

②

群集歩行における探索及び待ち行動のための
シミュレーションモデルの建築設計論的研究

松 下 聡

1991年 3月

A Study of Simulation Model for Pedestrian Movement
in Wayfinding and Queuing
for Architectural Design Theory

論文概要

設計行為は、設計主体の感覚的、直感的、経験的蓄積による分析不可能な行為であると同時に、人間行動、行動と空間との対応、空間の物理的構築など、科学的分析に基づく行為と考えられる。この後者の設計行為において、空間と人間行動の対応を把握し、空間特性の検討及び評価のための有力な手段として、群集歩行モデルによるコンピューターシミュレーションがある。これまで磁場の理論を群集の歩行に適用し、空間の各点に位置する歩行者が磁場から力を受け、力の方向と大きさを与えられ、それに基づいて行動する歩行モデルを開発してきた。この磁場に経路の概念を与えることにより、複雑な空間において最短経路を歩行したり、誘導標に従って歩行する行動のモデルがこれまで実現していた。

第Ⅰ章ではこの磁場モデルをより人間行動に近付けることを試みて探索歩行のモデル化に取り組んだ。探索歩行特性を解明するために石川県内にある2ヶ所の迷路において歩行実験を行った。その結果、探索歩行特性として、「経路の記憶」、「歩行方針」、「前進・後戻り傾向」、「直進・屈進傾向」の4通りが発見され、これらが組み合わさって、実験で観察された歩行者の様々な歩行パターンが発生すると考えられる。「経路の記憶」は全被験者に共通に見られた。人間の行動を、単なる刺激(S)－反応(R)の図式ではなく、認知地図或いは、歩行経路のイメージを頭の中に描き、それに基づく歩行方針を持って、それによって経路を選択すると考えた。実験結果から「歩行方針」として、「右回り接近」、「左回り接近」、「右回り迂回」、「左回り迂回」の4種類を推測した。

実験で、歩行者が行き止まりに遭った場合は引き返すが、行き止まりの場合以外でも、歩行中の経路をそのまま進むと目的地から離れて行く場合に引き返す行動が見られたが、この傾向を「後戻り傾向」とした。反対に、そのような場合でも、そのまま前進し続ける傾向を「前進傾向」とした。

歩行方針は状況変化に対応して変化し、更に前進傾向と後戻り傾向の何れの傾向を持っているかにより、歩行方針の変化の仕方が異なることを実験結果から確認した。「前進・後戻り傾向」、「直進・屈進傾向」、は歩行途中で変化せず、歩行者の個人的特性と考えられる。

直進・屈進傾向は、歩行方針の変化に関与せず、歩行方針に適する経路が複数見える場合に何れを選択するかを決定する。

以上を考慮して作成した歩行モデルにより、実験で用いた迷路平面上でシミュレーションを実行した結果、実験で観察された大半の被験者の歩行パターンを再現できた。

この探索歩行モデルだけでは現実の空間における歩行の再現には不十分で、誘導歩行と最短経路歩行と組み合わせて、状況によって適当な歩行方法を選択するシステムを作成し、群集の誘導や避難行動の再現や予測に有効であることをシミュレーション例により示した。

第Ⅱ章では現実の空間でしばしば見られる待ち行動のモデル化に取り組んだ。従来用いられている待ち行列理論とは異なり、待ち人数や待ち時間の算定に留まらず、待ち空間内で歩行者が、通常の歩行から待ち行列に接近し、サービスを受けた後退去するまでの各段階の行動を再現し、空間内の混雑状況の検討に貢献できるモデルの開発を目指した。駅、空港、デパート、高層事務所ビルなどで待ち行動の調査を行い、歩行者の行動を分析した結果、待ち行動を、「カウンター型」、「ラッチ型」、「乗降口型」の3種類に分類し、それぞれのモデル化を行った。カウンター型は、ホテルのフロント、駅切符売り場などで見られ、カウンターでサービスを受けて立ち去る行動である。ラッチ型はサービスを受けた後そのままラッチの間を通り抜ける行動で、駅改札口、スーパーのレジなどで見られる。乗降口型は、エレベーター、電車などの乗り場で見られ、乗り物から降りる客と、乗車する客の行動が起こる。この3種類の待ち行動モデルにより、建築空間で見られるほとんどの待ち行動が再現可能であることを実例を用いて示した。

目次

探索歩行と待ち行動のモデルを既存の磁場モデルに付加し、総合したシステムにより、より多様で複雑な人間行動の再現を可能にした。更に歩行者の避難、誘導、混雑度の検討に対する有効性をシミュレーション例により示した。

しかし依然として未解決の問題も残されており、パニック時の行動、歩行者間の関係（他人に追従、他人を誘導、etc.）等については、これからも研究を続けて取り組む必要がある。

序	1
1 研究の目的	1
1.1 群集歩行における課題	2
1.2 既存の研究	6
1.3 本研究の立場	7
1.4 実用性	8
引用文献	9
2 シミュレーションモデル全体構成とデータ構造	10
2.1 シミュレーションモデル全体構成	10
2.2 磁場モデル	11
Coulomb の法則/磁場の強さ/点磁荷による磁場/歩行者に働く磁力/ 歩行速度の決定/希望速さ/	
2.3 主要データ	14
シミュレーション平面/歩行者データ/	
引用文献	16
第 I 章 探索歩行	17
引用文献	17
3 探索歩行の特性	18
3.1 心理学における迷路学習	18
3.2 知能ロボットによる経路探索	20
ロボットによる感覚の仕組み/ロボットの探索歩行/群集歩行モデルとの比較/	
3.3 探索歩行に関する既存の研究	21
引用文献	24
4 迷路歩行実験	26
4.1 手取フィッシュランド迷路における歩行実験と分析	28
迷路平面の特性/実験例/歩行経路の分類/歩行パターンの分析/	
4.2 白峰迷路における第 1 回実験と分析	31
迷路平面の特性/実験例/歩行経路の分類/歩行パターンの分析/	
4.3 白峰迷路における第 2 回実験と分析	37
迷路平面の特性/実験例/歩行経路の分類/歩行パターンの分析/	
4.4 白峰迷路における第 3 回実験と分析	44
迷路平面の特性/実験例/歩行経路の分類/歩行パターンの分析/	

5 実験結果のまとめ	48
5.1 被験者の経路選択理由	48
5.2 実験結果から観察された歩行特性	52
5.3 歩行パターンの分析	53
5.4 歩行方針変更の分析	57
6 探索歩行アルゴリズム	63
6.1 探索歩行のための基本的アルゴリズム 歩行経路/コーナーの視認/コーナーの方向性/	63
6.2 歩行パターンに影響を与える実験結果から見た要因と探索歩行のための 基本的アルゴリズム	67
6.3 コーナー選択アルゴリズム [探索歩行] アルゴリズム/ [コーナー情報] アルゴリズム/ [状況変化の判断] アルゴリズム/ [歩行方針変更] アルゴリズム/ [行動の決定] アルゴリズム/ [コーナー方向性選択] アルゴリズム/ [最適コーナー選択] アルゴリズム/ [後戻り] アルゴリズム/	68
引用文献	75
7 迷路歩行シミュレーション結果と実験例	76
7.1 手取フィッシュランド迷路	76
7.2 白峰迷路第1回実験	77
7.3 白峰迷路第2回実験	80
7.4 白峰迷路第3回実験	82
7.5 シミュレーション結果のまとめ	84
8 誘導標による歩行	87
8.1 歩行者の状態と歩行状態	87
8.2 誘導標による歩行、最短経路歩行、及び探索歩行を総合したアルゴリズム 最短経路歩行/誘導標の認識と歩行者の誘導/ 誘導標による歩行、最短経路歩行、探索歩行の総合/	89
8.3 誘導標による歩行のシミュレーション例 手取迷路における誘導歩行シミュレーション例/ 白峰迷路における誘導歩行シミュレーション例/ 事務所ビルにおける避難シミュレーション例/	92
8.4 シミュレーション結果	103
引用文献	103
第I章のまとめ	104
第II章 待ち行動	106
9 待ち行動の特性	106
9.1 待ち行動の分類	106
9.2 待ち行動の分析とそのモデル化	108

9.3 既存の研究 待ち行列理論/ネットワークモデルによるシミュレーション/ J. J. Fruin による待ち空間に関する研究/待ち行動に関する問題点と既存の研究のまとめ/	109
引用文献	111
10 カウンター前における待ち行動とアルゴリズム	112
10.1 調査結果 乗車券購入所要時間/列の前が空いてから次の人が前に詰めるのに要する時間/	112
10.2 アルゴリズム [待ち行列形成] アルゴリズム/ [静止] アルゴリズム/ [退去] アルゴリズム/ [待ち行列迂回] アルゴリズム/ [前進] アルゴリズム/	113
10.3 シミュレーション例	116
11 ラッチの通過前後の行動とアルゴリズム	119
11.1 調査結果	119
11.2 アルゴリズム	120
11.3 シミュレーション例	121
12 エレベーターホールにおける待ち行動とアルゴリズム	123
12.1 調査結果 乗降客の行動パターン/エレベーター乗降口における流動係数/	123
12.2 アルゴリズム [待ち行列形成] アルゴリズム/ [静止] アルゴリズム/ [乗車] アルゴリズム/ [降車] アルゴリズム/ [待ち行列迂回2] アルゴリズム/	126
12.3 シミュレーション例 直線配置型エレベーターホールにおける混雑時1の歩行パターンのシミュレーション例/ 対面配置型エレベーターホールにおける混雑時2の歩行パターンのシミュレーション例/	130
12.4 シミュレーション結果のまとめ	135
引用文献	135
13 待ち行動を含んだ群集歩行のシミュレーション例	136
13.1 京阪三条駅コンコース	137
13.2 湯沢メンバーズホテルメインフロア シミュレーション例1/シミュレーション例2/シミュレーション例3/ シミュレーション例4/シミュレーション例5/シミュレーション結果/	141
13.3 人工島内の遊園地 人工デッキから水族館内への歩行/水族館内の歩行/	150
第II章のまとめ	159
結論	160
参考文献	164
あとがき	170

序

1 研究の目的

設計は1つの実在する空間を構築しようとする行為である。設計は諸問題を解決し、空間を定義し、それを形態生成（表出）する行為である。従って設計行為全体の中は多様である。即ち設計行為は設計主体の感覚的、直感的、経験的蓄積により実在空間が直接的にイメージされ創造される分析不可能な行為であると同時に、居住者の行動、それと空間との関係、空間の物理的構築の諸問題など科学的分析に基づく行為でもある。ここでは後者に属する設計行為として、人間の歩行行動と建築空間の関係を検討するモデルを設定し、これを使った設計行為を設計行為全体の1つのプロセスとして位置付けようとするものである。

実在する建築空間における歩行行動の調査や実験、諸科学の知見により、建築空間における歩行モデルを仮定し、そのモデルをコンピューターシミュレーションの動画によって可視的に表現し検証する。そして数量的に統一し、且つ把握可能にする。次にこのモデルに基づくコンピューターシミュレーションにより、設計計画中の空間や既存の空間の中で歩行者を歩かせ、その空間の特性を検討し評価する。このようにして、有効な設計行為としてこのシミュレーションモデルを位置付けようとするものである。元来単純な形態の空間における数人の歩行行動は、設計者の想像可能な状況である。しかし今日一般的になりつつある複雑大規模な空間に数百数千の群集が歩行する状況は、もはや設計主体の想像能力をはるかに超えた状況である。このような状況に対してコンピューターシミュレーションにより人間の行動を可視的にすることは設計プロセスにおいて空間と人間行動の対応を把握し、空間の特性を検討・評価するために有効な手段となっている。

ここで言う歩行モデルは、空間の各点に磁場の理論によって方向性と力を与えた場の理論を確立し、続いて、その中で行動する歩行者が各点の場の特性に従って行動すると言う空間・人間系の統一理論である。更に場の理論に経路の概念を加えて、より複雑な空間における行動を可能にした。この経路問題においては、歩行者が目的地の経路を知っている場合に最短経路を歩行する行動と、誘導標に従って歩行する行動が従来の磁場モデルにより実現されていたが、新たに目的地への経路が断たれた場合の探索歩行モデルを付加した。続いて特定の空間で歩行と同時に歩行者が行列を作って待つ行動のためのモデルを付加することにより、より現実の行動に近似した群集歩行が可能になった。

本研究は、この探索歩行と待ち行動に関して歩行特性の解明とそのモデル化に取り組み、既存の磁場モデルと総合し、より複雑な行動のシミュレーションを可能とし、建築の設計プロセスにおいて、空間と人間行動の対応を把握し、群集の避難、誘導、混雑度などの問題に対する検討・評価の手段として役立つシステムの開発を目的とする。このような歩行者の歩行特性を解明するため、駅、空港、デパート、事務所ビル、遊園地等で、歩行者の行動を観察又は実験を行い、その分析結果をもとにモデル化に取り組み、より歩行者の行動を忠実に再現できるモデルの開発を目指した。しかし、この研究はコンピューターにより群集歩行のシミュレーションを行うことを前提としているので、観察や実験の分析からモデル化のためのアルゴリズム作成において、それによる制約が生じるが、その様な制約の範囲内においてできる限り人間の行動を忠実に再現できるモデルの開発に努めた。

1. 1 群集歩行における課題

この節では、歩行者の行動モデルを考える前に、歩行者の行動の中にどのような動作が見られるか、又日常、或いは緊急時等の状況の違いにより、どのような行動の傾向が見られるかを概観する。その様な行動全体の中から、従来開発されて来たモデルで取り扱われていない部分を探り、どのような行動のモデル化に取り組む必要があるかを考察する。まず町の中や家庭において一般的に見られる人間の動作を観察し、それらを歩行との関係により分類すると、Table 1-1 に挙げられるような項目が考えられる。

ここに列挙した動作のうち、歩行行動のモデル化と言う範囲に限定して考えると、「歩行と関係が少ない動作」に関しては、そのモデル化の必要性は少ないと考えられる。

歩行中に現れる動作	前進する、後退する、曲がる、(障害物等を) 避ける
歩行状態が停止する動作	立ち止まる、倒れる
歩行と関係が少ない動作	座る、寝る、転がる、這う

Table 1-1 動作の分類

これらの動作とその目的を考えると、「歩行中に現れる動作」は、出発点から目的地まで歩行すると言う目的を持った行動の過程で現れる。「歩行状態が停止する動作」は、歩行途中で混雑による滞留に出会った場合やつまづいた場合など、歩行を目的としているが、止むを得ず停止する場合は考えられる。しかし、待ち合わせ、受付、観覧など、歩行以外の目的を持って、一定時間意図的に停止する場合は考えられる。この様に待ち合わせなどの目的を持って意図的に停止する動作が起こる行動を「待ち行動」、目的地に向かって歩行すると言う目的を持ち、歩行中の動作又は立ち止まる動作が現れる行動を「通常の歩行」と呼ぶことにする。群集流動パターンをこれら2種類の行動により「通常の歩行」と「待ち行動」とに分類し、それらがどのような環境において発生するかを考えると Table 1-2 に示す通りである。

流動パターン		流動例
通常の歩行	一方向、対向、交差、合流、分岐、滞留	通勤、通学、避難、散策、ハイキング
待ち行動	待ち合わせ、観覧	カウンター、乗り物、買い物、美術館、博覧会場

Table 1-2 群集流動パターン

次に、群集流動において歩行者同士の関係に注目すると、観察結果から、各歩行者が単独で他人とは無関係に歩行している場合、2、3人連れから団体旅行等、集団で歩行する場合、集団で歩行する場合に集団内の他の歩行者をリーダーや案内役として誘導する場合、そして集団で歩行する場合にリーダーや周囲の歩行者に追従して歩行する場合が考えられる。これらをまとめると Table 1-3 の通りである。

単独で歩行	他の歩行者とは無関係
集団で歩行	2人以上で連れ立って歩行
誘導	他人又は集団を誘導する
追従	他人又は集団に追従して歩行

Table 1-3 歩行者間の関係

ここまでは、基本的な群集流動パターン及び歩行者間の関係について考えてきたが、以下の部分で、日常及び緊急時の歩行者の行動の傾向を調べ、歩行モデルを考える上でどのような問題点があるかを分析する。日常生活における群集の行動に見られる癖は、戸川喜久二¹⁾により以下のようにまとめられた。

1. 左側通行

車に邪魔されない道路や歩行者天国、地下道、駅のコンコースなどでは、自然に左側通行となることが知られている。一般に人の流れが左側通行となるのは、路面に対する密度が 0.3人/m² 以上になったときとされているが、単独歩行の場合でも通路の左側を通ることが多い。

2. 左回り

公園、遊園地、展覧会場などにおいて、利用者の行動は右回りよりも左回りの方が多いたことが調査により確かめられている。野球でのベースの回り方、陸上競技のトラックの回り方など、ほとんどのスポーツ競技でも左回りである。新建築学体系11「環境心理」では、避難階段においても下るときに左回りになっている方が右回りの階段よりも速く降りることができるとされている。

3. 近道

目的地の位置がはっきりしている場合に最短経路を選ぶ傾向がある。通勤通学路の選択傾向に多く見られる。

4. いのしし口

一般に動物は危険を感じたとき、直ちに引き返し、元の出入口に戻るという習性があるが、人間にも同じことが言える。災害時には自分の身を守るために、未知の経路を選ぶより、もと来た道を引き返したり、日常よく使用する経路によって脱出を図ろうとする。

建築計画の分野で緊急時の人間行動を考える場合は、地震又は火災時を考えることが多いが、火災時の人間行動の一般的な傾向として以下の7項目が挙げられる。²⁾ これらの研究では、主として火災の生存者に対して直接ヒアリングすることにより、使用した避難路やそのときの状況などを知り、行動特性を分析している。

1. いつも使っている出入口や階段の方に向かう。

日常使っている経路、入ってきた出入口や階段に向かうのが普通である。この退避路が火煙などによりふさがれた場合、やむを得ず他の経路を取る。

2. 明るい方に向かう習性がある。

人間には走光性があるので明るい方向を目指して本能的に動き出す。

3. 開かれた空間の方をめざす

前記の明るい方向を目指すのと同様のものであり、警光ホテル火災の例に見られる。

- 火煙に対しては恐れを抱く。
動物の一般的な習性として炎に対して恐怖心を抱き、煙に覆われると戸惑ってしまう。火煙に遭遇すると、たとえ安全な場合でも、反対の方向に逃げようとする。
- 危険が迫ってきて、混迷の度がひどくなると、狭い隅の方に逃げ込む行動が見られる。
死者の出た火災においては、部屋の隅や便所にうずくまって、あるいはロッカーなどに頭を突っ込んだ状態で死亡する例がしばしば見られる。
- 混迷の度が増すほど、他に追従しやすくなる。
日常行動が停止し、非常の場合に対応する体制の組み替えができなくなり、他人が動き出したりするとこれに追従するようになる。
- 非常の場合には思いもよらない力が発揮される。
日常行動が停止し、全精力がそのことに集中されるから、日常では考えられないような力が発揮されることがある。火災に遭遇してとんでもなく重いものを運んだり、高所から飛び降りたりした例が多くある。

堀内、小林^{3,4}の研究ではオフィスビル火災からの生存者に対して行われたアンケート調査に基づいて、火災時の人間行動の3つの要因として、「個人的属性（性別、職業）」、「第一行動（火災覚知直後に取った行動）」、「避難行動（各人の避難経路の選択）」を挙げ、避難行動と職業や職場の人間関係との関連について分析している。そこでは「第一行動」として以下の4通りを挙げている。

- 責任行動 消防署や他人に知らせる、人を誘導しようとする、電源や火の始末をする、等
- 即避難 すぐに逃げ出す
- 持出避難 大切な物を持ち出す、逃げようかどうかと迷う、等
- 指示待ち 誰かの指示を待つ

「避難行動」として以下の5通りの理由により、避難経路の選択を行っている。

- 平素考 平素から考えていた経路、混雑が少ない、等
- 近道、とっさ とっさの判断、何となく、近道を取る、等
- 平素教 平素から教えられていた、誘導放送があった、等
- 追従 周囲の人に追従
- 従誘導 上司、その他の人の指示に従う

この中から特に職場の人間関係と、「第一行動」、「避難行動」との関係として見られた特徴を以下の2通り挙げている。

- 職場内で責任ある立場の者 責任行動 → 平素考
- 女子社員 指示待ち → 従誘導

非常時の行動として問題になるものにパニックがある。危険から逃れるときに発生する逃避型と、われ先に何かを争って奪い合う獲得型がある。日常考えられないような異常な行動のために混乱し、平静にしていれば安全であったはずのことが、かえって危険な結果を招く場合もある。安倍⁵の研究によると、パニック時には日常生活からは考えられないような知的、行動的レベルの大幅な低下が以下のように起こる。

- 退行
- 可塑性低減
- 視野狭窄
- 回り道行動の不可能

最近の認知科学関係の文献⁶では、パニックや避難時の行動は日常行動の延長上に位置付けられている。緊急時は、日常の事態に加えて、「事態が重大だ」、「時間が切迫している」という2つの特徴をより極端に持っているために、状況がより極端になる。池田⁶によると、パニック生起の要件は以下の4項目とされている。

- 目前の危険な事態に対する恐怖感
- 事態対応に可能な時間の切迫感
- もはや社会的な絆に頼ることができないという孤独感
- 当面の危険からの逃走

戸川喜久二⁷はパニックを「何らかの原因で、社会経済生活が一時的に大混乱に陥ること」と定義し、その発生、発展の機構を以下のようにまとめている。

- 不確実情報あるいはデマが、すでに集中中の群集に対して発せられる。それは次第に裾広がりになり、多数に伝播される。
- 伝播により、多数が共通の不安状態に置かれる。新情報を期待して、あるいは絶望して、デマを発生することがある。群集密度は更に高まる。
- 群集密度の高まりは個々の理性を失わせ、感情的になり、更に不安を強める。
- ある少数が、不安・恐怖にかられ、悲鳴をあげ、或いは衝動的行動、短絡行動を起こす。
- 少数の短絡行動が引き金となり、群集全体がそれに同調し、総崩れの状態になる。

以上の日常行動及び緊急時の行動に見られる問題点をまとめると、経路問題（左回り、近道、いつも使っている出口、等）、人間関係（誘導、追従、職場の人間関係、等）、そして、パニック時の行動（狭い隅に逃げ込む、うずくまる、視野狭窄、回り道行動の不可能、等）の3通りが挙げられる。このうち、人間関係に関しては Table 1-3 にまとめられている。経路問題に関して問題点をまとめると Table 1-4 のように分類できる。

歩行者の状態	歩行経路	
	経路を知っている場合	最短経路
経路を知らない場合	探索歩行 誘導標による歩行 追従	未知の経路上で避難、明るい方向を目指す、開かれた空間を目指す、火煙からの回避 サインの指示に従う 他人や集団に追従する

Table 1-4 経路問題

以上で述べてきた群集歩行における問題点をまとめると、歩行者の動作と流動パターン（Table 1-2）、歩行者間の関係（Table 1-3）、経路問題（Table 1-4）、そしてパニック時の行動に帰着される。パニック時の行動特性に関しては、依然として細部において不明な点が残されている。例えば通常の避難行動とパニックの区別、どの程度の危険により発生するか、等があり、ここでは敢えてパニック時の行動まで分類・モデル化に取り組むことは控えておき、寧ろ Table 1-2 から Table 1-4 でまとめた日常行動の特性の解明とそのモデル化に重点をおくことにする。次に、ここでモデル化について考える前に、従来開発されてきた歩行モデルにより、どのような行動のシミュレーションが可能になっているかを調べてみる。

1. 2 既存の研究

群集歩行のシミュレーションモデルに関する既存の研究は幾つか見られるが、それらをまず、空間の扱い方により分類すると、以下のようになる。

1. ネットワーク型 空間を節点と枝のつながりとしてのネットワークに抽象化し、各節点内の歩行者数や密度、節点間の移動人数により群集流動を表す。節点間の歩行者の移動量を問題にする。GPSS (IBM) ⁷、オートマトンモデル (渡辺、他) ⁸、三次元ネットワーク避難シミュレーション (岡田、他) ⁹等がある。
2. メッシュ型 ネットワーク型に対し、或る程度平面的な拡がりや考慮したものである。歩行空間をメッシュに分割し、各メッシュ内の歩行者数や密度、メッシュ間の移動人数により群集流動を表す。交差流動を扱ったもの (中、他) ¹⁰、都市地区をメッシュで表した避難シミュレーションシステム (堀内、小林) ¹¹等がある。
3. 座標型 空間座標を用いて空間をほぼ実物に近い形で表現し、その座標空間内を歩行者が移動するもので、歩行者の位置も座標を用いて表す。磁場モデル (岡崎) ¹²⁻¹⁴、ポテンシャルモデル (中村、他) ¹⁵がある。

新建築学体系11「環境心理」では、メッシュ型のメッシュを極度に細かくすると座標型と同様であるとして、座標型をメッシュ型に含め、ネットワーク型とメッシュ型の2種類に分類している。しかし、メッシュ型モデルでは、歩行者は、個々のメッシュを節点に例えたネットワーク上を移動すると考えられ、むしろ、歩行者の扱いはネットワーク型に近いものである。従ってメッシュ型と座標型は歩行者の扱い方において基本的に異なっているので、ここでは3通りに分類する。次に歩行者の扱い方に関して分類すると、以下の2種類となる。

1. 集団型 歩行者一人一人の詳細な情報は取り扱わず、ネットワークの節点から節点への移動量及び、各節点内の人数を問題とする。ネットワーク型とメッシュ型のモデルで用いられる。
2. 個人型 歩行者一人一人に関してその位置や状態の詳細な情報を保持する。座標型のモデルで用いられる。

以上のモデルに関し、それぞれの長所、短所を挙げると Table 1-5 の通りである。

モデルの種類	空間の扱い	歩行者の扱い	長所	短所
ネットワーク型	抽象的	集団型	比較的計算が簡単 短時間で大きな群集流動計算に 適している	歩行者の詳細な動きが表現できない 空間の細かい問題点も発見が困難
メッシュ型	現実的	集団型	メッシュの細かさの程度により 詳細な表現が可能	メッシュの数が増えると、それだけ 計算量、データ量が増大する
座標型	現実的	個人型	現実的な歩行者の動きの詳細な 表現が可能	歩行者数が増えるほど、計算 量、データ量が増大する

Table 1-5 各歩行モデルの長所・短所

以上で述べたモデルにより、前節で述べた歩行特性に関し、どの程度のモデル化が行われているかを以下にまとめる。従来のモデルにより実現できていると思われる部分に○、実現できていない部分には×、部分的に実現されているものに△が付けられている。しかし、実現できている場合も Table 1-5 に示したような長所、及び短所がそれぞれのモデルにあることは考慮に入れる必要がある。

モデルの種類	群集流動パターン		経路問題			歩行者間の関係			
	通常の流動	待ち行動	最短	探索	誘導標	単独	集団	誘導	追従
ネットワーク型	△	○	○	×	○	○	×	×	×
メッシュ型	○	×	○	×	×	○	×	×	○
座標型	○	△	○	△	△	○	△	△	△

Table 1-6 各歩行モデルで実現されている群集歩行行動

○：実現できている
△：部分的に実現できている
×：実現できていない

ネットワークモデルはネットワークの節点間の人や物の移動量を問題にするのであるから、歩行者の滞留や待ち行列の計算は座標型に比較して短時間で算定できると考えられるが、節点間の移動プロセスの詳細に付いては考慮せず、移動中の群集の合流、交差流動、滞留などの現象を取り扱うのは困難であると思われる。座標型は、空間の広がりの中で1人1人の歩行者の詳細な動きを問題にするので、群集流動を細部に渡って詳細に表現することが可能であるが、そのため、大規模平面上で、大群集のシミュレーションを行うには、莫大な計算時間と記憶容量が必要とされてきたが、最近のコンピューター技術の発達により、パーソナルコンピューターによっても1000人程度までのシミュレーションも可能な状態になってきている。

1. 3 本研究の立場

前節で見たようにネットワークモデルは短時間で大きな群集の流動量を算定できる長所があるが、歩行者1人1人の詳細な行動を取り扱うことができず、そのシミュレーションには限界がある。座標型モデルは、計算時間と記憶容量という技術的な問題が解決されると、ほぼ現実の群集の動きに近いシミュレーションが可能となる。従って、コンピューターの計算速度、記憶容量と言った技術的な問題が解決されれば、座標型モデルが最も好ましいことは言うまでも無く、最近のコンピューター技術の進歩を見れば、一昔前の大型計算機並の計算速度と記憶容量を備えたワークステーションやパーソナルコンピューターが出現し始めており、解決は時間の問題である。本研究はこの理由で、座標型の歩行モデルにより、できるだけ詳細な歩行者の動きを再現できるモデルの開発を目指す。磁場モデルを基に、それを更に発展させ、前節の Table 1-6 において未だ実現できていない部分のモデルの開発を試みる。「1. 1 群集歩行における課題」において3通りの問題点として、群集流動パターン (Table 1-2)、歩行者間の関係 (Table 1-3)、経路問題 (Table 1-4)、を挙げたが、それぞれから未解決の問題の主要なものを抜き出すと、待ち行動 (Table 1-2 より)、他人に追従したり誘導する歩行者間の関係 (Table 1-3 より)、そして、探索歩行 (Table 1-4 より) が考えられる。これらの中、特に歩行者の避難、誘導、及び混雑度の検討に必要な大きい探索歩行と待ち行動に重点を置いてモデル化に取り組んだ。

探索歩行における人間行動 — 従来開発されてきた行動モデルでは歩行者の経路は最初から解っているものとして扱われていることが多いが、上で述べられているように、避難時などの場合に熟知している避難路が断たれてしまった場合や、

日常時においても、地下街などで目的地までの経路が不明な状況はしばしば起こる。このような場合に起こる探索歩行の特性を分析し、そのモデル化を試み、日常行動及び災害時の避難行動の予測に役立てる。又、誘導標による歩行モデルと組み合わせることにより、サイン計画の検討にも用いる。

待ち空間における人間行動 —— 歩行者が空間内で滞留する状況を扱ったシミュレーションモデルは、ほとんどがネットワークモデルで、歩行者の細かい動きは無視されているものが多いが、この問題についても空間と歩行者の行動との関係を細かく分析し、歩行途中で立ち止まったり、列に並んだりする行動のモデル化を試み、単なる歩行以外の行動にも対処できるシステムを開発することにより、より現実的な歩行者の行動のシミュレーションを可能にする。

これら2項目のモデルを「探索歩行モデル」、「待ち行動モデル」とし、それぞれ単独ではなく、シミュレーションモデル全体として統一されたシステムを構築することにより、待ち行動と通常の群集流動が入り混じり、複雑に動線が交錯するような場合のシミュレーションも可能となる。

1. 4 実用性

以上の2種類のモデルを従来の磁場モデルに加えることにより、現実の複雑な空間における歩行者の行動の再現が可能となり、シミュレーションの応用範囲が拡大される。従って建築の設計プロセスにおいて、空間と人間行動の関係を把握し、群集の避難、誘導、混雑度等の問題の検討に対する有効性を高めることができると考えられる。それぞれのモデルにより可能になると考えられる応用範囲を実例を挙げて述べると、以下の通りである。

探索歩行モデルによるシミュレーション

歩行者の行動の中で探索歩行が起こる場合としては、最初から目的地への経路を知らない、目的地への経路を知っているが、火災や煙、混雑などにより通行不能、と言った場合が考えられる。更に誘導標による歩行も併せて考えると、誘導標の指示に従って歩行、火災時に煙により誘導標が見えない、誘導標はあるが不十分で経路が良く解らない、などの場合が考えられる。従って、これらの場合に探索歩行モデルにより歩行シミュレーションを行うと、以下の様な項目の検討が可能になると考えられる。

避難性能の検討 —— 地下街、デパート、ホテル、事務所ビルなどで火災時に既知の経路が断たれた場合の避難行動に利用。経路の解り易さ、避難時間の検討などに利用。

歩行者の誘導 —— 誘導標による経路選択のシミュレーションを行う。避難時の歩行者の誘導、博覧会場などの混雑する地区における歩行者誘導システムの検討などに利用。

待ち行動モデルによるシミュレーション

待ち行動の起こる空間として考えられるものは、駅切符売場、ホテルのフロント、銀行等のカウンター窓口の前、駅の改札口、スーパーのレジ、博覧会場や種々の展示場の入場口、駅のプラットフォーム、エレベーターホール等の乗降口がある。本研究では、これら待ち空間で起こる行動の型をカウンター型、ラッチ型、乗降口型の3種類*に分類し、それぞれについてアルゴリズムを作成し、待ち空間において、歩行者が待ち行列に接近、静止、退去、改札口等の通過、乗物への乗降等と言った行動を再現する。これにより、以下の様な項目の検討が可能となる。

混雑の検討 —— 待ち空間内の歩行者の単なる待ち人数、待ち時間の算定に止まらず、待ち行列への接近、退去等の歩行中の歩行者の行動も含め、空間の混雑度の検討、又、動線が複雑に交錯し、混雑する場所の発見に利用可能。更に、駅のコンコースなどのように待ち空間が交通空間の一部であるような場合、待ち空間を通過する群集の歩行も含め、混雑度、及び動線の検討に用いることが可能と考えられる。

* 調査結果から3種類に分類した。この詳細は第II章において説明する。

引用文献

1. 戸川喜久二：群集流の観測に基づく避難施設の研究，建築研究報告，1983年
2. 川越邦雄，他：新建築学大系12 建築安全論，彰国社，1983年
3. 小林正美，堀内三郎：オフィスビルにおける火災時の人間行動の分析 その1 行動の分類，日本建築学会論文報告集第280号，1979年6月，pp. 137-142
4. 小林正美，堀内三郎：オフィスビルにおける火災時の人間行動の分析 その2 行動パターンの抽出，日本建築学会論文報告集第284号，1979年10月，pp. 119-125
5. 安倍北夫：災害心理学序説，サイエンス社，1982年
6. 池田謙一：緊急時の情報処理，東京大学出版会，1986年
7. Gordon, Geoffrey. The Application of GPSS V to Discrete Systems Simulation. Prentice Hall, Inc., 1975
8. 渡辺仁史，位寄和久，池原義郎，中島高史，中村良三，宇土正浩：人間-空間系の研究 建築計画のためのネットワーク・オートマタモデル，日本建築学会論文報告集第298号，1980年12月，pp. 89-97
9. 岡田光正，柏原士郎，吉村英祐，横田隆司，東利彦：視覚情報に基づく建物火災時の三次元ネットワーク，避難シミュレーションシステムの開発，日本建築学会・情報システム技術委員会 第12回情報システム利用技術シンポジウム，1989年，pp. 421-426
10. 中祐一郎：交錯流動のシミュレーションモデル，鉄道駅における旅客の交錯流動に関する研究(2)，日本建築学会論文報告集第267号，1978年5月，pp. 103-111
11. 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，昭和52年8月，pp. 123-130
12. 岡崎甚幸：建築空間における歩行のためのシミュレーションモデルの研究 その1 磁気モデルの応用による歩行モデル，日本建築学会論文報告集第283号，1979年9月，pp. 111-117
13. 岡崎甚幸：建築空間における歩行のためのシミュレーションモデルの研究 その2 混雑した場所での歩行，日本建築学会論文報告集第284号，1979年10月，pp. 101-110
14. 岡崎甚幸：建築空間における歩行のためのシミュレーションモデルの研究 その3 停滞や火災を考慮して最短経路を選ぶ歩行，日本建築学会論文報告集第285号，1976年11月，pp. 137-144
15. 中村和男，吉岡松太郎，稗田哲也：歩行者流動モデルとそのシミュレーション，人間工学 Vol. 10, No3, 1971年6月，pp. 93-102

2 シミュレーションモデル全体構成とデータ構造

2.1 シミュレーションモデル全体構成

探索及び待ち行動を含んだモデルの全体構成は Figure 2-1 のフローチャートにより表される。この図に基づき、システムはデータを読み込むとまず平面上で壁面が内側に凸となっている部分をコーナーと認識し、更に各コーナーから他のコーナーが見えているかどうかといった情報を隣接関係行列として記憶する。各歩行者は、目的地が見えていればその地点から磁場による誘引力を受けて直接目的地に向かって進むが、平面が複雑で目的地が見えていない場合は、順に隣接関係のあるコーナーを辿りながら目的地に到達する。出発点から目的地までの経路が予め解っている場合はコーナー番号の数列をデータとして与え、歩行者はこれに従って歩行するが、経路データが与えられていない場合は目的地を探しながら探索歩行を行う。歩行経路上に待ち空間が含まれていると、そこへ到着した歩行者はその待ち空間の種類に応じた待ち行動を行い次の目的地に向かう。図中太線で囲んだ網掛け部は特に本研究で重点的に取り組んだ部分である。

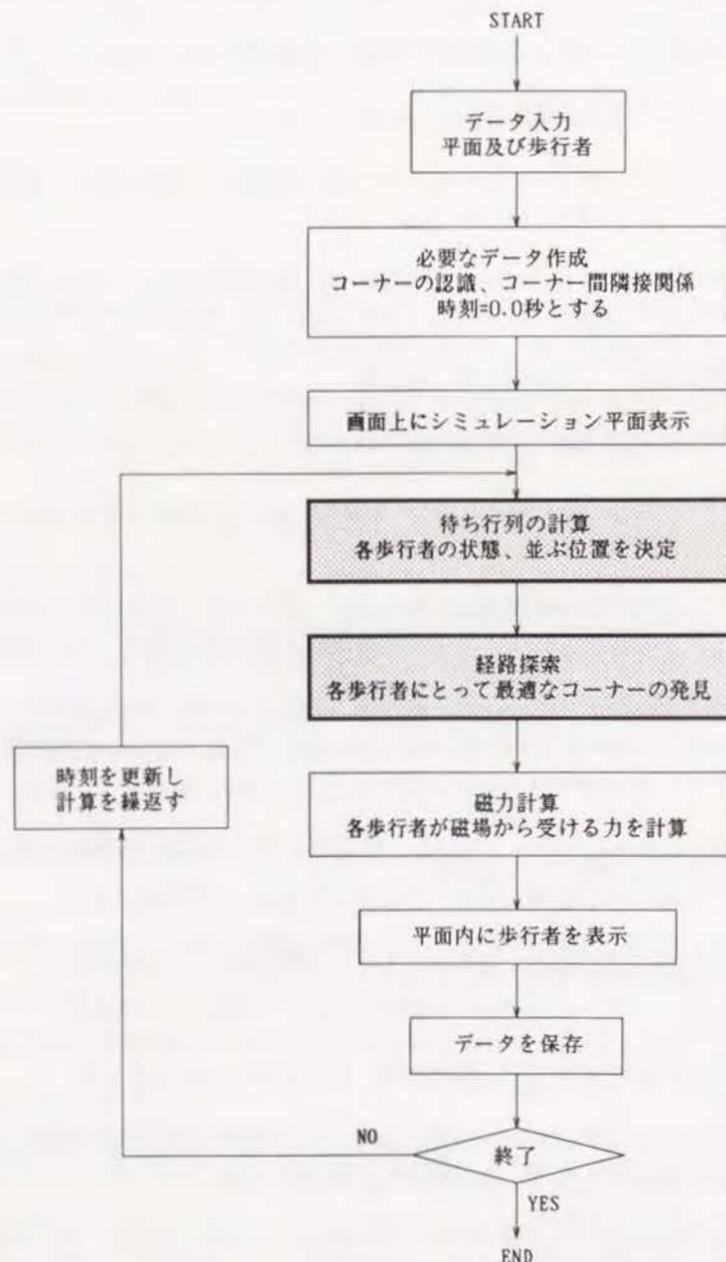


Figure 2-1 モデル全体のフローチャート

2.2 磁場モデル

このシミュレーションモデルでは基本的な歩行者の動きは磁場モデル¹⁻³を用いて再現している。磁場モデルの詳細については引用文献に詳述されているので、ここでは基本的な原理だけを述べておく。

磁石は+又は-の磁荷を持ち、同じ種類のもの同士(+と+、又は-と-)は反発し、異種類のもの同士(+と-)は引き合う性質を持つことは周知の事実である。この磁荷を持った質点の運動を、歩行者が障害物を避け、目的地に向かうという動きに対応させ、群集歩行モデルを形成する。このモデル中には、歩行者、障害物等の要素が含まれているが、それらの磁荷は以下のように設定されている。

1. 歩行者1人1人には+の磁荷を与える。
2. 壁、障害物等には+の磁荷をあたえる。
3. 目的地には-の磁荷をあたえる。

このように磁荷を与えることにより、Coulomb の法則⁴に従い、歩行者は他の歩行者や障害物から斥力を受け、目的地からは逆に引力を受ける。それにより、歩行者が障害物や他の歩行者との衝突を避けながら目的地に向かって歩行する行動をモデル化する。

2.2.1 Coulomb の法則

Coulomb は、2つの磁荷 Q_1 と Q_2 の間に働く力 F は式(1)により計算されることを見出した。

$$F = \kappa \cdot \frac{Q_1 \cdot Q_2}{r^2} \cdot r_0 \quad \dots (1)$$

Q_1 、 Q_2 は大きさが無視できる2つの点磁荷の磁気量、 r は Q_1 と Q_2 の間の距離、 r_0 は Q_1 から Q_2 に向かう単位ベクトルである。 κ は比例定数で、 $\kappa = 1/4\pi\mu_0$ である。 μ_0 を真空中の透磁率と呼び、 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ である。

2.2.2 磁場の強さ

Coulomb の式からA点に Q_1 、B点に Q_2 の磁荷がある時、 $r = AB$ とすれば両者の間に生ずる磁力 F は(2)式で表される。ここで、 $Q_2 = 1$ とすれば、 Q_2 に働く力が点Bの磁場の強さである。従って Q_1 によりBに生ずる磁場の強さ H は(3)式で表される。(Figure 2-2)

$$F = \kappa \cdot \frac{Q_1 \cdot Q_2}{r^2} \cdot r \quad \dots (2)$$

$$H = \kappa \cdot \frac{Q_1}{r^2} \cdot r \quad \dots (3)$$

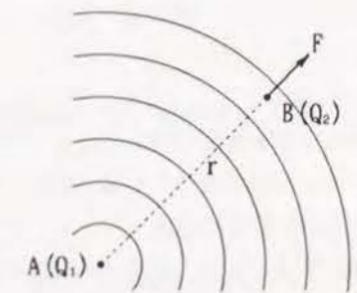


Figure 2-2 磁場

2.2.3 点磁荷による磁場

磁気を帯びた微少な物体を点磁荷と呼ぶ。今点Aに Q の磁荷を持った点磁荷があり、Aから距離 r を隔てた点Bに+1の磁荷が置かれているとき、点Bには磁力 H が働いており、(3)式から以下のように表される。

$$H = \kappa \cdot \frac{Q}{r^2} \cdot r \quad \dots (4)$$

複数の点磁荷 Q_i により構成される磁場の強さ H は各々の磁場の強さ H_i の強さの合計で表すことができる。

$$H = H_1 + H_2 + H_3 + H_4 + H_5 + \dots + H_i \\ = \kappa \cdot \sum \frac{Q_i}{r_i^2} \cdot r_i \quad \dots (5)$$

2.2.4 歩行者に働く磁力

モデル中で各歩行者に働く力には以下の4種類を設定し、これらの4つの力を受けて、歩行者の動きが決定される。以下の部分で各々の要素から受ける力の計算方法を具体的に説明する。

1. 目的地（-の磁荷）からの力
2. 壁（+の磁荷）から受ける力
3. 他の歩行者（+の磁荷）からの力
4. 柱（+の磁荷）からの力

[1] 目的地からの力

歩行者の現在位置Pから目的地Aが見えるときは、歩行者から目的地に向かう力P Aが働くが、目的地が見えないときは「仮目的地点A'」を新たに設定し、歩行者から仮目的地点に向かう力P A'が働く。

A'の位置の求め方をFigure 2-3に見られるような、コーナーを曲がる場合の例で考えると、歩行者はコーナーから距離r離れた位置を通過する。そのため、コーナーを中心として半径rの円を描き、点Pからこの円に接線を引く。その接線と円との節点から、接線方向に距離r延長した位置をA'とする。この時、円の半径rの値は2通りを設定している。第1節で述べたが、歩行者の日常の癖の1つとして左側通行が見られる。これを考慮し、歩行者が左に曲がるときはr = 45 cm、右に曲がるときはr = コーナーに接する狭い方の通路幅 - 45 cmとしている。この45 cmと言う値はJ. J. Fruin⁵の研究を参考に採用した。

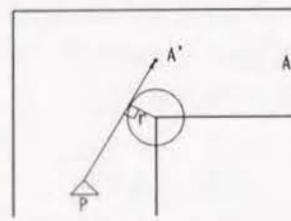


Figure 2-3
仮目的地点の設定

目的地からの引力の向きはこのように決定されるが、純粋にCoulombの法則を適用すると、歩行者と目的地との間の距離が大きい場合は歩行者に作用する引力の大きさが極めて小さくなり、障害物や他の歩行者からの斥力が相対的に大きくなり過ぎることになる。これを解消し、安定した力の大きさを目的地に向かって進めるように、目的地から歩行者に作用する引力の大きさは距離に関わりなく一定としている。

[2] 壁からの力

歩行者からある壁面が見えると、歩行者の位置Pからその壁面に垂線を下ろし、壁面との交点をHとする。点Hに Q_w の磁荷があり、歩行者の磁荷を Q_p とする。歩行者の速度をVとし、PHとVの成す角を θ とすると、壁から歩行者に作用する斥力Fを次の式で計算する。

$$F = K \cdot \frac{Q_p \cdot Q_w \cdot \cos \theta}{PH^3} \cdot PH \quad \dots \dots (6)$$

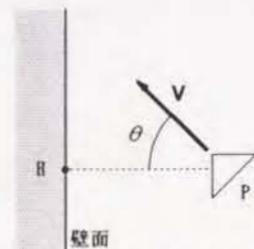


Figure 2-4 壁からの力

但し、以下の場合は $F = 0$ とする。

- 1) $\cos \theta \leq 0$ の場合（歩行者が壁面から離れる方向に進む）
- 2) $|PH| > 3.0 \text{ m}$ （歩行者と壁面との距離が充分大きく衝突の可能性が少ない）

[3] 他の歩行者からの力

この場合はCoulombの法則に基づいて計算すると各歩行者が歩行する動きを再現することが困難で、相対速度の考え方をを用いて計算を行う。例として、速度Uで歩行中の歩行者Aと速度Vで歩行中の歩行者B間に働く力を考え、これに即して歩行者間に働く力の計算について説明する。(Figure 2-5)

歩行者Bに対する歩行者Aの相対速度をRとすると、R、U、Vには(7)式の関係がある。

$$R = U - V \quad \dots \dots (7)$$

歩行者Bの周囲に、衝突を避けるための緩衝領域として半径60cmの円を考える。もしもRの延長線がこの円と交わると、歩行者AとBはそのまま進むと衝突する。歩行者Aの位置からBの緩衝領域に接線を引き、歩行者AがBに対する相対速度がこの接線の向きになるように磁力Fを加えると衝突が避けられる。

Fは式(8)により計算できる。

$$F = U \cdot \cos \alpha \cdot \tan \beta \quad \dots \dots (8)$$

Rが、歩行者Bの緩衝領域とBの反対側で交わる場合は反対側に接線を引き、歩行者AはBの後方に避けることになる。

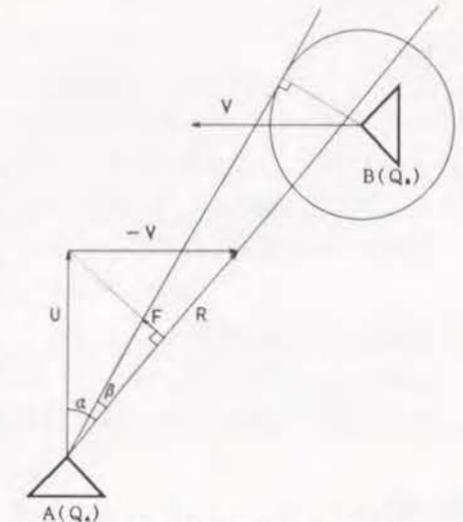


Figure 2-5 他の歩行者からの力

[4] 柱からの力

歩行者が柱を避ける場合の計算方法は、他の歩行者を避ける場合に、相手の速度を0と考えて計算する場合と同様である。従って詳しい説明は省略する。

2.2.5 歩行速度の決定

歩行者に働く磁力ベクトルFを歩行者の質量Mで割ると、ニュートンの運動方程式 $F = MA$ から加速度ベクトルAが求まる。このAにシミュレーションの単位時間 dt をかけると単位時間毎の速度ベクトルの増分値 dv が求まる。この dv を単位時間前の速度と合成すると、単位時間後の歩行者の新しい速度が求まる。

$$dv = (\sum H_p + \sum H_w + \sum H_a) \cdot Q \cdot \frac{dt}{M} \quad \dots \dots (9)$$

dv は式(9)により求められる。 $\sum H_p$ 、 $\sum H_w$ 、 $\sum H_a$ はそれぞれ他の歩行者、壁、目的地による磁場から働く力で、Qは対象となる歩行者の磁荷である。

2.2.6 希望速さ

しかし、前記の式に忠実に計算して歩行者の速度を決定すると、歩行者は加速度運動をすることになり、速度の大きさが大きくなり過ぎる場合が生じる。これを防ぐため、歩行者が普通の状態で歩行する場合の速度の大きさを「希望速さ」とし、これを速度の制限の基準として以下のように用いる。

歩行者Iの希望速さを $U_{SET}(I)$ として、ある単位時間における速さ TU_0 から単位時間後に速さ TU となったとすると、

- 1) 減速成分として、次の式で表されるDUに単位時間をかけた値を TU に加える。

$$DU = U_{SET}(I) - TU \quad \dots \dots (10)$$

- 2) 上限・下限値として、次の U_L 、 U_U を設定する。

$$U_L = -0.2 * U_{SET}(I) \quad \dots \dots \text{速度の大きさの下限値}$$

$$U_U = 1.2 * U_{SET}(I) \quad \dots \dots \text{速度の大きさの上限値}$$

$$U_L \leq TU \leq U_U$$

2.3 主要データ

シミュレーションは磁場モデルの原理に従って動くが、シミュレーションを実行するためにはまず、Figure 2-1 のフローチャートに示されているように、歩行者や、平面の障害物となる壁や柱、目的地となる出入口やカウンターなどに関するデータが計算機に与えられる。計算機は更にこれらのデータを基にシミュレーション途中で必要なデータを内部で作成し、シミュレーションを開始する。以下各節でこれらのデータの中、主要なものを説明しながら、モデルの大まかな原理を説明する。

2.3.1 シミュレーション平面

シミュレーション平面に関するデータについて、Figure 2-6 のような例を用いて以下各節で説明する。

[1] 壁と柱

Figure 2-6 では直線の繋りは平面上の壁を表し、点線は開口部を表している。壁の各頂点には番号が付されている。壁のデータとしてそれらの番号が付された頂点座標 (X, Y) が計算機に与えられ、同時に一続きの壁の終点となる頂点番号も与えられ、壁面の切れ目が認識される。曲面の場合は短い直線の繋りとして表示する。柱は円形とし、平面上の中心座標と半径を与える。壁頂点は平面内部に対して時計回りとなるように順にデータを与えることとし、平面上の任意の位置において平面内部か外部かの認識を行うことを容易にしている。モデル中の歩行者はこれらの壁や柱から反発する磁力を受け、衝突を避けながら目的地に向かって歩行する。

このように与えられる壁頂点数の上限は 650、柱本数は 50 本としている。これは、この論文で挙げているシミュレーション例の中、最大のものを少し上回っている数値である。

[2] 開口部及び待ち空間

Figure 2-6 で、点線により表示されている部分は開口部を示している。開口部のデータとしてその両端の頂点番号及び開口部種類が与えられる。開口部種類は Table 2-6 のように数値で与えられる。Figure 2-6 では 1-16 間と 4-5 間の開口部は出入口として与えられ、9-10 間及び 13-14 間はエレベーター乗降口となっている。

開口部種類を表す数値	開口部の種類
0	防煙垂れ壁
1	出入口
2	窓
3	カウンター窓口
4	エレベーター乗降口
5	ラッチ

Table 2-6 開口部データ

特に出入口やエレベーター乗降口はシミュレーションにおいて歩行者の目的地となる場合がある。「3 カウンター窓口」、「4 エレベーター乗降口」、「5 ラッチ」のデータが読み込まれると、システムはこれらの開口部の前に、待ち行列の発生する待ち空間を想定する。この待ち空間内に等間隔の格子点を想定し、

待ち客はこれらの格子点上に静止して待ち行列に並ぶものとする。この格子点間隔、待ち客の行動パターン等の詳細は第2章で述べることにする。カウンター窓口はこのような壁面の切れ目でなくても、壁面の一部となっている2頂点間のデータを与えても、その部分をカウンターと認識することになっている。これらのデータ以外に、カウンター窓口、ラッチ及びエレベーター乗降口に関しては Table 2-7 に示されるデータも与えられる。これらのデータにより歩行者の待ち行動を再現することが可能となる。このような開口部の数の上限は 50、カウンターの窓口数はシミュレーション平面全体で 100 を上限としている。

待ち空間	データ
カウンター窓口	窓口数 サービス時間
ラッチ	サービス時間
エレベーター乗降口	エレベーター乗客定員 到着時間

Table 2-7 待ち行列に関するデータ

[3] コーナーと歩行経路

平面に関するデータを読み取った後、システムは平面内部に対して出隅となっている壁頂点をコーナーとして認識し、記憶する。歩行者は出発点から目的地が見えている場合は、単純に他の歩行者や障害物を避けながら目的地に到達する。しかし、歩行者の位置から目的地が見えない場合は、歩行者から見えるコーナーを順に辿り、目的地に到達する。歩行者が辿ったコーナーの列は歩行経路として各歩行者に、記憶される。これにより、複雑な経路における歩行シミュレーションが可能となる。Figure 2-6 の例では、頂点 2, 6, 8, 11, 12, 15 がコーナーと認識される。

2.3.2 歩行者データ

シミュレーションの対象とする歩行者数が少ない場合は歩行者 1 人 1 人の初期データを Table 2-8 に示す通り与える。

表中、「希望速さ」とは歩行者が普通の状態歩く場合の速度である。歩行者には磁場により力が加わるので、放置すると加速度運動を行い速度が大きくなり過ぎる恐れがあるため、希望速さの 1.2 倍を速度の上限としている。歩行者の歩行方法は 3 通りあるが、それぞれシミュレーションの目的により適当なものを指定して使い分ける。それぞれの詳細は以下の通りである。

探索歩行	: 歩行者が目的地までの経路を知らない場合の歩行
最短経路歩行	: 歩行者が目的地までの経路を知っている場合の歩行
与えられた経路歩行	: 予め歩行経路が予想されている場合は、コーナーとなる壁頂点番号の列が歩行経路として与えられ、それに従って進む歩行。

Table 2-8 歩行者データ

第 I 章 探索歩行

これらの歩行において、前節で述べられたように歩行者から目的地が見える場合は、直接目的地に向かって歩行するが、歩行者から目的地が見えない場合はコーナーを順に辿り歩行する。このとき歩行者は、歩行者の位置から見えるコーナーの中、適当なものを仮目的地としてそのコーナーを一時的な目的地として、そこから引力を受けて歩行する。(Figure 2-3) シミュレーション開始後、歩行途中でシステムにより自動的に作成されるデータとして、この仮目的地と、各時刻における歩行者位置 (X, Y)、及び歩行速度 (向きと大きさ) がある。これらのデータはシミュレーション中時々刻々と変化し、単位時間 (0.1 秒) 毎に各歩行者が画面上に表示し直され、歩行者が平面上を動く様子を表示することができる。

歩行者数が多い場合は歩行者を集団に分け、集団毎に初期データを与え、乱数により歩行者の発生位置、速度の大きさ、歩行開始時刻を定めている。歩行者数の上限は 1000 人としている。

引用文献

1. 岡崎甚幸：建築空間における歩行のためのシミュレーションモデルの研究 その1 磁気モデルの応用による歩行モデル，日本建築学会論文報告集第283号，1979年9月，pp. 111-117
2. 岡崎甚幸：建築空間における歩行のためのシミュレーションモデルの研究 その2 混雑した場所での歩行，日本建築学会論文報告集第284号，1979年10月，pp. 101-110
3. 岡崎甚幸：建築空間における歩行のためのシミュレーションモデルの研究 その3 停滞や火災を考慮して最短経路を選ぶ歩行，日本建築学会論文報告集第285号，1979年11月，pp. 137-144
4. 三谷健次：電磁気学，共立出版，1971年
5. Fruin, John J. PEDESTRIAN Planning and Design. Kajima Institute Publishing Co. Ltd., 1975.
長島正充 (訳)：歩行者の空間，鹿島出版会，1974年

この章では歩行者の探索歩行特性を分析し、それを基に作成した探索歩行モデルの説明を行う。更にそのモデルによるシミュレーション例を示す。心理学で動物の行動を研究するために迷路を用いる実験があるが、A. Moles¹ はこれらの実験用の迷路以外に、現実の都市や建築空間も一種の迷路であるとし、以下のように、二、三、四次元の三種類の迷路を分類している。

- 二次元 --- 平面内の移動だけが発生する。例として都市の街路、デパートや地下街の平面、大学キャンパス、公園等が挙げられる。
- 三次元 --- 容積のある空間を持ち、縦、横、高さに移動し得る迷路である。例として、廊下、階段、エレベーター、エスカレーターなどにより、空間が結び付けられた多数階のショッピングセンター等が考えられる。
- 四次元 --- 三次元迷路に時間 (t) の要素が付加されたものであり、時間の経過に連れて、扉の開閉などにより経路が変化するものである。例として、多数の店舗を持つ大規模なショッピングセンターなどで、開店或いは閉店時間などに扉が開閉するような場合が考えられる。

現実の都市や建築空間では、心理学実験のような純粋な迷路とは異なり、誘導のサインや目印、その他歩行のための情報が与えられることが考えられるが、本研究ではまず探索行動に関する既存の研究を概観した後、遊園地の迷路を用いて歩行実験を行い、歩行者の基本的な探索歩行特性を分析する。それらの結果から探索歩行モデルを作成し、サインによる誘導歩行モデルとの組み合わせにより、現実の都市及び建築空間における探索歩行のシミュレーションを試みる。

引用文献

1. Moles, Abraham A. and Rohmer, Elisabeth. Psychologie de L'espace. Casterman, 1978.
渡辺淳 (訳)：空間の心理学，法政大学出版局，1983年

3 探索歩行の特性

この節では、探索歩行のモデル化のために参考となった心理学関係の理論、ロボット工学、そして、歩行者の探索行動や歩行者が空間に対して持つイメージ及びそのモデル化等に関する既存の研究を概観し、その中から問題点を探る。これを次節で述べる実験結果と合わせ、モデル化のためのアルゴリズムを作成する基礎とする。

3.1 心理学における迷路学習

心理学の分野では迷路学習に関する理論は大別して2通りに分類されている。¹ 1つは行動主義理論で、I. P. Pavlov、J. B. Watson 等に始まり、C. L. Hull、B. F. Skinner 等に受け継がれ、新行動主義理論と呼ばれるが、今日では後に述べる認知主義との境界が明白ではなくなっている。

行動主義理論の特徴は行動を機械的なものとして考え、刺激Sと反応Rの連合「S-R」が学習の形成であるとするものであった。Watsonによれば、動物は迷路において単に右へ曲がったり、左へ曲がったりする運動の連鎖を学習するに過ぎず、動物は自動筋肉機械に過ぎない。迷路を十分学習させた後、迷路の曲がる方向や長さを変えると混乱を生じる。²

これに対し認知主義理論では、動物は頭の中にある「認知地図」を読んで行動する。単なる「S-R」ではなく、頭の中で目的地にある食物などを予期して行動すると考える。このような予期という問題を説明するために、Hull³、Spence⁴等は内的媒介反応rとそれに伴う内的刺激sの関係「r-s」を仮定し、それが、SとRの間を「S-r-s-R」というように中継ぎし、或いは媒介すると仮定した媒介理論の考えを持つようになった。

認知主義理論はE. C. Tolman⁵に代表され、K. Koffka⁶、W. Kohler 等によるGestalt学説、J. Piaget⁷、K. Lewin⁸、Merleau-Ponty⁹等も類似の立場を取る。「S-R」理論に反する事実として潜在学習を挙げ、ここでは餌を与えられずに迷路に置かれた動物も学習を行っていることを示し、動物や人間の行動は目的的なものであると考える。動物は環境についてできるだけ多くの情報を得ようとして行動し、このようにして獲得された情報を、あたかも地図のように遂行の際に用いる。Tolmanはこれを「認知地図」と呼び、迷路学習は筋肉運動の系列化によって成立するのではなく、目的-手段の関係すなわち認知ないし認知地図の獲得にはかならないとする。この認知地図により、迂回行動、見通し行動などが可能になるとされている。

Merleau-Pontyも認知主義理論と類似の考え方をもち、行動の形態を以下のように分類している。

- A. 癒合的形態—行動は自然的条件の枠の中に閉じこめられている本能的行動
- B. 可換的形態—刺激を空間的・時間的な「目的-手段」の関係を表す記号として理解する。
- C. 象徴的形態—言語、音楽の理解のように、「刺激」を単なる「記号」として認識するのではなく、その記号が、象徴している対象を認識し、記号と記号の関係を、記号が象徴する対象と対象との関係として認識できる。

これらの理論から、動物実験により迷路学習の成立に関与する要因として従来から指摘されてきたものは以下の通りである。¹⁰

1. 短路選択傾向と習慣階層 (Hull)
2. 目標勾配 (Hull)
3. 目標定位 (Tolman) 及び下位目標定位 (Spence & Shipley¹¹)
4. 最終選択反応の早期傾向 (Spence & Shipley)
5. 迷路主要部分の空間的関係の把握 (Honzik¹²)

6. 動因及び誘因と学習成績 (Macduff¹³)
7. 前進傾向 (Dashiell & Bayroff¹⁴)、遠心性スイング (Ballachey & Buel¹⁵)、同側回転 (Tsai¹⁶)、位置習慣 (Yoshioka¹⁷)
8. 水温、水深、泳がせ方 (Waller et al.¹⁸)

以上の理論及び迷路学習に関与する要因から、探索歩行のモデル化のために考慮すべきであると考えられる事項をまとめると以下の通りである。

模索

最初模索は偶然的なものと考えられていた。動物を迷路の中に入れると、模索をし、偶然の成功に身を任せ、誤りがだんだん取り除かれ、うまく行った試みが保存され、学習が進行する¹⁹と考えられていた。しかし、後には逆に、純粋な模索というものは存在しないと考えられるようになった。Piagetによると、模索は、最初から欲求や習慣により方向付けられており、動物は初めにある方向を取ると、その方向を取り続ける。Tolmanによると、動物は今まで知っているものとは違った新しい迷路に直面すると、全体の類似性を知覚して、以前に成功した行動を新しい場合に当てはめる傾向が見られる。このように考えると、この模索だけを単独で考えることは無意味であり、以下に述べる事項により方向付けられるものと考えられる。

接近行動

動物の探索行動を方向付ける大きな要因として「目標定位」がある。Hullによると動物を迷路に入れると、まず目標の方向に直接接近する傾向がみられる。目標の方向との成す角が180度に近い方向に進む経路は選択され難く、その角度が0度に近づくに連れて選択され易くなる。この「目標定位」の傾向により、目標に接近しようとする行動を以後「接近行動」と呼ぶことにする。

「目標定位」と似た要因として「目標勾配」がある。これは、動物を用いた実験を何度も繰り返すうちに、どのように袋路に陥る誤りの除去が進行するかを示す仮説である。Hullによれば、「迷路の袋路は目標に近い箇所から順に除去され易い」、「短い袋路の除去より長い袋路の除去がより起こり易い」などがある。Merleau-Pontyによると、「目標の一般的方向と平行で、しかもそれと反対方向に向かう袋路」、「目標の方向に垂直な袋路」、「目標の方向に平行で、しかもそれと同一方向に向かう袋路」の順で除去される。

迂回行動

迷路実験ばかりでなく、日常生活においても、直接目標に接近する行動以外に一旦目標から離れてから接近するという迂回行動がしばしば見られるが、PiagetとLewinが、行動の発達と関連して迂回行動に触れている。Piagetは空間や対象に対するスキーマの発達の段階を、以下の6段階まで定義し、第6段階までスキーマが発達すると迂回行動も可能になるとしている。

- 第1段階 与えられた場面に対し、反射的な行動だけが現れる。
- 第2段階 知覚的光景を認知する。
- 第3段階 自分の見たものをつかむことができる。
- 第4段階 見えなくなった物体を探索し始める。しかし、この場合、物体は以前の活動と結びついたままで、物体を以前とは違う場所に隠しても、以前あった場所を探そうとする。
- 第5段階 物体が個性化され、必ずしも以前の活動と結びつく必要がない。
- 第6段階 知覚的恒常性が完成され、知覚対象の形や大きさが保存される。目に見えぬ道筋を表象することができ、回り道の可能性を予期することができる。

Lewinによると1才以下の人間の子供では自分と目標との間に柵の様な障害物があると、迂回して目標に到達するという行動は見られない。年長の子供にとっては、一旦目標から離れるということは迂回して目標に到達する行動の一部であるという意味をもつが、年少児にとっては、それはただ単に目標から遠去かるといふ意味しか持たない。

認知地図

動物は環境についてできるだけ多くの情報を得ようとして行動し、このようにして獲得された情報を、あたかも地図のように遂行の際に用いる。Tolman はこれを「認知地図」と呼び、迷路学習は筋肉運動の系列化によって成立するのではなく、目的-手段的關係すなわち認知ないし認知地図の獲得にほかならないとする。この認知地図により、迂回行動、見通し行動などが可能になるとされている。Gestalt 心理学においても類似の考え方が見られる。環境を物理的な又は実在的な「地理的環境」と、個体が知覚し又個体の動作もそこに展開される「行動的環境」の2通りに区別しているが、この「行動的環境」は「認知地図」と同様の考え方に基づくものであると考えられる。

各個体の特性

以上述べた事項は動物や人間に一般的に見られるものであるが、それらとは別に各個体が持つ固有の特性も考慮に入れる必要がある。どのような特性を持つかにより、各個体間の行動に差異が表れる。上述の前進傾向（なるべく曲がらず直進する）、位置習性（個体による左右何れかの片寄った好み）などがこれに当たると考えられる。

3. 2 知能ロボットによる経路探索

ロボット工学^{20, 21}の分野では工場や病院内の荷物の運搬などの目的で探索歩行を実用化する研究が進められている。ロボットによる感覚と探索歩行のそれぞれについて簡単に説明し、前節で検討された心理学理論や序で述べた既存のシミュレーションモデルと比較し、本研究で取り入れるべき点がないかどうか検討する。

3. 2. 1 ロボットによる感覚の仕組み

超音波パルス、電波、レーザーパルスなどを発信し、対象物からの反射信号を受信するまでの時間を計測することにより距離を得る。他に、2台のテレビカメラを用い、三角測量の原理に基づいて対象物までの距離を得る方法もある。これらの超音波などを利用した距離センサーを用いて、周囲を一定の角度間隔で測定し、自分の通過できる障害物と障害物の間隙を見出す（Figure 3-1）。発見した物体に関して、パターン認識により形や質を認識しようとする。

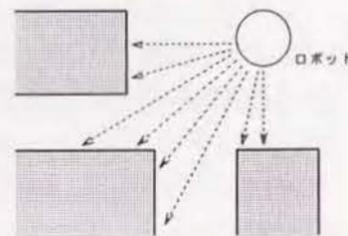


Figure 3-1 ロボットによる感覚

3. 2. 2 ロボットの探索歩行

ロボットの探索歩行に関し、環境情報が与えられている場合と、環境情報が殆どない場合の2通りに分けて説明する。

[1] 環境情報が与えられている場合

この場合は経路を知っていることになるので、最短経路をとる。工場などで利用される移動ロボットの移動方式では、床面に誘導のためのマークを設置したものがある。

[2] 環境情報が殆ど無い場合

未知の地域へ地図無しで入った人間の探索状況と似ており、出発点においては目的地が大体どっちの方向にあるという程度の情報しか持っていない。

センサーにより見いだした障害物の間隙のうち、「現在位置と目的地を結ぶ線分からなるべく離れず、且つ、いままで進んできたコースから急激に方向が変化しない」という条件を満たすものを選び、その方向に一定距離だけ進む。

その移動の結果によって得られた新しい情報に基づいて、より目標点に近いと思われる方に動くことにより、経路の探索を継続する。この過程を目標点に到達するまで繰り返す。環境の複雑さの度合いによっては目標点に到達する経路の発見ができない場合もある。

3. 2. 3 群集歩行モデルとの比較

ロボットの経路探索に関し、その感覚と探索歩行に分けて述べたが、感覚に関して考えると、ロボットは現実の世界の中で人間と同様の行動を行わせることが目的であるので、人間に近い感覚を持ち、物の形や質まで認識する必要があるであろう。本研究で開発した歩行モデルの場合は、モデル化された空間の情報を与えられ、その範囲内で、目的地、障害物、他の歩行者等の要素を認識できれば良いので、取扱いはロボットに比較して容易であると考えられる。

ロボットの探索歩行に関しては、センサーにより障害物間隙を発見し、目的地に接近して行くと言う比較的単純な接近行動による模索の段階と考えられる。より人間に近い動きをさせるためには、前節で検討された、迂回行動、認知地図と言った複雑な問題を如何に実現するかが問題となる。

以上述べた結果をロボットと本研究で開発したモデルとを比較し、表にまとめると Table 3-1 のようになる。

	感覚	探索行動			
		模索	接近行動	迂回行動	認知地図
ロボット	超音波等により障害物を見出し、パターン認識により、物の形や質を認識	○	○	×	×
本研究の歩行モデル	与えられたデータ（壁、柱、開口、他歩行者）が見えるかどうかを調べる	○	○	○	△

Table 3-1 ロボットと本研究のモデルとの比較

3. 3 探索歩行に関する既存の研究

この節では、建築計画の分野において見られる探索歩行に関する既存の研究を概観し、探索歩行のモデル化を行うに当たり、参考とすべき点を探る。

まず自治省消防研究所の迷路歩行実験を行った研究がある。²²⁻²⁶ ここでは、避難行動に影響を与える因子として、群集密度等の流動的因子の他に、心理的因子として、「通路記憶」、「通路学習」を挙げている。屋外広場に27m四方の広さで幅1mの格子形の通路を持った迷路を作り、火災による避難時を想定し、被験者は、停電や煙のために視界が効かず、足元しか見えないものとし、「視界障害用帽子」を被って歩行実験を行っている。実験は全部で4回行われ、それぞれ異なる目的を持ち、異なる方法で行われた。それらの結果は Table 3-2 の通りである。

この研究から、経路の学習効果や、出発点と出口との関係など、避難行動を考える上で参考になる点はあるが、本研究が目的とする探索歩行特性に関して考えると、歩行経路の選択傾向や、認知地図と言った事項に関して、参考となる資料を十分に提供してくれているとは言えない。

実験回数	実験目的	実験方法	実験結果
1	経路の記憶と、歩行経路との関係を調べる。	単独で出発し、迷路内を自由に歩行し、ブザーが鳴ったら折り返し、それまで歩いた歩行経路を通ってもとの出発点に帰る。	出発点、及び折り返し点付近で誤りが少なく、中間点付近で誤りが多い。 方向の誤り(17%)は少ないが距離の誤り(80%)は多い。
2	建物内に何回か入った経験のある場合を想定し、歩行経路の学習により経路の記憶が、どの程度増大するか調べる。	まず迷路の床上に置いてある矢印に沿って歩行し、折り返し点にきたら矢印を取り除き、矢印の無い経路を通して出発点に帰る。これを被験者が完全に経路を覚えるまで繰り返す。	試行数4以下では、記憶する経路は試行数に遅れて増大するが4以上になると、記憶経路の増加は鈍る。誤りが多いのは、折り返し地点から約6割進んだ付近である。
3	人間の出口探索行動を分析し、避難のための建物内出口の配置条件を調べる。	迷路内の上から出発し、自由に歩行して出口を探す。	出発時の進行方向と同一方向に向いている出口は発見し易く、逆方向に向いている出口は発見し難い。 出口と出発点は、少し離れている方が発見し易い。
4	非常口の確認方法と避難時間の関係を、迷路を使用して調べる。	最初に各被験者が非常口を確認し、その後、迷路内を出発点から非常口まで歩行する。非常口の確認方法は「自分で確認」、「他人の後に追従」、「地図による確認」の3通りである。	「地図による確認」、「自分で確認」、「他人の後に追従」の順で非常口が短時間で発見された。 何れの場合も、確認しない場合よりも短時間で発見している。

Table 3-2 自治省消防研究所で行った迷路歩行実験

最近の研究では経路探索は wayfinding と呼ばれ、現実の都市・建築空間において歩行実験を行い、探索歩行特性を解明しようとするものが見られる。大阪大学の舟橋國男²⁶ は Wayfinding に関する環境の物理的特性の影響として以下の3通りを挙げている。

サイン……………最も普遍的な wayfinding 補助手段

建築的文節……………cue、landmark 等と呼ばれるものに関連し、場所の記憶・再認に有効

平面形状特性……………空間的配置の複雑さ

更に、大学キャンパス内の建物を用いて探索歩行実験²⁷ を行い、学習による行動、及び空間把握への影響を調べている。その実験方法と結果を以下に示す。

実験の段階	内容
初期教示	以下の1、2の何れかの方法で経路を学習させる 1. 地図を見せる 2. 経路を連行する
歩行実験	以下の1～6の順で実施する。 1. 初期教示(地図、又は連行) 2. 歩行経路のスケッチマップを描かせる 3. 目的地へ歩行 4. 歩行経路のスケッチマップを描かせる 5. 目的地へ歩行 6. 歩行経路のスケッチマップを描かせる
結果	地図を見せたグループより、経路を連行したグループの方が空間把握の程度が上昇

Table 3-3 大学キャンパスにおける探索歩行実験

この実験結果では、地図を見た場合の方が学習効果が低く、先の消防研究所の実験と逆の結果が出ている所が興味深い。消防研究所の迷路に比較し、この実験の大学キャンパスの方が大規模で複雑なため、地図が不完全にしか理解されず、役に立っていないのかと推測される。

次に都市空間における経路探索のシミュレーションを行っている東京大学の日色真帆²⁸ の研究を紹介し、本研究のモデルと比較する。日色の研究では、都市空間を place (場所) を節点とするネットワークにより表現する。place には position (位置)、name (名前)、shape (形状)、function (機能)、place relation (関係) の属性が与えられ、place の shape には、迷路のコーナーなどの点状のもの、建物やストリートファニチュアなどの立体的なもの、交差点や広場などの広がりをもつものがある。place relation として以下の4種類を設定している。

1. physrel …… ある place から別の place へ行くことができる
2. visrel …… ある place から別の place が見える
3. indrel …… ある place から別の place を何らかのサインにより指示する
4. increl …… ある place が別の place に含まれる

これらの place のネットワーク上を、place から得られる情報を利用し、目的地に向かって経路探索を行う。

以上、舟橋、日色の実験、或いはモデルを見ると、心理学実験のような迷路内の経路探索に比較して、現実の都市・建築空間における経路探索においては、環境から得られる情報、即ちサインや目印となる landmark が経路選択の大きな要因となっている。それに反し、先の部分で挙げた心理学理論でみられた探索歩行特性、つまり接近行動、迂回行動等と言った歩行者個々の心理的な問題はあまり考慮されていないようである。本研究では、これら歩行者個々の歩行特性を考慮した上で、探索歩行アルゴリズムを作成し、これにサインによる誘導アルゴリズムを組み合わせて、現実の問題に対処する。ここで日色のモデルと本研究のモデル²⁹ の比較を Table 3-4 に示す。

	外部情報(サイン等)	模索	接近行動	迂回行動	認知地図
日色のモデル	○	○	△	×	△
本研究のモデル	○	○	○	○	△

Table 3-4 探索歩行モデルの比較

引用文献

1. 佐藤方哉：現代基礎心理学 第6巻，東京大学出版会，1983年
2. Watson, J. B. Behaviorism. Norton, 1925.
3. Hull, Clark L. A BEHAVIOR SYSTEM An Introduction to Behavior Theory. Yale University Press, 1952.
能見義博，岡本栄一（訳）：行動の体系，誠信書房，1971年
4. Spence, Kenneth W. Behavior Theory and Conditioning. Yale University Press, 1956.
三谷恵一（訳）：行動理論と条件づけ，ナカニシヤ出版，1982年
5. Tolman, E. C. Purposive Behavior in Animals and Men. Appleton-Century-Crofts, 1932.
6. Koffka, K. Principles of Gestalt Psychology. Harcourt, Brace and Company, 1935
7. Piaget, Jean. La Psychologie de L'intelligence. Librairie Armand Colin, 1952.
波多野完治，滝沢武久（訳）：知能の心理学，みすず書房，1967年
8. Lewin, Kurt. Field Theory in Social Science. Harper & Brothers, 1951.
猪股佐登留（訳）：社会科学における場の理論，誠信書房，1979年
9. Merleau-Ponty, Maurice. La Structure du Comportement. Presses Universitaires de France, 1942.
木田元，滝浦静雄（訳）：行動の構造，みすず書房，1964年
10. 八木晃編：心理学研究法5 動物実験 I，東京大学出版会，1975年
11. Spence, K.W. and Shipley, W.C. The Factors Determining The Difficulty of Blind Alleys in Maze Learning by The White Rat. J. comp. Psychol., 17, 1934, pp. 423-436
12. Honzik, C.H. The Sensory Basis of Maze Learning in Rats. Comp. Psychol. Monogr., 13, 1936, pp. 1-113
13. Macduff, M.M. The Effect on Retention of Varying Degrees of Motivation During Learning in Rats. J. comp. Psychol., 39, 1946, pp. 207-240
14. Dashiell, J.F. and Bayliff, A.G. A Forward-going Tendency in Maze Running. J. comp. Psychol., 12, 1931, pp. 74-94
15. Ballachey, E.L. and Buel, J. Centrifugal Swing as a Determinant of Choice-point Behavior in The Maze Running of The White Rat. J. comp. Psychol., 17, 1934, pp. 201-223
16. Tsai, L.S. The Cul-de-sac Phenomenon. J. comp. Psychol., 12, 1931, pp. 393-400
17. Yoshioka, J.G. A Further Note on a Position Habit in Rats. J. comp. Psychol., 10, 1930, pp. 309-315
18. Waller, M.B., Waller, P.F. and Brewster, L.A. A Water Maze for Use in Studies of Drive and Learning. Psychol. Rep., 7, 1960, pp. 99-102
19. Thorndike, E. L. The Fundamental of Learning. Teachers College, 1932.
20. 柿倉正義：知能ロボット入門，工業調査会，1987年
21. 中野栄二：ロボット工学入門，オーム社，1983年
22. 渡部勇市：迷路における人間の避難行動実験 その1 歩行経路の記憶，日本建築学会大会学術講演梗概集，1978年9月，pp. 783-784
23. 渡部勇市：迷路における人間の避難行動実験 その2 歩行経路の学習，日本建築学会大会学術講演梗概集，1979年9月，pp. 763-764
24. 渡部勇市：迷路における人間の避難行動実験 その3 出口の探索行動，日本建築学会大会学術講演梗概集，1981年9月，pp. 857-858
25. 渡部勇市：迷路における人間の避難行動実験 その4 非常口の確認方法による避難上の有効性の違いについて，1982年10月，pp. 1571-1572
26. 船橋國男：“WAYFINDING”研究に関する一考察 環境の物理的特性の影響について，日本建築学会大会学術講演梗概集，1987年10月，pp. 581-582
27. 船橋國男：不慣れな建築空間におけるwayfindingに関する実験的研究 再現歩行と経路の空間把握，日本建築学会大会学術講演梗概集，1988年10月，pp. 675-676
28. 日色真帆，原広司，門内輝行，金尾朗：都市空間における経路探索に関する研究 Object Logoによるコンピュータ・シミュレーション，日本建築学会大会学術講演梗概集，1990年10月，pp. 877-878
29. 松下聡，岡崎甚幸：迷路探索歩行のためのシミュレーションモデル，日本建築学会大会学術講演梗概集，1990年10月，pp. 659-660

4 迷路歩行実験

遊園地の巨大迷路を用いて歩行実験を行い、歩行者の探索歩行特性の分析を試みた。ホテルやデパートの火災時に既知の非常階段や出口が火煙に覆われ、別の避難路を捜す場合等は、迷路内の歩行と似たような状況が発生すると考えられる。また、地下街などでサインや案内板を見ても目的地への経路が解り難いような場合もよく経験する所であり、このような場合も、探索歩行と似た状況が発生すると考えられる。従って、このような迷路歩行実験結果を分析することにより、現実の複雑な空間における歩行者の行動や避難行動の特性を探ることも可能であると考えられる。しかし、このような遊園地の迷路と現実の都市、建築空間とは状況が異なり、それにより、歩行者の行動も影響を受けるので、実験と現実との状況の違いは考慮に入れる必要がある。現実の空間とここで行った迷路歩行実験との状況の相違点としては以下のような項目が考えられる。

項目	実験迷路	現実の都市、建築空間
サイン	無し	誘導標、非常出口などがある
目印	周囲の風景、通過した分岐点、観察者、目的地など	建物、通り、ストリートファニチュア、看板などが目印となる
目的地	被験者から見える	見えない場合があり、目的地の方向を見失う場合もある
袋路	比較的袋路は多く、真直ぐ目的地には到着できない場合が多い	通常はなるべく作らない。住宅地の街路で通過交通を排除するためや、古い城下町などでは袋路が見られる
歩行者の心理	迷路であるから、真直ぐ目的地に接近せず、迂回しなければならないのではないかと不安を持つ	通常は不安を持たず直接目的地の方向に接近していく

Table 4-1 実験で用いた迷路と現実の都市、建築空間との状況の違い

この様に考えると、現実とあまりにもかけ離れた大規模な巨大迷路で実験を行っても複雑過ぎて無意味であり、以下に述べるような比較的小規模で被験者の歩行パターンの分析が容易な迷路を用いて実験を行った。

実験場所: 石川県内にある以下の2ヶ所の迷路を使用して歩行実験を行った。何れの迷路も目的地に高い展望台のようなものがあり、被験者は目的地は見えるが、そこまでの経路は知らないと言う状況で歩行する。迷路は2ヶ所共木造であり、壁面には木製のパネルが貼られている。壁面の足元は Figure 4-1 のように空いており反対側を見ることが出来る。従って被験者は自分の横の壁面が外部との境界であるかどうかを知ることが出来る。

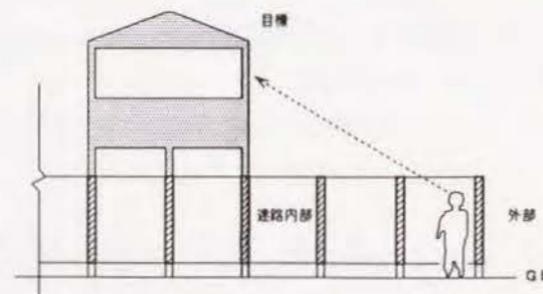


Figure 4-1 迷路断面の様子

手取フィッシュランド 金沢市郊外の遊園地にある既存の迷路を使用して実験を実施
 実験実施日：1989年7月21日
 被験者数：8人

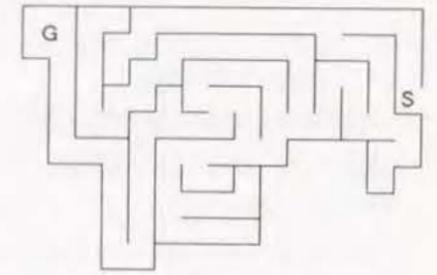


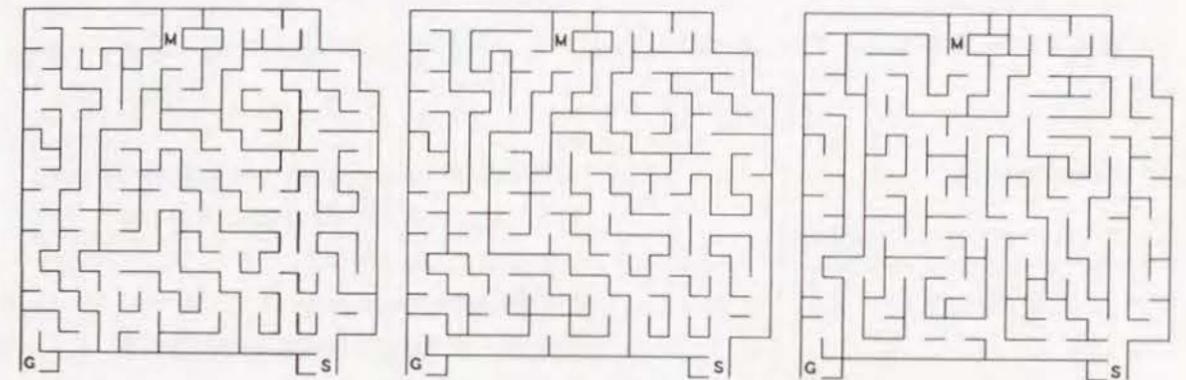
Figure 4-2 手取迷路平面

白峰村迷路 石川県白山麓にある白峰村の公園内において実験を3回実施

第1回実験 既存の平面を使用
 実験実施日：1989年8月3日
 被験者数：18人

第2回実験 平面を変更して使用
 実験実施日：1989年11月10日
 被験者数：17人

第3回実験 平面を変更して使用
 実験実施日：1990年5月31日
 被験者数：17人



a. 白峰迷路第1回実験平面 b. 白峰迷路第2回実験平面 c. 白峰迷路第3回実験平面

Figure 4-3 白峰迷路実験平面

被験者: 金沢工業大学建築学科学生及び福井大学環境設計工学学科学生

- * 被験者は一人ずつスタートし、先にスタートした被験者が迷路から出てから次の被験者がスタートする。
- * 各被験者はトランシーバーを携帯して伸ばしたアンテナの先に紐を結び付け、迷路内の高台にいる観察者からアンテナの先が見えるようにして歩行し、分岐点毎に自分が経路を選択する理由やその時の心境を観察者に報告する。
- * 迷路から出たら次の被験者にトランシーバーを渡す。

- 観察者:**
- * 観察者は迷路内を見渡すことのできる高台から被験者の行動を観察し、それをビデオカメラで録画する。
 - * 同時にトランシーバーにより、被験者が経路を選んだ理由及び歩行中の心境を各分岐点で経路を選択する度に聞き取る。
 - * 実験中のヒアリングだけでは不十分であった点について、実験後、ビデオを見ながら迷路中の各位置で被験者がどのような考えで行動したかをもう一度詳しくヒアリング調査をする。

4.1 手取フィッシュランド迷路における歩行実験と分析 (入口Sから目的地Gへ行く) 被験者数 = 8人

4.1.1 迷路平面の特性

遊園地の既存の大規模な迷路の一部を使用したもので、Figure 4-4 中の太線は最短経路を示しており、スタートから出発し、途中A、B、C、Dの分岐点を経由し、目的地に到達する。細線は最短経路から分岐している袋地や迂回路である。特に分岐点AとCにおいてどの経路を選択するかにより歩行経路に大きな差異が生じる。分岐点Aにおいては目的地方向に進むと行き止まりとなっている。分岐点C付近では目的地方向に2本、少し目的地から離れる方向に1本の経路が分岐しており複雑な状況で経路の選択を行わねばならない。

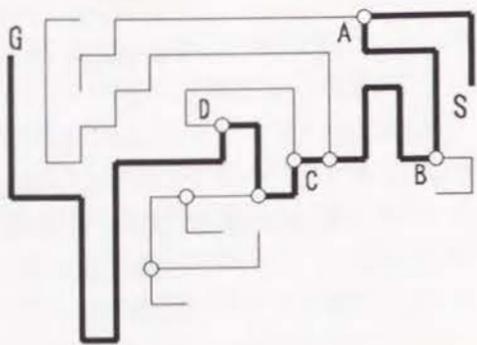
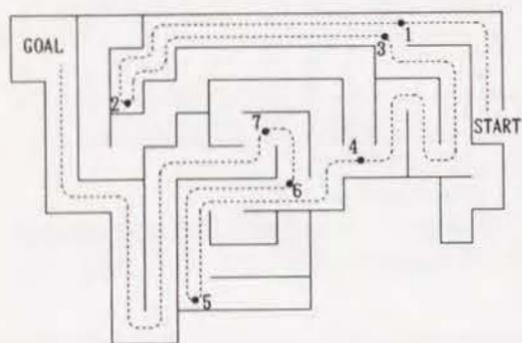


Figure 4-4 手取迷路平面の特性

4.1.2 実験例

実験において観察された被験者の歩行の一例と、その歩行時の経路選択理由を以下に示す。被験者全員の歩行について同様の表記をすると冗長になるので、歩行例は一例だけ示して他は省略するが、次節(第5節)に全被験者の歩行経路を図示する。更に第6節において、全被験者の経路選択理由をまとめ、分類した一覧表を示す。

[被験者の歩行例]



[実験後の質問に対する被験者の経路選択理由]

1. 左に曲がる道があるが素直に直進する
2. 行き止まりなので戻る
3. 先程通過した道に入る
4. 4つの選択があるがなるべく直進する
5. 行き止まりなので戻る
6. 試しに最も近い所を曲がる
7. 直進するとすぐに壁に突き当たりそうなので左に曲がる (左の方が先まで見通しがよい)

Figure 4-5 被験者の歩行経路の一例

4.1.3 歩行経路の分類

被験者8人の歩行経路は以下の図に示されるように、7通り現れた。歩行経路3だけ2人現れた。歩行経路2と3は酷似している。図中の記号の意味は以下の通りである。

- S : スタート地点
- G : 目的地
- : 分岐点
- : 被験者の通過経路
- - : 被験者が通過しなかった経路

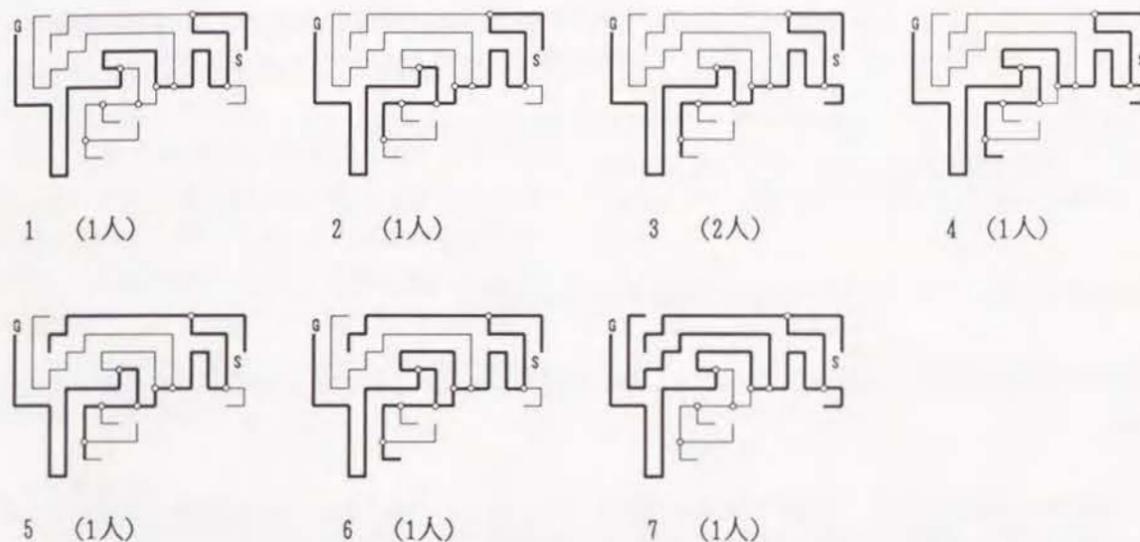


Figure 4-6 手取迷路実験において観察された歩行経路

4.1.4 歩行パターンの分析

この実験結果の歩行パターンはスタート直後の分岐点Aと中間的分岐点Bでどの方向を選択するかにより以下のように大まかに分類できる。

歩行パターン	特徴	被験者数
迂回 + 接近	分岐点Aで目的地から離れる方向の経路を選択する	2/8 人
	分岐点Bで目的地に接近する方向の経路を選択する	歩行経路 1, 4
迂回 + 迂回	分岐点Aで目的地から離れる方向の経路を選択する	3/8 人
	分岐点Bで目的地から離れる方向の経路を選択する	歩行経路 2, 3

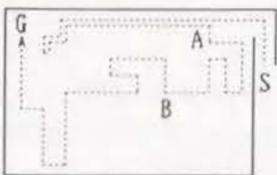
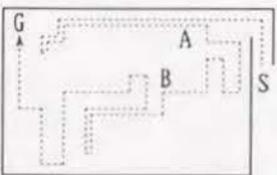
接近 + 接近		分岐点Aで目的地に接近する方向の経路を選択する	2/8 人
		分岐点Bで目的地に接近する方向の経路を選択する	歩行経路 6, 7
接近 + 迂回		分岐点Aで目的地に接近する方向の経路を選択する	1/8 人
		分岐点Bで目的地から離れる方向の経路を選択する	歩行経路 5

Figure 4-7 手取迷路実験における歩行パターンの分析

この実験結果から以下のような歩行者の歩行特性が見い出された。

1. 歩行者は単純に目的地方向に進むだけではなく、時には逆に目的地から離れる方向の経路を選択する場合がある。
2. 歩行者は最初から最後まで単一の方針で経路を選択するのではなく、歩行途中で経路選択方針を変更する場合がある。「目的地に接近する」 ↔ 「目的地から離れる」
3. 見通しの良い長い直線路では直進しようとする傾向が見られる。(直進傾向) 逆に直進せずにすぐに曲がる被験者も見られた。(屈進傾向)

しかしこの実験は被験者数が少なく、使用した迷路部分も小規模で、A、B 両地点で各歩行者がそれぞれの経路を選択した動機を解明するには不十分であった。しかもこの一種類の迷路からだけで歩行者の探索歩行の特性を結論づけるのは危険であるので、更に白峰迷路で実験を行い、歩行特性の分析を行う。

4.2 白峰迷路における第1回実験と分析 (入口Sから中間地点Mを経由し出口Gへ行く) 被験者数=18人

4.2.1 迷路平面の特性

既存の迷路平面を使用して実験を行った。手取迷路よりも大規模な平面で多数の被験者を用いて実験を行った。この実験結果の分析は入口Sから中間地点Mまでの部分と中間地点Mから出口Gまでの部分に分けて行う。図中太線は最短経路、細線はそれ以外の経路を示している。太い点線は最短経路以外に被験者の歩行が観察された経路である。経路全体としては、外周壁に沿って迂回しながら進むと目的地に到達しやすいようになっている。

尚、この実験の被験者は18人であったがそのうちの1人はS→M→Gと通らねばならない経路をS→Gと歩行するものと感違いしていたので、S→Mの部分の歩行経路の分類及び分析では除外し、17人としている。M→Gの部分ではこの被験者も含め、18人として歩行経路の分類・分析を行った。

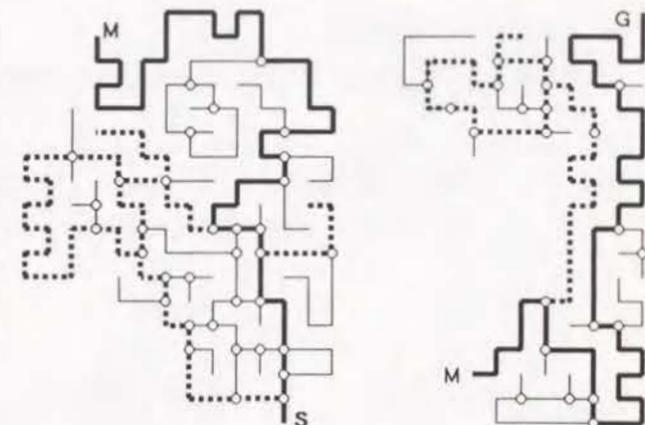


Figure 4-8 迷路平面の特性 (白峰第1回実験)

4.2.2 実験例

これも手取迷路実験と同様に観察された被験者の歩行経路の一例と、歩行時の経路選択理由を示し、更に第6節において、全被験者の経路選択理由をまとめ、分類した一覧表を示す。

[被験者の歩行例]

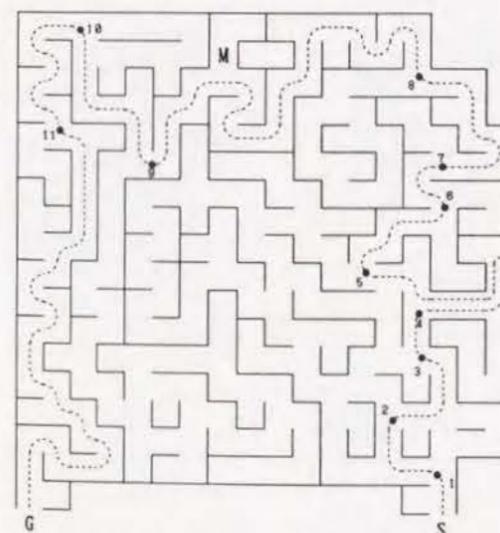


Figure 4-9 被験者の歩行経路の一例

[実験後の質問に対する被験者の経路選択理由]

1. 直進すると行き止まりに遭うと思い、中心の方へ進む
2. 外側へ回っていく方が行けそうな気がした
3. 手前を曲がる方が目的地に近付けたと思った
4. 外周壁に沿って目的地に近付こうとする
5. そのまま行くと騙されると思い、右折する
6. 目的地方向を目指す
7. 外周壁沿いに目的地に到達しようと直進する
8. 外周壁沿いに行けると思い右折する
9. そのまま GOAL の方向に進むと行けそうにないと感じて右折する
10. 素直に GOAL の方向に進む
11. 左の方が見通しが良く、右は行き止まりになりそうな気がして左へ行く

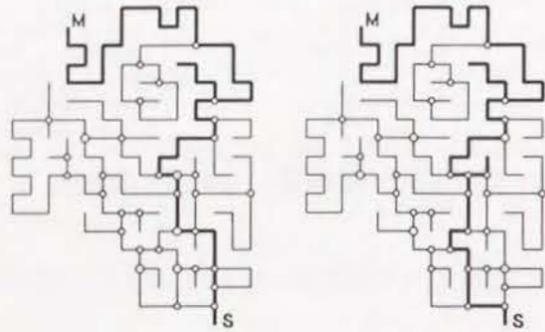
4.2.3 歩行経路の分類

手取迷路の実験結果と同様に、この実験で現れた歩行経路を以下に図示する。被験者の行動を類似したものの同士を集め、グループ分けすると以下ようになる。

[1] 入口Sから中間地点M

入口Sから中間地点Mまでの被験者の歩行経路を分類すると以下のように5つのグループに分かれる。

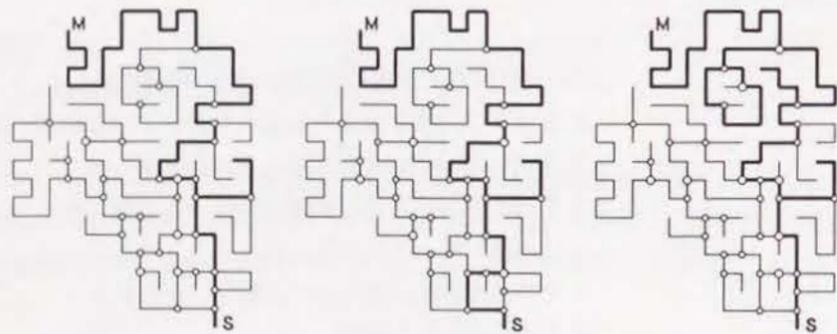
GROUP 1 最初は目的地方向に接近して進むようであるが、中間付近の分岐点でそのまま接近せず、一旦離れる方向の経路を選択し、迂回して目的地に到達する。(接近→迂回型)



1-1 (1人)

1-2 (1人)

GROUP 2 GROUP 1 に似ているが、迂回の傾向がより顕著に見られ、目的地から離れる方向の経路を選択している箇所が多い。(迂回型)

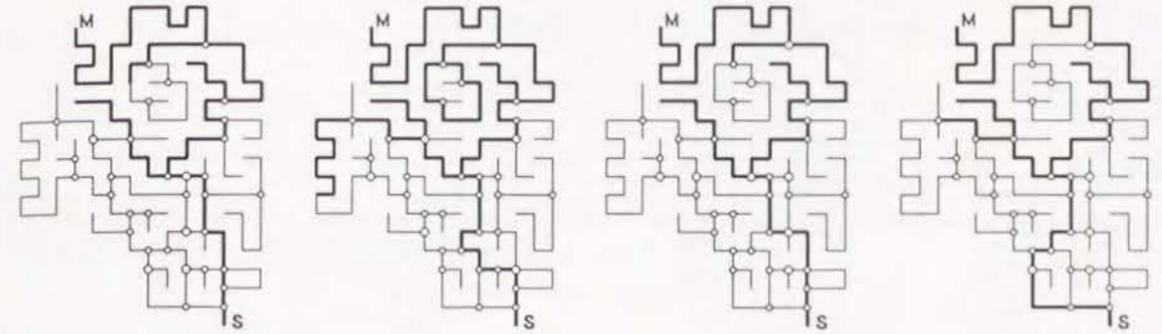


2-1 (1人)

2-2 (1人)

2-3 (2人)

GROUP 3 目的地に接近する方向の経路を取り続けるが、中間付近で行き止まりに遭い、更にそのまま進むと目的地から離れてしまうので引き返し、反対方向に迂回する。(接近型)

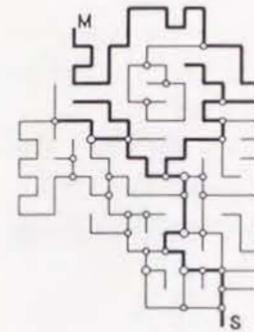


3-1 (1人)

3-2 (1人)

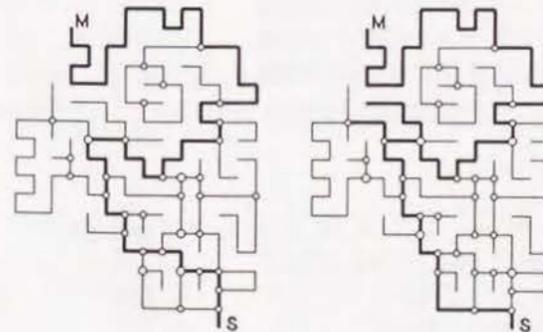
3-3 (1人)

3-4 (1人)



3-5 (1人)

GROUP 4 この歩行経路も GROUP 3 と同様であるが、スタートから中間付近までの経路が異なっている。(接近型)



4-1 (1人)

4-2 (1人)

GROUP 5 GROUP 3, 4 の被験者が引き返した地点においてもそのまま進み続ける。目的地に接近、離れるという行動が多数入り交じっている。(混乱型)

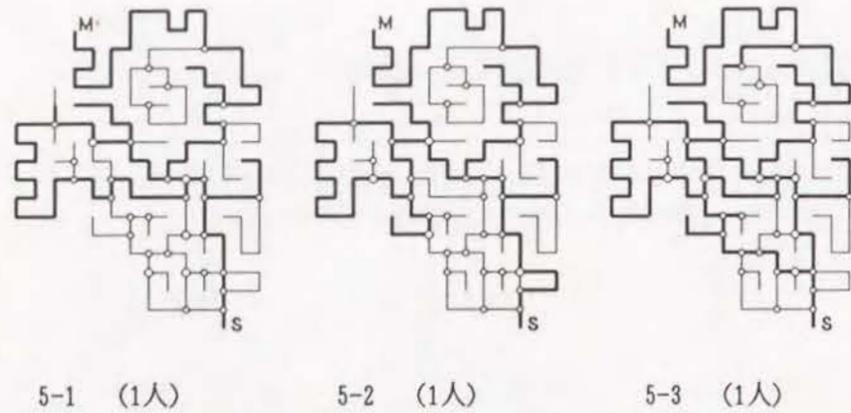
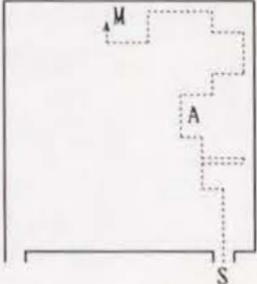
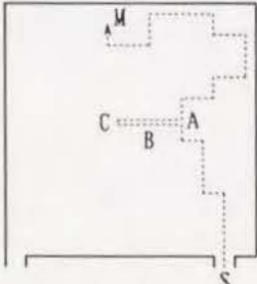
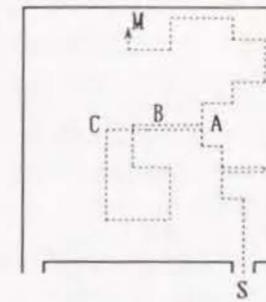


Figure 4-10 白峰迷路第1回実験において観察された歩行経路 (S→M)

被験者の歩行経路を5グループに分類したが、グループ1と2は迂回の傾向が現れていた点で類似しており、グループ3と4も目的地に接近し、途中で引き返した点で類似している。従ってこれらのグループ1と2、3と4、5の歩行パターンをそれぞれ、迂回型、接近型、混乱型と名付ける。それぞれの特徴を表にまとめると以下のようなになる。

歩行パターン	特徴	被験者数
迂回型 	単純に目的地に接近しようとせず、一旦離れて迂回しながら目的地に到達しようとする。特にこの平面ではA地点において、そのまま目的地方向に進まず、一旦離れる方向の経路を選択し、他の歩行パターンの被験者との違いが現れている。このような迂回行動は被験者の過去の経験にもよるものと思われる。	GROUP 1, 2 7/17人
接近型 	首尾一貫して目的地点の方向を目指して歩行する。B又はC地点においてそのまま左方向へ進んで行くと、目的地から離れて行ってしまふのでA地点まで後戻りし、別の経路を選択する。	GROUP 3, 4 7/17人

混乱型



行き止まりに出会った場合以外は後戻りせず、分岐点Cにおいても、進む方向が目的地から離れて行く場合でもそのまま進み続ける。以前に通過した地点Bに戻ってきた場合には、分岐点Aまで進み、別の経路を選択する。

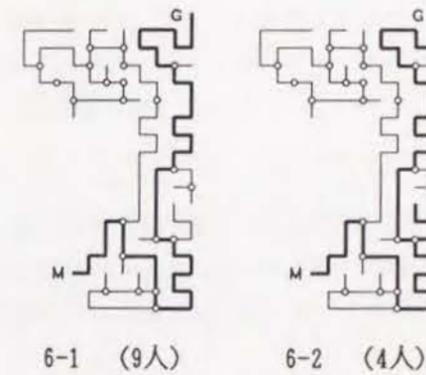
GROUP 5
3/17人

Figure 4-11 白峰迷路第1回実験結果の分析 (S→M)

[2] 中間地点Mから出口Gまで

中間地点Mから出口Gの部分で観察された歩行経路は比較的単純で以下の2通りに分類される。

GROUP 6 スタート直後の分岐点において目的地に接近せず、離れる方向の経路を選択し、迂回して目的地に到達する。(迂回型)



GROUP 7 目的地に接近する方向の経路を取ろうとするが、行き止まりであり、引き返す。(接近型)

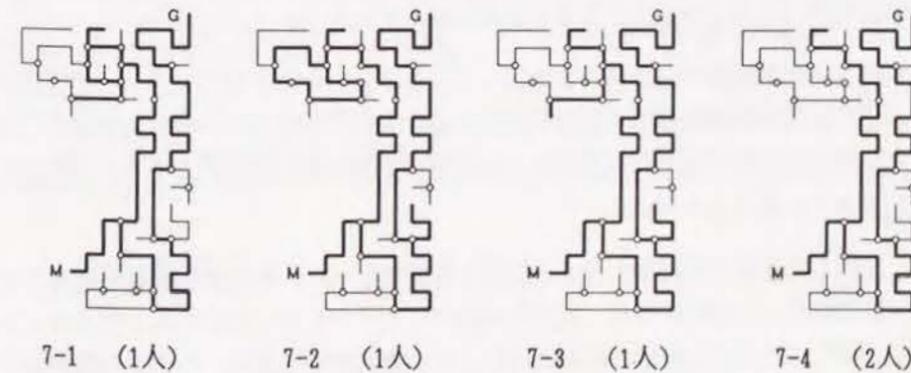


Figure 4-12 白峰迷路第1回実験において観察された歩行経路 (M→G)

この場合は平面が単純で、大きく分けると迂回型と接近型の二通りになる。平面が単純なため、混乱型は、他の2つの歩行パターンと大きな差異がなくなり、明確に区別できなくなってしまうと考えられる。

歩行パターン	特徴	被験者数
迂回型	スタート直後の分岐点Dにおいて目的地から離れる方向を選択する。このパターンの被験者が圧倒的に多かったが、その理由はスタートから中間地点Mまでは迂回しなければ到達できなかったため、最初は接近型であった被験者が今度は迂回型に転換したと見られる。Mまで接近型であった被験者の7人中4人、混乱型が1人迂回型に転換している。前半で迂回型であった7人はそのまま迂回型であった。	GROUP 6 13/18人
接近型	分岐点Dにおいて、目的地方向の経路を選択する。そのまま進み、行き止まりに出会ったり、同じ地点に戻ったりしてこの方向では目的地に到達できないことを悟り、分岐点Dまで戻り、別の経路を探索する。この型の被験者は中間地点Mまでは接近型であった者が3人、混乱型であった者が2人である。	GROUP 7 5/18人

Figure 4-13 白峰迷路第1回実験結果の分析 (M→G)

4.2.4 歩行パターンの分析

この実験結果から歩行者の探索歩行を大別して三通りに分類することができた。目的地に直接接近しようとする「接近型」、目的地から一旦離れてから接近する「迂回型」、接近と迂回が交互に入れ代わりながら多数回現れ、一見混乱した動きに見える「混乱型」である。これらの歩行パターンから以下のような歩行特性が見い出された。

1. 迂回行動において、一旦目的地から離れる方向に進む場合は、そのままますます離れて行くことはなく、一旦離れるとすぐに次は目的地方向に接近する経路を選択する。
2. 接近型の被験者は、B又はC地点においてそのまま進むと目的地から離れてしまうので、方向転換し引き返している。逆に混乱型の被験者はC地点からもそのまま前進し続けている。
3. 2のように経路を引き返す場合、全被験者が分岐点Aまで戻っている。B、Cの間にもう一つの分岐点があるが無視されている。これはその分岐点は全く目的地方向と逆の方向に分岐しているからであると思われる。従って後戻りする場合は目的地に接近する方向か又は迂回して目的地に接近できそうな方向の経路と接続している分岐点まで戻ると考えられる。

この実験は手取迷路実験と比較して平面の規模が大きく、経路も複雑であった。更に被験者数を増員したため、被験者の歩行パターンの傾向がより明確に現れ、3通りの歩行パターンを見い出すことができた。しかしまだ以下のような問題点に関しては十分に解明されたとは言えず、更に実験を重ねてこれらの問題を追求する必要がある。

1. 迂回型の被験者は迷路の外周壁沿いに迂回したが、反対方向に迂回することはないのか。
2. GROUP 3、4 をまとめて接近行動と分類したが、これらを区別する必要はないか。

4.3 白峰迷路における第2回実験と分析 (入口Sから中間地点Mを経由し出口Gへ行く) 被験者数=17人

4.3.1 迷路平面の特性

第1回実験の迷路平面を少し変更し、第1回とは逆方向へ迂回、すなわち第一回実験で接近型の被験者が後戻りした地点Cから更に前進し、目的地から大きく離れなければいけないようにし、被験者の迂回する方向及び、迂回の程度を確かめることを目的として実験を行った。しかし結果を先に述べると、この実験の被験者は全員が第一回実験と同一人物であり、第一回実験の記憶が残っており、その影響が行動に現れている。大部分の被験者が第1回実験で成功した歩行パターン通りに歩行しようとし、少数ではあるが、第1回実験と反対の歩行経路を取った被験者も見られた。

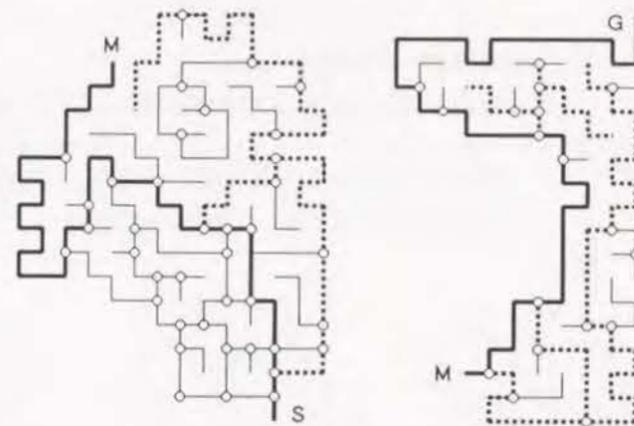


Figure 4-14 迷路平面の特性 (白峰第2回実験)

4.3.2 実験例

観察された被験者の歩行の一例とその経路選択理由を示し、更に第6節において、全被験者の経路選択理由をまとめ、分類した一覧表を示す。

[被験者の歩行例]

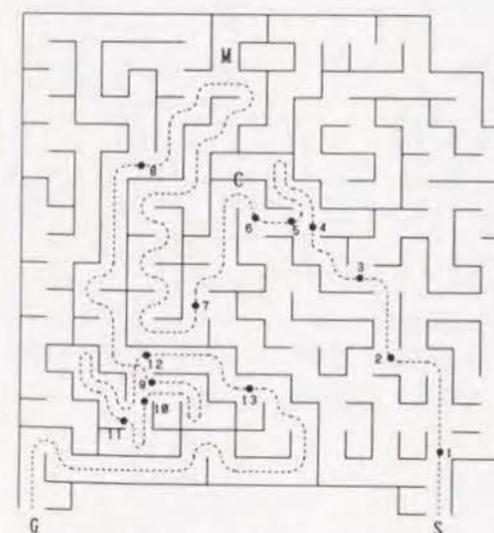


Figure 4-15 被験者の歩行経路の一例

[実験後の質問に対する被験者の経路選択理由]

1. 素直に目的地に向かう
2. 目的地を目指して進む
3. 第1回実験では外周壁沿いに進んだが、今度は反対に中心に向かおうとする
4. 目的地が直前に見えるので直進する
5. 左は行き止まりなので残った道を行く
6. ここから戻るはずがないと思いそのまま進む
7. ここから戻るはずがないと思いそのまま進む
8. 第1回実験とは異なり GOAL の方向へ進む
9. 迂回して外周壁沿いに GOAL に向かおうとする
10. 前方の様子を見ようと思って進む
11. GOAL に近づく方向に曲がる
12. 最後に残った経路を選ぶ
13. 迂回して行けると思い、左の道を選ぶ

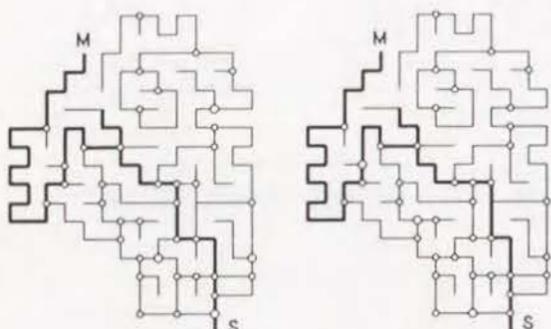
4.3.3 歩行経路の分類

この実験結果も被験者の行動をスタート地点Sから中間地点Mまでと中間地点Mから出口Gまでの部分に分け、観察された全被験者の歩行経路を類似した経路毎にグループ分けして図示する。

[1] スタート地点Sから中間地点Mまで

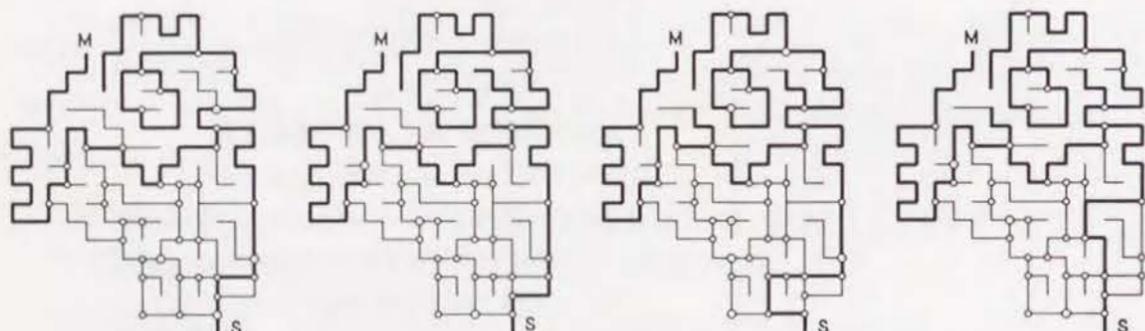
スタート地点Sから中間地点Mまでの歩行経路は以下の5通りに分類された。

GROUP 1 目的地に接近する方向に向かって進み、更に目的地から離れる方向にもそのまま進み、迂回して目的地に到着する。(接近→迂回型)

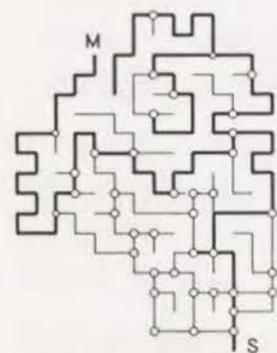


1-1 (1人) 1-2 (1人)

GROUP 2 前回の実験で成功した歩行経路の記憶が残っており、出発点から向かって右側の外周壁沿いに迂回しようとする傾向が顕著に現れている。(迂回型)

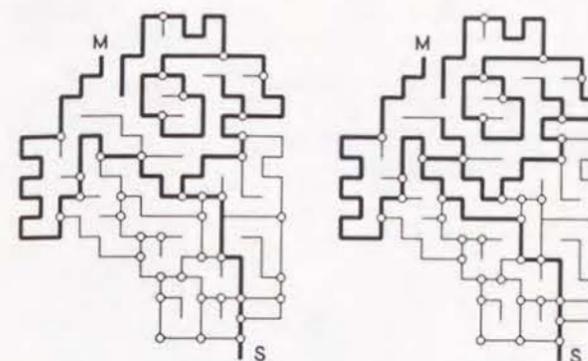


2-1 (1人) 2-2 (1人) 2-3 (1人) 2-4 (2人)



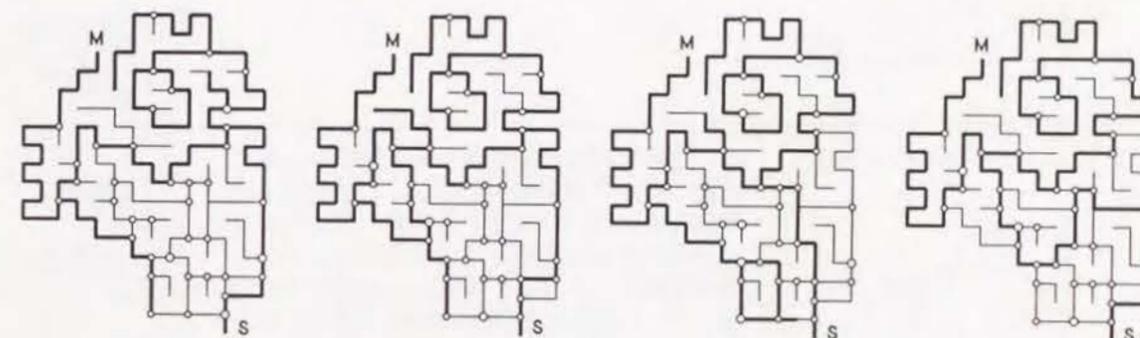
2-5 (1人)

GROUP 3 目的地方向に接近しようとするが、行き止まりであったり、目的地から離れそうになるので、第1回実験で成功した歩行経路と同様の方向に迂回しようとするがそちらも行き止まりであり、戻ってきて反対側に迂回する。(接近→右回り迂回→左回り迂回型)



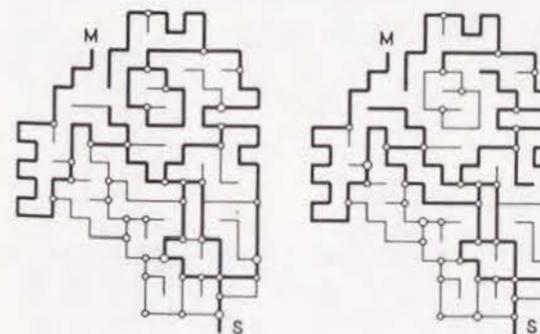
3-1 (2人) 3-2 (1人)

GROUP 4 途中までは GROUP 2 と同じ歩行経路であるが、終盤近くで目的地の左側に迂回するための分岐点で、更に目的地から離れる方向の経路を選択することができず、スタートの方へ戻ってしまう。(混乱型)



4-1 (1人) 4-2 (1人) 4-3 (1人) 4-4 (1人)

GROUP 5 GROUP 4 と類似しており、うまく迂回して目的地に到達する経路が見い出せず、混乱の度が更に激しい歩行経路である。



5-1 (1人) 5-2 (1人)

Figure 4-16 白峰迷路第2回実験において観察された歩行経路 (S→M)

この実験結果をまとめると以下のようなパターンに分類できる。この実験結果から白峰第1回実験と同様の迂回型、接近型、混乱型の3通りのパターンが観察され、更に迂回の際に目的地から離れる程度が大きい場合にはこれを迂回と認知することに困難を来す被験者も見られた。

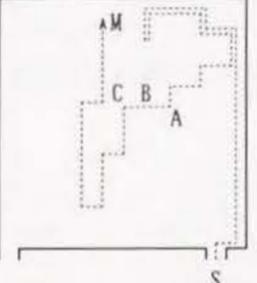
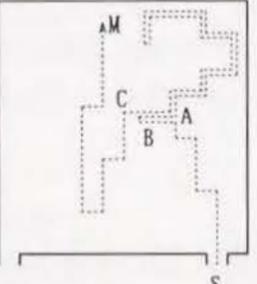
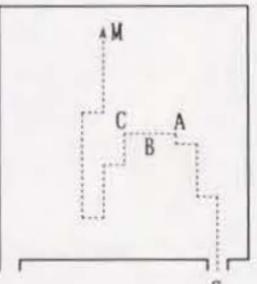
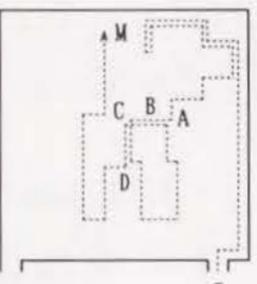
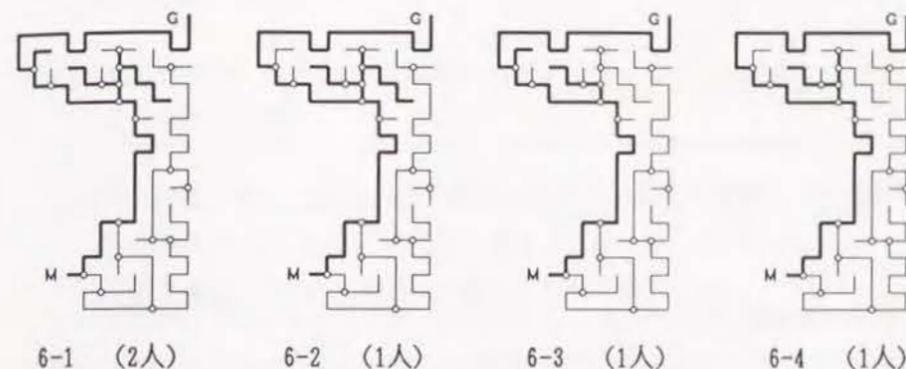
歩行パターン	特徴	被験者数
迂回型 	第1回実験の平面の記憶が残っており。最初から迂回して目的地に到達しようとするが、直前で行き止まりに会い、後戻りしてA、B、C地点を経由して目的地に到達する。	GROUP 2 6/17 人
接近型 1 	最初は素直に目的地方向へ進み、C地点まで来るが、そこからB、Aの方向に進む。第1回実験の接近型と同様の行動パターンであるが、この方向は行き止まりであるから又戻ってくる。	GROUP 3 3/17 人
接近型 2 	この型の被験者は最初から第1回実験と逆の行動、即ち外周壁沿いではなく、目的地に直接接近すれば行けるはずと考え、意図的にこの行動パターンを取った。A地点からB、C地点を通り、そのまま前進し、左回りの迂回をした。この型の被験者は2人であったが、第1回実験では2人とも迂回型の行動をしていた。	GROUP 1 2/17 人
混乱型 	途中までは迂回型又は接近型の行動をしていたが、目的地直前からA、B、C地点を経てD地点まで来るが、これ以上目的地から離れることに抵抗を感じ、混乱を来し、スタート地点近くまで戻る。	GROUP 4, 5 6/17 人

Figure 4-17 白峰迷路第2回実験結果の分析 (S→M)

[2] 中間地点Mから出口Gまで

中間地点Mから出口Gまでの被験者の歩行経路は以下のように3通りのグループに分類した。

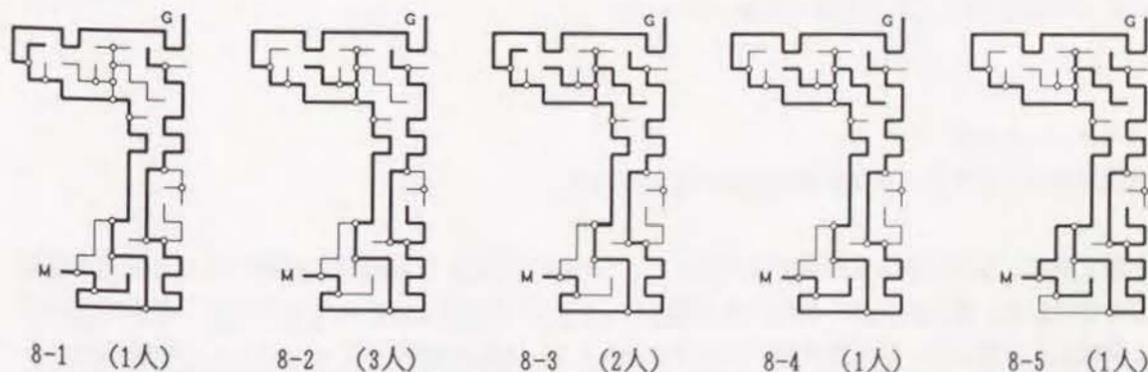
GROUP 6 目的地に接近する方向に進み、行き止まりに会い、左側へ大きく迂回して進む。(接近型)



GROUP 7 一旦迂回しようとして目的地から離れるが、接近する方向の経路を選択する。(迂回+接近型)



GROUP 8 この歩行経路は、第1回実験で成功した歩行経路を当てはめようとしたもので、外周壁沿いに右回りで迂回して進むが、行き止まりであるため、引き返す。(迂回型)





8-6 (3人)

Figure 4-18 白峰迷路第2回実験において観察された歩行経路 (M→S)

中間地点Mから出口Gまでの部分では経路が単純であり、以下の2通りに歩行パターンを分類できる。

歩行パターン	特徴	被験者数
迂回型	これも第1回実験の平面が頭にありE地点で目的地から離れる方向を選択するが、行止りで引返す。 また、F地点で迂回してGの方向へ行かず行止まりに会い、Eの方向へ戻る被験者も見られた。	GROUP 7, 8 7/17 人
接近型	分岐点Eで目的地方向の経路を選択する。F地点では、一旦Gから離れなければならないがここで行止まりに会わず最初から迂回方向を選んだ被験者はいなかった。	GROUP 6 10/17 人

Figure 4-19 白峰迷路第2回実験結果の分析 (M→G)

4.3.4 歩行パターンの分析

今回の実験結果から以下のような歩行の傾向が考えられる。

1. 今回の実験平面は、出発点から目的地方向に接近し、左回りで迂回して目的地に到着するように第1回実験の平面を変更した。第1回実験の平面は外周壁沿い、右回りで迂回しなければならなかったのが正反対である。被験者も全員が第1回実験と同一人物であったため、前回の歩行パターンのイメージを持ち、その通りに行動しようとする傾向がみられた。2人の被験者には、意図的に第1回実験と反対の行動をする傾向がみられた。

2. この実験平面のスタートSから中間地点Mまでの部分では、目的地に通じる分岐点Dに到達するために大きく目的地から離れる必要があり、D地点においても目的地から更に離れる方向に進まねばならない。ここで反対側に進み、混乱した被験者が5人見られた。又、中間地点Mから出口Gまでの部分においても分岐点Fにおいて、最初から大きく離れる方向に向かった被験者は1人だけであった。目的地から離れる距離が大きくなるほど、又、目的地方向と進行方向との角度が180°に近くなるほど迂回経路と認知され難くなると考えられる。

3. 今回の実験では、出発点から目的地へ右側から回っていく右回りの迂回と、左回りの迂回の2つの迂回パターンが観察された。

4. 迂回と同様に、接近に関しても、第1回実験結果と併せて考えると右回りと左回りがあると考えられる。第1回実験例でGROUP 3と4を接近型としたが、歩行経路のパターンは明らかに異なっており、GROUP 3は右回り接近、GROUP 4は左回り接近と考える事ができる。

5. 混乱型は、その歩行パターンは、接近型か迂回型の何れかであり、目的地に通ずる経路の発見が遅れただけであると考えられる。この様に考えると、歩行者の歩行パターンは、左回りの接近と迂回、及び右回りの接近と迂回の4通りの行動の組み合わせにより構成されると考えられる。

4.4 白峰迷路における第3回実験と分析 (入口Sから中間地点Mへ行く)

被験者数=17人

4.4.1 迷路平面の特性

これまでの実験から、歩行者の基本的な歩行パターンには、「左回り接近」、「左回り迂回」、「右回り接近」、「右回り迂回」の4通りがあることが仮定された。この実験はこの仮定を確認することを目的とし、出発直後に4方向への分岐点を設け、更に各方向へ進んだ後、目的地方向へ曲がる経路と、そのまま進み一旦目的地から離れる経路を配置し、各被験者が歩行経路を選択する傾向を調べる。

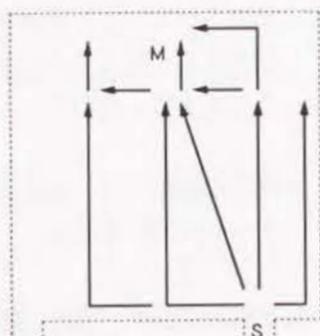


Figure 4-20 迷路平面の特性 (白峰第3回実験)

4.4.2 実験例

観察された被験者の歩行経路の一例とその経路選択理由を示し、更に第6節において、全被験者の経路選択理由をまとめ、分類した一覧表を示す。

[被験者の歩行例]

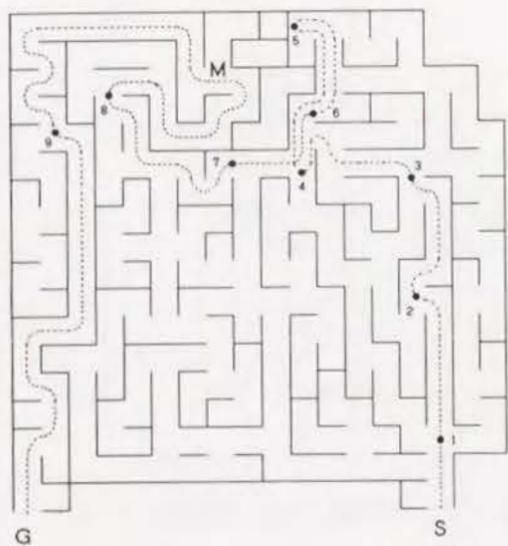


Figure 4-21 被験者の歩行経路の一例

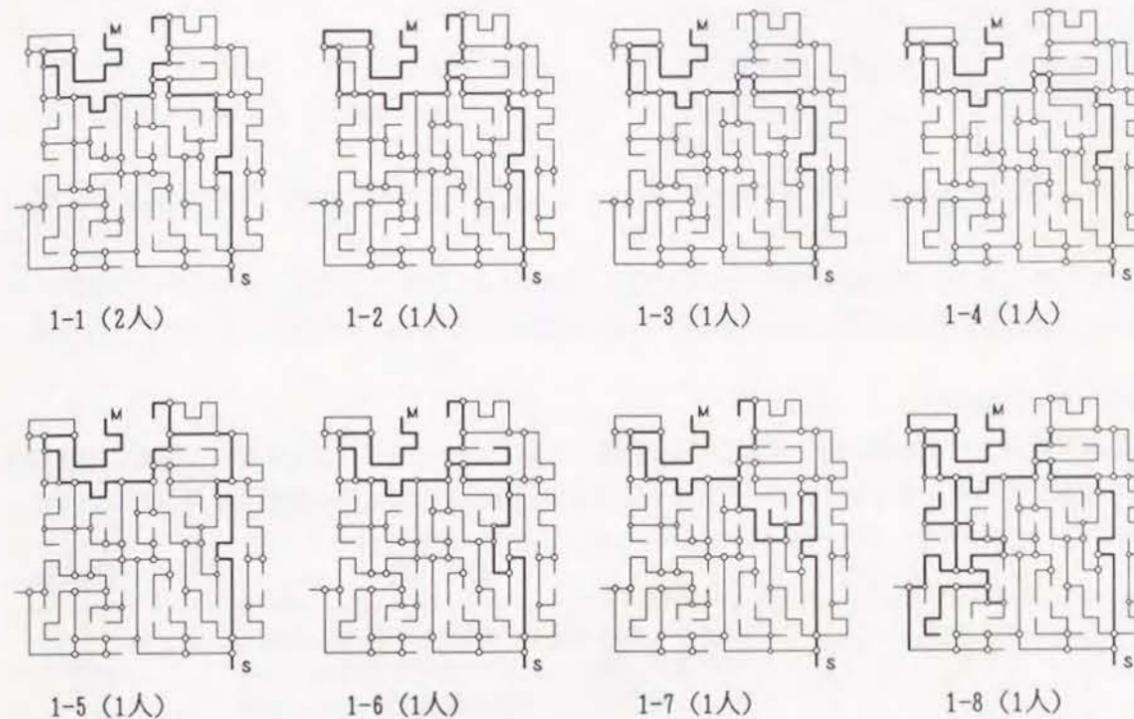
[実験後の質問に対する被験者の経路選択理由]

1. 前方の見通しが良いので直進する
2. 元に戻る方向には行きたくない
3. 目的地方向に進む
4. 目的地の右側から回って行ける気がして引き返す
5. 行き止まりに気付き引き返す
6. 目的地の反対側から行って見ようと思う
7. そのまま迂回しながら進む
8. 目的地方向に曲がる道が見えたので行けそうな気がする
9. 右に行く行き止まりに会いそうな気がして左の方に進む

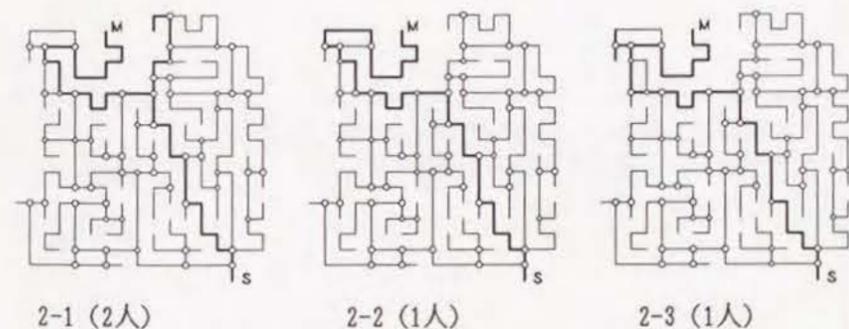
4.4.3 歩行経路の分類

この実験では以下の3通りの歩行経路が観察された。

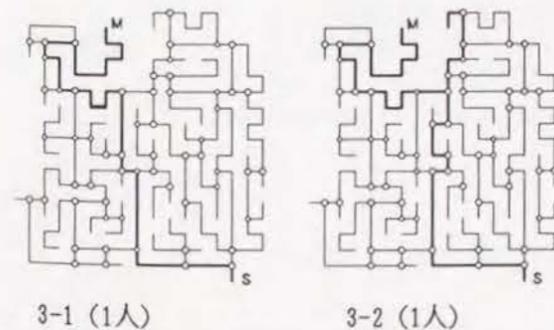
GROUP 1 スタート地点から前方に直進して目的地に接近する。(縦型)



GROUP 2 スタート直後の分岐点で斜め前方に進む経路を選択する。(斜型)



GROUP 3 スタート直後の分岐点で左に曲がり、中間地点Mの正面まで進み、目的地に接近する。(横型)



GROUP 4 スタート直後の分岐点では GROUP 3 と同様に左に曲がるが、その後の行動に差異が見られる。
(横型)

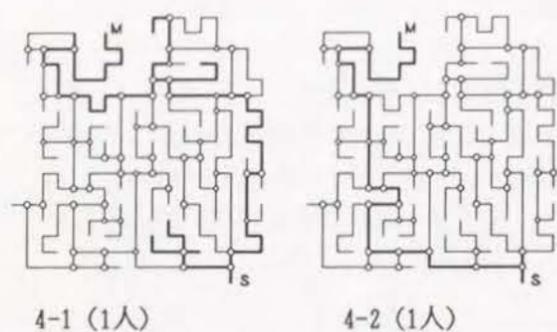


Figure 4-22 白峰迷路第3回実験において観察された歩行経路 (S→M)

4.4.4 歩行パターンの分析

この実験結果をスタート直後の進行方向により、分類してまとめると以下ようになる。結果として現れたパターンは大別すると3通りで、スタート直後に目的地から離れる方向に進む被験者は見られなかった。

歩行パターン	特徴	被験者数
縦型	スタート地点直後の分岐点Aで前方に向かって直進し、突き当たりで目的地方向に曲がった。この型の被験者数が最大であった。見通しの良い長い経路は選択され易い傾向があることを確認できた。	GROUP 1 9/17 人
斜型	分岐点Aにおいて目的地方向へジグザグに曲がりながら接近する経路を選択した。	GROUP 2 4/17 人
横型	分岐点Aにおいて左に曲がり目的地の正面まで来た所で右に曲がり、目的地方向に進んだ。GROUP 4の2例はかなり特殊であるが、A地点で左折しているため、このパターンに含めておく。	GROUP 3, 4 4/17 人

Figure 4-23 白峰迷路第3回歩行実験結果の分析 (S→M)

この実験結果では前回までの実験結果から推測された4通りの歩行パターン(右回り接近型、左回り接近型、右回り迂回型、左回り迂回型)があることを確認する目的で行った。その結果以下のように歩行パターンが確認された。

1. 縦型の大部分は直進傾向を持った右回り接近型と考えられる。1-5は右回り迂回型と考えられる。
2. 斜型は屈進傾向を持った右回り接近型で出発し、ジグザグに進む中に、右回りと左回りの接近行動が互いに入れ替わっているものと思われる。
3. 横型の大部分は左回り接近型と考えられる。4-2は左回り迂回型と考えられる。
4. 分岐点Aにおいて右に曲がり、最初から目的地から離れる方向に進む被験者は見られなかった。迂回の傾向を持っていても出発直後から、目的地から離れる方向に進むことは少ないと考えられる。

5 実験結果のまとめ

まず、これまで述べて来た実験結果の説明で用いた用語、及びこれからの分析に用いる用語を整理し、その定義をまとめておく。

歩行パターン	実験結果に現れた歩行者の歩行経路パターン（白峰第1回実験及び第2回実験では、接近型、迂回型、混乱型の3通り、白峰第3回実験では縦型、横型、斜型の3通りがある。）
歩行方針	予め歩行者が持っている歩行経路のイメージ（左回り接近、右回り接近、左回り迂回、右回り迂回の4種類）
歩行パターンに影響を与える要因	歩行者の個性の違いなどにより歩行パターンの違いを生じさせる要因（歩行方針、前進傾向又は後戻り傾向、直進傾向又は屈進傾向の3通り）
状況変化	歩行方針を変更させる状況の変化（行き止まりに遭った場合、既通過地点に戻った場合、そのまま進むと目的地から離れてしまう場合、明確な変化のない状況で歩行者がそのまま進むと目的地に到達できないのではないかと不安を持つ場合の4通り）
接近行動	目的地に接近する方向の経路を選択して歩行する行動（右回り及び左回り）
迂回行動	目的地から一旦離れてから近づく経路を選択して歩行する行動、目的地に接近する経路が見えていても意図的に離れる経路を選択する場合がある（右回り及び左回り）
直進傾向	目的地方向に見通しの良い長い直線路があると、そこで直進する傾向
屈進傾向	見通しの良い長い直線路があっても直進せず、すぐ曲がる傾向
経路選択	歩行方針に基づく適当な経路の選択（→モデル中では「コーナー選択」）
経路選択歩行	歩行方針に基づく適当な経路を選択して歩行すること（→モデル中では「コーナー選択歩行」）
前進傾向	行き止まり以外の場合、目的地から離れる方向であっても前進する傾向
後戻り傾向	行き止まり以外でも、目的地から離れる方向の経路しか見えない場合に後戻りする傾向
経路の記憶	通過した経路の記憶（→モデル中では通過したコーナーを記憶）
歩行経路	迷路平面中で歩行者が歩行した軌跡

5.1 被験者の経路選択理由

迷路歩行実験中及び実験後のビデオ再生によるヒアリングから得られた被験者の経路選択理由をまとめ、実験中に観察された被験者の行動に基づき、「接近」、「迂回」、「その他」に分類すると、Table 5-1 ~ Table 5-3 のようになる。表中の数字は各歩行実験においてその理由が現れた回数である。これらの経路選択理由の中で、類似したものをまとめ、表中では細い実線で区切り、グループに分けている。これらのグループに共通する内容を表中では太字で書き表してある。これらの経路選択理由のグループから歩行者が経路選択を行う場合の傾向を知ることができ、「5.2 実験結果から観察された歩行特性」をまとめるのに、前節の実験結果の分析と併せて役立っている。

歩行実験 行動 経路選択理由	接近					
	手取	白峰 1		白峰 2		白峰 3
	S→G	S→M	M→G	S→M	M→G	S→M
	直右左他 進折折	直右左他 進折折	直右左他 進折折	直右左他 進折折	直右左他 進折折	直右左他 進折折
接近行動						
目的地に近付くため	1 4 1	4 5 1 0 1 4	9	1 0 1 4 7 1 2	7	3 1 3 9 2 6
目的地に早く到達しそう	1 1 1		1		4 1	5 1 2 6
目的地の方向だから		2	4	3	5 2	1
目的地に近そうなので		4 6 5	1 5	1 3 1		
迷路中央を通り目的地へ				1		1
迂回行動						
迂回するつもり						
外壁沿いに行きたいので			6			4
迷路中央方向を避けたい						
行き止まりに遭いそうなので		1 4	1	1	2	5 4 4
ひっかきがありそうなので	1	1 1 2		1		1
素直に行けそうにない						
直進傾向						
行けるだけ真直ぐ進む		6		1		8
見通しがよいので	1		1		1	1
とりあえず直進	2	5		2	1	13
強い動機がない						
素直に進む	3					
とりあえず進む			1	3 1 4	2	
「～しかない」と思って		1 4	3	1 1		
未通過経路を優先						
未通過経路を選択	1	1 5 3		8 2	3	1
残った経路を選択					2	2
希望に反する経路を避ける						
出発点方向を避ける		1 3		3 3	1	4
複雑そうな経路を避ける				2 2	1	
不安を持っている						
行き止まりそうなので引返す						
道が違いそうなので引返す						
後戻り						
確認のため引返す						
行き止まりで引返す						
歩行経路イメージ						
イメージを想定して		1 2 3		1 1 5	5 1	1 2

Table 5-1 接近の場合の経路選択理由

迂回

歩行実験 経路選択理由	迂回					
	手取	白峰 1		白峰 2		白峰 3
	S→G	S→M	M→G	S→M	M→G	S→M
行動	直右左他 進折折	直右左他 進折折	直右左他 進折折	直右左他 進折折	直右左他 進折折	直右左他 進折折
接近行動						
目的地に近付くため		1				
目的地に早く到達しそう	1	1				1 1
目的地の方向だから						
目的地に近そうなので		4	1	8	2	
迷路中央を通り目的地へ					1	
迂回行動						
迂回するつもり	1 2	3 1		7 1	3 2	2 1 7
外壁沿いに行きたいので		2 8		1 5	6	
迷路中央方向を避けたい		1	1	1 1		
行止まりに遭いそうなので	1 2	1 1	2	1	5	3 2
ひっかきがありそうなので	5	2	1	2		1 3 3
素直に行けそうにない			6	1	1	
直進傾向						
行けるだけ真直ぐ進む						
見通しがよいので	1					1
とりあえず直進	1					
強い動機がない						
素直に進む						
とりあえず進む		3	1	1 1	3 1	2
「～しかない」と思って		1	1	1		
未通過経路を優先						
未通過経路を選択	2	2		1 3	2	3 2
残った経路を選択	1	1		2	9	10
希望に反する経路を避ける						
出発点方向を避ける						
複雑そうな経路を避ける		1 1				
不安を持っている						
行止まりそうなので引返す						2
道が違いそうなので引返す						
後戻り						
確認のため引返す						
行止まりで引返す						
歩行経路イメージ						
イメージを想定して				3 1 3	1	

Table 5-2 迂回の場合の経路選択理由

その他

歩行実験 経路選択理由	その他					
	手取	白峰 1		白峰 2		白峰 3
	S→G	S→M	M→G	S→M	M→G	S→M
行動	直右左他 進折折	直右左他 進折折	直右左他 進折折	直右左他 進折折	直右左他 進折折	直右左他 進折折
接近行動						
目的地に近付くため						
目的地に早く到達しそう						
目的地の方向だから						
目的地に近そうなので						
迷路中央を通り目的地へ						
迂回行動						
迂回するつもり						
外壁沿いに行きたいので						
迷路中央方向を避けたい						
行止まりに遭いそうなので						
ひっかきがありそうなので						
素直に行けそうにない						
直進傾向						
行けるだけ真直ぐ進む						
見通しがよいので						
とりあえず直進						
強い動機がない						
素直に進む						
とりあえず進む						
「～しかない」と思って						
未通過経路を優先						
未通過経路を選択						
残った経路を選択						
希望に反する経路を避ける						
出発点方向を避ける				6		
複雑そうな経路を避ける						
不安を持っている						
行止まりそうなので引返す	1	1	1		3	
道が違いそうなので引返す	1	2		1		1
後戻り						
確認のため引返す			2	2	2	
行止まりで引返す	1			3		11
歩行経路イメージ						
イメージを想定して					1	

Table 5-3 その他の場合の経路選択理由

5. 2 実験結果から観察された歩行特性

手取及び白峰の迷路で行った実験結果において、観察された行動とヒアリングにより得られた経路選択理由から、歩行者の探索歩行特性を項目別に列挙すると、以下の通りである。

[接近行動]

1. 目的地方向へ接近する方向の経路を選択する傾向がある。
2. 目的地方向に接近する方向に見通しの良い長い直線路があれば、直進する傾向が見られる。(直進傾向)

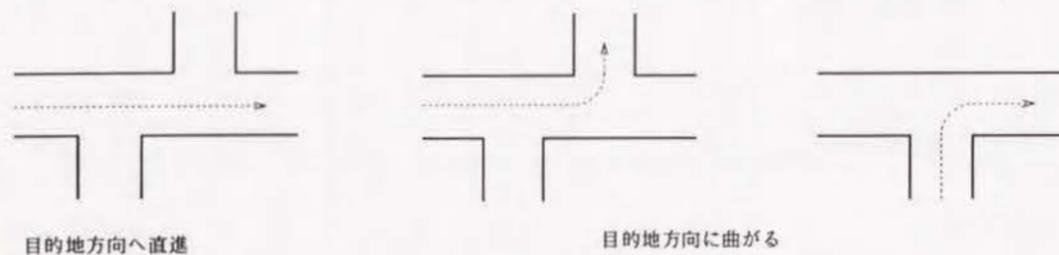


Figure 5-1 接近行動の傾向

[迂回行動]

3. 一旦目的地から離れ、迂回して目的地に到達しようとする傾向が見られる。
4. 目的地から離れる方向に進む場合は、長く直進することは少なく、目的地方向に曲る経路を発見すれば、すぐに曲る傾向がある。
5. 目的地から離れる距離が長いほど、又、目的地方向と進行方向との成す角度が 180° に近いほど、その経路は迂回路と認知され難くなる。

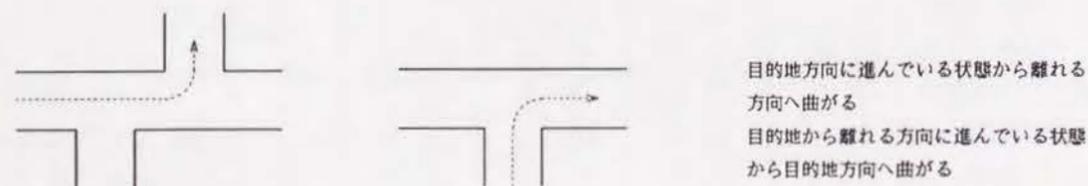


Figure 5-2 迂回行動の傾向

[後戻り]

6. 行き止まりの場合に引き返す。
7. 既通過地点に戻った場合に引き返す。
8. 目的地から離れる方向に進んでいる状態で、更に離れる経路しか見えない場合は引き返す。
9. 後戻りの状態で未通過経路に接続する分岐点まで戻った場合は、目的地に接近する方向か、又は迂回して目的地に接近できそうな経路を選択する傾向がある。

[前進]

10. 既通過地点に戻った場合、既通過の経路を前進する。
11. 目的地から離れる方向の経路しか見えない場合でも、そのまま前進する傾向も見られる。

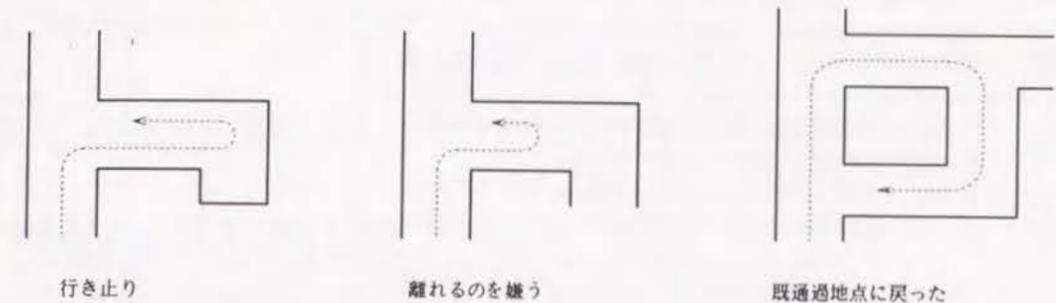


Figure 5-3 後戻り

[歩行パターン]

12. 実験結果から観察された歩行パターンを分類すると、白峰第1回及び第2回実験では接近型、迂回型、混乱型の3通り、白峰第3回実験では縦型、横型、斜型の3通りである。
13. ほとんどの歩行パターンは右回り接近、左回り接近、右回り迂回、左回り迂回の4種類の行動の組み合わせにより構成されている。
14. 予め全体の歩行経路を予想し、そのイメージパターンを持ち、それに従って歩行する。
15. 以前に歩行したときの経路のイメージパターンを持ち、それに従って歩行する。

[経路の記憶]

16. 通過した経路を記憶しており、なるべく同一地点を二度以上通らない傾向がある。

[歩行方針]

17. 歩行者は歩行経路のイメージを頭の中に描き、それに基づく歩行方針を持ち、歩行方針に従って経路を選択する。

[歩行方針の変更]

18. 歩行者は最初から最後まで単一の歩行方針で歩行するとは限らず、歩行途中で、歩行方針が変化している場合が見られる。
19. 行止りに遭った場合に歩行方針を変更する。
20. 既通過地点に戻った場合に歩行方針を変更する。
21. 目的地から離れる方向の経路しか見えない場合に歩行方針を変更する。
22. 明確な状況の変化は無いが、そのままうまく目的地に到達できそうにないという不安を持っている場合に歩行方針を変更する。

5.3 歩行パターンの分析

迷路歩行実験で観察された歩行特性から判断して、歩行者の歩行パターンに影響を与える要因としては Table 5-4 に示されるような項目が考えられる。これらの組み合わせにより、歩行者の歩行パターンが定まるものと考えられ、後に述べる探索歩行モデルのアルゴリズムもこれらの要因を考慮して作成する。

要因	要因の説明及び実験例
歩行方針	予め歩行者が持っている歩行経路のイメージで、左回り接近、左回り迂回、右回り接近、右回り迂回の4通りがある。
直進傾向又は屈進傾向	目的地方向に向かう見通しの良い長い直線路で直進する傾向が見られる(直進傾向)。逆に同じ場合に直進せず、すぐに曲がった被験者も見られた(屈進傾向)。例として、白峰迷路第3回実験の縦型は直進傾向で、他は屈進傾向と考えられる。
前進傾向又は後戻り傾向	目的地から離れる方向の経路しか見えない場合に、そのまま前進する被験者(前進傾向)と、後戻りする被験者(後戻り傾向)が見られた。例として白峰第1回実験において、GROUP 3,4 は後戻り傾向、GROUP 5 は前進傾向が見られる。
経路の記憶	通過した経路を記憶し、なるべく既通過経路を通らない。全被験者に共通に見られる。

Table 5-4 歩行パターンに影響を与える要因

実験において観察された接近型、迂回型、混乱型等の歩行パターンは全て Table 5-4 に述べられている3通りの要因の組み合わせの違いにより、それらの差異が現れたものと考えられる。歩行者の歩行パターンは実験結果で観察されたように左回り接近、左回り迂回、右回り接近、右回り迂回の4種類の行動の組み合わせと考えられるが、歩行者はこの何れかの行動(単独又は複数の組み合わせ)により目的地に到達する経路を、全体又は部分的に予想し、そのイメージを頭の中に描き、それに基づく歩行方針を持つと考えられる。従って歩行者は歩行方針として、左回り接近、左回り迂回、右回り接近、右回り迂回の何れかを持つと考えることができ、それによって、他の要因、直進又は屈進傾向、及び、前進又は後戻り傾向と組み合わせて歩行経路を選択して歩行すると考えられる。

ここで、歩行方針のうち、左回りと右回りをどのように具体的に区別するのかを考えると、Figure 5-4 において出発点Sと目的地Gを結ぶ直線を考え、迷路平面をこの直線により2つの領域に分割する。SからGに向かって、SGより右側にある領域を「右領域」、SGより左側にある領域を「左領域」とする。実験結果の歩行パターンの分類の際に、右領域を歩行している接近又は迂回行動を、「右回り接近」又は「右回り迂回」、左領域を歩行している接近又は迂回行動を、「左回り接近」又は「左回り迂回」と見なして歩行パターンを分類した。

次に右回り又は左回りの接近行動と迂回行動の区別については、接近行動では、原則的に目的地に接近する方向に進む経路を優先的に選択する。迂回行動では

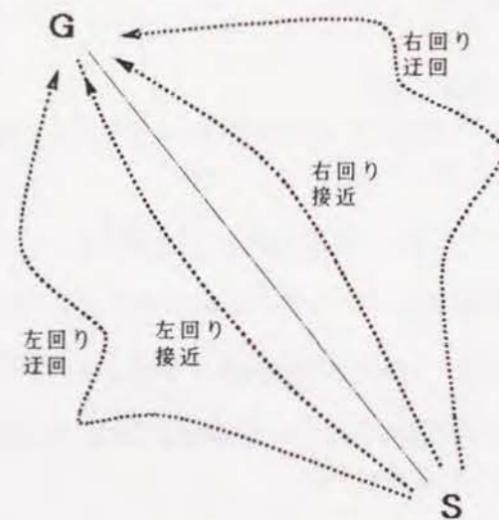


Figure 5-4 歩行方針

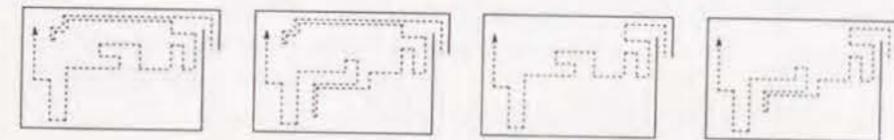
目的地に接近する方向に進む経路が見えているにもかかわらず、意図的に目的地から離れる方向に進む経路を選択する場合がある。この4種類の歩行方針をまとめると、Table 5-5 の通りである。

歩行方針		歩行方針に基づく歩行
接近	左回り	左領域を通り、目的地に接近する方向の経路を選択して歩行する。
	右回り	右領域を通り、目的地に接近する方向の経路を選択して歩行する。
迂回	左回り	左領域を通り、迂回しながら目的地に到達しようとする。意図的に目的地から離れる場合がある。
	右回り	右領域を通り、迂回しながら目的地に到達しようとする。意図的に目的地から離れる場合がある。

Table 5-5 歩行方針とそれに基づく歩行

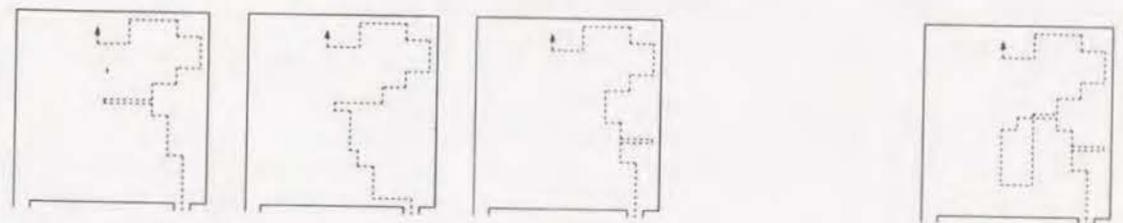
手取及び白峰迷路の各実験において観察された歩行パターンを、Table 5-4 の要因と Table 5-5 の歩行方針に基づき、再分類すると以下ようになる。前進・後戻り傾向及び直進・屈進傾向に関しては明確に判定できるものだけについて記入したが、記入していない歩行パターンにおいても、部分的にこれらの傾向が見られるものもある。

手取迷路実験



歩行経路 6,7 右回り接近 +左回り接近 (2/8人)	歩行経路 5 右回り接近 +左回り迂回 (1/8人)	歩行経路 1,4 左回り迂回 +左回り接近 (2/8人)	歩行経路 2,3 左回り迂回 (3/8人)
---------------------------------------	-------------------------------------	---------------------------------------	-----------------------------

白峰迷路第1回実験(入口Sから中間地点Mまで)



GROUP 3 右回り接近 後戻り傾向 (5/17人)	GROUP 4 左回り接近 後戻り傾向 (2/17人)	GROUP 1,2 右回り迂回 (7/17人)	GROUP 5 混乱型 前進傾向 (3/17人)
--------------------------------------	--------------------------------------	-------------------------------	-----------------------------------

白峰迷路第1回実験 (中間地点Mから出口Gまで)

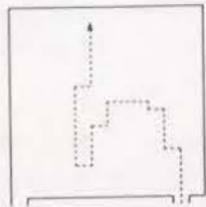


GROUP 7
左回り接近
(5/18人)

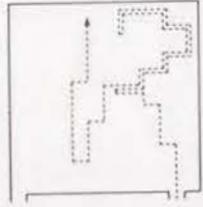


GROUP 6
右回り迂回
(13/18人)

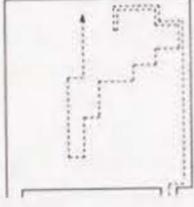
白峰迷路第2回実験 (入口Sから中間地点Mまで)



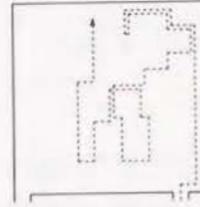
GROUP 1
右回り接近
+ 左回り迂回
前進傾向
(2/17人)



GROUP 3
右回り接近
+ 右回り迂回
後戻り傾向
(2/17人)

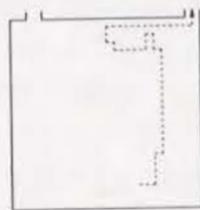


GROUP 2
右回り迂回
+ 左回り迂回
(7/17人)

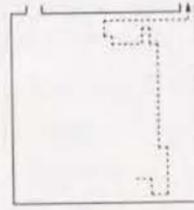


GROUP 4,5
混乱型
(6/17人)

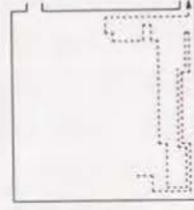
白峰迷路第2回実験 (中間地点Mから出口Gまで)



GROUP 6
左回り接近
(10/17人)

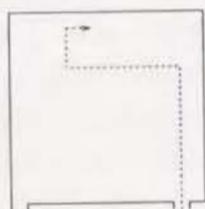


GROUP 7
右回り迂回+左回り接近
(1/17人)

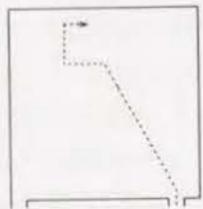


GROUP 8
右回り迂回
(6/17人)

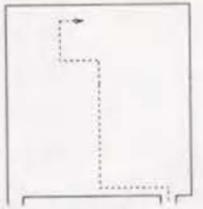
白峰迷路第3回実験 (入口Sから中間地点Mまで)



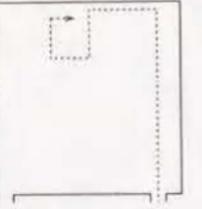
GROUP 1
右回り接近
直進傾向
(8/17人)



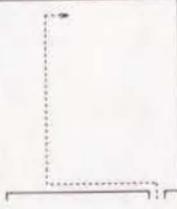
GROUP 2
右回り接近
屈進傾向
(4/17人)



GROUP 3
左回り接近
(3/17人)



1-5
右回り迂回
直進傾向
(1/17人)



4-2
左回り迂回
(1/17人)

Figure 5-5 実験結果の歩行パターンの分類

5.4 歩行方針変更の分析

歩行者は迷路内の各局面で、ある程度、歩行経路を予想し、そのイメージを持って歩行していると考えられる。そのイメージに基づいて歩行方針（左回り接近、右回り接近、左回り迂回、右回り迂回の何れか）を持ち、それに基づいて経路を選択すると考えられる。

歩行者は必ずしも首尾一貫した歩行方針で歩行するとは限らず、状況の変化に応じて歩行方針を変更していることが実験結果の観察から推測される。歩行方針を変更させる状況変化は Table 5-6 にまとめた4通りが実験結果から観察された。

更にこれらの状況変化に対して取られた経路選択方法は、実験結果から以下の2通りが観察された。

前進 —— 新しい歩行方針に基づき、未通過の経路を選択して歩行する。

後戻り —— 既通過の経路を通して、未通過の経路に繋る分岐点まで後戻りし、新しい歩行方針に基づいて未通過の経路を選択する。

この2通りの経路選択方法は、Table 5-4 で挙げた「前進傾向」と「後戻り傾向」に関連しており、Table 5-6 の「目的地から離れる」と言う状況変化に対し、「前進」と言う経路選択が起る場合を「前進傾向」、「後戻り」と言う経路選択が起る場合を「後戻り傾向」と呼ぶことにする。

4通りの状況の変化に対して、実験結果から観察された経路選択を挙げると Table 5-6 の通りである。

状況変化	経路選択
行き止まり	後戻り 未通過の経路に繋る分岐点まで戻り、新しい経路を探す。
既通過地点に戻った	前進 未通過の経路に繋る分岐点まで進み、新しい経路を探す。 後戻り 未通過の経路に繋る分岐点まで戻り、新しい経路を探す。
目的地から離れる	前進 新しい歩行方針に基づいて経路を選択する。 後戻り 後戻りし、別の目的地に接近する経路を探す。
明確な状況変化無し	前進 そのまま進むと目的地に到達できないのではないかという不安を持ち、接近から迂回又は迂回から接近と歩行方針を変更し、それに基づいて歩行する。 また、接近行動において、白峰第3回実験の GROUP 2 の様に、歩行者が明確に意識しないで右回りと左回りが入れ替わる場合もある。

Table 5-6 状況変化に対する経路選択

ここで「既通過地点に戻った」場合の行動について考えると、前進と後戻りの何れの場合も既通過の経路を通り、未通過の経路を探すと言う点で一致しており、モデル化した結果においても同一のアルゴリズムで処理が可能であった。従ってこの場合は前進と後戻りは同じ扱いをすることができ、「行き止まり」の場合の後戻りも同様である。故に、以後は「行き止まり」の場合と「既通過地点に戻った」場合をまとめて一つの扱いをすることにする。

状況変化と歩行方針の変化との関係を推測し、実験結果から分類された各歩行経路毎にまとめると Table 5-7 の通りである。表中の「→」の後の記号〔止〕と〔離〕及び〔疑〕は、歩行方針を変更させた状況の変化を表し、それぞれ以下の通りである。

- 〔止〕 歩行者が行き止まりに遭った場合及び、既通過地点に戻った場合
- 〔離〕 そのまま進むと目的地から離れる場合
- 〔疑〕 明確な状況の変化はないが、そのままうまく目的地に到達できないのではないかと不安を持っている場合

各歩行経路グループの中には、細部において異なる歩行経路の変化を示している被験者も見られたが、ここではモデル化に必要な原理を見出すため、できるだけグループ内に共通に見られるものを列挙した。

歩行実験	歩行経路グループ	歩行方針の変化
白峰第1回	GROUP 1 2 3 4 5 6 7	1 右回り接近 →〔疑〕 右回り迂回 2 右回り接近 →〔疑〕 右回り迂回 3 右回り接近 →〔疑〕 左回り接近 →〔離〕 右回り迂回 4 左回り接近 →〔離〕 右回り迂回 5 右回り迂回 →〔止〕 左回り接近 →〔離〕 左回り迂回 →〔止〕 右回り迂回 6 右回り迂回 7 左回り接近
白峰第2回	GROUP 1 2 3 4 5 6 7 8	1 右回り接近 →〔疑〕 左回り接近 →〔離〕 左回り迂回 2 右回り迂回 →〔止〕 左回り接近 →〔離〕 左回り迂回 3 右回り接近 →〔疑〕 左回り接近 →〔離〕 右回り迂回 →〔止〕 左回り迂回 4 右回り迂回 →〔止〕 左回り接近 →〔離〕 左回り迂回 →〔離〕 左回り接近 →〔離〕 左回り迂回 5 右回り迂回 →〔止〕 左回り接近 → 混乱した行動 →〔疑〕 左回り迂回 6 左回り接近 7 右回り迂回 →〔疑〕 右回り接近 →〔疑〕 左回り接近 8 右回り迂回 →〔止〕 左回り接近
白峰第3回	GROUP 1 1-5 GROUP 2 3-1 3-2 4-1 4-2	1 右回り接近 →〔止〕 左回り迂回 1-5 右回り接近 →〔疑〕 右回り迂回 →〔止〕 左回り迂回 GROUP 2 右回り接近 →〔止〕 左回り迂回 3-1 左回り接近 →〔離〕 左回り迂回 3-2 左回り接近 →〔疑〕 右回り接近 →〔止〕 左回り迂回 4-1 左回り接近 →〔止〕 右回り迂回 →〔疑〕 右回り接近 →〔止〕 左回り迂回 4-2 左回り迂回

Table 5-7 歩行方針の変化

Table 5-7 において白峰迷路第2回実験の GROUP 5 に「混乱した行動」と記入されている箇所があるが、これは被験者が目的地に通ずる経路をなかなか発見できなくて、同じ箇所を何度も歩行したり、出発点近くまで戻ったりした部分で、正確に歩行方針を分析することが困難であった。

この歩行方針の変化について、逆に歩行方針を変えた状況変化と事例を調べ、一覧表にすると、次の Table 5-8 の通りである。

歩行者の歩行方針の変化は状況の変化によって起こり、又歩行者の個性の違いによってその歩行方針の変化の仕方が異なり、それにより同一の迷路平面において数通りの異なった歩行パターンが現れたと考えられる。

歩行方針の変化	状況の変化	実験例 (歩行経路グループ番号)			
		手取	白峰1	白峰2	白峰3
左回り接近→右回り接近	疑				3-2
左回り接近→左回り迂回	離		5	1, 4, 5	3-1
左回り接近→右回り迂回	止 離		3, 4	3	4-1
左回り迂回→左回り接近	疑 止 離	1 4, 7		4	
右回り接近→左回り接近	疑 止	6	3	1, 3	
右回り接近→左回り迂回	止	5, 7			1, 2, 4-1
右回り接近→右回り迂回	疑		1, 2		1-5
右回り迂回→左回り接近	止		5	2, 4, 5, 8	
右回り迂回→右回り接近	疑			7	4-1
右回り迂回→左回り迂回	止				1-5

Table 5-8 歩行方針の変化と、その起きた状況及び実験例

以上の結果から Table 5-6 で挙げた状況変化に対する歩行方針の変更についてまとめる。歩行方針の変更の仕方は、グループによって偏りがあり、「明確な状況変化無し」の場合以外は「前進・後戻り傾向」と関連していると考えられる。

「明確な状況変化無し」の場合の歩行方針の変更

2通りの場合が実験で観察された。1つは、白峰第3回実験の GROUP 2 の様に、目的地に向かってジグザグに進む接近行動をとっているときに、歩行者が明確に意識しない中に右回りと左回りの接近行動が入れ替わるものである。Figure 5-4 で仮想した出発点Sと目的地Gを結ぶ直線SGを超えたときに右回りと左回りが入れ替わったものと判断して実験の観察結果を分析した。

もう1つは、行き止まりなどの明確な状況変化が無い場合に歩行者が不安を感じて、接近と迂回の間で、歩行方針を変更する場合が実験で観察された。(白峰第1回実験 GROUP 1) このように歩行者が不安を感じ

じる場合に関しては、どのような状況変化により不安を感じ、歩行方針を変更するかという明確な傾向を実験結果から発見することができなかった。

歩行者を何か状態（歩行方針）を持つシステムと仮定し、「入力（状況変化）」に対して「状態（歩行方針）」が変化し、同時に「出力（経路選択）」を発生すると考えると、ここで述べた2通りの状況変化に対応する出力、状態遷移は Table 5-9 に示す通りである。表中、「実験例」欄の（）内の数字は第4節の Figure 4-6 ~ Figure 4-22 で分類された歩行経路グループ番号である。白峰 I、II等は白峰迷路第1回実験、第2回実験を表している。

状態	入力		不安を感じる	
	経路選択/次状態	実験例	経路選択/次状態	実験例
右回り接近	前進/左回り接近	白峰 I (2) 白峰 II (1) 白峰 III (2)	前進/右回り迂回	白峰 I (1) 白峰 III (1)
左回り接近	前進/右回り接近	白峰 III (2)	前進/左回り迂回	白峰 III (3)
右回り迂回			前進/右回り接近	白峰 II (7)
左回り迂回			前進/左回り接近	手取(1,4)

Table 5-9 明確な状況変化が無い場合の状態・出力遷移表

「前進傾向」における歩行方針の変化

実験例では、白峰迷路第1回実験の GROUP 5 は、途中まで「右回り接近→左回り接近」と進み、「そのまま進むと目的地から離れてしまう」と言う状況変化に対し、そのまま前進し、一旦目的地から離れて、左回りで迂回しようとしていると推測でき、「前進傾向」と見なせる。「前進傾向」の場合の出力・状態遷移は Table 5-10 に示す通りである。表中の「実験例無し」の部分の出力・状態変化については、他の部分の出力・状態変化から推測して記入した。

状態	入力		そのまま進むと目的地から離れる	
	経路選択/次状態	実験例	経路選択/次状態	実験例
右回り接近	後戻り/右回り迂回	白峰 I (1)	前進/右回り迂回	実験例無し
左回り接近	後戻り/左回り迂回	白峰 II (1)	前進/左回り迂回	白峰 II (1) 白峰 III (3)
右回り迂回	後戻り/左回り接近 又は迂回	白峰 II (2,3,8)	前進/方針変更無し	実験例無し
左回り迂回	後戻り/右回り接近 又は迂回	白峰 I (5)	前進/方針変更無し	白峰 I (5) 白峰 II (2,3)

Table 5-10 前進傾向における状態・出力遷移表

「後戻り傾向」における歩行方針の変化

実験例では、白峰迷路第1回実験において、GROUP 3 及び 4 の被験者は途中で、「そのまま進むと目的地から離れてしまう」と言う状況変化に対し、後戻りし、右回りで迂回して目的地に到達しているため、「後戻り傾向」と見なすことができる。「後戻り傾向」の場合の出力・状態遷移は Table 5-11 に示す通りである。

状態	入力		そのまま進むと目的地から離れる	
	経路選択/次状態	実験例	経路選択/次状態	実験例
右回り接近	後戻り/左回り迂回	白峰 III (1,2)	前進/左回り迂回	実験例無し
左回り接近	後戻り/右回り迂回	白峰 I (3)	前進/右回り迂回	白峰 I (3,4)
右回り迂回	後戻り/左回り接近 又は迂回	白峰 II (4)	前進/方針変更無し	実験例無し
左回り迂回	後戻り/右回り接近 又は迂回	実験例無し	前進/方針変更無し	白峰 II (4)

Table 5-11 後戻り傾向における状態・出力遷移表

これまで歩行方針の変化に関して述べてきたが、Table 5-4 では歩行パターンに影響を与える要因として、ここで問題にした「歩行方針」以外に「経路の記憶」、「前進傾向又は後戻り傾向」、そして「直進傾向又は屈進傾向」を挙げているが、これらの傾向が歩行途中で明白に変化しているような状況とその原因は発見できなかった。

「直進傾向」又は「屈進傾向」

白峰迷路第3回実験で観察された「縦型」の歩行者グループは明らかに直進傾向で、「斜型」は屈進傾向と見なせる。「横型」は左回り接近又は迂回で出発し、そのまま直進すると右回りになるのを嫌って、最初に左に曲がり、以後は直進したものと推測できる。歩行者は歩行方針に基づいて経路を選択するが、歩行者が進もうとする方向に曲がるコーナーが複数見える場合に、どれを選ぶかを決定するのが、この「直進傾向」又は「屈進傾向」であると考えられる。従って、この要因が歩行方針の変更に影響を与えることは無いものと仮定する。

以上、歩行パターンに影響を与える要因を4種類考えたが、これらの中、「経路の記憶」は全被験者に共通に見られ、被験者毎の歩行パターンの相違には関与しないと考えられる。「歩行方針」だけが状況変化に対応して変化し、他の2つの要因「前進傾向又は後戻り傾向」及び「直進傾向又は屈進傾向」は、各歩行者固有の特性と考え、変化しないものと仮定する。モデル中では、「歩行方針」だけが状況に応じて変化し、他の2つの要因は一定としてアルゴリズムを作成することとする。

Table 5-9、Table 5-10、Table 5-11 を総合して、入力（状況変化）に対する出力（経路選択）と状態（歩行方針）遷移を、歩行者の個人的特性（前進又は後戻り傾向）を考慮して、図式的に表すと、Figure 5-6 に示す通りである。

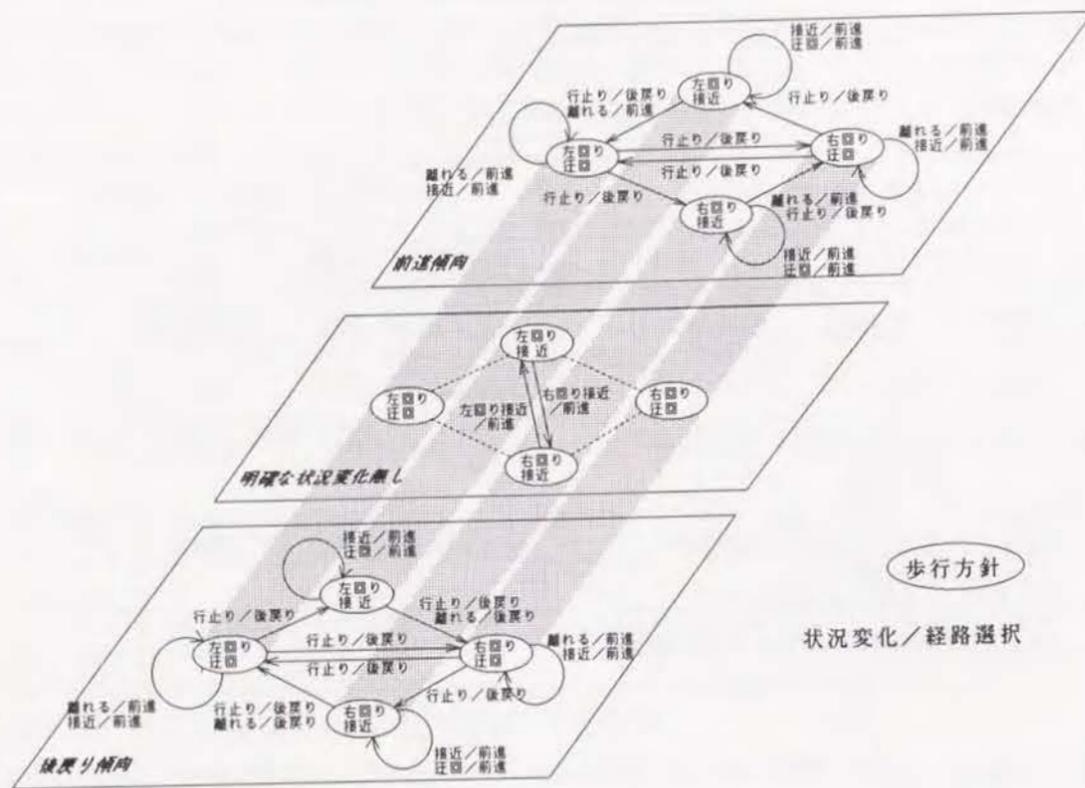


Figure 5-6 歩行方針の変更図式

Table 5-9、Table 5-10、Table 5-11、及び Figure 5-6 により、実験で観察された歩行者の探索歩行特性の大部分を表現することができたと考えられる。各被験者の行動の細部においてはこれらの表に一致しない部分も見られるが、1人1人の歩行者の行動を完璧に表現できるモデルの作成は困難であり、ここでは、これまで分類した歩行パターンの明確な特徴をできるだけ忠実に表現するように努めた。

6 探索歩行アルゴリズム

この節では、これまで述べて来た探索歩行に関連する理論や実験結果をもとに、探索歩行のためのアルゴリズムを作成し、モデル化を行う。まずアルゴリズムの説明で用いる用語の定義を、最初に挙げておく。

コーナーの方向性	そのコーナーの方向に進んだ場合、目的地に対してどの方向に進むことになるかを示す (曲がる前に進む方向と曲がった後に進む方向の2段階の組み合わせで示す)
コーナー選択	歩行方針に基づく適当なコーナーの選択(経路選択に対応)
コーナー選択歩行	歩行方針に基づく適当なコーナーを選択して歩行すること (経路選択歩行に対応)
歩行経路	歩行者が通過したコーナーの列
左領域	迷路の出発地点と目的地を結ぶ直線により迷路平面を分割し、出発地点から目的地に向かかって左側の領域を左領域と呼ぶ
右領域	迷路の出発地点と目的地を結ぶ直線により迷路平面を分割し、出発地点から目的地に向かかって右側の領域を右領域と呼ぶ

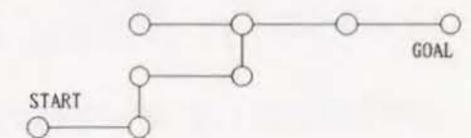
この研究では探索歩行を、歩行者から見えるコーナーの中から、何れかのコーナーを選択してそれに向かって進み、そのコーナーを曲がったら次のコーナーを探すと言う過程の連続としてモデル化しており、歩行者がどのような状況でどのようなコーナーを選択するかがこの研究の中心課題である。現実の歩行では、空間を全体的に把握して行動している訳であるが、この研究ではコンピューターシミュレーションを前提としているため、コーナーによって空間を把握することに現実を近似しなければならない。このことが以後の経路探索のアルゴリズムに大きな影響を与えていることはまぬがれない。以下の各項で基本的なコーナーの認知からコーナーの選択方針を含むモデルの構成まで説明する。

6.1 探索歩行のための基本的アルゴリズム

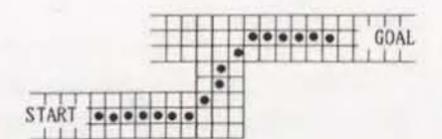
6.1.1 歩行経路

歩行モデルを用いてシミュレーションを行うとき、モデルの歩行者の位置から歩行の目的地が見えている場合は単純に目的地に向かって進めば良いが、目的地が見えない場合は経路を辿りながら目的地に到達する。このような経路を辿るモデルは従来のシミュレーションモデルにおいても幾つか見られるので、序における分類に即して説明する。

ネットワーク型 空間を節点と枝のネットワークに抽象化し、この節点から節点へ移動することにより経路を辿る。¹⁻⁴



メッシュ型 平面を細かいメッシュに分割し、メッシュからメッシュへ移動し経路を辿る。⁵

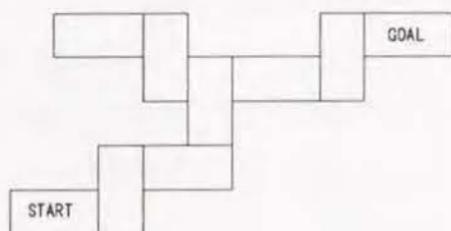


座標型

座標型の歩行モデルで経路を辿るものは既存の研究では磁場モデルに見られるだけで、以下の2通りの方法が考案されている。

矩形の歩行領域による方法

歩行空間を矩形の歩行領域に分割し、その繋りにより、平面領域全体を表す。この矩形の歩行領域を順に辿っていくことにより START から GOAL までの経路上を歩行する。⁶



コーナーによる方法

歩行空間において、壁や手摺などの平面上の境界線が、平面内部に対して凸となっている出隅部分をコーナーと認識する。図中では、○印の部分である。START から順にコーナーを辿って行くことにより GOAL までの経路上を歩行する。⁷

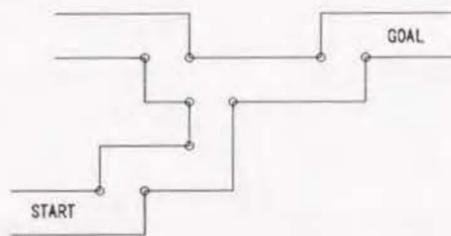


Table 6-1 経路上を歩行するモデル

本研究ではコーナーによる方法を用いている。領域による分割の方法では、平面形に制約が生じることがあり、コーナーの方が扱える空間の形に、より自由度がある。

6.1.2 コーナーの視認

現実の人間は視覚、聴覚、触覚、嗅覚、味覚の5感を持っているが、本システムは、このうち視覚のみを単純化したモデルを備えている。その仕組みを右図の例で説明する。

平面上の2点A, Bを考え、点Aから点Bが見えるかどうかの判断を行うものと仮定する。平面内の壁、手摺などの障害物が、線分CDで表されるとすると、3つのベクトル \vec{AB} 、 \vec{CD} 、 \vec{AC} により次の方程式を考える。

$$x \cdot \vec{AB} - y \cdot \vec{CD} - \vec{AC} = 0 \quad (x, y: \text{未知のスカラール量})$$

この方程式の未知数 x, y の解が次の範囲にあるとき点Aから点Bは障害物CDにより障られていて、見えないと認識される。

$$0 < x < 1, \text{ 且つ } 0 < y < 1$$

本システムではこの視覚モデルにより各歩行者からシミュレーション平面上の壁や柱等の障害物、他の歩行者、コーナー、目的地、サインなどの要素が見えるかどうかを単位時間毎に計算し、障害物や他の歩行者と

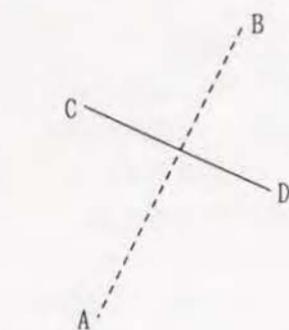


Figure 6-2 A B間の視認

の衝突を避けながらコーナーを辿り、目的地に到達する。歩行者がコーナーを辿る方法を右図のような通路が交差する地点の例で示す。この例では、歩行者から4つのコーナーA, B, C, Dが見える。コーナーAとDに関して、歩行者から見て、図の影の部分は見えない。この様に歩行者からコーナーの一方は見えるが反対側は見えないという位置関係のコーナーを探し、それらの中から最適なコーナーを選択し、最終的な目的地に到達するまでの中間の仮の目的地とする。この図の例ではA又はDが選択され、B, Cは選択の対象外である。この様な仮目的地を順に選んで進み、最終目的地までの経路を歩行する。

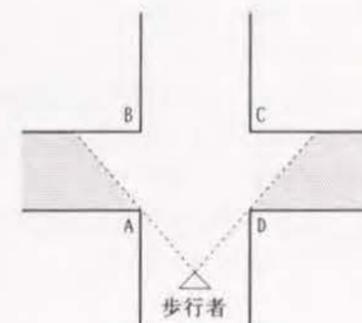


Figure 6-3 歩行者からコーナーの視認

6.1.3 コーナーの方向性

実験結果から、歩行者の歩行方針として、左回り接近、右回り接近、左回り迂回、右回り迂回の4通りを考えたが、これらの歩行方針に基づく経路選択を、モデル中では歩行者から見えるコーナーの選択により実現を試みる。現実の歩行では「どの経路を進むか」と言う問題に、モデル中では「どのコーナーを選択するか」と言う問題が対応することになり、経路選択問題をコーナー選択問題として扱う。

実験結果において歩行者の経路選択理由を見ると、「先の方で行き止まりに遭いそうだ」とか「外壁沿いに行ったほうが行けそう」と言った理由が見られ、歩行者は経路を選択する際にその進む方向を、単純に歩行者の位置から目的地に接近するか離れるかと言う方向だけを考えて判断している訳ではなく、その経路を進んだ先でも目的地に接近しそうであるか、逆に離れたり行き止まりではないかと言うような予想を立てて経路を選択している。この様な経路選択をコーナー選択によりモデル化するため、歩行者から任意のコーナーを見てその方向性を考える場合、「そのコーナーを曲がる前にコーナーに接近中の時点で進む方向」と、「コーナーを曲がった後に進むと予想される方向」の2段階で考えることにする。

A コーナーを曲る前に進む方向

Figure 6-4 において歩行者PはコーナーMを仮目的地として歩行して来て、次に仮目的地とするコーナーを探すため、任意のコーナー N_1 に注目している状況を仮定する。現実にはコーナーを曲る前に進む方向としては歩行者Pとコーナー N_1 を結ぶ直線の方が最も近いと考えられるが、これを用いると、歩行者の微妙な位置の差異により、本来は、「目的地から少し離れてから接近する」と言う様な場合にそれを認識できず、「目的地に接近する」と言う様に認識してしまう場合が生じ、その逆も起こり得る。それを無くすため、コーナー N_1 を曲る前に進む方向は、歩行者Pから見えている壁面 LN_1 の方向であると仮定する。そして、Figure 6-4 でコーナー N_1 から目的地の方向を N_1G とし、 LN_1 と N_1G の成す角を α とすると、

$$\cos \alpha > 0$$

のとき、歩行者Pから見て、コーナー N_1 を曲る前に進む方向は目的地に接近する方向と判断され、逆の場合は目的地から離れる方向と判断される。Figure 6-4 では薄い網目の部分が離れる方向で、網目のない部分が接近方向となる。

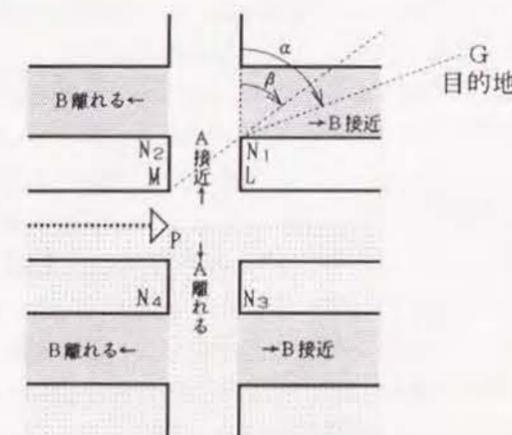


Figure 6-4 コーナーの方向性

B コーナーを曲った後に進むと予想される方向

コーナーを曲った後の方向は現実には歩行者から見えず、歩行者から見える範囲内の状況から予想できるだけである。これも Figure 6-4 のコーナーN₁の例で考えると、LN₁の延長線を引き、目的地Gが直線LN₁を境界とし、歩行者Pと異なる領域（濃い網目領域）にある場合は、コーナーN₁を曲った後に目的地Gに接近すると予想できるものとする。Figure 6-4 ではベクトルN₁PとN₁GがLN₁を隔てて、異なる方向であれば接近と予想できるものとする。しかし、これも歩行者の微妙な位置の差異により判断が異なる場合が生じる恐れがあるので、歩行者Pの位置をコーナーMに置き換える。そして、MN₁とN₁Gの成す角をβとし、数式を用いて表すと、

$$\sin\alpha \cdot \sin\beta > 0$$

となるとき、コーナーN₁を曲った後に目的地に接近すると予想され、逆の場合は離れると予想されることとする。これにより、任意のコーナーに関して単純に目的地に接近するか離れるかというだけでなく、「一旦離れてから接近する」、又は「接近してから離れる」という迂回に関しても判断が可能となる。以上から歩行者から見える任意のコーナーはその2段階の方向に関し、Table 6-1 に示される4種類に分類できる。この中で図中の例とは Figure 6-4 中のコーナーN₁~N₄がそれぞれに対応しているということである。

A 曲がる前に進む方向	B 曲がった後に進むと予想される方向	コーナーの特性	図中の例
目的地に接近	目的地に接近	接近	N ₁
目的地に接近	目的地から離れる	迂回	N ₂
目的地から離れる	目的地に接近	迂回	N ₃
目的地から離れる	目的地から離れる	離れる	N ₄

Table 6-1 コーナーの2段階の進行方向

これまでの実験結果から、右図のようにスタート地点Sから目的地Gに到着しようとする経路は基本的に左回り接近及び迂回、右回り接近及び迂回の4つの型があることが判明した。右図中で歩行者の位置をP、歩行者から見えるコーナーをそれぞれa、b、c、dとするとbとdのコーナーはそれぞれ「一旦離れてから接近」或いは「接近してから離れる」と言う迂回方向のコーナーの条件を満たしているが、その方向は正反対である。歩行者が右回りで迂回しようとする場合はbのコーナーを優先して選択し、左回りで迂回しようとする場合はdのコーナーを優先して選択するものと考えられる。歩行者が迷路平面中の任意の地点Pに位置している場合、歩行者から見えるコーナーは、このa、b、c、dの四種類が考えられる。これら四種類のコーナーを定義するとTable 6-2 のようになる。

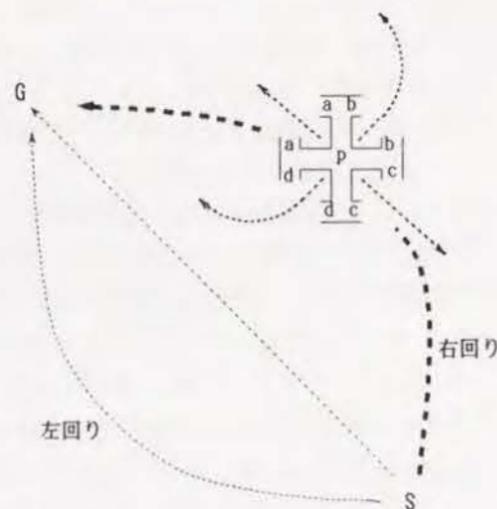


Figure 6-5 コーナーの方向性

コーナーの方向性	A + B	数式による表現
a 接近	接近+接近	$\cos\alpha > 0, \sin\alpha \cdot \sin\beta > 0$
b 右回り迂回	接近+離れる	$\cos\alpha > 0, \sin\alpha \cdot \sin\beta < 0, \sin\alpha > 0$
	離れる+接近	$\cos\alpha < 0, \sin\alpha \cdot \sin\beta > 0, \sin\alpha > 0$
c 離れる	離れる+離れる	$\cos\alpha < 0, \sin\alpha \cdot \sin\beta < 0$
d 左回り迂回	接近+離れる	$\cos\alpha > 0, \sin\alpha \cdot \sin\beta < 0, \sin\alpha < 0$
	離れる+接近	$\cos\alpha < 0, \sin\alpha \cdot \sin\beta > 0, \sin\alpha < 0$

Table 6-2 コーナーの方向性

迂回しようとした方向から目的地に到達する経路を発見できない場合は後戻りしたり、混乱した行動が発生することがある。歩行者Pが Figure 6-5 で太い点線のようにSからGまで右回りで迂回しながら進もうとしているとき、bのコーナーは確かに迂回していく方向と考えられるが、dは逆にこれまで進んできた方向、或いはスタートSに戻るような方向のコーナーである。従ってbとdのコーナーは、図式的には同じ「離れる+接近」又は「接近+離れる」と表されるが、その方向は、全く逆であり、区別して扱う必要があると考えられ、従ってbは「右回り迂回」、dは「左回り迂回」と言う呼び方をすることにする。コーナーの方向性がこの様に定義されると、このモデル中では以下のようにコーナーの選択の優先順位を定めることにより歩行方針に基づいたコーナー選択を実現することができる。

歩行方針		コーナーの方向性の選択の優先順位
接近	左回り	a 接近、 b 左回り迂回、 d 右回り迂回、 c 離れる
	右回り	a 接近、 d 右回り迂回、 b 左回り迂回、 c 離れる
迂回	左回り	b 左回り迂回、 a 接近、 c 離れる、 d 右回り迂回
	右回り	d 右回り迂回、 a 接近、 c 離れる、 b 左回り迂回

Table 6-3 歩行方針に対応するコーナーの方向性の選択の優先順位

6.2 歩行パターンに影響を与える実験結果から見た要因と探索歩行のための基本的アルゴリズム

実験結果の分析において、歩行者の探索歩行行動に影響を与える要因として「歩行方針」「直進傾向又は屈進傾向」「前進傾向又は後戻り傾向」を見出したが (Table 5-2)、これらとは別に、歩行者が経路を選択する際に考慮しているはずである要因として、「経路の記憶」もあると考えられ、これにより一度通った地点は止むを得ない場合以外は通らないようになると考えられる。従って探索歩行行動をモデル化することは、これらの4通りの要因に関し、現実の歩行者の行動をモデル化し、それらを組み合わせて用いるということになる。各々の要因に関し、現実の歩行者の行動とそれをモデル化した場合のアルゴリズムをTable 6-4 にまとめて述べる。

要因	実験結果	アルゴリズム
経路の記憶	通過した経路を記憶し、一度通過した地点は止むを得ない場合以外通らない。	通過したコーナーを記憶し、歩行者から見えるコーナーのうち、記憶にないコーナーを優先的に選択する。
歩行方針	予め歩行者が持っている歩行経路のイメージで、左回り接近、右回り接近、左回り迂回、右回り迂回の4種類があり、この何れかの歩行方針に従い経路を選択する。	左記と同様に4種類の歩行経路イメージに基づく歩行方針を持ち、それに従い最適なコーナーを選択する。
前進傾向又は後戻り傾向	目的地から離れる方向の経路しか見えない場合に、そのまま前進する(前進傾向)場合と、後戻りする(後戻り傾向)場合がある。	目的地から離れる方向のコーナー(「c 離れる」Table 6-2 参照)しか見えない場合に、前進傾向はそのまま進み、後戻り傾向は後戻りする。
直進傾向又は屈進傾向	目的地方向に向かい、見通しの良い長い直線路を直進する傾向(直進傾向)のある被験者とそうでない傾向(屈進傾向)の被験者が見られる。	目的地に接近する方向に見えるコーナーの中、歩行者から最長距離にあるコーナーを選択する(直進傾向)。歩行者から見て最も目的地の方向に近い向きに見えるコーナーを選択する(屈進傾向)。

Table 6-4 歩行パターンに影響を与える要因とそのアルゴリズム

6.3 コーナー選択アルゴリズム

前節で歩行パターンに影響を与える4つの要因として「経路の記憶」、「歩行方針」、「前進又は後戻り傾向」、「直進又は屈進傾向」を実験結果から仮定したが、これらの4つの要因をモデル化し、それらのアルゴリズムを組み合わせることにより、最適なコーナーを選択して歩行する探索歩行モデルの全体を構築する。以下にそのアルゴリズム全体の概要を説明する。

1. 歩行者の視界にあるコーナーの情報を得る。
2. 得られたコーナー情報から状況変化を判断する。以下の4通りの状況変化がある (Table 6-5)。

現実の状況変化	アルゴリズム
行き止まり、又は既通過地点に戻った	未通過のコーナーが見えない
そのまま進むと目的地から離れる	未通過のコーナーが見え、それらの方向性は全て「c 離れる」(Table 6-2 参照)
状況変化はないが、不安である	未通過のコーナーが見え、それらの方向性は「a 接近」「b 右回り迂回」「d 左回り迂回」の何れかである
目的地が見える	目的地が見える

Table 6-5 状況変化とそれを判断するアルゴリズム

3. コーナー情報から判断された状況変化に対し、Table 5-6 に基づき、歩行方針を変更する。
4. 歩行方針に基づき、行動(前進又は後戻り)を決定する。

5. 歩行方針に基づき、Table 6-3 による優先順位の高いコーナーから順に探す。
6. 発見された未通過コーナーの中、最優先の方向性を持ったコーナー群から、歩行者の「直進傾向」又は「屈進傾向」に基づき、最適なコーナーを選択する。最優先の方向性を持ったコーナーが1つだけの場合はそれを最適コーナーとして選択する。

以上の1~6の手続きをフローチャートにより表すと Figure 6-6 のようになる。但し、この手続きが実行される前に、最初にシミュレーション開始時に歩行者の初期データとして以下のデータが読み込まれる。

- 歩行者の特性 1 「前進傾向」又は「後戻り傾向」
 歩行者の特性 2 「直進傾向」又は「屈進傾向」
 出発時の歩行方針 「左回り接近」、「左回り迂回」、「右回り接近」、「右回り迂回」の何れか



Figure 6-6 探索歩行アルゴリズムフローチャート

この図式に基づいて、それぞれ□で囲んだ部分のアルゴリズムを以下のように作成し、これらの要因の組み合わせにより歩行中の各局面において歩行者から見える最適なコーナーを選択する。

[探索歩行] アルゴリズム

Figure 6-6 のフローチャートに基づき、モデル全体を制御する。

- if シミュレーションをスタート
 then アルゴリズム「コーナー情報」を実行
 アルゴリズム「状況変化の判断」を実行
 アルゴリズム「歩行方針変更」を実行
 アルゴリズム「行動の決定」を実行
 アルゴリズム「コーナー方向性選択」を実行
 アルゴリズム「最適コーナー選択」を実行

```

if 目的地に到達
  then シミュレーション終了
else
  2行目に戻る
end

```

6.3.1 [コーナー情報] アルゴリズム

歩行者から見えるコーナー全てに関する情報を得る。コーナーに関する情報は、「そのコーナーが未通過かどうか」と「コーナーの方向性」の2通りである。

```

if 未通過のコーナーが見える
  then 未通過コーナーの方向性を調べる (Table 6-2 による)
end

```

6.3.2 [状況変化の判断] アルゴリズム

歩行者から見えるコーナーに関する情報から、状況変化を判断する。状況変化は、「目的地を発見」、「行き止まり、又は既通過地点に戻った」、「そのまま進むと目的地から離れる」、「状況変化無し」の4通りである。(Table 6-5 参照)

```

if 目的地が見える
  then 目的地を発見したと判断
elseif 未通過コーナーが見えない
  then 行き止まり、又は既通過地点に戻ったと判断
elseif 未通過コーナーが見える
  if 「c 離れる」の方向性を持ったコーナーしか見えない
    then そのまま進むと目的地から離れると判断
  else
    状況変化無しと判断
end

```

6.3.3 [歩行方針変更] アルゴリズム

状況変化に対し、歩行方針を変更する。(Table 5-9、Figure 5-6 による)

```

if 目的地が見える
  then 歩行方針を変更しない
elseif 行き止まり、又は既通過地点に戻った
  then アルゴリズム「歩行方針変更1」を実行
elseif そのまま進むと目的地から離れる
  then アルゴリズム「歩行方針変更1」を実行
elseif 状況変化無し
  then アルゴリズム「歩行方針変更2」を実行
end

```

[1] [歩行方針変更1] アルゴリズム

状況変化が「行き止まり、又は既通過地点に戻った場合」、又は「そのまま進むと目的地から離れる」場合に歩行方針を変更する。

```

if 歩行者が「前進傾向」
  if 歩行者の現在の歩行方針が「左回り接近」
    then 歩行方針を「左回り迂回」に変更
  elseif 歩行者の現在の歩行方針が「右回り接近」
    then 歩行方針を「右回り迂回」に変更
  elseif 歩行者の現在の歩行方針が「左回り迂回」
    then 歩行方針を「右回り接近」に変更
  elseif 歩行者の現在の歩行方針が「右回り迂回」
    then 歩行方針を「左回り接近」に変更
  endif
elseif 歩行者が「後戻り傾向」
  if 歩行者の現在の歩行方針が「左回り接近」
    then 歩行方針を「右回り迂回」に変更
  elseif 歩行者の現在の歩行方針が「右回り接近」
    then 歩行方針を「左回り迂回」に変更
  elseif 歩行者の現在の歩行方針が「左回り迂回」
    then 歩行方針を「左回り接近」に変更
  elseif 歩行者の現在の歩行方針が「右回り迂回」
    then 歩行方針を「右回り接近」に変更
end

```

[2] [歩行方針変更2] アルゴリズム

状況変化が無い場合に、歩行方針を「左回り接近」から「右回り接近」へ、或いは逆に変更する。

```

if 歩行方針が「左回り接近」
  if 歩行方針に対し最優先の方向性を持つコーナーが「右領域」にしかない
    then 歩行方針を「右回り接近」に変更
  elseif 歩行方針が「右回り接近」
    if 歩行方針に対し最優先の方向性を持つコーナーが「左領域」にしかない
      then 歩行方針を「左回り接近」に変更
    end
end

```

6.3.4 [行動の決定] アルゴリズム

状況変化に対し、「前進」、又は「後戻り」の何れの行動を取るか決定する。(Table 5-9、Figure 5-6 による)

```

if 目的地が見える
  then 目的地に向かう
elseif 行き止まり、又は既通過地点に戻った
  then アルゴリズム「後戻り」を実行
elseif そのまま進むと目的地から離れる

```

```

if 歩行者が「前進傾向」
  then 前進する
elseif 歩行者が「後戻り傾向」
  then アルゴリズム「後戻り」を実行
end

```

6.3.5 [コーナー方向性選択] アルゴリズム

前進する場合に歩行者から見えるコーナーの中から、どの方向性を持ったコーナーを選択するか決定する。(Table 6-3 参照)

```

if 歩行方針が「左回り接近」
  then アルゴリズム「左回り接近」を実行
elseif 歩行方針が「右回り接近」
  then アルゴリズム「右回り接近」を実行
elseif 歩行方針が「左回り迂回」
  then アルゴリズム「左回り迂回」を実行
elseif 歩行方針が「右回り迂回」
  then アルゴリズム「右回り迂回」を実行
end

```

[1] [左回り接近] アルゴリズム

歩行者から見える未通過のコーナーに関して、3通りの方向性(「a 接近」、「d 左回り迂回」、「b 右回り迂回」)の何れを持っているかを調べ、どのコーナー方向性を選択するかを決定する。コーナー方向性の選択は、「a 接近」、「d 左回り迂回」、「b 右回り迂回」の順で優先する。「c 離れる」の方向性を持つコーナーしか見えない場合は「行動の決定」アルゴリズムで後戻りすることになるのでこのアルゴリズムが実行されることは起こり得ない。(Table 6-2、Table 6-3 参照)

```

if 「a 接近」のコーナーが見える
  if これらのコーナーの幾つかは迷路の「左領域」内
    then アルゴリズム「最適コーナー選択」を実行
elseif 「d 左回り迂回」のコーナーが見える
  if これらのコーナーの幾つかは迷路の「左領域」内
    then アルゴリズム「最適コーナー選択」を実行
elseif 「b 右回り迂回」のコーナーが見える
  if これらのコーナーの幾つかは迷路の「左領域」内
    then アルゴリズム「最適コーナー選択」を実行
end

```

[2] [右回り接近] アルゴリズム

歩行者から見える未通過のコーナーに関して、3通りの方向性(「a 接近」、「b 右回り迂回」、「d 左回り迂回」)の何れかを持っているかを調べ、どのコーナー方向性を選択するかを決定する。コーナー方向性の選択は、「a 接近」、「b 右回り迂回」、「d 左回り迂回」の順で優先する。(Table 6-2、Table 6-3 参照)

```

if 「a 接近」のコーナーが見える
  if これらのコーナーの幾つかは迷路の「右領域」内
    then アルゴリズム「最適コーナー選択」を実行
elseif 「b 右回り迂回」のコーナーが見える
  if これらのコーナーの幾つかは迷路の「右領域」内
    then アルゴリズム「最適コーナー選択」を実行
elseif 「d 左回り迂回」のコーナーが見える
  if これらのコーナーの幾つかは迷路の「右領域」内
    then アルゴリズム「最適コーナー選択」を実行
end

```

[3] [左回り迂回] アルゴリズム

左回りで迂回しながら目的地に到達しようとする方針に基き、最適なコーナー方向性を選択しようとするアルゴリズムである。コーナー方向性の優先順位は「d 左回り迂回」、「a 接近」、「c 離れる」の順である。(Table 6-2、Table 6-3 参照)

```

if 「d 左回り迂回」のコーナーが見える
  then アルゴリズム「最適コーナー選択」を実行
elseif 「a 接近」のコーナーが見える
  then アルゴリズム「最適コーナー選択」を実行
elseif 「c 離れる」のコーナーが見える
  then アルゴリズム「最適コーナー選択」を実行
end

```

[4] [右回り迂回] アルゴリズム

右回りで迂回しながら目的地に到達しようとする方針に基き、最適なコーナー方向性を選択しようとするアルゴリズムである。コーナー方向性の優先順位は「b 右回り迂回」、「a 接近」、「c 離れる」の順である。(Table 6-2、Table 6-3 参照)

```

if 「b 右回り迂回」のコーナーが見える
  then アルゴリズム「最適コーナー選択」を実行
elseif 「a 接近」のコーナーが見える
  then アルゴリズム「最適コーナー選択」を実行
elseif 「c 離れる」のコーナーが見える
  then アルゴリズム「最適コーナー選択」を実行
end

```

6.3.6 [最適コーナー選択] アルゴリズム

歩行者から見えるコーナーの方向性を調べた結果、同一の方向性を持つコーナーが複数見える場合に、歩行者の傾向(「直進傾向」、「屈進傾向」)により、最適なコーナーを選択する。(Figure 6-7)

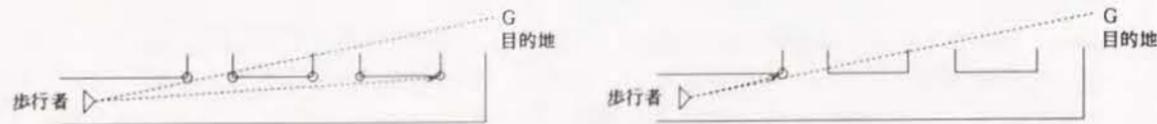


Figure 6-7 直進傾向

目的地方向を選択

```

if 同一条件のコーナーが複数見える
  if 歩行者が「直進傾向」
    if それらのコーナーは目的地に接近する方向に見える
      then 歩行者からの距離が最長のコーナーを選択
    elseif 歩行者が「屈進傾向」
      then 歩行者からコーナーへの方向と、歩行者から目的地への方向の、
            成す角が最小のコーナーを選択
    elseif 同じ条件のコーナーは見当たらない
      then 唯一のコーナーを選択
  end

```

6.3.7 [後戻り] アルゴリズム

歩行者が記憶している既通過のコーナーの列を1つずつ辿って、未通過の「接近」又は「迂回」の方向性を持っているコーナーと接続しているものを探す。こうして発見された既通過のコーナーの中、歩行者の現在位置から最短距離のコーナーを探し、それを一時的な目的地とし、既通過のコーナーを辿ってそこまで引き返す。Figure 6-8 の例では、○ が既通過コーナーを表し、歩行者が→で表された経路をコーナー 7 まで進んで行き止まりに陥ったとすると、コーナー 2 まで引き返す。

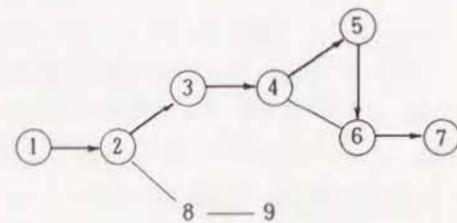


Figure 6-8 歩行経路の後戻り

```

let 記憶されている既通過のコーナーの列を1つ戻る
if その既通過コーナーが未通過コーナーと接続関係がある
  if 接続している未通過コーナーの方向性が「接近」又は「迂回」
    then 歩行者の位置からその既通過コーナーへの距離を計算し、それまでに計算した他の
          既通過コーナーと比較
    if この既通過コーナーへの距離が最短
      then この既通過コーナーを後戻りのための一時的な目的地として記憶
    if まだ既通過コーナーの列が残っている
      then letに戻る
    else if 後戻りのための目的地とする既通過コーナーが発見された
      then その経路への最短経路を進む
    else if 後戻りのための目的地とする既通過コーナーが発見されなかった
      then 既通過コーナーの中で未通過コーナーに接続している最短距離のコーナー
            を後戻りのための目的地とし、そのコーナーへの最短距離を進む

```

end

引用文献

- 岡田光正, 柏原士郎, 吉村英祐, 横田隆司, 東利彦: 視覚情報に基づく建物火災時の三次元ネットワーク、避難シミュレーションシステムの開発, 日本建築学会・情報システム技術委員会第12回情報システム利用技術シンポジウム, 1989年, pp. 421-426
- 渡辺仁史, 渡辺俊, 中村良三: 地方都市における自動車観光交通計画の評価に関する研究 シミュレーションによる建設企画のための交通渋滞予測, 日本建築学会計画系論文報告集第403号, 1989年9月, pp. 97-103
- 渡辺仁史, 位寄和久, 池原義郎, 中島高史, 中村良三, 宇土正浩: 人間-空間系の研究 建築計画のためのネットワーク・オートマタモデル, 日本建築学会論文報告集第298号, 1980年12月, pp. 89-97
- 渡辺仁史: 建築計画におけるオートマタモデル 人間の心理状態をとり入れた行動予測モデルの提案, 日本建築学会論文報告集第234号, 1975年8月, pp. 125-129
- 中祐一郎: 交錯流動のシミュレーションモデル, 鉄道駅における旅客の交錯流動に関する研究(2), 日本建築学会論文報告集第267号, 1978年5月, pp. 103-111
- 岡崎基幸: 建築空間における歩行のためのシミュレーションモデルの研究 その3 停滞や火災を考慮して最短経路を選ぶ歩行, 日本建築学会論文報告集第285号, 1979年11月, pp. 137-144
- 岡崎基幸, 松下聡: 建築空間における歩行のためのシミュレーションモデルの研究 その5 探索歩行及び誘導標識による歩行, 日本建築学会論文報告集第302号, 1981年4月, pp. 87-93

7 迷路歩行シミュレーション結果と実験例

前節で述べたアルゴリズムに基づいて作成した探索歩行モデルを用いて、歩行実験を行った巨大迷路の平面上でシミュレーションを実行した結果を以下に示す。図の左側にシミュレーション結果、右側にそれに類似した実験で観察された歩行経路を掲げている。シミュレーション実行時には、歩行者の初期条件として、「前進傾向又は後戻り傾向」、「直進傾向又は屈進傾向」、「歩行方針」の3通りの条件を与え、歩行者は与えられた条件に基づき、状況変化により歩行方針を変更し、適当なコーナーを選択しながら目的地に向かって歩行する。出発点Sから目的地Gまで各区分毎の歩行方針を歩行経路欄に示している。

7.1 手取フィッシュランド迷路

手取フィッシュランド迷路平面上でシミュレーションを実行した結果、Figure 7-1 に示される2通りの歩行経路を実現できた。例1は実験で観察された歩行経路2と3、例2は実験結果の歩行経路5に類似している。歩行経路1、4、6、7に関しては、状況変化無しに歩行方針が変化している部分があったり、歩行方針が変化していない部分もあり、再現できなかった。

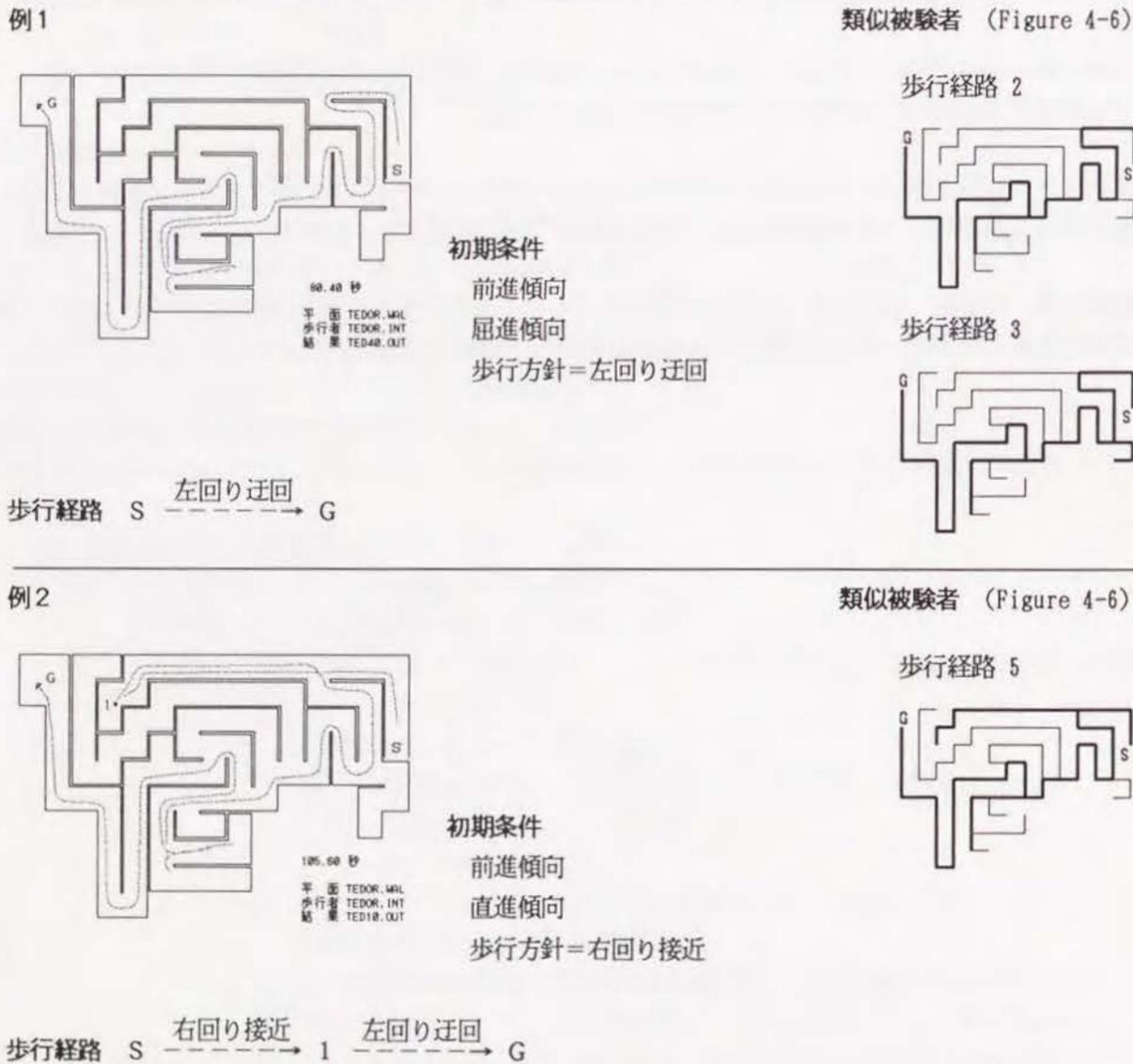
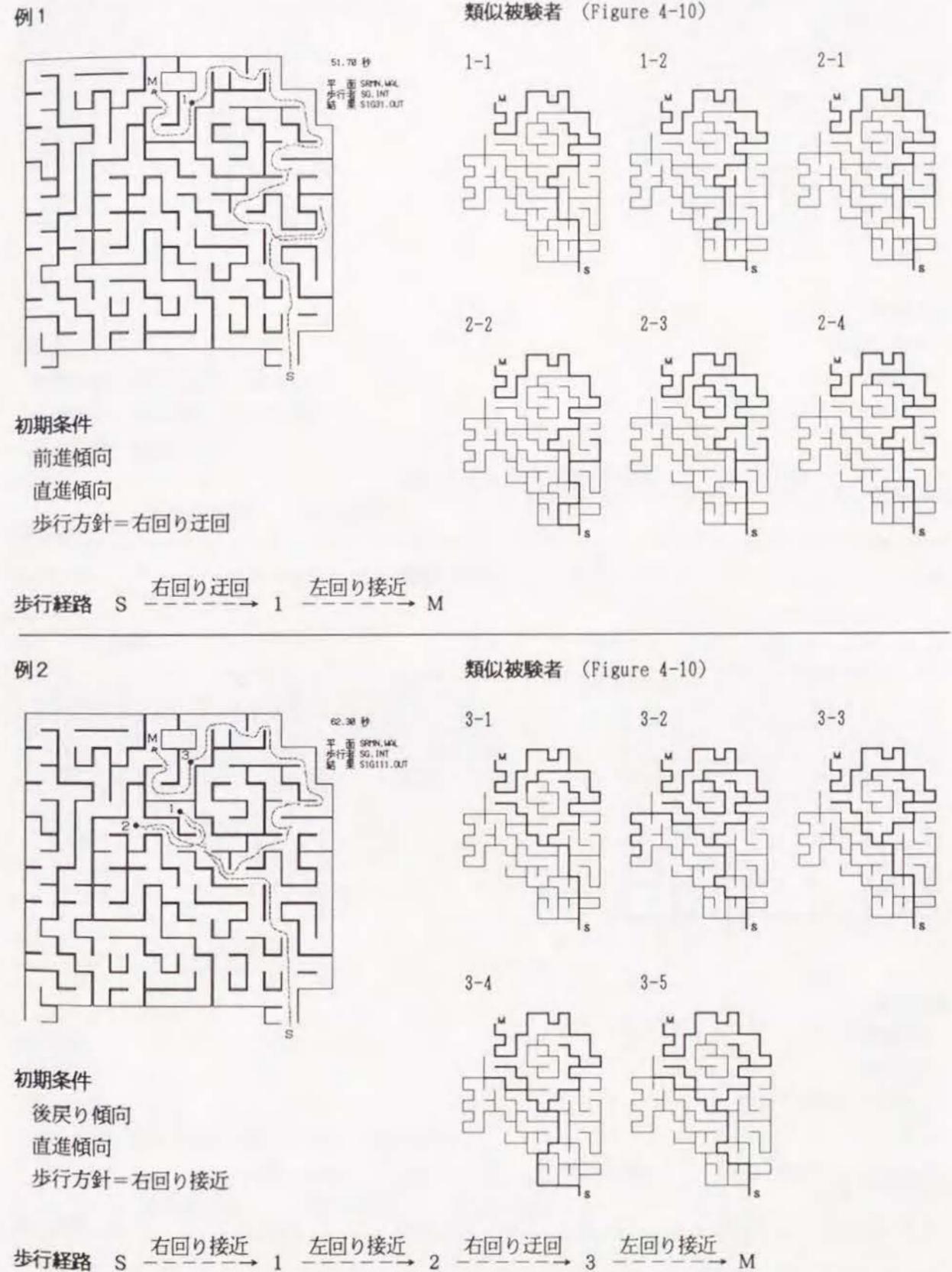


Figure 7-1 手取フィッシュランド迷路平面上の探索歩行シミュレーション例

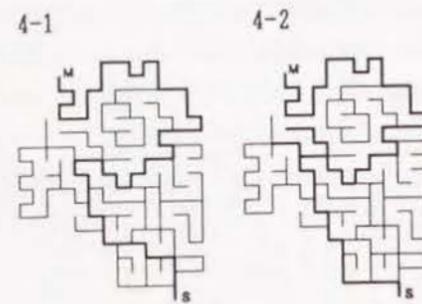
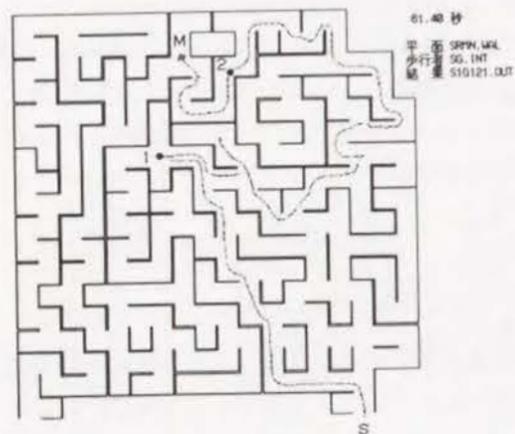
7.2 白峰迷路第1回実験

白峰迷路第1回実験に関しては、実験結果で分類された全ての GROUP の歩行経路に類似したシミュレーション結果を得ることができた。以下にシミュレーション結果と、実験で観察された歩行経路を示す。



例3

類似被験者 (Figure 4-10)



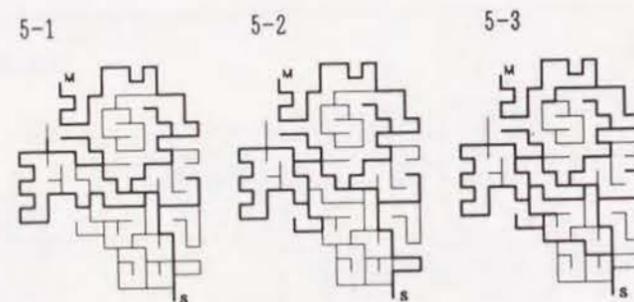
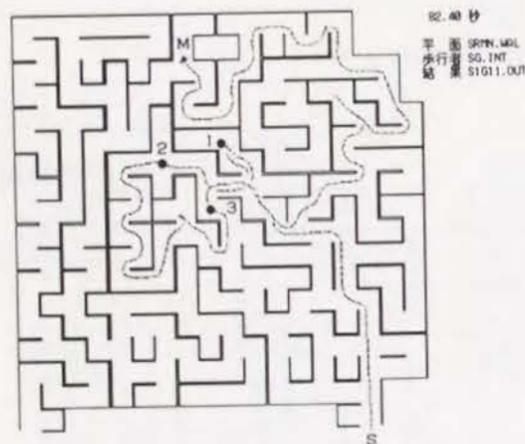
初期条件

- 後戻り傾向
- 直進傾向
- 歩行方針=左回り接近

歩行経路 S $\xrightarrow{\text{左回り接近}}$ 1 $\xrightarrow{\text{右回り迂回}}$ 2 $\xrightarrow{\text{左回り接近}}$ M

例4

類似被験者 (Figure 4-10)



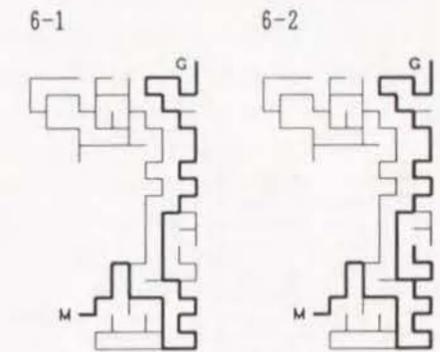
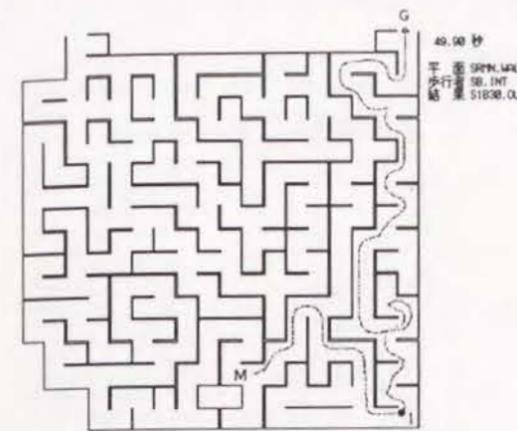
初期条件

- 前進傾向
- 直進傾向
- 歩行方針=右回り接近

歩行経路 S $\xrightarrow{\text{右回り接近}}$ 1 $\xrightarrow{\text{左回り接近}}$ 2 $\xrightarrow{\text{左回り迂回}}$ 3 $\xrightarrow{\text{右回り接近}}$ M

例5

類似被験者 (Figure 4-12)



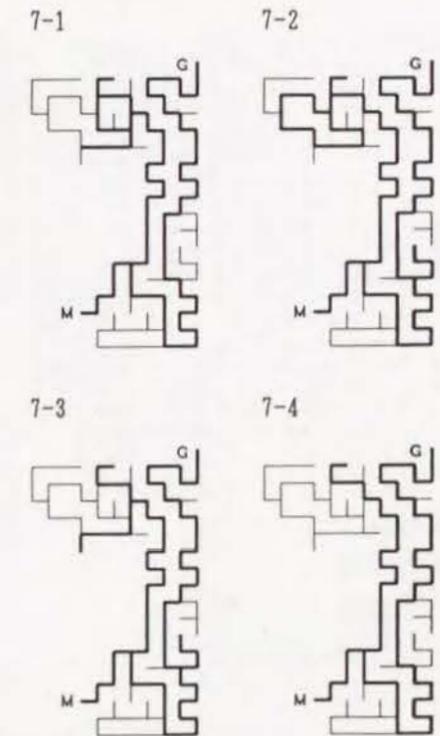
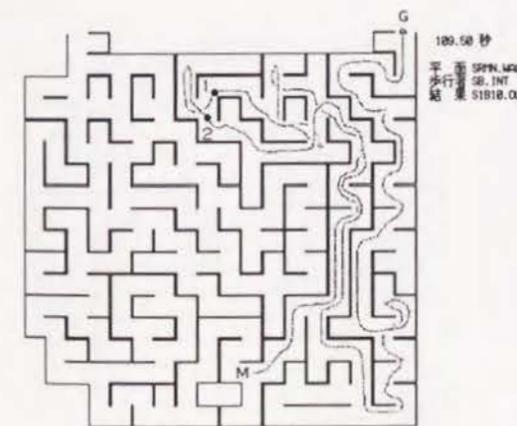
初期条件

- 前進傾向、後戻り傾向 (何れも可)
- 直進傾向、屈進傾向 (何れも可)
- 歩行方針=右回り迂回

歩行経路 M $\xrightarrow{\text{右回り迂回}}$ 1 $\xrightarrow{\text{右回り接近}}$ G

例6

類似被験者 (Figure 4-12)



初期条件

- 前進傾向
- 直進傾向
- 歩行方針=右回り接近、左回り接近 (何れも可)

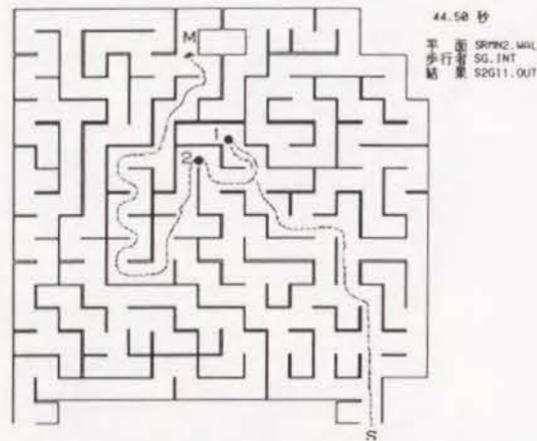
歩行経路 M $\xrightarrow{\text{左回り接近}}$ 1 $\xrightarrow{\text{左回り迂回}}$ 2 $\xrightarrow{\text{右回り接近}}$ G

Figure 7-2 白峰迷路第1回実験平面上の探索歩行シミュレーション例

7. 3 白峰迷路第2回実験

白峰迷路第2回実験に関しては実験結果で分類された GROUP 1, 2, 6, 8 と類似した歩行経路のシミュレーション結果が得られた。GROUP 3, 4, 5, 7 に関しては歩行者が混乱して同じ箇所を何度も歩行したり、アルゴリズムが充分に対応できておらず再現できなかった。

例1

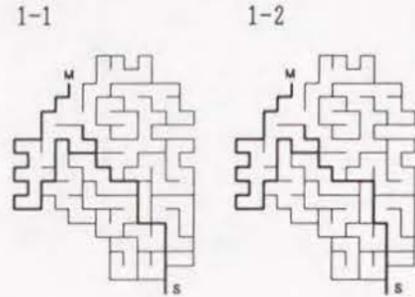


初期条件

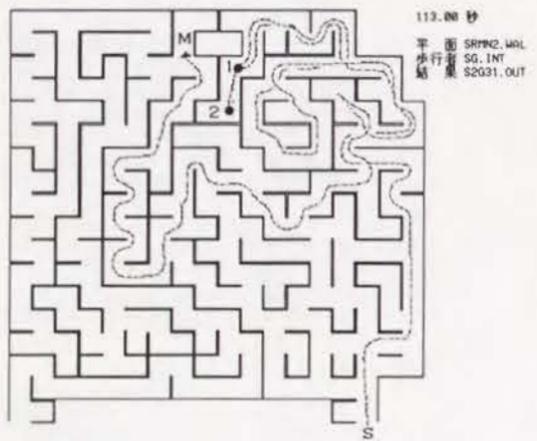
- 前進傾向
- 直進傾向
- 歩行方針=右回り接近

歩行経路 S $\xrightarrow{\text{右回り接近}}$ 1 $\xrightarrow{\text{左回り接近}}$ 2 $\xrightarrow{\text{左回り迂回}}$ G

類似被験者 (Figure 4-16)



例2

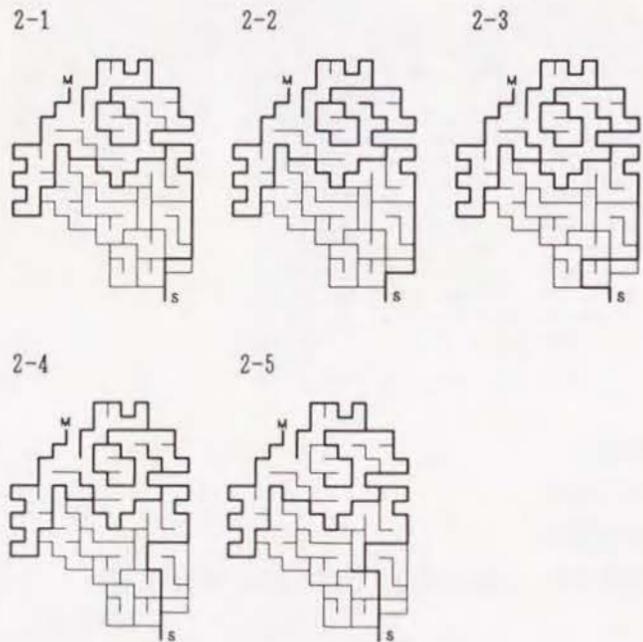


初期条件

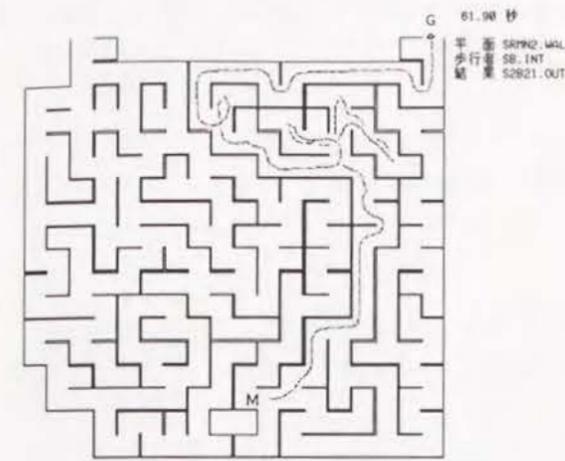
- 前進傾向
- 直進傾向
- 歩行方針=右回り迂回

歩行経路 S $\xrightarrow{\text{右回り迂回}}$ 1 $\xrightarrow{\text{左回り接近}}$ 2 $\xrightarrow{\text{左回り迂回}}$ G

類似被験者 (Figure 4-16)



例3

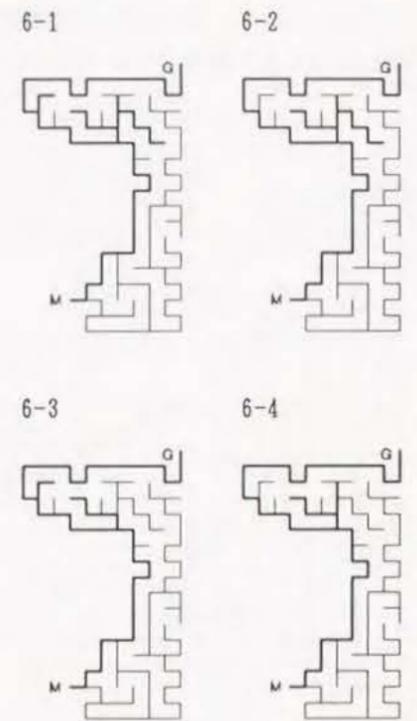


初期条件

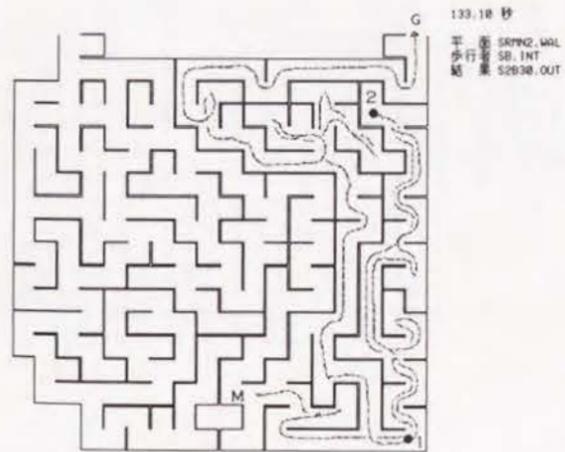
- 前進傾向、後戻り傾向 (何れも可)
- 直進傾向、屈進傾向 (何れも可)
- 歩行方針=左回り接近、右回り接近 (何れも可)

歩行経路 M $\xrightarrow{\text{左回り接近}}$ G

類似被験者 (Figure 4-18)



例4



初期条件

- 前進傾向、後戻り傾向 (何れも可)
- 直進傾向、屈進傾向 (何れも可)
- 歩行方針=右回り迂回

歩行経路 M $\xrightarrow{\text{右回り迂回}}$ 1 $\xrightarrow{\text{右回り接近}}$ 2 $\xrightarrow{\text{左回り接近}}$ G

類似被験者 (Figure 4-18)

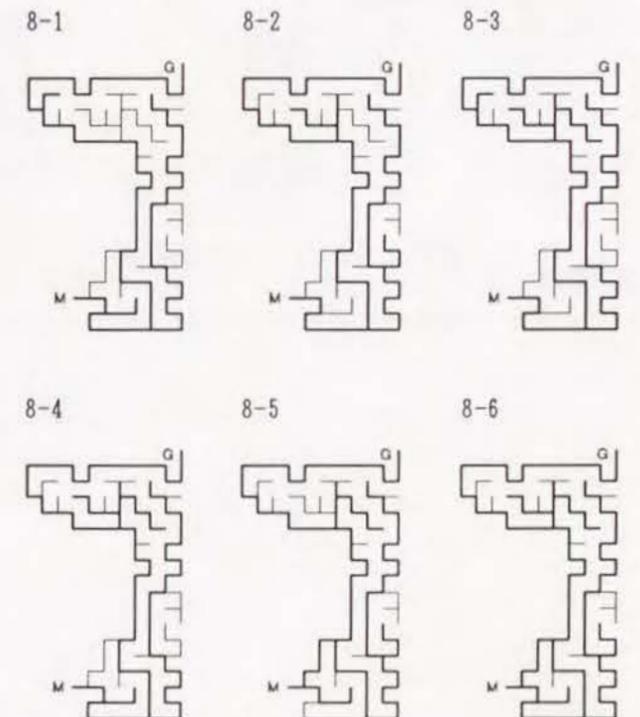


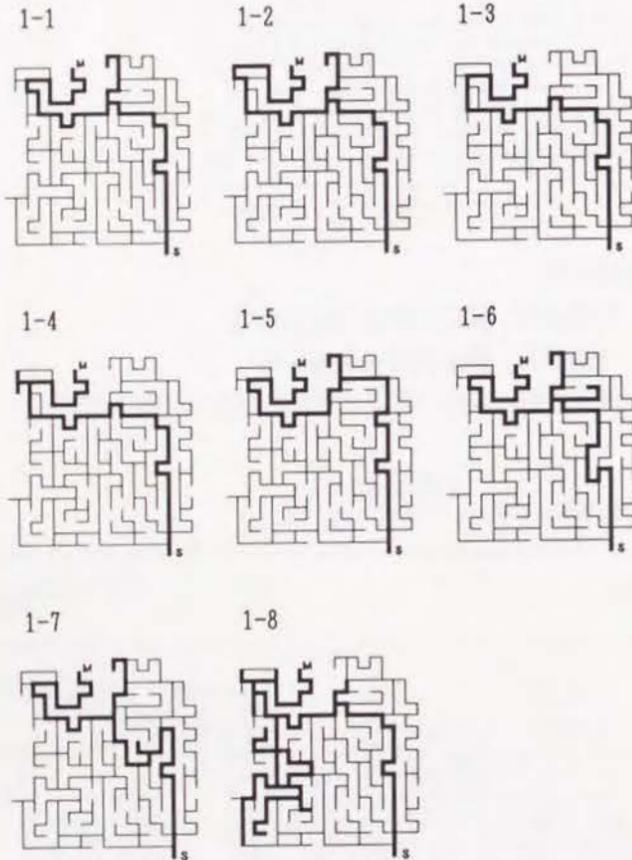
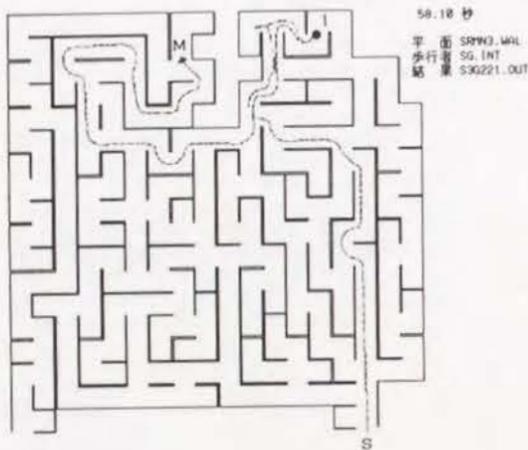
Figure 7-3 白峰迷路第2回実験平面上の探索歩行シミュレーション例

7. 4 白峰迷路第3回実験

白峰迷路第3回実験に関しては、GROUP 1, 2, 3, 4 の全てに類似した歩行経路のシミュレーション結果が得られた。しかし、各 GROUP 内の特殊な歩行経路、例えば、1-5, 1-7, 1-8, 4-1 などは少し相違点が大きく、類似しているとは見なせないかも知れない。

例1

類似被験者 (Figure 4-22)

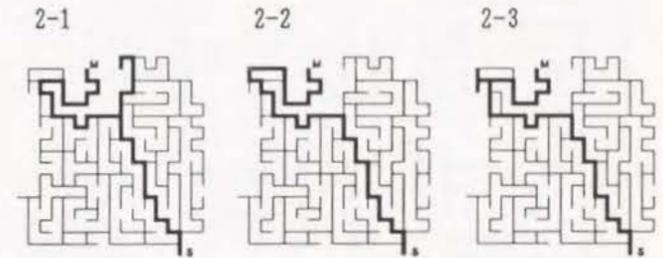


初期条件
後戻り傾向
直進傾向
歩行方針=右回り接近

歩行経路 S $\xrightarrow{\text{右回り接近}}$ I $\xrightarrow{\text{左回り迂回}}$ M

例2

類似被験者 (Figure 4-22)

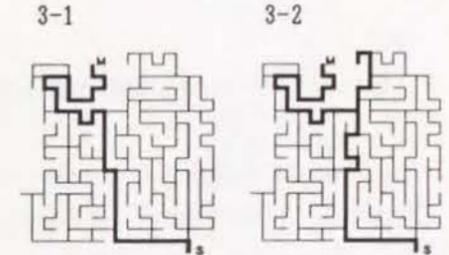
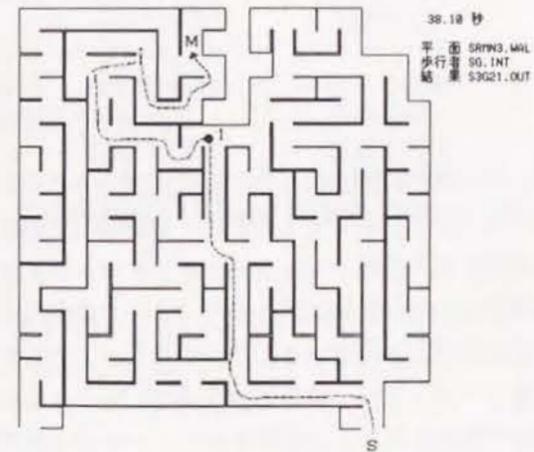


初期条件
後戻り傾向
屈進傾向
歩行方針=右回り接近

歩行経路 S $\xrightarrow{\text{右回り接近}}$ I $\xrightarrow{\text{左回り迂回}}$ M

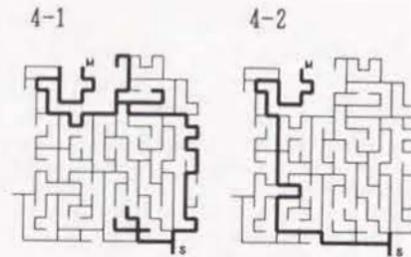
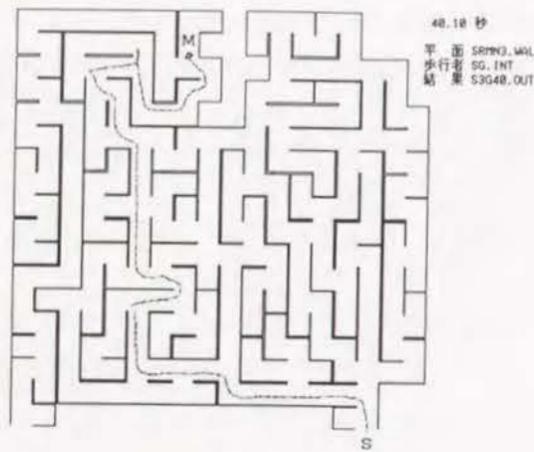
例3

類似被験者 (Figure 4-22)



初期条件
前進傾向
直進傾向、屈進傾向 (何れも可)
歩行方針=左回り接近

歩行経路 S $\xrightarrow{\text{左回り接近}}$ I $\xrightarrow{\text{左回り迂回}}$ M



初期条件

前進傾向
直進傾向、屈進傾向 (何れも可)
歩行方針=左回り迂回

歩行経路 S $\xrightarrow{\text{左回り迂回}}$ M

Figure 7-4 白峰迷路第3回実験平面上のシミュレーション例

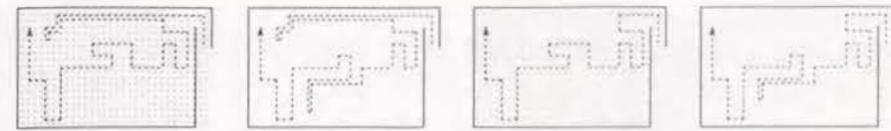
7.5 シミュレーション結果のまとめ

以上で全ての迷路歩行シミュレーション結果を示したが、これらを実験結果から分類した歩行パターン (Figure 5-5) と対比させ、どの歩行パターンをシミュレーションにより再現できたかを一覧表にして表示すると、Table 7-5 の通りである。Table 7-5 で図に網掛けを施したものはシミュレーションモデルにより再現できなかった歩行パターンである。それぞれ図の下に実験結果から分析した基本歩行パターンが記入されており、今回新たにその下にシミュレーション実行時の初期条件が記されている。これを見ると、全てのシミュレーション例の初期条件と実験結果の分析による基本歩行パターンが一致しているので、モデルはかなり忠実に実験結果を反映して作成されていると言える。実験で観察された歩行経路とシミュレーション例とは細部において一致しない部分がしばしば見られるが、これは止むを得ないことと考え、全体的な歩行パターンが類似していれば再現できていると見なした。

シミュレーションモデルにより再現できなかった歩行パターンに関し、その理由を挙げると以下の3項目があり、今後の課題として残されている。

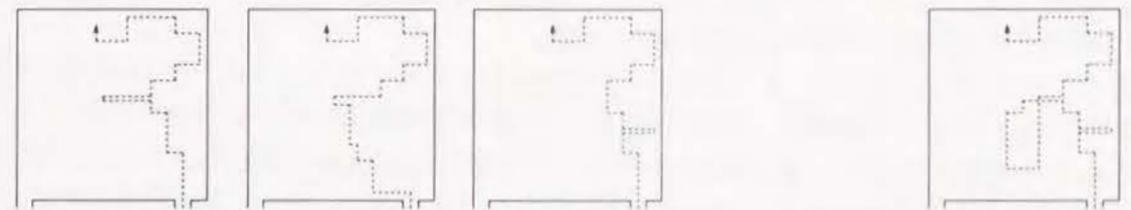
1. 「状況変化は無いがそのままうまく行けそうにないと言う不安を持っている」場合に歩行方針を変更する行動のモデル化ができておらず、従ってその様な行動の発生した歩行パターンの再現はできなかった。
(手取 歩行経路 1, 4, 6, 7 白峰第2回 GROUP 7 白峰第3回 GROUP 1-5)
2. 混乱して同じ箇所を同道巡りするような行動のモデル化はできず、再現できなかった。
(白峰第2回 GROUP 4, 5)
3. 後戻りアルゴリズムが十分に歩行パターンに対応できておらず、後戻りの際に被験者と同じ位置まで戻ることができず、途中の分岐点で別の経路を選択してしまった。(白峰第2回 GROUP 3)

手取迷路実験



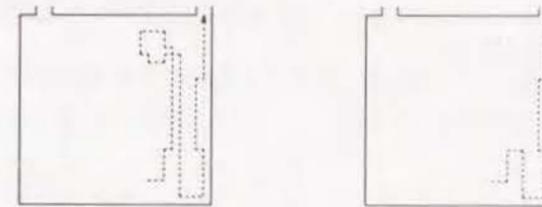
歩行経路 6, 7	歩行経路 5	歩行経路 1, 4	歩行経路 2, 3
実験結果 右回り接近 +左回り接近 (2/8人)	右回り接近 +左回り迂回 (1/8人)	左回り迂回 +左回り接近 (2/8人)	左回り迂回 (3/8人)
初期条件	前進傾向 直進傾向 右回り接近	前進傾向 屈進傾向 左回り迂回	

白峰迷路第1回実験 (入口Sから中間地点Mまで)



GROUP 3	GROUP 4	GROUP 1, 2	GROUP 5
実験結果 右回り接近 後戻り傾向 (5/17人)	左回り接近 後戻り傾向 (2/17人)	右回り迂回 (7/17人)	混乱型 前進傾向 (3/17人)
初期条件 後戻り傾向 直進傾向 右回り接近	後戻り傾向 直進傾向 左回り接近	前進傾向 屈進傾向 右回り迂回	前進傾向 直進傾向 右回り接近

白峰迷路第1回実験 (中間地点Mから出口Gまで)



GROUP 7	GROUP 6
実験結果 左回り接近 (5/18人)	右回り迂回 (13/18人)
初期条件 前進傾向 直進傾向 左回り接近	前進傾向、後戻り傾向 直進傾向、屈進傾向 右回り迂回

8 誘導標による歩行

最初にこの節で誘導標による歩行の分析、又はアルゴリズムの説明で用いる用語の定義を以下の通り挙げておく。

歩行者の状態	歩行者と経路との関係を表す。歩行者が「目的地までの経路を知っている場合」、「目的地までの経路を知らないが、誘導標が見える場合」、「目的地までの経路を知らず、誘導標も見えない場合」の3通りを考えている (Table 8-1)
歩行状態	歩行者の状態に対応し、経路上を歩行する状態。「最短経路歩行」、「誘導標による歩行」、「探索歩行」の3通りである (Table 8-1)
最短経路歩行	シミュレーション平面上で目的地に向かって最短経路上を歩行する (8.2.1)
誘導標による歩行	シミュレーション平面上で誘導標を発見し、その指示に従って歩行する (8.2.2)
誘導標	Table 8-2 に示されるデータを持ち、歩行者を誘導する
探索歩行	第6節で説明した探索歩行アルゴリズムに従って歩行する

これまで探索歩行モデルに関して述べて来たが、デパート、地下街、ホテル等では迷路のように解り難い空間はあっても、何らかの行先を示す誘導標が見られるのが普通である。現実の都市・建築空間における歩行経路の問題を考えると、単に探索歩行だけでなく、このような誘導標等外部から歩行者が情報を得る場合も起こることを考慮する必要がある。この節では、これらの現実の歩行上の問題を考慮し、それら进行处理するアルゴリズムを作成し、探索歩行モデルと組み合わせ、現実的な歩行モデルを作成する。

8.1 歩行者の状態と歩行状態

現実の都市・建築空間において、経路を辿って歩行する歩行者と経路との関係を考えて、以下の2通りが考えられる。

1. 歩行者が目的地までの経路を知っている。
2. 歩行者が目的地までの経路を知らない。

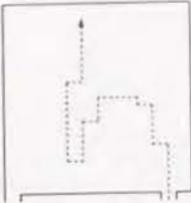
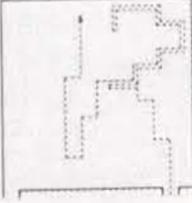
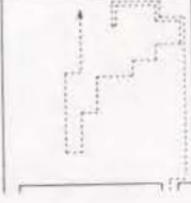
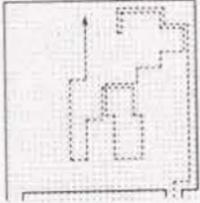
更に、歩行者が目的地までの経路を知らない場合に、歩行者が歩行するための拠り所とする方法は、以下のような例が考えられる。

1. 誘導標の指示に従う。
2. 地図を見る。
3. 他人に道を尋ねる。

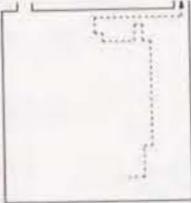
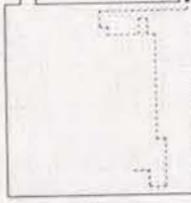
上記の2、3の場合は結局、地図又は他人の指示により経路に関する情報を得て、選択すべき経路を決定することになるので、地図や他人の代わりに誘導標があると仮定すれば、このように外部から情報を得て歩行する場合は、全て誘導標の指示に従って歩行するということにしてモデル化を行っても差し支えないと考えられる。従って歩行者と歩行経路との関係は、次の3通りとなり、これらを「歩行者の状態」と呼ぶことにする。

1. 歩行者が目的地までの経路を知っている。
2. 歩行者は目的地までの経路を知らないが、誘導標が見える。
3. 歩行者が目的地までの経路を知らず、誘導標も見えない。

白峰迷路第2回実験 (入口Sから中間地点Mまで)

				
	GROUP 1	GROUP 3	GROUP 2	GROUP 4,5
実験結果	右回り接近 +左回り迂回 前進傾向 (2/17人)	右回り接近 +右回り迂回 後戻り傾向 (2/17人)	右回り迂回 +左回り迂回 (7/17人)	混乱型 (6/17人)
初期条件	前進傾向 直進傾向 右回り接近		前進傾向 直進傾向 右回り迂回	

白峰迷路第2回実験 (中間地点Mから出口Gまで)

			
	GROUP 6	GROUP 7	GROUP 8
実験結果	左回り接近 (10/17人)	右回り迂回 +左回り接近 (1/17人)	右回り迂回 (6/17人)
初期条件	前進傾向、後戻り傾向 直進傾向、屈進傾向 左回り接近		前進傾向、後戻り傾向 直進傾向、屈進傾向 右回り迂回

白峰迷路第3回実験 (入口Sから中間地点Mまで)

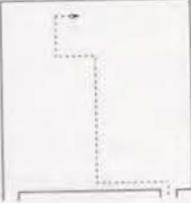
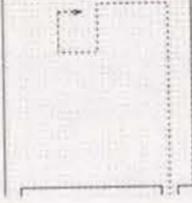
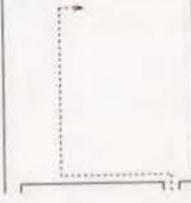
					
	GROUP 1	GROUP 2	GROUP 3	1-5	4-2
実験結果	右回り接近 直進傾向 (8/17人)	右回り接近 屈進傾向 (4/17人)	左回り接近 (3/17人)	右回り迂回 直進傾向 (1/17人)	左回り迂回 (1/17人)
初期条件	後戻り傾向 直進傾向 右回り接近	後戻り傾向 屈進傾向 右回り接近	前進傾向 直進傾向、屈進傾向 左回り接近		前進傾向 直進傾向、屈進傾向 左回り迂回

Figure 7-5 実験結果の歩行パターンの分類とシミュレーション結果の対比

次に、これらの3通りの歩行者の状態に対応する歩行者の行動について考える。まず、歩行者が目的地までの経路を知っている状態では、序において述べたように、目的地への最短経路を歩行するものとする。目的地までの経路を知らないが、誘導標が見える状態では誘導標の指示に従って歩行するものとする。そして、目的地までの経路を知らず、誘導標も見えない状態では、前節までで述べた探索歩行を行うものとする。従って、3通りの「歩行者の状態」に対し、このモデルでは、「最短経路歩行」、「誘導標による歩行」、「探索歩行」の3通りの「歩行状態」を対応させることにする。(Table 8-1)

歩行者の状態	歩行状態
目的地までの経路を知っている場合	最短経路歩行
目的地までの経路を知らないが、誘導標が見える場合	誘導標による歩行
目的地までの経路を知らず、誘導標も見えない場合	探索歩行

Table 8-1 歩行者の状態と歩行状態

これらの3通りの歩行者の状態と歩行状態を組み合わせ、歩行者の状態の変化に連れて歩行状態が変化するモデルを考える。歩行状態の変化が、どのような状況において起こるかを考えると、以下のような場合が考えられる。

- 最短経路歩行 → 探索歩行 ----- 既知の経路を歩行中に、災害などの理由により経路が通行不能になった場合
- 探索歩行 → 最短経路歩行 ----- 探索歩行中に、既知の経路に出会った場合
- 探索歩行 → 誘導標による歩行 ----- 探索歩行中に誘導標を発見した場合
- 誘導標による歩行 → 探索歩行 ----- 誘導標に従って歩行中に、経路を見失った場合
- 最短経路歩行 → 誘導標による歩行 --- 歩行者が目的地に向かって歩行中の経路が、混雑又は危険等の情報を得て、誘導標により他の経路が指示されている場合
- 誘導標による歩行 → 最短経路歩行 --- 誘導標に従って歩行中に、既知の経路に出会った場合

これらの状況変化に対する歩行状態の変化を図式的に表すと、Figure 8-1 の通りである。

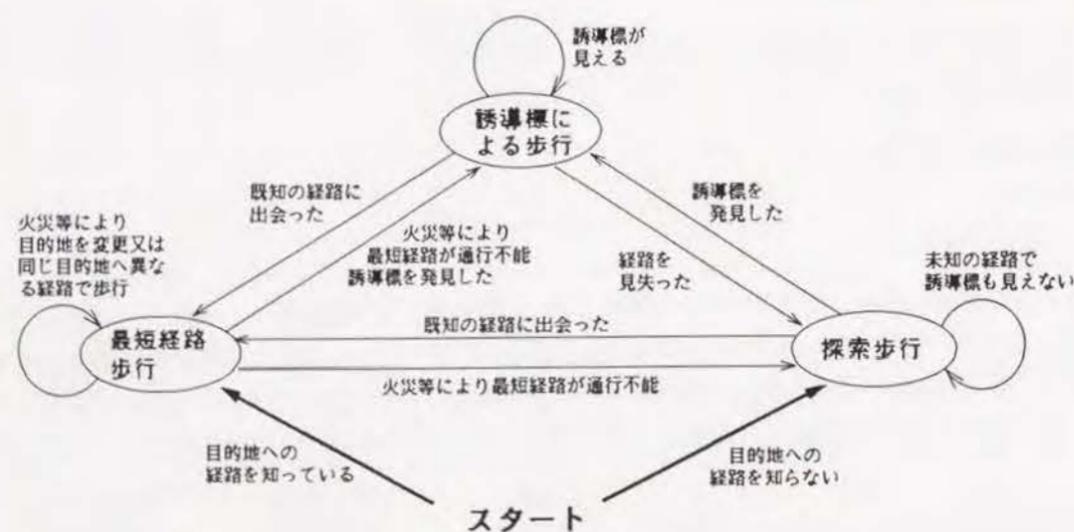


Figure 8-1 歩行状態の遷移図

8.2 誘導標による歩行、最短経路歩行、及び探索歩行を総合したアルゴリズム

Table 8-1 において3通りの歩行状態を考えたが、これらのうち、探索歩行に関しては第6節で説明している。ここでは残りの2つの歩行状態のアルゴリズムと、この3通りの歩行状態を総合したアルゴリズムについて述べる。最短経路歩行¹と誘導標による歩行²のアルゴリズムは既に作成済みで、他の文献で紹介しているが、ここでも簡単に説明しておく。

8.2.1 最短経路歩行

最短経路の計算は、グラフ理論を用いて計算する方法が既に確立されており、それらの一種で、Dijkstraにより考案された方法が最も効率よく計算できるとされている。³ 本論では、歩行経路を、シミュレーション平面中のコーナーの繋りとして扱っているため、Dijkstra法を用いて、コーナー間のネットワーク上で歩行者の位置から目的地までの最短経路を求めるアルゴリズムを作成した。このアルゴリズムを「最短経路」と名付けることにする。

【最短経路】アルゴリズム

このアルゴリズムは、他のアルゴリズムのように if - then の方式で表現し難いので、以下のように各ステップ毎に分けて説明する。

- STEP 1 最初、シミュレーション平面上の全てのコーナー集合を S とする。集合 S 中の任意のコーナー J について、 $V(J) = 10^{10}$ と初期値を与えておく。V(J) の値は、後に歩行者からコーナー J までの最短距離が与えられる。これを集合 S 中の全てのコーナーについて行う。最短経路を構成するコーナーの集合を T とすると、最初は、 $T = \phi$ (空集合) である。
- STEP 2 歩行者から見えるコーナーの中で、歩行者からの距離が最短のコーナー I を選び、それを集合 S から削除し、集合 T に加える。V(I) = 歩行者とコーナー I の距離とする。
- STEP 3 集合 T 中の任意のコーナー K から見える集合 S 中の任意のコーナー J の組み合わせを取り出し、コーナー K とコーナー J の距離 D_{jk} を計算し、 $V(K) + D_{jk} < V(J)$ であれば、 $V(J) = V(K) + D_{jk}$ とする。同時に $P(K) = J$ とする。P(K) は最短経路中で、コーナー K の次に進むべきコーナーを与える。
- STEP 4 STEP 3 を全ての K と J の組み合わせについて繰り返す。集合 S 中で、最小の V(J) を与えるコーナー J を集合 S から削除し、集合 T に加える。
- STEP 5 STEP 4 で集合 T に加えたコーナー J から目的地が見えれば計算を終了し、P(K) を順に辿ることにより、目的地への最短経路上を歩行する。コーナー J から目的地が見えない場合は、STEP 3 及び 4 を繰り返す。

8.2.2 誘導標の認識と歩行者の誘導

誘導標はシミュレーション平面上の任意の位置に Table 8-2 に示されるデータとして与えられる。

誘導標に関するデータ	説明
誘導標の視認可能距離 (m)	誘導標指示内容を読み取り可能な距離で、歩行者は誘導標を発見すると、まずこの距離の範囲内に接近する。
誘導標の位置 (X, Y)	シミュレーション平面上に誘導標を配置する位置で、X, Y 座標により与える。
誘導標が指示する方向 (角度)	誘導標が歩行者に進むべき方向を指示するその向きを角度により与える。シミュレーション平面上で、X 軸方向を角度 0 とし、反時計回りを + 方向とする。
誘導標が指示する目的地	誘導標が指示する方向にある目的地 (出入口などの開口) の番号を示す。歩行者の目的地がこの誘導標の指示する目的地と一致しない場合は、誘導標を無視するか、又は緊急時には目的地を変更して誘導標の指示に従う。

Table 8-2 誘導標に関するデータ

歩行者が任意の誘導標Nを発見すると、Nまでの距離を求め、Nの内容を判読できる視認距離より大であれば、視認距離までさらに接近しその内容を読む。歩行者が目指す目的地と誘導標が指示する目的地の番号が一致しないとき、歩行者はこの誘導標を無視する。一致していると歩行者の目指す目的地の方へ進むために、誘導標の指示する方向に従って最適なコーナーを選択する。

Figure 8-2 のようにPから誘導標を見て、誘導標の指示する目的地の方向へ進む時、コーナーの何れかを以下の方法で仮目的地として選ぶ。

1. $C < B$ となるコーナーがいくつかある場合は、その中から $\cos A$ が最大となるような位置にあるコーナーを選択する。
2. $C \geq B$ となるコーナーしかない場合は、 $\cos A$ が最大となるような位置にある曲り角を選択する。

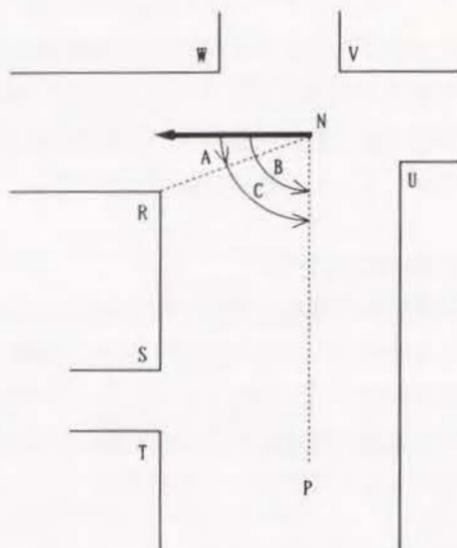


Figure 8-2 誘導標によるコーナーの選択

これをモデル化し、アルゴリズムを作成すると以下の通りである。このアルゴリズムを「サイン」と名付ける。

[サイン] アルゴリズム

```

if 任意の誘導標Nを発見
  if 歩行者と N との距離 > 視認可能距離
    then 誘導標に接近する
         then 2行目に戻る
  elseif 歩行者と N との距離 < 視認可能距離
    if N の指示内容が歩行者の目的地と一致
      then 歩行者から見えるコーナー全てにつき、角度 A、B、C (Figure 8-2) を計算
           if  $C < B$ となるコーナーがある
             then それらの中から  $\cos A$  が最大となるコーナーを選択
           elseif  $C < B$ となるコーナーがない
             then  $\cos A$  が最大となるコーナーを選択
    end
  end
end

```

8.2.3 誘導標による歩行、最短経路歩行、探索歩行の総合

以上で説明した誘導標による歩行、最短経路歩行、及び探索歩行の3つのアルゴリズムをまとめ、Figure 8-1 に基づき、状況変化に対して適当な歩行状態を選択するアルゴリズムを以下の通りに作成した。火災等により最短経路が通行不能となった場合は、火災又は煙に覆われている領域に含まれているコーナーを除外して、最短経路の計算を行う。

```

if 目的地への経路を知っている
  then アルゴリズム「最短経路」を実行し、最短経路を歩行
  if 火災等により最短経路が通行不能
    if 他の出口への経路を知っている

```

```

      then 目的地を変更し、アルゴリズム「最短経路」を実行し、最も近い出口への最短経路を歩行
    elseif 他の出口を知らないが、目的地への他の経路を知っている
      then アルゴリズム「最短経路」を実行し、通行可能な最短経路を歩行
    elseif 誘導標が見える
      then アルゴリズム「サイン」を実行し、誘導標に従って歩行する
    else アルゴリズム「探索歩行」を実行する (第6節参照)
  end
elseif 目的地への経路を知らない
  then アルゴリズム「探索歩行」を実行する
  if 誘導標が見える
    then アルゴリズム「サイン」を実行し、誘導標に従って歩行する
  elseif 既知の経路を発見
    then アルゴリズム「最短経路」を実行し、最短経路を歩行
  end
end

```

8.3 誘導標による歩行のシミュレーション例

迷路歩行実験を行った平面に誘導標を配置し、歩行者を誘導したシミュレーション例を示す。手取迷路と白峰迷路で歩行実験を行った平面上の数カ所の分岐点に誘導標を置き、歩行者を誘導した結果、探索歩行アルゴリズムだけでは、行き止まりに陥ったりしていたのが、同一の初期条件でも迷わずに目的地に到達している。これにより、誘導標による歩行アルゴリズムは妥当であることを実証できた。

8.3.1 手取迷路における誘導歩行シミュレーション例

Figure 8-3 に示すように、迷路平面内に3ヶ所、矢印で示される方向に目的地があることを指示する誘導標を配置して、歩行実験と同じ位置から出発させる。その結果、歩行者の初期条件は何れの場合も、誘導標の指示に従って歩行し、目的地に到達した。以下に誘導標を使用した場合と無い場合と同じ初期条件を与えてシミュレーションを行った例を対比させて示す。

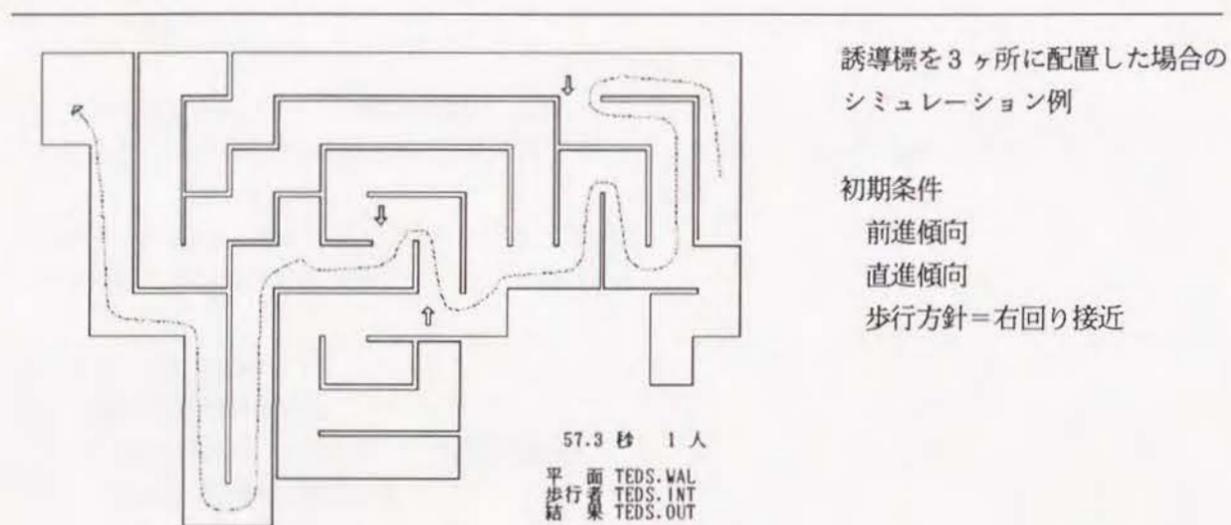


Figure 8-3 手取迷路における誘導標による歩行

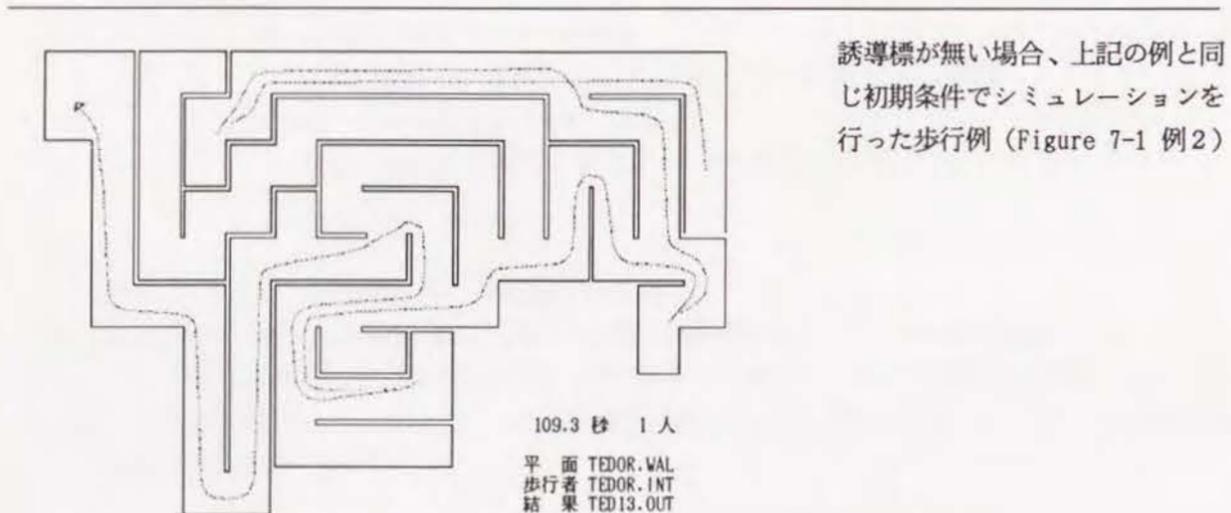


Figure 8-4 誘導標がない場合の歩行

8.3.2 白峰迷路における誘導歩行シミュレーション例

白峰迷路における第1回実験で用いた平面においても、誘導標を配置してシミュレーションを行った例を示す。これも同じ初期条件で誘導標を配置した場合と無い場合の例を対比させる。

誘導標を図中の矢印の位置に配置した場合



Figure 8-5 誘導標がある場合の歩行

誘導標が無い場合

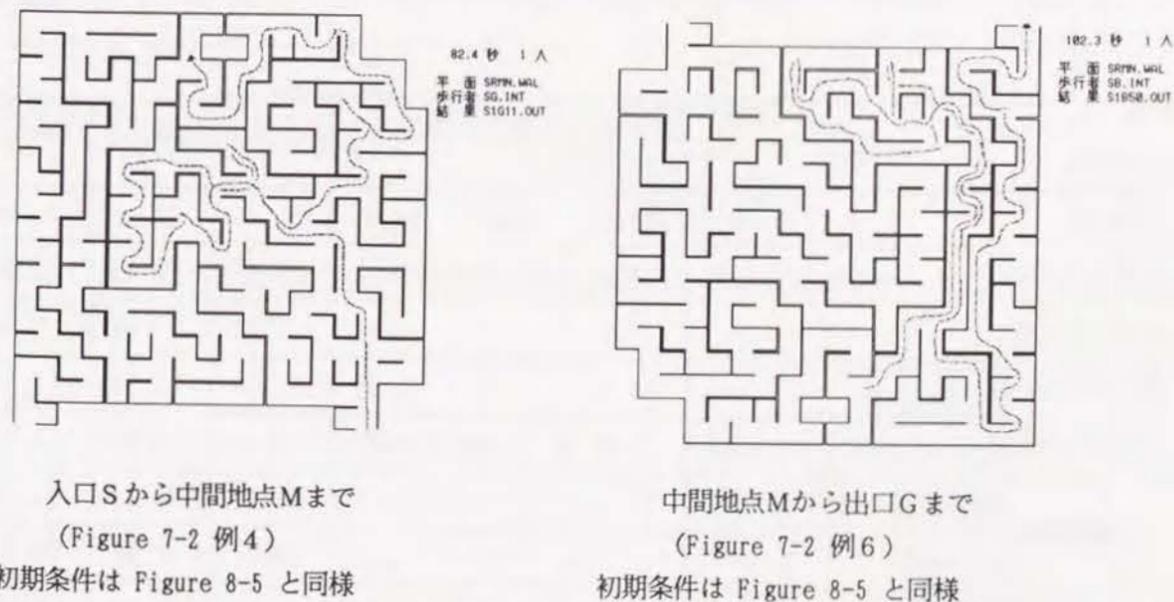


Figure 8-6 誘導標が無い場合の歩行

8.3.3 事務所ビルにおける避難シミュレーション例

ここでは現実的な避難シミュレーション例として、小規模な事務所ビルの基準階平面 (Figure 8-7) における火災時の避難シミュレーションを示す。シミュレーションに際して、歩行者数、避難開始時間、歩行速度等に関するデータは Table 8-3 に示す通りで、これらは「新・建築防災計画指針」⁴に基づいて作成した。事務所ビルは貸しビルと想定し、人口密度を各事務室 0.25 [人/㎡]、会議室 0.60 [人/㎡] として歩行者数を算定した。歩行速度は平均 1.30 [m/s] となるようにデータを与えた。火災が事務室3において時刻 0.0 秒に発生し、避難開始時間は、出火室の歩行者を 30.0 秒、非出火室の歩行者を 60.0 秒とした。こうして行ったシミュレーション結果を「新・建築防災計画指針」に基づいて計算した避難時間の判定 (以後防災評定と呼ぶ) と比較し、本モデルの妥当性を検証し、安全性の検討に有効であることを示す。

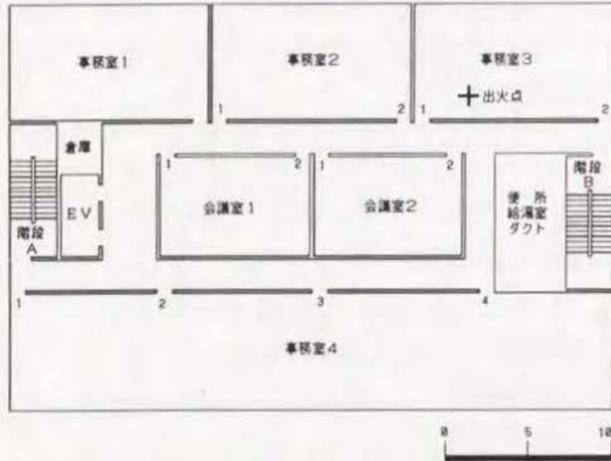


Figure 8-7 事務所ビル基準階シミュレーション平面 (図中開口付近の数字は出口番号を示す)

事務室	人数	火災状況	避難開始時間
事務室1	21人	非出火室	60.0 秒
事務室2	21人	非出火室	60.0 秒
事務室3	21人	出火室	30.0 秒
事務室4	63人	非出火室	60.0 秒
会議室1	33人	非出火室	60.0 秒
会議室2	33人	非出火室	60.0 秒
計	192人		

Table 8-3 各室で発生する歩行者数及び避難開始時間

「新・建築防災計画指針」に基づく避難時間の判定

「新・建築防災計画指針」に基づき、「居室避難時間」を計算し、その判定結果を一覧表にすると、Table 8-4 に示される通りである。事務室3では出火地点が出口1に近いので、出口2だけから避難することとして避難経路を設定した。

計算項目	居室		事務室3 (出火室)	事務室1	事務室2	事務室4	会議室1	会議室2	
	居室面積	居室人口密度	避難対象人員	居室扉幅の合計	避難扉幅の合計	居室避難時間 (扉の通過時間 T_i)	居室許容避難時間 r, T_i	判定 $(T_i \leq r, T_i)$	
居室面積	A_i [㎡]		21	84.00	84.00	84.00	252.00	54.00	54.00
居室人口密度	ρ [人/㎡]		21	0.25	0.25	0.25	0.25	0.60	0.60
避難対象人員	N_i [人]		21	21	21	63	32	32	32
居室扉幅の合計	[m]		0.90	0.90	1.80	3.60	1.80	1.80	1.80
避難扉幅の合計	ΣB_i [m]		0.90	0.90	1.80	3.60	1.80	1.80	1.80
居室避難時間	扉の通過時間 T_i [秒]		15.56	15.56	7.77	11.67	12.22	12.22	12.22
	歩行時間 T_i' [秒]		13.96	13.96	9.42	11.04	7.50	7.50	7.50
居室許容避難時間	r, T_i [秒]		18.33	18.33	18.33	31.74	14.69	14.69	14.69
判定	$(T_i \leq r, T_i)$		OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK

Table 8-4 居室避難の判定

「廊下避難時間」及び「階避難時間」は各居室からの出入口毎に避難者数及び、出口から階段室入口までの距離を求め、それにより避難時間を計算する。更に、廊下及び、階段室前において滞留の発生が予想されるので以下のようにグラフにより、各避難時間を求める。

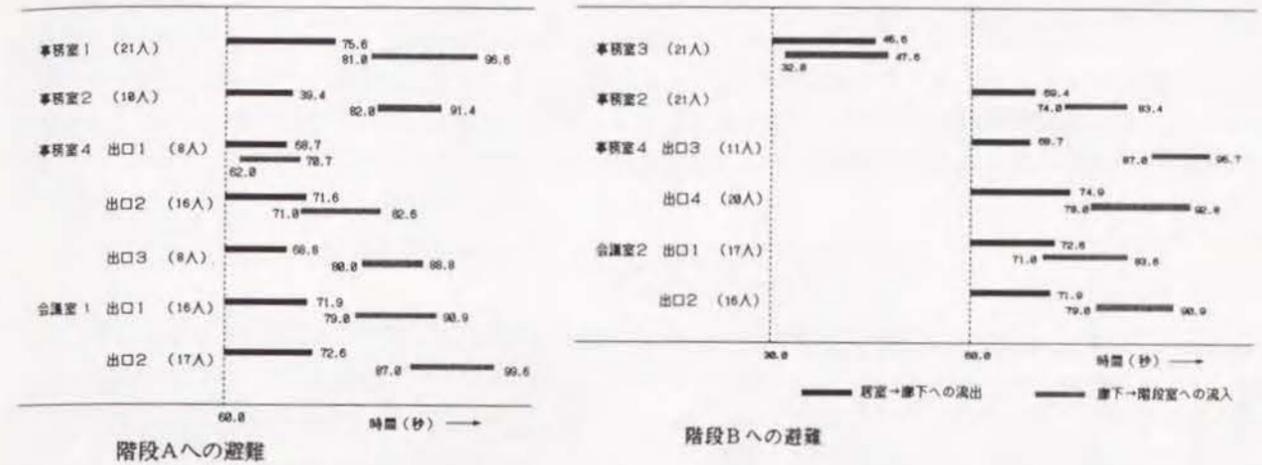


Figure 8-8 各居室から廊下及び階段への流出人数と時間

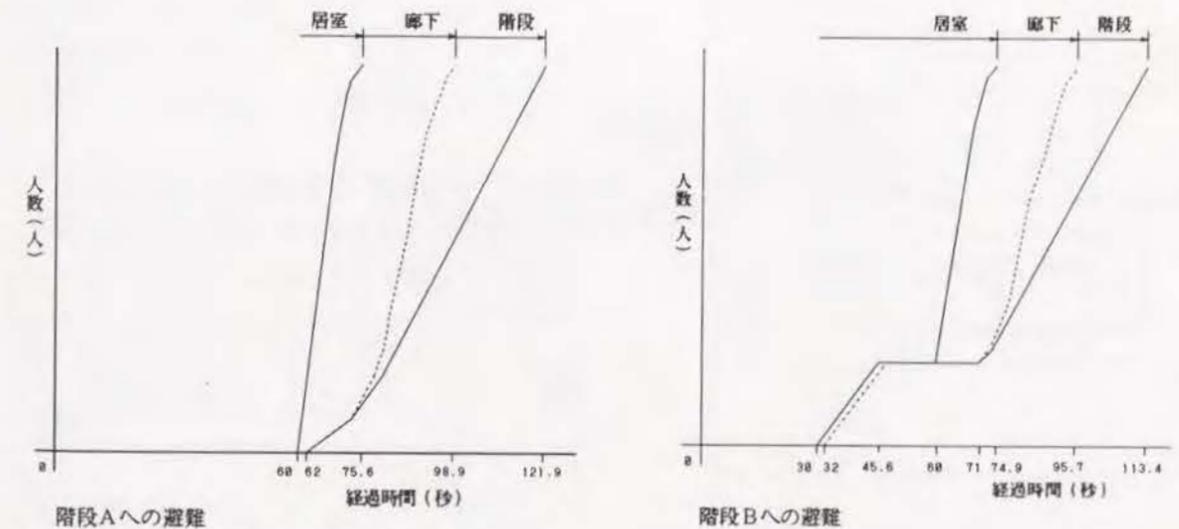


Figure 8-9 避難状況のグラフ表示

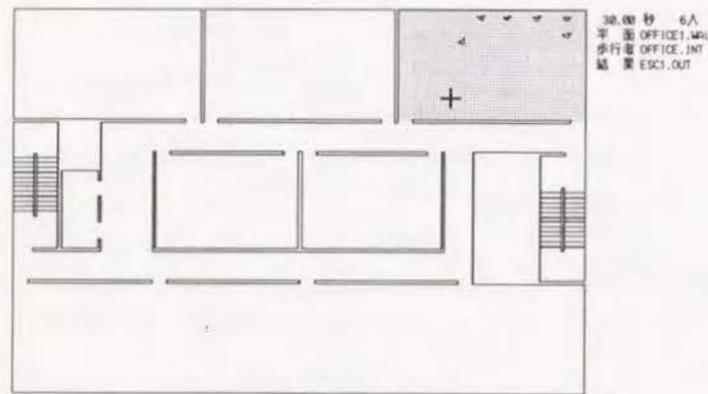
以上の結果から廊下及び階避難時間をそれぞれの許容値と比較し、安全性の判定を行い、それらをまとめたものが次の Table 8-5 である。

	廊下避難			階避難		
	廊下避難時間	廊下許容避難時間	判定	階避難時間	階許容避難時間	判定
階段A	59.88 秒	110.56 秒	OK	121.88 秒	221.12 秒	OK
階段B	81.40 秒	110.56 秒	OK	113.40 秒	221.12 秒	OK

Table 8-5 廊下避難及び階避難の判定

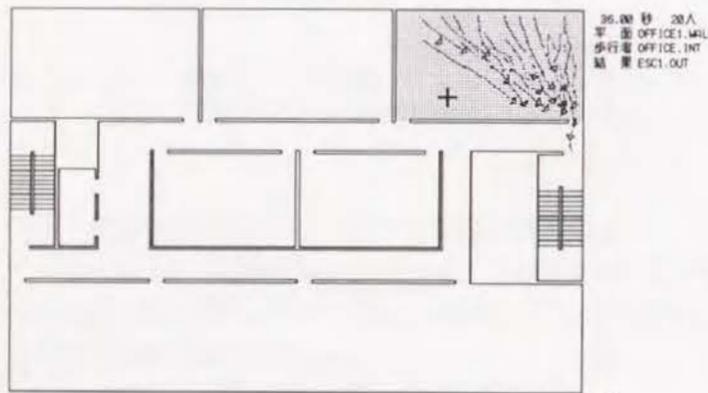
シミュレーション例1 (最短経路上の歩行)

各居室内の人口密度、歩行速度、避難開始時間に関しては、「新・建築防災計画指針」に基づく判定方法と同一条件でシミュレーションを行った例を以下に示す。歩行経路に関しては、各事務室内の歩行者は避難階段への経路を知っており、最短経路上を歩行するものとしている。このシミュレーションでは使用されない出口が発生し、「防災評定」において、各歩行者は最寄りの出口から避難することとしている仮定と異なる状況が発生している。従って、居室避難時間は「防災評定」と異なる結果が起こっているが、廊下で滞留が発生するため、階避難時間は大差の無い値となっている。このシミュレーション例の後に、各居室から廊下及び階段への流出人数と時間の経過をグラフ (Figure 8-11) により表す。



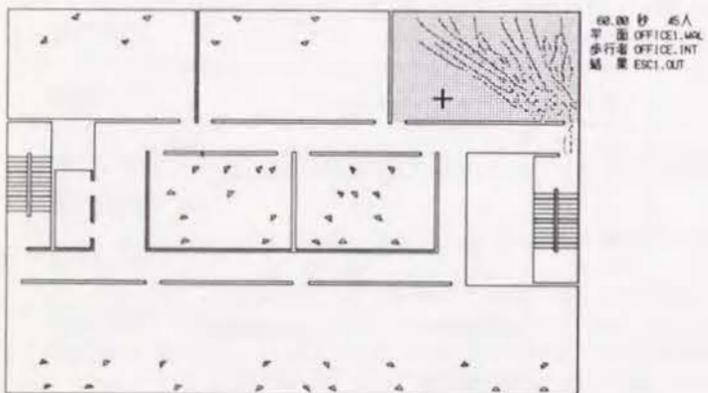
時刻=30.0秒

事務室3において時刻=0.0秒で火災発生 (■:火災領域、+:出火点)
事務室3内の歩行者は火災発生を認知して避難を開始する。



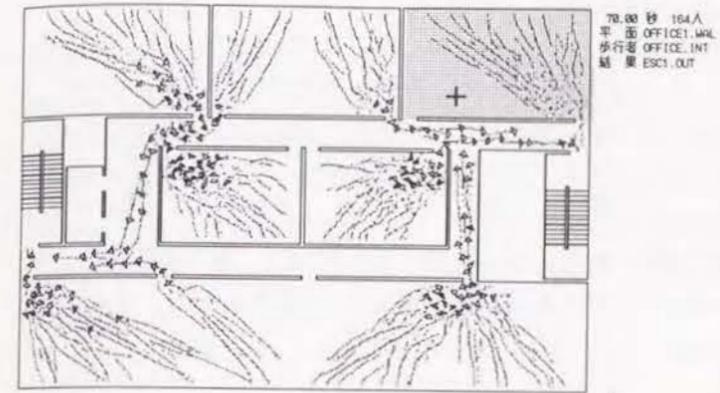
時刻=36.0秒

火災を認知した事務室3内の歩行者は、事務室3から最も近い避難口である階段Bへと避難を行う。



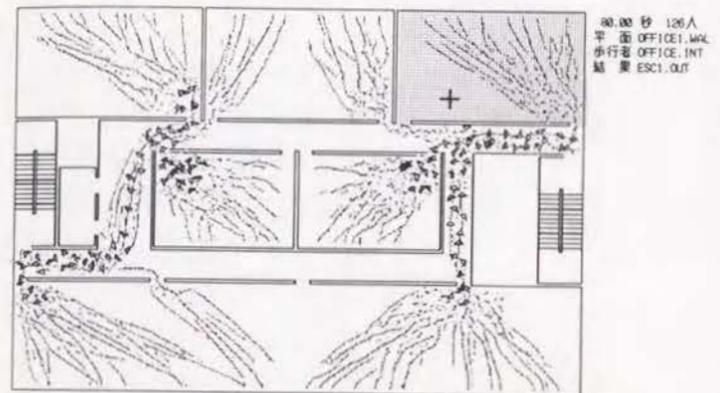
時刻=60.0秒

ビル内で火災発生を認知。各事務室内の歩行者は、避難を開始する。



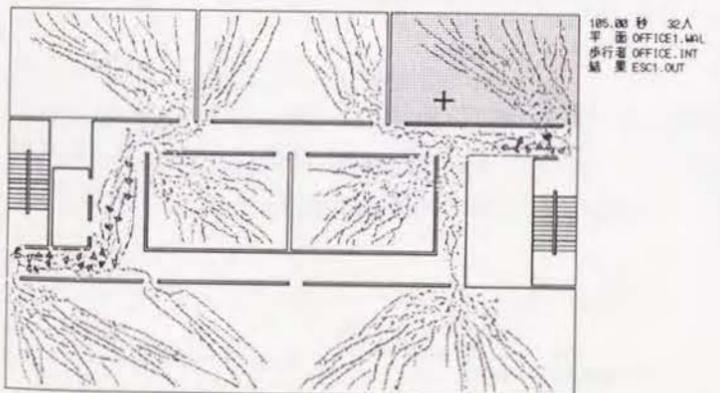
時刻=70.0秒

それぞれ、発生位置から階段A又はBへの最短経路上を歩行して避難している。



時刻=80.0秒

避難のため、階段に歩行者が殺到したため、階段室前は非常に混雑している。



時刻=105.0秒

大半の歩行者が避難を終えた。

Figure 8-10 事務所ビル基準階における避難シミュレーション例1

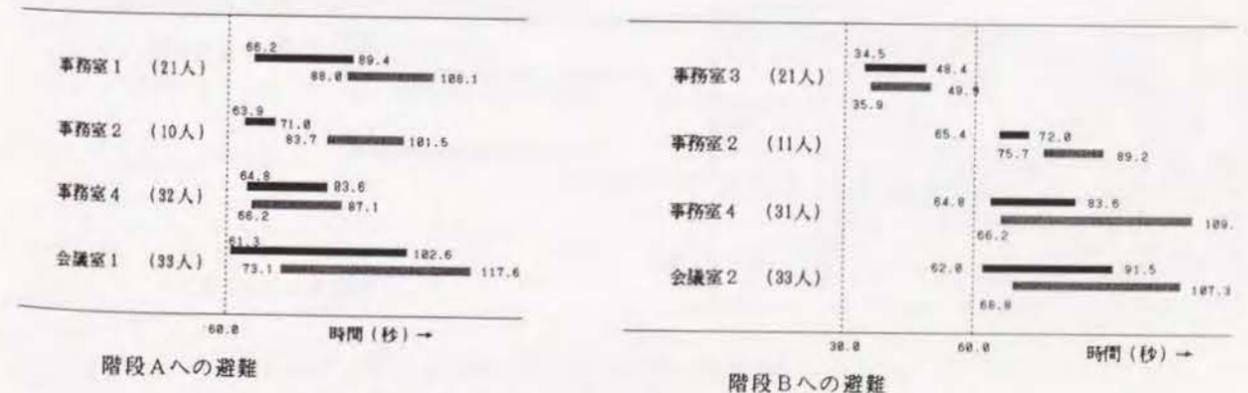
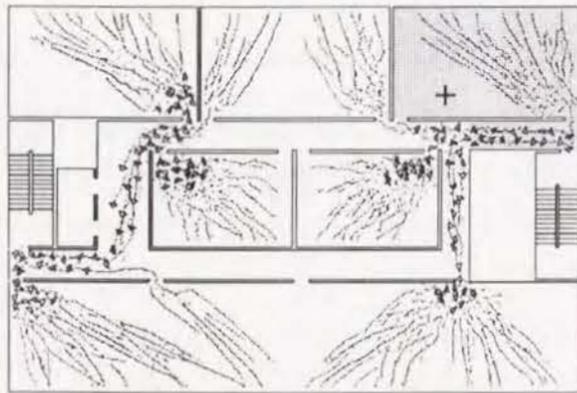


Figure 8-11 各居室から廊下及び階段への流出人数及び時間

シミュレーション例2 (途中で目的地を変更する最短経路歩行)

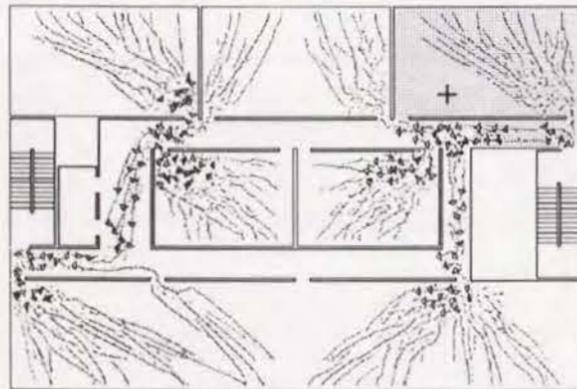
事務室3で時刻0.0秒に出火し、時刻75.0秒に事務室3の前の廊下に火煙が拡がり、階段Bへの通路が断たれ、以後は階段Aだけにより避難を行うシミュレーション例を示す。「新・建築防災計画指針」ではこの様に一方の避難路が断たれる状況を想定した避難計算を行っていないが、現実にはこのような状況が発生する可能性も考えられる。このシミュレーション例により、「新・建築防災計画指針」に基づく避難計算以外の状況を想定した避難のシミュレーションも再現可能であることを示す。75.0秒に火煙が拡がる状況を想定した理由は、階段Bを目的地として進んできた歩行者が、階段Bの手前で火煙を発見し、目的地及び歩行経路を変更して避難する行動を再現可能であることを示すためである。尚、75.0秒以前の状態はシミュレーション例1と同様であるのでここでは掲載していない。



75.00 秒 147人
平面 OFFICE2.WAL
歩行者 OFFICE.INT
結果 ESC2.OUT

時刻=75.0秒

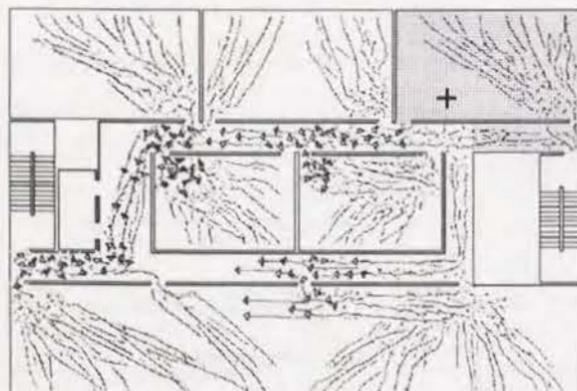
事務室3で発生した火災によって、前の廊下まで火煙が拡がる。
(■: 火災領域、+: 出火点)
このため、階段Bへの経路が通行不能となる。



76.00 秒 143人
平面 OFFICE2.WAL
歩行者 OFFICE.INT
結果 ESC2.OUT

時刻=76.0秒

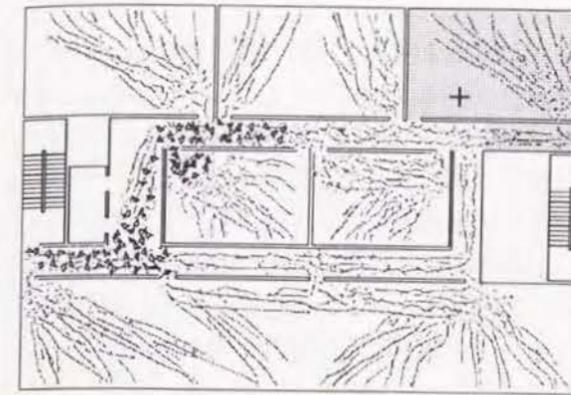
火災領域内にいる歩行者は、なるべく早く火災領域外へ脱出しようとするので、そのまま階段Bへ向かう者と、Uターンをする者とに分かれる。



85.00 秒 130人
平面 OFFICE2.WAL
歩行者 OFFICE.INT
結果 ESC2.OUT

時刻=85.0秒

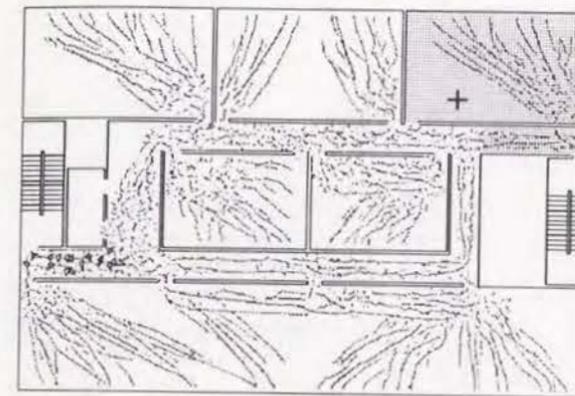
階段Bへの経路が通行不能であるため、歩行者は安全な階段Aより避難を行う。



100.00 秒 82人
平面 OFFICE2.WAL
歩行者 OFFICE.INT
結果 ESC2.OUT

時刻=100.0秒

避難のため、階段Aだけに歩行者が殺到したため、階段Aの前の廊下は非常に混雑している。



140.00 秒 16人
平面 OFFICE2.WAL
歩行者 OFFICE.INT
結果 ESC2.OUT

時刻=140.0秒

全ての歩行者は火災領域を避け、安全な階段Aより避難を行っている。大半の歩行者が避難を終えた。

Figure 8-12 事務所ビル基準階における避難シミュレーション例2

このシミュレーション例における、各居室から廊下及び階段への流出人数と時間の経過の関係を、グラフにより表すと、Figure 8-13の通りである。この例では、階段Bへの避難は75.0秒に火災が廊下に拡がるまでの短時間であり、避難者数も少数であるので、階段Aへの避難だけを図示した。

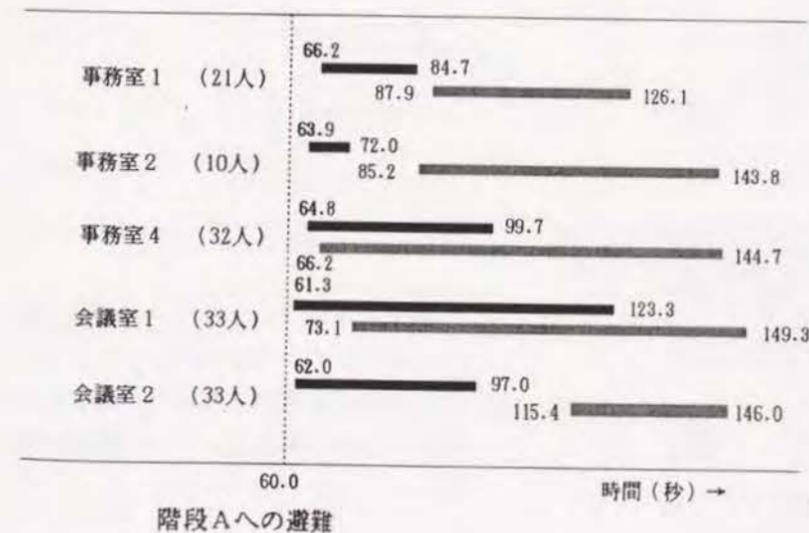
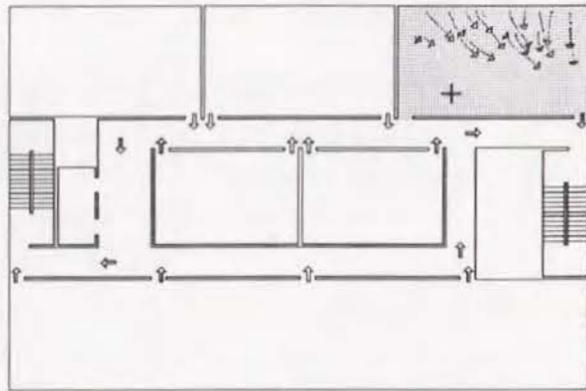


Figure 8-13 各居室から廊下及び階段への流出人数及び時間

シミュレーション例3 (誘導標による探索歩行)

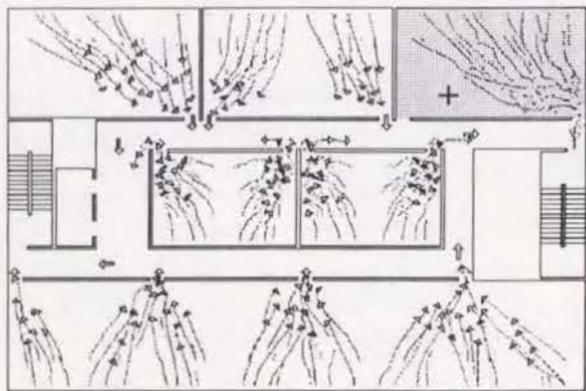
これまでの2つのシミュレーション例は歩行経路を知っており、最短経路を歩行する場合のシミュレーションであったが、ここでは、経路を知らない歩行者が誘導標の指示に従って避難するシミュレーションの例を示す。誘導標は以下の図中では矢印で示されており、それぞれ各居室の出口、階段室前、及び廊下のコーナー部に配置され、避難階段の方向を示している。居室から廊下への出口には、現実の建物においては、誘導標は設置されていないが、ここでは、これらの出口はそれぞれ避難階段への歩行経路を指示するサインとして歩行者に認識されるものと仮定し、居室からの各出口にも誘導標のデータを与えた。これにより、居室内の歩行者はそれぞれの位置から最も近い誘導標の指示に従い、避難階段への経路を歩行する。結果として「防災評定」で仮定されている「歩行者が最寄りの出口から出る」という歩行経路と同様の経路をとることになる。



32.00 秒 20人
平面 OFFICE3, WKL
歩行者 OFFICE, INT
結果 ESC3, OUT

時刻=32.0秒

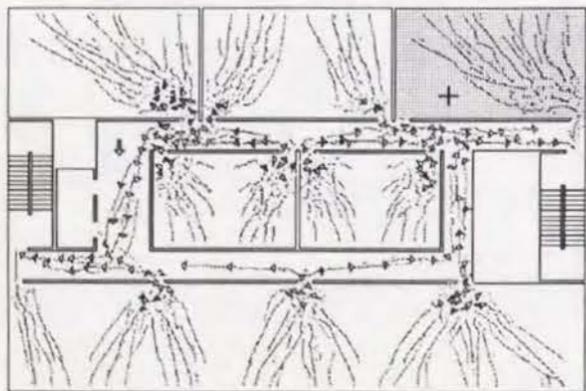
事務室3において時刻=0.0秒で火災発生(■:火災領域、+:出火点)。事務室3内の歩行者は火災発生を認知して時刻=30.0秒に避難を開始する。この事務室3の歩行者の避難に関しては、シミュレーション例1及び2と同様の結果となった。



64.00 秒 171人
平面 OFFICE3, WKL
歩行者 OFFICE, INT
結果 ESC3, OUT

時刻=64.0秒

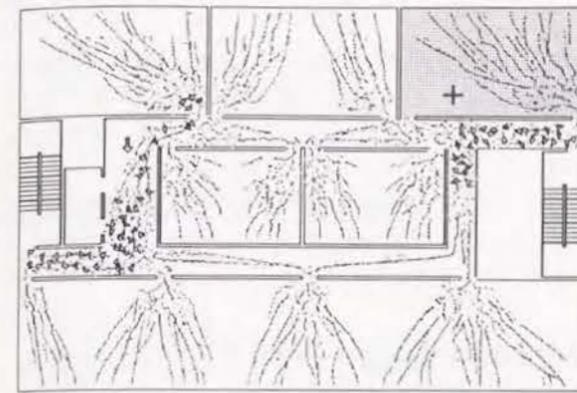
非出火室(事務室3以外の居室)の歩行者も火災を認知し、時刻=60.0秒に避難を開始した。誘導標の指示に従い、各歩行者から最短距離にある出口に向かっていく。



71.00 秒 162人
平面 OFFICE3, WKL
歩行者 OFFICE, INT
結果 ESC3, OUT

時刻=71.0秒

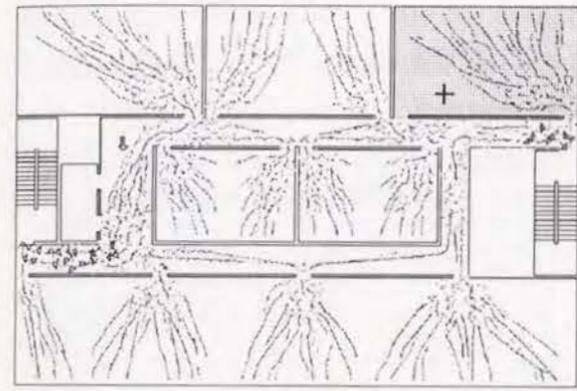
階段室前及びコーナー部分の廊下で滞留が起きている。滞留が起きている付近に出口がある居室からの避難がこのために遅れる。特に事務室1からの避難が遅れる。



95.00 秒 79人
平面 OFFICE3, WKL
歩行者 OFFICE, INT
結果 ESC3, OUT

時刻=95.0秒

居室避難がほとんど完了したが、階段室前の廊下で滞留が起こっている。



110.00 秒 26人
平面 OFFICE3, WKL
歩行者 OFFICE, INT
結果 ESC3, OUT

時刻=110.0秒

大半の歩行者が避難を完了した。

Figure 8-14 事務所ビル基準階における避難シミュレーション例3

このシミュレーション例における、歩行者の各居室からの流出及び階段室への流入を、時間の経過と共にグラフに表示すると以下の通りである。

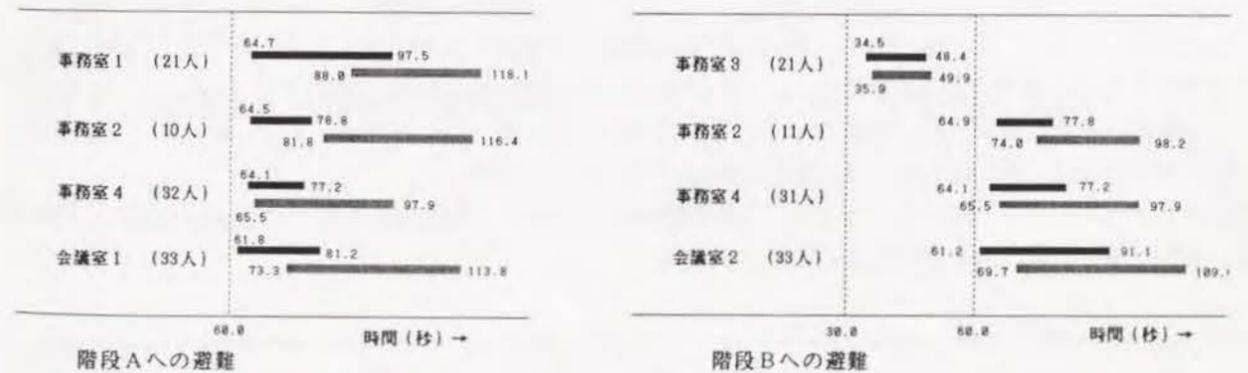


Figure 8-15 各居室から廊下及び階段への流出人数と時間

事務所ビル避難シミュレーション結果

ここでは小規模な事務所ビル平面における避難行動に関して、「防災評定」に基づく避難時間の計算例を示し、更に以下の3通りの状況を想定してシミュレーションを行った。

1. 歩行者が最短経路を通過して2ヶ所の階段から避難する。
2. 歩行者が最短経路を通過して2ヶ所の階段から避難しようとするが、火災の拡大により避難経路を変更し、大部分の歩行者が階段Aから避難する。
3. 誘導標の指示に従って避難する。

これらのシミュレーション結果と、「防災評定」に基づく避難時間計算結果を比較すると、Table 8-6 に示す通りとなる。居室避難に関しては、「防災評定」では各室内の歩行者は最寄りの出口から室外に出ることとしているが、シミュレーション例1及び2では最短経路上を歩行することとしているので、使用されない出口が発生している。事務室1及び会議室前の廊下で滞留が発生し、それによりこれらの居室避難時間が許容避難時間よりも長くなっている。しかし、結局階段室前や廊下で滞留が発生しており、階避難時間は互いに近い値となっている。

方法	居室避難 [秒] (出火室: 事務室3)					廊下避難 [秒]		階避難 [秒]		
	事務室1	事務室2	事務室3	事務室4	会議室1	会議室2	階段A	階段B	階段A	階段B
防災評定	15.6	9.4	15.6	11.7	12.2	12.2	59.9	51.4	121.9	113.4
シミュレーション例1	29.4	12.0	18.4	23.6	42.6	31.5	56.3	47.7	117.6	109.7
シミュレーション例2	24.7	12.0	18.4	39.7	63.3	37.0	88.0	—	149.3	—
シミュレーション例3	37.5	18.8	19.1	20.8	21.2	31.1	56.3	53.2	118.1	114.4
許容避難時間	18.3	18.3	18.3	31.7	14.6	14.6	110.5	110.5	221.1	221.1

Table 8-6 防災評定及びシミュレーション結果による避難時間の比較

これらのシミュレーション結果から、平面内の階段室A及びBのそれぞれの入り口における歩行者の流動係数を測定すると、以下の表の通りである。「防災評定」で、歩行者の流動係数を 1.5 人/m・sec として仮定しているが、それに非常に近い値になっている。このことから、このモデルによるシミュレーションの妥当性が確認できる。尚、階段室入り口の有効幅を 1.2m として計算した。

以上のシミュレーション結果により、単に避難時間ばかりでなく、階段室前や廊下の混雑する場所も発見することができ、防災計画に有効であることを立証した。

	流動係数 [人/m/秒]		
	シミュレーション例1	シミュレーション例2	シミュレーション例3
階段A	1.61 (87人 / 70~115秒)	1.62 (136人 / 70~140秒)	1.54 (83人 / 70~115秒)
階段B	1.48 (71人 / 70~110秒)		1.38 (58人 / 75~110秒)

Table 8-7 各シミュレーション例毎の階段室入り口における流動係数

8.4 シミュレーション結果

この節では以下の誘導と避難のシミュレーション例を示した。Figure 8-16 においてそれぞれの例で使用したモデル中の部分を図示する。

1. 手取及び白峰迷路に誘導標を設置した場合の歩行
歩行者は誘導標の指示に従い、行き止まりに陥ることなく目的地に到達し、誘導標による歩行モデルの妥当性を示した。
2. 小規模な事務所ビルにおける火災時の避難
「最短経路歩行」、「火災拡大による経路変更」、「誘導標による歩行」の3通りの状況におけるシミュレーションを行い、「新・建築防災計画指針」に基づく計算結果と比較し、本モデルの妥当性を示した。更に「新・建築防災計画指針」では想定されていない状況の避難行動の再現も可能であることを示した。

これらは比較的単純な誘導と、避難経路を知っている場合の避難例であった。このような場合以外に、もっと複雑で大規模な平面において避難経路も解らない群衆の避難も考える必要があると思われるが、一応、この2例で簡単な誘導及び避難の問題も扱うことが可能であることを立証した。

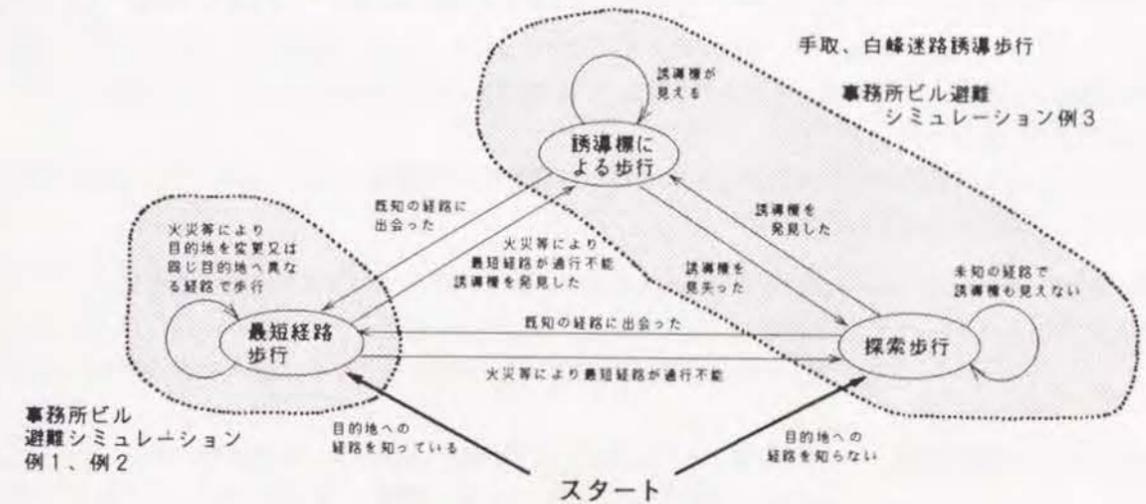


Figure 8-16 歩行状態の遷移図中で、シミュレーション例により使用された部分

引用文献

1. 岡崎甚幸, 松下聡, 国枝毅: 歩行経路選択に関するシミュレーションモデルの研究, 日本建築学会北陸支部研究講演梗概集, 1986年6月, pp. 325-328
2. 岡崎甚幸, 松下聡: 建築空間における歩行のためのシミュレーションモデルの研究 その5 探索歩行及び誘導標識による歩行, 日本建築学会論文報告集第302号, 1981年4月, pp. 87-93
3. 伊理正夫, 古林隆: ネットワーク理論, 日科技連出版社, 1976年
4. 日本建築センター: 新・建築防災計画指針 1985年版, 日本建築センター, 1985年

第1章のまとめ

この章では、心理学関係の文献において動物を使った迷路学習理論から探索歩行特性を探り、ロボット工学及び建築計画関連の文献から現実の世界における探索歩行モデル作成のための課題を探った。

探索歩行のモデル化に関しては、当初は心理学における迷路学習理論に見られる接近行動、迂回行動、認知地図の考え方にに基づき、モデルを構築しようと考えた。

ところが、実験を繰り返しているうちに接近行動及び迂回行動には左回りと右回りが見られることが判明した。認知地図については、まだ不完全と思われるが、実験結果から、歩行者はこれから進もうとする経路のイメージを持って歩行すると仮定し、それを歩行者の歩行方針として「左回り接近」、「右回り接近」、「左回り迂回」、「右回り迂回」の何れかを持ち、それに従って歩行経路を選択すると考えた。

しかし、歩行方針は必ずしも歩行の最初から最後まで一定ではなく、歩行者は状況の変化により、歩行方針を変更していることが実験結果から判明した。歩行方針を変更させる状況変化は、以下の4通りがあることを実験結果から確認した。

行き止まりに陥った場合

既通過地点に戻った場合

そのまま進むと目的地から離れる場合

状況変化は無いが、そのままうまく行けそうにないと言う不安を持っている場合

これらのうち、「状況変化は無いが、そのままうまく行けそうにないと言う不安を持っている場合」の歩行方針の変更については、明確な傾向を発見できなかった。他の3つの状況変化に対し、歩行方針を変更する場合の分析だけに止まった。

迷路歩行実験において観察された被験者の歩行パターンは数種類に分類されたが、歩行パターンに影響を与える要因として以下の4通りが発見された。

経路の記憶 ----- 歩行者が通過した経路を記憶し、なるべく既通過経路を通らない。

歩行方針 ----- 歩行者が「左回り接近」、「右回り接近」、「左回り迂回」、「右回り迂回」の何れかの歩行経路イメージを持ち、それに従って歩行経路を選択する。

前進傾向又は後戻り傾向 --- 歩行者が「そのまま進むと目的地から離れる」状況変化に対し、歩行方針をそのままの方向に迂回するように変更し、前進し続ける傾向を「前進傾向」とし、「後戻り傾向」はそれに対して、反対方向に迂回するように歩行方針を変更し、後戻りする傾向である。

直進傾向又は屈進傾向 ----- 目的地方向に接近しているとき、同じ向きに曲がるコーナーが複数見える場合にできるだけ直進しようとする傾向を「直進傾向」とし、「屈進傾向」は逆である。

これら4通りの要因の中、「経路の記憶」は全被験者に共通に見られ、歩行パターンの被験者毎の相違には関与しないと考えられる。「歩行方針」は状況変化に応じて変化するが、残りの2つの傾向が変化する明確な状況は実験結果からは発見されず、これらは各歩行者の個人的な特性であり歩行途中で変化するものと考え、これらの何れの傾向を持っているかにより、歩行パターンの違いが発生すると結論付けた。

以上の実験結果の分析をもとに探索歩行のモデル化を行った。歩行者を、状況変化を入力とし、入力に対して歩行方針を変更し、それに基づく適当なコーナー選択を出力とするシステムとしてアルゴリズムを作成し、モデル化した。個人的特性として、シミュレーション開始時に「歩行方針」、「前進傾向又は後戻り傾向」、「直進傾向又は屈進傾向」の3通りの要因を初期条件としてデータを与えシミュレーションを実行し、実験で観察された大部分の歩行パターンの再現に成功した。

実験において観察されたがモデル化できなかった点が以下の3項目であり、今後の課題として残されている。

1. 「状況変化は無いがそのままうまく行けそうにないと言う不安を持っている」場合に歩行方針を変更する行動のモデル化ができておらず、従ってその様な行動の発生した歩行パターンの再現はできなかった。(手取 歩行経路 1, 4, 6, 7 白峰第2回 GROUP 7 白峰第3回 GROUP 1-5)
2. 混乱して同じ箇所を同道巡りするような行動のモデル化はできず、再現できなかった。(白峰第2回 GROUP 4, 5)
3. 後戻りアルゴリズムが十分に歩行パターンに対応できておらず、後戻りの際に被験者と同じ位置まで戻ることができず、途中の分岐点で別の経路を選択してしまった。(白峰第2回 GROUP 3)

項目1、2に関しては、明確な傾向を実験結果から分析できず、更に実験を繰り返し、分析を行う必要がある。項目3に関しては、他の歩行パターンにおいては実現できているので、特に、後戻りが長い場合の後戻りアルゴリズムを改良する必要がある。

この探索歩行モデルを実験用迷路だけでなく、現実の都市・建築空間における歩行に応用するため、経路を知っている場合の「最短経路歩行」、外部から情報を取り入れる場合の「誘導標による歩行」と組み合わせ、歩行者とその環境との関係に従って適当な歩行モデルを選択するシステムを開発し、迷路内に誘導標を配置した場合や、事務所ビルにおける避難行動の再現に成功し、歩行者の誘導、避難等の面で実用化できることを示した。

第II章 待ち行動

この章では待ち行動に関する群集歩行モデルについて述べる。待ち行動を扱っている既存の研究には、待ち行列理論、ネットワーク型のシミュレーション等が見られるが、これらは待ち空間における待ち人数及び待ち時間の数量的な算定に重点が置かれ、行動の質的な面に関して考慮されているものは少ない。本論では待ち行動を、数量的な扱いに止まらず、行動特性を分析し、可能な限り現実の待ち空間における歩行者の行動を再現できるモデルの開発を試みた。以下各節において、調査によって得られた待ち行動特性、待ち行動モデルのアルゴリズム、シミュレーション例について述べる。

9 待ち行動の特性

この節では、本研究による観察結果から待ち行動を分類し、更に待ち行動の分析結果から作成したモデルの概要について説明し、既存の研究とも比較し、本研究で開発したモデル¹の必要性を示す。

9.1 待ち行動の分類

待ち空間における歩行者の行動の特性を分析するため、鉄道駅、空港、デパート、事務所ビルなどで歩行者の行動を観察した。その結果、観察された歩行者の行動を、歩行者が辿る軌跡の型に基づいて3通りに分類することができた。その1つは、駅の切符売り場やホテルのフロント受付等で起こる型で、歩行者はカウンターに到着してサービスを受けた後、後方へ引き返して次の目的地へ進む。2つ目の型は駅の改札口等で、サービスを受けるまではカウンターと同様の歩行軌跡を辿るが、サービスを受けた後は引き返さず、そのまま前進してラッチの間を通り抜ける。3つ目はエレベーターホールなどの乗り物の乗降口において起こる型であり、乗り物が到着すると、降車する客が乗り物から降車し、降車終了後、乗車する客が乗り物に乗り込む。この3通り以外に、展示物の鑑賞や、ロッカーの荷物の出し入れなどの行動も考えられるが、この3通りの待ち行動モデルの応用により、近似した行動を再現することができ、第13節の例により、それを実証している。従って、この3通りの待ち行動モデルにより、町の中で一般的に見られる待ち行動の大部分は再現が可能と考え、それぞれのモデル化に取り組み、既存の磁場モデルに付加した。Table 9-1 でこれらの待ち行動の型とその実例について図を用いて説明する。

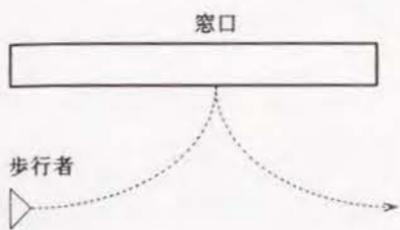
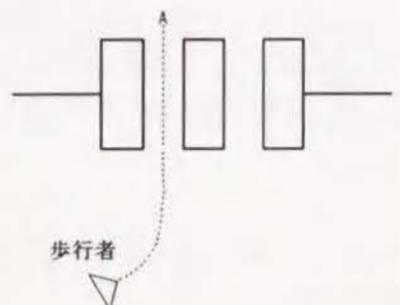
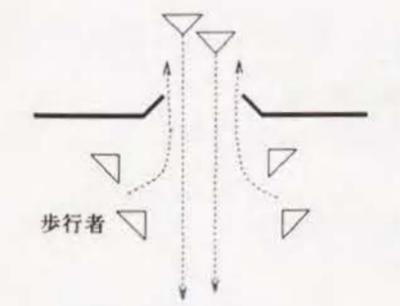
待ち行動の型	歩行者の行動	実例
カウンター型 	<p>歩行者はカウンター窓口の前に並んで、待ち行列を形成し、前から順にサービスを受けた後、待ち行列の後方又は横へ退去し、次の目的地へ向かう。展示物の鑑賞やロッカーの前での荷物の出し入れなど、一時的に立ち止まって何らかの用を済ませる行動もこの型を適用し、近似した行動を再現可能である。この行動の型を「カウンター型」と呼ぶことにする。</p>	<p>駅切符売り場 空港の搭乗受付 ホテルのフロント 病院の受付</p> <p>〔展示物の鑑賞〕 ロッカー 荷物一時置き場</p>
ラッチ型 	<p>サービスを受けるまではカウンター型と同様の行動をする。サービスを受けた後、カウンター型では、後方又は横に出て待ち行列から退去するが、ラッチ型ではそのまま前進して入退場する。歩行者は改札口、入場口等を通り入退場するが、混雑が激しいときは待ち行列ができる。この行動の型を「ラッチ型」と呼ぶことにする。</p>	<p>駅の改札口 博覧会等の入場口 スーパーのレジ</p>
乗降口型 	<p>乗り物の乗降口前で起こる。原則として、乗り物内の乗客が降車してから待ち客が乗車する。待ち行列の形成の仕方は、駅員等にコントロールされて整然と並び、乗車時も前列から順に乗車する場合と、無秩序に並び、特に乗車の順序も定まっていない場合の2通りの型が見られる。この行動の型を「乗降口型」と呼ぶことにする。</p>	<p>エレベーターホール 駅のプラットホーム バス乗り場</p>

Table 9-1 待ち行動の型の分類

9.2 待ち行動の分析とそのモデル化

ここでは3通りに分類されたそれぞれの型の待ち行動において更に詳細にどのような行動が起こるかを観察結果から分析し、そのモデル化を行う。例えばカウンター型の行動を細かく区分すると以下の7段階になる。

1. カウンターを発見し、空いている窓口又は待ち行列に接近する。
2. 待ち空間が混雑しているときに待ち行列に接近する場合、歩行者が並ぼうとする列の後尾に到着するの他の列が障害となる場合は、列の後方を迂回して目的の列に到達する。
3. 窓口又は待ち行列に到着し、静止する。
4. 列の前が空いたら1順前に詰める。
5. 最前列では窓口のサービス時間が経過するまで静止する。
6. サービス時間が経過すると、最前列の歩行者は待ち行列から退去し、次の目的地に向かって歩行する。
7. 待ち行列から退去する場合でも、混雑している状況では、一旦列の横へ出て、それから列の後方に出て、他の列を迂回しながら次の目的地へ向かって歩行する。

ラッチ型では退去の仕方が異なり、乗降口型では、乗車と降車に行動パターンが分かれ、サービスの仕方も異なって来るが、それぞれ、カウンターと同様に数段階に区分される。このことから考えて、歩行モデルにより待ち行動を扱う場合には、単に待ち行列中で静止している待ち人数の算定だけでなく、待ち行列に接近中の歩行者及び退去中の歩行者も考慮する必要があることが解る。更に、駅のコンコースなどでは、切符売場が交通空間の一部であり、切符を買わずに通過するだけの群衆の行動も考慮しなければならない場合も考えられる。このように考え、本研究では、3種類の待ち行動の型、カウンター型、ラッチ型、乗降口型のそれぞれに対して、数通りに細かく区分された段階の行動を可能とするモデルを作成した。それぞれのアルゴリズムの詳細については以後の各項で説明することとし、ここでは、それらの3種類をまとめた待ち行動全体のアルゴリズムの概要を Figure 9-1 のフローチャートにより示す。

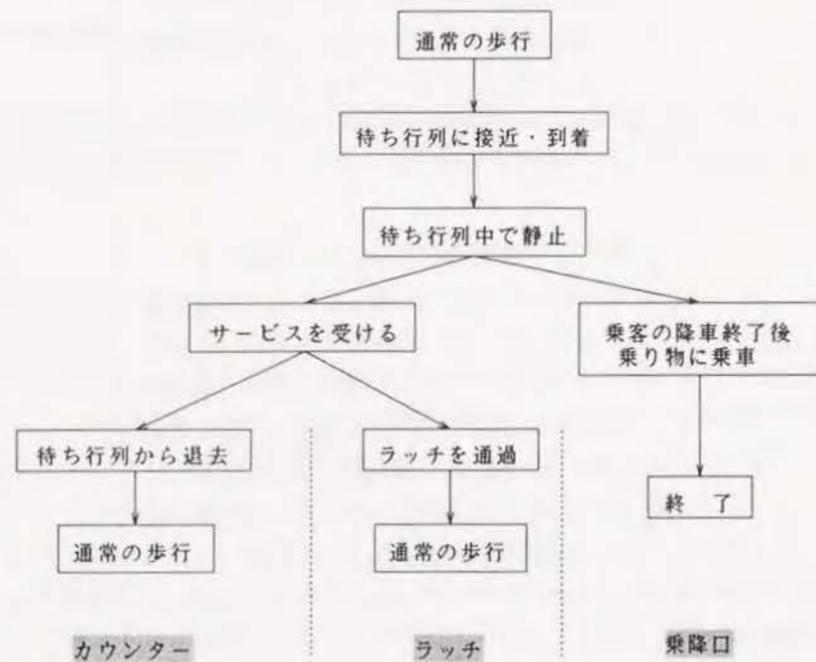


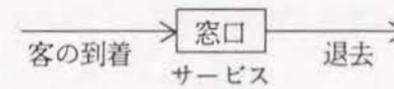
Figure 9-1 待ち行動アルゴリズムの概要

9.3 既存の研究

従来待ち空間における待ち人数や待ち時間の算定は、以下に述べる待ち行列理論²を用いて行われてきた。待ち行列理論で処理不可能な場合はシミュレーションにより処理される。このようなシミュレーションモデルの例には GPSS³ などがある。これらの理論やモデルでは待ち人数及び待ち時間の算定に重点が置かれているが、待ち行列の構成、歩行者同士の間隔などに目を向けたものに J. J. Fruin⁴ の研究がある。この節では、これらの従来の方法について簡単に説明し、本研究のモデルと比較し、更にこれらの長所、短所を明らかにし、本モデルの有用性を示す。

9.3.1 待ち行列理論

建築設計資料集成⁵ や新建築学体系⁶ で紹介されている方法である。以下の図式でモデル化され、客の到着、サービス時間、待ち時間、及び待ち人数を確率過程で表現する。



この図式に従い、客の到着分布、サービス時間分布をもとに、平均待ち人数、平均待ち時間を求める方法を簡単に説明する。

1. 客の到着分布 客の到着はランダムで、1人の客が到着した後、2人目以降は以前に到着した客に影響されないと仮定する。ある時間間隔 t 内に k 人の客が到着したとすると客の到着率 r は以下になる。

$$r = k / t \quad [\text{人/時間}] \dots \text{客の平均到着率}$$
2. サービス時間分布 これも客の到着分布と同様にランダムとし、時間間隔 t 内にサービス可能な人数を N とすると、サービス率 u は以下の式で表される。

$$u = N / t \quad [\text{人/時間}] \dots \text{サービス率}$$
3. 窓口数 窓口数は単一の場合と複数の場合がある。

以上の条件をもとに、単一窓口の場合の平均待ち人数及び平均待ち時間は以下の計算式により求められる。

$$\text{平均待ち人数 } L = \frac{r}{u - r} \dots \dots (\text{待ち行列中の人数} + \text{サービスを受けている人数})$$

$$\text{平均待ち時間 } W = \frac{1}{u - r} \dots \dots (\text{待ち行列中の待ち時間} + \text{サービス時間})$$

窓口数が複数の場合は計算が複雑になり、建築設計資料集成や、建築学体系ではグラフを用いて求める方法を紹介している。

この方法は簡単に待ち空間内の待ち人数と待ち時間を計算により求めることができるが、大きな欠点として、客の到着率 r が窓口サービス率 u を越えると、待ち行列が無量大となり、計算不可能となる。現実の建築物で、しばしば発生する一時的なラッシュ時の場合の計算ができないことになる。又エレベーターホールのように、一度に集団のサービスを行うような場合もこの方法では処理が困難である。

9.3.2 ネットワークモデルによるシミュレーション

空間をネットワークに抽象化し、各節点内の待ち人数や、節点から節点への歩行者の移動量を計算するモデルで、GPSS (General Purpose Simulation System)³、オートマトンモデル⁷などがある。これらのモデルでは、空間を幾つかの節点のつながりとしてのネットワーク形式で表現し、単位時間毎に乱数を用いて歩行者を発生させ、各時刻毎の節点内の待ち人数や待ち時間、節点間の歩行者の移動人数などを計算する。このようなネットワークモデルによると、待ち行列理論で計算不可能なラッシュ時のシミュレーションも可能であり、大まかな群集の流れを比較的短時間で数量的に表すには便利な方法と考えられる。しかし、序でも述べたように、空間が明確にこのような節点に分割できないような、一つの大きなホールの中に異なった機能を持った幾つかの部分が含まれていたり、待ち行動以外に通常の歩行者の流れが発生し、それらが複雑に交錯し合っているような状況のシミュレーションは困難である。

9.3.3 J. J. Fruin による待ち空間に関する研究

以上述べた2種類の理論又はモデルは、短時間で待ち空間内の待ち人数と待ち時間を算定するには便利な方法であるが、これらとは別の角度から Fruin⁴ は待ち空間の分析を行っている。本研究もモデルの作成に当たって参考となった点が大いにあった。

待ち行列の構成

Fruin は待ち行列を2種類に分類している。1つはカウンター窓口前などにできる行列的な待ちで、歩行者が規則正しく並び、前から順にサービスを受けるものである。もう1つは、エレベーターホールや駅のプラットフォームなどの乗降口前の無秩序な面的な待ち行列であり、乗降に際してもはっきりとした順序は定まっていないものである。この2種類の待ち行列は本研究における調査でも明確に観察された。

待ち行列前後間隔

カウンター前などの行列的な待ち行列では列の前後間隔は 48~50 cm で、ほとんど偏差が無い。本研究もこの値を採用し、カウンター及びラッチ型の待ち行動では、前後間隔 50 cm で並ぶようにモデルを作成している。但し、乗降口型では、エレベーター到着寸前の混雑時の状況では、更に短い間隔で並び、ほとんど前後左右の歩行者と体が触れ合う程度にまで接近している状況を観察しているため、本モデルでは左右 50 cm、前後 45 cm の間隔を取っている。

待ち空間内の密度

歩行者の周囲の緩衝空間として歩行者の周囲に円を描き、混雑の程度により、円の直径を4段階に区分している。(Table 9-2)

緩衝空間	空間の状況
直径 60 cm (0.3 m ² /人)	接触領域の限界 他人としばしば接触する。人が行列を通り抜けることができない。
直径 90 cm (0.7 m ² /人)	非接触領域の限界 立っているだけなら他人との接触を避けられる。
直径 105 cm (1.0 m ² /人)	快適領域の限界 立っている人々の間を体を横にして通り抜けることができる。
直径 120 cm (1.3 m ² /人)	通り抜け領域の限界 他人を邪魔しないで間を通り抜けられる。

Table 9-2 待ち行列中の緩衝空間

本研究で行ったエレベーターホールにおける調査では、歩行者同士の間隔が混雑時では約 60 cm 以下、閑散時では約 1 m 以上となる傾向が観察され、混雑時には Fruin の接触領域の限界値、閑散時には快適領域の限界値以上の値になる傾向があると思われる。

9.3.4 待ち行動に関する問題点と既存の研究のまとめ

ここまで述べて来た待ち行動に関する問題点として考えられるものをまとめ、既存の研究及び本研究のモデルでどの程度取り扱われているかを一覧表に示すと Table 9-3 のようになる。これにより、本研究のモデルでは、従来のネットワークモデルと Fruin の調査に本研究の調査結果を加え、より広範囲な問題に対処することが可能となることが知られる。

問題点 研究例	待ち人数、 待ち時間 の算定	一時的な ラッシュ の扱い	待ち行列の構成 (並び方、間隔等)	待ち行列への接近、 退去等、段階毎の 細かい行動	通過する群集流動 と待ち行列の交錯
待ち行列理論	○	×	×	×	×
ネットワークモデル	○	○	×	×	×
J. J. Fruin	×	×	○	×	△
本研究のモデル	○	○	○	○	○

Table 9-3 待ち行動に関する問題点と既存の研究との関係

(○:扱っている △:部分的に扱っている ×:扱っていない)

引用文献

1. 松下聡, 岡崎甚幸: 待ち空間を考慮した群集歩行的シミュレーションモデルの研究, 日本建築学会大会 学術講演梗概集, 1989年10月, pp. 819-820
2. 森村英典, 大前義次: 応用待ち行列理論, 日科技連出版社, 1975年
3. Gordon, Geoffrey. The Application of GPSS V to Discrete Systems Simulation. Prentice Hall, Inc., 1975
4. Fruin, John J. PEDESTRIAN Planning and Design. Kajima Institute Publishing Co. Ltd., 1974. 長島正充(訳): 歩行者の空間, 鹿島出版会, 1974年
5. 日本建築学会編: 建築設計資料集成5 単位空間Ⅲ, 丸善, 1981年, pp. 21-22
6. 岡田光正, 他: 新建築学大系13 建築規模論, 彰国社, 1988年
7. 渡辺仁史, 位寄和久, 池原義郎, 中島高史, 中村良三, 宇土正浩: 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, 日本建築学会論文報告集第298号, 1980年12月, pp. 89-97

10 カウンター前における待ち行動とアルゴリズム

この節ではカウンター前の待ち行動に関して、鉄道駅及び空港で行った調査結果について報告し、それをもとに作成したモデルのアルゴリズムを説明する。

10.1 調査結果

カウンター前の歩行者の行動を再現するために必要な以下の2項目について行動調査を行った。

窓口におけるサービス時間（駅乗車券販売機における乗車券購入所要時間）

列の前の空いたとき順に前に詰めるのに要する時間

これらの調査結果を以下に示す。

10.1.1 乗車券購入所要時間

京阪電鉄京都三条駅地下1階コンコースにおいて、乗車券自動販売機により乗客が切符を購入し、立ち去る行動をビデオカメラにより撮影し、その行動の分析を行った。その調査結果を一覧表にし、Table 10-1 及び Table 10-2 に示す。観察時には歩行者は1人で歩行している場合ばかりではなく、2人或いは数人連れの場合も見られたので、1人連れと2人連れの2通りの場合に分けて分析した、3人以上の場合はサンプル数が少ないためここでは除外した。

調査場所 京阪三条駅乗車券自動販売機前
 調査日時 1989年8月16日（水）夕刻
 サンプル特性 大文字送り火の見物客が大半で、駅に不慣れな乗客が多いと考えられる。

切符購入所要時間範囲 [秒]	平均時間 [秒]	標準偏差 [秒]	サンプル数 [人]
0.00 - 9.99	7.369	1.501	33
10.00 - 19.99	14.361	2.668	62
20.00 - 29.99	23.090	3.934	4
30.00 - 39.99	37.140	0.000	1
全体	12.631	5.211	100

Table 10-1 1人連れの場合の切符購入所要時間

切符購入所要時間範囲 [秒]	平均時間 [秒]	標準偏差 [秒]	サンプル数 [人]
0.00 - 9.99	8.895	0.891	4
10.00 - 19.99	16.436	2.738	33
20.00 - 29.99	24.595	3.086	34
30.00 - 39.99	33.372	2.803	18
40.00 - 49.99	45.195	2.244	8
50.00 - 59.99	51.153	0.172	3
全体	25.299	10.386	100

Table 10-2 2人連れの場合の切符購入所要時間

カウンター窓口のサービス時間はサービス種類、販売機の性能などにより差異が生じる。従ってこの調査を全ての場合に当てはめることはできないので、歩行モデルはこの様なサービス時間をデータにより数値で与え、その時間歩行者がカウンター前で立ち止まるようにしており、データを変更するだけで異なるサービス時間のカウンター前の待ち行動を可能にする。この調査では2人連れの場合は1人の場合のほぼ2倍のサービス時間となっている。同じ乗車券を2枚購入する場合はもっと短時間になるはずであるが、これは家族連れよりもアベックや友人同士が多いため、2人連れでも目的の駅が異なるためと考えられる。

10.1.2 列の前の空いてから、次の人が前に詰めるのに要する時間

カウンター前の行動において、単にサービス時間だけでなく、列の前の空いた場合に順に前に詰める時間の測定を駅と空港で行った。その結果、空港よりも駅の方が短時間で前に詰める結果が現れた。空港ではキャンセル待ちの客を除いて全員が座席を確保されているため急ぐ必要がなく、更に、駅の乗客よりも大きい荷物を携帯している場合が多いためと考えられる。

調査場所 京阪三条駅乗車券自動販売機前及び小松空港搭乗受付カウンター前
 調査日時 京阪三条駅 1989年8月16日（水）夕刻
 小松空港 1989年9月29日（金）午前
 サンプル特性 京阪三条駅 大文字送り火の見物客が大半で駅に不慣れな乗客が多いと考えられる。
 小松空港 一般旅行者。金沢市内からのバス到着時に混雑が見られる。

調査場所	平均時間 [秒]	標準偏差 [秒]	サンプル数 [人]
京阪三条駅の乗車券販売機	0.669	0.215	94
小松空港の受付カウンター	1.988	1.433	92

Table 10-3 列の前に詰める時間

10.2 アルゴリズム

調査結果を基に歩行者の行動パターンをモデル化すると Figure 10-1 のような図式で表される。図中の□で囲まれた部分は歩行者の歩行状態を示し、○で囲まれた部分は歩行状態遷移の契機を表している。この図式を□で囲まれた部分に分割し、それぞれのアルゴリズムを作成した。それらのアルゴリズムを総合すると、通常の歩行状態から、待ち行列に並び、サービス終了後待ち行列から退去し、通常の歩行に戻る一連の過程を再現することができる。

シミュレーションがスタートし、読み込んだデータ中に待ち空間のデータが含まれていると、歩行を開始する前に全ての待ち空間内に歩行者が並ぶ位置を仮定し、それを格子点で表す。カウンター型の待ち空間では、窓口前に 50 cm の前後間隔で格子点を設定し、この格子点の列が壁又は開口部と交差する手前まで格子点を配置する。壁や開口部と交差する直前の格子点は、歩行者が列の後方を迂回する空間を空けておくため、それらの格子点上には並ばないものとする。この様に設定された格子点を簡単なカウンター型の待ち空間の例で示すと Figure 10-2 の最初の図である。待ち行列に並ぶ歩行者はこの格子点上に静止するものとする。

以下にカウンター型待ち行動モデル (Figure 10-1) の各部分のアルゴリズムを示す。

10.2.1 [待ち行列形成] アルゴリズム

歩行者の目的地が、カウンター、ラッチ、又は乗降口の何れかの場合にその窓口又は待ち行列に接近し、到着すると静止する。

```

if 窓口が空いている
then 空いている窓口のうち最短距離の窓口に向かって歩行
    if 窓口に到着
    then アルゴリズム「静止」を実行
elseif 待ち行列ができている
then 最も短い待ち行列の最後尾を目的地とする
    then アルゴリズム「待ち行列迂回」を実行
        if 目的地に到着
        then アルゴリズム「静止」を実行
end
    
```

10.2.2 [静止] アルゴリズム

目的の待ち行列に到着した場合に静止して前が空くのを待つ。或いは窓口に着いた場合は静止してサービスの終了を待つ。

```

if 目的の待ち行列の最後尾に到着
then 待ち行列中で静止する
    then アルゴリズム「前進」を実行
elseif 窓口に着いた
then 静止してサービスの終了を待つ
    then アルゴリズム「退去」を実行
end
    
```

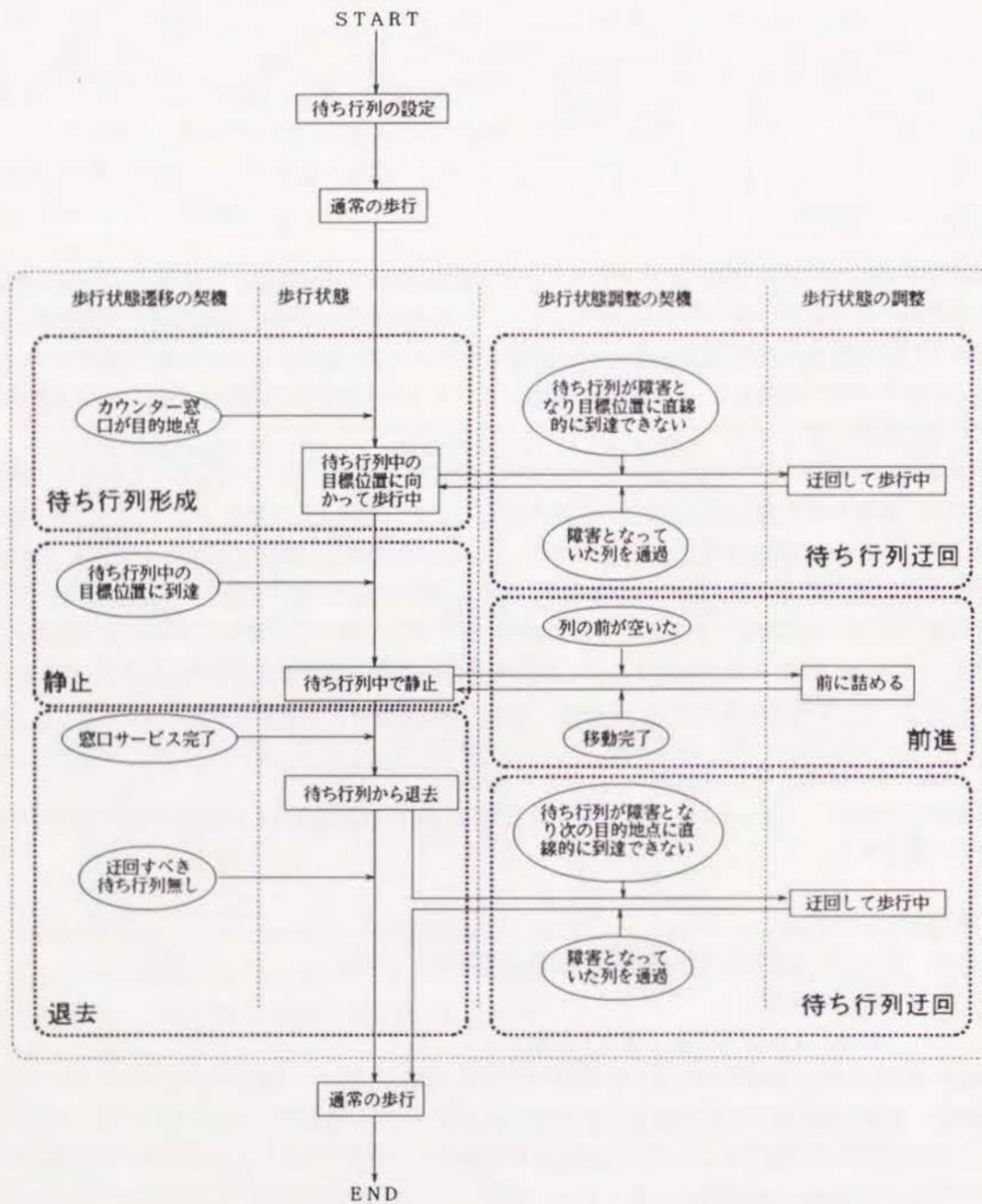


Figure 10-1 カウンター型待ち行動のモデル

10.2.3 [退去] アルゴリズム

窓口でサービスを受け終わったら待ち行列から退去し、次の目的地へ向かって歩行する。

```

if 窓口のサービスが終了した
then 列の横へでる (次の目的地の方向へ)
    then アルゴリズム「待ち行列迂回」を実行
end
    
```

10.2.4 [待ち行列迂回] アルゴリズム

歩行者が待ち行列に接近、又は待ち行列から退去し次の目的地に向かう場合に、他の待ち行列が障害となり、目的地に直接接近できない場合に障害となる待ち行列を迂回して目的地に向かって歩行する。

```

if 次の目的地又は待ち行列に向かうのに他の待ち行列が障害となる
then 障害となる列の最後尾を一時的な目的地として歩行
    if 障害となる列の最後尾に到着
    then 1行目に戻る
elseif 障害となる列がない
then 次の目的地又は待ち行列の最後尾に向かって歩行
end
    
```

10.2.5 [前進] アルゴリズム

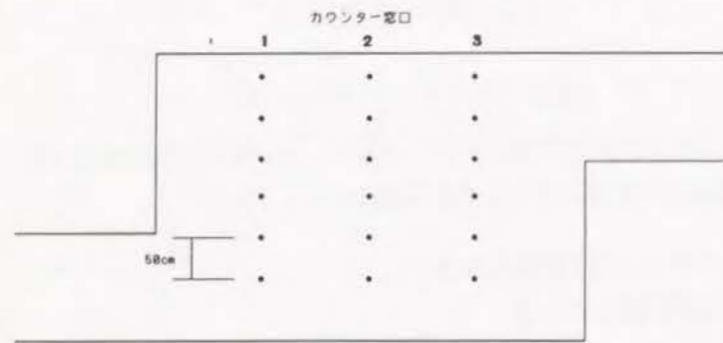
待ち行列に並んでいる場合に、列の一順前が空いたら前進して一順詰める。

```

if 待ち行列の一順前が空いた
then 一順前に詰める
end
    
```

10.3 シミュレーション例

単純なカウンター窓口のある待ち空間平面におけるシミュレーション例を用いて、歩行者の行動パターン及びモデルのアルゴリズムを説明する。



シミュレーション平面

図の中央が待ち空間で上部にカウンター窓口が3ヶ所並んでいる状況を考える。待ち空間内に各窓口前に前後間隔約50cmの格子点の列を想定し、待ち行列に並ぶ歩行者はこれらの格子点上に並ぶものとする。

時刻=7.0秒

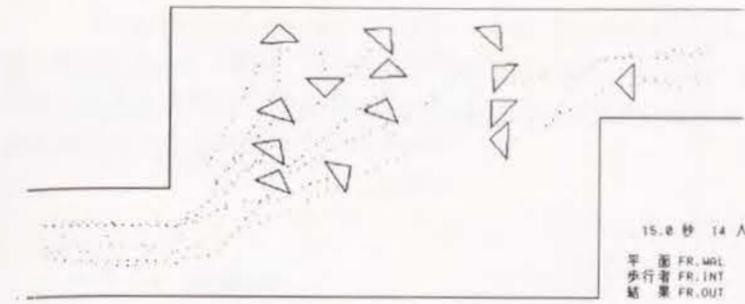
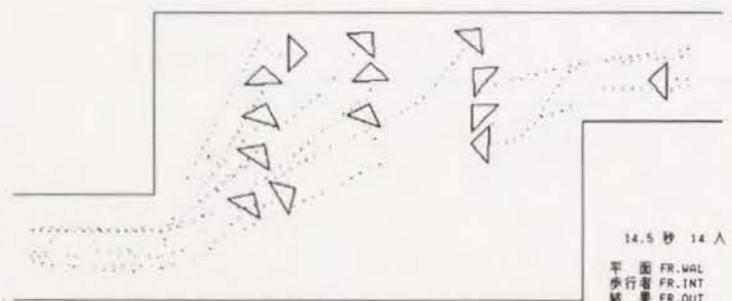
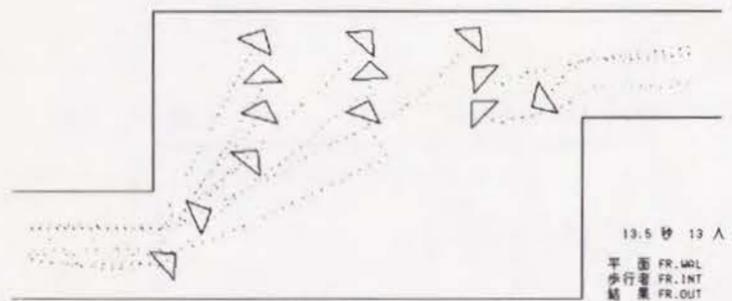
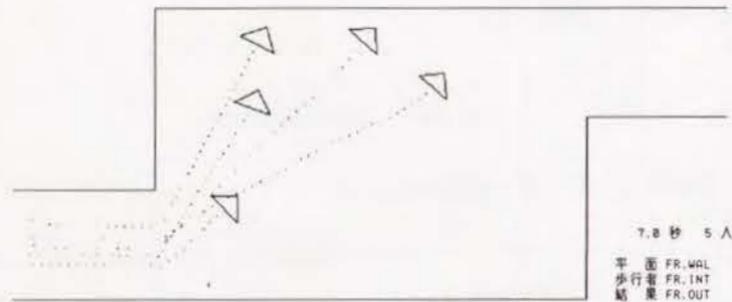
歩行者が発生し、順に空いた窓口前に並ぶ。空いている窓口がなければ、できるだけ短い列の後尾に並ぶ。

時刻=13.5秒

各列がだんだん長くなる。右端から発生した歩行者は待ち行列の後部に回り込む。

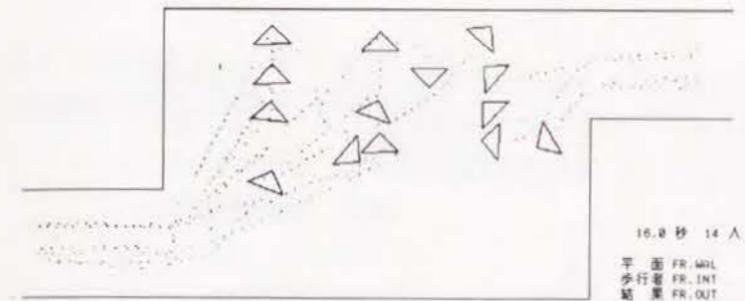
時刻=14.5秒

窓口1の最前列の歩行者はサービス時間(10.0秒として初期データが与えられている)が経過したので列の横へ出る。



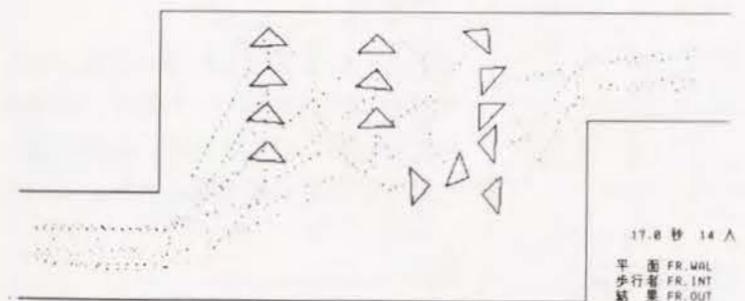
時刻=15.0秒

窓口1の列から横へ出た歩行者は列の後部へ進み、迂回して次の目的地に向かう。同時に列の2順目に並んでいた歩行者が最前列に詰めた。以後後列の歩行者が順に前に詰める。



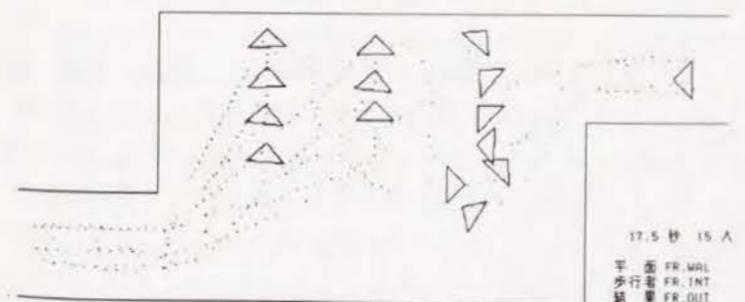
時刻=16.0秒

第1列から出た歩行者はほぼ列の最後部まで迂回した。第2列の最前列の歩行者も列から退去するところである。



時刻=17.0秒

第1、2列から退去した歩行者と、新たに待ち行列に接近する歩行者が対向している。



時刻=17.5秒

待ち行列から退去する歩行者と接近する歩行者がうまくすれ違いそれぞれの目的地に向かう。

1.1 ラッチの通過前後の行動とアルゴリズム

駅改札口における旅客の行動パターンと流動係数を調査した。旅客の種類については通勤通学者と旅行者とに区別し、更に、行動種類として入・退場の別について区別して、それぞれについて改札口の通過時間を測定し、それをもとに流動係数を算定した。尚この調査で行った金沢駅改札口は自動ではなく、駅員が改札を行うものである。

1.1.1 調査結果

駅改札口における流動係数を客の種類別及び入・退場別について測定すると Table 11-1 に示す通りである。

調査場所 JR 金沢駅改札口前
 調査日時 1990年6月28日(木) 夕刻
 サンプル特性 通勤通学者及び旅行者
 改札口有効幅 73cm

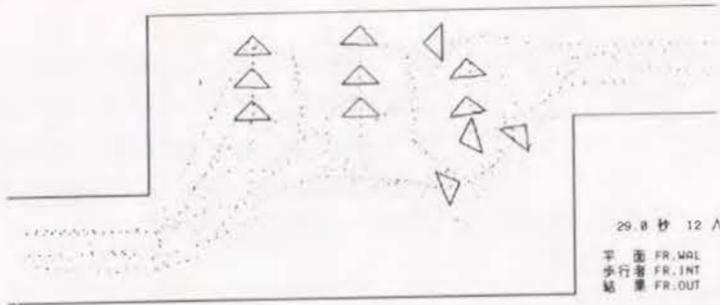
旅客種類	行動種類	通過時間計 [秒]	平均通過時間 [秒/人]	標準偏差 [秒]	流動係数 [人/m・s]	サンプル数 [人]
通勤通学	入場	409.66	0.971	0.161	1.411	422
	退場	145.72	1.026	0.152	1.335	142
旅行者	入場	138.11	1.212	0.155	1.131	114
	退場	114.35	1.121	0.183	1.222	102
全体	入場	685.14	1.044	0.195	1.312	656
	退場	260.07	1.066	0.172	1.285	244
平均	入場		1.092		1.271	
	退場		1.074		1.278	
	入退場		1.084		1.275	

Table 11-1 金沢駅改札口通過時間

この調査結果では通勤通学者の方が旅行者よりも流動係数が大きい結果が現れている。又、入場・退場の別については、通勤通学者では入場の場合の方が流動係数が大きく、旅行者では逆になっている。通勤通学者は、電車から降りて退場する場合の方が入場の場合よりも混雑度が大きく、そのため歩行速度が減少し、流動係数も入場時の方が退場時よりも大きくなったと考えられる。旅行者は、通勤通学者のような定期券を携帯せず、改札口で切符を切ることになり、当然改札口の通過時間が長くなり、流動係数が通勤通学者より小さくなる。同じ理由で、入場時の方が退場時より流動係数が小さくなる。

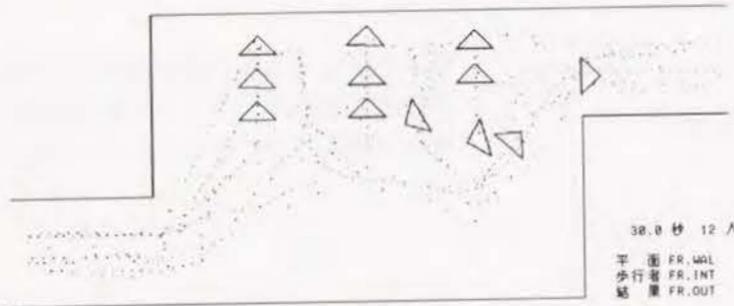
旅客を通勤通学者と旅行者の2種類に分類したが、観察時に何れか判別できない旅客もあり、それらは通勤通学及び旅行者の欄からは除外し、全体の欄では含めて計算しているため、表中の通勤通学者と旅行者の和が全体の数値とはならないので注意を願いたい。又、通勤通学者と旅行者のサンプル数が大きく異なるので、全体欄の数値は当然通勤通学者の方に片寄る。従って、平均欄を別に設け、通勤通学者と旅行者の平均通過時間と流動係数のそれぞれを足して2で割った数値を挙げておく。

時刻=29.0秒



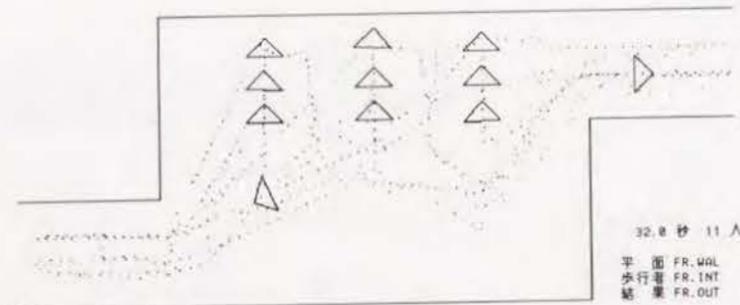
順に待ち行列への接近、退去が繰り返される。第3列から退去する歩行者は、次の目的地が左端にあるので列の左側へ出る。

時刻=30.0秒



待ち行列から退去した歩行者は、それぞれ列の後部を迂回して次の目的地に向かう。

時刻=32.0秒



待ち行列から退去した歩行者は、それぞれの目的地に向かって進み、列中の歩行者は順に前に詰める。以後同様の行動パターンが繰り返される。

Figure 10-2 カウンター窓口におけるシミュレーション例

このシミュレーション例では、平面上の各歩行者の待ち行列への接近、待ち行列の迂回、静止、前進、退去と言った各段階の行動を表示することができた。更に待ち行列から退去する歩行者と接近する歩行者の対向の様子(17.0秒前後)も再現できている。これにより、このモデルによりカウンター待ち空間における歩行者の行動を詳細に再現できることを実証した。又、この平面上で左端から発生して待ち行列に接近する歩行者は、待ち行列の後方から接近することになり、殆ど待ち行列を迂回する必要が無かったが、右端から発生した歩行者は待ち行列が短い場合(13.5秒前後)でも列の後方に回り込まねばならない。これは、カウンター待ち空間が左右の通路と接続する位置により動線が影響を受けていると考えられ、この様な平面形が歩行者の動線に影響を与える状況も表現可能であり、動線が重なったり、交錯したり、混雑する場所の発見にも役立つことを示した。

11.2 アルゴリズム

ラッチ通過時の行動をモデル化すると Figure 11-1 のような図式により示される。カウンター前の行動パターンとの差異は窓口サービス完了後待ち行列から退去していた行動が、そのまま前進してラッチを通過し、通常の歩行に移る点である。Figure 11-1 では太い点線で囲まれた「通過」の部分である。待ち行列の設定も、各ラッチの開口部の中点から 50cm 間隔で格子点を設定する点はカウンター型の場合と同様であり、簡単な例では、Figure 11-2 の最初の図の様になる。

ここでは、カウンターの場合と異なる「通過」の部分についてだけアルゴリズムを説明する。他の部分はカウンター型のアルゴリズム (Figure 10-1) の同じ名称の部分と同様である。

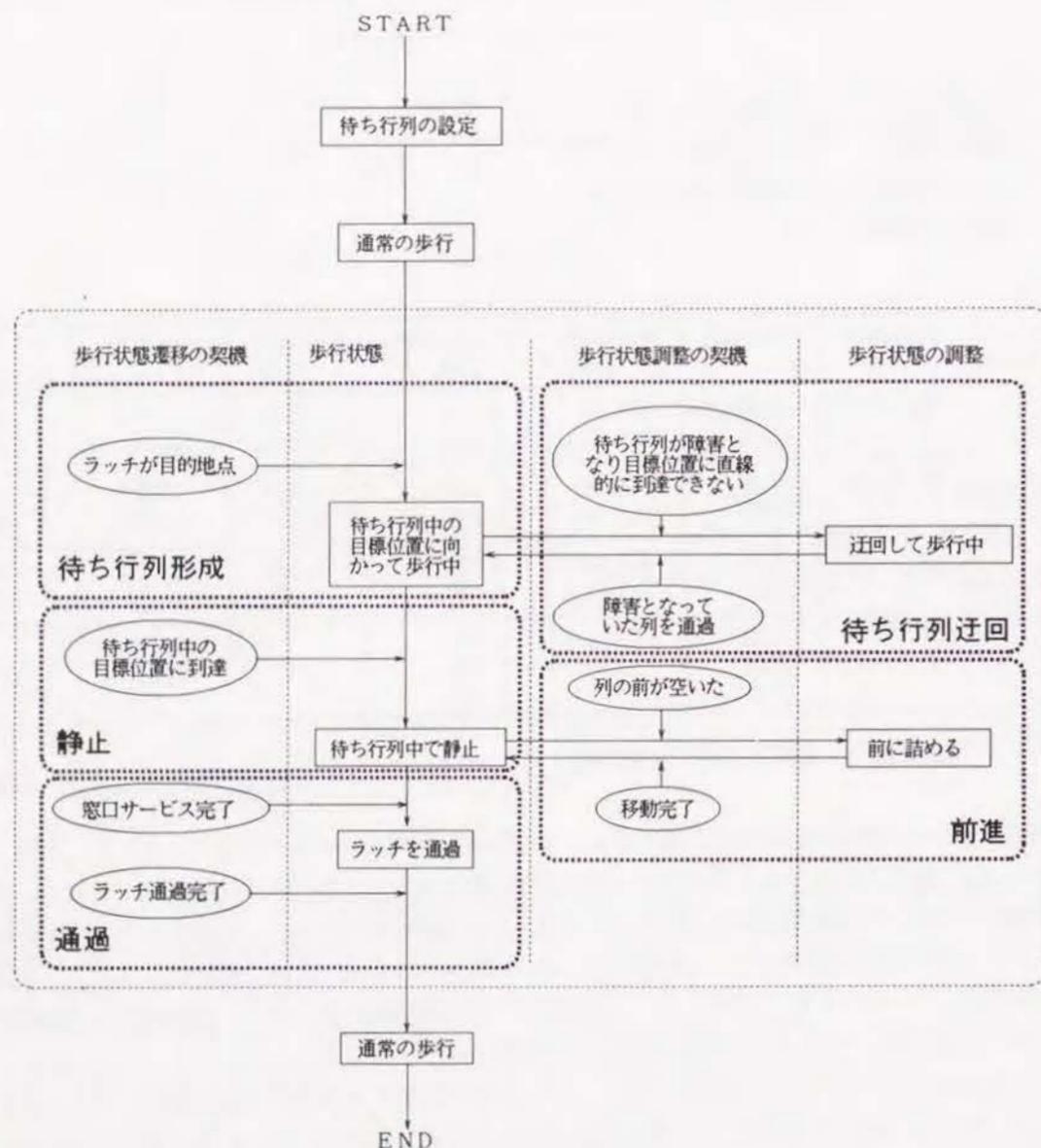


Figure 11-1 ラッチ通過時の行動アルゴリズム

[通過] アルゴリズム

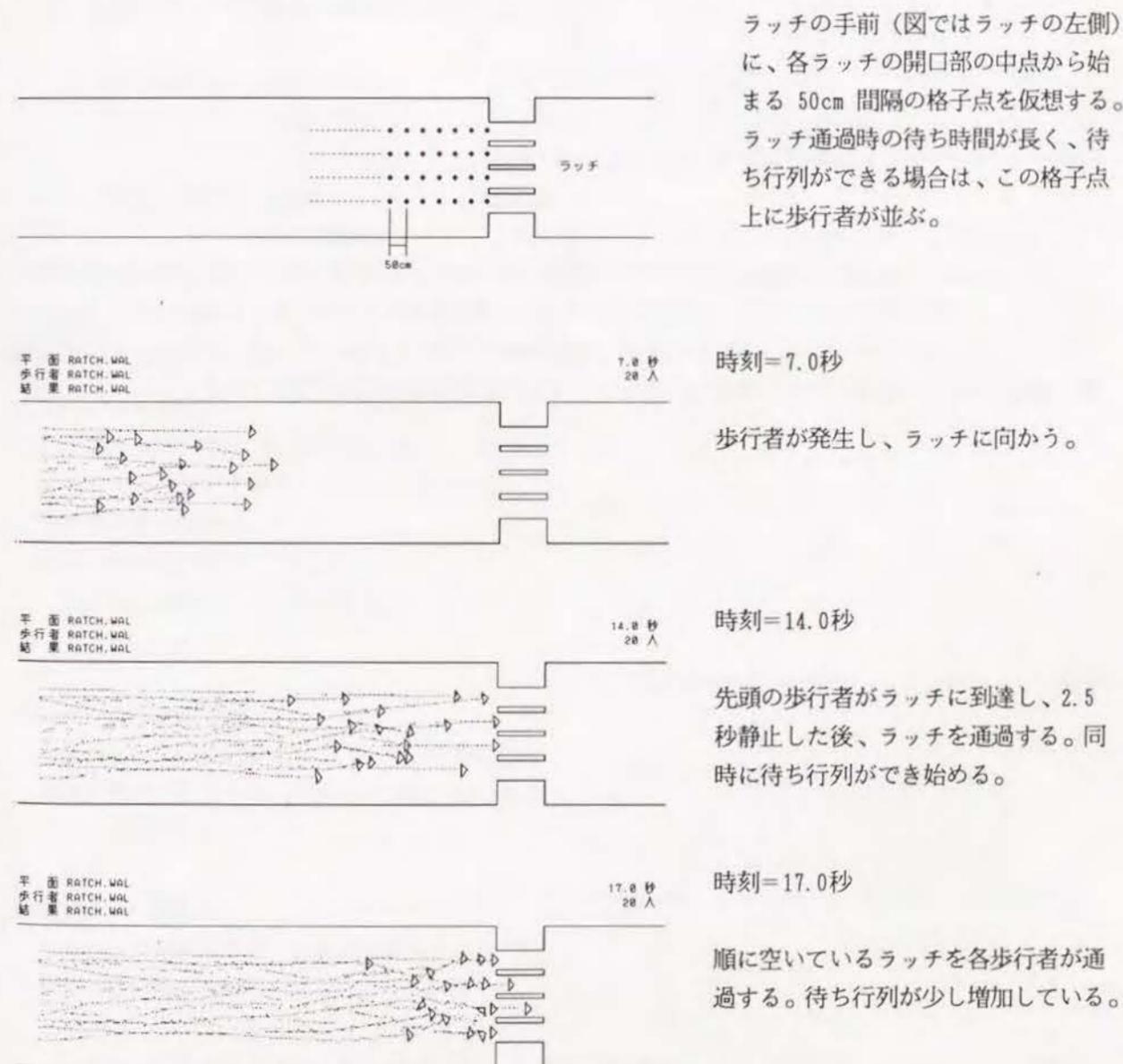
ラッチの手前で静止し、サービスが終了したらラッチを通過し、次の目的地に向かって歩行する。カウンター型待ち行動のアルゴリズム中の「退去」と置き換える。

```

if サービスが終了
  then 前方に進んでラッチの間を歩行する
       if ラッチを通過した
         then 次の目的地に向かって通常の歩行に移る
end
  
```

11.3 シミュレーション例

これは単純な直線通路に入場口としてのラッチがあり、歩行者が左端から 20 人発生し、ラッチを通過して右端へ行くシミュレーションである。このデータでは、待ち行列のできる様子を解り易くするため、ラッチの入り口で各歩行者が 2.5 秒静止するようにデータを与え、駅の改札口などよりも長く静止するようにしている。この例を用いてラッチ通過時の歩行者の行動を説明する。



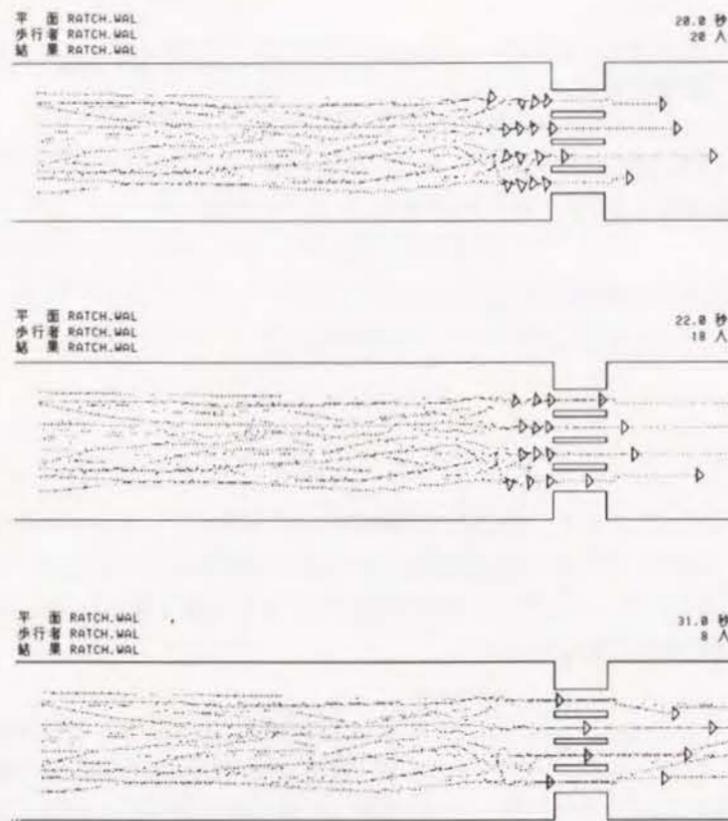


Figure 11-2 ラッチを通過する歩行者のシミュレーション例

このシミュレーション例により、アルゴリズムで説明した通り、ラッチを通過する歩行者の行動が再現できている。この例ではラッチ手前で 2.5 秒静止するようにデータを与えたが、0.4 秒静止するようにデータを与えてシミュレーションを行うと、ラッチ部の流動係数は 1.23 人/m・s となり、金沢駅改札口の調査結果 (Table 11-1) の流動係数の平均値 1.275 人/m・s に近い値の流動係数が観察された。

時刻=20.0秒

最初にラッチに到着した歩行者がラッチを通過し、目的地へ向かう。待ち行列はピークになっている。

時刻=22.0秒

歩行者が次々とラッチを通過し、待ち行列中の歩行者は順に列の前に詰める。

時刻=31.0秒

大半の歩行者がラッチを通過した。

12 エレベーターホールにおける待ち行動とアルゴリズム

乗降口型の待ち空間の例としてエレベーターホールにおける乗降客の行動の調査を行い、その結果に基づいてアルゴリズムを作成した。

12.1 調査結果

エレベーターホールにおける歩行者の行動はホール内の混雑状況により異なった行動パターンが観察された。従って数量的な調査、即ちエレベーター乗降口における流動係数の調査結果に加え、乗降客の行動パターンに関する調査結果も述べる。

12.1.1 乗降客の行動パターン

エレベーターホールにおける乗降客の行動パターンは、混雑時と閑散時と言う混雑状況により、待ち行列の形や乗降時の行動パターンが異なる。更に、混雑時においても待ち行列の形が2種類観察された。数量的な測定結果の前に、まずこれらの行動パターンを閑散時と混雑時の状況別に説明する。

調査場所	金沢市内の大和デパート地下食料品売り場 大阪駅前阪急32番街ビル1階 新宿グリーンタワービル1階	
調査日時	大和デパート	1989年4月9日(日) 午後から夕刻
	阪急32番街	1989年7月9日(日) 正午前後の昼食時
	グリーンタワービル	1989年10月24日(火) A.M. 8:30-A.M. 9:10
サンプル特性	大和デパート	買物客
	阪急32番街	上階に食堂街があり、昼食目的の客が多いと考えられる。
	グリーンタワービル	ビル内のオフィスで働く通勤客の出動ラッシュ時

a. 閑散時

エレベーター到着前

ホール内に低い密度で立って待っており、規則正しく並ぶようなことは見られない。(Figure 12-1)

歩行者同士の間隔は、

- 知らない人間同士 約 1.0m 以上
- 知り合い同士 約 60cm 以上

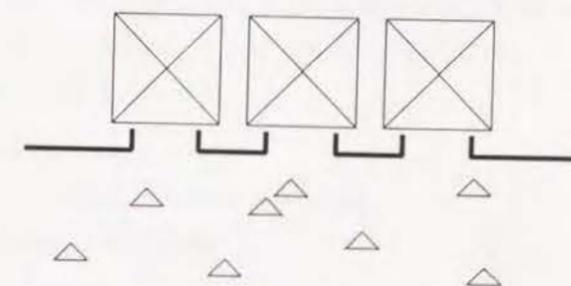


Figure 12-1 閑散時 エレベーター到着前

エレベーター到着寸前

全体的に各人が到着するエレベーターの方に少し移動するが、まだ十分人間同士の間を人が通れるだけの間隔がある。

エレベーター乗降時

エレベーターから降車した客は乗車待ちの客の間を通り目的地方向へ進む。(Figure 12-2)

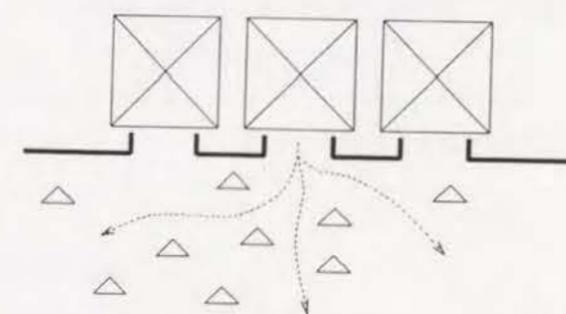


Figure 12-2 閑散時 エレベーター乗降時

b. 混雑時

エレベーター到着前

閑散時に比較すると高密度で待っている。この場合の歩行者同士の間隔は 50~60cm である。エレベーターを待っている間は規則正しく並んでいない。(Figure 12-3)

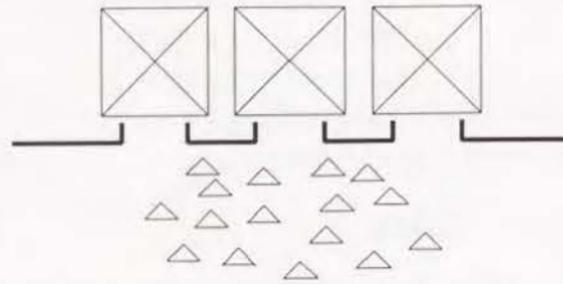


Figure 12-3 混雑時 エレベーター到着前

エレベーター到着寸前

到着寸前になると他人と体が触れ合うくらいまで高密度でエレベーター前に並ぶ。そのときの並び方は以下のように二通り観察された。

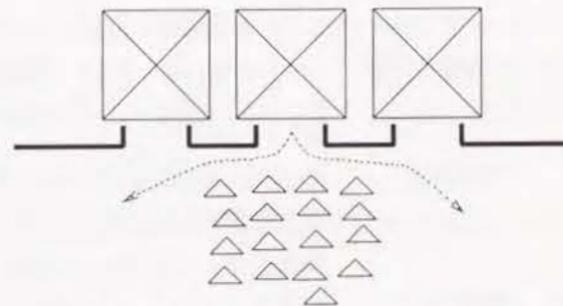


Figure 12-4 混雑時1 エレベーター乗降時

混雑時1 エレベーター前に高密度で並び、降車客の通路が開けられていない並び方である。金沢市内のデパート及び大阪の阪急32番街ビルでときどき観察された。これはエレベーターの乗降にあまり慣れていない乗客の場合に起こると考えられる。特に、左右両端のエレベーターでこの傾向が多く見られる。(Figure 12-4)

混雑時2 エレベーター乗降口前に人が通れるように通路を開ける並び方である。全体としてこのパターンの方が多く観察された。(Figure 12-5)

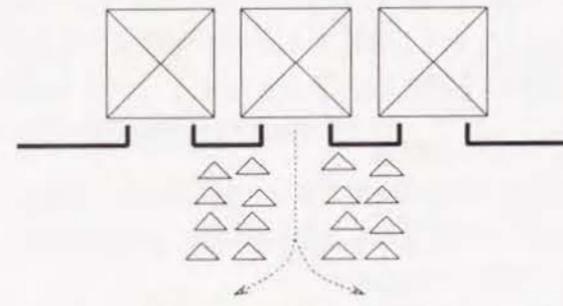


Figure 12-5 混雑時2 エレベーター乗降時

エレベーター乗降時

混雑時1 降車客はエレベーター前の待ち行列を避け、左右両側に分かれて目的の方向に進む。(Figure 12-4)

混雑時2 降車客は中央の空けられた通路を通り、目的の方向に向かう。(Figure 12-5)

以上の歩行者の行動パターンと、エレベーターの発着状況との関係をまとめると以下の表のようになる。

エレベーターの状態	歩行者の行動	
	ホール内にいる待ち客	エレベーター内の乗客
走行中	ホール内で静止	
停止直前	到着エレベーター乗降口前に集中待ち行列を詰める	
到着		
降車中	待ち行列中で静止、降車の終了を待つ	エレベーターから降車、ホール内の待ち行列を避けて目的地へ向かう
降車終了		
乗車中	前から順に乗車	
乗車終了		
出発		

Table 12-1 エレベーターの状態と歩行者の行動との関係

12.1.2 エレベーター乗降口における流動係数

エレベーター乗降口における乗客の流動係数を閑散時と混雑時に分けて測定を行った。閑散時と混雑時の区別には一定の基準がないので判断が困難であったが、大和デパートの調査ではエレベーターホール内の待ち人数が7、8人程度以上の場合に混雑時の行動パターンや待ち行列の形式が現れ始めた。流動係数の計算を行う際に、閑散時のエレベーターホール内の待ち人数の上限を6人、7人、8人、9人として4通り計算したところ、7人として計算した場合が最も閑散時と混雑時の流動係数の差が開いたので、大和デパートの調査では閑散時をエレベーターホール内の待ち人数7人以下、それ以上を混雑時として計算した。グリーンタワービルにおいては朝の通勤ラッシュ時の乗降の様子をビデオにより撮影し、それを再生しながら、明らかに混雑している状態（エレベーターが満員で積み残しがあった場合）と、ほとんど待ち行列のできない閑散時に分けて計算し、中間の判断の困難な場合は計算から除外している。

調査場所 新宿グリーンタワービル1階エレベーターホール
 調査日時 1989年10月24日(火) A.M. 8:30-A.M. 9:10 朝の通勤ラッシュ時
 サンプル特性 高層オフィスビルに勤務する通勤客。乗車行動のみ。
 乗降口有効幅 1.1m

混雑度	乗車所要時間計 [秒]	平均乗車所要時間 [秒/人]	標準偏差 [秒]	流動係数 [人/m/秒]	サンプル数 [人]
閑散	116.31	0.727	0.102	1.251	160
混雑	200.83	0.669	0.055	1.358	300
全体	317.17	0.690	0.079	1.319	460

Table 12-2 新宿グリーンタワービル1階エレベーターホールにおける乗降客の行動調査結果

調査場所 金沢市内 大和デパート
 調査日時 1989年4月9日(日)、1990年6月30日(土)
 サンプル特性 買物客
 乗降口有効幅 1.0m

混雑度	乗降	乗降時間計 [秒]	平均乗降時間 [秒/人]	標準偏差 [秒]	流動係数 [人/m/秒]	サンプル数 [人]
閑散	乗車	250.120	0.970	0.277	1.032	258
	降車	342.340	0.984	0.312	1.017	348
	両方	592.460	0.978	0.297	1.023	606
混雑	乗車	111.990	0.974	0.207	1.027	115
	降車	267.460	0.826	0.186	1.211	324
全体	乗車	362.110	0.971	0.257	1.030	373
	降車	609.800	0.907	0.271	1.102	672
	両方	971.911	0.930	0.268	1.075	1045

Table 12-3 大和デパートエレベーターホールにおける乗降客の行動の調査結果

12.2 アルゴリズム

以上の調査結果を基にエレベーター乗降客の行動パターンを乗車時 (Figure 12-4) と降車時 (Figure 12-5) に分けてモデル化した。但し、この行動パターンは何れも混雑時のものであり、閑散時の行動のモデル化はシミュレーションを行う必要性にも疑問があるので行っていない。

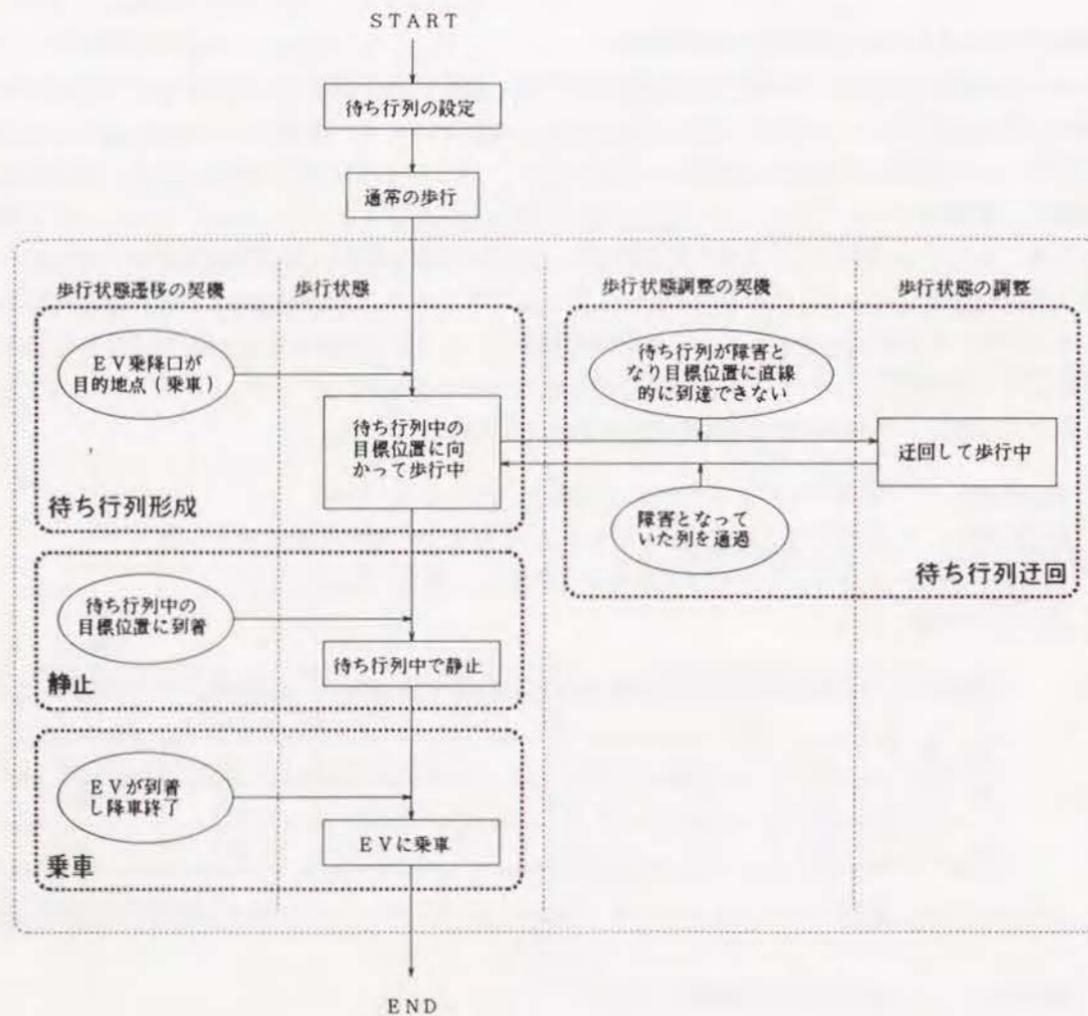


Figure 12-6 エレベーター乗車時の行動アルゴリズム

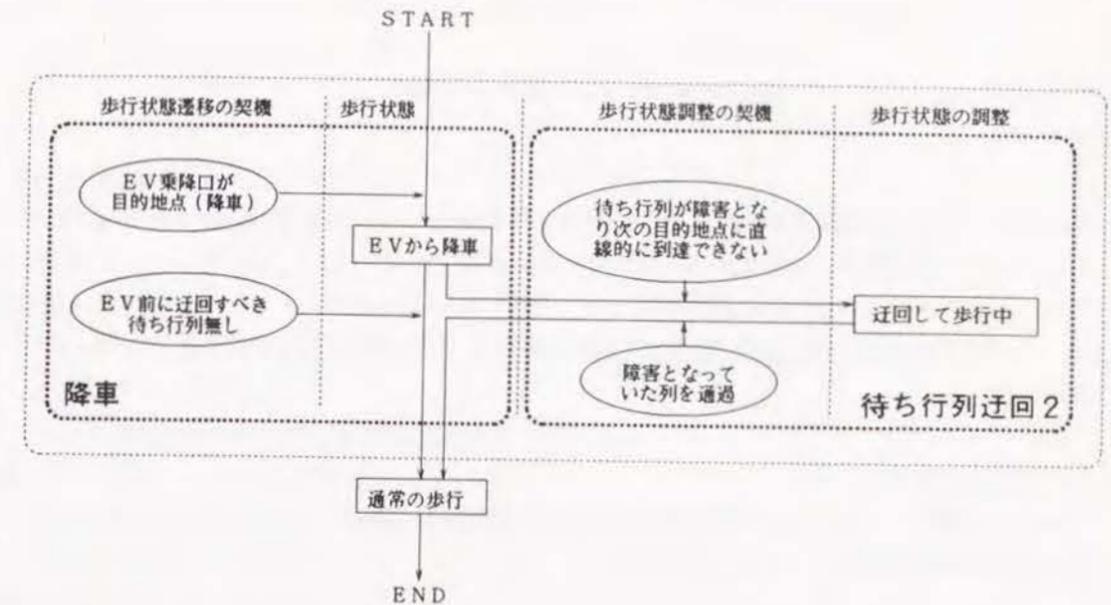


Figure 12-7 エレベーター降車時の行動アルゴリズム

混雑時の行動パターンは前節で見たように、2通りの待ち行列の形があり、行動パターンもそれにより差異があったので後のシミュレーション例に示すように2通りのモデルを作成した。

それら混雑時1と混雑時2の歩行モデルはアルゴリズムの詳細は異なるが、概略を図式的に表すと同じであるので、Figure 12-6 と Figure 12-7 で、それぞれ乗車時と降車時のアルゴリズムを示した。

まず、待ち行列の設定であるが、混雑時1と混雑時2で格子点の設定の方法が異なる。混雑時1では Figure 12-8 の最初の図の様にエレベーター前に左右 50cm、前後 45cmで等間隔に格子点を配置する。これはカウンター型及びラッチ型とは異なる間隔であるが、エレベーターホールが混雑している場合、エレベーターの到着寸前には歩行者は極度にエレベーター前に集中し、しばしば他人と体が触れ合っている場合が観察されたので、歩行者同士の間隔をこの様な寸法にした。混雑時2では Figure 12-9 の最初の図の様に各エレベーター乗降口前に人が1人通れる幅の通路を空けるため、エレベーター前には格子点のない列がそれぞれ1列ある。

このように格子点を設定しておき、Figure 12-6 と Figure 12-7 中の太い点線で囲まれた部分の、それぞれのアルゴリズムに従って乗車及び降車が行われる。Figure 12-6 中の「待ち行列迂回」の部分は、これまでのカウンター型及びラッチ型の「待ち行列迂回」アルゴリズムと同じなので説明しない。他の部分のアルゴリズムは以下の通りである。

12.2.1 [待ち行列形成] アルゴリズム

エレベーター乗降口を目的地として歩行する場合、空いている格子点の中から目的のエレベーター乗降口に最短距離の位置にある格子点を選択して、それを目的地として歩行する。(Figure 12-6)

- ```

if エレベーター乗降口が目的地
then エレベーターホール内で最初に到着するエレベーターを探し、それを目的地とする *1
 if 目的とするエレベーターの待ち人数がエレベーターの定員以上 **
 then 次に来るエレベーターの乗降口を目的地とし、上の行に戻る
 elseif 目的とするエレベーターの待ち人数がエレベーターの定員未満
 then 空いている格子点の中から目的とするエレベーター乗降口の中点に最短距離のものを

```

```

目的地として歩行する
then アルゴリズム「待ち行列迂回」を実行
 if 目的の格子点に到着
 then アルゴリズム「静止」を実行
end

```

- \*1 各エレベーターの到着時刻はデータとして最初に与えられている。現実のエレベーターホールにおいても、エレベーターの接近する様子は解るようになっているので差支えないと思われる。
- \*2 エレベーターホールの歩行者の観察を行うと、混雑しているエレベーターを避けて待ち人数の少ないエレベーター前に並ぶ場合が見られる。どの程度が混雑かどうかの判断の基準としてエレベーターの乗車定員を用いた。

#### 12.2.2 [静止] アルゴリズム

この場合は単純で、エレベーターが到着するまで待ち行列内で静止しており、カウンターやラッチ型のよりに前に詰める行動はない。(Figure 12-6)

```

if エレベーターが到着
 then アルゴリズム「乗車」を実行
elseif エレベーターが未到着
 then 格子点上で静止
end

```

#### 12.2.3 [乗車] アルゴリズム

エレベーターが到着するが、降車終了までエレベーターホール内の待ち客は静止して待ち、降車終了後乗車を開始する。乗車時の歩行は通常の歩行と同様で、特にアルゴリズムを作成していない。(Figure 12-6)

```

if エレベーターからの降車が終了
 then エレベーター乗降口を目的地として歩行
elseif エレベーターから中の乗客が降車中
 then そのまま静止して待つ
end

```

#### 12.2.4 [降車] アルゴリズム

エレベーターから降車し、次の目的地へ向かって歩行する。エレベーターホール内に待ち行列があれば迂回して進む。(Figure 12-7)

```

if エレベーター乗降口が目的地
 then 目的地に向かって歩行
elseif エレベーター乗降口を通過
 then 次の目的地に向かって歩行
 if 待ち行列があり、直接次の目的地に接近できない
 if 行動パターンが混雑時1
 then 待ち行列の前方を通過
 elseif 行動パターンが混雑時2

```

```

 then 乗降口前の空いた通路を歩行し、待ち行列の後方へ出る
 elseif 迂回すべき待ち行列が無い
 then 次の目的地に向かって歩行
 end
end

```

#### 12.2.5 [待ち行列迂回2] アルゴリズム

エレベーターから降車した歩行者が、エレベーターホール内の待ち行列を迂回して次の目的地に向かって進む。(Figure 12-7)

```

if エレベーターホール内に待ち行列があり、次の目的地に直接接近できない
 if 行動パターンが混雑時1
 then 待ち行列の前方を目的地に接近する方向に進む
 elseif 行動パターンが混雑時2
 then 待ち行列の間の空いた通路を通り待ち行列の後方に進む
 elseif 迂回すべき待ち行列が無い
 then 目的地に向かって歩行
end

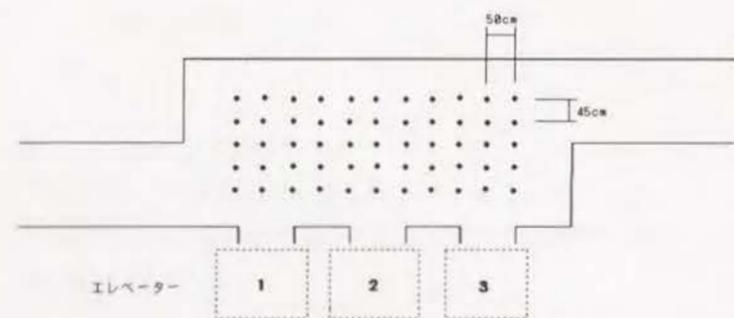
```

### 12.3 シミュレーション例

エレベーターホール内のエレベーターの配置型式<sup>1</sup>には直線配置型と対面配置型の2種類が見られるが、直線配置型エレベーターホールで混雑時1、対面配置型エレベーターホールで混雑時2の行動パターンのシミュレーションを行った。エレベーターホールでしばしば見かける問題に団子運転がある。エレベーターを長時間待たされたかと思うと、連続して2、3台のエレベーターが到着すると言った場合であるが、これはどのようにうまく計画されても避けられない問題のようである。そのようにエレベーターが長時間到着せず、エレベーターホールから人が溢れるくらいに混雑した極限的な状況に対応できるかどうかの検討に利用できるモデルの開発が研究目的の1つであった。この節のシミュレーション例は、アルゴリズムを説明するためのものである。そこまで極限的な状況は扱っていないが、第13節では、ホテルのフロントやエレベーターホール、水族館の入場口など大群集で混雑する状況のシミュレーションを行っている。

#### 12.3.1 直線配置型エレベーターホールにおける混雑時1の歩行パターンのシミュレーション例

この例は、混雑時1の行動パターンの歩行モデルによるものである。17人乗りのエレベーター3台が直線状に配置されたエレベーターホールの乗降客の行動シミュレーションの例を示す。エレベーター2、1、3の順で、シミュレーション開始後、30秒、45秒、60秒にそれぞれ到着するようにデータが与えられている。



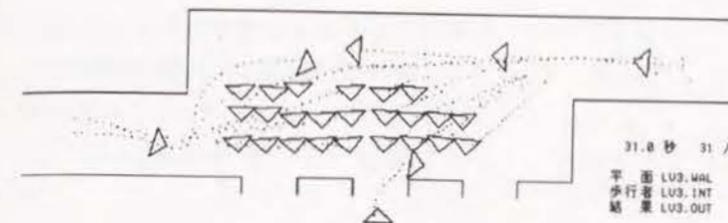
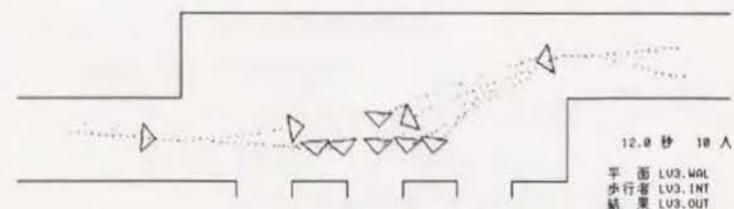
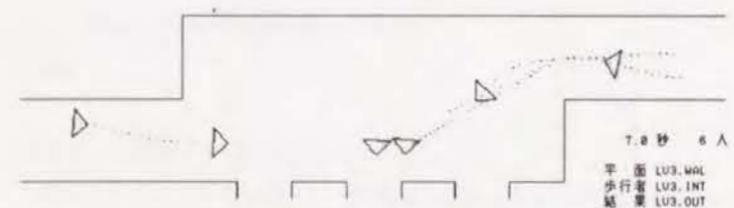
この例では乗降客の行動パターンは混雑時1を用いている。ホール内に、左右50cm、前後45cm間隔の格子点を想定し、乗客はこの格子点上に並ぶものとする。

時刻=7.0秒

エレベーターホールに到着した乗客は先着順にエレベーター2の乗降口に最も近い位置の格子点から順に選んで並ぶ。

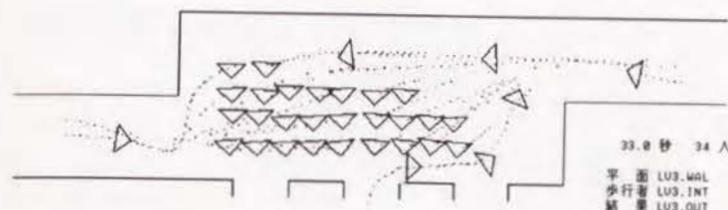
時刻=12.0秒

待ち人数が増加する。待ち行動の調査では、最初は低密度で並ぶがこのモデルでは最初からエレベーター到着寸前と同様に高密度で並ぶことにしている。



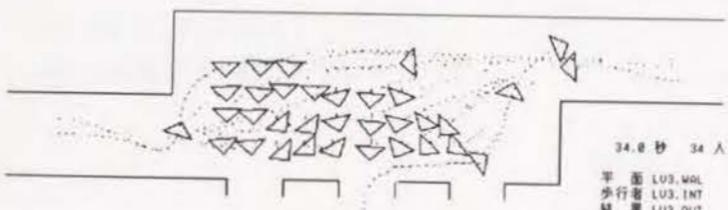
時刻=31.0秒

エレベーター2が到着し、乗客が降車し始める。エレベーターホールに到着した乗客は列の後部を迂回して進む。



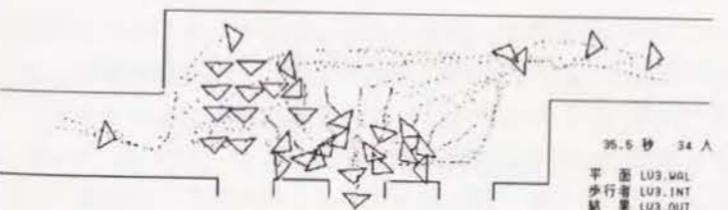
時刻=33.0秒

乗客が3人降車し、待ち行列の前を通過して次の目的地の方向へ進む。



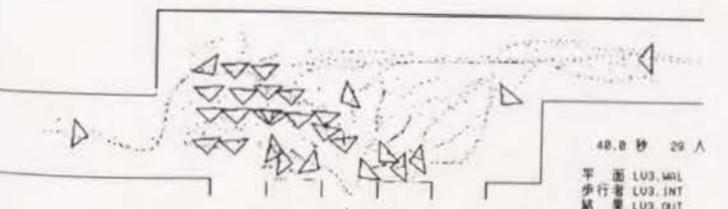
時刻=34.0秒

エレベーター2の降車が終了し、待ち行列の客が乗車を開始する。



時刻=35.5秒

エレベーター2に乗車中



時刻=40.0秒

エレベーター2の乗車はかなり進行した。同時にエレベーター1の方に並んでいた乗客が、空いた位置に詰めて並ぶ。

時刻=43.0秒

エレベーター2に乗車はほとんど終了し、乗れない乗客はエレベーター1の前に進んでいる。エレベーター3の前にも待ち行列ができ始める。

時刻=47.0秒

エレベーター1が到着し、乗客が2人降車する。

時刻=48.5秒

エレベーター1に乗車中。以後他のエレベーターでも同様の行動が繰り返される。

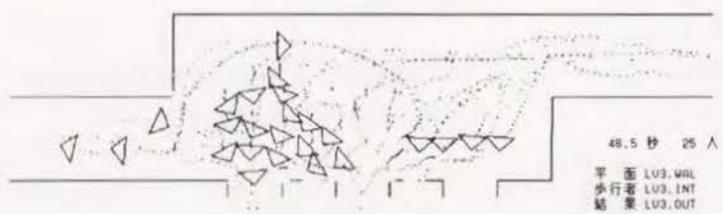
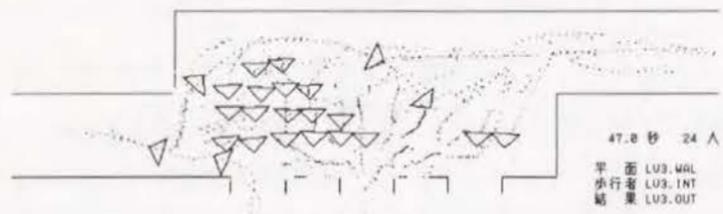
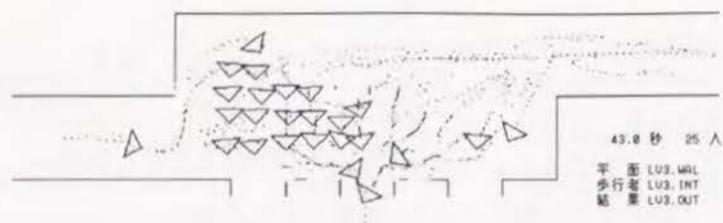


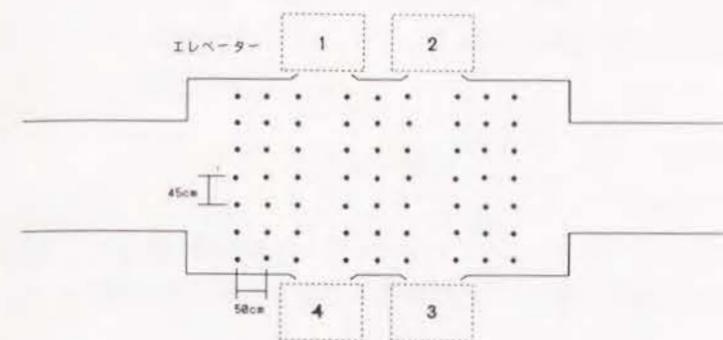
Figure 12-8 直線配置型エレベーターホールにおける混雑時1の歩行パターンのシミュレーション例

このシミュレーション例では、エレベーターホール内に待ち客が、降車する客の通路を空けないで並ぶ場合に、エレベーター到着後、降車した客が待ち行列を避けて次の目的地に向かって進み、待ち客が乗車する様子を再現している。そのとき、エレベーター2が時刻30.0秒に到着し、中の乗客が降車後エレベーターホール内の待ち客が乗車する場合の、エレベーター乗降口における流動係数を測定すると、1.55人/m・sとなり、グリーンタワービルの調査結果 (Table 12-2) より少し高い値となっている。戸川喜久二の調査<sup>2</sup>と比較すると、丁度、事務所ビルの平均値 (1.5人/m・s) に近い値である。

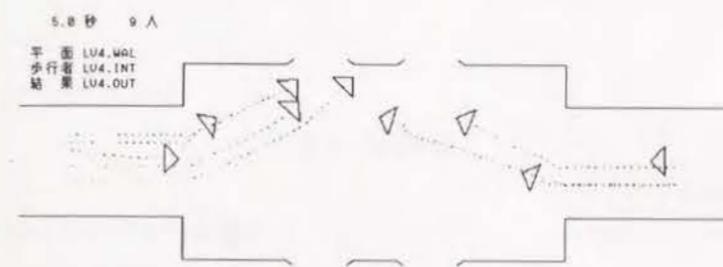
この例においても、31.0秒以後の図を見ると、左側から接近する歩行者は全て列を迂回しなければならず、これも待ち空間と通路の接続など、平面形により動線が受ける影響も検討の対象とすることが可能となった。

### 12.3.2 対面配置型エレベーターホールにおける混雑時2の歩行パターンのシミュレーション例

混雑時2の歩行パターンによる乗降客の歩行モデルのアルゴリズムを以下の例を用いて説明する。この例では15人乗りのエレベーター4台が2台ずつ対向形式でエレベーターホールに配置されている。エレベーターの到着時間は1=30.0秒、2=120.0秒、3=60.0秒、4=90.0秒となるようにデータが与えられる。

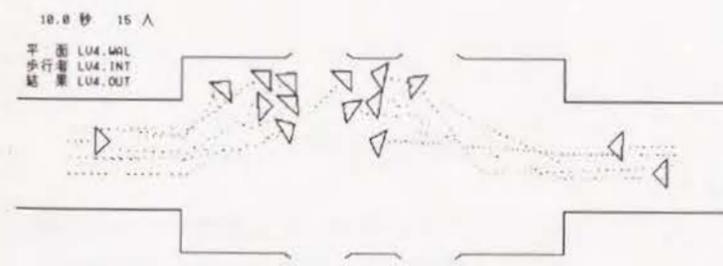


エレベーターホール平面内に横50cm、縦45cm間隔の格子を仮想し、エレベーター待ちの乗客は到着順に、エレベーター乗降口に近い格子点を順に選び格子点上に並ぶ。



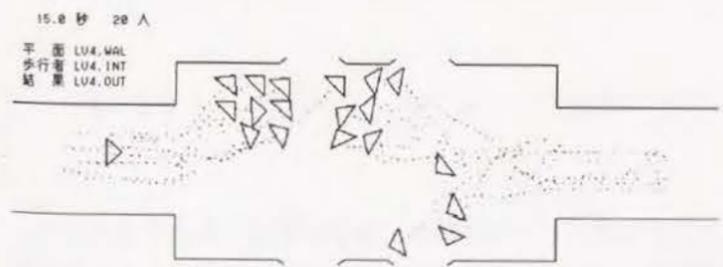
時刻=5.0秒

エレベーターホール到着客が、エレベーター1の乗降口前に並び始める。乗降口前には約50cm幅の通路スペースが空けられている。



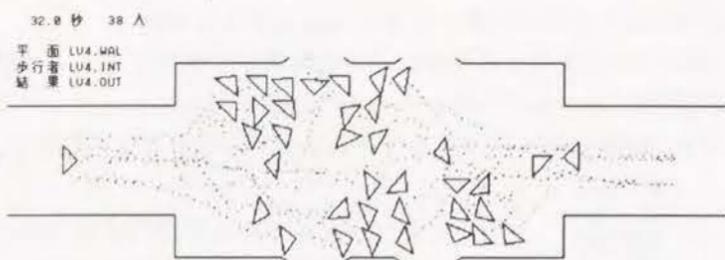
時刻=10.0秒

待ち行列が増加している。



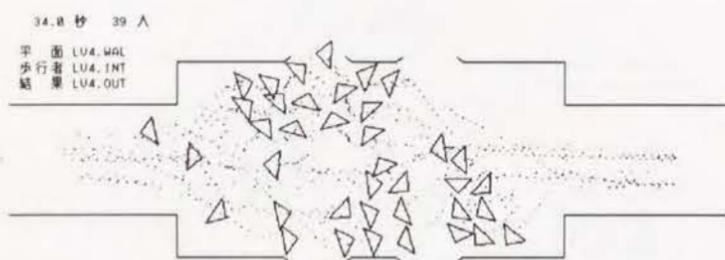
時刻=15.0秒

エレベーター1の待ち人数が多いので、次に到着予定のエレベーター3の前に待ち行列ができ始める。



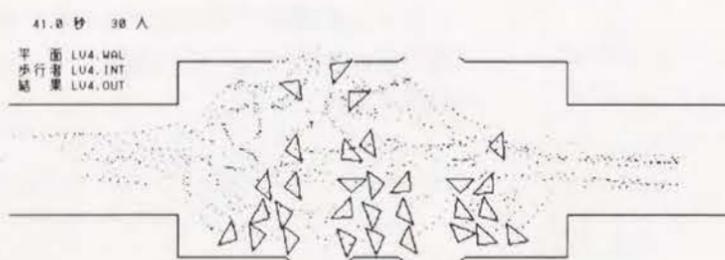
時刻=32.0秒

エレベーター1が到着し、中の乗客が降車し、列の間を通過して左側の通路へ向かう。



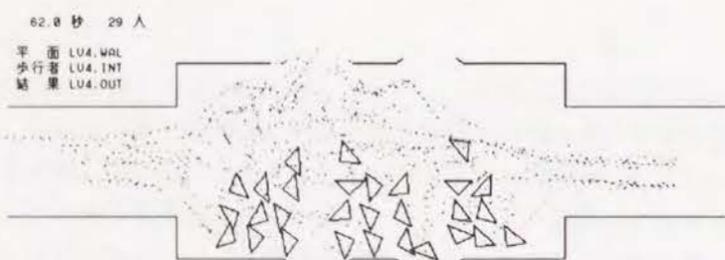
時刻=34.0秒

エレベーター1の降車が終了し、乗車が始まる。



時刻=41.0秒

エレベーター1の乗車がほとんど終了し、エレベーター3、4の前に待ち行列ができています。



時刻=62.0秒

エレベーター3が到着し、中の乗客が降車する。以後これまでと同様の行動が各エレベーター前で繰り返される。

Figure 12-9 対面配置型エレベーターホールにおける混雑時2の歩行パターンのシミュレーション例

この対面配置型のエレベーターホールでは、待ち行列を迂回する行動は、直線配置型の場合と基本的には同じで列の後方を迂回するが、後方にも、反対側のエレベーター乗降口前に並ぶ待ち行列ができていない場合（時刻 32.0 秒）があり、反対側の待ち行列も避ける必要がある。ここで示した例ではこのような場合の待ち行列迂回行動も実現できた。歩行者の待ち行動パターンは混雑時2を用い、待ち客が降車客のための通路を空けて待ち行列を形成する行動を再現できることを示した。

## 12.4 シミュレーション結果のまとめ

この節では建築物平面内に見られる2種類のエレベーターホール（直線配置型と対面配置型）においてシミュレーション例を示し、何れの型のエレベーターホールにおいてもシミュレーション可能であることを立証した。更に調査結果から分類された混雑時1と混雑時2の2種類の行動パターンの何れも再現できることを示した。従って、2種類の型のエレベーターホールにおいて2種類の行動パターンのシミュレーションを行うことが可能であり、エレベーターホール又は類似の空間を持つ平面内における多様な行動のシミュレーションの可能性を提示した。

### 引用文献

1. 日本建築学会編：建築設計資料集成8 建築-産業，丸善，1981年，pp.8-9
2. 戸川喜久二：群集流の観測に基づく避難施設の研究，建築研究報告，1955年

### 1.3 待ち行動を含んだ群集歩行のシミュレーション例

現実の大規模且つ複雑な経路を持った平面上で数百人の歩行者の行動のシミュレーション例を示す。それらは以下の3通りで、それぞれ平面内にこれまで説明した3通りの待ち行動、カウンター型、ラッチ型、乗降口型のうち複数が同時に発生する待ち空間を含んでおり、大群集の歩行とこれらの待ち行動とが同時に起こる状況を再現し、このシミュレーションモデルによって平面各部の混雑度、流動の状況の調査が可能であることを実証した。

| シミュレーション例                                  | 待ち行動の発生場所                                 | 待ち行動の型                             | シミュレーションの目的                                                                                                                                                                                         |
|--------------------------------------------|-------------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 京阪電鉄京都三条駅<br>地下1階コンコース<br>(120人)           | 切符自動販売機前<br>改札口                           | カウンター型<br>ラッチ型                     | 1つの空間内に切符自動販売機と改札口という2種類の待ち空間が含まれ、同時にこれらの待ち空間は通過する群集の交通空間となっており、このような複雑に交錯する群集の歩行を再現する。                                                                                                             |
| 湯沢メンバーズホテル<br>メインフロア<br>(178人～79人)         | 荷物一時置場<br>スキーロッカー室<br>フロント受付<br>エレベーターホール | カウンター型<br>カウンター型<br>カウンター型<br>乗降口型 | 平面内に多数の待ち行動の起こる空間が含まれている。荷物一時置場やスキーロッカー室で荷物を出し入れする行動をカウンター型の待ち行動を応用することにより実現を試みる。このホテルの敷地は狭い傾斜地で1つの階に十分な面積を確保できず、フロント受付が、他の待ち空間や玄関とは別の階になっており、動線が複雑である。このような複雑な動線と空間の狭さによる混雑度の検討もこのシミュレーションの目的であった。 |
| 人工島内の遊園地<br>1. 人工デッキから<br>水族館入場口<br>(820人) | デッキからの眺めの<br>良い場所<br>水族館入場口<br>水族館内水槽回り   | カウンター型<br>ラッチ型<br>カウンター型           | 遊園地内の最も混雑が予想される地域のシミュレーションを行った。水族館入場口前の数百人の待ち行列の処理と、デッキからの眺望や、水族館内の水槽等の鑑賞行動をカウンター型でうまく再現できるかどうか課題であった。                                                                                              |
| 2. 水族館内部<br>(300人)                         | 水族館内水槽回り                                  | カウンター型                             | 水族館内の曲がりくねった複雑な経路上の至る所で立ち止まって、水槽内の魚類を鑑賞する行動を再現する。                                                                                                                                                   |

Table 13-1 各シミュレーション例の内容

歩行経路に関しては、何れのシミュレーション例も歩行者の歩行経路は予め予想できるものとし、その予想される経路のコーナー番号を順に与え、各歩行者がそれに従って歩行する。歩行者が他の歩行者との衝突を避けたりしたときに一時的に目的地のコーナーを見失った場合は、見失ったコーナーを発見するまで探索歩行をすることになっている。

### 1.3.1 京阪三条駅コンコース

京阪電鉄京都三条駅の地下1階における群集歩行のシミュレーション例を示す。コンコース平面はFigure 13-1に示されており、この図の暗い部分のシミュレーションを行う。

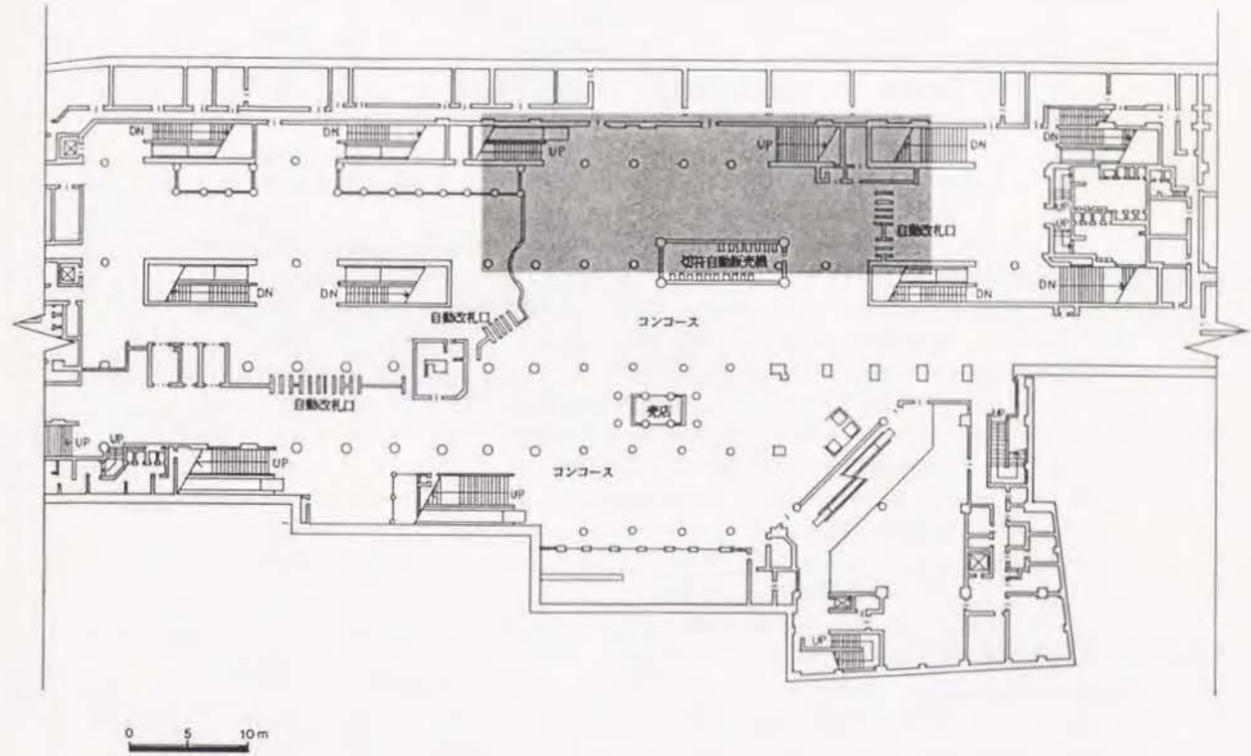


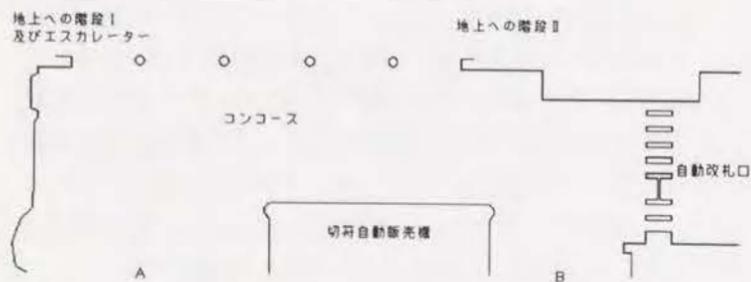
Figure 13-1 京阪三条駅地下1階コンコース平面図

シミュレーションを行う平面は、Figure 13-2に示されている通りである。この部分は、地上に通ずる2カ所の階段とエスカレーター1台を含み、更に、待ち空間として切符自動販売機及び自動改札口がある。ここでは階段I、IIから降りてきて切符を買い改札口から入場する客、予め切符を買ってあったり定期券を持っており、直接改札口から入場する客、到着した電車から出てきて改札口を通り屋外へ行く客等、待ち行動と通常の群集流動が交錯し、種々の経路を歩行する群集が入り乱れている。これらの歩行者を集団で発生させ、各集団毎に発生位置、歩行経路を与えてある。この場合は与えられた経路に従って歩行し、第1章のような経路の探索は行わない。各歩行者集団の発生位置、歩行経路、人数はTable 13-1の通りである。

既存のネットワークモデルでは、このような平面をネットワーク化させることは困難で、更に、この例のように同時に待ち行列と通常の群集流動とが起こり、それらの動線が交錯しているような状況のシミュレーションを行うことも困難であり、本研究で用いている座標型のモデルによらなければ再現は困難と考えられ、実際にこのような種類のシミュレーションをネットワークモデルにより行った例は、これまでのところ見られない。

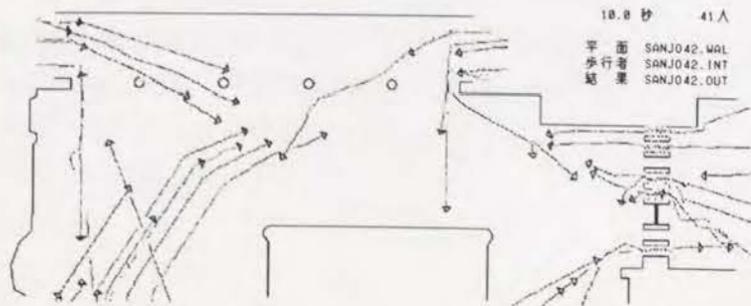
| 集団 | 歩行経路                  | 人数   |
|----|-----------------------|------|
| 1  | 階段Ⅰ → 切符自動販売機 → 自動改札口 | 60人  |
| 2  | 階段Ⅰ → コンコース → A       | 10人  |
| 3  | 階段Ⅰ → コンコース → 自動改札口   | 10人  |
| 4  | 階段Ⅱ → 切符自動販売機 → 自動改札口 | 60人  |
| 5  | 階段Ⅱ → コンコース → A       | 10人  |
| 6  | 階段Ⅱ → コンコース → B       | 10人  |
| 7  | 階段Ⅱ → コンコース → 自動改札口   | 10人  |
| 8  | 自動改札口 → コンコース → 階段Ⅰ   | 10人  |
| 9  | 自動改札口 → コンコース → 階段Ⅱ   | 10人  |
| 10 | 自動改札口 → コンコース → A     | 10人  |
| 11 | 自動改札口 → B             | 10人  |
| 12 | A → コンコース → 階段Ⅰ       | 10人  |
| 13 | A → コンコース → 階段Ⅱ       | 10人  |
| 14 | B → 自動改札口             | 10人  |
| 計  |                       | 240人 |

Table 13-1 歩行者のデータ



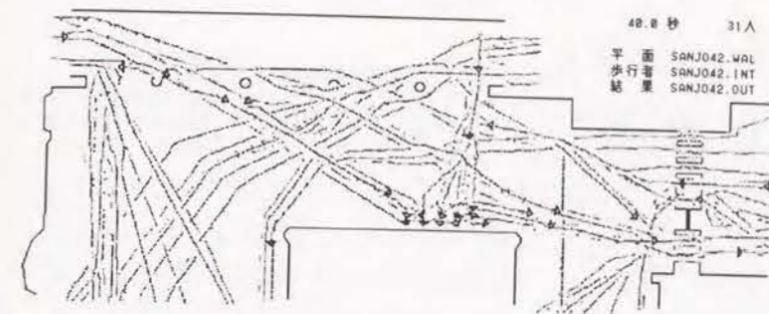
京阪三条駅シミュレーション平面

上部の2つの出入口は地上へと向かう階段であり、下部の出入口は地下道へと続く。中央に切符自動販売機、右側に自動改札機がある。



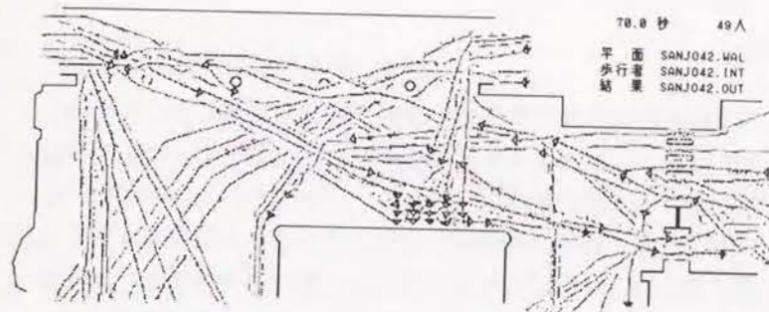
時刻=10.0秒

各歩行者がそれぞれの目的地に向かい始めている。



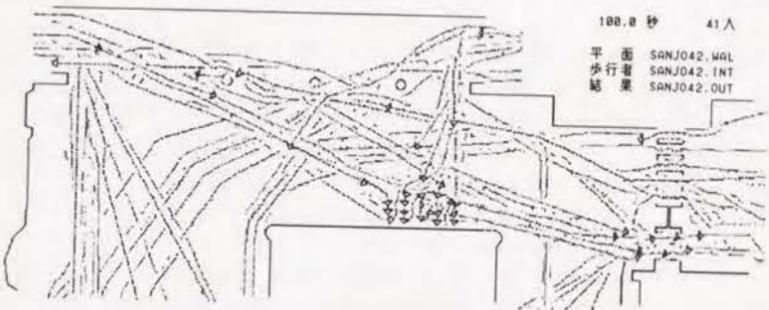
時刻=40.0秒

切符自動販売機前に待ち行列ができ始めている。



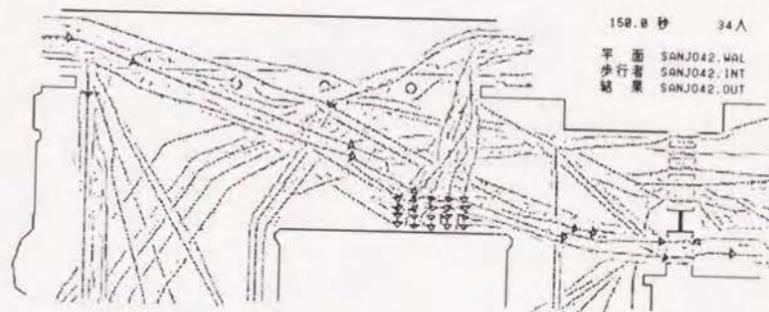
時刻=70.0秒

切符自動販売機前に待ち行列ができ、コンコースにも人が多くなる。



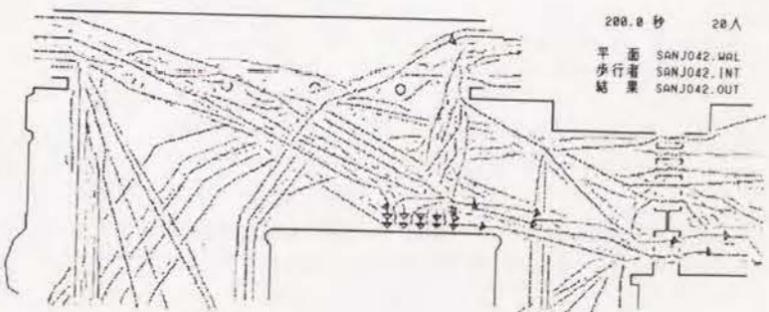
時刻=100.0秒

切符自動販売機前の待ち行列が大きくなり、改札口も少し混雑している。



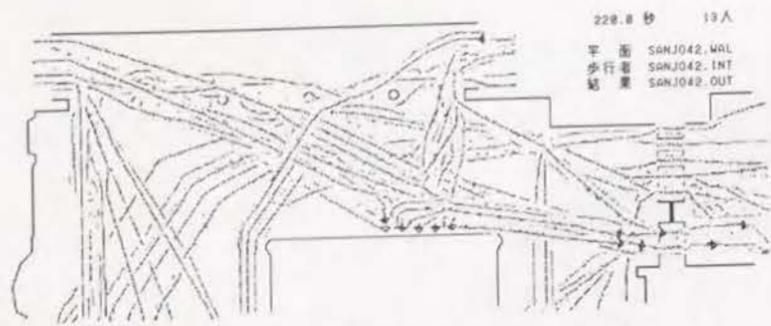
時刻=150.0秒

依然として、切符自動販売機前の混雑が続いている。



時刻=200.0秒

切符自動販売機前の待ち行列が徐々に減少している。



時刻=220.0秒

切符自動販売機前の待ち行列がほとんど解消され、歩行者は改札口へと向かっている。

Figure 13-2 三条京阪駅コンコースにおける群集歩行シミュレーション例

### シミュレーション結果

このシミュレーション例ではコンコース内に切符自動販売機と改札口の2種類の待ち空間を含んでいる。切符の購入及び改札口通過時に待ち行動を行う歩行者と、コンコースを通過するだけの歩行者が混在しており、それらの動線が複雑に交錯している状況を再現することに成功した。このモデルにより、待ち空間における待ち行動を行う群集と、通常の歩行により待ち空間を通過する群集が複雑に交錯するコンコースのような空間におけるシミュレーションが可能であることを示し、このような空間における動線の検討や、混雑する場所の発見に有効であることを示した。

### 13.2 湯沢メンバーズホテルメインフロア

このホテルは新潟県湯沢スキー場に建つ予定で、敷地は狭くしかも急な傾斜地である。メインフロアに十分な面積を確保することが困難であり、玄関、ロッカールームなどが3階、フロント受付が4階に配置されている。このような状況で最大の混雑が予想される連休初日の夕刻を選び、新幹線駅からの多数の客と、スキー場からの帰館客が同時にホテルに到着し、混雑の様子を約5分間に渡ってシミュレーションを行った。この例では3階の防災センターを取り除き、そこへ4階のフロントロビーを配置して階段で繋ぎ、実際には2つの階に跨る空間を1つの平面上で表示してシミュレーションを行った。フロントロビー、エレベーターホール以外にスキーロッカー室のロッカー、荷物一時置場等における行動も、カウンター型待ち行動を適用し、カウンター窓口と仮定したデータを与え、歩行者が一定時間立ち止まる行動を再現することに成功した。

### 到着客種類と予想される歩行経路

予想される到着客は大別すると、新たにホテルに到着する客と、既に滞在中でスキー場から帰館する客の2種類に分けられる。新たに到着する客は、新幹線駅からバス又はタクシーにより正面玄関に到着する客と、マイカーにより地下駐車場から東口に到着する客とがある。これらの客は荷物一時置場に荷物を置き、フロントで宿泊手続きを済ませた後、荷物一時置場から荷物を第1又は第2ロッカールームへ運び、エレベーターにより宿泊室へ向かう。スキー場から帰館する客は正面玄関又は西口に到着し、第1又は第2ロッカールームに荷物を置き、フロントを経由して宿泊室へ向かう。これらの歩行者をその到着場所と歩行経路により以上の8つの集団に分け、集団毎にシミュレーション平面内に発生させる(「2.3.2 歩行者データ」参照)。

| 集団  | 歩行経路                                                             | 人数   | 発生開始時刻               |
|-----|------------------------------------------------------------------|------|----------------------|
| G 1 | バスにより正面玄関に到着<br>正面玄関 → 荷物一時置場 → フロント → 荷物一時置場 → 第2ロッカー → エレベーター  | 32人  | 0秒と100秒に16人ずつ発生開始    |
| G 2 | バスにより正面玄関に到着<br>正面玄関 → 荷物一時置場 → フロント → 荷物一時置場 → 第1ロッカー → エレベーター  | 48人  | 0秒と100秒に24人ずつ発生開始    |
| G 3 | マイカーにより地下駐車場に到着<br>東口 → 荷物一時置場 → フロント → 荷物一時置場 → 第2ロッカー → エレベーター | 12人  | 0秒、60秒、120秒に4人ずつ発生開始 |
| G 4 | マイカーにより地下駐車場に到着<br>東口 → 荷物一時置場 → フロント → 荷物一時置場 → 第1ロッカー → エレベーター | 18人  | 0秒、60秒、120秒に6人ずつ発生開始 |
| S 1 | スキー場から帰館<br>西口 → 第1ロッカー → フロント → エレベーター                          | 20人  | 0秒に発生開始              |
| S 2 | スキー場から帰館<br>正面玄関 → 第1ロッカー → フロント → エレベーター                        | 20人  | 0秒に発生開始              |
| S 3 | スキー場から帰館<br>西口 → 第2ロッカー → フロント → エレベーター                          | 14人  | 0秒に発生開始              |
| S 4 | スキー場から帰館<br>正面玄関 → 第2ロッカー → フロント → エレベーター                        | 14人  | 0秒に発生開始              |
| 計   |                                                                  | 178人 |                      |

Table 13-2 歩行者データ

各歩行者集団は発生開始時刻に全員同時に発生するのではなく、それぞれの集団に与えられた発生密度に従い、乱数により発生開始時刻と位置を決め、1人又は数人ずつ発生して歩行を開始する。各歩行者集団の歩行経路、人数、発生開始時刻は Table 13-2 の通りである。集団G1とG2で、0秒と100秒に半分ずつの人数が発生開始することとしているが、これは、1台目のバスが0秒、2台目のバスが100秒に玄関前に到着することを想定しているからである。

### メインフロアの平面図とシミュレーション平面

湯沢メンバーズホテル3階及び4階の平面図は Figure 13-3 に示される通りである。

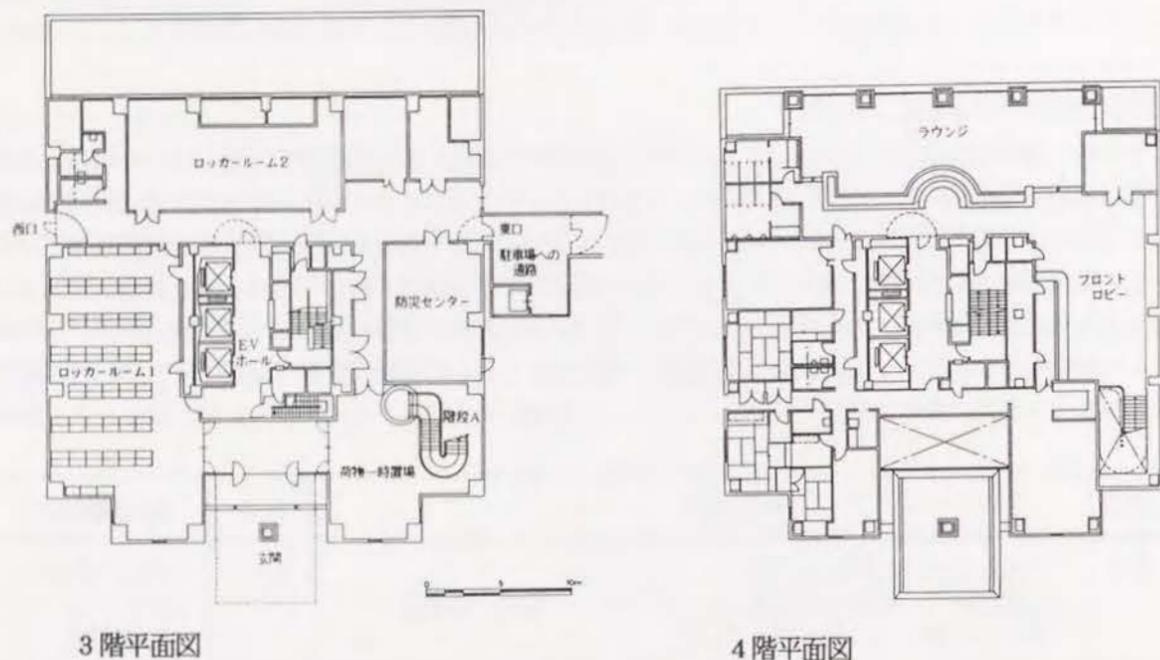


Figure 13-3 湯沢メンバーズホテルメインフロア平面図

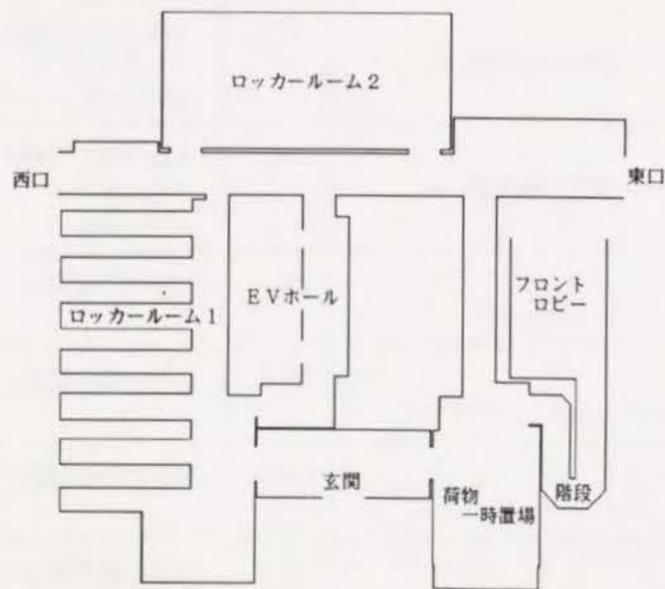
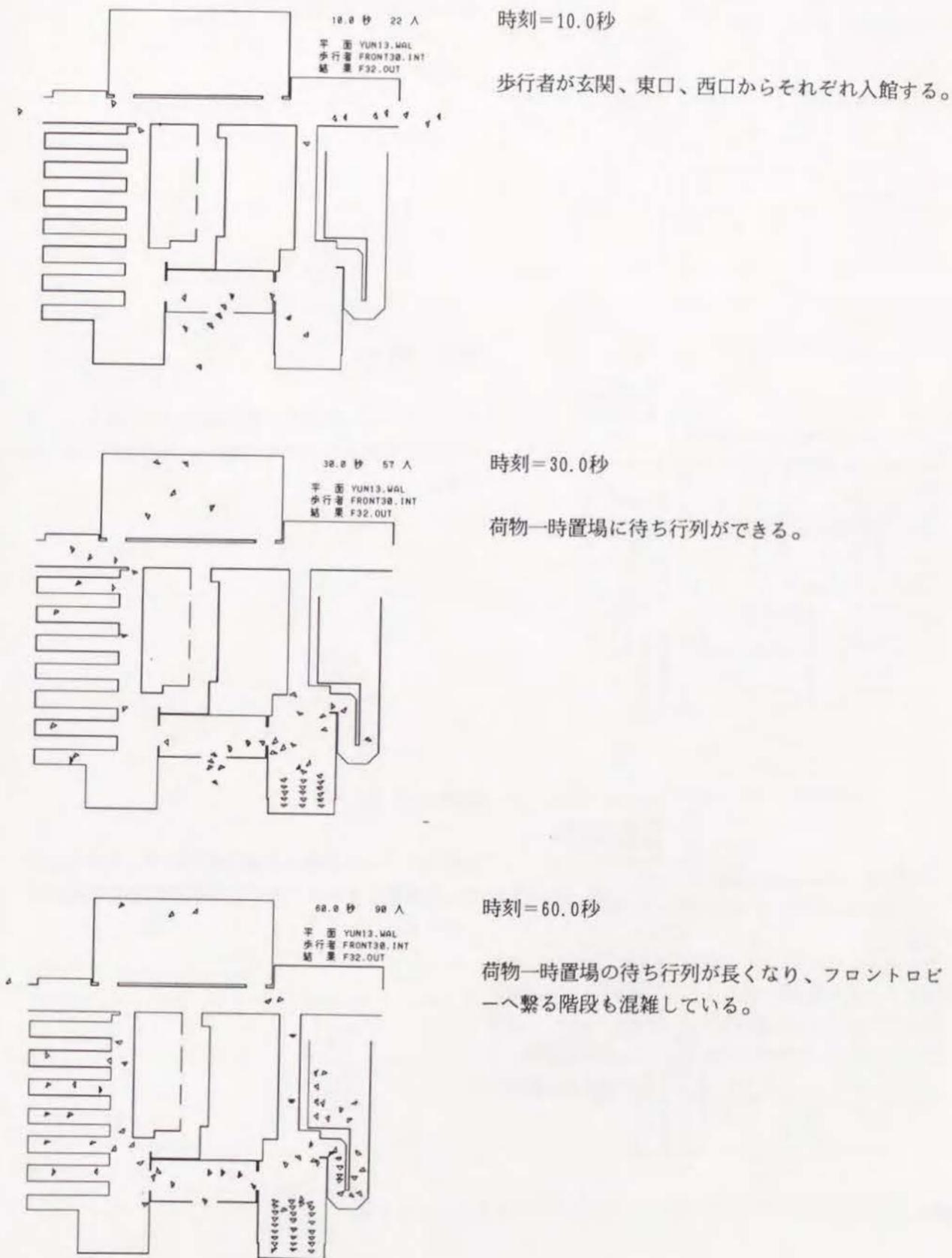
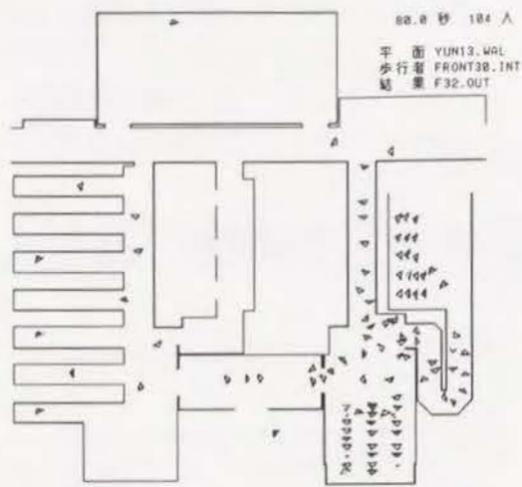


Figure 13-4 湯沢メンバーズホテルメインフロアシミュレーション平面

### 13.2.1 シミュレーション例1

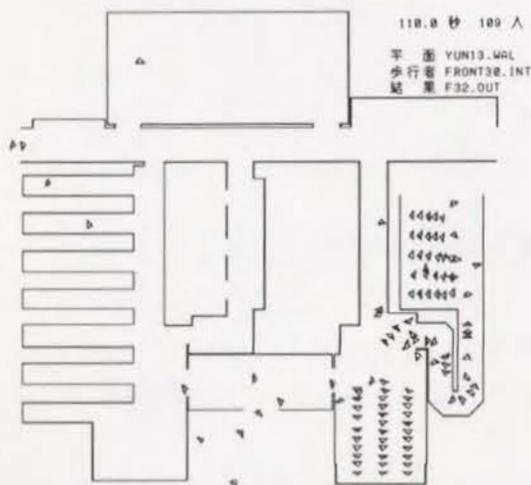
Table 13-2 に基づいた歩行者数でシミュレーションを行った。(歩行者数=178人)





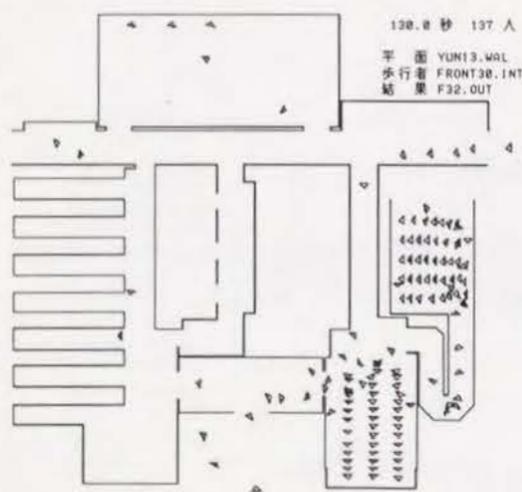
時刻=80.0秒

フロントロビーの待ち行列が長くなり、荷物一時置場と階段の混雑が激しくなる。



時刻=110.0秒

フロントロビーの混雑が飽和に近い状態になる。正面玄関に2台目のバスが到着し、歩行者が入館し始める。



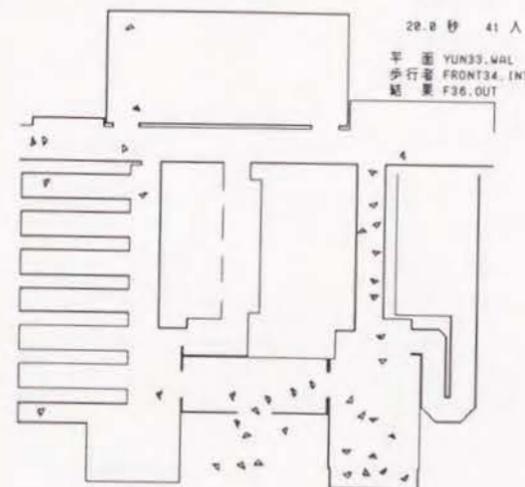
時刻=130.0秒

2台目のバスから次々と歩行者が降車して来るが荷物一時置場とフロントロビーが飽和に近い状態になっている。

Figure 13-5 湯沢メンバーズホテルメインフロアシミュレーション例

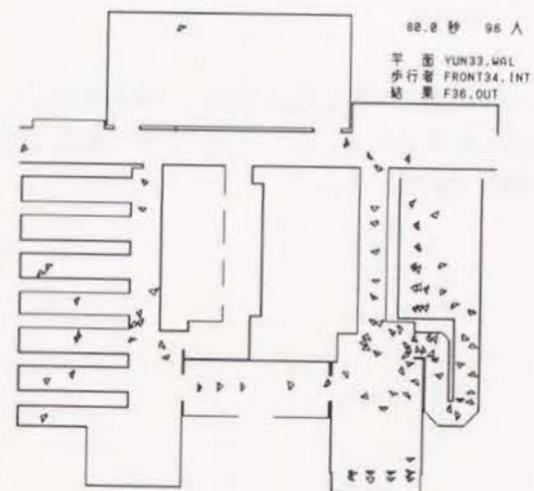
### 13.2.2 シミュレーション例2

シミュレーション例1では、混雑の程度がひど過ぎたのでバスによる到着客を80人から58人に減らし荷物一時置場及びフロントの窓口をそれぞれ1つつ増加してシミュレーションを行った。(歩行者数=156人)



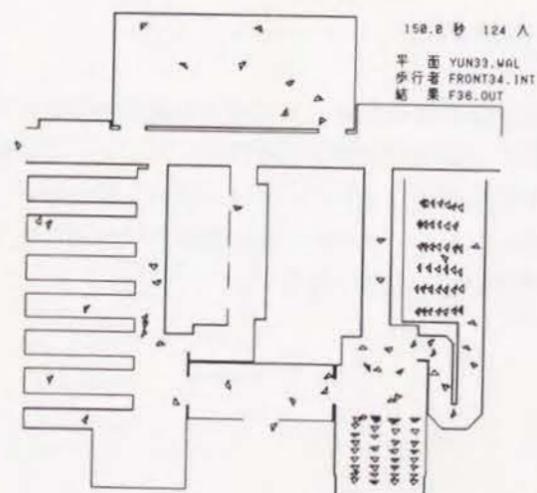
時刻=20.0秒

歩行者が各入口から入館するが、まだ混雑は見られない。



時刻=80.0秒

階段の上り口及び階段内で混雑が見られる。



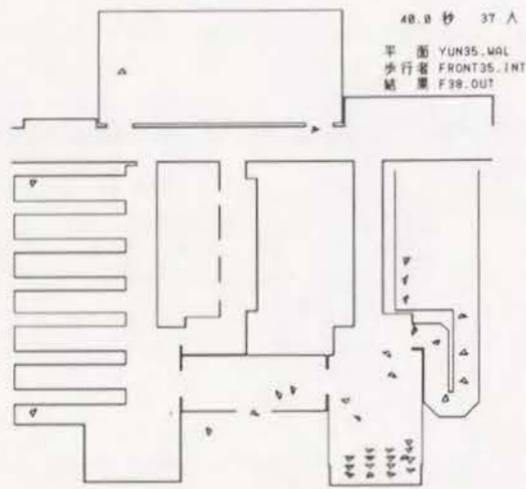
時刻=150.0秒

フロントロビーが最も混雑した状態フロントロビーは飽和に近い状態となる。荷物一時置場もかなり混雑している。しかし、この例ではかろうじて混雑のピークを持ちこたえ、以後、フロントの混雑は徐々に解消されて行く。

Figure 13-6 歩行者数を156人とした場合のシミュレーション例

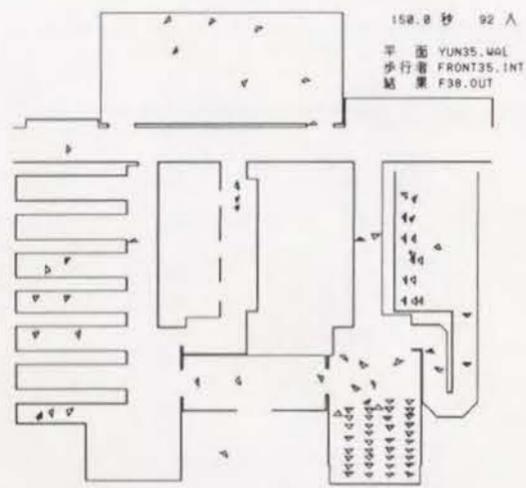
### 13.2.3 シミュレーション例3

スキー場からの帰館客を 68 人から 20 人に減らしてシミュレーションを行った例 (歩行者数= 108 人)



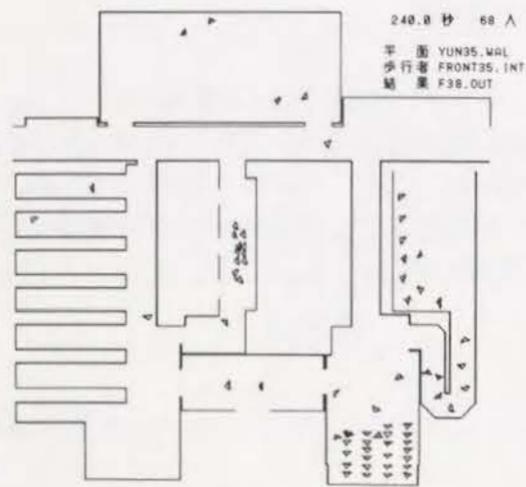
時刻=40.0秒

混雑はまだ見られない。



時刻=150.0秒

荷物一時置場で混雑が見られる。フロントロビーの混雑はこれまでのシミュレーション例に比較してかなり緩和されている。



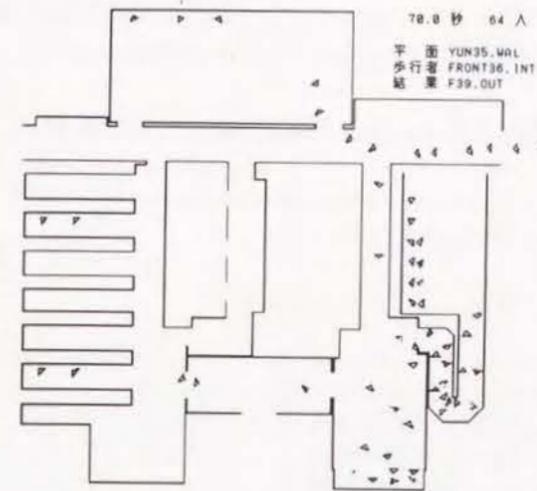
時刻=240.0秒

大多数の歩行者はフロントで受付を経て階段を降りて荷物一時置場で荷物を受け取る。ロッカーに荷物を置いた歩行者はエレベーターに乗り、上階の客室へ向かう。エレベーターホールに待ち行列が見られるが、まだひどい混雑ではない。

Figure 13-7 歩行者数を 108 人とした場合のシミュレーション例

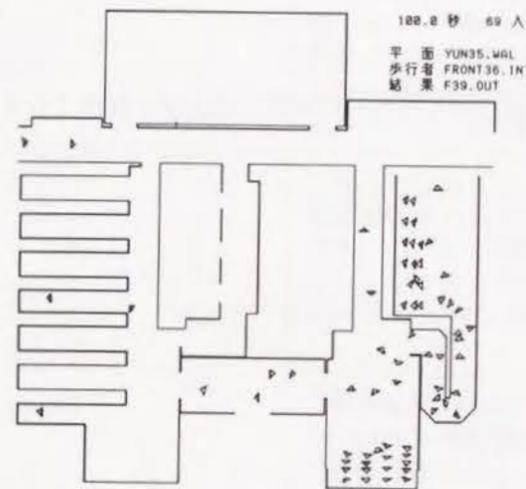
### 13.2.4 シミュレーション例4

バスによる到着客を、マイクロバス 1 台分の 29 人としたシミュレーション例 (歩行者数= 79 人)



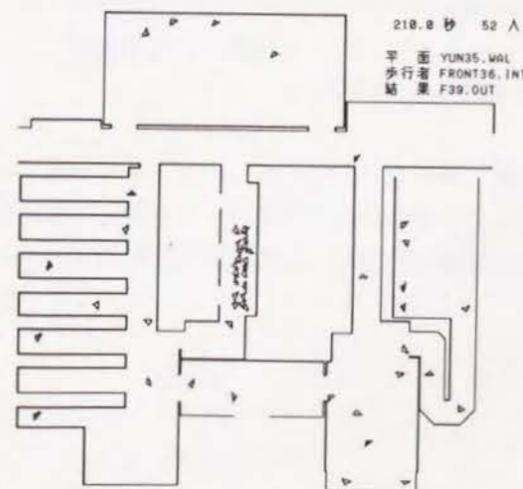
時刻=70.0秒

階段が混雑しているが、フロントロビー、荷物一時置場では混雑は見られない。



時刻=100.0秒

荷物一時置場及びフロントロビーで少し待ち行列ができています。



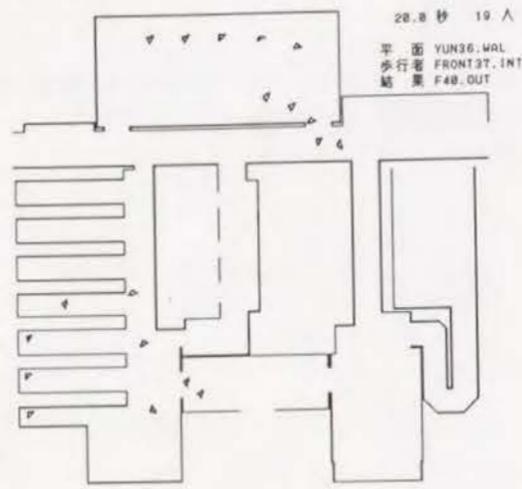
時刻=210.0秒

上階の客室へ行くため、エレベーターホールに待ち行列ができています。エレベーターホールが狭いので混雑し易い。他の場所では混雑は見られない。

Figure 13-8 歩行者数を 79 人とした場合のシミュレーション例

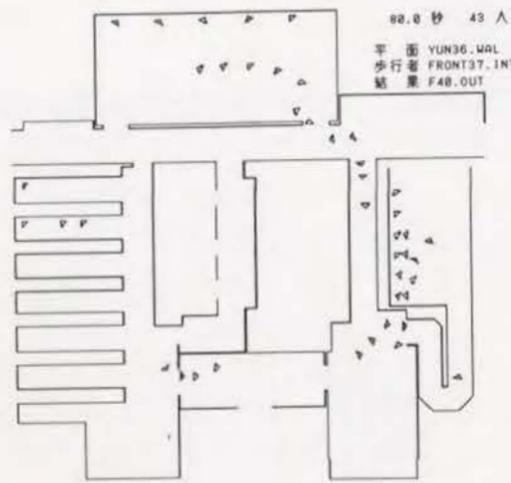
### 13.2.5 シミュレーション例5

歩行者数は例4と同様で、到着客の歩行経路を変更し、荷物一時置場を使用せず、入館後直接ロッカールームに荷物を置き、フロントで宿泊手続きを行った後フロント階のエレベーターに乗車し、各宿泊室へ向かう。



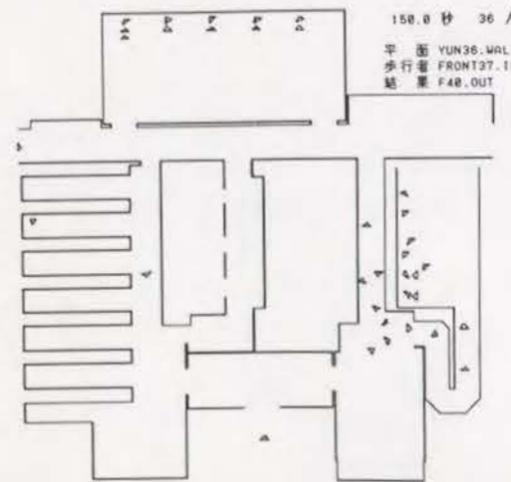
時刻=20.0秒

入館客はまずロッカールームへ行き、荷物を置く。



時刻=80.0秒

フロントに少し待ち行列が見られるが、混雑は見られない。



時刻=150.0秒

混雑する場所は見られない。

Figure 13-9 荷物一時置場を使用しない場合のシミュレーション例

### 13.2.6 シミュレーション結果

最初に Table 13-2 にあるような歩行者の条件でシミュレーションを行ったところ(例1)、フロントロビー、階段、及び荷物一時置場の混雑が激し過ぎる結果が現れた。そこで以下のように条件を変更し、その組み合わせにより5通りのシミュレーションを行った。それぞれのシミュレーション例のデータの主な変更点、結果を一覧表にすると、Table 13-3 の通りである。

| シミュレーション例 | データ変更点                                                                                                                 | 結果                                          |
|-----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|
| 1         | Table 13-2 の通り。<br>(総歩行者数=178人)                                                                                        | フロント、荷物一時置場、階段付近で極度に混雑、途中でフロントロビーが飽和状態となった。 |
| 2         | フロント窓口と荷物一時置場の窓口数を、それぞれ1つ増加し(フロント窓口=6、荷物一時置場=4)、バスによる到着客の集団 G1=24人、G2=34人として、22人減らす。<br>(総歩行者数=156人)                   | フロント、荷物一時置場、階段付近で混雑するが、持ちこたえる。              |
| 3         | スキー場からの帰館客を 68人から 20人に減らす。(S1=S2=6人、S3=S4=4人) 現実には連休初日等で、到着客の多い日はスキー場から帰館する滞在客は少ないと考えられる。<br>(総歩行者数=108人)              | 混雑は全体的に緩和されるが、荷物一時置場でかなり混雑が見られる。            |
| 4         | これまではバスが 0秒と 100秒に1台ずつ到着するものとして歩行者を発生させていたが、100秒に到着する2台目のバスを廃止し、バスによる到着客の集団 G1=12人、G2=17人(共に 0秒に発生)とする。<br>(総歩行者数=79人) | 混雑は全体的に緩和されるが、荷物一時置場、フロントロビーで少し待ち行列ができる。    |
| 5         | 荷物一時置場の使用を止め、バス又はマイカーによる到着集団 G1、G2、G3、G4 の歩行経路を以下のように変更する。<br>入館 → ロッカー室 → フロント<br>→ フロント階のエレベーター<br>(総歩行者数=79人)       | 混雑は見当たらない。                                  |

Table 13-3 湯沢メンバーズホテルメインフロアにおけるシミュレーション例

これらのシミュレーションを行った結果、例1から例4で荷物一時置場及び階段が特に混雑し、荷物一時置場の運営、フロントの配置に改善を要することが判明した。これにより、このシミュレーションモデルが平面内各部の混雑度を検討し、問題点の発見に役立つことを立証した。

### 13.3 人工島内の遊園地

東京湾に浮かぶ人工島に遊園地、水族館、展望台などを配置したレジャー施設が計画されており、特に混雑しそうな箇所（マリゲートからの連絡口、人工デッキ、水族館付近）における歩行者の行動のシミュレーションを行った例を示す。人工デッキ及び水族館付近の平面図は Figure 13-10 に示されており、その中の北東部にマリゲート、アクアミュージアム、人工デッキ等が配置されている。

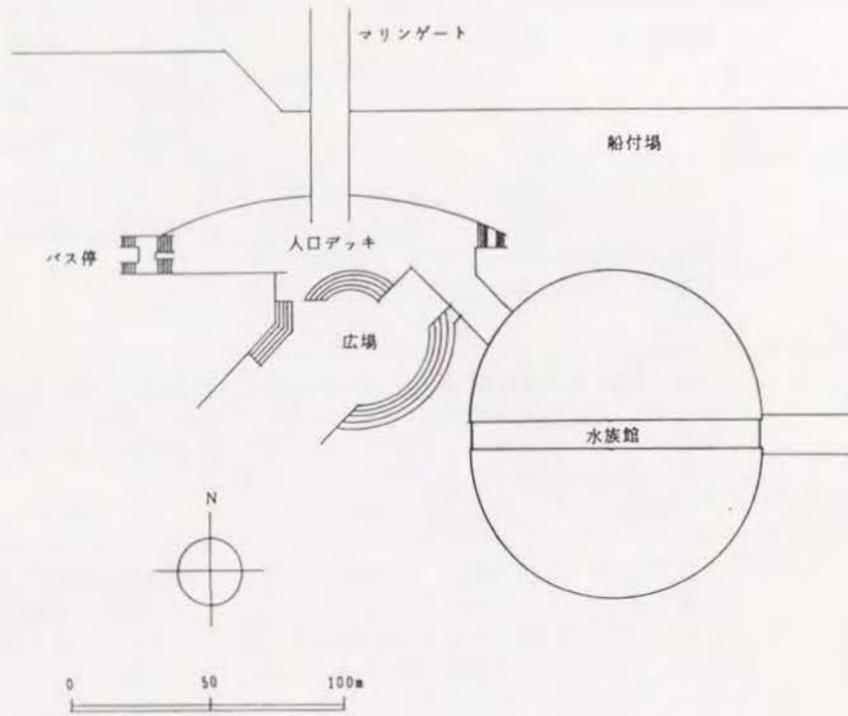
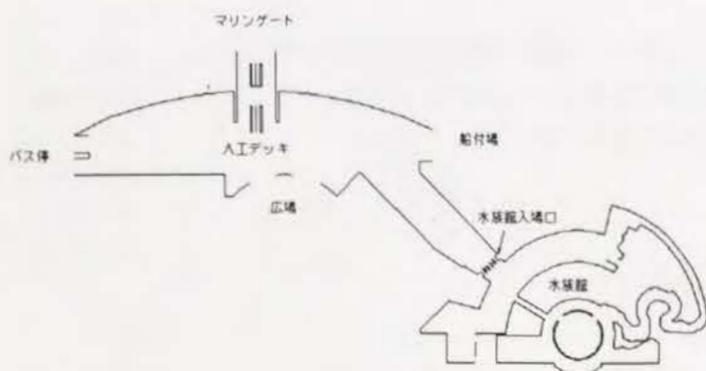


Figure 13-10 人工島の遊園地

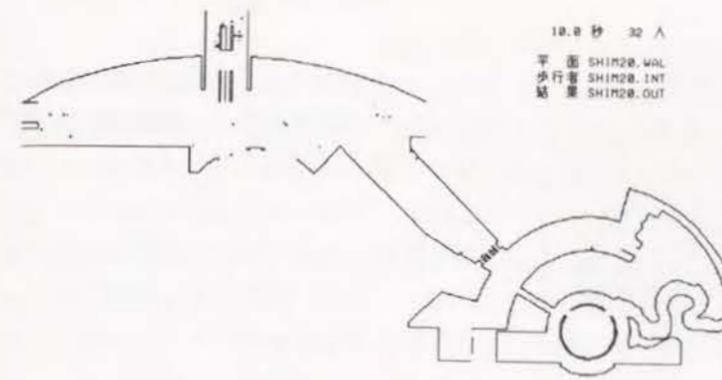
#### 13.3.1 人工デッキから水族館内への歩行（歩行者数= 820 人）

この例では水族館入場口のラッチに加え、人工デッキ上の見晴らしの良い所で風景を眺めたり、水族館内で水槽内の生物を鑑賞のため立止まる行動が発生するが、これらはカウンターの扱いを適用することにより再現している。



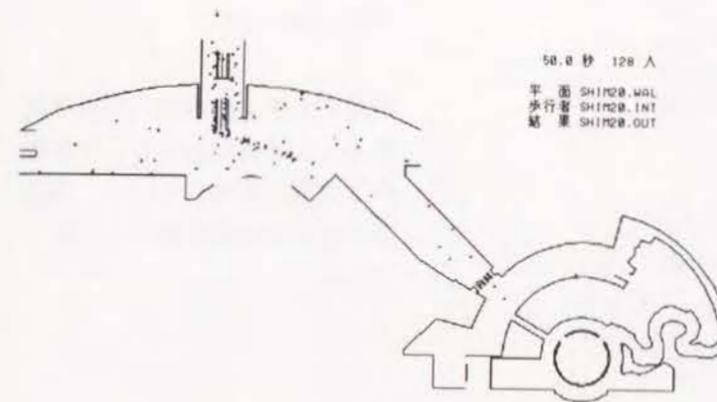
#### シミュレーション平面

島の平面図の一部分から左図のようなシミュレーション用の平面データを作成し、シミュレーションを行う。スケールが非常に大きいため、シミュレーション画面上では歩行者は三角形で表示しているが、点にしか見えなくなってしまう。



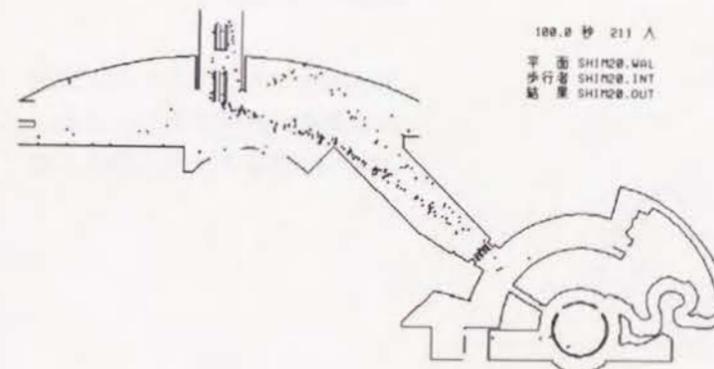
時刻=10.0秒

マリゲート、広場、バス停、船付場方面から歩行者が発生し、人工デッキを経由し、水族館に向かう。



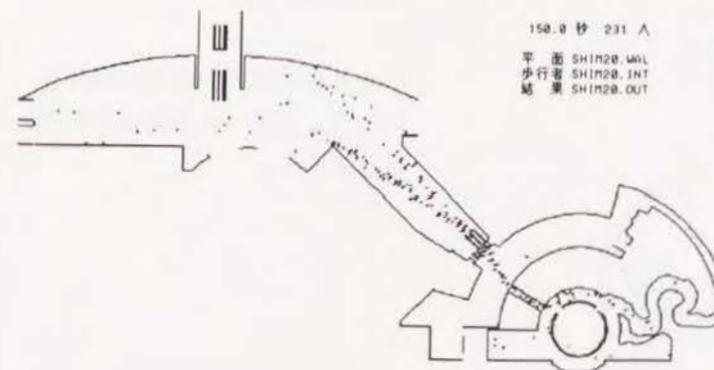
時刻=50.0秒

人工デッキ上の歩行者が増加する。



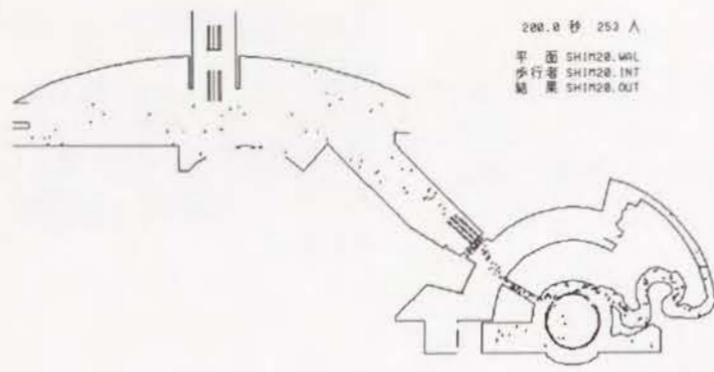
時刻=100.0秒

人工デッキから水族館方向へ多数の歩行者が移動しているのが見られる。



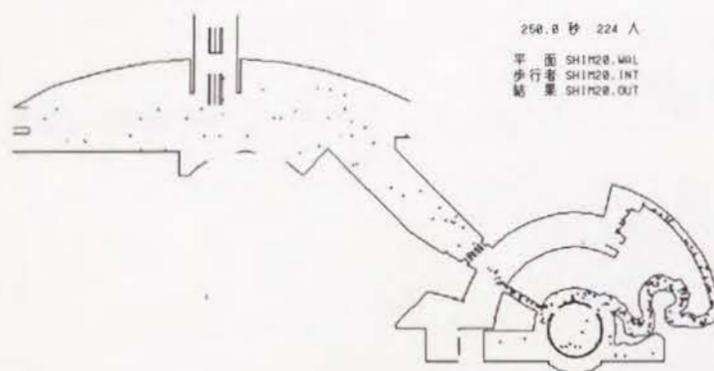
時刻=150.0秒

水族館内へ歩行者が入場し、館内を散策し始めている。水族館入場口には待ち行列ができています。



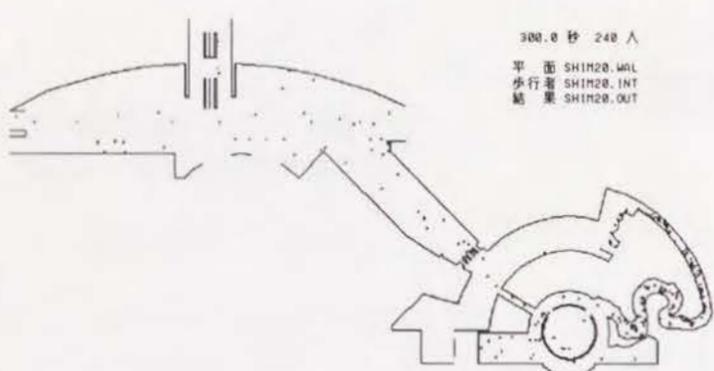
時刻=200.0秒

水族館入場口の待ち行列がピークを過ぎた状態。水族館内も見物客で混雑している。



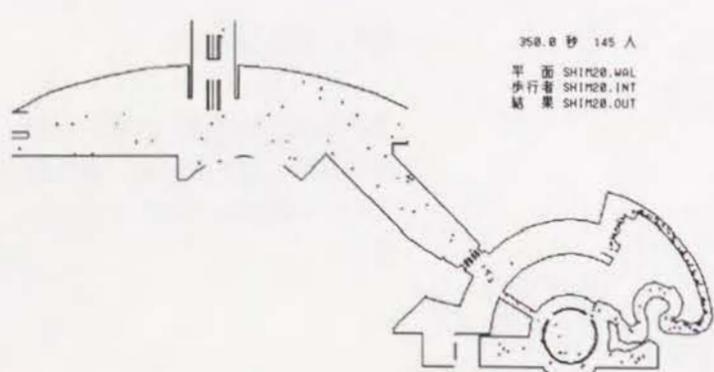
時刻=250.0秒

人工デッキ、水族館入場口は閑散とした状態であるが、水族館内は非常に混雑している。観覧客は観覧の順路を辿り、上階へ進む。



時刻=300.0秒

水族館内でも入場口に近い部分から混雑が解消されて行くが、上階への通路は非常に混雑している。



時刻=350.0秒

かなり水族館内の混雑は緩和されたが、上階への通路はまだ混雑している。

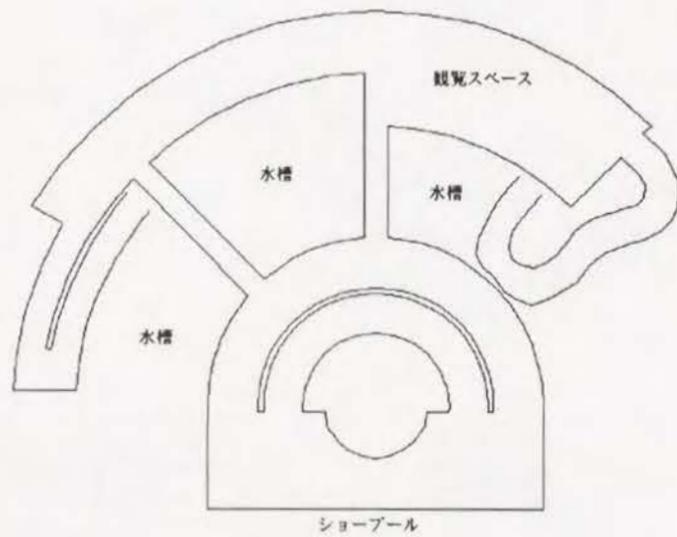
シミュレーション結果

この例では、人工デッキ上の眺望の良い位置で立ち止まって海を眺めたり、水族館内の水槽の周囲で魚類を鑑賞する行動が起こるが、これらはカウンター型の待ち行動を適用して実現することができた。水族館入場口はラッチ型になっており、入場口前に100人以上の待ち行列ができ、順に入場する行動も実現に成功した。その結果このシミュレーションモデルにより、これまでの例で示した建築物平面内ばかりでなく、遊園地、博覧会場などの屋外の地域におけるシミュレーションも可能であり、水族館入場口の混雑度や、館内の狭い通路の混雑度等の問題点の発見に役立つことを立証した。尚、このシミュレーションでは、これまで行った中で最大の歩行者数(820人)を扱ったが、計算結果データの記憶容量は約20.3MBで、ハードディスク、光ディスク等の記憶装置が普及している現状では特に問題とはならない。

Figure 13-11 東京湾に浮かぶ人工島内の歩行シミュレーション (歩行者数 820 人)

13.3.2 水族館内の歩行 (歩行者数 = 300 人)

このシミュレーション例は前節の例と同じ建物内の別の階の平面上でシミュレーションを行ったものである。スタート地点は前節のシミュレーション例の目的地となっていた地点とほぼ等しい位置である。この平面では、歩行者が至る所で立ち止まって水槽内の魚類を鑑賞する行動が起こる。この鑑賞行動をカウンター型待ち行動モデルにより再現するため、平面内の水槽周囲及び、ショープールに沿った部分にカウンターを想定したデータを与え、歩行者の集団がそれぞれ歩行経路として与えられたカウンター前で一定時間立ち止まりながら平面内を移動することによりシミュレーションを実行した。特に水槽と水槽の間に細い通路が2本見えるが、そこでは大きな水槽内をガラスのチューブのような通路が通っており、歩行者は水中を歩く様な感じで魚類を鑑賞できる。従ってこの通路部分では特に歩行者が立ち止まって混雑することが予想されたので、これをモデルにより再現するため、通路に沿った部分に約 60cm 間隔で窓口が並ぶカウンターのデータを与えて、高密度の群集の鑑賞行動を再現した。

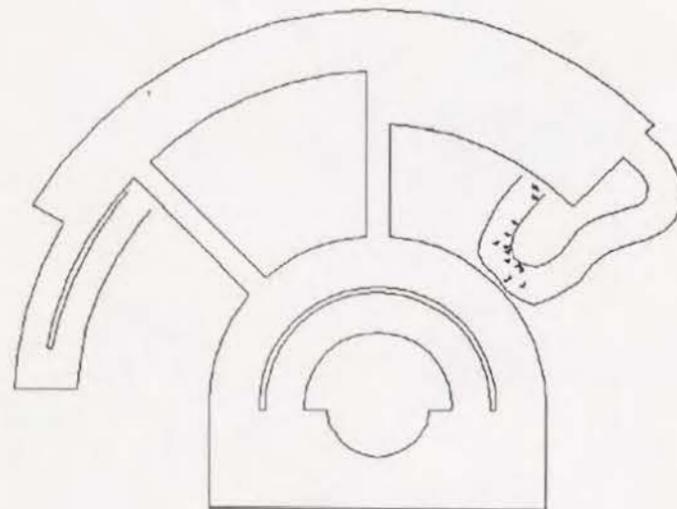


シミュレーション平面

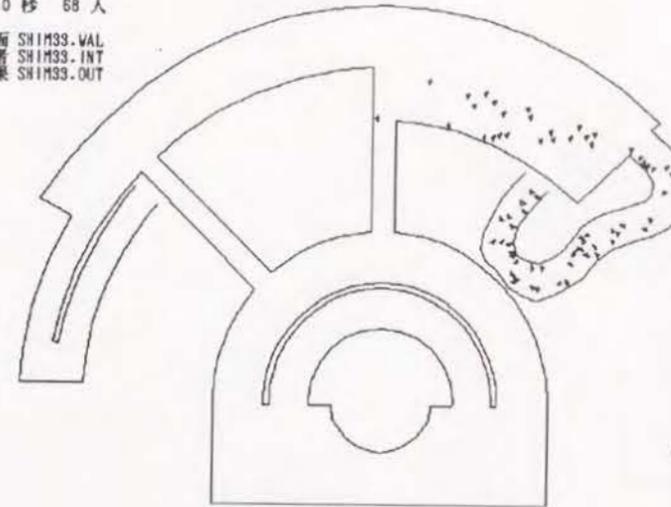
スタート地点からしばらくは細い散策路を通り、それを抜けると大きな水槽の観覧スペースに出る。それらの水槽内の生物を鑑賞しながら歩行を続け、最終的に出口に到達する。

時刻=10.0秒

歩行者が発生し始める。



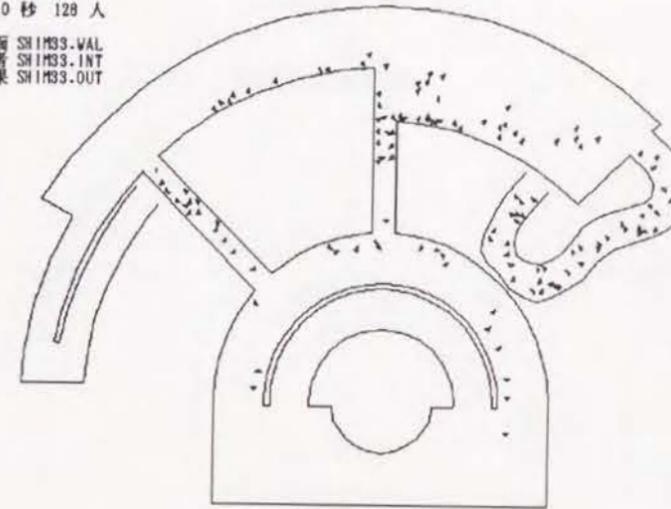
50.0 秒 68 人  
平 面 SHIM33.WAL  
歩 行 者 SHIM33.INT  
結 果 SHIM33.OUT



時刻=50.0秒

だんだんと水槽周辺に歩行者が進んで行く。

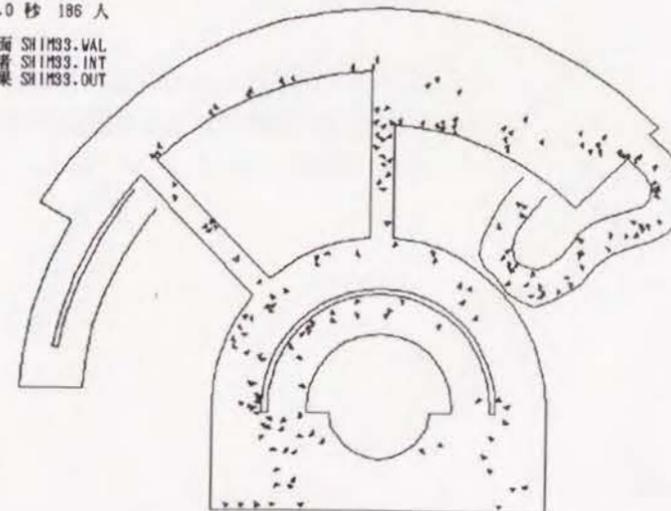
100.0 秒 128 人  
平 面 SHIM33.WAL  
歩 行 者 SHIM33.INT  
結 果 SHIM33.OUT



時刻=100.0秒

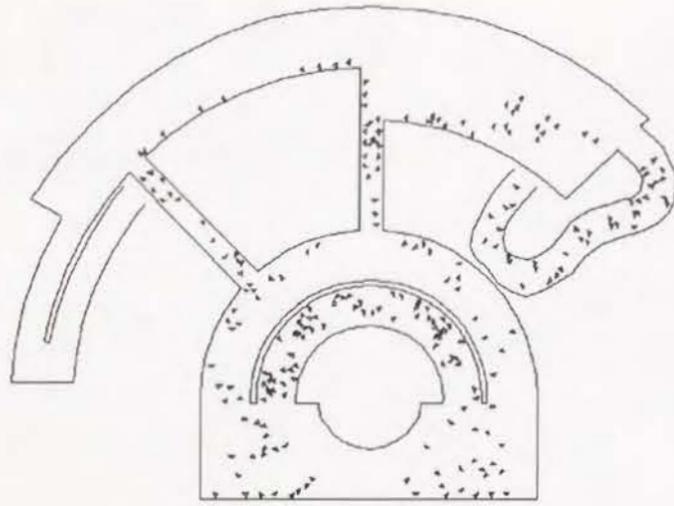
水槽周辺がだんだん混雑し始める。

150.0 秒 186 人  
平 面 SHIM33.WAL  
歩 行 者 SHIM33.INT  
結 果 SHIM33.OUT



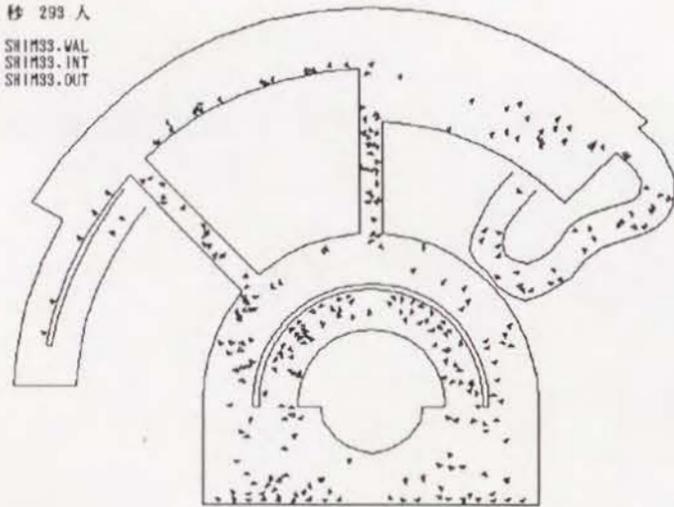
時刻=150.0秒

歩行者が館内至る所で観覧している。



時刻=200.0秒

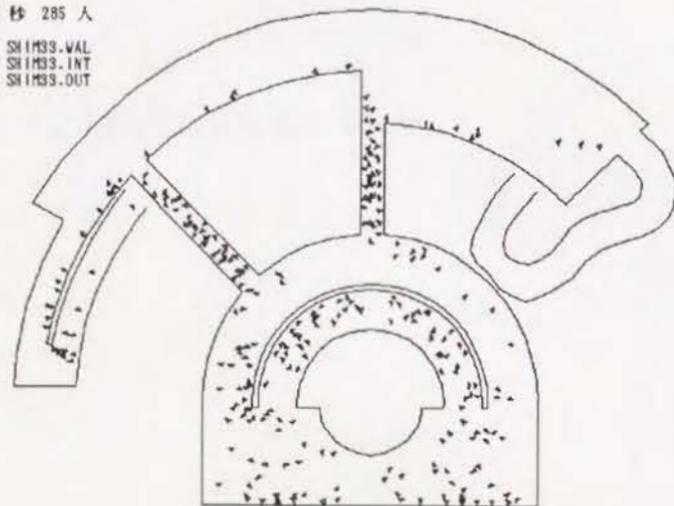
250.0秒 293人  
平面 SHIM33.WAL  
歩行者 SHIM33.INT  
結果 SHIM33.OUT



時刻=250.0秒

館内全体が混雑している。

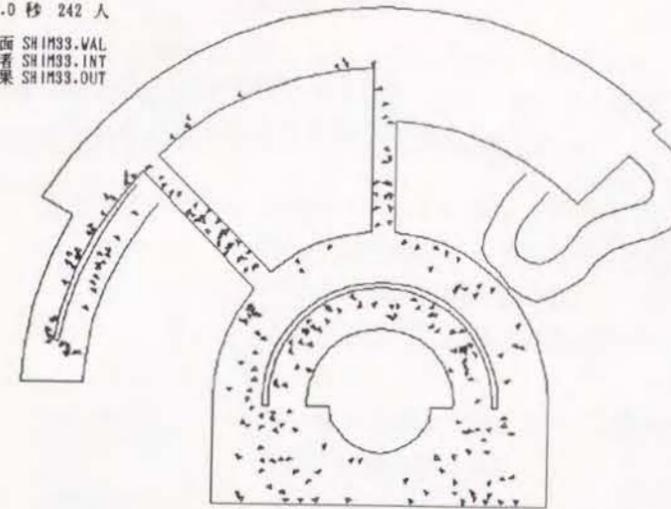
300.0秒 285人  
平面 SHIM33.WAL  
歩行者 SHIM33.INT  
結果 SHIM33.OUT



時刻=300.0秒

スタート地点付近は歩行者が見られないが、他の場所では特に水族館の間の通路が混雑している。

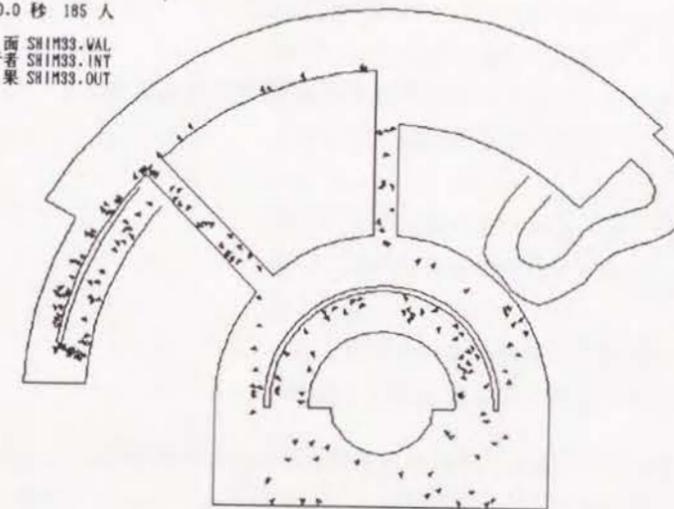
350.0秒 242人  
平面 SHIM33.WAL  
歩行者 SHIM33.INT  
結果 SHIM33.OUT



時刻=350.0秒

観覧客が順に退場し、少しずつ観客数が減少する。

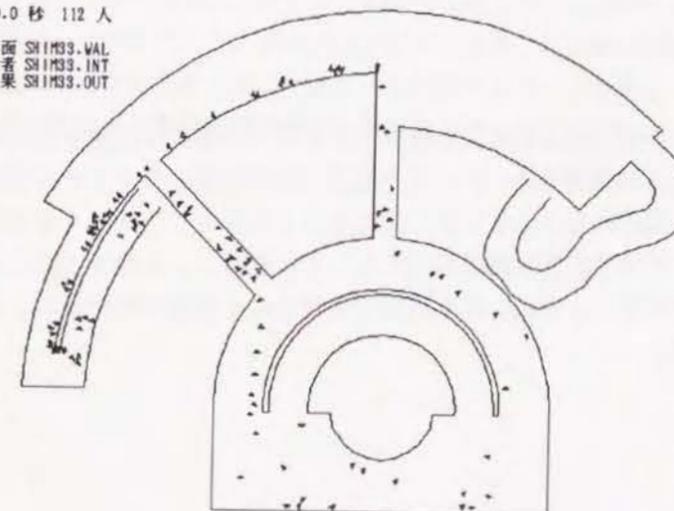
400.0秒 185人  
平面 SHIM33.WAL  
歩行者 SHIM33.INT  
結果 SHIM33.OUT



時刻=400.0秒

館内の混雑はかなり緩和されるが、退出口への通路は混雑している。

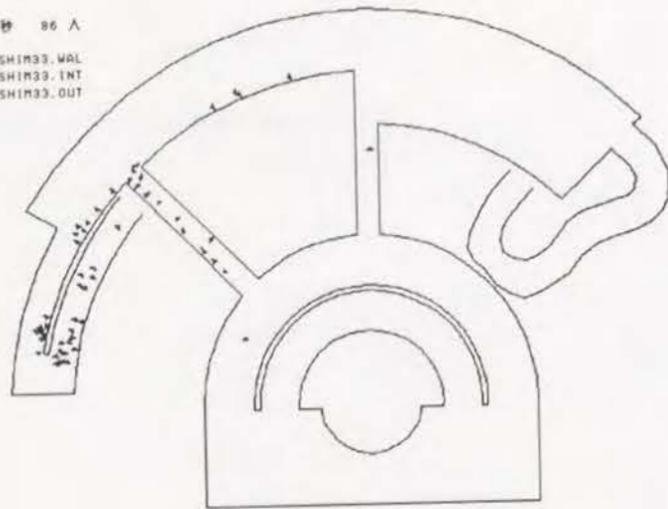
450.0秒 112人  
平面 SHIM33.WAL  
歩行者 SHIM33.INT  
結果 SHIM33.OUT



時刻=450.0秒

全体の2/3近くの歩行者が退出した。

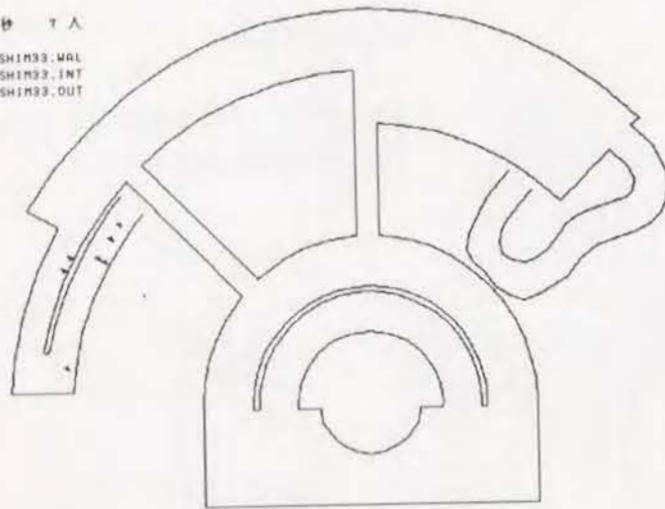
500.0秒 96人  
平面 SHIM33.MAL  
歩行者 SHIM33.INT  
結果 SHIM33.OUT



時刻=500.0秒

退出口への通路付近を除くと、ほとんど歩行者が見られなくなった。

550.0秒 7人  
平面 SHIM33.MAL  
歩行者 SHIM33.INT  
結果 SHIM33.OUT



時刻=550.0秒

ほとんど歩行者は見られない。

Figure 13-12 水族館内の歩行シミュレーション

#### シミュレーション結果

この例では、水槽周辺、ショーパール周辺の至る所で歩行者が立ち止まって水槽内の生物を鑑賞する行動を再現し、平面内の各部分の混雑度を検討することが課題であった。この鑑賞行動の再現にカウンター型の待ち行動モデルを適用し、水槽及びショーパール周辺にカウンター窓口が並ぶことを仮定したデータを与えてシミュレーションを行った。その結果高密度の群衆の鑑賞行動を再現することに成功し、このモデルが本来はカウンターなど無い様な空間において歩行者が立ち止まる行動を再現するためにも使用可能であり、平面内の混雑度の検討に有効であることを立証した。

## 第II章のまとめ

デパート、事務所ビル、駅、空港等で行った調査に基づいて待ち空間における歩行者の行動パターンを「カウンター型」、「ラッチ型」、「乗降口型」の3種類に分類し、それぞれの歩行特性を分析し、モデル化を行った。それらをまとめると以下の通りである。

カウンター型 — 既存のシミュレーションモデルでは単に待ち人数と待ち時間の算定しか行われていなかったのに対し、「待ち行列への接近」、「待ち行列の迂回」、「待ち行列中で静止」、「待ち行列中で前に詰める」、「待ち行列からの退去」と、5段階の行動が調査により確認された。これらの各段階の行動を実行するアルゴリズムを作成し、モデル化を行った。

ラッチ型 — サービスを受けた後、ラッチの間を通過する行動がカウンター型の「待ち行列からの退去」に置き替わる。

乗降口型 — エレベーターホールにおいて行動パターンの分析を行い、行動パターンを閑散時、混雑時1、混雑時2の3種類に分類した。

閑散時の行動パターンは、エレベーターホール内に混雑が見られず、待ち行列も発生せず、少数の歩行者が余裕を持って乗降するものである。

混雑時1の行動パターンはエレベーター乗降口前に待ち行列ができるが、待ち客が降車する客の通路を空けずに並び、エレベーターから降車した客は待ち行列を避けて歩行する。

混雑時2の行動パターンは、エレベーター乗降口前に待ち客が降車客のための通路を空けて待ち行列を構成し、エレベーターから降車した客は空けられた通路を歩いて歩行するものである。

この3種類のうち閑散時の行動パターンは、モデル化の必要性が少ないと考えられ、混雑時1と混雑時2の2種類のモデルを作成した。

これら3種類の型の待ち行動モデルと通常の歩行モデルを総合したシステムにより、単純な待ち空間においてシミュレーションを行い、3種類の待ち行動モデルにより、待ち行動を再現できることを示した。更に第13節において3種類の大規模な複数の待ち空間を持つ平面上でシミュレーションを行い、これら3種類の待ち行動モデルにより、カウンター、ラッチ、エレベーターホール、以外にも「ロッカー」や「荷物一時置場」で荷物の出し入れのために立ち止まる、水族館の水槽内の生物を「鑑賞」するために立ち止まる等の行動もここで作成したモデルにより再現できることを示し、平面内の混雑度の検討、待ち行列と通常の歩行者の動線との交錯の検討等に有効であることを立証した。

## 結論

設計行為において、空間と人間行動の対応を把握し、空間特性の検討及び評価のための有力な手段として、群集歩行モデルによるコンピューターシミュレーションがある。これまで磁場の理論を群集の歩行に適用し、空間の各点に位置する歩行者が磁場から力を受け、力の方向と大きさを与えられ、それに基づいて行動する歩行モデルを開発してきた。この磁場に経路の概念を与えることにより、複雑な空間において最短経路を歩行したり、誘導標に従って歩行する行動のモデルがこれまで実現していた。この研究では、新たに、歩行者が目的地への経路を知らず、目的地を探しながら歩行する探索歩行と、歩行途中で立ち止まり、行列を作って待つ待ち行動に関して実験と観察を行い、その歩行特性の解明とモデル化を行った。この探索歩行及び待ち行動のモデルを既存の磁場モデルに付加し、総合したシステムにより、より複雑な群集歩行の再現を可能にした。そして、この群集歩行モデルを用いたシミュレーション例により、空間における歩行者の避難、誘導、混雑度などの問題点の検討に対して有効であることを示した。

今日のように空間が複雑且つ大規模化し、数百、数千人の大群集がその中を歩行する状況は、設計者の経験や慣例からだけでは予測は困難である。群集歩行モデルによるコンピューターシミュレーションは、人間の行動を可視的にし、又数量的に把握可能とすることができ、人間行動の予測を行うための有効な手段である。この研究で開発した群集歩行モデルは、このような空間において、より広範囲な人間行動の再現を可能にし、空間特性の検討に対する有効性を高めることができたと言える。設計行為は、設計主体の感覚的、直感的、経験的蓄積による分析不可能な行為であると同時に、人間行動、行動と空間との対応、空間の物理的構築など、科学的分析に基づく行為と考えられる。この後者に属する設計行為として、この群集歩行モデルを用いて空間特性の検討を行う行為を位置付けようと考え、この研究に取り組んできた。更にこのような設計行為を、設計行為全体の中の1つのプロセスとして位置付けることを目指した。

### 探索歩行

探索歩行のモデル化に関しては、当初は心理学における迷路学習理論に見られる接近行動、迂回行動、認知地図の考え方にに基づき、モデルを構築しようと考えた。

ところが、実験を繰り返しているうちに接近行動及び迂回行動には左回りと右回りが見られることが判明した。認知地図については、まだ不完全と思われるが、実験結果から、歩行者はこれから進もうとする経路のイメージを持って歩行すると仮定し、それを歩行者の歩行方針として「左回り接近」、「右回り接近」、「左回り迂回」、「右回り迂回」の何れかを持ち、それによって歩行経路を選択すると考えた。

しかし、歩行方針は必ずしも歩行の最初から最後まで一定ではなく、歩行者は状況の変化により、歩行方針を変更していることが実験結果から判明した。歩行方針を変更させる状況変化は、以下の4通りがあることを実験結果から確認した。

これらのうち、「状況変化は無いが、そのままうまく行けそうにないと言う不安を持っている場合」の歩行方針の変更については、明確な傾向を発見できなかった。他の3つの状況変化に対し、歩行方針を変更する場合の分析だけに止まった。

行き止まりに陥った場合

既通過地点に戻った場合

そのまま進むと目的地から離れる場合

状況変化は無いが、そのままうまく行けそうにないと言う不安を持っている場合

迷路歩行実験において観察された被験者の歩行パターンは数種類に分類されたが、歩行パターンに影響を与える要因として以下の4通りが発見された。

経路の記憶 ----- 歩行者が通過した経路を記憶し、なるべく既通過経路を通らない。

歩行方針 ----- 歩行者が「左回り接近」、「右回り接近」、「左回り迂回」、「右回り迂回」の何れかの歩行経路イメージを持ち、それによって歩行経路を選択する。

前進傾向又は後戻り傾向 --- 歩行者が「そのまま進むと目的地から離れる」状況変化に対し、歩行方針をそのままの方向に迂回するように変更し、前進し続ける傾向を「前進傾向」とし、「後戻り傾向」はそれに対して、反対方向に迂回するように歩行方針を変更し、後戻りする傾向である。

直進傾向又は屈進傾向 ----- 目的地方向に接近しているとき、同じ向きに曲がるコーナーが複数見える場合にできるだけ直進しようとする傾向を「直進傾向」とし、「屈進傾向」は逆である。

これら4通りの要因の中、「経路の記憶」は全被験者に共通に見られ、歩行パターンの被験者毎の相違には関与しないと考えられる。「歩行方針」は状況変化に応じて変化するが、残りの2つの傾向が変化する明確な状況は実験結果からは発見されず、これらは各歩行者の個人的な特性であり歩行途中で変化しないものと考え、これらの何れの傾向を持っているかにより、歩行パターンの違いが発生すると結論付けた。

以上の実験結果の分析をもとに探索歩行のモデル化を行った。歩行者を、状況変化を入力とし、入力に対して歩行方針を変更し、それに基づく適当なコーナー選択を出力とするシステムとしてアルゴリズムを作成し、モデル化した。個人的特性として、シミュレーション開始時に「歩行方針」、「前進傾向又は後戻り傾向」、「直進傾向又は屈進傾向」の3通りの要因を初期条件としてデータを与えシミュレーションを実行し、実験で観察された大部分の歩行パターンの再現に成功した。

この探索歩行モデルだけでは現実の都市・建築空間における歩行の再現には不十分である。より現実的な歩行を再現するため「4 迷路歩行実験」の冒頭部分で実験用迷路と現実の空間との相違点について考察し、「8 誘導標による歩行」において、経路を知っている場合の「最短経路歩行」、外部から情報を取り入れる場合の「誘導標による歩行」と組み合わせ、歩行者とその環境との関係に従って適当な歩行モデルを選択するシステムを開発した。この3通りの歩行モデルを総合したシステムにより、迷路内に誘導標を配置した場合や、事務所ビルにおける避難行動の再現に成功し、歩行者の誘導、避難等の面で実用化できることを示した。

## 待ち行動

待ち行動の型を調査とその分析により「カウンター型」、「ラッチ型」、「乗降口型」の3種類に分類し、それぞれのモデル化を行った。従来待ち行列理論やネットワーク型のシミュレーションモデルで行われていた、待ち人数と待ち時間の算定に加え、待ち行列への接近から退去までの行動を段階毎に分けてモデル化のためのアルゴリズムを作成した。更に待ち行列に加わらず、待ち空間を通過するだけの群集の行動も含めた総合的な歩行を再現するモデルを提示した。これら3通りの待ち行動モデルをまとめると以下の通りである。

カウンター型 —— 既存のシミュレーションモデルでは単に待ち人数と待ち時間の算定しか行われていなかったのに対し、「待ち行列への接近」、「待ち行列の迂回」、「待ち行列中で静止」、「待ち行列中で前に詰める」、「待ち行列からの退去」と、5段階の行動が調査により確認された。これらの各段階の行動を実行するアルゴリズムを作成し、モデル化を行った。

ラッチ型 —— サービスを受けた後、ラッチの間を通過する行動がカウンター型の「待ち行列からの退去」に置き替わる。

乗降口型 —— エレベーターホールにおいて行動パターンの分析を行い、行動パターンを閑散時、混雑時1、混雑時2の3種類に分類した。

閑散時の行動パターンは、エレベーターホール内に混雑が見られず、待ち行列も発生せず、少数の歩行者が余裕を持って乗降するものである。

混雑時1の行動パターンはエレベーター乗降口前に待ち行列ができるが、待ち客が降車する客の通路を空けず並び、エレベーターから降車した客は待ち行列を避けて歩行する。

混雑時2の行動パターンは、エレベーター乗降口前に待ち客が降車客のための通路を空けて待ち行列を構成し、エレベーターから降車した客は空けられた通路を歩いて歩行するものである。

この3種類のうち閑散時の行動パターンは、モデル化の必要性が少ないと考えられ、混雑時1と混雑時2の2種類のモデルを作成した。

これら3種類の型の待ち行動モデルと通常の歩行モデルを総合したシステムにより、単純な待ち空間においてシミュレーションを行い、3種類の待ち行動モデルにより、待ち行動を再現できることを示した。

更に第13節において3種類の大規模な複数の待ち空間を持つ平面上でシミュレーションを行い、これら3種類の待ち行動モデルにより、カウンター、ラッチ、エレベーターホール、以外にも「ロッカー」や「荷物一時置場」で荷物の出し入れのために立ち止まる、水族館の水槽内の生物を「鑑賞」するために立ち止まる等の行動もここで作成したモデルにより再現できることを示し、平面内の混雑度の検討、待ち行列と通常の歩行者の動線との交錯の検討等に有効であることを立証した。

## 未解決の問題

しかし、まだ未解決の問題も山積しており、これから取り組むべき課題として残されている。それらは以下に述べるような事柄である。

1. 探索歩行において状況変化が無い場合でも不安を持ち、歩行方針を変更する。目的地にうまく到達できず、同じ箇所を何度も歩行したり、出発点に戻って来たりする混乱型と分類した行動のモデル化。
2. 歩行者間の関係として2人以上の集団で歩行する場合、他人を誘導して歩行する場合及び他人に追従して歩行する場合等のモデル化は未解決のままである。
3. 緊急時の行動に関しては、最近ではパニック時の行動も日常行動の延長として捉えられる傾向にあるが、まだ行動特性が十分に解明されておらず、モデル化は困難である。本研究でも第8節で避難行動を扱ったが、これは歩行者が正常な判断力を持ち、安全な経路を選択して避難したシミュレーション

であり、パニックで混乱した状況のシミュレーションは実現できていない。

以上の未解決の問題を徐々に解明していくことにより、人間行動のモデル化の可能性をより拡大して行けることが期待できる。その様な歩行モデルによる群集歩行シミュレーションを用いて、空間と人間行動の対応をより広範囲に把握し、空間特性の検討及び評価に役立て、将来に渡ってより広範囲に且つ深く設計行為に貢献していくことを目指すものである。

## 参考文献

- 相場覚編：現代基礎心理学 第2巻 知覚 I 基礎過程，東京大学出版会，1982年
- 安倍北夫：災害心理学序説，サイエンス社，1982年
- 安部北夫：パニックの心理，講談社，1974年
- Ballachey, E. L. and Buel, J. Centrifugal Swing as a Determinant of Choice-point Behavior in The Maze Running of The White Rat. J. comp. Psychol., 17, 1934, pp.201-223
- Bolles, Robert C. Learning Theory, 2nd ed. Holt, Rinehart and Winston, 1979.  
今田寛(訳)：学習の心理学，培風館，1982年
- Dashiell, J. F. and Bayloff, A. G. A Forward-going Tendency in Maze Running. J. comp. Psychol., 12, 1931, pp.74-94
- Fruin, John J. PEDESTRIAN Planning and Design. Kajima Institute Publishing Co. Ltd., 1974.  
長島正充(訳)：歩行者の空間，鹿島出版会，1974年
- Gordon, Geoffrey. The Application of GPSS V to Discrete Systems Simulation. Prentice Hall, Inc., 1975
- Guillaume, Paul. La Psychologie de la Forme. Librairie Ernest Flammarion, 1937.  
八木晃(訳)：ゲシュタルト心理學，岩波書店，1952年
- Hall, Edward T. The Hidden Dimension. Doubleday & Company Inc., 1966.  
日高敏隆，佐藤信行(訳)：かくれた次元，みすず書房，1970年
- 原広司，他：新建築学大系23 建築計画，彰国社，1982年
- 日色真帆：都市空間の経路に関する研究 LOGOによる経路の表現，日本建築学会大会学術講演梗概集，1987年10月，pp.567-568
- 日色真帆：都市空間の経路に関する研究 銀座におけるWAYFINDING実験，日本建築学会大会学術講演梗概集，1988年10月，pp.591-592
- 日色真帆，原広司，門内輝行，金尾朗：都市空間における経路探索に関する研究 Object Logoによるコンピュータ・シミュレーション，日本建築学会大会学術講演梗概集，1990年10月，pp.877-878
- Honzik, C. H. The Sensory Basis of Maze Learning in Rats. Comp. Psychol. Monogr., 13, 1936, pp. 1-113
- Hopcroft, John E. and Ullman, Jeffrey D. Introduction to Automata Theory, Languages and Computation. Addison-Wesley Publishing Co. Inc., 1979.  
野崎昭弘，町田元，高橋正子，山崎英記(訳)：オートマトン言語理論計算論 I，サイエンス社，1984年
- Hopcroft, John E. and Ullman, Jeffrey D. Introduction to Automata Theory, Languages and Computation. Addison-Wesley Publishing Co. Inc., 1979.  
野崎昭弘，町田元，高橋正子，山崎英記(訳)：オートマトン言語理論計算論 II，サイエンス社，1986年
- 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，昭和52年8月，pp.123-130
- 堀内三郎：建築防災，朝倉書店，1972年
- Hull, Clark L. A BEHAVIOR SYSTEM An Introduction to Behavior Theory. Yale University Press, 1952.  
能見義博，岡本栄一(訳)：行動の体系，誠信書房，1971年
- 船橋國男：不慣れな地区における歩行の傾向について その1，日本建築学会大会学術講演梗概集，1980年9月，pp.1157-1158
- 船橋國男：“WAYFINDING”研究に関する一考察 環境の物理的特性の影響について，日本建築学会大会学術講演梗概集，1987年10月，pp.581-582
- 船橋國男：不慣れな建築空間におけるwayfindingに関する実験的研究 再現歩行と経路の空間把握，日本建築学会大会学術講演梗概集，1988年10月，pp.675-676
- 船橋國男：環境行動研究におけるトランザクショナリズムに関する一考察 理論の概要並びに建築計画学との関係，日本建築学会大会学術講演梗概集，1989年10月，pp.785-786
- 船橋國男：さがす・まよう・わかる WAYFINDING研究課題の一考察，日本建築学会大会学術講演梗概集，1990年10月，pp.813-814
- 二村良彦：プログラム技法，オーム社，1984年
- 池田謙一：緊急時の情報処理，東京大学出版会，1986年
- 乾正雄，他：新建築学大系11 環境心理，彰国社，1982年
- 伊理正夫，古林隆：ネットワーク理論，日科技連出版社，1976年
- 柿倉正義：知能ロボット入門，工業調査会，1987年
- 川越邦雄，他：新建築学大系12 建築安全論，彰国社，1983年

小林正美：建築空間における災害時の人間行動と建築計画，1982年浦河沖地震住宅内滞在者の行動分析，日本建築学計画系論文報告集第408号，1990年2月，pp. 43-52

小林正美，堀内三郎：オフィスビルにおける火災時の人間行動の分析 その1 行動の分類，日本建築学会論文報告集第280号，1979年6月，pp. 137-142

小林正美，堀内三郎：オフィスビルにおける火災時の人間行動の分析 その2 行動パターンの抽出，日本建築学会論文報告集第284号，1979年10月，pp. 119-125

Koffka, K. Principles of Gestalt Psychology. Harcourt, Brace and Company, 1935

近藤次郎：オペレーションズ・リサーチの手法，日科技連出版社，1973年

Lewin, Kurt. Field Theory in Social Science. Harper & Brothers, 1951.  
猪股佐登留（訳）：社会科学における場の理論，誠信書房，1979年

Lynch, Kevin. The Image of The City. M. I. T. Press, 1960.  
丹下健三，富田玲子（訳）：都市のイメージ，岩波書店，1968年

Macduff, M. M. The Effect on Retention of Varying Degrees of Motivation During Learning in Rats. J. comp. Psychol., 39, 1946, pp. 207-240

松下聡，岡崎甚幸：待ち空間を考慮した群集歩行のシミュレーションモデルの研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，1989年10月，pp. 819-820

松下聡，岡崎甚幸：迷路探索歩行のためのシミュレーションモデル，日本建築学会大会学術講演梗概集，1990年10月，pp. 659-660

Merleau-Ponty, Maurice. La Structure du Comportement. Presses Universitaires de France, 1942.  
木田元，滝浦静雄（訳）：行動の構造，みすず書房，1964年

三谷健次：電磁気学，共立出版，1971年

水本雅晴：ファジイ理論とその応用，サイエンス社，1988年

Moles, Abraham A. and Rohmer, Elisabeth. Psychologie de L'espace. Casterman, 1978.  
渡辺淳（訳）：空間の心理学，法政大学出版局，1983年

森村英典，大前義次：応用待ち行列理論，日科技連出版社，1975年

室崎益輝，高林一樹，大西一嘉：避難時の「不適応行動」に関する考察，日本建築学会大会学術講演梗概集，1989年10月，pp. 779-780

中祐一郎：交錯流動のシミュレーションモデル，鉄道駅における旅客の交錯流動に関する研究（2），日本建築学会論文報告集第267号，1978年5月，pp. 103-111

中村和男，吉岡松太郎，稗田哲也：歩行者流動モデルとそのシミュレーション，人間工学vol. 10, No3, 1971年6月，pp. 93-102

中野栄二：ロボット工学入門，オーム社，1983年

日本建築センター編：新・建築防災計画指針，日本建築センター，1985年

日本建築学会編：建築設計資料集成5 単位空間Ⅲ，丸善，1981年，pp. 21-22

日本建築学会編：建築設計資料集成8 建築-産業，丸善，1981年，pp. 8-9

岡田光正，柏原士郎，吉村英祐，横田隆司，東利彦：視覚情報に基づく建物火災時の三次元ネットワーク避難シミュレーションシステムの開発，日本建築学会・情報システム技術委員会第12回情報システム利用技術シンポジウム，1989年，pp. 421-426

岡田光正：火災安全学入門，学芸出版社，1985年

岡田光正，他：新建築学大系13 建築規模論，彰国社，1988年

岡崎甚幸：GEOGRAPHICAL ORIENTATION，日本建築学会大会学術講演梗概集，1972年10月，pp. 469-470

岡崎甚幸：街路の方向認知，日本建築学会大会学術講演梗概集，1973年10月，pp. 453-454

岡崎甚幸：建築空間における歩行のためのシミュレーションモデルの研究 その1 磁気モデルの応用による歩行モデル，日本建築学会論文報告集第283号，1979年9月，pp. 111-117

岡崎甚幸：建築空間における歩行のためのシミュレーションモデルの研究 その2 混雑した場所での歩行，日本建築学会論文報告集第284号，1979年10月，pp. 101-110

岡崎甚幸：建築空間における歩行のためのシミュレーションモデルの研究 その3 停滞や火災を考慮して最短経路を選ぶ歩行，日本建築学会論文報告集第285号，1979年11月，pp. 137-144

岡崎甚幸，松下聡：建築空間における歩行のためのシミュレーションモデルの研究 その5 探索歩行及び誘導標識による歩行，日本建築学会論文報告集第302号，1981年4月，pp. 87-93

岡崎甚幸，松下聡，山口浩幸：歩行シミュレーションにおける経路探索モデルの研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，1988年10月，pp. 557-558

岡崎甚幸，松下聡，山口浩幸：歩行シミュレーションにおける追従歩行及び暗闇歩行モデルの研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，1988年10月，pp. 559-560

岡崎甚幸，松下聡，山口浩幸：歩行経路探索モデルによる迷路歩行シミュレーション，日本建築学会大会学術講演梗概集，1988年10月，pp. 561-562

岡崎甚幸, 松下聡, 中山實, 小沢宏明, 鈴木浩史: 高層会員制ホテルのメインフロアにおける群集歩行のシミュレーション, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1989年10月, pp. 821-822

岡崎甚幸, 松下聡: 迷路歩行実験とシミュレーションモデルによる再現, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1990年10月, pp. 661-662

Passini, Romedi. Wayfinding in Architecture. Van Nostrand Reinhold Company Inc., 1984.

Piaget, Jean. La Psychologie de L'intelligence. Librairie Armand Colin, 1952.  
波多野完治, 滝沢武久(訳): 知能の心理学, みすず書房, 1967年

佐々木正伸編: 現代基礎心理学 第5巻 学習Ⅰ 基礎過程, 東京大学出版会, 1982年

佐藤方哉編: 現代基礎心理学 第6巻 学習Ⅱ その展開, 東京大学出版会, 1983年

Spence, Kenneth W. Behavior Theory and Conditioning. Yale University Press, 1956.  
三谷恵一(訳): 行動理論と条件づけ, ナカニシヤ出版, 1982年

Spence, K. W. and Shipley, W. C. The Factors Determining The Difficulty of Blind Alleys in Maze Learning by The White Rat. J. comp. Psychol., 17, 1934, pp. 423-436

鈴木成文, 守屋秀夫, 太田利彦: 建築計画, 実教出版, 1975年

Thorndike, E. L. The Fundamental of Learning. Teachers College, 1932

戸川喜久二: 群集流の観測に基づく避難施設の研究, 建築研究報告, 1955年

Tolman, E. C. Purposive Behavior in Animals and Men. Appleton-Century-Crofts, 1932

鳥居修晃編: 現代基礎心理学 第3巻 知覚Ⅱ 認知過程, 東京大学出版会, 1982年

Tsai, L. S. The Cul-de-sac Phenomenon. J. comp. Psychol., 12, 1931, pp. 393-400

Waller, M. b., Waller, P. F. and Brewster, L. A. A Water Maze for Use in Studies of Drive and Learning. Psychol. Rep., 7, 1960, pp. 99-102

渡辺仁史, 渡辺俊, 中村良三: 地方都市における自動車観光交通計画の評価に関する研究 シミュレーションによる建設企画のための交通渋滞予測, 日本建築学会計画系論文報告集第403号, 1989年9月, pp. 97-103

渡辺仁史, 位寄和久, 池原義郎, 中島高史, 中村良三, 宇土正浩: 人間-空間系の研究 建築計画のためのネットワーク・オートマタモデル, 日本建築学会論文報告集第298号, 1980年12月, pp. 89-97

渡辺仁史: 建築計画におけるオートマタモデル 人間の心理状態をとり入れた行動予測モデルの提案, 日本建築学会論文報告集第234号, 1975年8月, pp. 125-129

渡辺仁史, 鄭姫敬, 渡辺俊: 大量輸送機関のターミナルにおける人間行動に関する研究 (池袋駅コンコース) 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1990年10月, pp. 823-824

渡部勇市: 迷路における人間の避難行動実験 その1 歩行経路の記憶, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1978年9月, pp. 783-784

渡部勇市: 迷路における人間の避難行動実験 その2 歩行経路の学習, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1979年9月, pp. 763-764

渡部勇市: 迷路における人間の避難行動実験 その3 出口の探索行動, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1981年9月, pp. 857-858

渡部勇市: 迷路における人間の避難行動実験 その4 非常口の確認方法による避難上の有効性の違いについて, 1982年10月, pp. 1571-1572

Watson, J. B. Behaviorism. Norton, 1925

八木晃編: 心理学研究法5 動物実験Ⅰ, 東京大学出版会, 1975年

吉田典可: 論理数学Ⅲ, 共立出版社, 1978年

Yoshioka, J. G. A Further Note on a Position Habit in Rats. J. comp. Psychol., 10, 1930, pp. 309-315

## あ と が き

この研究は10数年前に故増田友也先生（京都大学名誉教授）の提案により、岡崎甚幸先生（福井大学教授）を中心として発展させてきた磁場モデルによる群集歩行シミュレーションモデルの開発の一環である。従来まで開発されてきた磁場モデルによって、単純な空間における群集流動や最短経路問題とそれを利用した避難行動などは既に再現可能であった。

この磁場モデルをより人間行動に近付けることを試みて取り組んだ問題が、第I章の探索歩行である。実験を繰り返し、モデルを改良するに連れ、「認知地図」や「イメージ」と言った概念を、「歩行方針」により、不完全ながら表現できるようになった。これにより、状況の変化に対して歩行方針も変化するシステムを形成し、実験で観察された大半の歩行パターンを再現することに成功した。

また、群集歩行モデルを現実の大規模な空間における群集流動に応用する場合、新たな問題として起こったのが、第II章の待ち行動である。駅、デパート、事務所ビルなどで、待ち行動の調査を行った結果、待ち行動を、「カウンター型」、「ラッチ型」、「乗降口型」の3種類に分類し、それぞれのモデルを作成し、全体として1つにまとめた。これにより、待ち空間の混雑状況をよりリアルに再現することができるようになった。

しかし、依然として未解決の問題が残っており、パニック時の行動はおろか、平常時の行動さえも未解決の問題が見られる。この研究も1部分で避難行動を扱っているが、未だ、パニック時の行動までは至っていない。今後も研究を続け、残された未解決の問題を解明していく必要がある。

本論は加藤邦男先生（京都大学教授）の御指導を受けて、この「探索歩行」、及び「待ち行動」のモデル化を中心に、未熟ながら、これまで取り組んできた研究をまとめたものである。特にこの群集歩行モデルと建築設計との関わりについて、将来の研究の発展の可能性にまで広く御指導を受け、ようやくまとまった形になったのは全面的に先生に負うものであります。ここに心から感謝の意を表します。川崎清先生（京都大学教授）からは、この研究の位置付け、現実への応用、システムの改良に関して、鋭い御指摘を受け、早速本論及びモデルの改良に取り掛かり、最大限先生の御指摘を反映させて頂いております。私のまとまりの無い説明を忍耐強く御理解頂き、誠に感謝致しております。天野光三先生（京都大学教授）からは、研究の位置付け、モデルの構成、現実への応用に関して御指導を受け、本論の改良に反映させて頂きました。ここに深く感謝致します。

岡崎甚幸先生からは、京都大学におられた頃から、長年に渡り、研究の御指導を受け、又、この研究をまとめるに当たっても絶えず御指導・御助言を頂き、また激励して頂き、私が今日あるのは全面的に先生のおかげであり、この御恩に対する感謝の念は言葉では言い尽くせぬほどであります。田中喬先生（京都大学教授）には、長年に渡り、御指導、御助言を頂き、また本論をまとめるに当たっても、暖かい励ましの言葉を頂き、心から感謝致しております。

三条京阪地下駅での待ち行動調査には、京阪電気鉄道土木部建築課長の清澤悟氏の御協力を得、白峰村役場及び手取フィッシュランドの方々には、再三に渡って迷路を実験に使用させて頂いた。これらの人々の御協力のおかげでこの研究を進めることができ、深く感謝の意を表します。最後に、本論の執筆、実験、調査を手伝ってくれた金沢工業大学並びに福井大学の研究室の諸君に感謝の意を表します。