

# パーソナルコンピュータを用いた3次元 避難行動シミュレータの開発とその評価

瀧本浩一<sup>1</sup>・三浦房紀<sup>2</sup>・原 誠<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山口県宇部市常盤台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山口県宇部市常盤台2557)

<sup>3</sup>工修 出雲グリーン株式会社 (〒693島根県出雲市矢野町810)

本研究では普及率の高いパーソナルコンピュータを用いてコンピュータグラフィックスにより3次元表示された仮想的な構造物内で避難を体験できる3次元避難行動シミュレータの開発を行った。そして、シミュレータの評価を行うため、これを用いて被験者100人に対し2種類の迷路の避難行動実験を行った。その結果、本シミュレータで得られた結果は既存の迷路実験結果と整合性があることが分かった。さらに、歩行パターンの抽出や、迷路のどの場所ですみやすいかといった構造的特徴といった防災計画に有益となる情報を得ることができることも分かった。

**Key Words :** simulator, 3D-computer graphics, human behavior, disaster reduction plan, personal computer

## 1. まえがき

わが国では都市システムの高度化、複雑化の傾向にあり、このような地下構造物や高層建築物の共通する特徴としては空間の閉鎖性があげられる。1995年の阪神・淡路大震災では、地震の発生が早朝であったが、もし、同規模の地震が人間の活動時間帯に発生すれば、こうした空間で多くの人的被害が出たものと考えられる。このような状況下で総合的な防災計画づくりを行うためには構造物自体の不燃化や耐震化といったハード面だけでなく、その中で活動する人間の行動の予測や避難計画などのソフトな面も充実しなければならない。即ち、避難の際に支障を来さないように非常口の位置や非常口までの経路の長さ等の構造物の内部構造を検討したり、構造物の建設後に設置される什器類や陳列棚等の転倒による避難路の閉塞といった危険因子をあらかじめ発見することも重要である。また、一般市民においても災害時に冷静に行動を行うためには日頃から防災に関する知識を身につけておくだけでなく、災害に遭遇した際に自分がどのような行動をとるかをあらかじめ体験して、把握しておくことも重要である。しかしながら、災害時の人間行動を人を使って実際の構造物内で実験や訓練を行うことは危険性

を伴うことから事実上不可能である。また、それを予測するためのコンピュータによる避難行動シミュレーションにも人間行動を規定するパラメータが不明であったり、それにより得られた結果が妥当であるか否かの検証が困難であるという問題点を抱えている。そこで、このような実験や訓練を再現したり、避難シミュレーションのための基礎データを得るために、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タの開発が試みられている。例えば、林らはパーソナルコンピュータを用いて使用者が建物内の平面図を見ながら避難する避難行動シミュレータを用いて火災時におけるリーダーの行動分析を行っている<sup>2)</sup>。また、目黒らはバーチャルリアリティ(現実仮想空間)を利用したシミュレータを開発し、シミュレータによる訓練が、実際の迷路実験における行動に与える影響などの分析を行っている<sup>3)</sup>。しかし、前者のようなシミュレータでは、建物内を平面図で表示しているため、使用者はその対象とする建物内の全体構造を見ながら避難するという点で現実的ではないと考えられる。また、後者のようにバーチャルリアリティを用いることで、より現実感を持たせた避難行動を行わせることが可能となったが、バーチャルリアリティを作り出すために必要な周辺機器等が高コストとなり、使用者が限定され

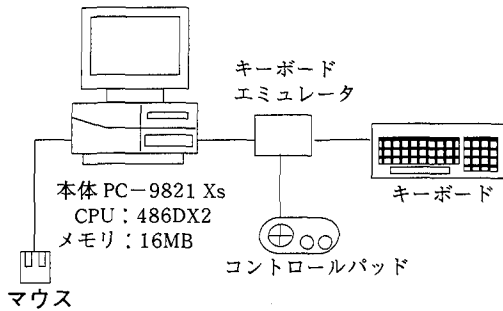


図-1 開発に用いたシステム構成

るといふ難点がこの手法には残る。

そこで、本論文では普及率の高い安価なパーソナルコンピュータでも利用でき、地下街や百貨店といった構造物の屋内を3次元表示することでシミュレータ使用者の視点で見ながら避難を行わせることができる簡易なシミュレータの開発を行った。さらに、開発したシミュレータを2種類の迷路に適用して、既存の迷路実験との整合性の検討やシミュレータの可能性について考察を行った。なお、火災時等における避難行動には火元確認、119番通報、初期消火、救助、避難といったものが含まれるが、本論文で述べるシミュレータは避難のみを再現するものである。

また、本研究でいう「使用者」とはシミュレータを使う人やユーザであり、後出の「被験者」とは、使用者の中で特にシミュレータの評価実験のためにシミュレータを使った人である。

## 2. 3次元避難行動シミュレータの概要

### (1) 開発環境

3次元避難行動シミュレータ開発に用いたシステムの構成とアプリケーションソフトウェアを図-1と表-1にまとめてそれぞれ示す。本シミュレータの開発にあたっては、比較的安価で演算処理能力も標準であるNEC社製のパーソナルコンピュータPC-9821 Xsを用いた。さらにその周辺機器としてキーボードとマウスの他にシミュレータ操作に関してコンピュータに不慣れな使用者が容易に操作が行えるようにキーボードエミュレータを介してゲーム用のコントロールパッドを接続して用いた。

本シミュレータ開発のためのプログラミング言語としては、BORLAND社のTURBO C++とフリーソフトウェアのGRLIBを用い、オペレーティングシ

表-1 開発に用いたソフトウェア

| 名称                               | 内容           |
|----------------------------------|--------------|
| MS-DOS Ver.5.0<br>(Microsoft 社製) | オペレーティングシステム |
| TURBO C++<br>(BORLAND社製)         | C言語コンパイラ     |
| GRLIB<br>(フリーソフトウェア)             | グラフィックスライブラリ |

テムとして、Microsoft社のMS-DOS Ver.5.0を用いた。

以下にこれらハードウェアおよびアプリケーションソフトウェアを用いた利点を記す。

- ①PC-98 シリーズは国内で最も普及率の高いパーソナルコンピュータであり、開発したシミュレータを多くの使用者が利用することができる。
- ②TURBO C++はC言語のコンパイラの中でも比較的高速な実行ファイルを作成することができ、高速にシミュレータを動作させることができる。
- ③C言語はアセンブリ言語のプログラムを容易に結合でき、将来、シミュレータの高速化が可能である。

### (2) 3次元避難行動シミュレータの概要

本研究で開発した避難行動シミュレータの特徴を以下に記す。

- ①コンピュータに精通していなくても容易にビルや地下街等の対象とする空間を構成したり、火災等の仮定の災害を設定するなどの環境設定ができる。
- ②安価なパーソナルコンピュータで動作することから、百貨店のような大規模店舗や地下街等の管理者の防災計画支援のためのシステムとして用いるだけでなく、その従業員や一般市民といった多くの人々が利用可能である。

開発したシミュレータは、屋内空間データエディタとシミュレータから構成されている。

以下にそれぞれの内容について述べる。

#### a) 屋内空間データエディタ

コンピュータによる避難シミュレーションを行うには、対象となる地下街やビルなどの屋内のデータを作成する必要がある。しかし、これらデータの作成には多くの時間と手間を伴い、コンピュータに詳しくない使用者がデータの作成作業を行うことは一般に困難である。そこで、そのような使用者でもデー

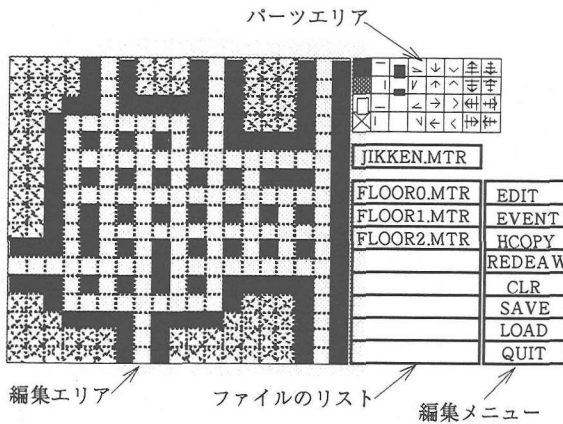


図-2 屋内空間データエディタの構成

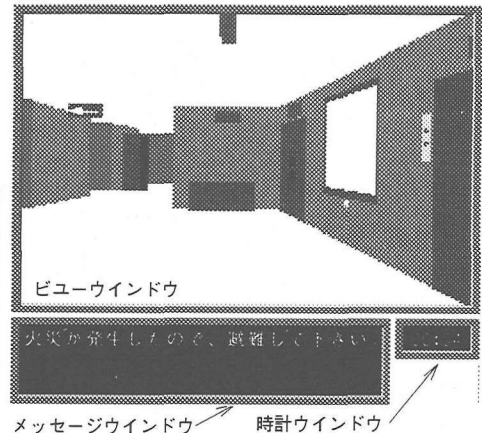


図-3 シミュレータの構成

表-2 仮想災害の種類

| 仮想災害の種類  | 内容                        | 発生条件                            |
|----------|---------------------------|---------------------------------|
| 火災       | 指定した場所で火災が起きる             | シミュレーション開始時または使用者が指定した場所に到達時に発生 |
| 什器類の転倒   | 設置した什器類が倒れる               | シミュレーション開始時または使用者が指定した場所に到達時に発生 |
| 停電       | 非常誘導灯を除き画面が暗くなり、周囲が見え難くなる | シミュレーション開始時または使用者が指定した場所に到達時に発生 |
| 出口の閉塞    | 出口が開かなくなり、使用不能になる         | シミュレーション開始時に発生                  |
| エレベータの停止 | エレベータの扉が開かなくなる            | シミュレーション開始時または使用者がエレベータを使用中に発生  |

タを容易に編集できるように支援するユーザーインターフェイスとして、「屋内空間データエディタ」を作成した。この屋内空間データエディタは大きく分けて編集メニュー、パーツエリア、編集エリアからなる。図-2に屋内空間データエディタの画面構成を示す。

まず、編集メニューでは、上から順に編集のためのEDITや後に述べる仮想災害の設定を行うEVENT、画面のハードコピーを行うHCOPY、作業の取り消しを行うREDRAW、編集エリア上の図を消去するCLR、ファイルの保存や読み込みを行うSAVEとLOAD、編集を終了するQUIT等のボタンが登録してある。これらをマウスクリックという簡便な操作により、それぞれの命令を実行することができる。

次にパーツエリアには、あらかじめ屋内空間を構成する壁や階段、エレベータ、非常誘導灯といった設備を画面上にアイコン化して並べて表示している。このパーツエリアでマウスクリックを行って選択し、編集エリア上に並べながら建物内の平面図を作成、編集が行えるようになっている。例えば、図-2は地下街を作成している一例であるが、編集エリアにおける黒い部分は作成した壁や柱を、点線の×印の

部分は人が通れない部分を、白い部分が通路をそれぞれ表している。なお、この編集エリアは縮尺が変更可能なメッシュが、400メッシュ（縦20メッシュ×横20メッシュ）集まって構成されており、最大10000㎡の広さの屋内構造の編集が可能である。さらに、ビル等の1階分の屋内構造のデータを1つのファイルとして階数分作成して、階段やエレベータ等でそれぞれのファイルをリンクすることで、ビルや地下鉄駅等の多層構造物内での移動を再現することもできる。

次に本シミュレータでは、構成した構造物内に火災等の仮想の災害を設定し、シミュレーション時に設定した災害を発生させることができる。設定できる災害の種類と内容を表-2に示す。

- ①火災：火災はシミュレーション開始時、またはシミュレータで移動中に使用者があらかじめ設定しておいた場所に来た時に発生し、火災の絵を表示する。
- ②什器類の転倒：什器類の転倒はシミュレーション開始時、または使用者があらかじめ設定しておいた什器に近づいた時に倒れ、幅の狭い通路の場合には通路を什器類が塞ぎ通れなくなる。

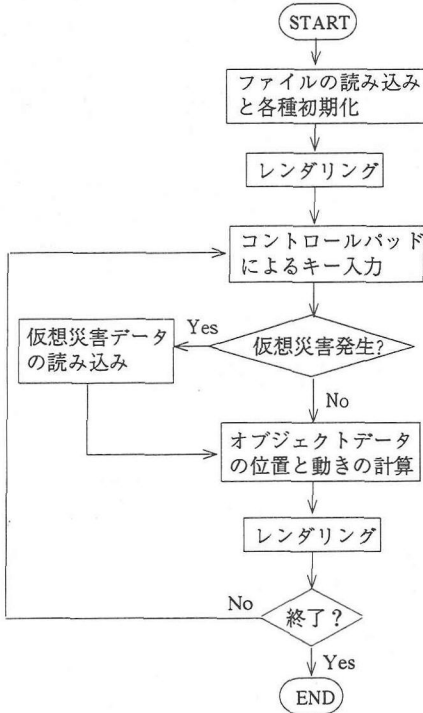
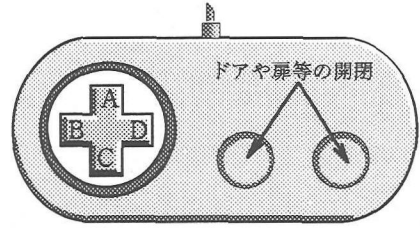


図-4 シミュレータ動作のフローチャート

- ③停電：停電はシミュレーション開始時または、シミュレータで移動中に発生し、非常誘導灯等の防災設備のための照明を除いて画面全体が暗くなり、壁や通路等が見えにくくなる。
- ④出口の閉塞：シミュレーション開始時に起き、シミュレータで使用者がドアへ近づき、ドア開閉のためにコントロールパッドでボタンを操作してもドアは開閉せず、そのドアを利用することができなくなる。
- ⑤エレベータの停止：シミュレーションの開始時、または使用者がエレベータに乗った時に発生し、エレベータのドアが開閉せず、エレベータに乗れない、あるいはエレベータ内に閉じこめられる。
- なお、仮想災害としては壁や天井などの構造物自体の崩壊はないものとした。この理由としては、崩壊のシミュレーションには個別要素法といった別のシミュレーションモデルを入れる必要があり、避難シミュレーションを行わせながら、その結果を3次元表示するにはパソコンの処理能力では困難であるからである。また、火災についても、その延焼や煙の拡散モデルが複雑であり、対象とする空間内を拡散する煙をリアルタイムに計算し、それを3次元表示することはやはり現在のパソコンの処理能力では



A：前進 C：後退 AとB同時：左斜め前進  
B：左回転 D：右回転 AとD同時：右斜め前進

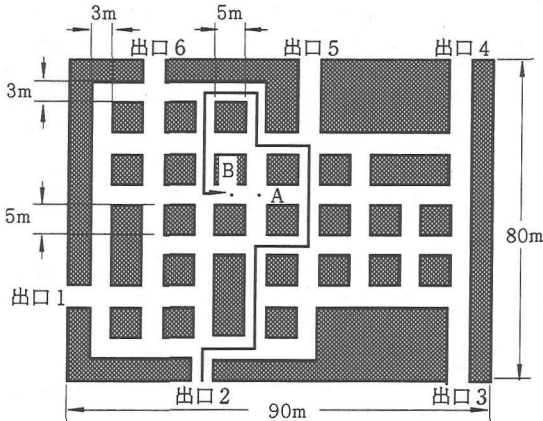
図-5 コントロールパッドのキー入力と移動方向

困難である。したがって、火や煙は拡散しないものとし、火のみ発生点で動かない赤い円柱として表示している。

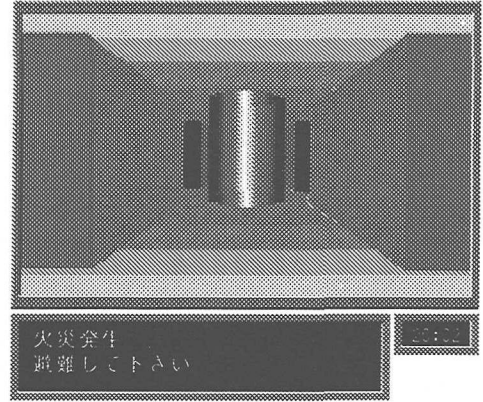
#### b)シミュレータ

シミュレータはa)の屋内空間データエディタで作成した屋内の平面図のデータを読み込み、それをコンピュータグラフィックにより3次元表示する。そして、使用者がコントロールパッドによるキー操作を行うことで使用者の視点を移動・回転させ、シミュレータの使用者があたかも構造物内を移動しているかのようにみせることができる。図-3にシミュレータの実際の画面の一例を示す。シミュレータ画面は、ビューウィンドウ、時間ウィンドウ、メッセージウィンドウの3つのウィンドウから構成されている。ビューウィンドウは、使用者の視点から見える3次元表示された屋内空間が8ビットカラー(256色)のコンピュータグラフィックスで表示されるウィンドウである。さらに、時計ウィンドウには、シミュレータを動作させてからの経過時間が表示され、メッセージウィンドウは使用者に災害の発生等の情報を告知するときのみ表示される。

次に、シミュレータの動作の流れについて図-4に示すフローチャートに沿って説明する。まず、各種初期化では、屋内空間データエディタで作成されたデータを読み込み、最初に使用者から見える壁やドアといったオブジェクトをレンダリング(描画)してビューウィンドウに表示する。シミュレータの使用者が前進や斜め移動、方向転換、ドアの開閉を行うためには図-5に示すコントロールパッドのボタンキーを押す。これらのボタンキー入力によって変化した壁や柱等の位置やドアの開閉等の動きを計算、レンダリング(描画)し、先の表示画面上に上書きして表示する。これらキー入力と計算、画面表示を高速に繰り返して行わせることで、使用者にリアルタイムに移動しているかのようにみせることができる。なお、本シミュレータでは、人間の歩行速度



図一六 出口が複数ある迷路モデル



図一七 実験時のシミュレータの画面 (中央の円柱が火災を表す)

が年齢、性別によって異なる点<sup>4)</sup>を考慮に入れ、シミュレータの使用前に使用者の年齢や性別に合わせて歩行速度を変更できるようにした。また、使用者が移動の際に構造物の壁や柱等の障害物に衝突した場合には、その場所で停止して使用者によるキー入力が再度なされるまで動かないものとした。なお、ここで用いたコントロールパッドによる操作ではその習熟度によって避難行動や避難時間に影響を与えることが考えられる。そこで、シミュレータによる実験の前には別途異なる構造物のモデルを用いて操作に慣れてもらう必要がある。

### (3)シミュレーションの保存と再現

本シミュレータを使用する使用者の行動の特性を調べるために、シミュレータ使用中に得られる行動の軌跡や移動時間を記録する必要がある。そこで、シミュレーション中に入力したコントロールパッドのキーの種類とそのキーが押された時間を記録し、シミュレーションの終了時にファイルとして自動的に保存が行えるようにした。また、記録されたファイルのデータを読み込み、使用者が移動した軌跡をビューウィンドウ上に動画で再生する機能も設けた。

## 3. シミュレータによる迷路実験

本研究で開発したシミュレータの評価を行うため、山口大学工学部の20歳前後の学生100人に対し、以下に述べる2種類の迷路について実験を行った。なお、被験者に学生を選んだ理由は、コントロールパッドの操作に慣れた学生に使用してもらうことに

より、シミュレータの操作ミスを少なくする必要があったからである。

### (1) 出口が複数ある迷路の場合

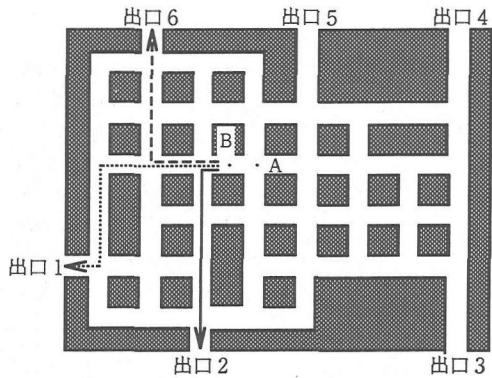
#### a)実験の概要

実験に用いた地下街モデルの平面は図一六に示すように大きさ90m×80m、通路幅3mであり、天井高さは2.5mである。これは先に述べた屋内空間データを用いて作成したものである。被験者には実験前に実験用の地下街モデルとは別の簡単な迷路中を移動してもらい、シミュレータの操作に慣れた後に実験を開始した。実験は次の2通りの方法で行った。

- ①図一六のB点に被験者を交差点Aへ向かせた状態で配置した。その後、図一七のようにビューウィンドウ上に交差点Aで火災が起こった様子と「火災発生」のメッセージをメッセージウインドウに表示して実験を開始し、被験者が出口へ到着すると実験を終了させた。
- ②まず、図一六の出口2よりこちら（以後実験者という）の誘導に従って実線に示した通路を移動してもらった。そしてB点へ到着した後、ビューウィンドウ上に交差点Aで火災が起こった様子と「火災発生」のメッセージをメッセージウインドウに表示して避難を開始してもらい、被験者が出口へ到着すると実験を終了させた。

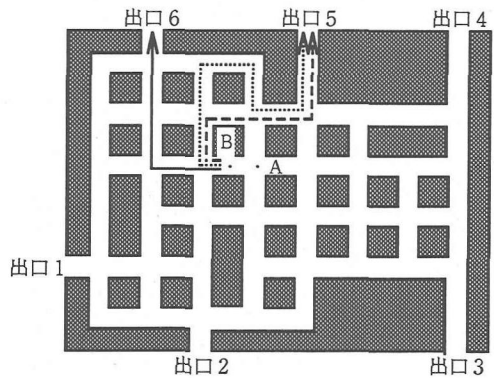
以上の2通りの実験結果を比較することによって過去に歩行した記憶が避難時の歩行経路の選択に影響を与えるかどうかを調べることができる。

これら実験を各被験者に対し1回ずつ行い、実験終了後にどのような方針で歩行したか聞き取りを行った。なお、被験者の歩行速度は被験者の年齢に



—— (a)被験者100人中21人がとった避難経路  
 - - - - (b)被験者100人中16人がとった避難経路  
 ..... (c)被験者100人中12人がとった避難経路

図-8 ①の実験で被験者がとった避難経路のうち直進傾向を示したもの



—— (a)被験者100人中29人がとった避難経路  
 - - - - (b)被験者100人中18人がとった避難経路  
 ..... (c)被験者100人中8人がとった避難経路

図-9 ②の実験で被験者がとった避難経路のうち過去の記憶をたどったものと記憶した経路から逸脱したもの

表-3 経路選択理由と歩行特性

| 実験で得られた歩行経路の図番号 | 経路選択理由  | 歩行特性                |
|-----------------|---|---------------------|
| 図-8             | 「とりあえず直進する」<br>「いけるだけまっすぐ進む」<br>「最も近い曲がり角を選択」 | 直進傾向<br>または<br>屈進傾向 |
| 図-9             | 「記憶をたよりに、できるだけ以前に通った経路と同じ経路をとる」               | 経路の記憶               |

おける平均的な速度である3.0m/s<sup>4</sup>)とし、屋内の見通し距離は、煙が薄く濃い、煙感知器が作動する濃度である減光係数を0.1とした<sup>5</sup>)。また、実験②については実験①により歩行経路を覚えている被験者がいることが考えられるので、①の実験後に(2)で述べる迷路実験を行い、その後、②の実験を行った。さらに、実験に際し、被験者に対して地下街モデルの構造や出口の数などの情報は一切与えなかった。

### b)被験者から得られた歩行経路

①の実験で被験者がとった歩行経路のうち多く見られた経路を図-8に矢印で示す。図-8における(a)は被験者100人中21人と最も多くの被験者がとった行動を示したもので、B点で進む方向を反転させた後に最初の交差点を左折、直進して出口2より避難に成功している。次いで2番目に多かった行動パターンである(b)では、B点で反転の後に直進し、2つめの交差点を右折して直進の後、出口6へ到達している。3番目に多かった(c)では、B点で反転した後、直進して3つめの交差点を左折し、直進して右折後、出口1より避難している。

次に図-9に②の実験で多く得られた被験者の歩行経路を示す。図-9(a)では100人中29人と最も多

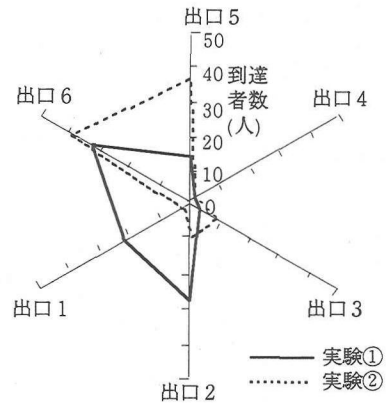


図-10 実験①および②における出口毎の被験者到達者数

く、次いで(b)に示すようにB点で進む向きを反転して最初の交差点を右折し、さらに次の交差点で再度右折、直進して出口5を発見している。3番目に多かった(c)では、被験者はB点で方向を反転し、最初の交差点で右折の後、地下街モデルの最も外側の通路に突き当たるまで直進して右折後、その通路に沿って移動して出口5を発見している。

### c)歩行特性の分類

b)で示した歩行経路を松下らが行った探索歩行実験<sup>6</sup>)による歩行特性に分類すると表-3になる。まず、図-8の経路選択理由としては「最も近い曲がり角を選択」や「行けるだけまっすぐ進む」、「とりあえず直進する」があげられる。即ち、これは目的地への経路が不明なときに表れる歩行特性である。さらに、被験者が進もうとする方向に複数の曲がり

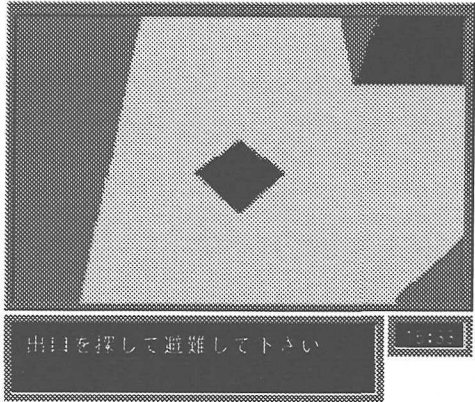
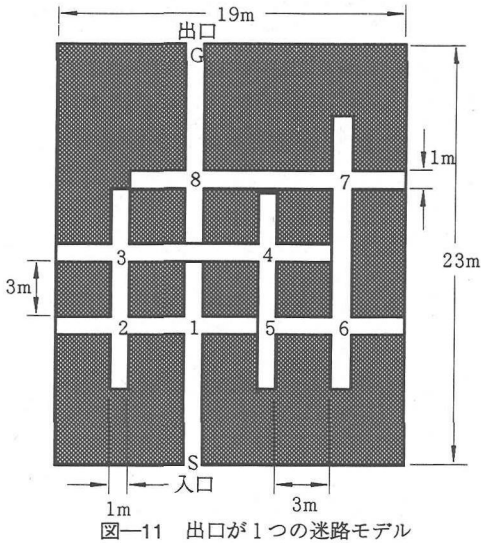


図-12 実験時のシミュレータの画面  
(中央の◆は敷設したマーク)

角がある場合に特に「直進傾向」と「屈進傾向」が組み合わされた歩行特性が見られる。これは避難開始前に実験者による誘導がなされなかったことに起因していると考えられる。

次に、図-9(b)および(c)では、曲がる交差点の位置は部分的に違っているものの、実験者によって誘導された経路を戻ろうとしてその途中で出口6または出口5を発見している。これらは、実験者による誘導、即ち前に通った経路を通るといった特性が表れている。また、図-9(a)については、実験後の聞き取りから実験①でとった避難経路を覚えていた被験者がいたことが分かった。したがって、図-9の結果は、「以前に通った経路と同じ経路をとる」という経路選択理由に起因した歩行と考える。

以上より既存の歩行実験<sup>6)</sup>から明らかになっている歩行特性と同じものを本シミュレータにより得ることができることが分かった。

#### d)被験者の出口別到達者数

次に①と②の実験で各出口に到達した被験者の数を図-10にそれぞれ示す。図から①の実験では出口6が32人と1番多く、次いで出口2、出口1の順で多い。これより、被験者が火災を発見した点Bを中心と考えると、出口への経路を知らない被験者が火災発生日点Aとは反対方向の出口を目指したことが分かる。一方、②の実験では出口6が39人と最も多く、次に出口5が多かった。これより、①の実験とは異なり、実験者によって誘導された経路またはその方向へ引き返す方向の出口を探索したことが分かる。

これから、本シミュレータにより、火災発生場所を想定してシミュレーションを行うことで、避難者が集中する非常口や通路をあらかじめ知ることが出来る。これにより、実際の地下街等の防災計画づくりを行う際に、避難時に危険となりうる場所、即ち非常口や通路、階段、陳列棚のような設置物がある場所を知る手がかりになるものと考えられる。

### (2) 出口が1つの迷路モデルの場合

#### a)実験概要

図-11に示す渡部らが屋外の実験で使用した迷路のモデル<sup>7)</sup>を用いて経路探索に関する実験を行った。

実験方法としては被験者に図の入口Sより迷路内へ入り、出口を探して出るように指示を出し、被験者1人ずつに対し実験を行った。また、渡部らの実験では被験者の視野に制限範囲を設け、足下のみ見ることができるよう頭巾をかぶせて実験を行っている。そこで、本実験でも条件を同じにするために、ビューウインドウに表示される視野範囲を被験者の前方1.7m、側方2mに限定し、歩行速度については薄い煙中を進む速度である0.7m/s<sup>8)</sup>とした。さらに、渡部らの実験では各交差点および行き止まりの床に被験者への目印としてそれぞれ色の異なるマークを敷設してあったので、本実験でも図-12に示すように色と形が異なるマークを床に同じように設けた。なお、ここでは説明の都合上、図-11中には目印の代わりに入口をS、出口をG、迷路中の各交差点には1から8までの番号を付してある。また、実験

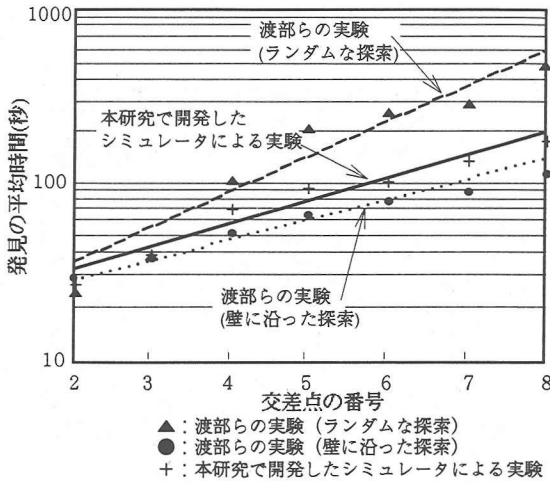


図-13 被験者の各交差点の平均発見時間

に際して被験者には目印の存在については告げたが、迷路の形状や交差点の数、歩行経路に関しては知らせずに実験を行った。

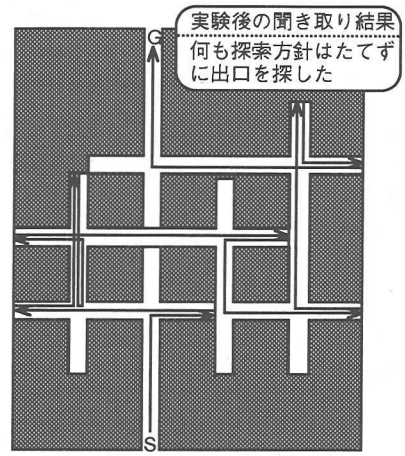
#### b)各交差点における平均発見時間

各交差点とその平均発見時間とが指数関係にあることが渡部らの研究<sup>7)</sup>で分かっている。そこで、本実験で得られた結果と渡部らの実験結果を比較するために横軸に交差点の位置、縦軸に発見の平均時間の対数を取り回帰直線で表したものを図-13に示す。図-13中のランダムな探索とは、渡部らの実験において被験者が何も方針を持たずに歩行した場合の結果であり、壁に沿った探索とは同じ実験で迷路中の壁に沿いながら規則的に歩行した被験者の結果である。これより本シミュレータによる実験の結果、即ち発見の平均時間は実際の迷路実験におけるランダムな探索と壁に沿った探索との間に入っており、やや壁に沿った探索に近い結果となった。

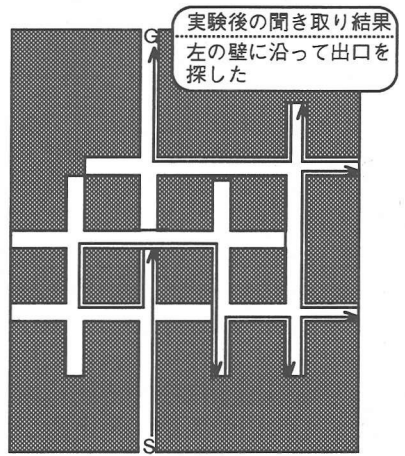
以上より本シミュレータを用いて行った実験と実際の迷路を使った実験とほぼ同じ結果を得ることができた。

#### c)被験者より得られた探索経路

次に図-14に実験で得られた探索経路のうち代表的な例を矢印でそれぞれ示す。図-14(a)に途中で方向を見失った被験者の例を示す。被験者は出口の探索方針を持たずに歩行して交差点3を発見後、その周囲の探索を行った際に方向感覚を失って逆戻りし、交差点2の目印を見て既に通過した点であることに気づき、再び交差点3へ戻っている。その後、被験者は方向を見失うことなくゴールへたどり着いている。また、図-14(b)に規則的な探索を行った



(a)途中で方向を見失った被験者の例



(b)規則的な探索を行った被験者の例

図-14 ゴール地点Gを発見するまでの被験者の代表的な探索行動例

被験者の例を示す。被験者は交差点1を通過後、通路の右の壁に沿って進むという明確な方針のもとに歩行を続け、ゴールへ到達している。これら探索経路と実験後の聞き取りにより、被験者の歩行する方針の有無により、歩行パターンに違いが生じることが分かった。

#### d)各交差点の通過回数

次に図-14(a)のように方向を見失うと探索のために被験者の交差点での通過回数が増すことに着目し、全被験者が迷路のどの交差点を多く通過したかについて得られた結果を図-15に示す。このグラフから以下のことが分かる。

交差点5を谷として2つのピークが表れていることが分かる。この理由としては、交差点5が迷路中唯一のT字路であり、他の十字路と比べ探索回数が



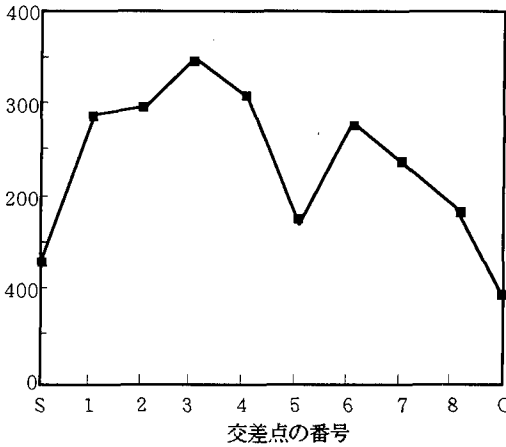


図-15 各交差点における被験者の総通過回数

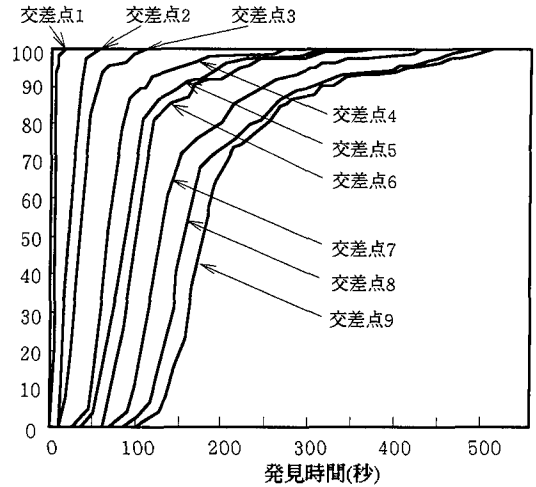


図-16 各交差点における被験者の累積発見率

少なくとも済んだことや出口を探索する上での目印になったものと考え。さらに、被験者は最初のピークである交差点3と後半のピークである交差点6を中心に出口の探索を行っており、交差点5を境に大きく分けて2箇所の交差点付近で被験者に迷いが生じ、多くの探索がなされていたことが分かる。

#### e) 被験者の各交差点の累積発見率

次に、各交差点を発見するまでの時間についても検討を行った。図-16に時刻Tまでに各交差点およびGを発見した被験者数を全被験者数で割った累積発見率を示す。これより、スタートSからゴールGに近づくにつれて発見に多くの時間を要していることが分かる。また、一つの交差点を発見して次の交差点を発見するまでに要した時間についてみると、特に交差点3の発見から交差点4の発見までと交差点6の発見から交差点7の発見までに他よりも時間を要している。これは、図-15において交差点3と6での通過回数が多かった結果を考慮すると、いずれも被験者が交差点3と4および交差点6と7の間のように交差点間の距離が長い通路に出くわしたために何度か探索し直し、次の交差点を発見するために多くの時間を必要としたものと考え。さらに、交差点5の発見から交差点6の発見までの時間が短い点についても、図-15における交差点5の通過回数が少ないことと一致する。

これらd)とe)より得られた結果から被験者が迷路のどの交差点で多く迷ったかが分かり、より迅速に避難者を避難させるための、防災要員や非常誘導灯の効果的な配置の決定等に本シミュレータが活用できるものと考え。

## 4. 結論

本研究ではまず多くの人が使用できるように安価なパーソナルコンピュータでビルや地下街等の屋内空間を作成し、それを使って避難行動を体験できる3次元避難行動シミュレータの開発を行った。そして、開発したシミュレータを用いて被験者100人に対して2種類の迷路実験を行い、本シミュレータと既存の迷路実験結果との整合性および可能性について考察を行った。これにより以下の知見を得た。

- ①本シミュレータにより被験者がとった歩行経路を分類でき、それらが、既存の歩行実験から得られている歩行特性にあてはまることが分かった。さらに、被験者の過去の記憶が経路選択決定に影響を与えることも確認できた。
- ②本シミュレータによる結果は実際の迷路実験で探索方針を立てて歩行した結果に近いことが分かった。
- ③被験者が迷いやすい場所や集中する場所といった避難時の問題点を見出すことができる。

以上から本研究で開発した3次元避難シミュレータを用いることで対象とするビルや地下街といった屋内空間での行動分析や防災要員を配置する際の検討材料を得ることができ、さらには実践的防災教育の支援ツールとしても活用できるものと考え。

最後に今後の課題としては、災害時の人間行動は心理的要因や他の避難者との相互作用によって大きく異なることから、シミュレータに様々な災害のシナリオを取り入れ、再現できる機能や被験者の行動パターンの抽出、避難時間の計算を行わせてわかり

やすく表示する機能を設ける必要がある。

また、本シミュレータを用いて非常誘導灯や標識等の避難誘導設備が避難時間に与える影響も明らかにする必要がある。現在この点について検討中であり、別の機会に報告する予定である。

**謝辞：**本研究に際し、多くの有益なご助言を頂いた山口大学工学部太田 裕教授、京都大学大学院清野純史助教授に深謝を表す。さらに、シミュレータを用いた実験に際して協力して頂いた山口大学工学部知能情報システム工学科ならびに同社会建設工学科の教職員、学生各位に謝意を表す。

#### 参考文献

1) 例えば、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.257-266,1996年4月。

2) Hayashi, O. : Individual differences between leaders in a simulated fire, *Journal of Natural Disaster Science*, Vol.14, No.1, pp.1-15, 1992.

3) 目黒公郎, 芳賀保則, 山崎文雄, 片山恒雄: VR (バーチャルリアリティ) 訓練は避難行動にどんな影響を与えるか?, *地域安全学会 論文報告集*, No.5, pp.466-469, 1995.

4) 栗本義彦: 体力づくりへの道, 第一法規出版, pp.182, 1966.

5) 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.

6) 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.

7) 渡部勇市: 迷路における人間の避難行動実験-第3報 出口探索行動-, *日本建築学会論文報告集*, 第647号, pp.102-109, 1985.

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

(1997. 2. 17 受付)

## DEVELOPMENT OF 3-D EVACUATION SIMULATION SOFTWARE BY USING A PERSONAL COMPUTER AND ITS EVALUATION

Kouichi TAKIMOTO, Fusanori MIURA and Makoto HARA

This paper presents the development of evacuation simulation software on a 3 dimensional image by using a personal computer. This simulation software consists of "data editor" by which users can simply construct simulated spaces such as underground shopping centers or department stores and "simulator" by which users can simulate evacuation in the spaces which are constructed by the data editor.

To evaluate this software, we tried to explore wayfinding behavior by experiment using two kinds of mazes which were constructed by data editor. We found that three typical characteristics of wayfinding behavior were derived : first, tendency to go straight, second, tendency to turn frequently and third, tendency to choose paths where they walked before.