

MAS手法を用いた屋内避難誘導灯の最適配置法に関する研究

辻 優介* 尾崎 昭剛** 原尾 政輝**

(*崇城大学大学院工学研究科 **崇城大学情報学部情報学科)

1 はじめに

災害時に人が建物内から避難する際、建物内の構造や、災害対策設備を知っているか否かが避難行動に大きく影響する。

過去の建物内における災害の一つとして、1971年1月2日に「寿司由桜」という旅館で火災が発生し、死者16名、傷者15名という被害が出た事例がある[1]。この火災で被害が拡大した要因として、「自動火災報知設備や非常警報設備が未設置」、「出火の発見」、「増築した新館部分からの避難誘導が不完全」が挙げられている。これらの要因の中で、出火の発見を除いては建物の管理側が対処すべきものであり、対策が消防法で規定されている。しかし避難誘導手法に関しては、規定はあるが災害の状況や建物の構造に効果が依存すると考えられる。

建物内の避難誘導手法にはいくつかあるが、広く用いられる物として避難誘導灯(以下、誘導灯と呼ぶ)がある。誘導灯には、消防法施行規則[2]で最低限の配置基準が規定されている。しかし、建物の構造によっては誘導灯を不適切に配置することで避難時間が増加する場合があるため、建物に応じた誘導灯配置法を検討する必要がある。誘導灯配置法の検討は、実際に建物内に配置し、避難実験を行うことが最も効果的であると考えられるが、危険が多く、また災害の状況や様々な建物の構造について全て検証することは不可能である。これらの理由から、コンピュータ上でのシミュレーションを用いた研究が行われてきた。

既存の研究として、横石ら[3]は暗視下における高輝度蓄光材を用いての避難行動分析を行い、高輝度蓄光材を配置することで避難者の避難行動を効率化することが可能であることを示した。しかし、この結果は特定の建物・人に対して有効ではあるが、一般性については検証されていない。避難シミュレーションを用いた既存研究として、鎌田[4]はマルチエージェントモデルによる介護保険施設における火災時の避難誘導に関する研究を行った。また、渡邊ら[5]はマルチエージェントモデルを用いた建物火災の避難行動シミュレーションを行った。3つの研

究結果より、対象とした建物での誘導灯による誘導は有効であることがわかったが、避難行動モデルの再現度と誘導効果の一般性に問題点があることもわかった。この問題点を受け、筆者らはマルチエージェントモデルを用いて避難シミュレータを構築し、誘導灯の最適配置法について検討を行った[6]。結果として、構築した避難シミュレータは現実の災害を模倣することができ、誘導灯の配置法に関しては特定の配置法によって避難が完了するまでの時間が悪化することを示した。しかし、最適配置法を求めることはできなかった。そこで本研究では、以前の避難シミュレータ[6]を様々な建物の構造でも用いることができるように改良し、汎用性のある誘導灯の最適配置法を求める。避難シミュレータはマルチエージェントモデルを用いて構築し、避難者の情報取得に着目して避難行動の再現度を高くする。特定の建物での誘導灯の配置法による効果を検証し、その効果の汎用性について検証する。結果として、「通路・避難口の幅から各避難口への適切な誘導人数を求め、誘導灯を配置する」という手法が効率的な誘導灯配置法の一つであることがわかった。

2 避難シミュレーションモデル

本章では、誘導灯の最適配置法を求めるために構築した避難シミュレーションモデル(以下、本モデルと呼ぶ)について述べる。

2.1 避難シミュレーションモデルの概要

本モデルは「避難空間」と「避難者エージェント」の2つの要素で構成される。シミュレーション実行時の時間単位は「step」とする。

避難空間は障害物や避難口などにより構成され、本モデルの設計図となる。避難空間は二次元格子状セル空間上に構築する。1つのセルは1辺が500mmの正方形とする。なお、この空間上においては斜め方向も上下左右と同様の距離とみなし、一つのセルに隣接するセルは8つある。**避難者エージェント**は災害時に避難行動を取る人を表す。図1に避難シミュレーションモデルの概要を示す。

本モデルを用いて行うシミュレーションは全ての避難者エージェントが避難を完了するか、シミュレー

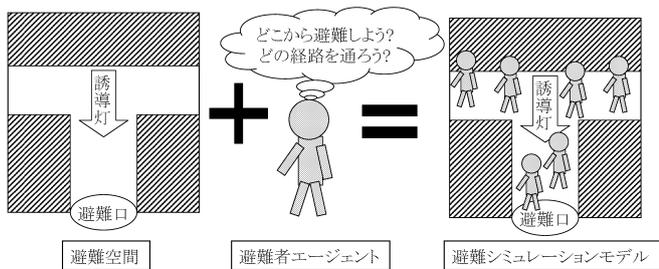


図 1: 避難シミュレーションモデルの概要

シミュレーション実行 step が規定 step を超えたところで終了する。規定 step とは避難空間全体が避難不可能な状態 (例: 火や煙が全体に回り切る) になる時間を指す。シミュレーションは「避難空間生成」→「避難者エージェントの生成」→「避難者エージェントの避難行動」という流れで行う。図 2 にシミュレーションの流れを示す。

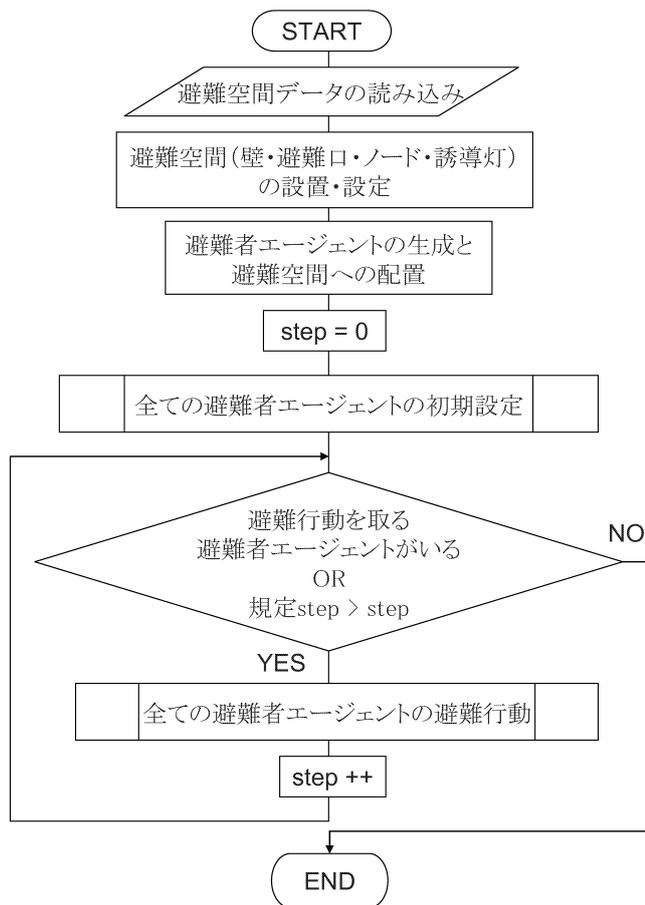


図 2: 避難シミュレーションの流れ

2.2 避難空間の構成

本節では、避難空間を構成する 4 つの要素について述べる。4 つの要素とは「壁」「避難口」「ノード」「誘導灯」である。

壁とは避難空間における仕切りである。これによって避難者エージェントが移動できる範囲、視認できる範囲を制限する。また、障害物 (机や椅子など) のような避難者エージェントの移動を妨げる物も壁を用いて表現する。障害物には「移動を妨げるが視認は妨げない」や「視認は妨げるが移動は妨げない」といった種類が考えられるが、本研究では単純な避難空間を構築するために全て妨げるものとして壁を定義する。

避難口とは避難者エージェントが避難行動の最終的な目標とする場所である。避難口とみなす基準は、法令¹に定められている屋内の各部分から屋外への避難口に至る歩行距離が 60m~100m 以下であることとする (図 3)。また、佐野ら [8] の研究によって開口部²を通過する時には遅延が発生することが知られている。そこで、本モデルにおいて避難者エージェントは避難口に到達し、避難完了となるまでに 1.3 秒の時間を要することと想定する (図 4)。

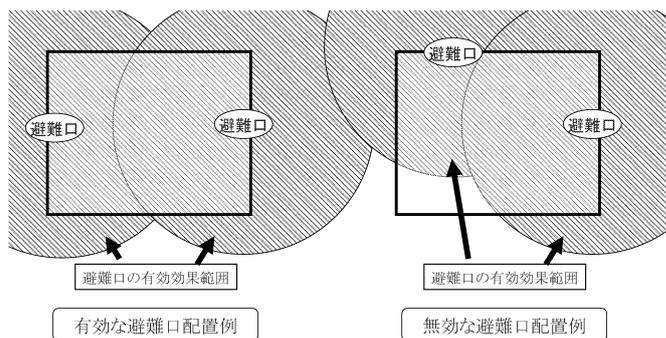


図 3: 設置範囲

また、避難口には使用可否の状態を持たせる。使用不可の避難口には到達しても避難者エージェントは避難することができない。これは、火や煙によって使用不可という状態を再現するためである。

ノードは、グラフ (ノードと、ノード間を繋ぐリンクにより構成) の要素である。本モデルでは、安福ら [10] と同様に、避難者エージェントはそのグラフを用いて避難経路を構築する (図 5)。

既存のコンピュータ上での避難シミュレーションモデル構築においては、森田 [11]、水野ら [12] のようにポテンシャル法を用いたモデル構築も多く行われている。しかし、マップ作成に手間がかかることや、誘導灯の効果を検証することが困難であると考えたためにグラフを用いることとする。

¹建築基準法施行令 [9]: 第 5 章第 2 節第 125 条

²壁や屋根に設けられた開閉可能な窓や出入り口

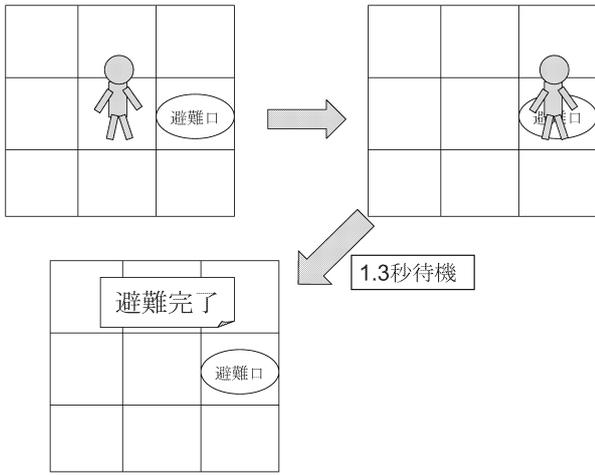


図 4: 避難口通過時遅延

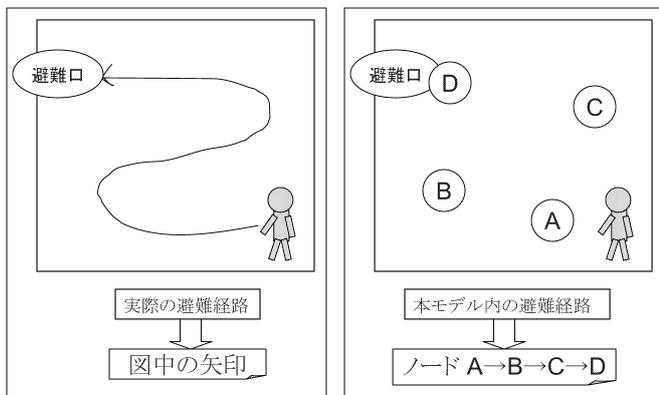


図 5: ノード概要

グラフによる避難経路構築を選択したことによる利点を以下に述べる。

1. 避難者エージェントが持つ避難経路情報をシンプルにできる
2. 避難者エージェントは目標がノードとなるだけなので、誘導灯により目標が変更されても影響が少ない
3. マップ作成の際は必要な場所にノードを設置するだけで済む

ノードを数多く設置することで密な経路形成が出来るが、マップ簡略化の理由から主に避難口付近や交差路、扉の内外に設置する。

誘導灯とは、避難者に避難口の位置(方向)を伝えることで迅速に避難を行うことを支援するものである。誘導灯には「避難口誘導灯」「通路誘導灯」「客席誘導灯」といった種類があるが、本研究では「避難口誘導灯」と「通路誘導灯」を対象とする。「客席誘導灯」は設置場所が限られるという理由で除外

した。

配置基準は消防法施行規則 [2]³に記されている。避難口誘導灯の現行の最低配置基準は以下の 3 点を満たすことである。

1. 屋内から直接地上へ通ずる出入口 (附室が設けられている場合にあつては、当該附室の出入口)
2. 直通階段の出入口 (附室が設けられている場合にあつては、当該附室の出入口)
3. 1 又は 2 に掲げる避難口に通ずる廊下又は通路に通ずる出入口 (屋内の各部分から容易に避難することができるものとして消防庁長官が定める居室の出入口を除く。)
4. 1 又は 2 に掲げる避難口に通ずる廊下又は通路に設ける防火戸で直接手で開くことができるもの(くぐり戸付きの防火シャッターを含む。)がある場所(自動火災報知設備の感知器の作動と連動して閉鎖する防火戸に誘導標識が設けられ、かつ、当該誘導標識を識別することができる照度が確保されるように非常用の照明装置が設けられている場合を除く。)

通路誘導灯の現行の最低配置基準は以下の 3 点を満たすことである。

1. 曲り角
2. 避難口に設置される避難口誘導灯の有効範囲内の箇所
3. 廊下又は通路の各部分(避難口誘導灯の有効範囲内の部分を除く)を通路誘導灯の有効範囲内に包含するために必要な箇所

誘導灯の種類は設置する居室の床面積により、C～A 級のいずれかに決まる。避難口誘導灯及び通路誘導灯の有効範囲は、消防法施行規則に規定されており、今回は一律で 10m と想定する。

本モデルにおける誘導灯は「指示方向」により避難口への経路を示す。なお、実際の誘導灯は効果がある方向は限られるが、本モデル内においては 360 度全ての方向から同様に効果を与えるものとする。

3 避難者エージェントの構成

本章では本モデル上で避難を行う避難者エージェントの定義と避難行動の詳細について述べる。

³第二十八条の三「誘導灯及び誘導標識に関する基準の細目」

3.1 避難者エージェントの概要

本モデルにおける避難者エージェントは、「災害時に屋内から室外へと避難を行うこと」を目的とする人をモデル化する。避難者エージェントの定義は平常時の人を基準とする。避難行動については、屋内においてその建物内のことをよく知っているかどうかに関係してくる。よく知っている場合は、既存の災害時人間行動 [13] にて知られている。しかし、本研究は建物内のことをよく知らない人が多数いる場合を対象としているため、その点に着目して避難者エージェントをモデル化する。

3.2 避難者エージェントの空間上専有範囲

本モデルにおいて、構築する避難者エージェントは健全な平均一般男性をモデルとする。建築設計資料集成-人間 [14](以下、資料集とする) より、直立状態における男子の肩幅の平均は 490mm、腹部前縁から踵点までの距離の平均は 290mm と想定する。近田ら [15]、高柳ら [16] が用いたように人体を上方から見下ろした姿は人体楕円と呼ばれており、本モデルもこれを用いてサイズを図 6(a) に表す。1つのセルを正方形として構築するため、図 6(b) のように1つのセルのサイズを1辺 500mm とする。なお、避難者エージェントは1つのセル内に1体のみ存在できることとする (図 6(b))。

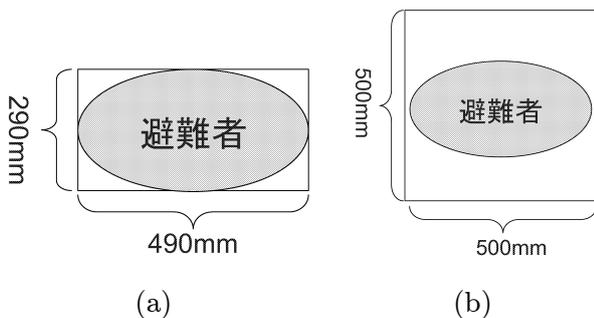


図 6: セルの設定

3.3 避難者エージェントの認識機能

避難者エージェントは認識機能より「避難口」「他の避難者」「誘導灯」の3種類を認識することができる。認識できる範囲は、エージェントからの距離を「視野」、角度を「視角」として定義する。視野は個人ごとや環境 (照度や煙など) の影響により異なる。視角は資料集 [14] より水平方向に左右 45° とする。図 7 に避難者エージェントの視野が 3 である場合の認識範囲の例を示す。

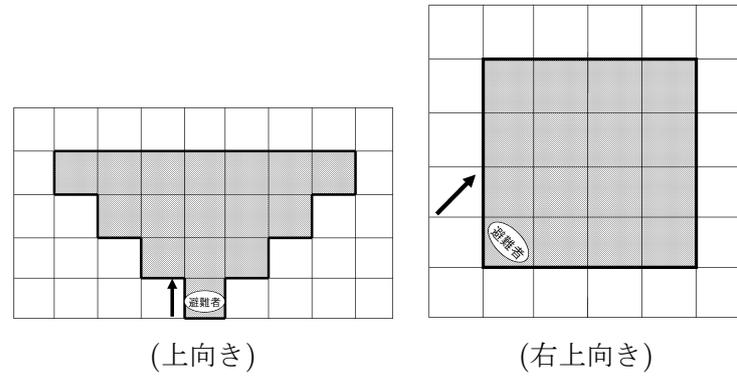


図 7: 避難者エージェントの認識範囲

3.4 避難者エージェントの移動速度

避難者エージェントの移動速度は、資料集 [14] より男性の平均歩行速度 1.24m/s と想定する。これより、空間上では 0.4 秒に 1 セルずつムーア近傍に基づいて移動するものとして再現できる。また、森田ら [17] は群集密度と歩行特性に関する研究により、群集密度は移動速度に強く影響することを示している。そこで、本研究でもこれらの要素を取り入れるが、峯岸ら [18] のように流動係数により避難者エージェントの移動速度を変更することは、図 8 に表すように、局所的に見た場合不自然であると考えられる。

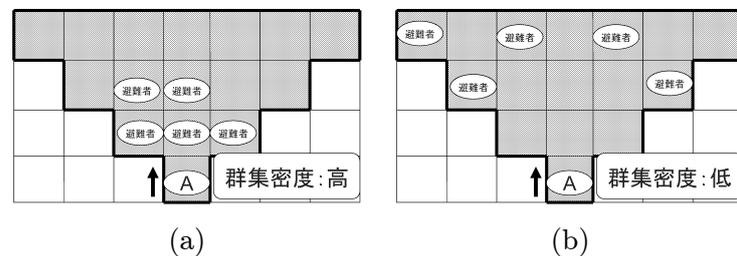


図 8: 避難者エージェントの認識範囲内群集密度

図 8 の (a) と (b) では、避難者エージェント A の認識範囲内にいる他の避難者数は同じである。しかし図 8 の (a) と (b) において、他の避難者エージェントから受ける影響による移動速度の低下が同じであるとは考えにくい。そのため、避難者エージェントの認識範囲内にいる他者との距離による影響度を算出し、その合計を密度関数 c とし、次の式 (1) のように定義する。

$$c = \sum ((d \times \sqrt{2}) - Length(\alpha)) \quad (1)$$

d : 避難者エージェントが認識できる距離

$Length$: 対象との距離を取得する関数

α : 対象の避難者エージェント

この密度関数 c は、避難者エージェントが認識で

きる範囲の中で避難者からの距離が近いほど影響が大きくなり、最も遠距離にいる他の避難者エージェントからの影響は無いものとするを意味する。必要単位時間を「何 step に 1 回移動ができるか」とし、移動速度をシミュレータ上で再現するための単位時間と、密度関数の評価による変化を表 1 に示す。群集密度による移動速度への影響を考慮するため、1step は実時間 0.13 秒として定義する。

表 1: 密度別移動速度

移動速度 (m/s)	必要単位時間 (step)	密度関数 (c)
1.24	3	$c < 5$
0.93	4	$c < 17.5$
0.74	5	$c < 37.5$
0.62	6	$c \geq 37.5$

3.5 他の避難者エージェントからの情報取得

避難者エージェントは、認識範囲にいる他の避難者エージェントから情報を得ることができる。今回は、「特定の避難口の使用可否」という情報を得ることができる。しかし、1 人の避難者エージェントからすぐに情報を得ることができてしまえば、すれ違いで情報の受け渡しが多いと考える。そこで、認識範囲内に 2 人以上の避難者エージェントが「同じ避難口が使用不可である」という情報を持っている場合のみ自身も取得できるものとする (図 9)。これによって、避難口使用可否の情報伝播を再現する。

3.6 避難者エージェントの避難経路

避難者エージェントが避難口へ向かうための経路は 2.2 節で示すようにノードを経由することで求める。経路の始点は避難者エージェントが認識出来る最も近くにあるノードであり、経路の終点はいずれかの避難口付近に配置したノードとなる。

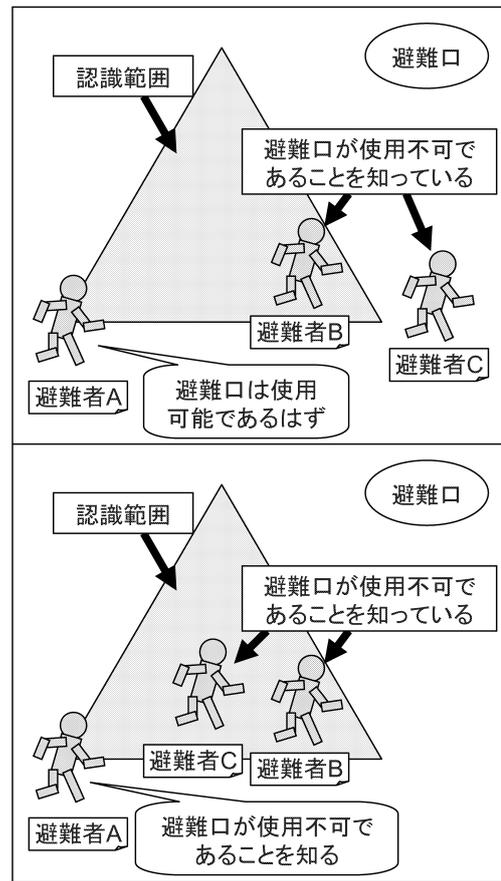


図 9: 他の避難者エージェントからの情報取得

既存の誘導がある避難シミュレーション [19] では、避難者エージェントは避難開始時に 1 つも避難口への経路を知らないという仮定を設けていた。しかし、実際には屋内から避難する人は避難開始の場所までいずれかの入り口から入ってきたはずであるため、最低 1 つは避難口への経路を知っているはずである。これは、実際の災害時の避難行動報告 [20] から「入ってきた来た場所へ戻ろうとした」という人がいたことから明らかである。そこで、本モデルでは全ての避難者エージェントが最低 1 つの避難口への経路を知っていると定義する (図 10)。この知っている避難口と経路の数によって、エージェントの建物への理解度を設定できる。すなわち、1 つだけしか知らなければ理解度は低く、多数知っていれば理解度が高いと言える。

ノード間の経路はダイクストラ法 [21] により最短経路を求める。ダイクストラ法とは、グラフ上の 2 頂点間の最短経路を効率的に求めるアルゴリズムである。

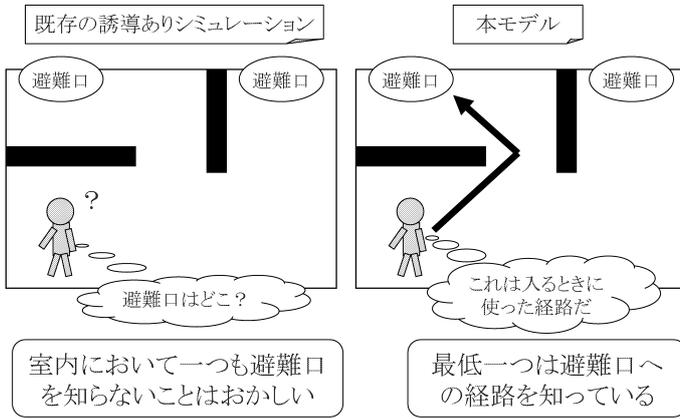


図 10: 避難開始時の既知の避難口

3.7 避難者エージェントの避難行動アルゴリズム

避難者エージェントが避難行動を取るために必要な要素として、「(生成時) 目標避難口への避難経路」, 「他の避難者エージェントからの影響や速度の調整を考慮した移動」, 「誘導灯を見つけた際の行動」がある. 本節ではこれらの要素について述べる. まず, 避難者エージェントのシミュレーション開始時に行う初期設定フローを図 11 に示す.

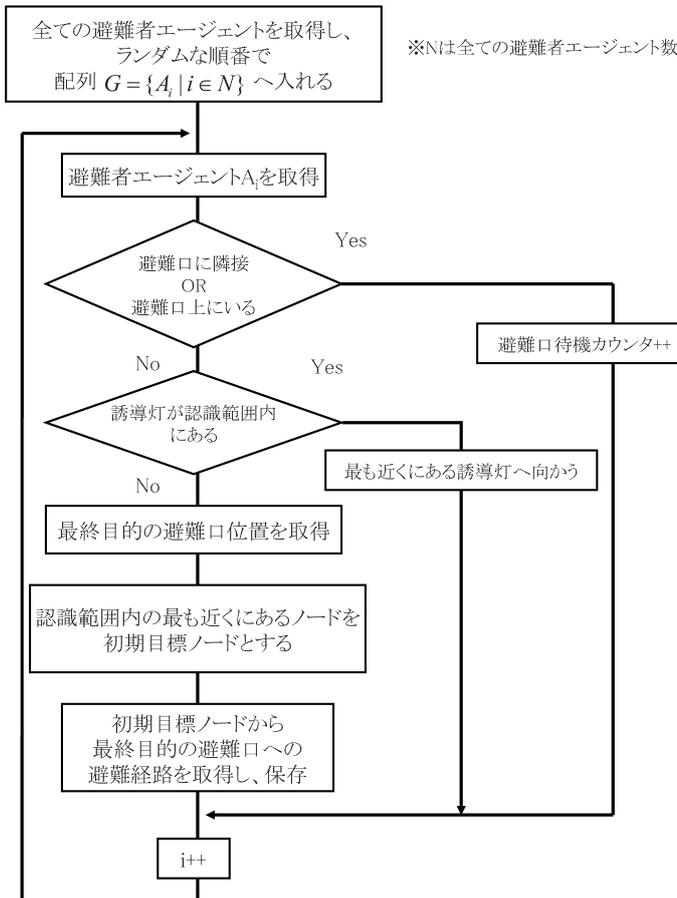


図 11: 避難者エージェントの避難行動：初期設定

次に, 避難者エージェントの 1step 内での避難行動フローを図 12 に示す. 避難行動では「避難口到達判断」と「避難経路を辿る移動」を行う. 避難口に到達した際に用いる「避難口待機カウンタ」は, 扉通過時の滞留を表現するために用いる. 設定している 10 という数値は, 後述する出口を通過する時の流動係数である 90 人/分・m から, 50cm の広さの出口を一人が通るために要する時間 (step) に変換したものである.

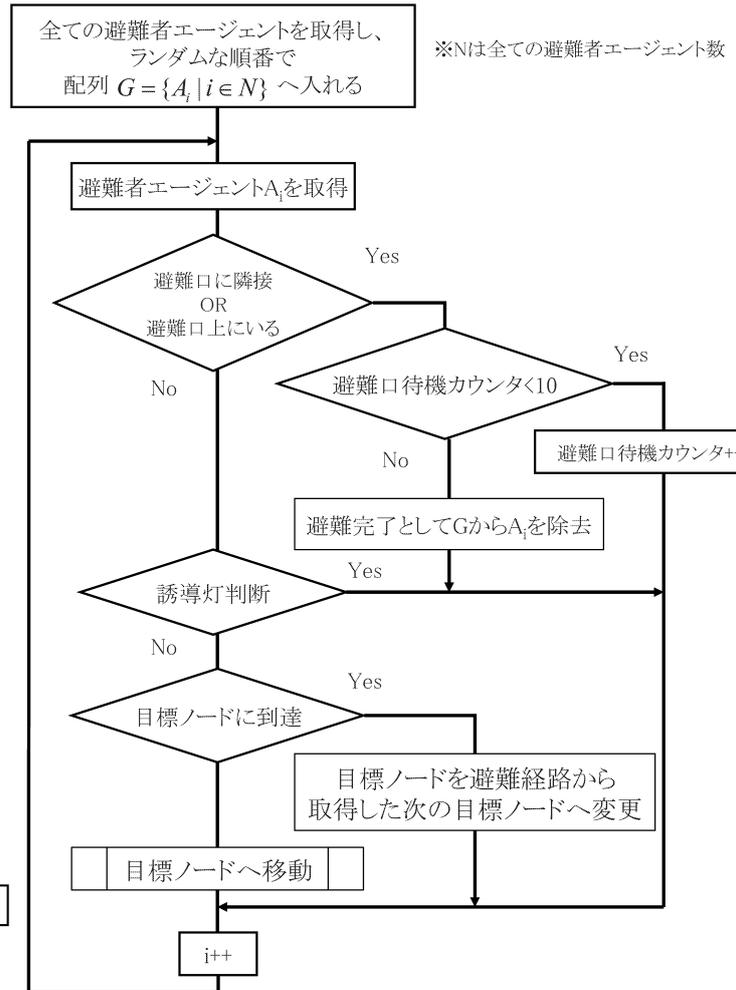


図 12: 避難者エージェントの避難行動：避難行動

避難者エージェントの移動フローを図 13 に示す. 進行予定方向のセルが他の避難者か壁で埋まっている場合の進路変更については, 後退することなく, 群衆としての動きを再現するために取り入れた. 必要単位時間の更新は 3.4 節の「避難者エージェントの移動速度」の表 1 に従う.

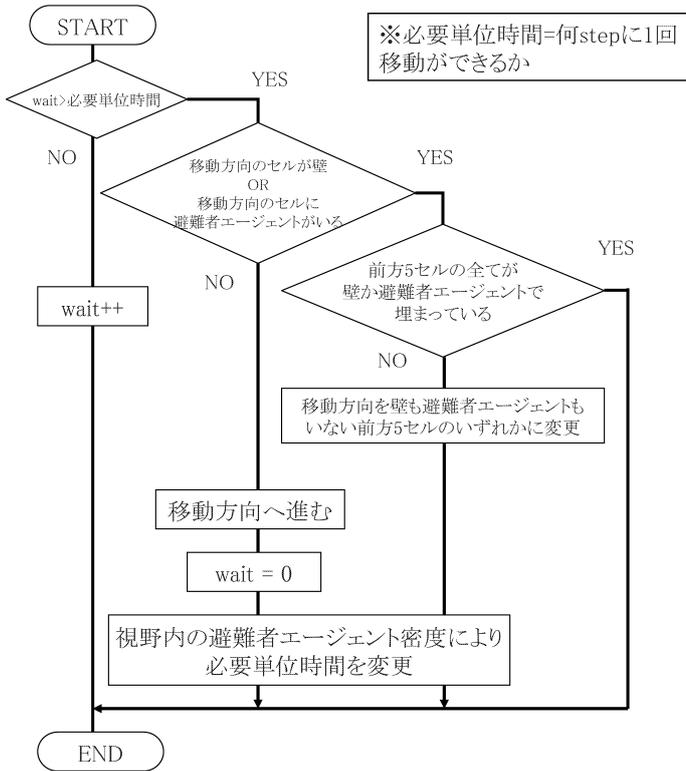


図 13: 避難者エージェントの避難行動：移動

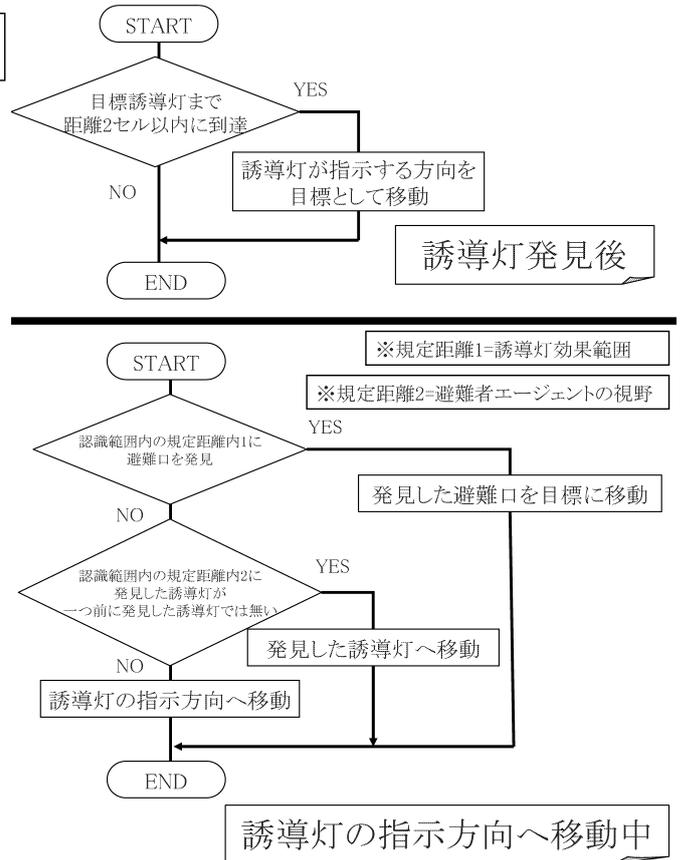


図 15: 避難者エージェントの避難行動：誘導灯判断 2

避難者エージェントが誘導灯を発見したときの誘導灯判断フローを図 14, 図 15 に示す. 誘導灯まで距離 2 セル以内に到達したところで誘導を受けるという行動は, 誘導灯の指示方向指定を簡潔にするためであり, この距離に関しては変更の余地があると考ええる.

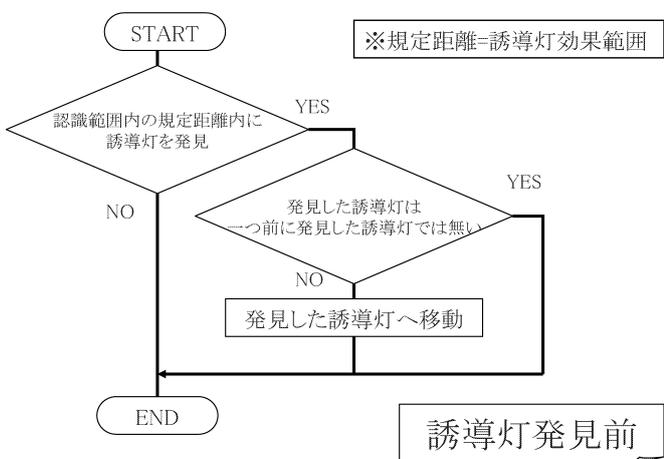


図 14: 避難者エージェントの避難行動：誘導灯判断 1

4 避難シミュレータの実装

本章では, 前章までに述べた避難シミュレーションモデルの実装について述べる. 実装には汎用マルチエージェントシミュレータである `artiso`[22] を用いる. また, 避難空間の構築を容易に行うために作成したツールについて述べる.

4.1 実装したモデル構成

実装したモデル構成について, 「避難空間」「避難者エージェント」の順番で述べる. まず, 避難空間構築時に用いるデータ構造について述べる.

避難空間構築時に用いるデータの種類は「各座標の情報」「リンク情報」「避難口情報」「各ノード間の最短経路情報」の 4 つである. 今回はこれを 5 つの CSV ファイルから取得する. それぞれのファイルに保存される情報は以下の通りである.

- `posi`: 各座標の情報
- `link`: リンク情報
- `exit`: 避難口情報
- `route1`: 各ノード間の最短経路となるノード順番

- route2 : 各ノード間の最短経路での距離

この避難空間を構築するための情報は、次節に述べるツールで入力することになるが、CSV形式のテキストデータとして保存しているためにテキストエディタさえあれば編集は容易である。

最後に、避難者エージェントの持つ要素について述べる。

本モデルにおいて、全ての避難者エージェントは以下の要素を持つ。

- ID : 全ての避難者エージェントに重複なく割り振られ、避難者エージェントの特定に用いる番号。
- 座標 : 避難空間上のどこに存在しているのかを保存。
- 進行方向 : 現在進もうとしている方向を保存。
- ルート : ノード番号を保存し、避難経路を保存。
- wait : 移動速度の表現に用いるカウンタ。
- count : 次の目標としているノードがルートの中で何番目であるかを保存。
- before_sig : 一つ前に発見した誘導灯を保存。同一の誘導灯を目標とし続けられないために用いる。

これらの要素を持った避難者エージェントが、3.7節で述べた避難行動アルゴリズムに従って避難口を目標として避難行動を取る。

4.2 避難空間作成ツールの実装

本節では、避難空間を構築するための要素をグラフィカルに構築するためのツールについて述べる。

避難空間作成ツール(以下、本ツールと呼ぶ)の実行画面を図16に示す。

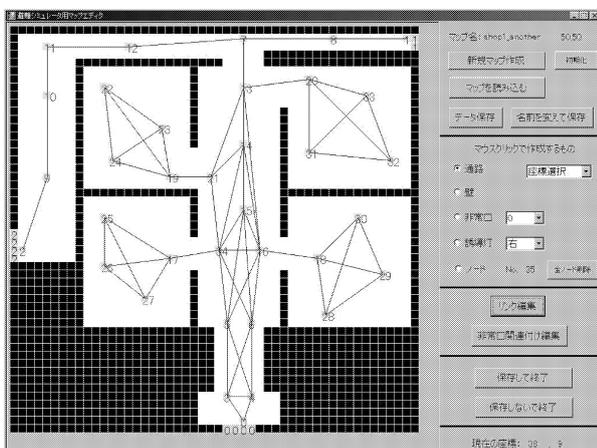


図 16: 避難空間作成ツールの実行画面

本ツールは、Microsoft Visual Basic 2010 Express を用いて構築する。本ツールは、ユーザーがマウスとキーボードを用いてデータ入力を行い、4.1節で述べた避難空間構築時に用いる CSV ファイルを生成することができる。

本ツールを用いた避難空間作成の手順フローを図17に示す。避難空間の名前とは、避難シミュレーション実行時に読み込むファイル名として用いる。

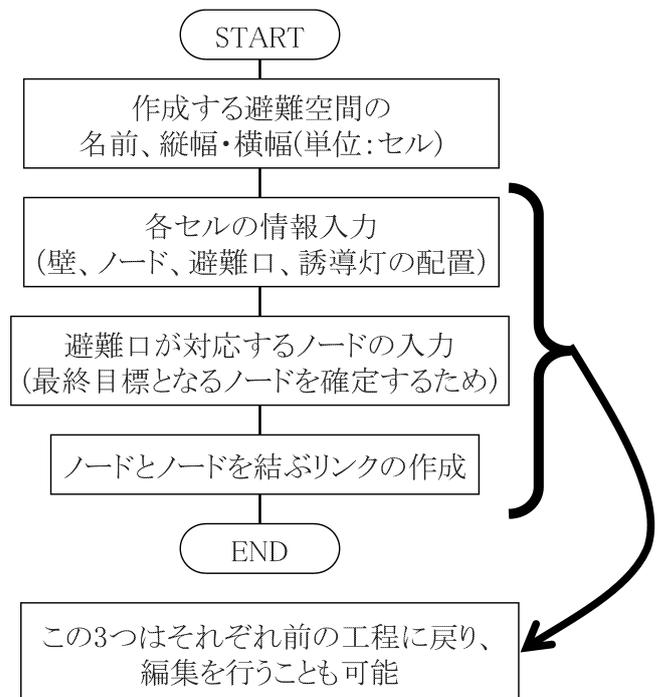


図 17: 避難空間作成ツールを用いた避難空間作成の手順

本ツールは直感的に解りやすいと思われるマウス操作を主な入力として用い、手軽に様々な避難空間を構築するための要素を生成できる。エディタとしては「保存」「復元(上書き・別名保存)」「編集」といった必要最低限な機能を有している。次章での実験に用いる避難空間は、全て本ツールで構築した要素を用いたものである。

5 避難シミュレータを用いた実験と考察

本章では、実装した多数のエージェントがいる屋内からの避難行動を模倣する避難シミュレータを用いて、誘導灯配置による避難者への影響を検証し、最適な配置法を提案する。その結果を検証し、提案する誘導灯配置法に一般性があることを明らかにする。

5.1 実験条件

本節では、次節から行う3つの実験における共通の実験条件と実験に用いる避難空間について述べる。共通となる実験条件は以下のものである。

1. 避難開始時間
2. 避難者エージェントの建物認知度
3. 在館者密度
4. 避難の制限時間
5. 建物の種類
6. 避難者エージェントの視野

2の建物認知度は、避難者エージェントを「最短距離となる避難口への経路」か「全ての避難口の中でランダムにいずれかへの経路」のどちらかを知っていると仮定して設定する。この2つの割合は、商店における店員と客の比率として考えることができる。本研究では不特定多数の人が多い建物を想定しているので、建物に不慣れな人を全体の9割と考え、建物認知度は10%として行う。

3の在館者密度は、避難空間の床面積に対する避難者エージェントの存在密度であり、階避難安全検証法[23]に記されているものを用いる。

4は避難行動の制限時間は避難空間で延焼が発生したという仮定で、延焼が避難空間全てに広がった時間とし、階避難安全検証法[23]に記されているものを用いる。制限時間は建設省告示第1441号第4の居室避難計算における「当該居室において発生した火災により生じた煙又はガスが避難上支障のある高さまで降下するために要する時間」から以下の式により算出される。

$$ts = \frac{A_{room} \times (H_{room} - 1.8)}{\max(V_s - V_e, 0.01)} \quad (2)$$

この式(2)において、 ts 、 A_{room} 、 H_{room} 、 V_s 及び V_e は、それぞれ次の数値を表すものとする。

ts : 当該居室において発生した火災により生じた煙又はガスが避難上支障のある高さまで降下するために要する時間(分)

A_{room} : 当該居室の床面積(m^2)

H_{room} : 当該居室の床面の最も高い位置(以下「基準点」という。)からの平均天井高さ(m)

V_s : 煙等発生量(m^3 /分)

V_e : 有効排煙量(m^3 /分)

煙等発生量、有効排煙量についての詳細な計算は、建設省告示第1441号第4に記されているものを用いる。

5については、建物は百貨店、またはそれに類するもの(以下、商店類と呼ぶ)を対象とし、壁の仕上げは不燃材料とする。この建物種別にした理由については避難空間の設定にて述べる。

6は、建物内が煙により視界が悪くなっていると想定し、10mとする。

以上のことから、共通の実験条件をまとめたものを以下に示す。

1. 避難開始時間 : 0(全避難者エージェントが同時に避難)
2. 避難者エージェントの建物認知度 : 10%
3. 在館者密度 : 階避難安全検証法にて規定された値
4. 避難の制限時間 : 式(2)に示す ts
5. 建物の種類 : 建物は商店類
6. 避難者エージェントの視野 : 10m

次に、実験に用いる避難空間について、設定した構造の理由と規定する避難者数などについて述べる。

今回は建物として「商店類」を用いる。この理由としては、人々が生活する上で訪れる機会が多く、不特定多数の人が建物に不慣れであり、改装・改築の頻度が家屋を除いた建物種別の中で多いと思われることから選んだ。商店類は、商品を陳列・販売する「売り場」と、出入り口と売り場を繋ぐことが主な目的となる「通路」で構成される。本研究では、誘導灯を配置することによる避難行動への一般的な影響を検証することを目的としているため、避難空間もこの目的に沿うように構築する。そのため、以下の要素を満たす避難空間を構築する。

- 避難口は最低2箇所配置
- 避難口は多くの避難者から発見しやすい・発見しにくい場所にそれぞれ最低1箇所配置
- 売り場を想定した小部屋を最低1つ配置

上記の要素を満たす避難空間として構築するテスト商店について述べる。なお、避難者エージェントの避難行動検証実験では「大洋デパート」という実際の建物を模倣したものを用いるが、詳細は5.2節の実験時に述べる。

テスト商店は、主に用いられる1箇所の避難口と裏口を仮定した2箇所の避難口、それに繋がる通路と4つの売り場(小部屋)で構成される。図18にテスト商店の構成(壁による区切りと避難口)を示す。

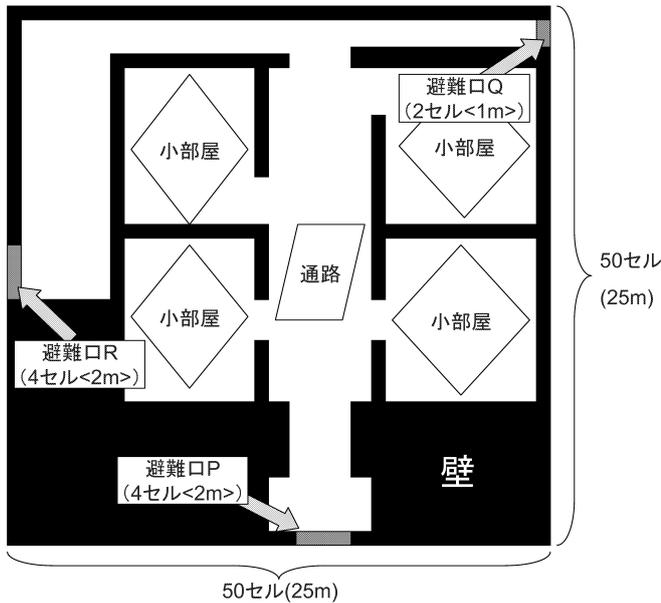


図 18: テスト商店の構成

この建物内において、避難者が行動できる床面積は $402.5m^2$ である。この床面積と在館者密度より建物内の想定在館者数を求めることができる。しかし、今回は実験時に空間全てに同様な確率で避難者を配置することを考えるため、売り場と通路の床面積比に合わせて在館者密度を求める必要がある。なお、この建物における売り場と通路の床面積比は1対1.14である。以下の式でテスト商店の在館者密度を求める。

$$\frac{(0.500 \times 1.000) + (0.250 \times 1.150)}{2.000} \cong 0.392(\text{人}/m^2) \quad (3)$$

よって、在館者数は以下の式で求めることができる。

$$0.392 \times 402.5 = 157.98125 \cong 158(\text{人}) \quad (4)$$

また、この建物での避難の制限時間は式(2)より、以下の式で求めることができる。なお、この建物において基準点からの平均の天井の高さは4m、煙等発生量は $213.3m^3/\text{分}$ 、有効排煙量は $40m^3/\text{分}$ である。

$$ts = \frac{402.5 \times (4.000 - 1.800)}{\max(213.3 - 40.00, 0.010)} = 2358(\text{step}) \quad (5)$$

5.2 避難者エージェントの避難行動検証実験

本節では、構築した避難者エージェントの避難行動が災害時の避難者の行動を模倣できているか検証

する。検証は実際の災害が発生した建物を模倣した避難空間にて避難シミュレーションを行い、実際の避難者の行動と比較により行う。

用いる実際の災害として、1973年11月29日に熊本県熊本市の太洋デパートで発生した火災を対象とする。比較には、避難者の行動や災害の様子について多くの情報があった7階での避難者の行動を用いる。当時の太洋デパート7階の構造を図19に示す。

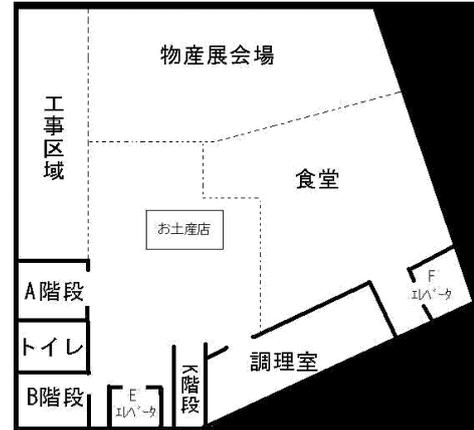


図 19: 太洋デパート概略図

太洋デパート火災での避難者の行動は堀内ら[24]が行ったアンケートを参考にし、以下にまとめる。

利用客 Eエレベータへ向かい、その後K階段より8階へ

従業員 1 B階段へ向かい、その後は利用客と同じ行動

従業員 2 K階段へ向かい、8階へ

今回は利用客の行動を再現する。そのため、上記の情報に基づいて、災害時に7階にいた人々は初めはEエレベータへ向かい、使用不可能であることを知った後にK階段へ向かって移動したと仮定する。そこで、災害時の行動を再現する避難者エージェントとして、避難経路を「Eエレベータ→K階段」と固定したものを構築する。この避難経路を固定したもの(以下、固定エージェントとする)と、本研究で用いている避難者エージェント(以下、通常エージェント)をそれぞれ用いて比較実験を行った。なお、固定エージェントは探索を行わないこと以外は全て通常エージェントと同一条件とする。また、通常エージェントは、全ての非常口が使用可能状態であると考える行動し、初期目標をEエレベータとする。実験条件を次に示す。

1. 避難者エージェントの視野は建物の端から端が見える長さ
2. 求める値は 20 回シミュレーションを行った結果の平均
3. 避難者エージェントは 257 名配置
4. 誘導灯は、非常口付近のものは直近の非常口を、それ以外は E エレベータ方面を指し示す
5. 避難口は、K 階段のみ使用可能

評価方法として、固定エージェントと通常エージェントの避難経路の類似度を求める。特に、E エレベータが使用不可であることを認識した後の行動に着目した。図 20 に避難者エージェントの避難行動経路を大別して示す。

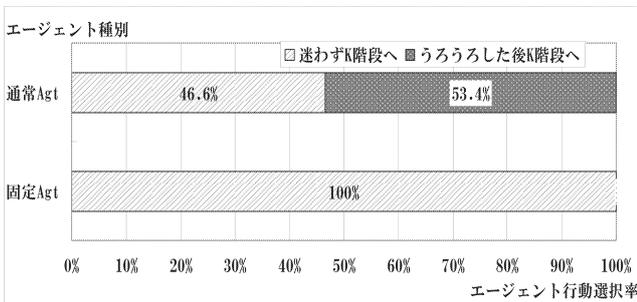


図 20: E エレベータが使用不可であることを知った後の避難者エージェントの行動区分

図 21 に固定・通常エージェントの E エレベータ付近での行動を示す。

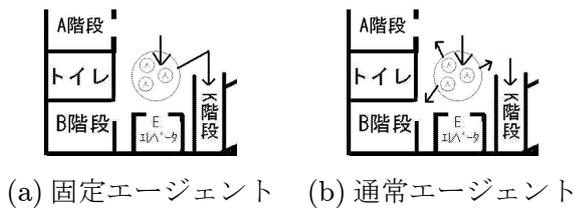


図 21: 固定・通常エージェントの行動

通常エージェントは E エレベータ付近に到達後、エレベータが使用不可であることを認識する。その後周囲を探索し、A・B・K のそれぞれの階段のいずれかを発見した場合は、それを目標として移動する。ここで図 20 より、通常エージェントの中で固定エージェントと同じように直接 K 階段へ向かった (図 21(a)) のは全体の 46% ほどであった。その他の通常エージェントは E エレベータ付近で非常口を求めてうろろする様子が見られた (図 21(b))。火災時の詳細な避難行動情報は判明していないが、おそらく実験 1 で見られたように避難者は非常口を求め

て付近をうろろとしたと考える。その後、A・B の階段はそれぞれ使用不可であるため、結果として全ての避難者エージェントは K 階段へ向かう。また、この際に最初に E エレベータ、および A・B 階段へ向かった避難者エージェントは近くまで行かなければ使用可否の情報を得られない。一方、後続の避難者エージェントは離れた場所から対象の非常口が使用不可であるという情報を他の避難者エージェントより得ることができる。そのため、時間がある程度経過することで直接 K 階段へ向かう通常エージェントの割合が増した。これらのことから、構築した避難者エージェントは、周囲の情報を得ながら安全な方向へ向かおうとする避難行動を、より忠実に再現するモデルとなったと考える。

5.3 誘導灯設置による避難者エージェントへの影響検証実験

本節では誘導灯設置による避難者エージェントへの影響検証実験を行う。この実験により、「様々な誘導灯配置法が避難者エージェントの避難行動にどのような影響を与えるか」について検証を行う。そして、最も避難完了時間を短くすることが出来る誘導灯配置法を見つけることを目的とする。

表 2 に実験条件を示す。

表 2: 誘導灯設置による影響検証：実験条件

対象建物	テスト商店
変化パラメータ	誘導灯の配置法
誘導灯配置	あり
計測対象	避難完了時間
計測回数	200 回実験を行い平均を求める

表 3 に誘導灯配置法を示す。表 3 において、法準拠とは 3.2 節で述べたように消防法施行規則 [2] の基準を最低限満たすように配置した組み合わせである。また、P、Q、R はそれぞれ図 18 に示す避難口を示す。

これらの条件により避難シミュレーションを行い、誘導灯配置法ごとの避難完了時間と平均避難時間を求めたグラフを図 22 に示す。グラフにおいて縦軸は時間 (step)、横軸は誘導灯配置法である。

図 22 より、避難完了時間、平均避難時間共に B3 の「法準拠。通路中央部分からの誘導灯削減」手法が最も最短となった。

表 3: 誘導灯設置による影響検証：誘導灯配置法

配置法名	配置理由
A	誘導灯無しのパターン
B1	法準拠, Pへ多く
B2	法準拠, Q,Rへ多く
B3	法準拠, 通路中央部分からの誘導灯削減
C1	Pへの誘導のみ-Pへ多く
C2	Pへの誘導のみ-Q,Rへ多く
D	Qへの誘導のみ
E	Rへの誘導のみ
F1	P,Qへの誘導-Pへ多く
F2	P,Qへの誘導-Qへ多く
F3	P,Qへの誘導 -通路中央部分からの誘導灯削減
G1	P,Rへの誘導-Pへ多く
G2	P,Rへの誘導-Rへ多く
H	Q,Rへの誘導
I	空間の全てを 誘導灯の有効範囲内に

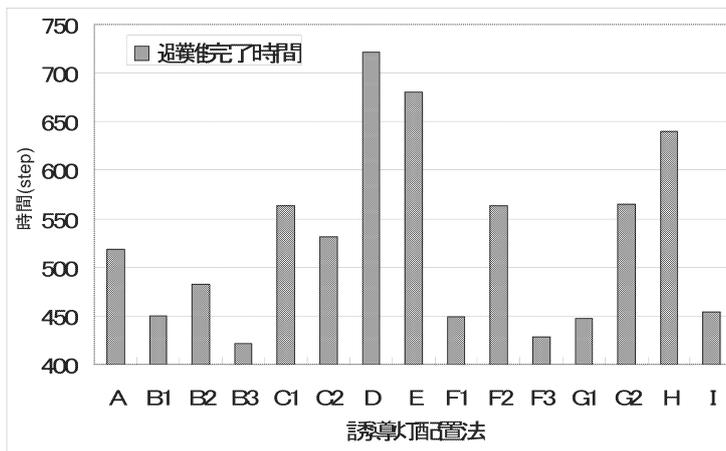


図 22: 誘導灯設置による影響検証：実験結果

1. 誘導は複数箇所に分散したほうが効率は良いが、誘導人数が多すぎると効率は悪化
2. 幅が広く、通路も広い場所を通って行ける避難口へは多めに誘導するほうが効率的

また、避難時間短縮に最も影響があった B3 については以下の理由が考えられる。

1. 小部屋から通路に出た避難者エージェントの多くを避難口 P へ誘導しつつ、適当な人数を避難口 Q と R へ誘導した
2. 1 によって、狭い通路部分の滞留と、距離のある避難口 R へ向かう人数を減らすことができた

上記の 2 について、建物の中で主な滞留発生地点を図 23 に示す。

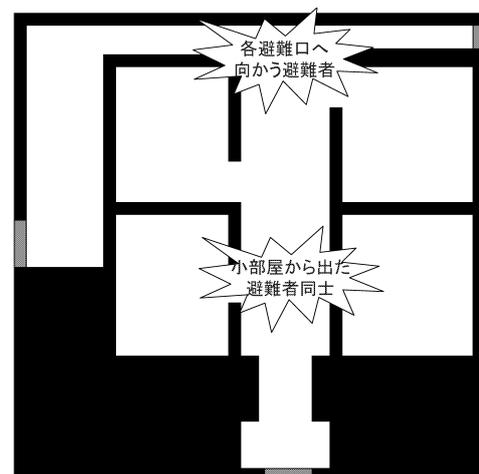


図 23: テスト商店での主な滞留発生地点

5.4 誘導灯配置法の効果についての考察

本節では、5.3 節の実験にて得られた結果から、各誘導灯配置法の効果について考察する。

図 22 の誘導灯設置による避難完了時間への影響から考えられる特徴を以下に示す。

1. 避難完了時間が早い配置法は、中央の通路部分からの誘導を減らしつつ、複数方向へ誘導を行っている
2. 避難完了時間が 600step を超えて特に遅くなっているのは、全て避難口 P への誘導を行わない配置法である

この特徴を一般的な建物の場合で考えると以下のようにまとめられる。

この結果から誘導灯は、通路・避難口の幅から各避難口への適切な誘導人数を求め、誘導灯を配置するということが重要であり、この手法が最適配置法の一つであると考えられる。

5.5 誘導灯の最適配置法の一般性検証実験

本節では、前節の実験で得られた最適誘導灯配置法の一般性を検証する。検証手法として、前節の実験で用いた建物とは異なる構造の建物にて、誘導灯配置による避難時間への影響を検証し、その効果を前節で得た結果と比較する。

実験条件を表 4 に、前節の実験で用いた建物と、今回の実験に用いる建物を図 24 に示す。

表 4: 誘導灯の最適配置法の一般性検証実験：実験条件

対象建物	図 24 に示す 5 種
変化パラメータ	建物の種類と誘導灯の有無
誘導灯配置法	表 3 の B3
避難者数	各建物の在館者密度
計測対象	避難完了時間
計測回数	200 回実験を行い、平均を求める

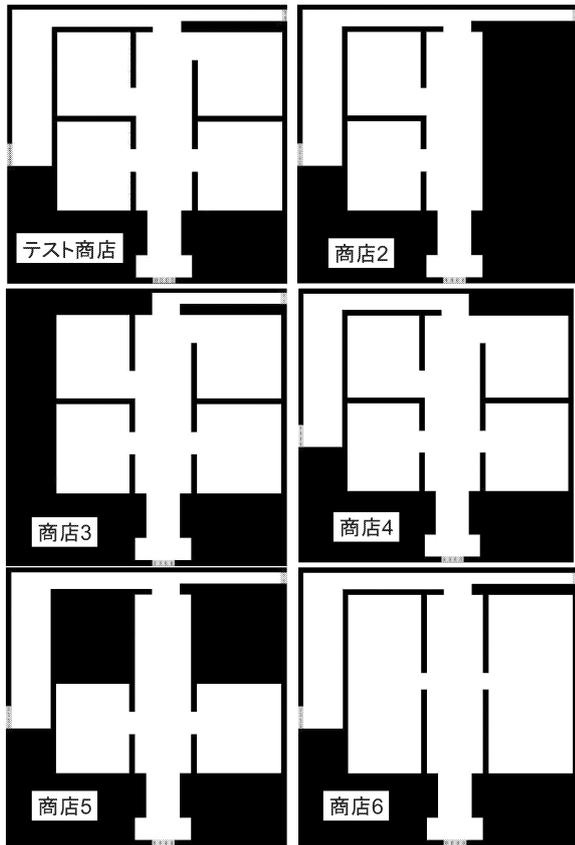


図 24: 一般性検証に用いる建物

これらの建物はテスト商店の構造を変化させたものであり、それぞれの変化理由を以下に示す。

商店 2 : 小部屋を通路の片側だけにし、小部屋を出たときの滞留を減少

商店 3 : 離れた避難口 R と接続する通路を削除し、L 字構造化

商店 4 : 狭い通路の先にある避難口 Q と接続する通路を削除し、通路の交差を削除

商店 5 : 小部屋の数を減らし、滞留の規模を縮小

商店 6 : 小部屋の仕切りを減らし、小部屋からの出入口付近滞留を増加

実験結果を表 5 に示す。表 5 の項目にある T_{delta} は誘導灯配置によって短縮した避難完了時間である。また、短縮率は誘導灯無しの避難完了時間に対しての T_{delta} の割合である。

表 5: 誘導灯の最適配置法の一般性検証実験：実験結果

建物種類	T_{no} (step)	T_{sig} (step)	T_{delta} (step)	短縮率 (%)
テスト商店	518.3	471.9	46.46	8.960
商店 2	391.4	275.8	115.6	29.53
商店 3	433.0	379.4	53.56	12.37
商店 4	517.6	413.9	103.7	20.04
商店 5	418.8	294.7	124.1	29.63
商店 6	513.1	439.8	73.26	14.28

表 5 中の各記号は以下の数値を表す。

T_{no} : 誘導灯なしの避難完了時間 (step)

T_{sig} : 誘導灯ありの避難完了時間 (step)

T_{delta} : $T_{no} - T_{sig}$ (step)

表 5 の短縮率 (%) から、前節で得られた最適誘導灯配置法によって、5 種類全ての建物で避難完了時間を短縮することができたことがわかった。

5.6 最適誘導灯配置法についての考察

本節では、5.5 節の実験にて得られた結果から、各誘導灯配置法の一般性について考察する。

図 5 の短縮率から考えられる特徴を以下に示す。

1. 避難完了時間の短縮率は建物ごとに違いがあり、約 10% が 2 つ、約 20% が 1 つ、約 30% が 2 つあった
2. 商店 3 と商店 4 は避難口を削減という考えは同じだが、短縮率には 8% の差があり、避難口の位置や大きさの影響を受けることがわかった
3. 商店 6 は滞留の規模が大きくなるために短縮率も大きくなると考えたが、商店 2 や商店 5 のほうが短縮率としては大きくなった
4. 商店 2 と商店 5 の避難完了時間を比較すると、商店 5 のほうが遅くなると考えたが、大きな差は無かった

これらのことから、5.4 節の考察から得られた「通路・避難口の幅から各避難口への適切な誘導灯数を

求め、誘導灯を配置する」という手法は、建物の構造を変化させても有効であることがわかった。しかし、避難完了時間への影響は構造によって大きく違いがあるため、さらに多様な種類の建物構造について検証する必要があると考える。

6 まとめと今後の課題

本研究では、様々な建物の構造での災害を再現できる避難シミュレータを構築して、汎用性のある誘導灯の最適配置法について検討した。避難シミュレーションを行い、誘導灯配置による効果を検証した結果から「通路・避難口の幅から各避難口への適切な誘導人数を求め、誘導灯を配置する」という手法が最適な誘導灯配置法であったことが明らかになった。この手法は数種類の建物構造でも有効であることがわかったが、避難への影響の大きさに違いがあり、特に避難口の数と位置によって異なることがわかった。そのため、最適誘導灯配置法については「避難口の数、発見しやすさ」に合わせて考える必要がある。

今後の課題として、「災害状況による避難行動への影響再現」、「避難者エージェントに追従・グループ行動などの群集行動再現」、「避難者エージェントの初期避難経路の多様化」、「商店類以外の建物での誘導灯効果の検証」、「誘導灯最適配置の自動取得」が考えられる。

参考文献

- [1] 消防防災博物館：
<http://www.bousaihaku.com/cgi-bin/hp/index.cgi>
- [2] 消防法施行規則：<http://law.e-gov.go.jp/htmldata/S36/S36F04301000006.html>
- [3] 横石めぐみ, 林田和人, 渡辺仁史：暗視下における高輝度蓄光材を用いた避難行動特性に関する研究, 日本建築学会関東支部研究報告集, pp.53-56, (2006)
- [4] 鎌田智之：マルチエージェントモデルによる介護保険施設における火災時の避難誘導に関する研究, 筑波大学大学院博士課程システム情報工学研究科修士論文, (2008)
- [5] 渡邊卓也, 大上俊之, 小山茂：マルチエージェントモデルを用いた建物火災の避難行動シミュレーション, 計算数理工学論文集 Vol.7, pp.7-12(2007)
- [6] 辻優介, 尾崎昭剛, 原尾政輝：マルチエージェント避難シミュレータを用いた最適誘導灯配置法の検討, 第9回情報科学技術フォーラム講演論文集, (2010)
- [7] H.S.Nwana, D.T.Ndumu: *An Introduction to Agent Technology*, Software Agents and Soft Computing, pp.3-26, (1997)
- [8] 佐野友紀, 今西美音子, 布田健, 萩原一郎：群衆実験空みた開口部通過流動に関する考察, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.957-958, (2007)
- [9] 建築基準法施行令：<http://law.e-gov.go.jp/htmldata/S25/S25SE338.html>
- [10] 安福健祐, 阿部浩和, 吉田勝行：避難シミュレーションシステムの経路障害発生時への適用, 日本建築学会計画系論文集, 第626号, pp.721-727, (2008)
- [11] 森田昌宏：大規模施設の避難安全シミュレーション, 日本損害保険協会 予防時報, 240号, (2010)
- [12] 水野雅之, 山田茂, 森田昌広, 円谷信一, 田中哮義, 若松孝旺：建物火災時の避難安全評価シミュレーションプログラムの開発(その2) 避難行動モデルの概要, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.217-218, (2005)
- [13] 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, pp.135-142, (1979)
- [14] 日本建築学会(編)：建築設計資料集成一人間, 丸善, (2003)
- [15] 近田康夫, 廣岡淳：CAによる避難行動シミュレーション, 第9回設計工学に関するシンポジウム講演論文集, (2005)
- [16] 高柳英明, 佐野友紀, 渡辺仁史：群集交差流動における歩行小集団の可視化に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-2分冊, pp.389-390, (2000)
- [17] 森田孝夫, 阪田弘一, 高木真人, 山本宗：祝祭街路における群集密度と歩行特性に関する研究-神戸ルミナリエを中心として-, 日本建築学会技術報告集, 第20号, pp.307-312, (2004)
- [18] 峯岸良和, 竹市尚広, 吉田克之：マルチエージェントモデルによる大規模ホールにおける避

難性状の予測—歩行者シミュレーションシステム SimTread の実務的利用可能性の検証—, 日本建築学会技術報告集, 第 29 号, pp.227–232, (2009)

- [19] 岡田裕作, 竹内則雄: 避難時における指差誘導法及び吸着誘導法に対するシミュレーション, 法政大学情報メディア教育研究センター研究報告, pp.55–62, (2007)
- [20] 高野公男, 松島正幸, 村上處直, 中村八郎: 災害空間の考察 (大阪千日デパート火災) その 2 災害空間の構造と人間行動, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.505–506, (1972)
- [21] E.W.Dijkstra: A note on two problems in connexion with graphs, In Numerische Mathematik, pp.269–271, (1959)
- [22] MAS コミュニティ: <http://mas.kke.co.jp/>
- [23] 国土交通省ほか編: 2001 年版避難安全検証法の解説及び計算例とその解説, 井上書院, (2001)
- [24] 堀内三郎, 室崎益輝, 関沢愛, 日野宗門, 淀野誠三: 大洋デパート火災における避難行動について (その 2), 日本建築学会大会学術講演梗概, pp.575–576, (1974)