONO and Fusanori MIURA

Complex spaces such as underground shopping centers or department stores where many people gather could be dangerous places if a fire breaks out. It is very important that owners or salesclerks who are responsible for fire control in such places know how to lead quickly and safely people to the exits in an emergency. To simulate the behavior of evacuees and guides in a fire, we developed a computational model using genetic codes that are used in genetic algorithm. This model simulates not only the behavior of guides and evacuees but also the interaction between evacuees' behavior and guide's instructions.