

## 防災要員を考慮に入れた避難行動シミュレーション

山口大学工学部 瀧本浩一  
山口大学工学部 三浦房紀  
山口大学大学院 ○柿元正裕

地下空間は、地上空間にはない利便性を有しているが、一度災害が発生した場合、避難方向が地上方向に限られた複雑な多層ネットワークの構造であることから、避難者の混乱を生じて避難を困難なものとし、多くの人的被害が出るのが考えられる。従って、地下街、駅、ビルなど日常不特定多数の人間が集まる空間においては、災害が発生した場合の人間がとる行動をあらかじめ予測しておくことは、設備、構造等の設計や防災計画を行う上で重要な事項である。しかし、実際に多数の人間を配置して災害を再現し実験を行うことは危険を伴い不可能であることから、コンピュータシミュレーションによる多くの研究がなされ、多くのシミュレーションモデルが提案されてきている。しかし、これまでの避難行動モデルでは避難者の行動を単に再現するだけであって、災害が発生したときに先頭に立ち避難誘導活動を行う防災要員が避難者へ避難情報を与える等の人間どうしの相互作用を取り入れた行動が考慮されていない。

そこで、本研究では地下街等の空間で火災が発生した際に避難者や防災要員がどのような行動をとるかを再現するために、新たに非常誘導灯の設備や、避難者の行動特性、煙の濃度による影響を取り入れ、避難者と防災要員との間の情報交換等を考慮に入れた避難行動シミュレーションモデルを開発し、災害時の人間行動の再現と防災要員の重要性を検討することを試みた。その結果、誘導灯の有効性が示せたと同時に、欠点も明らかになった。そのうえで防災要員を導入して同じシミュレーションを行った結果、生存者の増加が確認でき、誘導灯が設置されていた場合においても防災要員を配置することが有効であることが分かった。

## 防災要員を考慮に入れた避難行動シミュレーション

山口大学工学部 瀧本浩一  
 山口大学工学部 三浦房紀  
 山口大学大学院 ○柿元正裕

## 1. はじめに

地下空間は、地上空間にはない利便性を有しているが、一度災害が発生した場合、避難方向が地上方向に限られた複雑な多層ネットワークの構造であることから、避難者の混乱を生じて避難を困難なものとし、多くの人的被害が出ることが考えられる。従って、地下街、駅、ビルなど日常不特定多数の人間が集まる空間においては、災害が発生した場合の人間がとる行動をあらかじめ予測しておくことは、設備、構造等の設計や防災計画を行う上で重要な事項である。しかし、実際に多数の人間を配置して災害を再現し実験を行うことは危険を伴い不可能である事から、コンピュータシミュレーションによる多くの研究がなされ、多くのシミュレーションモデルが提案されてきている<sup>1)</sup>。しかし、これまでの避難行動モデルでは避難者の行動を単に再現するだけであって、災害が発生したときに先頭に立ち避難誘導活動を行う防災要員が避難者へ避難情報を与える等の人間どうしの相互作用を取り入れた行動が考慮されていない。

そこで昨年度より、筆者らは遺伝子コードの考え方を導入した避難行動シミュレーション手法<sup>2)</sup>を提案し、これを用いた災害時の人間行動の再現と防災要員の重要性を検討してきた。しかし、このモデルでは個々の避難者の特性等が十分考慮されておらず、現実の災害状況を再現するには十分ではなかった。そこで、本研究では地下街等の空間で火災が発生した際に避難者や防災要員がどのような行動をとるのかを再現するため、新たに非常誘導灯の設備や、避難者の行動特性、煙の濃度による影響を取り入れ、避難者と防災要員との間の情報交換等を考慮に入れた避難行動シミュレーションモデルを開発し、災害時の人間行動の再現と防災要員の重要性を検討することを試みた。

## 2. シミュレーションモデル

本シミュレーションは、空間モデル、火災モデル、人間モデルからなる。以下それぞれのモデルについて述べる。

## 2.1 空間モデル

本シミュレーションでは、対象とする地下街等の空間を平面的にとらえ、ノードとリンクから構成されるネットワークを用いる。空間モデルの例を図2.1に示す。図におけるリンク部分は地下街等の通路を、ノードはそれら通路の交差点を表現している。なお、防災要員及び避難者は、これらノードとリンク上を自由に移動することができるようになっている。また、防災設備として、「(発光型)誘導灯」を取り入れた。これは、通路または廊下の各部分から通路誘導灯までの歩行距離が10m以下となる箇所及び曲がり角に設けることになっているが<sup>3)</sup>、本研究のモデルでは、すべてのノード上に配置した。

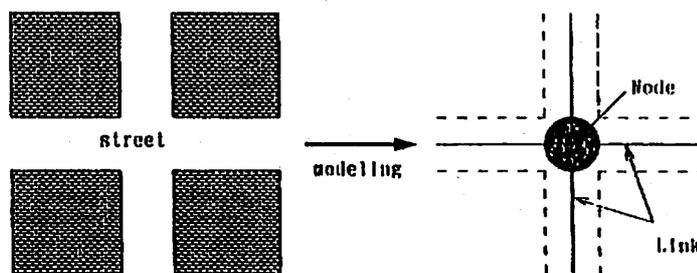


図2.1 空間のモデル化

## 2. 2 火災モデル

本モデルでは、煙をリンクに沿って広げていくことにより、煙の拡散を表し、さらに、煙濃度という概念も導入した。この煙濃度は、単位容積中の粒子数や煙重量で表現することもできるが、一般には、煙の中の見通し量から求める光学的濃度である減光係数[1/m]が用いられる<sup>4)</sup>。そこで、煙濃度を減光係数で定義し、これによって時々刻々変化する各地点における煙濃度を表すことにする。減光係数より仮定した煙濃度分布関数を式(2.1)のように表す。

$$C_k = \frac{1}{V_k} \quad (2.1)$$

ここに、 $k$ :ノード番号,  $V_k$ :ノード $k$ から出口までのリンク経由の最短経路,  $C_k$ :ノード $k$ における減光係数の値[1/m]である。

## 2. 3 人間モデル

災害時には避難者の行動だけでなく、避難誘導を行う防災要員の活動によっても避難時間、死傷者数等が大きく左右されることから、避難シミュレーションを行う際には、両者の行動の相互作用を考慮に入れたモデル化が必要となる。そこで、本シミュレーションでは「避難者」と「防災要員(非常口への経路既知)」の、2つのタイプの人間を設定した。

## 2. 4 人間の避難経路選択ルール

避難の際には、避難者がどの方向に逃げるのかということが大きな問題となる。そこで、人間が経路を選択決定する際にポテンシャルの考え方を導入した<sup>2)</sup>。即ち、以下の3種類のポテンシャルを定義し、それらのポテンシャル値の和で方向を決定することにした。

### ①空間ポテンシャル場

避難する場合、その建物に関する知識のない人(土地勘のない人)は、避難するときの指標となるものがないため、混乱に陥ることになるが、誘導灯を配置し、出口の方向へ導く事によって避難を容易なものとすることができる。この様な働きをする誘導灯を表現するために、次のような最短の出口へ向かうためのポテンシャル $G_k$ を表す関数を定義した。

$$G_k = -\sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i} \quad (2.2)$$

ここに、 $n$ :出口数,  $R_k$ :ノード $k$ から出口までのリンク経由の最短距離である。

### ②火災モデルの与えるポテンシャル場

同じ煙濃度が分布した煙でも、見る人(防災要員あるいは避難者)によって受け取り方が異なっている<sup>4)</sup>。即ち、避難者は減光係数が0.2までにほとんどの人が動揺し始めるのに対して、知識のある防災要員は、減光係数が0.6位になってはじめて動揺し始める。このことより、その建物に不慣れな避難者における煙の危険限界濃度は極めて低いのに対し、防災要員の煙の危険限界濃度は高いものになっていることが分かる。このような動揺し始めた状態を各々においてポテンシャル1.0の状態と定義し、次式で与える $F_k$ を移動方向決定時に用いる煙ポテンシャルの値とした。

$$\text{防災要員:} \quad F_k = C_k \times \frac{1}{0.6} \quad (2.3)$$

$$\text{避難者:} \quad F_k = C_k \times \frac{1}{0.2} \quad (2.4)$$

### ③各避難者が過去の記憶として持っている個人のポテンシャル場

シミュレーション例のところで示すように、避難者は避難開始前に200秒間モデル内を移動する。その際、移動した各ノードに対応する個人のポテンシャル値を少し上げて凸の状態を作り、1カ所に留まりにくくする。そして、避難を開始すると同時にそれまでのポテンシャル値に-1を乗じて凹の状態を作り、それまでに通ったノードに対応した個人のポテンシャル場に沿って避難できるようにした。これによって人間の行動特性の1つである「帰巣性」というものを実現している。但し、避難開始後は同じ場所を何度も通るといふ「堂々巡り」を防ぐために避難中に一度通った場所はポテンシャルを $u$ 上げて、通りにくくしている。すなわち、次式で避難者が持つポテンシャル $H_k$ を与える。(式2.5)

$$H_k = H_k + u \quad (2.5)$$

さらに、避難者が防災要員と出会った場合には情報交換を行い、個人のポテンシャル場を更新する。即ち、避難者が見通し距離(後述)内に防災要員を捉えたと、その防災要員からその時点における最適出口を表すポテンシャル場(「最適ポテンシャル場」と呼び、これに関しては後述する)が与えられる。その情報とそれまで避難者の持っていた個人ポテンシャル場の情報を、あらかじめ与えておいた重み( $0 \leq d \leq 1$ )に従って各ノードごとに足しあわせ、それらの値を新たなその避難者の個人ポテンシャル場の情報とするものである。この重み $d$ を変動させることによって、「他人の言うことをよく聞く( $d$ が大きい場合)、あるいは聞かない( $d$ が小さい場合)」といった個人の特性を表現することが可能となる。すなわち、この時の避難者のポテンシャル $H_k$ は式2.6で与えられる。

$$H_k = d B_k + (1 - d) H_k \quad (2.6)$$

ここで、防災要員が与える情報とは、次のようなものである。すなわち、煙の先端が防災要員の位置に達するまでの時間を火元から防災要員までの最短距離によって求め、その時間におけるすべてのノードにおける煙のポテンシャル場と出口への最短ポテンシャル場との和として求めた場である(これを「最適ポテンシャル場」と呼ぶ)。このように、未来の状況を予測し、その結果に基づいて避難者に情報を与えることによって、より実際の防災要員の活動に近い行動を再現することが出来ると考える。

ここに、 $H_k$ は避難者が持つ個人ポテンシャル場、 $B_k$ は防災要員が持つポテンシャル場、 $u$ :定数( $>0$ ) (通ったノードに対応した個人ポテンシャル値から上げる量)とする。

煙の中での「見通し距離」に関しては、煙濃度(減光係数値)と見通し距離との積がほぼ一定値を示す事が分かっている<sup>4)</sup>。よって、煙中における(発光型)誘導灯と防災要員に対する見通し距離 $r$ を減光係数 $C_k$ の関係として、それぞれ次のように仮定した。

$$\text{誘導灯} : r = \frac{7.5}{C_k} \quad (2.7)$$

$$\text{防災要員} : r = \frac{4.0}{C_k} \quad (2.8)$$

#### ④経路決定

避難者は、以上3つのポテンシャル場の和 $P_k$ を求め、その値が最小となる方向へと経路を選択していく。すなわち、

$$P_k = a G_k + b F_k + c H_k \quad (2.9)$$

ここに、 $a, b, c$ は定数( $a+b+c=1$ )であり、以下のような意味を持つ。

$a$  ( $0 \leq a \leq 1$ )の値は、誘導灯に従う度合いを表し、大きい値ほど誘導灯に従い易いことを示す。 $b$  ( $0 \leq b \leq 1$ )の値は、煙に対する反応の度合いを表し、大きい値ほど煙に敏感に逃げるようになる。 $c$  ( $0 \leq c \leq 1$ )の値は、本人の記憶に従う度合いを表し、大きな値ほど過去の記憶をたどって避難するようになる。

表 2. 1 平常時の歩行速度[m/min]<sup>6)</sup>

性別 \ 年齢	0 ~ 9	10 ~ 19	20 ~ 29	30 ~ 39	40 ~ 49	50 ~ 59	60 ~ 69	70 ~
男子	58.7	72.2	78.7	79.6	75.3	76.5	74.6	58.2
女子	53.1	64.4	63.1	63.5	62.8	59.5	53.1	57.0

以上の3つのポテンシャル場を合成する概念図を図 2. 2 に示す。まず、①の空間ポテンシャル場は、出口で小さい値となる分布となる。②の火災ポテンシャル場は、煙の充満している領域で高い値をもつ。③の人間ポテンシャル場は本人が入場してきた入り口へ向かう場が小さな値となる分布となっている。これらを合計したポテンシャル場④の値の小さい方に、すなわちこの図の例ではこの避難者は出口2の方へ向かって避難することになる。図 2. 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。

一方、防災要員の行動は次のように仮定した。火災発生前は何も行動を行わず、発生後煙が自分の周囲であるレベルに達するまでは、決められたルートに従って、避難者の誘導を続ける。あらかじめ設定しておいたレベルに達すると、自分の生命に危険が及ぶと判断し、より安全性が高く、より近い出口へ向かって避難を開始する。避難開始後の行動に関しては、避難者と同じポテンシャルの計算法を用いている。ただし、避難中も、避難者に出会った場合、その時点における最適な情報を与えるなど、避難誘導活動は引き続き行うものとする。また、人間（避難者、防災要員）の死亡判定基準としては、煙中を移動した場合にその場における煙のポテンシャル値の和が、0.7に達したかどうかで求める事になっている。

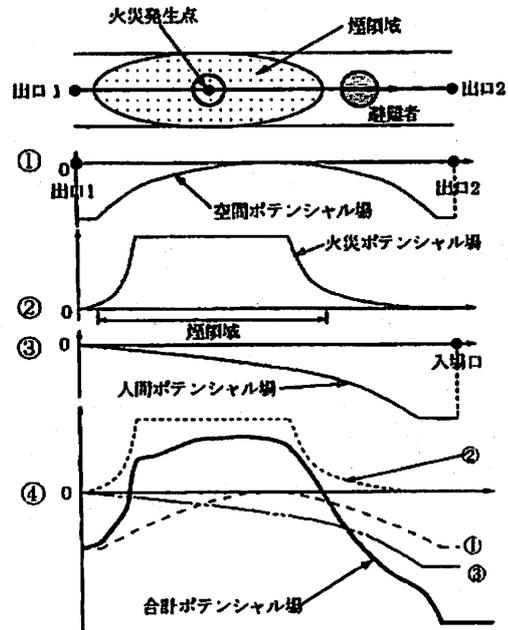


図 2. 2 ポテンシャル合成の概念図

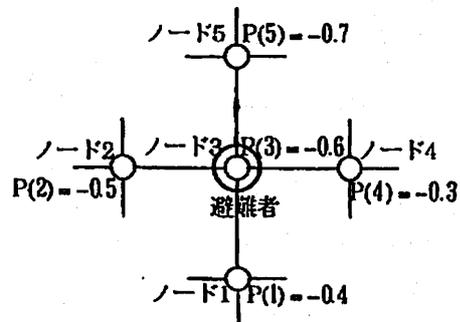


図 2. 3 方向決定とポテンシャルの関係

2. 5 人間の歩行速度の決定

避難時における歩行速度は平常時の2倍とし、特に煙中での歩行速度  $v$  [m/sec] は、減光計数値の関数として、式(2.10)のように仮定した<sup>4)</sup>。

$$v = -0.33 \times C_k + 2 \times s \tag{2.10}$$

ここに、 $s$  は平常時の歩行速度で、年齢、性別により表 2. 1 の値を与えた<sup>6)</sup>。

### 3. シミュレーション例

#### 3.1 シミュレーションの方法

作成したモデルを、図3.1に示す岡崎らが迷路実験で用いたモデル<sup>5)</sup>に適用して、避難シミュレーションを行った。図中における小丸は避難者を、大丸は防災要員を、太線は防災要員の巡回経路を表す。ここで、防災要員が巡回経路からはずれているのは、煙のために避難を開始したためである。シミュレーションに用いた諸元は以下に示すとおりである。

##### ①避難者・・・100 [人]

・性別：男、女

(各々乱数で人数を発生させる)

・年齢：10歳ごとに8段階に分類(同上)

・入り口ノード番号(乱数で与える)

・初期配置ノード(同上)

・土地勘：ある(50人)、ない(50人)

ただし、土地勘が「ある」とは出口への最短ポテンシャル場をあらかじめ持っている場合であり、「ない」とは個人ポテンシャル場が乱数で与えられる場合である。

##### ②防災要員・・・0, 2, 4, 6, 8, 10 [人]

(計6パターン)

・各々、巡回ルートを初期値で与える。

##### ③(発光型)誘導灯・・・ある、なし

(計2パターン)

##### ④シミュレーション開始(time=0)で、各避難者は、乱数で与えられた初期配置ノードから入場を始め、同じく乱数で与えられた初期配置ノードへと最適ルートを通って移動していく。

⑤200秒後に出火点から出火させ避難者は避難を開始し、同時に防災要員の活動を開始させる。

⑥出火点は、図3.1のノードA(2つの出口から共に遠い地点)とノードB(モデルの出口付近)の2ケースで行う。

⑦シミュレーションは、以上の24(=6×2×2)パターンを行うものとした。

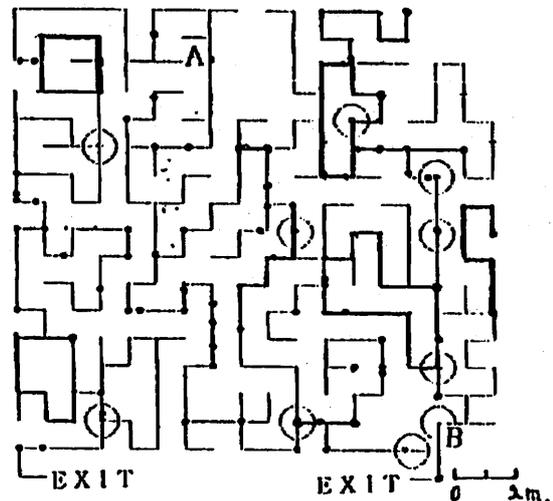


図3.1 シミュレーションモデル

#### 3.2 シミュレーション結果

出火場所をノードAとしたときの誘導灯の有無による避難完了時間と避難完了者数との関係を、(a)防災要員がいない場合、(b)防災要員がいる場合を図3.2に示す。同じく出火場所をノードAとしたときの、誘導灯の有無と防災要員数による(a)死亡者数と(b)避難完了時間の結果を図3.3に示す。

図3.2(a)より、誘導灯有りの方が無しの場合より効率の良い避難を行っており、さらに(b)で防災要員がいた場合にさらに効率の良い避難が行われていることが分かる。また、図3.3より、死亡者、避難完了時間共に、誘導灯有りかつ防災要員の多い場合の方がよい結果となっていることが分かる。また、両グラフの死亡者数を見比べた場合、(a)では誘導灯の有無でシミュレーションの後半部分で大きな差が見られるが、(b)では、誘導灯無しの場合で途中避難効率が落ちるものの、最終的な死亡者数に関しては差がほとんどでない。なお、両グラフ共に避難完了者数50人付近まで誘導灯の有無による避難効率の差が表れていないが、これは、土地勘のある避難者を50人に設定しておりそのためこの50人に関しては誘導灯に無関係に効率的な避難ができていたためである。

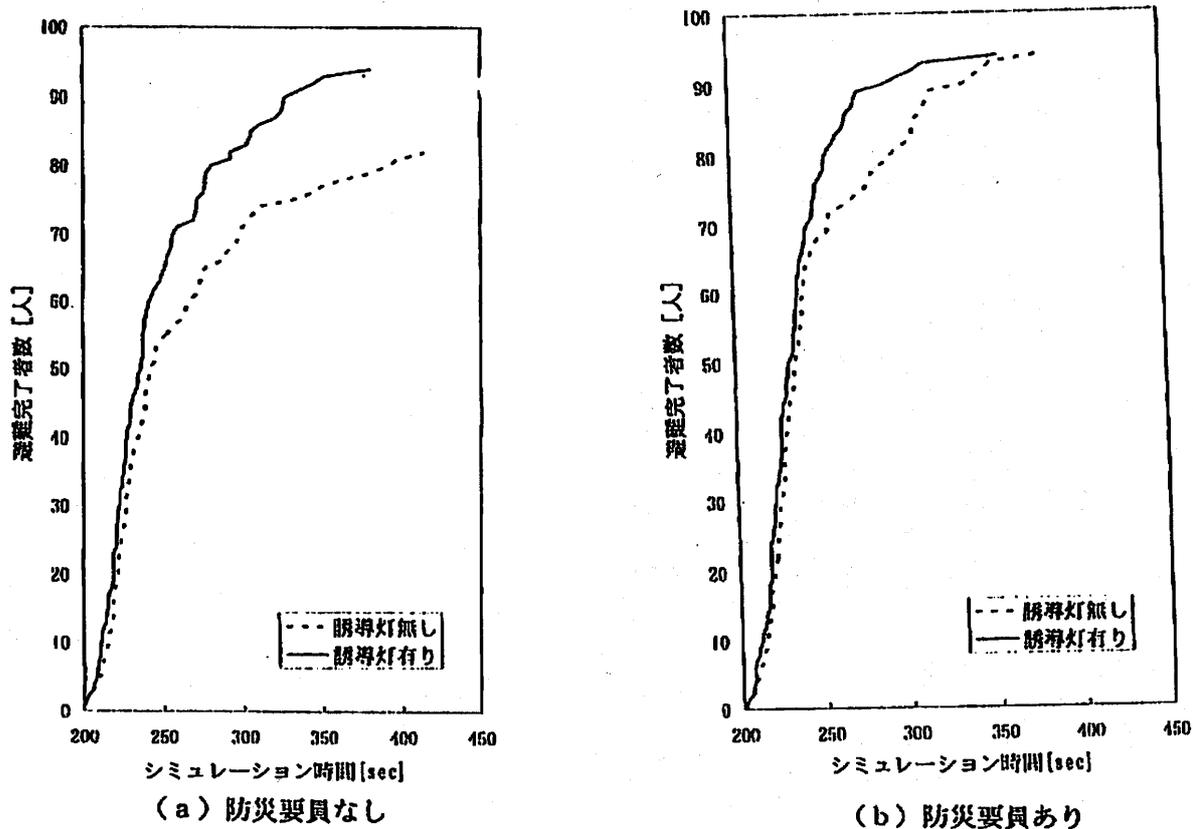


図 3. 2 誘導灯の有無による避難完了時間と避難完了者数との関係

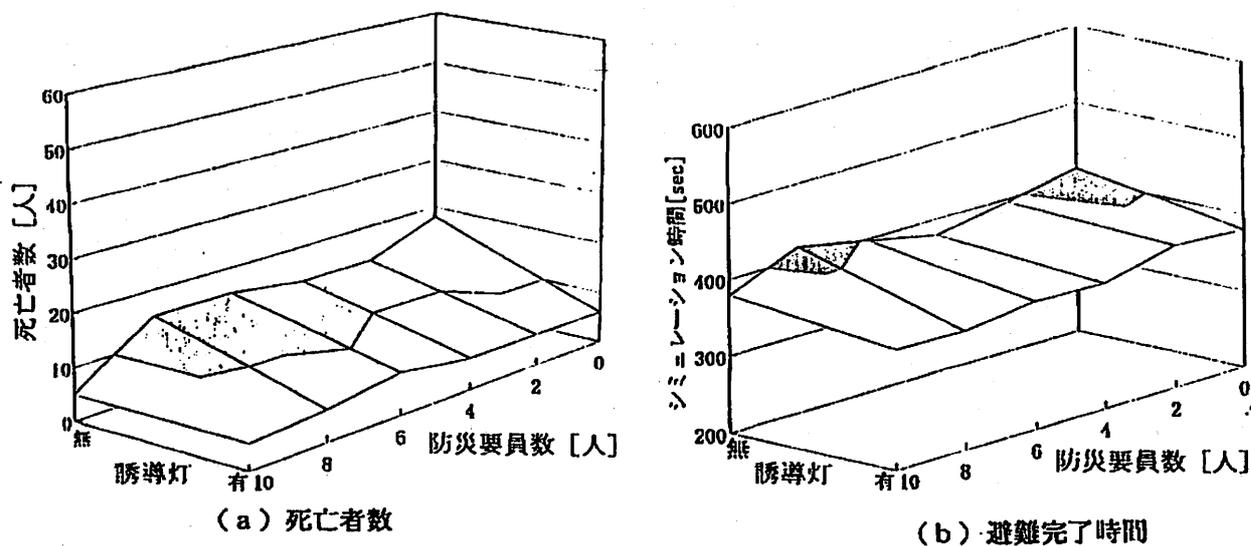


図 3. 3 誘導灯の有無と防災要員数によるシミュレーションの結果

と思われる。

次に、出火場所をノードBとしたときの結果を図3.4に示す。このグラフで、「誘導灯無し、防災要員無し」の場合より、「誘導灯有り、防災要員無し」の場合の避難効率の方が良くなっているのは、2つの出口の内、出火場所の反対側の出口から誘導灯に従って効率よく避難した避難者が多いためである。さらに、防災要員がいた場合の方が避難効率、避難完了者数ともによい結果を示している。ここで死亡者数が50人前後と多いのは、2つしかない出口の片方で出火したという極端な状況に置ける避難のためであると考えられる。このシミュレーションでは、誘導灯が出火場所である出口を指し示したため死者数を増加させて、避難に悪影響を与えている。

#### 4. 結論

本研究は、誘導灯と防災要員を導入した避難行動シミュレーション手法を開発し、迷路モデルに適用してシミュレーションを行い、「誘導灯の有無」、「防災要員数」、「土地勘の有無」等の影響の比較検討を試みたものである。

シミュレーションの結果から、出火場所によっては非常誘導灯が避難の際に好ましくない情報を与え、死者を多く出す結果となった。しかし、このような場合においても防災要員を導入することによって、死者数を減少させ、避難効率を上げることが分かり、誘導灯がある場合においても防災要員が有効となることを示すことが出来た。

今後の課題としては、火災による煙の動きをより現実に近い表現ですること、同時に人間に対する煙の致死量を実際のデータに基づいて決定すること等が上げられる。

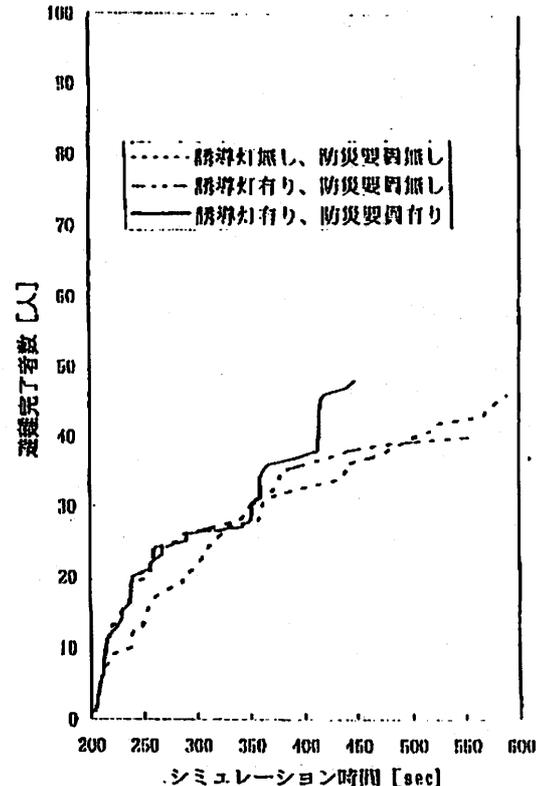


図3.4 出口付近から出火した場合の避難状況

#### 謝辞

本研究を進めていく上で、清野純史助教授、大学院の八木宏晃氏から助言を頂いた。謝意を表す。

#### 参考文献

- 1) 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.
- 2) 瀧本浩一, 清野純史, 三浦房紀, 八木宏晃, 「遺伝子コードを用いた避難行動シミュレーション」, 第9回日本地震工学シンポジウム, Vol. 2, pp. 2359-2364, 1994.
- 3) 建築消防実務研究会編, 「建築消防 advice '94」, 新日本法規出版株式会社, 1994.
- 4) 日本建築センター出版部編, 「新・建築防災計画指針 1985年版」, 技報堂, 1985.
- 5) 栗本義彦, 「体力づくりへの道」, p182, 1974
- 6) 岡崎慎幸, 松下聡「巨大迷路探索歩行実験における経路イメージ及び歩行経路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441号, 1992.